

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Distribusi Tenaga Listrik

2.1.1 Pengertian Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Sistem distribusi tenaga listrik mengacu pada salah satu bagian dari sistem tenaga listrik, mulai dari PMT yang masuk di gardu induk hingga APP (Alat Pengukur dan Pembatas) di instalasi untuk konsumen. Sistem ini mentransmisikan dan mendistribusikan tenaga listrik yang berasal dari gardu induk sebagai pusat beban kepada pelanggan secara langsung atau melalui gardu induk distribusi dengan kualitas yang memadai sesuai standar pelayanan yang berlaku. Sistem distribusi tenaga listrik secara garis besar dapat dikategorikan sebagai distribusi primer yang sering disebut sebagai Sistem Jaringan Tegangan Menengah (JTM) dan distribusi sekunder yang sering disebut sebagai Sistem Jaringan Tegangan Rendah (JTR) (Manopo et al.).

2.1.2 Jenis-Jenis Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Adapun jenis-jenis sistem distribusi tenaga Listrik terbagi ke dalam beberapa bagian yaitu:

1. **Sistem Jaringan Distribusi Primer**

Sistem jaringan distribusi primer dalam tenaga listrik adalah bagian yang menghubungkan gardu induk dengan gardu distribusi. Biasanya, jaringan ini menggunakan konfigurasi tiga fasa dengan tiga atau empat kawat. Untuk menyalurkan listrik pada jaringan distribusi primer, digunakan saluran berupa kawat udara, kabel udara, atau kabel bawah

tanah. Pilihan saluran ini disesuaikan dengan tingkat keandalan yang dibutuhkan. Jaringan distribusi primer ini membentang sepanjang wilayah yang mendapatkan pasokan listrik hingga mencapai pusat beban di bagian ujung (Muhtar et al., 2021).

Sistem jaringan distribusi primer memiliki berbagai tipe, yang masing-masing memiliki karakteristik, kelebihan, dan kekurangan yang berbeda. Pemilihan jenis sistem ini sangat bergantung pada kebutuhan serta tingkat pentingnya konsumen atau pusat beban yang dilayani (Muhtar et al., 2021).

2. Sistem Jaringan Distribusi Sekunder

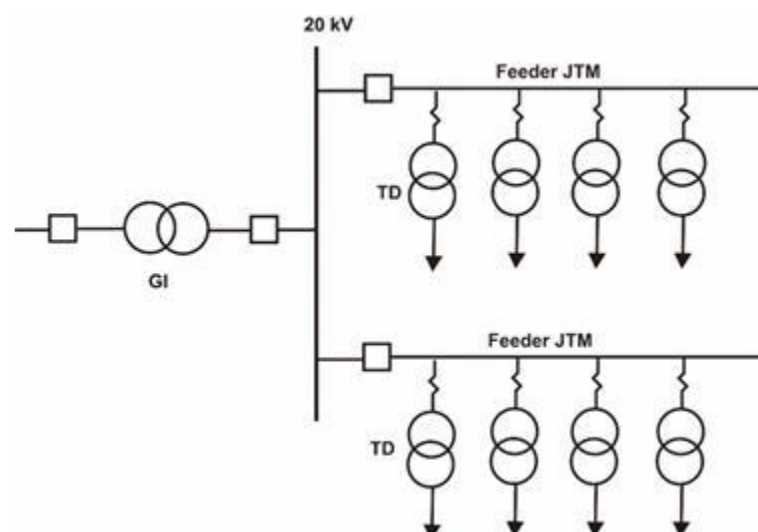
Sistem distribusi sekunder adalah bagian penting dari keseluruhan sistem distribusi listrik, yang mencakup mulai dari gardu induk dan transformator hingga sampai ke pengguna akhir atau konsumen. Karena sistem ini berhubungan langsung dengan konsumen, fungsinya tidak hanya menerima daya dari transformator distribusi, tetapi juga mengirimkan dan mendistribusikan listrik tersebut ke berbagai pelanggan. Karena dekat dengan konsumen, kualitas listrik yang disalurkan melalui sistem distribusi sekunder harus selalu dijaga dengan baik agar kebutuhan dan kepuasan pengguna dapat terpenuhi secara optimal. Hal ini menjadikan sistem distribusi sekunder sebagai jembatan utama antara pasokan listrik dan pemanfaatan sehari-hari oleh konsumen (Lumiu et al., 2022).

2.1.3 Macam-Macam Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Jaringan distribusi memiliki beberapa jenis konfigurasi yang berbeda, disesuaikan dengan cara penyusunan dan pengoperasiannya. Berikut ini adalah berbagai macam konfigurasi jaringan distribusi yang umum digunakan:

1. Sistem Radial

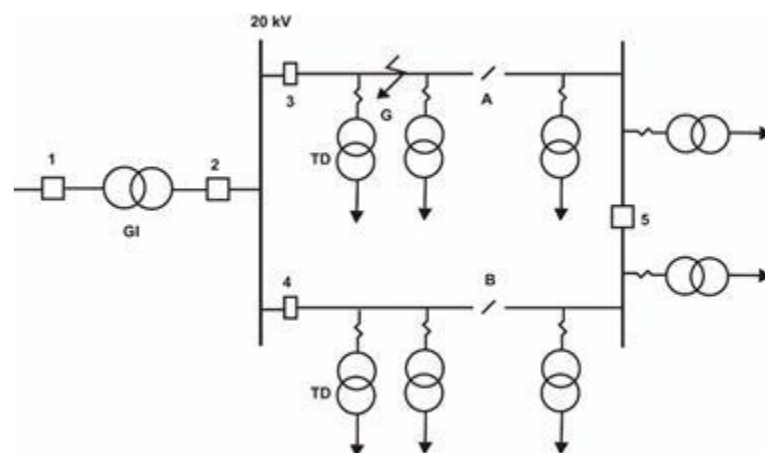
Sistem radial adalah salah satu jenis sistem jaringan yang paling sederhana, di mana beban-beban terhubung secara langsung ke satu titik sumber. Karena desainnya yang sederhana, biaya pembangunannya pun relatif lebih terjangkau dibandingkan dengan jaringan lain yang lebih kompleks. Namun, karena tidak adanya jalur pasokan alternatif, jaringan ini memiliki tingkat keandalan yang lebih rendah jika terjadi gangguan pada sumber utama. Meski begitu, jaringan radial masih memungkinkan pengaturan tegangan yang cukup baik, sehingga bisa memenuhi kebutuhan listrik secara efisien dalam kondisi normal (Gusti Pahiyanti et al., 2018).



Gambar II. 1 Konfigurasi Jaringan Radial (Gusti Pahiyanti et al., 2018)

2. Sistem *Loop*

Sistem jaringan distribusi primer tipe lingkaran (*loop/ring*) merupakan kombinasi dari dua sistem radial yang digabungkan untuk meningkatkan keandalan jaringan listrik. Dalam kondisi operasi normal, cara kerja sistem ini hampir sama dengan sistem radial karena masih menggunakan prinsip distribusi dari sumber listrik ke beban. Namun, sistem ini memiliki kelebihan karena memiliki lebih dari satu sumber dan penyulang, sehingga jika terjadi gangguan pada salah satu jalur, listrik dapat mengalir lewat jalur lain. Dengan begitu, sistem lingkaran bisa menjaga kestabilan pasokan listrik dan mengurangi risiko pemadaman, membuatnya lebih handal dibanding sistem radial biasa (Gusti Pahiyanti et al., 2018).

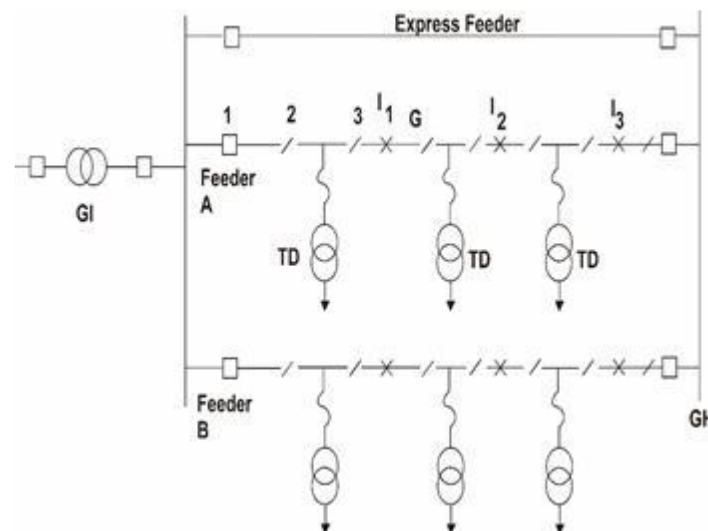


Gambar II. 2 Konfigurasi Jaringan Loop (Gusti Pahiyanti et al., 2018)

3. Sistem Spindel

Pada sistem spindel, salah satu cara untuk meningkatkan keandalan adalah dengan menghubungkan semua penyulang yang keluar dari gardu induk menuju satu titik pertemuan. Hal ini membentuk sebuah lingkaran yang terbuka pada titik tersebut. Dengan kata lain, semua

penyulang dirancang berakhir pada satu titik yang disebut titik refleksi. Dalam praktiknya, titik refleksi ini biasanya berupa gardu hubung (GH) yang berfungsi sebagai penghubung dan pengatur aliran listrik dalam jaringan (Gusti Pahiyanti et al., 2018).



Gambar II. 3 Konfigurasi Jaringan Spindel (Gusti Pahiyanti et al., 2018)

2.1.4 Gangguan Pada Sistem Distribusi

Sistem distribusi merupakan sektor infrastruktur tenaga listrik yang paling dekat dengan pengguna. Jika mempertimbangkan panjang fisik, sistem distribusi biasanya lebih luas daripada sistem transmisi, dan mengalami lebih banyak masalah, dengan laporan hingga 100 gangguan per kilometer setiap tahun. Jaringan distribusi yang sudah ada mencakup satu jaringan distribusi tegangan menengah (JTM) dan sembilan jaringan distribusi tegangan rendah (JTR). Rentang tegangan untuk jaringan distribusi tegangan menengah berada di antara 3 kV dan 20 kV. Saat ini, PLN hanya berfokus pada perluasan jaringan distribusi tegangan menengah yang beroperasi pada 20 kV. Sistem distribusi tegangan menengah terutama terdiri dari saluran udara dan kabel pembumian untuk tegangan menengah. Saat ini, gangguan yang dialami oleh saluran udara tegangan menengah berjumlah sekitar

100 kejadian untuk setiap 100 km setiap tahun. Sebagian besar masalah pada saluran udara tegangan menengah bukan disebabkan oleh petir; sebaliknya, masalah tersebut sering kali muncul akibat kontak dengan pepohonan. Hal ini khususnya berlaku di daerah perkotaan di mana gedung-gedung tinggi dan pepohonan melebihi tinggi tiang tegangan menengah. Hal ini melindungi banyak saluran udara bertekanan sedang di kota dari sambaran petir, namun banyak yang terganggu oleh pepohonan. Hanya untuk wilayah luar kota, selain gangguan dari tumbukan pohon, gangguan dari petir juga sering terjadi. Karena gangguan akibat sambaran petir atau tersambar pohon bersifat sementara, maka penggunaan *recloser* otomatis akan mengurangi waktu pemadaman listrik (*Supply Interrupting Time*).

2.1.5 Jenis-Jenis Gangguan Pada Sistem Distribusi

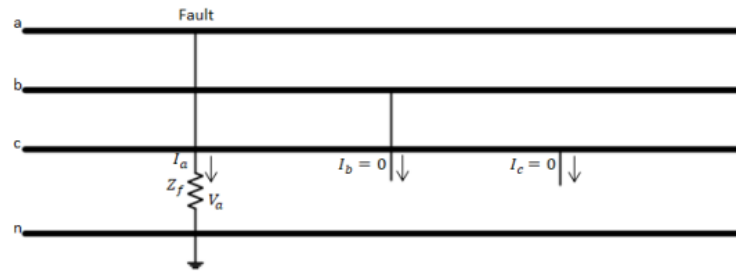
Adapun jenis gangguan yang ada pada sistem jaringan distribusi dapat dibagi ke dalam beberapa kelompok yaitu:

1. Gangguan Tak Simetris

Gangguan tak simetris terjadi pada sistem listrik karena panjang gelombang listrik yang berbeda dan sudut fasa ketiga fasa yang berbeda, yaitu 120° (Rohman Syah et al., 2021.).

Jenis gangguan tak simetris meliputi:

- Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah (*Line to Ground Fault*) yaitu meningkatnya arus fasa dengan gangguan dan tegangan menuju nol merupakan akibat adanya gangguan arus satu fasa ke tanah, sehingga kejadian ini menyebabkan arus fasa lain menjadi nol dan seiring dengan kenaikan tegangan fasa lain.



Gambar II. 4 Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah (Rohman Syah et al., 2021)

Pada gangguan hubung singkat 1 fasa tidak melalui impedansi dapat dijelaskan dengan rumus berikut:

$$I_{ao} = I_{a1} = I_{a2} = \frac{V_f}{Z_0 + Z_1 + Z_2} \quad [2.1]$$

Keterangan:

$I_{ao} = I_{a1} = I_{a2}$ = Arus gangguan (A)

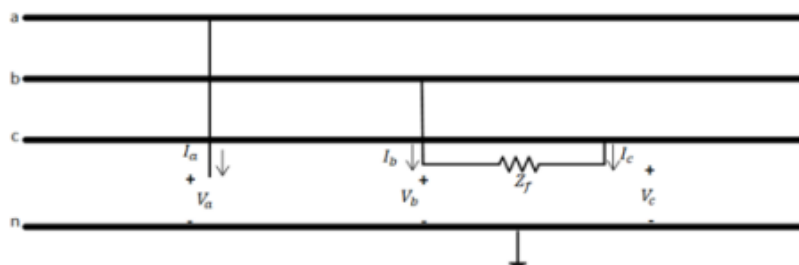
V_f = Tegangan (V)

Z_0 = Impedansi urutan nol (Ohm)

Z_1 = Impedansi urutan positif (Ohm)

Z_2 = Impedansi urutan negatif (Ohm)

- Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa (*Line to Line Fault*) yaitu Gangguan ini sering terjadi karena terputusnya kawat penghantar fasa di tengah pada distribusi dan transmisi dengan pengaturan yang disusun vertikal.



Gambar II. 5 Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa (Rohman Syah et al., 2021)

Ada kemungkinan lain penyebab gangguan ini diantaranya *back flashover* antara dua buah kawat penghantar fasa dan tiang sekaligus pada saat tiang distribusi dan transmisi memiliki tahanan kaki tiang tinggi yang tersambar petir dan kerusakan isolator dapat menjadi pemicu terjadinya gangguan ini. Jika gangguan arus tanpa melewati suatu impedansi maka persamaannya dapat dijelaskan sebagai berikut:

$$I_f = \frac{V_f}{Z_1 + Z_2} \quad [2.2]$$

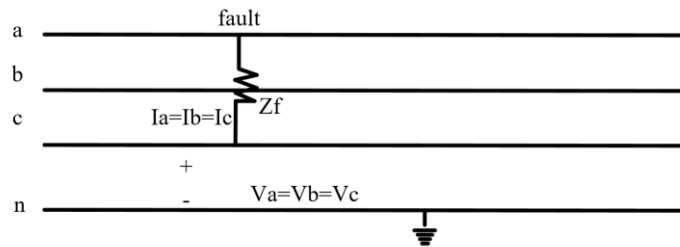
Keterangan:

I_f	=	Arus gangguan (A)
V_f	=	Tegangan (V)
Z_1	=	Impedansi urutan positif (Ohm)
Z_2	=	Impedansi urutan negatif (Ohm)

2. Gangguan Simetris

Gangguan simetris pada sistem tenaga didefinisikan sebagai gangguan tegangan lebih (*over voltage*) yang disebabkan oleh kebakaran, aliran listrik yang bergelombang atau karena kerusakan mekanik yang lain. Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa (*Three Phase Fault*) yaitu Jenis gangguan ini dikategorikan dalam kelas gangguan yang simetris, yaitu apabila terjadi gangguan maka tegangan maupun arus setiap fasanya tetap seimbang. Sehingga pada gangguan tersebut dapat dianalisis memakai komponen urutan yang positif saja. Gangguan ini merupakan

tipe gangguan yang terparah dibanding dengan gangguan arus hubung singkat yang lainnya namun gangguan ini sangat jarang sekali terjadi.



Gambar II. 6 Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa (Rohman Syah & Elektro, n.d.-b)

Rumus Gangguan hubung singkat 3 fasa adalah sebagai berikut:

$$I_f = \frac{V_f}{Z_1} \quad [2.3]$$

Keterangan:

I_f	=	Arus gangguan (A)
V_f	=	Tegangan (V)
Z_1	=	Impedansi urutan positif (Ohm)

3. Berdasarkan Lama Gangguannya

- Jika terjadi gangguan, gangguan sementara ini tidak akan berlangsung lama dan keadaan normal dapat dipulihkan. Gangguan ini dapat hilang dengan sendirinya atau dengan memutus sementara bagian yang terkena dampak dari sumber tegangan. Kemudian matikan kembali perangkat yang terhubung. Jika interferensi sementara sering terjadi, hal ini dapat menyebabkan kerusakan peralatan dan akhirnya interferensi permanen (I Gusti Putu Arka et al., 2013).

- Gangguan permanen tidak akan hilang kecuali penyebab gangguan tersebut dihilangkan terlebih dahulu. Gangguan permanen dapat disebabkan oleh kerusakan pada peralatan, sehingga gangguan ini baru hilang setelah kerusakan tersebut diperbaiki atau karena adanya gangguan permanen. Untuk melepaskannya, perlu dilakukan tindakan perbaikan atau penyebab gangguan tersebut perlu dihilangkan (I Gusti Putu Arka et al., 2013).

2.1.6 Sistem Proteksi

Sistem proteksi adalah seperangkat perlengkapan keselamatan yang lengkap, meliputi perangkat utama dan perangkat tambahan yang diperlukan untuk menjalankan fungsi proteksi. Faktor alam, kelalaian manusia, atau kerusakan peralatan dapat menyebabkan masalah pada sistem distribusi. Gangguan pada jaringan tenaga listrik dapat diklasifikasikan ke dalam dua kategori: gangguan jangka pendek yang dapat teratasi dengan sendirinya atau dengan memutuskan sebagian sumber tegangan yang terpengaruh, dan gangguan jangka panjang yang memerlukan intervensi untuk mengatasi penyebab yang mendasarinya (Ir Hardiansyah et al., 2019).

2.1.7 Tujuan Sistem Proteksi

Hampir semua gangguan pada jaringan distribusi daya disebabkan oleh korsleting, yang menghasilkan arus listrik yang signifikan. Seiring dengan semakin rumitnya sistem, kemungkinan terjadinya gangguan pun meningkat. Jika arus gangguan tidak segera diatasi, hal itu dapat merusak peralatan. Sistem pengaman sangat penting untuk mengisolasi area yang terdampak. Mekanisme pengaman ini

dirancang untuk memutus bagian yang bermasalah dan menghentikan aliran arus gangguan (Nasrul, 2017).

Tujuan utama dari sistem proteksi adalah:

- Untuk mencegah atau mengurangi kerusakan yang disebabkan oleh gangguan pada peralatan yang terpengaruh atau yang dilalui arus gangguan.
- Untuk menentukan area yang terkena dampak sehingga dapat dibatasi semaksimal mungkin.
- Untuk menyediakan layanan listrik yang sangat andal bagi pengguna sambil meminimalkan risiko individu.

2.1.8 Syarat Sistem Proteksi

Sistem proteksi harus memiliki kriteria yang diperlukan agar dapat berfungsi secara efektif sebagai mekanisme pengamanan untuk sistem distribusi tenaga listrik. Setiap perangkat proteksi memang memiliki standar khusus yang harus dipenuhi untuk memastikan keamanan peralatan yang dirancang untuk dilindunginya. Berikut ini adalah deskripsi beberapa kriteria untuk suatu sistem proteksi, sebagaimana diuraikan di bawah ini: (Taufiq, 2020)

1. Kepekaan (*Sensitivity*)

Jika relay dapat menangani masukan (input) kecil, maka dianggap peka. Oleh karena itu, relay dapat berfungsi pada awal gangguan. Secara teori, mekanisme pengamanan harus mampu mengidentifikasi gangguan dengan jumlah stimulus minimum dari sumber gangguan. Misalnya, hubungan pendek fasa-tanah terjadi ketika kabel putus dan

bersentuhan dengan pohon atau bangunan. Karena pohon dan bangunan memiliki resistansi tinggi, relay kecil hanya dapat mendeteksi arus gangguan satu fasa-tanah.

2. Keandalan (*Reliability*)

Biasanya, relay dapat berfungsi tanpa masalah selama berbulan-bulan atau bahkan bertahun-tahun, asalkan tidak ada gangguan. Namun, bila terjadi gangguan, relay harus beroperasi secara efektif selama waktu tersebut untuk menjaga peralatan distribusi. Jika hal ini tidak dilakukan, pemadaman listrik dapat meluas. Keandalan sangat penting tidak hanya untuk relai, tetapi juga untuk berbagai komponen perangkat proteksi. Selain itu, keandalan sistem proteksi harus dipertahankan sejak konfigurasi awalnya selama mungkin.

3. Selektifitas (*Selectivity*)

Relay proteksi bertanggung jawab untuk menjaga perangkat atau segmen sistem tenaga listrik dalam parameter keselamatan yang ditentukan. Diposisikan pada pemutus tenaga (PMT) sedemikian rupa sehingga memungkinkan pemisahan setiap komponen sistem, peran relai mencakup pendeteksian setiap gangguan yang timbul dalam zona aman. Setelah mengidentifikasi kejadian seperti itu, ia memerintahkan PMT untuk membuka, mengisolasi bagian sistem yang terkena dampak. Hal ini memastikan bahwa bagian lain yang tidak terpengaruh dapat terus berfungsi secara normal. Pencapaian ini mengarah pada keamanan selektif. Selain itu, sistem proteksi dapat membedakan apakah gangguan berasal dari area keamanan primer atau area keamanan

cadangan, dan sistem harus merespons secara instan atau setelah penundaan waktu yang telah ditentukan.

4. Kecepatan (*Speed*)

Untuk mengurangi dampak gangguan, sangat penting untuk segera memisahkan komponen-komponen yang terpengaruh, yang berarti bahwa perangkat perlindungan juga harus beroperasi dengan cepat untuk melepaskan komponen-komponen yang terganggu. Menunggu untuk menggunakan alat pelindung dapat membahayakan sistem atau peralatan akibat tekanan panas yang berlebihan. Terkadang, diperlukan penundaan waktu untuk menghasilkan selektivitas yang diinginkan. Namun di sisi lain, waktu pengoperasian relay harus cepat. Hal ini menciptakan selektivitas yang baik dan waktu pengoperasian relai yang lebih cepat.

2.1.9 Relay Proteksi

Relay proteksi adalah suatu alat yang dirancang untuk merasakan atau mendeteksi, mengukur gangguan dan mulai merasakan kelainan pada peralatan listrik dan segera membuka pemutus arus listrik secara otomatis untuk mengisolasi peralatan atau bagian sistem yang terganggu dan mengirimkan sinyal dalam sistem. Fungsi bel atau lampu relay pada sistem tenaga listrik adalah sebagai berikut (Dermawan et al., 2017):

- Merasakan, mengukur, dan mengidentifikasi komponen sistem yang terganggu, dan segera menyingkirkannya agar sistem lainnya yang tidak terganggu dapat beroperasi secara normal.
- Mencegah kerusakan yang lebih parah pada peralatan yang rusak.

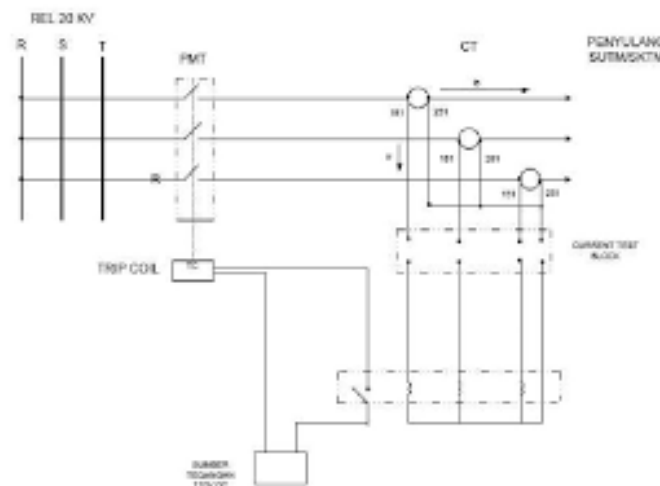
- Mengurangi dampak gangguan pada bagian sistem yang lain yang tidak terganggu dan mencegah penyebaran gangguan dan mengurangi risiko bagi manusia.

2.1.10 Jenis-Jenis Relay Proteksi

Adapun jenis-jenis relay proteksi terbagi ke dalam beberapa jenis yaitu:

1. OCR (*Over Current Relay*)

Relay arus lebih, juga dikenal sebagai OCR (*Overcurrent Relay*), digunakan hampir di semua pola pengamanan sistem tenaga listrik. Mereka menunjukkan adanya arus lebih yang disebabkan oleh gangguan hubung singkat atau *overload* yang dapat merusak peralatan sistem tenaga yang berada dalam wilayah proteksi mereka. Relay arus lebih juga dapat digunakan sebagai pengaman utama atau pengaman cadangan (Yuli Kustanto et al., 2014).



Gambar II. 7 Rangkaian Pengawatan OCR (Yuli Kustanto et al., 2014)

Arus setting untuk relay OCR baik pada sisi primer maupun pada sisi sekunder transformator tenaga adalah:

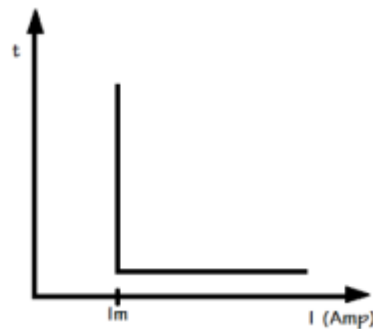
$$I_{set}(prim) = 1,05 \times I_{nom} \quad [2.4]$$

Nilai tersebut adalah nilai primer, untuk mendapatkan nilai setelan sekunder yang dapat di setkan pada relay OCR, maka harus dihitung dengan menggunakan ratio trafo (CT) yang terpasang pada sisi primer maupun sisi sekunder transformator tenaga.

$$I_{set}(sek) = I_{set}(prim) \times \frac{1}{Ratio\ CT} \quad [2.5]$$

Relay OCR dibagi ke dalam beberapa karakteristik waktu yaitu:

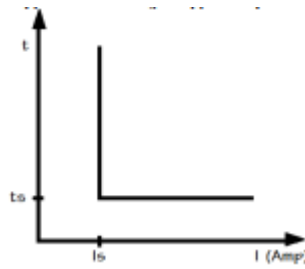
- Relay arus lebih sesaat (*Instantaneous*) adalah relay arus lebih yang tidak mempunyai waktu tunda/waktu kerja sesaat, untuk waktu kerjanya (20-100 ms).



Gambar II. 8 Relay Arus Lebih Sesaat (*Instantaneous*)

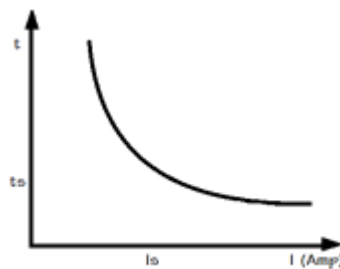
(Yuli Kustanto et al., 2014)

- Relay arus lebih definite (*Definite time*) adalah relay di mana waktu tundanya tetap tidak terpengaruh oleh arus gangguan. Jika arus gangguan lebih besar dari arus settingnya, berapapun besarnya arus gangguan relay, relay akan bekerja dengan waktu yang tetap.



Gambar II. 9 Relay Arus Lebih Definite (*definite time*) (Yuli Kustanto et al., 2014)

- Relay arus lebih pembalik (*inverse time*) merupakan relay yang waktu tundanya mempunyai karakteristik yang bergantung pada besarnya arus gangguan. Oleh karena itu, semakin besar arus gangguan maka waktu kerja rele semakin cepat, dan arus gangguan berbanding terbalik dengan waktu kerja relay.

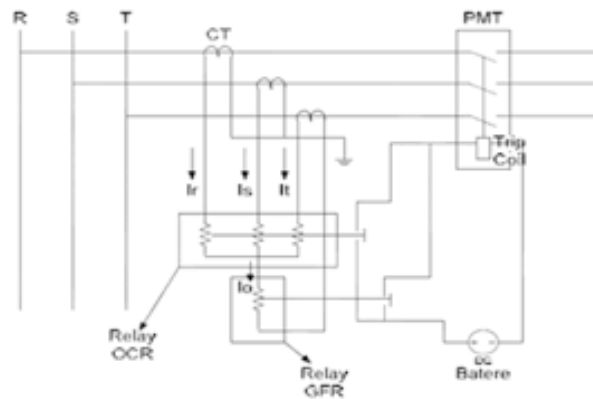


Gambar II. 10 Relay Arus Lebih Inverse (*Inverse Time*) (Yuli Kustanto et al., 2014)

2. GFR (*Ground Fault Relay*)

Ground Fault Relay (GFR) adalah relay yang beroperasi berdasarkan kenaikan arus melebihi nilai pengaturan pengaman tertentu. Jika terjadi hubung singkat fasa ke tanah, maka relai tersebut beroperasi dalam jangka waktu tertentu. Relay gangguan tanah hanya efektif jika netral dibumikan secara langsung atau dengan resistansi rendah. Ada dua jenis grounding resistansi: grounding resistansi tinggi dan grounding

resistansi rendah. Kedua jenis grounding ini dirancang untuk membatasi tegangan lebih agar tidak melebihi batas tegangan normal (Yuli Kustanto et al., 2014.).



Gambar II. 11 Rangkaian Pengawatan GFR (Yuli Kustanto et al., 2014)

Arus setting untuk relay GFR baik pada sisi primer maupun pada sisi sekunder transformator tenaga adalah:

$$I_{set} \text{ (Prim)} = 10\% \times I_{nom} \text{ trafo} \quad [2.6]$$

Untuk menghitung setting arus untuk sisi sekunder yaitu:

$$I_{set} \text{ (sek)} = I_{set} \times \frac{1}{\text{Ratio CT}} \quad [2.7]$$

2.1.11 Manuver Jaringan

Manuver jaringan adalah kegiatan membuat modifikasi terhadap operasi normal dari jaringan akibat adanya gangguan/pekerjaan jaringan sehingga tetap tercapainya kondisi penyaluran tenaga listrik yang maksimal. Untuk melakukan manuver jaringan diperlukan peralatan pemisah dan penghubung (*switching*) antar penyulang. Peralatan yang berfungsi sebagai saklar (*switching*) ini berupa ABSw (*Air Break Switch*) atau LBS (*Load Break Switch*). Dengan mengoperasikan ABSw NO (*Normaly Open*) atau LBS NO, konfigurasi penyulang yang semula *Radial*

akan berubah menjadi *Loop*. Sedangkan ABSw NC (*Normaly Close*) atau LBS NC berfungsi untuk memisahkan beban ke dalam suatu jarak tertentu (*section*). Tujuannya untuk mempermudah melokalisir apabila terjadi gangguan, sehingga tidak meluas ke jaringan yang dibelakangnya (Maxi Ali Sobikin et al, 2022).

Manuver jaringan merupakan bagian penting dalam pengelolaan sistem distribusi tenaga listrik yang menuntut operator untuk mengambil tindakan cepat dan tepat. Karena peranannya yang krusial, operator harus bisa mengatur manuver dengan cermat agar sistem tetap stabil dan berfungsi dengan baik. Salah satu aspek yang perlu diperhatikan adalah koordinasi relay antar penyulang, yang sangat berperan dalam menjaga kelangsungan pasokan listrik, terutama saat terjadi gangguan atau perpindahan beban. Pada saat manuver jaringan, seperti saat beban dipindahkan dari satu penyulang ke penyulang lain, sering terjadi overlapping arus dan perubahan waktu kerja relay yang berpotensi menyebabkan proteksi bekerja tidak sesuai. Maka dari itu, evaluasi dan penyetelan ulang relay serta recloser menjadi hal yang wajib dilakukan, dengan mempertimbangkan arus beban maksimum dalam kondisi manuver. Penyetelan ini bertujuan menghindari overlapping serta menjaga waktu kerja relay agar tetap lebih lama, tanpa melanggar standar proteksi. Dengan cara ini, sistem distribusi dapat tetap aman dan andal meskipun manuver jaringan berlangsung (Jonatan Martino Windi Saputro et al, 2018).

2.1.12 Peralatan Manuver jaringan

Dalam usaha menjaga kontinuitas pelayanan penyaluran tenaga listrik, maka dilakukan manuver jaringan distribusi untuk mengurangi area padam yang dialami pelanggan atau konsumen. Untuk pelaksanaan manuver jaringan distribusi

maka jaringan distribusi harus berbentuk minimal terhubung *loop* dengan jaringan yang lain serta memiliki sumber transformator yang berbeda dengan jaringan yang akan digunakan untuk manuver jaringan. Untuk menghubungkan jaringan satu dengan yang lainnya dapat digunakan beberapa peralatan saklar penghubung atau *switching*, adapun saklar penghubung atau *switching* yang digunakan dalam manuver jaringan distribusi yakni:

1. PMT (Pemutus Tenaga)

Pemutus tenaga dengan rating tegangan diatas 10 kV dapat diklasifikasikan di dalam pemutus daya tegangan menengah. Pemakaian pemutus tenaga *circuit breaker* (CB) ditempatkan pada saluran transmisi, sistem distribusi, dan gardu induk (Janter Napitupulu et al., 2019).



Gambar II. 12 PMT (Pemutus Tenaga) (Janter Napitupulu et al., 2019)

Pemutus tenaga berfungsi sebagai penghubung dan pemisah jaringan apabila terjadi hubung singkat untuk melindungi sistem distribusi. Di dalam penggunaanya suatu pemutus tenaga harus memenuhi persyaratan-persyaratan sebagai berikut:

- Harus mempunyai kesanggupan memutuskan daya (*KVA Breaking Capacitance*).
- Waktu pemutus daya sesingkat mungkin.
- Harus mempunyai keandalan dalam pelayanan beban.

- Bentuk yang sederhana mudah bekerja dan mempunyai ukuran yang simpel di samping berat yang tidak mempengaruhi keandalan.

Menurut cara pemadaman api dan mediun yang dipergunakan dalam pemutus tenaga dapat diklasifikasikan:

- a. Pemutus tenaga dengan minyak volume besar (*Bulk Oil Circuit Breaker*)

Penggunaan pemutusan tenaga yang banyak minyak sangat luas pemakaiannya. Akan tetapi keperluan dari pemutusan ini tidak menguntungkan didalam pusat-pusat tenaga listrik modern. Pemutusan tenaga dengan banyak minyak mempunyai beberapa buah tangki yang terpisah untuk tegangan mulai dari 72,5 kV keatas dan untuk tegangan 36 kV ke bawah menggunakan sebuah tangki.

- b. Pemutus tenaga dengan minyak kecil (*Low Oil Circuit Breaker*)

Pada umumnya pemutus tenaga dengan sedikit minyak ini arus terjadi pada ruangan pemutus. Pelindung dari pemutus ini terbuat dari material pemisah seperti porselin. Penggunaan media minyak pada pemutus tenaga ini bertujuan sebagai pemisah dan penggunaannya sangat sesuai dengan media pemadam busur api.

Dielektric oil pada pemutus daya digunakan sebagai media pemadam busur api pemisah kontak tersebut didalam tangki minyak yang berisi dengan *dielectric oil*. Busur api yang terjadi mengakibatkan kerusakan pada media minyak tersebut.

Fungsi minyak pada kedua pemutus tenaga diatas adalah:

- Untuk memadamkan busur api sewaktu membuka kontak (*switch*) dengan bebas.
- Untuk menisolasi bagian-bagian yang dilalui arus.

2. LBS (*Load Break Switch*)

Load Break Switch (LBS) merupakan suatu alat pemutus atau penyambung sirkuit pada sistem distribusi listrik dalam keadaan berbeban. LBS mirip dengan alat pemutus tenaga (PMT) atau *Circuit Breaker* (CB) dan biasanya dipasang dalam saluran distribusi listrik. LBS digunakan untuk pemutusan lokal apabila terjadi gangguan atau ingin dilakukan perawatan jaringan distribusi pada daerah tertentu sehingga daerah yang tidak mengalami gangguan atau perawatan tidak mengalami pemadaman listrik.



Gambar II. 13 LBS (*Load Break Switch*) (Sukadana & Suartika, 2019)

Seiring perkembangan teknologi fungsi koordinasi LBS dan *recloser* serta fungsi sebagai sakelar seksi otomatis (*sectionalizer*) yang memungkinkan untuk mengisolasi segmen jaringan yang terganggu sementara itu pelayanan pada segmen jaringan yang tidak terganggu dipulihkan secara otomatis dengan memanfaatkan fungsi peralatan control RTU yang menyalurkan, menyambung dan memutus beban

secara elektromekanis (*motorized*) di jaringan listrik tegangan menengah (Sukadana et al., 2019).

3. DS (*Disconnecting Switch*)

Disconnecting Switch adalah salah satu peralatan sistem tenaga listrik yang dapat digunakan sebagai saklar pemisah rangkaian listrik dalam keadaan tanpa beban. *Disconnecting Switch* dijalankan Ketika akan dilakukan *maintenance* untuk melihat tegangan pada rangkaian agar lebih *safety* dari sisa-sisa tegangan yang timbul akibat terjadi pemutusan.



Gambar II. 14 *Disconnecting Switch* (Annisa & Mardiansah, 2023)

Posisi *switchyard Disconnecting Switch* 150 kV dalam instalasi akan lebih bagus Ketika dijalankan dalam jarak yang cukup jauh, hal ini dilakukan dengan panel kontrol dan dioperasikan menggunakan remote sehingga lebih efektif dan efisien dari segi keamanan operator gardu induk dalam mengoperasikan *Disconnecting Switch* (Annisa et al., 2023).

Disconnecting Switch juga dapat berfungsi memperlihatkan secara visual bahwa suatu alat listrik sudah bebas dari tegangan kerja. Oleh karena itu *Disconnecting Switch* tidak dapat dikeluarkan atau dimasukkan pada rangkaian listrik berbeban. Hal ini dikarenakan untuk menjamin error urutan operasi tidak terjadi, maka harus ada keadaan saling mengunci

(*interlock*) antara *Disconnecting Switch* dengan pemutus bebannya. Dengan terpasang *interlock* maka kemungkinan kesalahan operasi bisa dihindari (Annisa et al., 2023).

Disconnecting Switch mempunyai dua fungsi utama yaitu:

- Pemisah Peralatan berfungsi untuk memisahkan peralatan listrik dari peralatan lain atau instalasi lain yang bertegangan. *Disconnecting Switch* ini dapat dibuka atau ditutup hanya pada rangkaian jaringan yang tidak berbeban.
- Pemisah Tanah (Pisau Pentanahan/Pembumian) berfungsi untuk mengamankan dari arus tegangan yang timbul sesudah saluran tegangan tinggi diputuskan atau induksi tegangan dari penghantar atau kabel lainnya. Hal ini perlu untuk keamanan bagi orang-orang yang bekerja pada peralatan instalasi.

4. ABSw (*Air Break Switch*)

Air Break Switch (ABSw) merupakan peralatan hubung yang berfungsi sebagai pemisah dan biasa dipasang pada jaringan luar.



Gambar II. 15 ABSw (*Air Break Switch*) ((Ari Juliasandi et al, 2019)

Penggunaan ABSw pada jaringan, antara lain digunakan untuk pelimpahan/penambahan dan pengurangan beban antar dua penyulang atau *feeder*, untuk penyambungan jaringan antar dua penyulang atau *feeder*, dan untuk pemisah jaringan secara manual baik dalam keadaan berbeban maupun tanpa beban dengan media pemutus udara dan alat ini dapat dioperasikan dalam keadaan terbuka (*normally open*) atau tertutup (*normally close*) sesuai dengan keperluan dengan prosedur PDKB (Pekerjaan Dalam Keadaan Bertegangan) (Ari Juliasandi et al, 2019).

5. *Recloser*

Recloser atau penutup balik otomatis merupakan suatu peralatan pengaman dalam sistem distem distribusi tenaga Listrik yang memiliki fungsi untuk memutuskan saluran secara otomatis Ketika terjadi gangguan dan akan segera menutup kembali beberapa waktu kemudian sesuai dengan setting waktunya.



Gambar II. 16 *Recloser* (Gede Wiyoga Putra et al., 2020)

Pada suatu gangguan permanen, *recloser* berfungsi memisahkan daerah atau jaringan yang terganggu sistemnya secara cepat sehingga dapat memperkecil daerah yang terganggu pada gangguan sesaat. *Recloser* akan memisahkan daerah gangguan sesaat sampai gangguan tersebut

akan dianggap hilang, dengan demikian *recloser* akan masuk kembali sesuai settingannya sehingga jaringan aktif kembali secara otomatis (Gede Wiyoga Putra et al., 2020).

Secara garis besar cara kerja *recloser* adalah sebagai berikut:

- Saat kondisi tidak terjadi gangguan arus mengalir secara normal.
- Ketika terjadi gangguan, maka *recloser* akan beroperasi secara cepat memutus arus gangguan.
- *Recloser* akan menutup kembali setelah beberapa detik, sesuai dengan *setting* yang telah ditentukan. Dengan memberikan selang waktu beberapa detik merupakan cara untuk memberikan kesempatan kepada sistem agar gangguan hilang dari sistem, terutama untuk gangguan temporer.
- Jika terjadi gangguan permanen, maka *recloser* akan membuka dan menutup balik sesuai dengan *setting* yang telah ditentukan dan *recloser* akan *lock out*. (*permanently open*).
- Setelah gangguan permanen berhasil dibebaskan oleh petugas lapangan, baru *recloser* dapat dikembalikan ke kondisi normal.

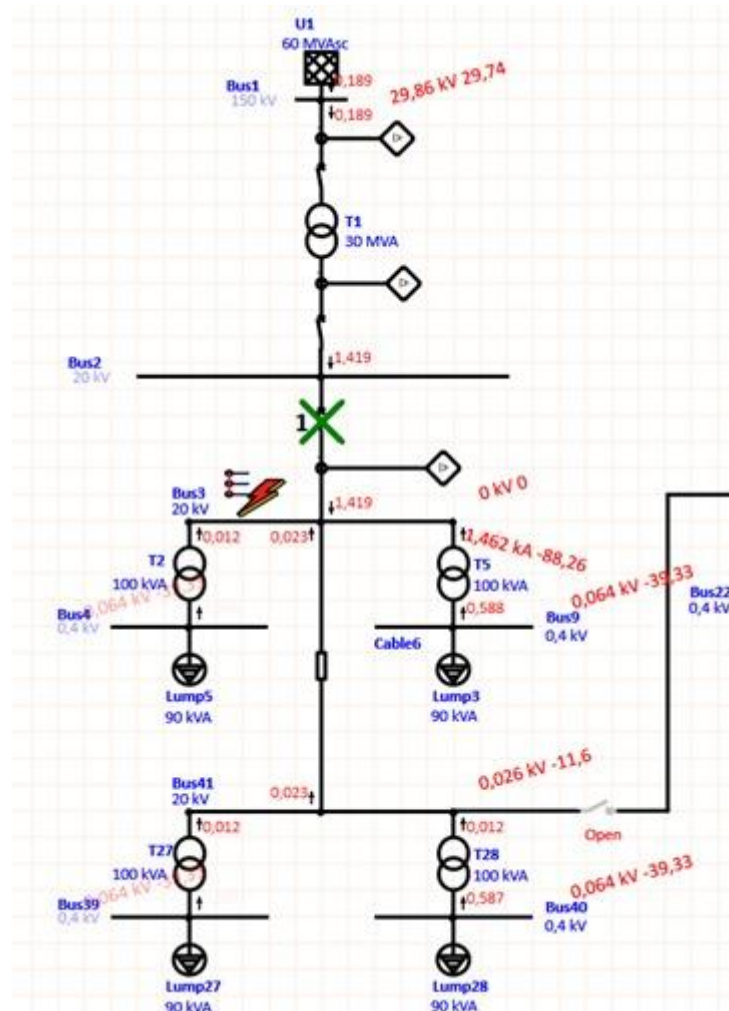
2.1.13 Pengujian Kinerja Relay

Kinerja dari sebuah relay proteksi dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu:

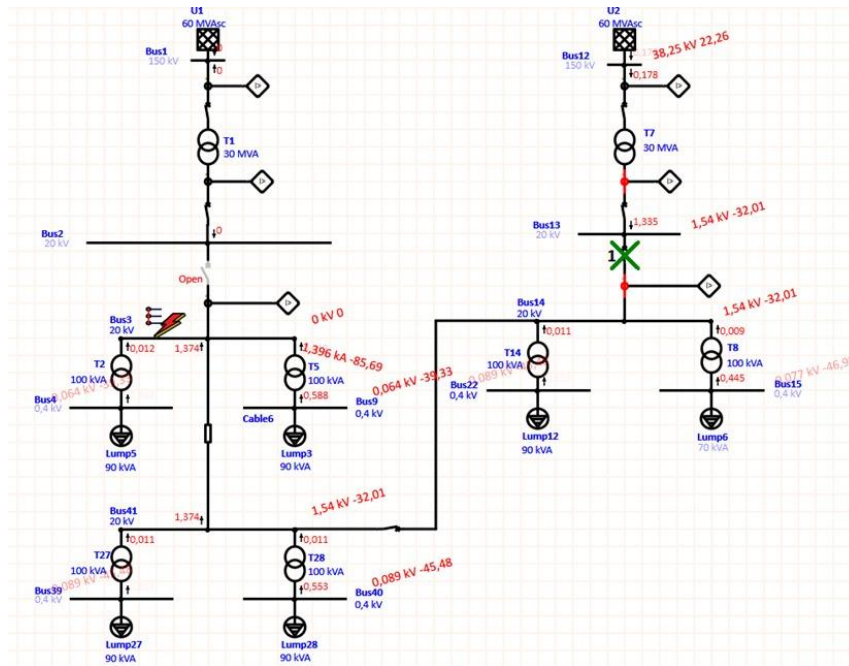
(Adam El Mukti Alifino Et al., 2024)

- Relay yang digunakan (manufaktur, jenis, dan karakteristik).
- Nominal *setting* arus pada relay.
- Nominal *setting* waktu pada relay.

- Nominal rasio transformator (primer dan sekunder).
- Nominal arus hubung singkat.
- Jenis perintah yang diberikan kepada relay (input).



Gambar II. 17 Keberhasilan Proteksi Eksisting (Hasil Pemodelan ETAP 19.0.1)

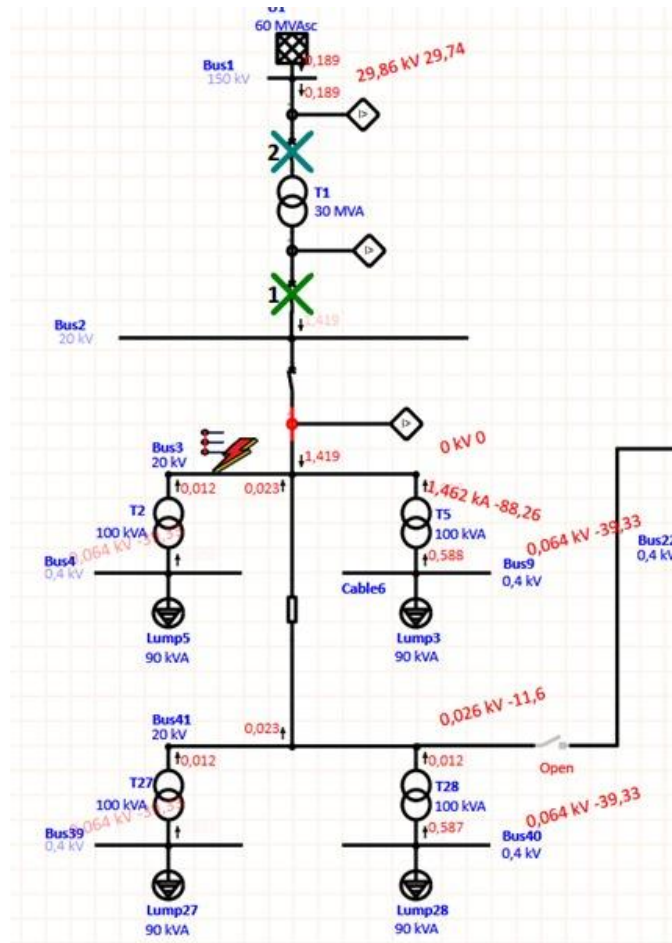


Gambar II. 18 Keberhasilan Proteksi Manuver (Hasil Pemodelan ETAP 19.0.1)

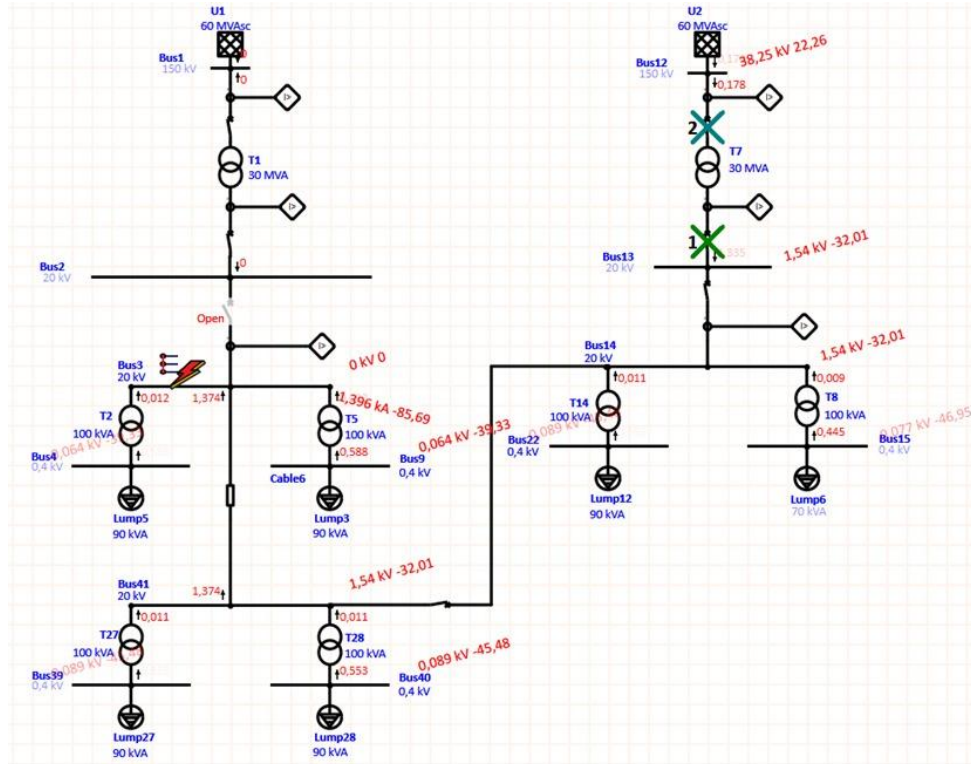
Pengujian kinerja relai dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu: (Dermawan et al, 2017.)

- Kegagalan pada relainya sendiri
- Kegagalan suplai arus dan atau suplai tegangan ke relai.
- Kegagalan sistem suplai arus searah untuk tripping pemutus beban.
- Kegagalan pada pemutus tenaga.

Hal ini dapat disebabkan karena kumparan trip tidak menerima suplai, kerusakan mekanis ataupun kegagalan pemutusan arus karena besarnya arus hubung singkat melampaui kemampuan dari pemutus bebannya.



Gambar II. 19 Kegagalan Proteksi Eksisting (Hasil Pemodelan ETAP 19.0.1)



Gambar II. 20 Kegagalan Proteksi Manuver (Hasil Pemodelan ETAP 19.0.1)

2.2 Penelitian Terkait

Tabel II. 1 Penelitian Terkait

No.	Judul Jurnal	Nama Penelitian	Tempat dan Tahun Penelitian	Pembahasan Penelitian	Kebaruan Penelitian
1.	Analisis Koordinasi Over Current Relay dan Recloser Akibat Adanya <i>Manuver</i> Jaringan dari Penyulang 05 ke Penyulang 07 Gardu Induk Weleri Kendal	Andreas Bahda Muchamad, Juningtyastuti, Susatyo Handoko	Departemen Teknik Elektro, Universitas Diponegoro (2017)	Pada jurnal ini dijelaskan tentang penelitian yang memiliki studi kasus di Gardu Induk Weleri Kendal keadaan manuver pada penyulang 05 ke penyulang 07, yang membahas terkait koordinasi dari proteksi OCR dan <i>recloser</i> .	Perbedaan pada penelitian ini dengan penelitian terkait adalah pada penelitian ini hanya fokus membahas mengenai analisis kinerja dari setting rele OCR, GFR dan tidak membahass terkait <i>Recloser</i> yang sudah ada dengan memasukkan gangguan

No.	Judul Jurnal	Nama Penelitian	Tempat dan Tahun Penelitian	Pembahasan Penelitian	Kebaruan Penelitian
					hubung singkat pada keadaan eksisting dan keadaan manuver
2.	Analisa Koordinasi <i>Over Current Relay</i> dan <i>Ground Fault Relay</i> di Sistem Proteksi <i>Feeder</i> Gardu Induk 20kV Jababeka	Erwin Dermawan, Dimas Nugroho	Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Jakarta (2017)	Pada jurnal ini menjelaskan tentang penellitian yang dilakukan studi kasus di Gardu Induk Jababeka pada penyulang Rambutan, yang membahas terkait koordinasi <i>setting rele</i> antara OCR (<i>Over Current Rele</i>) dan GFR (<i>Ground Fault Rele</i>).	Perbedaan pada penelitian ini dengan penelitian terkait adalah hanya membahas analisis kinerja dari <i>setting rele</i> OCR, GFR yang sudah ada dengan menambahkan gangguan hubung singkat pada keadaan eksisting dan keadaan manuver jaringan.

No.	Judul Jurnal	Nama Penelitian	Tempat dan Tahun Penelitian	Pembahasan Penelitian	Kebaruan Penelitian
3.	Analisis Manuver Jaringan terhadap Keandalan Kontinuitas Penyaluran Tenaga Listrik Penyulang di Area Ampenan	Nurul Hidayah, Supriyatna, Agung Budi Muljono	Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Mataram (2014)	Penelitian ini mengevaluasi manuver jaringan distribusi untuk mengatasi gangguan dan pekerjaan jaringan yang memerlukan pemadaman listrik. Tujuannya adalah menentukan posisi manuver yang optimal dan menganalisis perubahan keandalan dalam kondisi normal, gangguan, dan setelah manuver. Metodologi	Perbedaan pada penelitian ini dengan penelitian terkait adalah hanya membahas tentang pada pendekatan komprehensif yang mengintegrasikan manuver jaringan dengan analisis keandalan sistem, serta pemilihan kriteria teknis yang inovatif dalam evaluasi efektivitas manuver.

No.	Judul Jurnal	Nama Penelitian	Tempat dan Tahun Penelitian	Pembahasan Penelitian	Kebaruan Penelitian
				deskriptif dengan data sekunder dari PT. PLN (Persero) Cabang Mataram, dan penggunaan software <i>Matlab</i> dan <i>Matpower</i> .	
4.	Analisa Konfigurasi Penyulang Industri Untuk Menentukan Opsi Terbaik Saat Manuver Jaringan Distribusi	Muhammad Wahyu Aprianto	Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Gresik (2024)	Dengan solusi manuver yang berbeda untuk setiap section berdasarkan jenis gangguan dan pemeliharaan. Pendekatan ini bertujuan untuk memastikan backup	Perbedaan penelitian ini dengan penelitian terkait adalah membahas terkait pendekatan terintegrasi dan spesifik dalam memilih penyulang dan solusi manuver, yang tidak hanya

No.	Judul Jurnal	Nama Penelitian	Tempat dan Tahun Penelitian	Pembahasan Penelitian	Kebaruan Penelitian
				penyulang yang optimal dan efisien.	mengoptimalkan penyaluran tenaga listrik tetapi juga mengurangi kerugian dan menjaga kualitas listrik

5.	Analisa Beban Section Untuk Menentukan Alternatif Manuver Jaringan Distribusi 20 kV Penyulang BRG-3 PT PLN (Persero) Unit Layanan Salatiga	Akhmad Jamaah	Jurusan Teknik Elektro, Polteknik Negeri Semarang (2013)	Penelitian ini menunjukkan bahwa konfigurasi Radial sederhana kurang memadai, sehingga digunakan konfigurasi <i>Loop</i> yang menggabungkan dua jaringan radial dengan saklar. Untuk meningkatkan keandalan, jaringan dibagi menjadi section dengan peralatan pemisah seperti ABSw, LBS, atau <i>Recloser</i> .	Perbedaan penelitian ini dengan penelitian terkait adalah hanya membahas penerapan strategi konfigurasi jaringan yang lebih kompleks dan adaptif, serta pendekatan berbasis kapasitas dan efisiensi dalam manuver jaringan, yang berkontribusi pada peningkatan keandalan dan kualitas sistem tenaga listrik.
----	--	---------------	--	---	---

Teori dan hasil penelitian yang telah dipaparkan di Bab II digunakan sebagai dasar dalam perancangan simulasi dan analisis kinerja relay OCR serta GFR yang dibahas pada Bab III.