

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori

Bab ini berisi penjelasan mengenai teori-teori dasar yang mendukung penelitian berjudul “*Pengaruh Pemindahan Keypoint Recloser Petai Patah untuk Peningkatan Keandalan di Penyulang Keriau ULP Sandai.*” Landasan teori ini disusun untuk memberikan pemahaman konseptual tentang sistem distribusi tenaga listrik, peralatan proteksi seperti recloser, parameter keandalan sistem (SAIDI dan SAIFI), serta hubungan antara keandalan dengan penjualan energi listrik. Dengan adanya landasan teori ini, diharapkan pembahasan dan analisis pada bab selanjutnya memiliki dasar ilmiah yang kuat dan relevan dengan kondisi teknis di lapangan.

2.2 Sistem Distribusi Tenaga Listrik

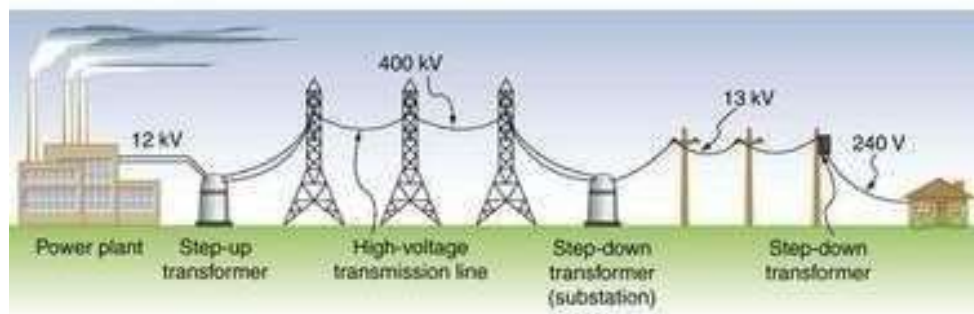
2.2.1. Pengertian Sistem Distribusi

Sistem distribusi tenaga listrik merupakan bagian akhir dari sistem tenaga listrik yang berfungsi menyalurkan energi listrik dari sistem transmisi ke konsumen akhir dengan tingkat tegangan yang lebih rendah. Tujuan utama sistem distribusi adalah menjamin penyaluran daya listrik dengan mutu yang baik, kontinuitas tinggi, serta biaya operasional yang efisien.

Secara umum, sistem distribusi menerima pasokan dari gardu induk (GI) dengan tegangan menengah 20 kV dan menyalurkannya ke gardu distribusi atau transformator distribusi yang menurunkan tegangan menjadi 400/230 V untuk keperluan pelanggan.

Selain dengan menggunakan GI ada juga sistem distribusi yang disupply oleh Pembangkit kecil yaitu pada sistem isolated. Setelah tenaga listrik disalurkan melalui saluran transmisi maka sampailah tenaga listrik ke gardu

induk untuk diturunkan tegangannya melalui transformator penurun tegangan (Transformator Step down) menjadi tegangan menengah atau biasa disebut dengan tegangan distribusi primer yang dipakai PLN adalah 20 kV. Kecenderungan saat ini menunjukkan bahwa tegangan distribusi primer yang berkembang adalah 20 kV. Jaringan setelah keluar dari gardu induk biasa disebut jaringan distribusi, sedangkan jaringan antara pusat listrik dengan gardu induk disebut jaringan transmisi. Setelah tenaga listrik disalurkan melalui jaringan distribusi primer diturunkan lagi menggunakan transformator distribusi.



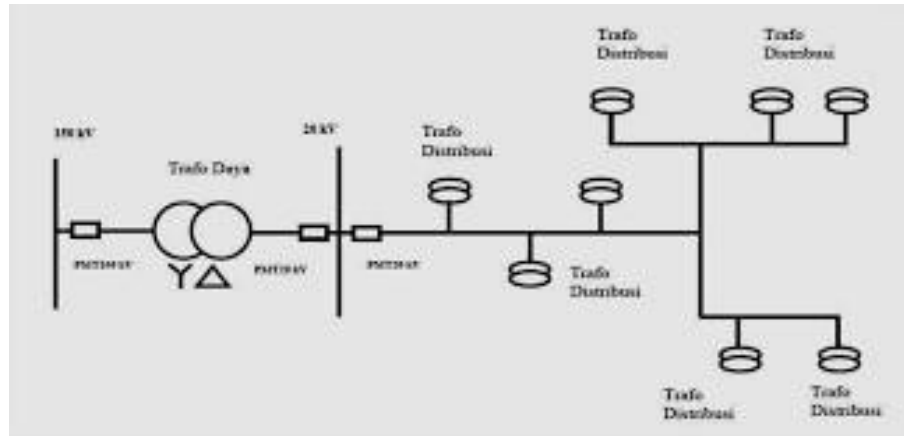
Gambar 2.2.1 Sistem Distribusi (sumber Kompas)

2.2.2 Klasifikasi Sistem Distribusi

Sistem distribusi tenaga listrik dapat diklasifikasikan menjadi beberapa jenis berdasarkan bentuk jaringannya:

1. Sistem Radial

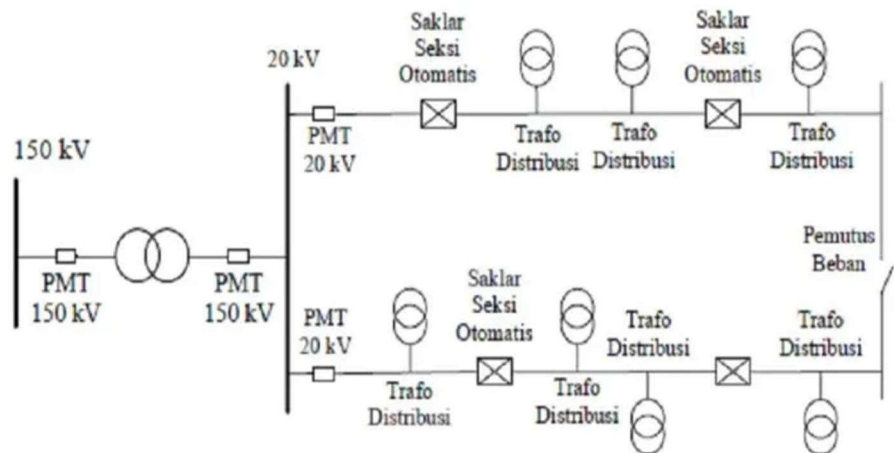
Sistem ini paling umum digunakan pada jaringan distribusi 20 kV di Indonesia. Ciri utamanya adalah setiap beban disuplai hanya dari satu sumber. Kelebihannya sederhana dan ekonomis, namun kelemahannya adalah jika terjadi gangguan pada salah satu titik, seluruh pelanggan di bawahnya akan padam.



Gambar 2.2.2.1 Sistem Distribusi Radial (Abdul Kadir, 2000)

2. Sistem Ring (Loop)

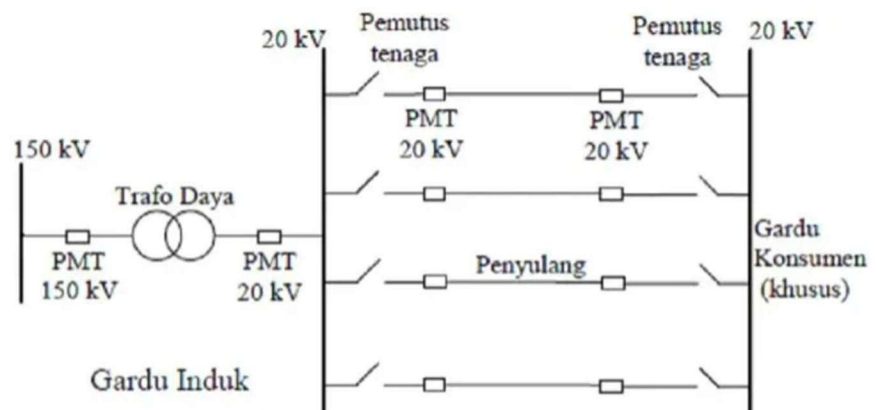
Pada sistem ini, jalur distribusi berbentuk cincin yang menghubungkan antar penyulang. Jika salah satu sisi terjadi gangguan, suplai dapat dialihkan dari sisi lainnya. Sistem ini meningkatkan keandalan namun memerlukan koordinasi proteksi yang lebih kompleks.



Gambar 2.2.2.2 Sistem Distribusi Looping (Abdul kadir, 2000)

3. Sistem Hantaran Penghubung (Tie Line)

Sistem ini pada umumnya adalah saluran distribusi yang menghubungkan antara dua atau lebih pusat beban atau sistem kelistrikan yang berbeda. Pada sistem ini kehandalan pasokan, stabilitas tegangan kirim, dan keefisienan oprasional dapat ditingkatkan. Kelebihan utama pada sistem ini adalah kehandalan yang tinggi, flesibilitas oprasi yang bagus serta stabilitas sistem yang lebih baik. Namun terdapat juga beberapa kekurangan pada sistem Tie Line ini berupa biaya investasi yang tinggi, kerumitan sistem proteksi, tingkat short sircuit lebih tinggi. Sistem distribusi ini cocok digunakan pada lokasi - lokasi yang tidak boleh mengalami padam.

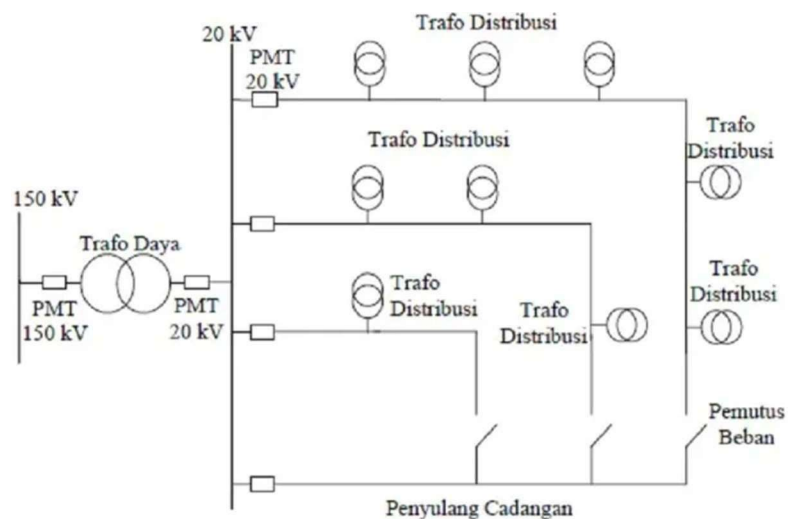


Gambar 2.2.2.3 Sistem Distribusi Looping (Abdul kadir, 2000)

Sistem ini umumnya digunakan pada kawasan industri atau perkotaan besar yang membutuhkan kontinuitas sangat tinggi. Setiap beban mendapat suplai dari lebih dari satu sumber, sehingga gangguan di satu jalur tidak menyebabkan pemadaman total.

4. Sistem Gugus atau Cluster

Pada dasarnya sistem gugus atau cluster ini banyak di gunakan pada penyulang penyulang yang memiliki beban yang tinggi. Pada sistem ini terdapat 1 penyulang cadangan dimana penyulang cadangan ini berfungsi dapat langsung memback up penyulang yang mengalami gangguan tanpa melalui Gardu hubung.

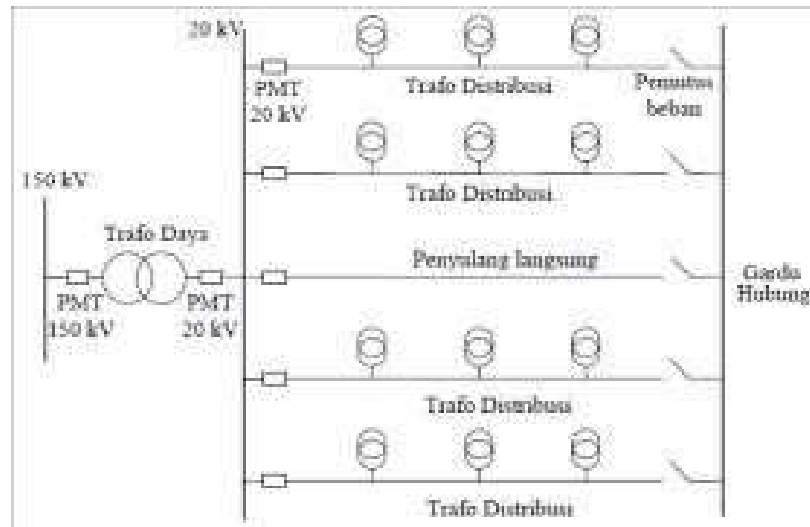


Gambar 2.2.2.4 Sistem Distribusi Tie Line (Abdul kadir, 2000)

5. Sistem Spindel

Pada sistem spindel bisa disebut sebagai sistem gabungan antara sistem radial dan looping dimana ujung - ujung penyulang radial masuk ke satu gardu hubung dan biasanya tidak lebih dari 6 penyulang. Pada sistem spindel terdapat 1 penyulang express dimana penyulang ini tidak berbeban dari GI hingga ke gardu hubung dan biasanya penyulang express ini menggunakan SKTM. Sistem ini memungkinkan manuver beban dapat dilakukan oleh masing – masing feeder yang berada pada 1 gardu hubung yang sama. Tingkat kontinuitas pada sistem ini dapat terbilang tinggi karena memiliki banyak alternatif manuver beban. Namun pada sistem ini

juga terdapat beberapa kekurangan seperti kerumitan dalam perencanaan jaringan, biaya investasi yang tinggi serta apabila terjadi gangguan pada penyulang express yang menggunakan SKTM maka penanganan gangguan akan memerlukan waktu perbaikan yang lebih lama.



Gambar 2.2.2.4 Sistem Distribusi Tie Line (Abdul kadir, 2000)

Tabel 2.1 Perbandingan Umum Klasifikasi Sistem Distribusi

Jenis Sistem	Keandalan	Biaya Investasi	Kompleksitas Proteksi	Contoh Aplikasi
Radial	Rendah	Rendah	Sederhana	Pedesaan, beban kecil
Loop	Sedang	Sedang	Menengah	Perkotaan, industri
Interkoneksi	Tinggi	Tinggi	Kompleks	CBD, bandara, RS besar
Cluster	Tinggi	Tinggi	menengah	Perkotaan industri
Spindel	sedang	Tinggi	menengah	Perkotaan, industri

2.2.3 Komponen Utama Sistem Distribusi

Komponen penting dalam sistem distribusi antara lain:

- a. Gardu Induk (GI): Menghubungkan sistem transmisi dengan sistem distribusi.
- b. Penyulang (Feeder): Saluran 20 kV yang membawa daya dari GI menuju beban.
- c. Trafo Distribusi: Menurunkan tegangan dari 20 kV ke 400/230 V.
- d. Peralatan Proteksi dan Pemutus: Seperti Recloser, Load Break Switch (LBS), Sectionalizer, dan Fuse Cut Out (FCO).

2.3 Jenis – Jenis Padam Pada Sistem Distribusi

Pada dasarnya padam di sistem distribusi dikelompokkan menjadi 2 yaitu padam karena pemeliharaan dan padam akibat terjadinya gangguan. Sumber gangguan pada jaringan tegangan menengah dapat disebabkan oleh faktor internal dan faktor eksternal. Gangguan internal bisa berasal dari komponen atau peralatan distribusi itu sendiri sedangkan faktor eksternal biasanya disebabkan oleh adanya gangguan pohon, binatang, kelalaian masyarakat bahkan sambaran petir. Berikut adalah contoh macam – macam gangguan.

2.3.1 Padam Gangguan beban Lebih

Gangguan ini sebenarnya dapat disebabkan oleh pola operasi distribusi itu sendiri dan bukan merupakan gangguan murni, namun apabila ini terus dibiarkan dan berlangsung secara terus menerus maka akan dapat merusak peralatan listrik yang dialiri oleh arus tersebut dan mempengaruhi tingkat kepuasan pelanggan pada suplai kelistrikan.

2.3.2 Padam Gangguan Hubung Singkat

Gangguan hubung singkat dapat terjadi antar fase (2 fase atau 3 fase) atau 1 fase ke tanah dan sifatnya bisa saja menjadi gangguan temporer atau gangguan permanen.

- **Gangguan Permanen**

Salah satu contoh gangguan permanen adalah gangguan hubung singkat, yang bisa terjadi pada komponen sistem disebabkan oleh adanya gangguan yang bersifat tetap pada suatu sistem. Gangguan ini tidak bisa hilang dengan sendirinya setelah dilokalisasi oleh peralatan teknik seperti recloser. Contoh umum termasuk gangguan tembusnya isolasi kabel atau komponen distribusi seperti isolator atau pun benda asing yang mempengaruhi nilai tahanan isolasi pada sistem Distribusi.



2.3.2.1 Contoh gangguan permanen

- Gangguan Temporer

Gangguan temporer pada sistem distribusi adalah gangguan hubung singkat yang bisa terjadi pada komponen sistem disebabkan oleh adanya gangguan yang bersifat sementara pada suatu sistem. Gangguan ini dapat hilang dengan sendirinya setelah dilakukan autoreclose tanpa perlu melakukan perbaikan. Namun gangguan yang sementara ini paling sering terjadi pada sistem distribusi tegangan menengah. Contoh umum termasuk gangguan lambaian dahan pohon, jatuhnya ranting, hewan, serta surja petir.



2.3.2 Contoh Potensi Gangguan Temporer

- Gangguan Tegangan (Overvoltage atau Undervoltage)

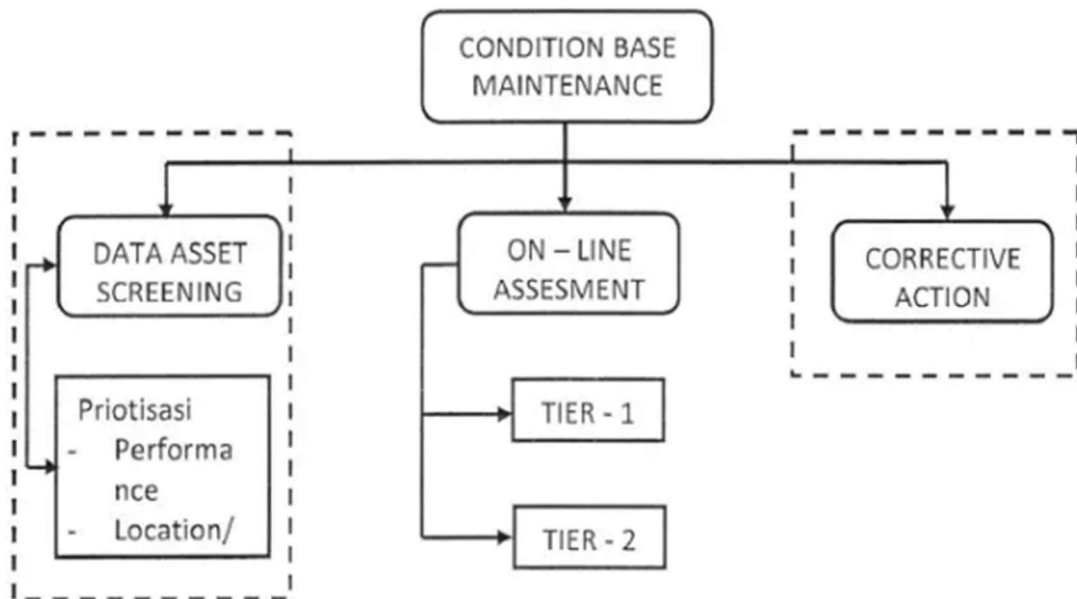
Gangguan tegangan lebih merupakan gangguan yang terjadi akibat adanya kelainan atau anomali baik pada sistem Distribusi maupun pembangkit. Pada pembangkit biasanya disebabkan adanya beban yang hilang secara tiba - tiba karena pelepasan keypoint sehingga menyebabkan adanya overspeed pada generator, tegangan lebih ini dapat juga terjadi karena adanya gangguan pada komponen pengatur tegangan Auto volateg regulator (AVR). Selain pada pembangkit dapat juga terjadi overvolatege pada sistem distribusi yang diakibatkan kerana adanya surja petir.

- **Gangguan Hilangnya Daya Pembangkit**

Hilangnya daya pembangkit dapat disebabkan karena adanya mesin yang mengalami trip bisa diakibatkan karena adanya gangguan distribusi atau gangguan pada mesin itu sendiri. Beban yang di tanggung oleh mesin lebih besar dari kesiapan atau spare dan menyebabkan turunya frekuensi (power swing) secara terus menerus sehingga sistem bisa padam total (Blackout). Tentu hal ini dapat dicegah dengan membuat skema pelepasan beban guna memperbaiki angka frekuensi atau yang biasa disebut dengan Under frekuensi Relay (UFR). Pada saat relay merasakan frekuensi turun sehingga mencapai setingannya maka relay akan memberikan perintah ke tripping coil untuk melakukan pelepasan beban guna mencegah turunnya frekuensi secara terus menerus.

2.3.3 Padam Akibat Pemeliharaan

Pemeliharaan distribusi yang rutin merupakan jenis pemeliharaan yang dilakukan secara terencana dan terus – menerus, dengan tujuan menjamin kehandalan penyaluran tenaga listrik kepada konsumen. dalam keadaan atau kondisi yang optimal . menurut Edaran Direksi nomor : 0018.E/DIR/2014 pada dasarnya kegiatan pemeliharaan SUTM dilakukan melalui beberapa tahapan yaitu screening, online assesment tier-1, online assesment tier-2 dan corrective action seperti ditunjukkan pada gambar 2.3.3.1



2.3.3.1 Strategi pemeliharaan SUTM

Tahapan online assesment tier-1 dilakukan dalam keadaan SUTM beroperasi dan ditujukan untuk melakukan pemeriksaan visual terhadap kondisi SUTM yang meliputi peralatan – peralatan kritisnya dan kebersihan ROW pada SUTM tersebut. Hasil dari assesment tier-1 ini merupakan dasar dari tindakan perbaikan. Secara umum assesment tier-1 ini dilakukan dalam periodik 3 bulan sekali.

2.3.3.1 Tabel hasil online assesment tier-1 pada SUTM

Teknik Diagnosa	Item Diagnosa	Deskripsi Kondisi Baik
Kebersihan ROW	Pohon	2.5 m dari ROW dan tidak membahayakan jaringan
	Bambu	2.5 m dari ROW dan tidak membahayakan jaringan
	Layangan	Bersih dari rangka/benang layangan
	Bangunan	2.5 m dari ROW dan tidak membahayakan jaringan
	Umbul - umbul	2.5 m dari ROW dan tidak membahayakan jaringan
Visual Equipment	Tiang	Tegak dan fisik bagus
	Kawat	Andongan normal dan tidak rantas

Teknik Diagnosa	Item Diagnosa	Deskripsi Kondisi Baik
	Arrester	Fisik dan konstruksi baik
	Grounding	Terpasang dengan baik
	Fuse Cut Out	Fisik dan konstruksi baik
	Kawat Tanah	andongan normal dan tidak rantas
	Arm-tie	Fisik dan konstruksi baik
	Travers	Fisik dan konstruksi baik
	Isolator	Fisik dan konstruksi baik
	Top-ties	Terpasang dengan baik
	Jumper	Terpasang dengan baik
	Skur/Druck	Terpasang dengan baik dan bersih dari tanaman

Tahapan Online assesment tier-2 dilakukan dalam keadaan beroperasi dan ditunjukkan untuk memeriksa kondisi komponen SUTM dengan menggunakan peralatan pendukungnya dengan menggunakan peralatan inspeksi khusus. Assesment tier-2 ini akan menghasilkan healt index dimana akan menentukan jadwal inspeksi selanjutnya. Dari hasil inspeksi tier -2 ini apabila menunjukan kondisi yagn kurang baik atau buruk maka akan dilakukan corrective action. Inspeksi tier-2 ini biasa dilakukan dengan alat bantu seperti ultrasound atau thermovision. Ketentuan berdasarkan Edaran Direksi nomor : 0018.E/DIR/2014 terkait thermovision seperti pada tabel 2.3.3.2 dan Ultrasound seperti pada tabel 2.3.3.3

2.3.3.2 Tabel Assesment tier-2 menggunakan infrared thermography

KLASIFIKASI	SUHU (°C)
BAIK	$\Delta T < 10^{\circ}\text{C}$
PERHATIAN	$10^{\circ}\text{C} \leq \Delta T < 30^{\circ}\text{C}$
BAHAYA	$30^{\circ}\text{C} \leq \Delta T < 70^{\circ}\text{C}$
DARURAT	$\Delta T \geq 70^{\circ}\text{C}$

2.3.3.3 Tabel Assesment tier-2 menggunakan ultrasound

Teknik Diagnosa	Item Diagnosa	Indikator	Kondisi			
			Baik	Cukup	Kurang	Buruk
Ultrasound Detector	Connector/ Tension Joint	Noise	Tidak Terdeteksi	Berdengung	Meletup - Letup	Bergemuruh disertai cahaya (arcing)
	Fuse Cut Out	Noise	Tidak Terdeteksi	Berdengung	Meletup - Letup	Bergemuruh disertai cahaya (arcing)
	Terminasi	Noise	Tidak Terdeteksi	Berdengung	Meletup - Letup	Bergemuruh disertai cahaya (arcing)
	Arrester	Noise	Tidak Terdeteksi	Berdengung	Meletup - Letup	Bergemuruh disertai cahaya (arcing)
	Isolator	Noise	Tidak Terdeteksi	Berdengung	Meletup - Letup	Bergemuruh disertai cahaya (arcing)

Ultrasound mengukur intensitas suara (dalam dB) untuk identifikasi pelonggaran, arcing, atau tracking: intensitas >5 dB menandakan induksi non-prioritas, sementara 0.2-5 dB memerlukan perhatian.

Pada pemeliharaan sistem distribusi dapat ditentukan sesuai dengan jenisnya :

- Pemeliharaan Korektif merupakan jenis pemeliharaan yang dilakukan dengan maksud untuk memperbaiki kerusakan atau melakukan



2.3.3 Contoh pemeliharaan Korektif

- Pemeliharaan Preventif merupakan jenis pemeliharaan yang dilakukan secara periodik dengan maksud untuk mencegah kerusakan terhadap komponen sehingga dapat menjaga keandalan, efisiensi, dan keamanan karingan, mencegah gangguan sehingga terjadi pemadaman. Adapun contoh dalam pemeliharaan preventif seperti pemeriksaan dengan infrared, pengukuran beban pada trafo, inspeksi jaringan. Titik panas dapat menyebabkan kegagalan peralatan, kebakaran sehingga menyebabkan padam jika tidak ditangani, memerlukan perbaikan secara online atau offline agar dapat menurunkan suhu secara signifikan. Inspeksi rutin thermovisi mencegah kerusakan lebih lanjut pada sistem distribusi.

- Pemeliharaan Darurat merupakan jenis pemeliharaan yang dilakukan dengan keperluan mendesak seperti perbaikan setelah jaringan distribusi ditimpa pohon atau kerusakan alam lainnya. Jenis pemeliharaan ini diperlukan agar dapat memulihkan layanan secara cepat. Adapun contoh dalam pemeliharaan ini adalah putusnya konduktor atau sambungan konduktor sehingga mengganggu supply kelistrikan.



2.3.4 Contoh jumperan putus

2.4 Peralatan Proteksi dan Pengendalian pada Sistem Distribusi

2.4.1 Fungsi Proteksi Sistem Distribusi

Proteksi bertujuan mendeteksi dan memutus bagian jaringan yang mengalami gangguan agar tidak merusak peralatan lain dan tidak menyebabkan padam luas. Sistem proteksi yang baik harus mampu bekerja cepat, selektif, dan andal. Sistem proteksi terdiri dari sensor (CT/PT), relay pengaman (OCR, OVR, ground fault relay), dan aktuator seperti circuit breaker atau recloser. Relay mendeteksi parameter abnormal (arus/tegangan

melebihi ambang), lalu memerintahkan pemutus tenaga (PMT) untuk trip dalam hitungan milidetik hingga detik. Daerah proteksi dibagi zona 1 (generator, trafo, transmisi, distribusi) dengan proteksi utama dan cadangan untuk redundansi. Adapun Jenis Proteksi Distribusi :

- Over Current Relay (OCR)

Overcurrent relay (OCR) adalah perangkat proteksi listrik otomatis yang mendeteksi arus berlebih dalam rangkaian dan memerintahkan pemutusan sirkuit untuk mencegah kerusakan peralatan. Dengan prinsip kerja mengukur arus melalui current transformer (CT), membandingkannya dengan nilai setelan (pickup current, biasanya 50-200% arus nominal). Jika arus melebihi ambang, relay mengaktifkan timer dan mengirim sinyal trip ke circuit breaker (PMT) setelah delay waktu tertentu, namun tergantung karakteristiknya.

- a) Inverse Time

Karakteristik dari relay Inverse adalah relay akan bekerja apabila arus yang mengalir pada relay tersebut melewati besarnya arus settingan (I_s) yang telah ditentukan. Serta lamanya waktu (T_s) relay yang bekerja agar dapat memberikan perintah pada tripping coil adalah tergantung pada besarnya arus gangguan yang dibaca oleh relay. Maka semakin besar arus gangguan yang dibaca oleh relay maka semakin cepat juga waktu kerja dari relay tersebut.

- b) Definite Time

Karakteristik dari relay Definite adalah relay akan bekerja apabila arus yang mengalir pada relay tersebut melewati besarnya arus setingan (I_s) yang telah ditentukan. Berbeda dengan Inverse time pada definite time waktu kerja pada relay untuk memerintahkan tripping coil akan tetap konstan, dan tidak dipengaruhi oleh besarnya arus yang mengalir pada relay tersebut.

- c) Instantaneous

Instantaneous relay, juga disebut Instantaneous Element (50 dalam ANSI code), memutus sirkuit dalam waktu sangat singkat, biasanya 10-50 ms (sering <20 ms), begitu arus gangguan mencapai ambang high-set (biasanya 5-20 kali arus nominal). Sama halnya seperti pada definite time instantaneous bekerja apabila arus yang mengalir pada relay tersebut melewati besarnya arus setingan (I_s) maka relay akan langsung memerintahkan tripping coil untuk bekerja dengan waktu yang singkat.

Tabel 2.3.1 karakteristik waktu relay

JENIS	WAKTU TRIP	HUBUNGAN DENGAN ARUS	ANSI Code	PENGAPLIKASIAN
Definite Time	Tetap (d disesuaikan, misal 0.5-5 detik) setelah pickup, independen dari besar arus.	Tidak bergantung arus (vertikal setelah delay).	51	Backup proteksi, koordinasi jarak jauh di feeder 20 kV.
Inverse Time	Berbanding terbalik dengan arus (semakin besar arus, semakin cepat trip, misal 10s di 1.5x pickup → 0.5s di 10x). Subtipe: SI, VI, EI.	Kurva melengkung ($T = K / (I^\alpha - 1)$).	51	Proteksi radial umum, overload & short circuit sedang.
Instantaneous	Langsung (0-50 ms), tanpa intentional delay.	Vertikal tepat di pickup tinggi (5-20x I_n).	50	Fault berat dekat sumber, seperti di gardu induk.

- Ground Fault Relay (GFR)

Ground Fault Relay (GFR) adalah perangkat proteksi listrik otomatis yang mendeteksi arus lebih akibat gangguan Fasa ke tanah. Sama dengan prinsip pada OCR namun pada relay GFR yang dibaca oleh relay adalah adanya arus hubung singkat pada fasa ke tanah dimana apabila besar arus gangguan tersebut telah melebihi nilai setinggan maka relay akan memerintahkan tripping coil bekerja untuk mengamankan peralatan. Pada GFR sendiri terdapat hubungan antara sistem pentanahan dan pembacaan arus gangguan itu sendiri. Adapun penjelasan singkat terkait sistem pentanahan :

- a) Solid Grounded

Solid grounded pada sistem pentanahan adalah metode dimana titik netral trafo distribusi atau generator dihubungkan langsung ke tanah melalui konduktor dengan resistansi yang sangat rendah ($R = 0-2 \Omega$), tanpa resistor atau reaktor tambahan. Pada dasarnya sistem pentanahan seperti ini mempunyai kelebihan yaitu deteksi gangguan yang cepat oleh relay (instantaneous trip $<50\text{ms}$), kurangi durasi outage dan cocok digunakan pada gardu indu dengan daya trafo yang besar. Dan memiliki kelemahan tegangan sentuh yang tinggi apabila nilai pentanahan buruk ($R = >5 \Omega$), Arus gangguan yang besar sehingga beresiko flashover.

- b) Resistor Grounded (NGR)

Resistor grounded atau NGR pada sistem pentanahan adalah metode dimana titik netral trafo dihubungkan melalui resistor dengan nilai tahanan tetap (biasanya $6 - 40 \Omega$) membatasi arus gangguan groundfault menjadi $100-400\text{A}$. Dimana keuntungan dari sistem ini adalah membatasi arus gangguan fasa tanah (I_o) menjadi $100-400 \text{ A}$ sehingga dapat mengurangi kerusakan yang terjadi dan mempunyai kelemahan biaya pengadaan NGR yang mahal serta membutuhkan perawatan yang rutin.

c) Ungrounded / Netral Mengambang

Resistor grounded atau NGR pada sistem pentanahan adalah metode dimana titik netral trafo tidak dihubungkan ke tanah, sehingga sistem “mengambang” terhadap tanah dengan kapasitansi ke tanah sebagai arus fault. Pada sistem ini memiliki kelebihan dimana kontinuitas layanan tinggi : Gangguan pertama self clearing arcing) tidak trip sistem, tidak membebani generator / trafo serta biaya yang relatif rendah dan memiliki kelemahan dapat merusak peralatan, arus gangguan yang sulit dideteksi serta bahaya pada saat melakukan pemeliharaan karena tegangan sentuh tidak terdeteksi seperti kawat putus.

- Voltage Relay

Relay tegangan (Voltage Relay) adalah perangkat proteksi otomatis yang mendeteksi anomali tegangan pada sistem distribusi listrik, seperti tegangan terlalu tinggi (overvoltage) atau terlalu rendah (undervoltage), lalu memerintahkan trip circuit breaker untuk melindungi peralatan dari kerusakan.

- Overvoltage Relay (ANSI 59): Trip saat $V > \text{setelan}$ (misal 110-130% V_{nominal} , 22-26 kV pada 20 kV).
- Undervoltage Relay (ANSI 27): Trip saat $V < \text{setelan}$ (misal 80-90% V_{nominal} , 16-18 kV).
- Voltage Supervising Relay: Monitor rentang $\pm 10-15\%$ untuk alarm saja.

Relay mengukur tegangan via Voltage Transformer (PT/VT), membandingkan dengan pickup value dan time delay. Karakteristik: definite time (delay tetap 0.5-5s) atau inverse (cepat pada deviasi ekstrem). Output trip ke PMT/recloser setelah konfirmasi, hindari false trip akibat transient.

Peralatan proteksi utama pada sistem distribusi 20 kV meliputi recloser, LBS, sectionalizer, dan fuse. Masing-masing memiliki fungsi dan karakteristik yang berbeda.

2.4.2 Recloser

Recloser adalah pemutus tenaga otomatis yang berfungsi membuka dan menutup kembali saluran listrik secara otomatis ketika terjadi gangguan sementara. Alat ini mampu melakukan beberapa kali operasi buka-tutup (reclose) sebelum akhirnya memutuskan permanen jika gangguan tidak hilang.

Kelebihan recloser dibandingkan pemutus biasa adalah kemampuannya mengurangi pemadaman akibat gangguan sementara seperti hubung singkat ke tanah yang bersifat sementara. Recloser dapat dioperasikan secara manual, otomatis, atau melalui sistem SCADA. Fungsi dari recloser sendiri adalah memisahkan daerah atau jaringan yang terganggu secara instan sehingga dapat meminimalisir jumlah pelanggan yang terdampak padam.



Gambar 2.4.2.1 Recloser Scheneider

2.4.2.1 Kegunaan recloser

Pada suatu gangguan permanen, recloser berfungsi memisahkan daerah atau jaringan yang terganggu sistemnya secara cepat sehingga dapat memperkecil daerah yang mengalami gangguan mau itu gangguan sesaat ataupun gangguan permanen. Biasanya settingan umum pada recloser untuk kerja reclose nya adalah :

a) Menutup balik seketika atau instantaneous reclosing

Membuka kontak paling cepat, biasanya setingan reclose ini digunakan pada daerah yang memiliki kebutuhan energi listrik yang terus menerus seperti pada pabrik, industri yang tidak boleh mengalami padam terlalu lama. Kerugian yang dapat dialami adalah karena waktu penutupan (reclose) yang terlalu singkat maka belum cukup waktunya untuk menghilangkan gangguan transient seperti gangguan akibat adanya cabang pohon yang mengenai konduktor, benang layang – layang, ionisasi dari bunga api yang timbul waktu gangguan dan belum hilang dalam waktu yang relatif singkat.

b) Menutup kembali dengan jeda (delay)

Pada dasarnya suatu switchgear membutuhkan waktu paling tidak 50ms untuk melakukan pelepasan dan 50ms untuk melakukan close gear. Maka dari itu jeda waktu yang cukup sangat diperlukan agar dapat menghilangkan ionisasi akibat trip pertama pada jaringan, menghilangkan pengaruh gangguan transient pada jaringan dan memberikan waktu pada switchgear untuk melakukan pelepasan dan close dengan sempurna sehingga komponen – komponen pada switchgear tersebut dapat bertahan lebih lama. Menuutup kembali dengan jeda ini biasanya diberikan waktu antara 15-60 detik. Pada saat ini recloser petai patah memiliki waktu delay reclose selama 60 detik.

2.4.2.2 Bagian - bagian recloser

Ada banyak merk *recloser* yang digunakan PT PLN (Persero). Setiap merk memiliki konstruksi berbeda, namun pada intinya prinsip kerjanya adalah sama yaitu sebagai alat pengindra arus lebih. Bagian utama pada peralatan *recloser* adalah *bushing*, *manual trip*, *arrester*, *ground stud*, dan peredam. Untuk *recloser Schneider tipe N-Series*, peredam *vacuum* diisi oleh gas SF₆ (*Sulphur Hexsflouride*).

a) Pemutus

Pemutus vakum udara pada recloser dapat memberikan fleksibilitas untuk pengoperasian trip / menutup dengan rating dan kapasitas yang ada berdasarkan gangguan yang sering terjadi. Pemutus vakum sepenuhnya disegel dan hanya membutuhkan kontak kecil. Sangat cocok untuk diaplikasikan di mekanisme penggerak magnetik dan juga pemutus vakum memiliki kemampuan beroperasi, dan sangat ideal untuk diaplikasikan di recloser itu.

b) Penggerak Magnetik

Penggerak magnetik dirancang oleh teknologi terbaru memberikan kekuatan untuk pemutus tersebut. Karena penggerak magnetik hanya mengkonsumsi daya yang rendah, operasi mengubah penggerak dapat dilakukan dengan tegangan AC 110 atau 220V dipasok dari sumber daya eksternal dan juga baterai yang terisi dengan sumber tegangan DC. Mekanisme penggerak magnet hanya memiliki satu bagian yang bergerak. Dengan demikian penurunan bagian dalam memberikan peningkatan yang sesuai dalam kehandalan. Terutama, sebagai penggerak menggunakan magnet yang menempel dan menggunakan kumparan trip dan close secara terpisah, penggerak terdiri dari komponen yang sedikit dan pemeliharaannya tidak terlalu sering. Rod adalah bahan isolasi berkekuatan tinggi dimana akan memberikan kekuatan untuk pemutus tersebut. Ketika arus pulsa yang mengalir pada kumparan close, plunger penggerak magnetik akan bergerak karena induksi gaya magnetik yang mana akan mendorong pemutus untuk posisi close, dan penggerak kemudian ditahan dalam posisi close. Sebaliknya, ketika pulsa arus mengalir ke kumparan trip, plunger melepaskan kait magnetik dan pemutus tersebut akan berpindah ke posisi trip.

c) Box Isolasi

Kerangka isolasi yang terpasang di bagian atas pagar logam memiliki ketahanan terhadap cuaca, hidrofobik. Box isolasi diproduksi dengan metode cetakan APG dengan menggunakan resin epoxy. Inti cincin CT yang ada didalam box isolasi dapat merasakan aliran arus. Dimana informasi arus ini ditransmisikan ke relay

berbasis mikro-prosesor melalui kabel multi-core. Kapasitor pembagi tegangan (CVD) yang ada di dalam box isolasi adalah untuk mengukur dan merasakan tegangan sekunder untuk sinyal penggunaan.

d) Tuas Manual trip/close

Selama ada kesalahan pada sirkuit kontrol atau perbaikan pada jalur, operator dapat langsung mengoperasikan trip/ closing/ locking recloser dengan tuas trip/ closing/ locking yang dapat beroperasi secara manual yang beradapada sisi depan boxnya. Dengan begitu dapat dioperasikan secara manual dengan COS hot stick. Operasi manual tersedia pada tuas trip. Jika tuas trip / locking berada di posisi lock, recloser tidak dapat dioperasikan oleh kontrol lokal / remote karena power penggerak mati. Dalam posisi lock ini, operator harus mendorong tuas trip / locking ke posisi trip untuk mengembalikan status lock dari recloser dan kemudian recloser dapat dioperasikan oleh kontrol lokal atau remote kembali.

e) Baterai & Charger baterai

Baterai digunakan untuk mengoperasikan komponen recloser dan rangkaian kontrol dimana baterai dan chargernya ditempatkan di bagian bawah kubikel kontrol dan dapat dengan mudah diganti. Masa pakai baterai biasanya 5 tahun, tetapi dapat diperpendek tergantung pada bagaimana baterai itu dipelihara. Baterai yang terisi penuh sudah cukup untuk 30 jam operasi tanpa sumber daya eksternal.

f) Panel Kontrol

Kubikel kontrol recloser dirancang untuk dipasang di tiang outdoor dan gardu operasi yang terbuat dari stainless steel anti-korosi. Pintu dikunci dengan tiga posisi penguncian dirancang dan disegel dengan diganti kemasan busa urhetan. Semua ventilasi dapat menyaring hama yang akan masuk dan didalam kubikel sepenuhnya ditutupi dengan bahan faming adiabatik yang akan melindungi komponen yang didalam dari variasi suhu yang ada disekitar kubikel. Kubikel kontrol yang berada diluar dilindungi dengan perisai penutup dari sinar matahari yang akan menjaga siklus kerja dari kubikel karena komponen elektronik sensitif

terhadap suhu dan baterai sangat terpengaruh pemanasan sinar matahari. Kompartemen kontrol berbasis mikroprosesor benar-benar disegel terhadap masuknya air meskipun pintu dibuka dalam kondisi hujan pada saat operasi ataupun pemeliharaan. Kondensasi di dalam kubikel dapat diharapkan untuk busa karena variasi suhu di bawah kondisi atmosfer seperti iklim tropis, namun kondensasi apapun tidak mempengaruhi komponen elektronik yang diatur sepenuhnya dengan terisolasi dan disegel baik dengan desain vented.

- g) Operation Counter Menunjukkan jumlah total trip
- h) Control fuse berfungsi memproteksi terhadap aliran baterai jika sumber rangkaian tegangan demikian rendah untuk menutup bali (recloser).
- i) Lamp Test menguji kondisi lampu dengan mengecek untuk kondisi lockout (mengunci).

Pada recloser tipe UWVE merek scneider, busur api yang ditimbulkan pada saat pelepasan maupun pemasukannya digerakan oleh selenoid closing oil yang mendapat sumber tegangan 20 kV pada sisi sumber, sedang pengendaliannya menggunakan remot melalui panel kontrol dengan tegangan 24 Volt ataupun 100 volt karena pada belakang panel terdapat 2 selektro tegangan yang bisa diatur.

2.4.2.3 Klasifikasi Recloser

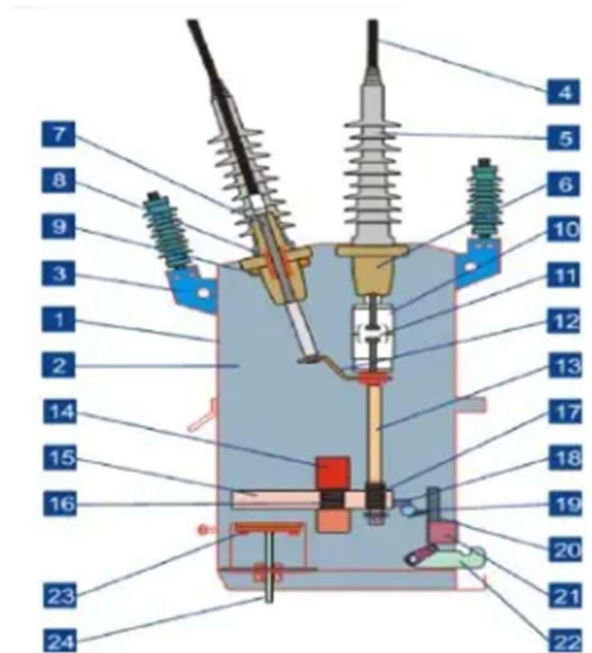
Pada umumnya recloser yang digunakan dapat di klasifikan berdasarkan :

- a. Berdasarkan jumlah fasanya
 - Fasa Tunggal
 - Fasa Tiga
- b. Berdasarkan media pemadam busur apinya :
 - Media Minyak
 - Media hampa udara (Vacum)
- c. Berdasarkan peralatan pengendalinya
 - Pengendali hidrolik
 - Pengendali elektronik

2.4.2.4 Berdasarkan jumlah Fasanya

2.4.2.4.1 Recloser satu fasa

Recloser ini memiliki karakteristik pengamanan saluran fasa. Recloser jenis ini jarang digunakan pada sistem distribusi di Indonesia karena pada sistem distribusi di Indonesia menggunakan 3 kawat fasa. Cara kerjanya adalah recloser mengamankan fasa yang memiliki beban tertinggi atau masuk ke percabangan jaringan sehingga apabila terjadi gangguan fasa tanah pada fasa yang pasang recloser tersebut maka recloser tersebut akan terbuka (lockout), sedangkan pada fasa yang lain tidak akan terganggu pengoprasiannya.



Gambar 2.4.2.4.1 recloser fasa tunggal (rilo pambudidoyo)

Keterangan gambar :

- | | |
|---------------------------|---|
| 1. Tank | 7. Central condutor |
| 2. SF6 insulating gas | 8. Capacitive voltage transformer (CVT) |
| 3. Surge Arrester bracket | 9. Current Transformer (CT) |
| 4. HV cable tail | 10. Vacuum interupter |
| 5. bushing boot | 11. Contacts |
| 6. Bushing | 12. Flexible connection |

- 13. Push rod
- 14. Close selenoid
- 15. Mechanism plate
- 16. Opening spring
- 17. Contact spring
- 18. Latch

- 19. Trip bar
- 20. Trip bar armature
- 21. Trip Sleenoid
- 22. Manual trip lever
- 23. SCEM
- 24. control Cable

2.4.2.4.2 Recloser 3 fasa

Recloser tiga fasa digunakan apabila pelepasan gangguan menetap. Keadaan untuk menghindari beban tiga fasa bekerja pada satu fasa. Dan umumnya recloser dengan tiga fasa ini digunakan pada sistem distribusi di Indonesia. Recloser ini berkerja untuk mengurangi perluasan padam akibat adanya gangguan temporer ataupun permanen.



Gambar 2.4.2.4.2 recloser 3 Fasa

2.4.2.5 Berdasarkan pemadam busur apinya

- a. Media pemutus minyak

Dalam hal ini minyak isolasi digunakan untuk meredam busur api yang berada di dalam switch gear agar tidak terjadi flashover atau kontak antara kontak dan bodi switchgear.

b. Media hampa udara (Vacum) dan Gas SF₆

Dalam hal ini pada tangki switchgear dibuat hampa udara atau bisa diberi gas SF₆ untuk meredam busur api yang berada di dalam switch gear tersebut. Saat recloser bekerja ruang hampa udara akan memutuskan arus antara elektroda, yang mencegah ionisasi gas dan memulihkan isolasi secara instan. Gas heksaflorida merupakan gas isolasi listrik yang tidak berwarna, tidak berbau, dan tidak beracun secara langsung, dengan kepadatan 5 kali lebih berat dari udara. SF₆ bersifat nonpolar dimana tidak larut didalam air, akan tetapi bisa larut dalam pelarut organik nonpolar dengan titik didih -82,5°C dan titik leleh di -108,5°C. Gas sf₆ memiliki konduktivitas termal yang tinggi dan stabilitas termal luar biasa, sehingga tidak terurai kecuali pada suhu ekstrem di atas 500°C. Namun penggunaan gas ini diatur ketat karena dampak lingkungan yang dapat terjadi sehingga dapat diganti dengan alternatif lain yaitu metode hampa udara.

2.4.2.6 Berdasarkan peralatan pengendalinya

a) Recloser pengendali hidrolik

Recloser pengendali hidrolik ini adalah jenis recloser yang menggunakan sistem hidrolik berbasis minyak isolasi untuk mengendalikan pembukaan dan penutupan kontak. Recloser jenis ini banyak ditemukan pada sistem distribusi tegangan menengah. Pada saat arus gangguan melebihi setingan maka relay akan memberikan perintah untuk menarik tuas mekanik yang memicu aliran minyak bertekanan untuk membuka kontak utama. Setelah jeda waktu tertentu pegas hidrolik akan menutup kembali kontak secara otomatis untuk siklus reclose. Adapun jenis dan pengaplikasiannya :

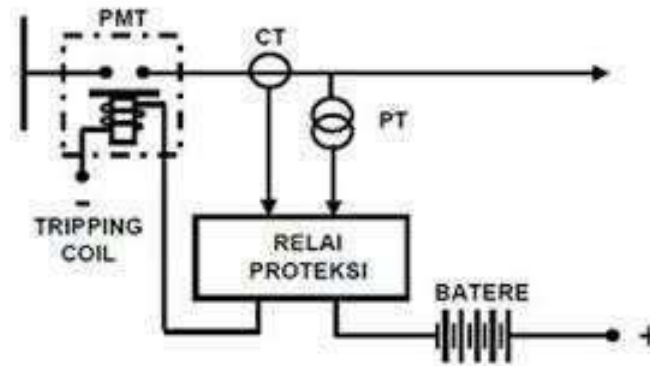
- Hidrolik tunggal : Arus masuk satu bushing, cocok untuk rating arus yang rendah
- Hidrolik ganda : Arus masuk/keluar via bushing terpisah, untuk rating arus kontinu lebih tinggi pada sistem 3-fasa.

2.4.2.7 Prinsip kerja Recloser

Ketika arus gangguan melebihi nilai setting, recloser akan membuka sirkuit untuk memutus arus. Setelah jeda waktu tertentu (reclose time), alat ini akan menutup kembali. Jika gangguan telah hilang, sistem akan kembali normal tanpa intervensi petugas. Namun jika gangguan masih ada, recloser akan membuka kembali hingga batas operasi maksimum (misalnya 3 kali), dan selanjutnya tetap terbuka untuk mengisolasi gangguan.

Cara kerja kerja recloser berdasarkan waktu dan setingan arus gangguannya, waktu membuka dan menutup pada recloser dapat diatur pada kurva karakteristiknya.

- a. Arus mengalir normal apabila tidak terjadi gangguan
- b. Ketika terjadi gangguan maka arus yang memnuhi setingan waktu recloser maka relay akan memerintahkan Switch gear untuk membuka kontak pada recloser.
- c. Kontak recloser yang telah terbuka akibat gangguan akan menutup kembali sesuai dengan setingan waktunya, dalam hal ini pada recloser petai patah maka waktu reclose adalah 60 detik.
- d. Apabila terjadi gangguan permanen maka recloser akan membuka kontak kembali dan meng lock out.
- e. Setelah gangguan diatasi maka recloser dapat dimasukan kembali dengan cara manual atau pun menggunakan remote (RTU)



Gambar 2.4.2.7.1 Wiring recloser

2.4.3 Load Break Switch (LBS)

Load Break Switch (LBS) atau saklar pemutus beban adalah peralatan switching pada sistem distribusi tegangan menengah (umumnya 20 kV) yang dirancang untuk **membuka dan menutup rangkaian dalam kondisi berbeban normal**, tetapi **tidak dirancang untuk memutus arus hubung singkat besar** seperti circuit breaker. Secara konseptual, LBS berada di antara disconnecting switch (yang hanya boleh dioperasikan tanpa beban) dan circuit breaker (yang mampu memutus arus gangguan tinggi). Posisi ini penting dalam filosofi proteksi dan operasi jaringan distribusi radial maupun ring.

Secara teknis, LBS bekerja dengan memanfaatkan mekanisme pemadam busur api (arc extinction), seperti media udara bertekanan, SF₆, vakum, atau kombinasi dengan fuse (switch-fuse unit). Ketika saklar dibuka dalam kondisi berbeban, timbul busur api akibat pemutusan arus. Desain ruang pemadam busur pada LBS membatasi durasi dan energi busur agar tidak merusak kontak. Prinsip ini konsisten dengan teori pemutusan arus AC, di mana pemadaman terjadi saat arus melewati titik nol alami (current zero). Asumsi implisitnya adalah arus yang diputus masih berada dalam rentang rating LBS; jika arus melampaui kapasitas pemutusan, risiko kegagalan meningkat secara eksponensial.

Dari sudut pandang sistem, fungsi utama LBS adalah **isolasi operasional dan manuver jaringan**, bukan proteksi utama terhadap gangguan. Dalam praktik distribusi, LBS digunakan untuk:

1. Memindahkan beban antar penyulang (load transfer).
2. Mengisolasi bagian jaringan untuk pemeliharaan.
3. Membentuk konfigurasi ring atau loop terbuka.

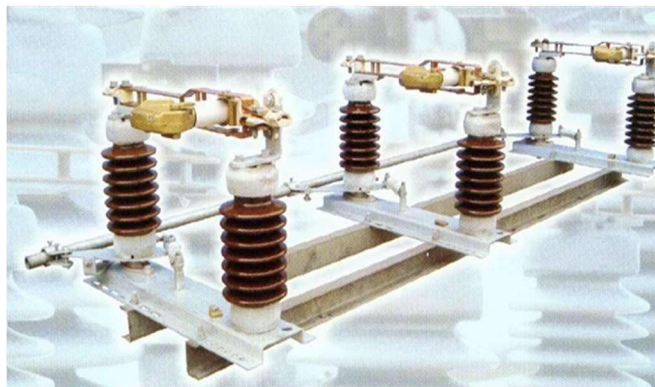
Efektivitas LBS dalam meningkatkan keandalan sistem sering dikaitkan dengan kemampuannya mempercepat restorasi suplai setelah gangguan terisolasi oleh peralatan proteksi (recloser atau circuit breaker). Namun, klaim bahwa pemasangan LBS otomatis menurunkan SAIDI atau SAIFI perlu diuji secara empiris. LBS sendiri tidak mendeteksi atau memutus gangguan; ia hanya memfasilitasi rekonfigurasi jaringan. Tanpa sistem proteksi dan koordinasi yang baik, kontribusinya terhadap indeks keandalan bisa minimal.

Dalam konteks ekonomi, LBS relatif lebih murah dibanding circuit breaker dan lebih fleksibel dibanding saklar manual konvensional. Pada jaringan dengan topologi ring terbuka, LBS memungkinkan transfer beban cepat sehingga mengurangi durasi padam. Namun, manfaat ini sangat tergantung pada keberadaan sumber suplai alternatif dan kapasitas penyulang cadangan. Jika jaringan tidak memiliki redundansi, LBS tidak dapat mengurangi durasi gangguan secara signifikan. Oleh karena itu, analisis biaya–manfaat harus mempertimbangkan struktur jaringan, kepadatan beban, serta nilai energi tak tersuplai (ENS). Dari perspektif historis, LBS berkembang seiring kebutuhan distribusi perkotaan yang semakin kompleks dan tuntutan kontinuitas suplai yang lebih tinggi. Pada sistem tradisional radial sederhana, LBS mungkin tidak memberikan manfaat signifikan. Namun, dalam sistem modern dengan konsep *smart grid*, LBS dapat diintegrasikan dengan motorized actuator dan SCADA sehingga memungkinkan pengoperasian jarak jauh dan otomatisasi restorasi. Di sini muncul dimensi sosial dan psikologis: pelanggan di wilayah urban dengan aktivitas ekonomi tinggi memiliki toleransi rendah terhadap pemadaman, sehingga investasi pada LBS bermotor dan sistem otomatisasi sering dibenarkan secara sosial meskipun biaya awal tinggi. Meski demikian, terdapat sejumlah keterbatasan dan potensi bias dalam evaluasi kinerja LBS. Pertama, peningkatan keandalan yang diamati setelah pemasangan LBS bisa

dipengaruhi oleh faktor lain seperti peningkatan pemeliharaan vegetasi atau perubahan pola beban. Kedua, pada sistem dengan penetrasi pembangkit tersebar (distributed generation), arus balik dapat memengaruhi keamanan operasi LBS, sehingga diperlukan studi koordinasi ulang. Ketiga, penggunaan media SF₆ menimbulkan isu lingkungan karena gas tersebut memiliki potensi pemanasan global tinggi; ini menjadi pertimbangan etis dan regulatif yang semakin relevan.

Secara logis, LBS paling efektif ketika digunakan sebagai bagian dari strategi proteksi dan otomasi yang terintegrasi, bukan sebagai solusi tunggal. Jika tujuan utama adalah pemutusan arus gangguan besar, maka circuit breaker lebih tepat. Jika tujuan hanya isolasi tanpa beban, disconnecting switch cukup. LBS menjadi rasional ketika sistem membutuhkan kemampuan switching berbeban dengan biaya dan kompleksitas lebih rendah dari circuit breaker.

Dengan demikian, load break switch adalah perangkat switching berbeban yang memainkan peran strategis dalam fleksibilitas operasi jaringan distribusi. Nilai tambahnya terletak pada kemampuannya mempercepat rekonfigurasi dan mendukung restorasi suplai, bukan pada fungsi proteksi gangguan. Keputusan pemasangan sebaiknya berbasis data historis gangguan, analisis ENS, studi kapasitas penyulang alternatif, serta evaluasi dampak lingkungan dan sosial. Langkah lanjut yang disarankan adalah melakukan simulasi aliran daya dan skenario kontinjensi, menghitung potensi penurunan SAIDI melalui model restorasi, serta mengevaluasi opsi teknologi (manual vs. motorized, udara vs. vakum) untuk memastikan keseimbangan antara keandalan, biaya, dan keberlanjutan lingkungan.



Gambar 2.4.3.1 Gambar Load Break Switch

2.4.4 Sectionalizer dan Fuse Cut Out

a. Sectionalizer

Sectionalizer distribusi adalah peralatan proteksi pada jaringan tegangan menengah yang berfungsi untuk mengisolasi bagian jaringan yang mengalami gangguan secara selektif. Berbeda dengan recloser yang mampu memutus arus gangguan secara langsung, sectionalizer tidak memiliki kemampuan pemutusan arus hubung singkat. Perangkat ini bekerja dengan prinsip menghitung jumlah operasi pemutus tenaga atau recloser di sisi hulu. Ketika terjadi gangguan, recloser akan membuka dan menutup kembali sesuai siklus penyambungan ulang otomatis. Sectionalizer mendeteksi hilangnya arus atau tegangan tersebut dan menghitung jumlah operasi sesuai pengaturan yang telah ditetapkan. Setelah jumlah hitungan terpenuhi dan sistem berada dalam kondisi tanpa arus, sectionalizer akan membuka untuk mengisolasi bagian jaringan yang terganggu. Dengan demikian, saat recloser menutup kembali, hanya bagian jaringan yang sehat yang kembali bertegangan.

Secara teoretis, sectionalizer dirancang untuk meningkatkan selektivitas sistem proteksi pada jaringan distribusi radial. Prinsip ini didasarkan pada konsep koordinasi proteksi berjenjang, di mana setiap peralatan proteksi memiliki zona kerja yang jelas agar gangguan tidak menyebabkan pemadaman meluas. Namun, efektivitas sectionalizer sangat bergantung pada asumsi bahwa koordinasi setting antara recloser dan sectionalizer telah dirancang secara tepat. Jika pengaturan jumlah hitungan atau waktu tunda tidak sesuai, maka perangkat dapat membuka secara tidak semestinya atau justru gagal mengisolasi gangguan. Oleh karena itu, desain dan pengaturan parameter harus didasarkan pada data historis gangguan yang memadai serta analisis karakteristik beban dan panjang jaringan.

Dalam konteks keandalan, sectionalizer berpotensi menurunkan nilai SAIFI karena jumlah pelanggan yang terdampak gangguan dapat dibatasi pada satu section tertentu. Selain itu, durasi pemadaman rata-rata pelanggan (SAIDI) juga dapat ditekan karena proses restorasi menjadi lebih cepat setelah bagian terganggu terisolasi. Dampak lanjutan dari perbaikan tersebut adalah penurunan energi tak tersuplai (ENS) yang secara ekonomi mengurangi kerugian perusahaan dan pelanggan. Meskipun demikian, klaim peningkatan keandalan harus dibuktikan secara empiris melalui perbandingan data sebelum dan sesudah

pemasangan, serta dianalisis dengan mempertimbangkan variabel lain seperti pemeliharaan jaringan, kondisi cuaca, dan perubahan konfigurasi sistem.

Dari sudut pandang ekonomi, pemasangan sectionalizer perlu dianalisis melalui pendekatan biaya–manfaat. Investasi perangkat dan biaya operasional harus sebanding dengan penurunan ENS dan peningkatan kualitas layanan. Pada wilayah dengan konsentrasi pelanggan industri atau fasilitas vital, nilai manfaat sosial dan ekonomi dari pengurangan gangguan bisa jauh lebih besar dibandingkan biaya investasinya. Sebaliknya, pada jaringan dengan tingkat gangguan rendah, manfaat yang diperoleh mungkin tidak signifikan.

Perkembangan teknologi distribusi modern juga memengaruhi peran sectionalizer. Integrasi dengan sistem SCADA dan konsep smart grid memungkinkan pemantauan dan pengendalian jarak jauh, sehingga respons terhadap gangguan menjadi lebih cepat dan terkoordinasi. Namun, meningkatnya penetrasi pembangkit tersebar dapat mengubah pola arus gangguan dan menuntut penyesuaian ulang koordinasi proteksi.

Secara keseluruhan, sectionalizer merupakan komponen penting dalam strategi peningkatan keandalan sistem distribusi, tetapi bukan solusi tunggal. Keberhasilannya sangat ditentukan oleh ketepatan perencanaan, kualitas data gangguan, dan evaluasi berkelanjutan terhadap kinerja sistem. Pendekatan yang sistematis, berbasis data, dan terbuka terhadap revisi menjadi kunci agar penggunaan sectionalizer benar-benar memberikan kontribusi nyata terhadap peningkatan keandalan penyaluran energi listrik.



Gambar 2.4.4.1 SSO (sectionalizer)

b. Fuse Cut Out (FCO)

Fuse cut out distribusi adalah peralatan proteksi arus lebih yang dipasang pada jaringan tegangan menengah, umumnya pada sistem 20 kV, untuk melindungi transformator distribusi, cabang jaringan, atau peralatan lain dari gangguan hubung singkat dan beban lebih. Secara konstruksi, fuse cut out terdiri dari tabung isolasi yang berisi elemen lebur (fuse link) dan mekanisme engsel yang akan membuka secara gravitasi ketika elemen tersebut meleleh akibat arus gangguan. Ketika arus melebihi kapasitas nominal dalam kurva karakteristik waktu–arusnya, elemen lebur akan mencair dan memutus rangkaian, sehingga bagian jaringan yang terganggu terisolasi dari sistem utama.

Secara teoretis, prinsip kerja fuse cut out didasarkan pada hukum pemanasan Joule (I^2R), di mana energi panas yang dihasilkan oleh arus berlebih akan menaikkan temperatur elemen hingga titik lebur tercapai. Karakteristik pelelehan ini dirancang mengikuti kurva waktu–arus tertentu agar tercapai koordinasi selektif dengan peralatan proteksi lain, seperti recloser atau circuit breaker. Artinya, fuse harus bekerja lebih lambat dari recloser untuk gangguan temporer namun lebih cepat untuk gangguan permanen pada sisi hilir yang dilindunginya. Asumsi penting di sini adalah bahwa data arus hubung singkat, impedansi sistem, dan karakteristik beban telah dihitung secara akurat. Jika asumsi ini keliru—misalnya karena

perubahan konfigurasi jaringan atau pertumbuhan beban—maka koordinasi proteksi dapat gagal dan menyebabkan pemadaman yang tidak selektif.

Dari perspektif keandalan, fuse cut out memiliki dua sisi. Di satu sisi, ia efektif membatasi area gangguan pada transformator distribusi sehingga tidak memengaruhi penyulang secara keseluruhan. Hal ini berpotensi menurunkan nilai SAIFI pada level sistem karena gangguan lokal tidak merambat luas. Di sisi lain, fuse cut out bersifat sekali pakai (non-reclosing), sehingga setiap operasi memerlukan intervensi manual untuk penggantian fuse link. Konsekuensinya, durasi pemadaman (SAIDI) pada pelanggan yang dilindungi bisa lebih panjang dibanding sistem yang menggunakan proteksi otomatis. Oleh karena itu, klaim bahwa fuse selalu meningkatkan keandalan perlu diuji secara kontekstual berdasarkan pola gangguan aktual dan waktu respons pemeliharaan. Secara ekonomi, fuse cut out relatif murah dibanding recloser dan tidak memerlukan sistem kontrol kompleks. Pada jaringan dengan kepadatan beban rendah dan tingkat gangguan moderat, perangkat ini sering menjadi pilihan rasional karena rasio biaya–manfaatnya menguntungkan. Namun, pada wilayah dengan pelanggan industri kritis atau fasilitas publik vital, ketergantungan pada proteksi non-otomatis dapat meningkatkan biaya sosial akibat durasi pemadaman yang lebih lama. Di sini muncul trade-off antara efisiensi investasi dan kualitas layanan.

Dalam dimensi historis, fuse cut out merupakan salah satu bentuk proteksi tertua pada sistem distribusi dan tetap digunakan luas karena kesederhanaan dan keandalannya secara mekanis. Namun, perkembangan smart grid dan penetrasi pembangkit tersebar menantang asumsi klasik proteksi satu arah. Arus gangguan dari sumber terdistribusi dapat memengaruhi selektivitas pelelehan fuse dan memerlukan studi koordinasi ulang. Tanpa penyesuaian, risiko salah operasi atau kegagalan proteksi dapat meningkat.

Secara kritis, efektivitas fuse cut out sangat bergantung pada kualitas perencanaan teknis, pemilihan rating fuse link yang tepat, serta data arus gangguan yang mutakhir. Evaluasi kinerja sebaiknya dilakukan dengan membandingkan

frekuensi dan durasi gangguan sebelum dan sesudah pemasangan, serta menganalisis dampaknya terhadap ENS dan biaya operasional. Jika data tidak tersedia atau tidak reliabel, keputusan pemasangan berisiko didasarkan pada asumsi yang lemah.

Dengan demikian, fuse cut out distribusi adalah perangkat proteksi sederhana namun strategis dalam sistem tenaga listrik. Keunggulannya terletak pada kesederhanaan, biaya rendah, dan kemampuan isolasi lokal, sedangkan keterbatasannya pada sifat non-otomatis dan potensi peningkatan durasi padam. Penggunaan yang optimal memerlukan pendekatan berbasis data, analisis koordinasi proteksi yang cermat, serta evaluasi berkala terhadap perubahan kondisi jaringan. Langkah lanjut yang disarankan meliputi audit kurva koordinasi waktu– arus, pengumpulan data gangguan minimal dua tahun, dan analisis biaya–manfaat yang mempertimbangkan nilai ekonomi serta dampak sosial pemadaman.



Gambar 2.4.4.2 Fuse Cut Out

2.4.5 SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition)

SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) adalah sistem terintegrasi berbasis komputer yang digunakan untuk memantau, mengendalikan, dan mengumpulkan data dari proses industri atau infrastruktur secara real-time melalui jaringan komunikasi. Secara teoritis, SCADA bekerja dengan menghubungkan perangkat lapangan seperti sensor, RTU (Remote Terminal Unit), atau PLC (Programmable Logic Controller) ke pusat kendali, sehingga operator dapat mengambil keputusan berbasis data aktual.

Asumsi utama di balik penerapan SCADA adalah bahwa ketersediaan data real-time akan meningkatkan efisiensi operasional, keandalan sistem, dan kecepatan respons terhadap gangguan. Namun, efektivitasnya bergantung pada kualitas komunikasi, keamanan siber, integritas data, dan kompetensi operator. Tanpa desain arsitektur yang baik dan proteksi keamanan yang memadai, SCADA justru dapat menjadi titik kerentanan sistem.

Singkatnya, SCADA adalah tulang punggung sistem kendali modern yang memungkinkan pengawasan dan pengendalian jarak jauh secara terpusat, dengan manfaat besar terhadap efisiensi dan keandalan, tetapi tetap memerlukan pengelolaan risiko teknis dan keamanan yang cermat.

Dalam Hal ini penggunaan scada pada relcoser petai patah dinilai sangat penting karena posisi recloser petai patah sendiri berada cukup jauh dari kantor ULP Sandai, sehingga apabila terjadi gangguan maka petugas tidak perlu datang ke lokasi untuk mengoprasikan Recloser Petai Patah tersebut. Adapun beberapa hal yang sangat mempengaruhi SCADA adalah :

a) Latensi

Latensi adalah jeda waktu atau keterlambatan yang terjadi antara saat suatu sinyal, perintah, atau data dikirim dari sumber hingga diterima atau diproses di tujuan, yang memengaruhi kecepatan respons dan keandalan sistem. Dalam konteks SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), latensi menjadi parameter kritis karena sistem ini mengandalkan pengiriman data sensor, status peralatan, dan perintah kontrol secara real-time

dari lapangan ke pusat kendali dan sebaliknya. Latensi yang tinggi dapat menyebabkan keterlambatan deteksi gangguan atau respons proteksi otomatis, sehingga menurunkan keandalan distribusi listrik dan memperpanjang waktu pemulihan saat terjadi gangguan. Selain itu, latensi juga memengaruhi akurasi monitoring dan pengambilan keputusan berbasis data dalam SCADA, termasuk analisis kondisi peralatan, kontrol load switching, dan rekonfigurasi jaringan. Oleh karena itu, untuk menjaga performa SCADA, latensi harus diminimalkan melalui infrastruktur komunikasi yang cepat dan andal, integrasi protokol yang efisien, serta pengaturan prioritas data yang tepat, sehingga sistem dapat mendukung operasi distribusi listrik yang aman, cepat, dan berkelanjutan.

b) Packet loss

Packet loss adalah kondisi di mana sebagian paket data yang dikirim melalui jaringan tidak sampai ke tujuan, sehingga informasi yang diterima menjadi tidak lengkap atau memerlukan pengiriman ulang. Dalam konteks SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), packet loss memiliki implikasi kritis karena sistem ini bergantung pada aliran data real-time dari sensor, Remote Terminal Unit (RTU), atau Programmable Logic Controller (PLC) ke pusat kendali, serta pengiriman perintah kontrol kembali ke lapangan.

Jika packet loss terjadi, SCADA bisa menerima informasi yang tidak lengkap atau tertunda, yang berdampak pada keterlambatan deteksi gangguan, interpretasi kondisi peralatan yang salah, dan penundaan eksekusi kontrol jaringan distribusi listrik. Hal ini menurunkan keandalan sistem dan dapat memperpanjang durasi pemadaman listrik, meningkatkan risiko kerusakan peralatan, dan menimbulkan kerugian ekonomi maupun sosial.

Oleh karena itu, mitigasi packet loss dalam SCADA memerlukan:

1. Protokol komunikasi yang andal – seperti TCP untuk data penting yang memerlukan konfirmasi penerimaan.
2. Redundansi jaringan dan jalur komunikasi – untuk memastikan data tetap tersampaikan meskipun jalur utama terganggu.

3. Monitoring kualitas jaringan secara real-time – untuk mendeteksi dan mengatasi packet loss sebelum berdampak pada operasi kritis.

Secara sistematis, pengelolaan packet loss adalah bagian dari strategi memastikan kontinuitas, akurasi, dan keandalan SCADA dalam mendukung operasi distribusi energi listrik modern.

c) Bandwidth

Bandwidth adalah kapasitas maksimum saluran komunikasi untuk mentransmisikan data dalam satuan waktu tertentu, biasanya diukur dalam bit per detik (bps), megabit per detik (Mbps), atau gigabit per detik (Gbps). Dalam konteks SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), bandwidth menentukan seberapa banyak data—termasuk sinyal sensor, status peralatan, alarm, dan perintah kontrol—dapat dikirim secara simultan antara perangkat lapangan (RTU/PLC) dan pusat kendali.

Bandwidth yang memadai sangat penting agar SCADA dapat mendukung pemantauan dan kontrol real-time, mengurangi antrean data, dan meminimalkan risiko keterlambatan atau packet loss. Namun, bandwidth tinggi saja tidak menjamin kinerja optimal; latensi yang tinggi atau packet loss yang signifikan tetap dapat menghambat respons sistem.

2.5 Keandalan Sistem Distribusi Tenaga Listrik

2.5.1 Pengertian Keandalan

Keandalan sistem distribusi menggambarkan kemampuan sistem dalam menyalurkan energi listrik secara kontinu kepada pelanggan. Semakin kecil frekuensi dan durasi gangguan, semakin andal sistem tersebut. Keandalan menjadi indikator utama dalam evaluasi kinerja unit distribusi PLN Sandai. Agar dapat menjaga kepuasan pelanggan terhadap pasokan listrik PLN.

2.5.2 Indeks Keandalan Sistem

Untuk menilai keandalan sistem, digunakan beberapa parameter kuantitatif berikut:

a. SAIFI (System Average Interruption Frequency Index)

Menunjukkan seberapa sering rata-rata pelanggan mengalami gangguan dalam satu periode. Indeks ini didefinisikan sebagai jumlah rata – rata kali padam pada pelanggan yang dilayani oleh sistem per satuan waktu. Indeks ini ditentukan dengan membagi jumlah semua padam dalam satu periode (bulan / tahun) dengan jumlah pelanggan yang dilayani oleh sistem. Persamaan untuk SAIFI (rata – rata jumlah gangguan) ini dapat dilihat pada persamaan di bawah ini.

$$SAIFI = \frac{\sum N_i}{N_T} \dots\dots\dots 2.1$$

di mana:

N_i = jumlah pelanggan yang padam akibat gangguan ke- i

N_T = total pelanggan yang dilayani

b. SAIDI (System Average Interruption Duration Index)

Mengukur rata-rata durasi gangguan yang dialami pelanggan. Indeks ini didefinisikan sebagai nilai rata – rata dari lamanya kegagalan untuk setiap konsumen selama satu periode. Indeks ini ditentukan dengan

pembagian jumlah dari lamanya kegagalan secara terus menerus untuk semua pelanggan selama periode waktu yang telah ditentukan dengan jumlah pelanggan yang dilayani oleh sistem tersebut. Persamaan untuk SAIDI (rata – rata jangka waktu gangguan pelanggan) dapat juga dilihat pada persamaan berikut.

$$SAIDI = \frac{\sum(N_i - T_i)}{N_T} \dots\dots\dots 2.2$$

di mana:

T_i = lama gangguan (jam) pada kejadian ke- i

c. CAIDI (Customer Average Interruption Duration Index)

Menggambarkan rata-rata lama padam setiap kali gangguan terjadi. CAIDI atau Customer Average Interruption Duration Index adalah indeks yang mengukur durasi rata – rata gangguan listrik bagi konsumen yang mengalami pemadaman. Indeks ini digunakan dalam evaluasi kehandalan sistem distribusi tenaga listrik. Indeks ini menilai waktu rata -rata pemulihan pasca gangguan, membantu mengidentifikasi kelemahan sistem distribusi. Nilai CAIDI rendah menunjukkan kehandalan yang tinggi. Menurut IEEE Std 1366-2023 misalnya menargetkan di bawah 1,47 jam/gangguan. Persamaan CAIDI dapat dilihat pada persamaan berikut.

$$CAIDI = \frac{SAIDI}{SAIFI} \dots\dots\dots 2.3$$

d. ENS(Energi Not Supplied)

Menunjukkan energi yang tidak tersalurkan akibat gangguan. ENS atau Energy Not Supplied / served adalah indikator yang mengukur jumlah total energi listrik yang tidak dapat disalurkan kepada pelanggan akibat gangguan atau pemadaman pada sistem. ENS digunakan untuk mengevaluasi kehandalan sistem, dimana nilai tinggi menandakan

kerugian finansial akibat adanya energi yang tidak dijual kepada pelanggan. Persamaan ENS dapat dilihat pada persamaan berikut.

$$ENS = \sum (P_i \times t_i) \dots\dots\dots 2.4$$

di mana:

P_i = daya pelanggan terdampak (kW)

t_i = lama gangguan (jam)

2.6 Analisis Gangguan pada Sistem Distribusi

2.6.1 Jenis Gangguan

Secara umum, gangguan pada sistem distribusi dibagi menjadi dua jenis:

a. Gangguan Sementara (Temporer)

Terjadi dalam waktu singkat dan dapat hilang dengan sendirinya, seperti sambaran petir, hewan, atau dahan pohon yang menyentuh konduktor. Recloser efektif mengatasi jenis gangguan ini.

b. Gangguan Permanen

Gangguan yang menyebabkan kerusakan fisik pada peralatan atau jaringan sehingga perlu listrik manual untuk pemulihan, misalnya konduktor putus atau isolator pecah.

2.6.2 Dampak Gangguan

Gangguan menyebabkan terganggunya kontinuitas suplai listrik, menurunkan indeks keandalan, meningkatkan ENS, dan pada akhirnya mengurangi volume penjualan energi. Pada sistem yang memiliki recloser dengan posisi tidak optimal, area terdampak menjadi lebih luas sehingga kerugian energi lebih besar.

2.6.3 Manuver Jaringan

Manuver jaringan dilakukan untuk meminimalkan dampak gangguan dengan cara mengalihkan suplai daya dari penyulang lain melalui LBS atau recloser yang tersedia. Tujuan utamanya adalah mempercepat pemulihan suplai dan menekan nilai SAIDI serta SAIFI. Namun untuk penyulang AR Petai patah sendiri jaringan tegangan menengahnya tidak dapat dimanuver, karena sistem jaringannya yang radial.

2.7 Analisis Teknis Pemindahan Keypoint Recloser

2.7.1 Pertimbangan Teknis

Pemindahan posisi recloser dilakukan berdasarkan analisis terhadap:

- a. Pola aliran beban pada penyulang.
- b. Letak pelanggan besar yang kritis.
- c. Frekuensi serta lokasi gangguan.
- d. Aksesibilitas lokasi dan koordinasi proteksi.

2.7.2 Dampak Pemindahan terhadap Keandalan

Dengan posisi recloser yang lebih strategis, zona padam akibat gangguan dapat dikurangi. Pelanggan pada sisi sehat jaringan tidak ikut terdampak, sehingga nilai SAIDI dan SAIFI menurun. Hal ini juga mengurangi nilai ENS, yang berarti peningkatan energi yang tersalurkan. Selain itu penekanan terhadap nilai saidi dan saifi dapat meningkatkan penjualan, pada pembahasan kali ini maka akan di batasi pada penjualan di sisi PT SSM yang menjadi pelanggan yang dilayani oleh section Recloser Petai Patah.

2.7.3 Evaluasi Operasional

Evaluasi dilakukan dengan membandingkan kondisi sebelum dan sesudah pemindahan recloser. Analisis ini dapat dilakukan menggunakan data histori gangguan dan simulasi jaringan untuk memprediksi dampak perubahan posisi terhadap indeks keandalan.

2.8 Hubungan Keandalan dengan Penjualan Energi Listrik

Kinerja keandalan jaringan berbanding lurus dengan tingkat penjualan energi listrik. Semakin tinggi keandalan, semakin sedikit energi yang tidak tersalurkan (ENS), sehingga penjualan energi meningkat.

Kerugian akibat padam listrik dapat dihitung dengan mengalikan energi tak tersalurkan dengan tarif rata-rata per kWh. Dengan demikian, setiap perbaikan yang mampu menurunkan SAIDI dan SAIFI akan memberikan nilai ekonomi langsung bagi perusahaan.

Sebagai contoh: Jika nilai ENS berkurang sebesar 500 kWh per bulan dan tarif rata-rata Rp1.400/kWh, maka peningkatan pendapatan mencapai Rp700.000 per bulan. Dalam skala tahunan dan sistem yang lebih luas, nilainya bisa sangat signifikan.