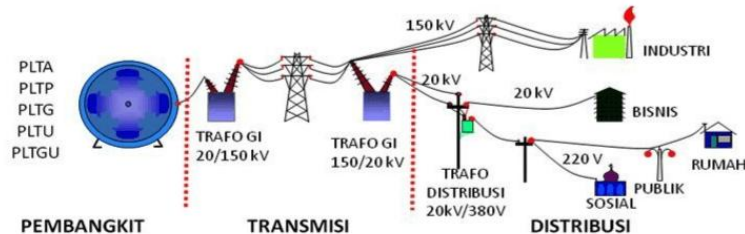


BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Tenaga Listrik

Sistem Tenaga Listrik adalah suatu sistem yang terdiri dari beberapa komponen berupa pembangkitan, transmisi, distribusi dan beban yang saling berhubungan dan bekerja sama untuk melayani kebutuhan tenaga listrik bagi pelanggan sesuai kebutuhan (Nur et al., n.d.). Secara garis besar Sistem Tenaga Listrik dapat dilihat pada gambar 2.1.



Gambar 2. 1 Sistem Tenaga listrik

Fungsi Komponen sistem Tenaga Listrik Sebagai Berikut(Pringsewu et al., 2023):

1. Pembangkitan merupakan komponen untuk mengubah energi yang digunakan sebagai sumber energi dapat berasal dari sumber energi lain misalnya: minyak bum, panas bumi, air, batu bara dan sumber lainnya yang dapat diubah menjadi energi listrik.
2. Saluran Transmisi Tegangan Tinggi (STTT) mengirimkan energi listrik ke pusat beban tegangan tinggi untuk mengantisipasi kehilangan daya.

3. Fungsi saluran distribusi adalah menyalurkan energi listrik dari gardu distribusi ke beban dengan menyalurkan tegangan rendah sehingga siap digunakan oleh peralatan listrik sisi konsumen.
4. Beban adalah peralatan listrik pada lokasi konsumen yang memanfaatkan energi listrik.

2.2 Pembangkit Listrik Tenaga Uap

Pembangkitan Listrik Tenaga Uap (PLTU) adalah pembangkitan yang mengandalkan energi kinetik dari uap yang bertekanan tinggi untuk menghasilkan energi listrik (Rully Muzani et al., 2024). Untuk menghasilkan uap, maka haruslah ada proses pembakaran untuk memanaskan air. Pembangkit listrik merupakan jenis pembangkit listrik termal yang umum digunakan, karena efisiensinya yang menguntungkan dan aksesibilitas sumber bahan bakarnya, sehingga memfasilitasi produksi energi listrik yang hemat biaya. PLTU merupakan suatu sistem pembangkitan tenaga listrik yang mengkonversikan energi kimia menjadi energi listrik dengan menggunakan uap air sebagai fluida kerjanya, yaitu dengan memanfaatkan energi kinetik uap untuk menggerakkan poros turbin, selanjutnya poros turbin akan menggerakkan generator yang kemudian dibangkitkan energi listrik (Sinaga, W. A. 2022). Energi listrik yang dihasilkan oleh generator dapat disalurkan ke sistem transmisi dan distribusi listrik. Daya listrik ini dapat dialirkan melalui jaringan listrik dan disalurkan ke rumah-rumah, industri, dan berbagai lokasi lain yang membutuhkan suplai energi listrik.



Gambar 2. 2 Pembangkit Listrik Tenaga Uap

Pada gambar 2.2 di atas adalah PT. PLN Indonesia Power UBP Jabar 2 Palabuhan ratu (PLTU Palabuhan Ratu) salah satu pembangkit listrik tenaga uap berbahan bakar batu bara, PT. PLN Indonesia Power UBP Jabar 2 Palabuhan Ratu (PLTU Palabuhan Ratu) terletak di kecamatan Palabuhan Ratu Kabupaten Sukabumi, Provinsi Jawa Barat yang berkapasitas 3 x 350 MW ditandatangani pada 7 Agustus 2012 oleh PT. PLN (Persero) dan konsuntrium Shanghai Electric Corp Ltd dan PT. Maxima Insfratraktur.

2.3 Sistem Proteksi

Sistem Proteksi merupakan peralatan keselamatan listrik dalam sistem tenaga listrik, diposisikan secara strategis dalam jaringan distribusi, transformator daya, saluran transmisi daya, dan generator, untuk memfasilitasi isolasi komponen tertentu dari sistem tenaga listrik, sehingga menjaga integritas sistem tenaga listrik terhadap gangguan atau lonjakan listrik (Yuniar Yasmin & Permata, 2022). Sistem ini bekerja dengan cara melepaskan atau memutus bagian yang mengalami gangguan dari jaringan listrik agar tidak merusak peralatan lainnya. Sistem proteksi feeder (penyulang) tegangan menengah adalah pengaman yang terdapat pada

elemen tegangan menengah. Feeder (penyulang) tegangan menengah adalah feeder yang berfungsi untuk penyaluran tenaga listrik tegangan menengah (6 kV– 20 kV) yang terdiri dari (Nasution et al., 2021) :

1. Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM)
2. Saluran Kabel Tegangan Menengah (SKTM)

Sistem proteksi memiliki persyaratan khusus yang harus dipenuhi untuk melindungi peralatan yang dilindungi secara efektif. Berikut ini menjelaskan beberapa persyaratan penting untuk sistem perlindungan tersebut (Ardha Ibrahmusa et al., 2023) :

1. Sensitivitas

Sebuah *Relay* harus dapat beroperasi dengan kepekaan yang tinggi, yaitu cukup peka terhadap gangguan di daerahnya, meskipun gangguannya minimal, dan kemudian memberikan tanggapan/umpan balik. Melindungi peralatan seperti motor, generator atau trafo. *Relay* yang sensitif dapat mendeteksi kesalahan lebih awal untuk membatasi kerusakan. Hal ini sangat penting untuk peralatan tersebut, karena jika gangguan tersebut merusak besi laminasi stator atau inti trafo, perbaikannya sangat sulit dan mahal.

2. Reliabilitas

Keandalan *Relay* dihitung dengan jumlah *Relay* yang beroperasi/kurang terlindungi versus jumlah kegagalan. Keandalan *Relay* dikatakan cukup baik jika harganya : 90% - 99%.

3. Selektivitas

Sistem proteksi harus mampu mengisolasi bagian sistem yang terganggu sesedikit mungkin, yaitu. hanya perangkat yang disebabkan oleh gangguan yang termasuk dalam area keamanan utamanya. Perlindungan semacam itu disebut perlindungan selektif. Untuk mencapai keandalan yang tinggi, *Relay* pengaman harus memiliki selektivitas yang baik. Dengan demikian, semua tindakannya menjadi penting dan akibatnya gangguan dapat diminimalkan.

4. Kecepatan

Bagian yang terganggu harus diisolasi dari bagian sistem yang lain sesegera mungkin untuk meminimalkan kerugian/kerusakan yang diakibatkan oleh gangguan tersebut. Total waktu pembatasan dan gangguan sistem adalah waktu dari munculnya gangguan hingga pemisahan lengkap bagian yang terganggu dari sistem lainnya.

2.3.1 Fungsi Sistem Proteksi

Menurut Naibaho & Pratama (2024) Salah satu fungsi utama sistem proteksi, yaitu mengisolasi area gangguan yang terdampak dengan secepat mungkin, agar area lain yang tidak terdampak tetap bisa beroperasi menyalurkan energi listrik secara normal. Fungsi sistem proteksi untuk mendeteksi adanya gangguan, mencegah kerusakan (peralatan dan jaringan), pengaman terhadap manusia, meminimumkan daerah-daerah padam bila terjadi gangguan. Gangguan pada pusat pembangkit listrik dapat terjadi kapan saja, untuk itu diperlukan sistem proteksi, yang berfungsi selain mengamankan peralatan pada pusat pembangkit juga untuk melokalisasi dampak dari gangguan. Alat pendeteksi gangguan adalah

mengisolasi kesalahan di wilayah tersebut dari sistem lain. Aspek penting lain yang perlu dipertimbangkan saat membagi kawasan lindung adalah bahwa kawasan yang berdekatan tumpang tindih (overlap), hal ini dimaksudkan agar tidak ada sistem yang dibiarkan tanpa perlindungan. Pembagian area proteksi ini bertujuan agar area yang tidak mengalami gangguan tetap dapat berfungsi untuk mengurangi waktu pemadaman listrik.(Buku Pedoman Proteksi, 2013)

2.4 Gangguan Sistem Tenaga Listrik

Gangguan sistem tenaga listrik adalah keadaan tidak wajar atau tidak normal seperti yang diharapkan yang dapat mengganggu berlangsungnya aliran listrik (Chrisna andreansyah et al., 2023). Biasanya, gangguan listrik disebabkan oleh gangguan dari sumber eksternal atau internal. Dimana Gangguan eksternal sering muncul dari fenomena atmosfer seperti sambaran petir, yang menghasilkan lonjakan tegangan yang signifikan dalam jaringan yang terkena dampak, sedangkan gangguan internal dikaitkan dengan gangguan yang berasal dari sistem itu sendiri. Misalnya, kabel listrik yang secara tidak sengaja menghubungi tubuh manusia menimbulkan risiko yang cukup besar bagi individu di dekatnya jika kontak tersebut terjadi.

Berdasarkan SPLN 52-3: 1983 pasal empat tentang empat pola pengamanan sistem distribusi menjelaskan bahwa macam gangguan (fault) pada sistem distribusi dapat dibagi atas dua kelompok diantaranya gangguan yang bersifat temporer dan gangguan yang bersifat permanen (SPLN No.52-3, 1983). Berikut ini adalah klasifikasi gangguan:

- a. Berdasarkan lama terjadinya gangguan
 1. Gangguan transient (temporer), gangguan ini dapat hilang namun jika tidak segera diperbaiki, maka gangguan ini dapat berubah menjadi gangguan permanen, dan gangguan ini dapat membaik dengan sendirinya jika pemutus tenaga terbuka dari saluran untuk sementara dan setelah itu dihubungkan kembali, atau bisa diperbaiki dengan hanya memutuskan beberapa bagian yang terganggu saja.
 2. Gangguan permanen, gangguan yang membutuhkan beberapa tindakan perbaikan lebih lanjut, gangguan ini tetap ada apabila pemutus tenaga terbuka untuk waktu yang singkat dan setelah itu dihubungkan kembali.
- b. Berdasarkan kesimetrisannya
 1. Gangguan asimetris, merupakan gangguan yang menyebabkan besar magnitude dari arus gangguan yang mengalir pada setiap *Phasenya* menjadi tidak seimbang (berbeda). Gangguan ini terdiri dari:
 - Gangguan Hubung Singkat Satu *Phase* ke Tanah, yakni gangguan yang disebabkan karena salah satu *Phase* terhubung singkat ke tanah atau ground.
 - Gangguan Hubung Singkat Dua *Phase*, yakni gangguan yang disebabkan karena antar kedua *Phase* (*Phase-Phase*) terhubung singkat dan tidak terhubung ke tanah.
 - Gangguan Hubung Singkat Dua *Phase* ke Tanah, yakni gangguan yang terjadi ketika kedua *Phase* terhubung singkat ke tanah.

2. Gangguan simetris, merupakan gangguan yang terjadi pada semua *Phasenya* di mana magnitude dari arus gangguan setiap *Phasenya* sama.

Gangguan ini terjadi dari:

- Gangguan Hubung Singkat Tiga *Phase*, yakni gangguan yang terjadi ketiga tiga *Phase* saling terhubung singkat.
- Gangguan Hubung Singkat Tiga *Phase* ke Tanah, yakni gangguan yang terjadi ketika ketiga *Phase* terhubung singkat ke tanah

2.5 Komponen Simetris

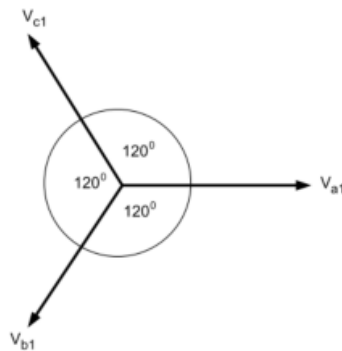
Menurut C.L. Fortescue bahwa Suatu sistem tak seimbang terdiri dari fasor tak seimbang pula dapat diuraikan menjadi fasor-fasor seimbang dinamakan komponen simetri dari fasor aslinya “n” buah fasor pada setiap himpunan komponen-komponennya sama panjang, dan sudut antara fasor yang bersebelahan dalam himpunan itu adalah sama besar (Muhammad, M et al., 2022).

Prinsip dasar dari komponen simetris untuk rangkaian sistem tiga *Phase* adalah pada setiap bilangan fasor yang tak seimbang dalam sistem tiga *Phase*, dapat di uraikan menjadi fasor yang seimbang :

1. Komponen Urutan Positif (Positive Sequence Components)

Komponen urutan positif yang terdiri dari tiga fasor yang sama besar, terpisah dengan beda *Phase* sebesar 120° listrik dan mempunyai urutan *Phase* yang sama seperti fasor aslinya (Basir & Helmi,. 2024). Komponen urutan positif terdiri dari tiga arus dan tegangan *Phase* ke netral yang seimbang yang dibangkitkan oleh sistem pembangkit tenaga listrik. Saat sistem berada dalam kondisi normal, hanya terdapat tegangan

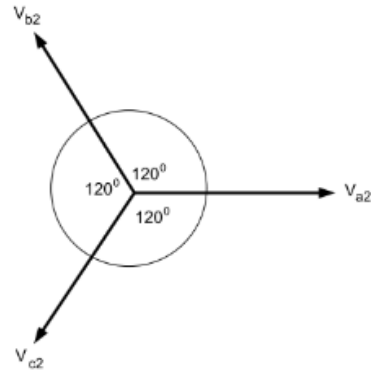
dan arus urutan positif saja, sehingga impedansi sistem pada kondisi normal adalah impedansi urutan positif.



Gambar 2. 4 Komponen Urutan Positif

2. Komponen Urutan Negatif (Negative Sequence Components)

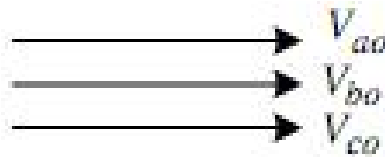
Komponen urutan negative yang terdiri dari tiga fasor yang sama besarnya, terpisah satu dengan yang lainnya dalam sudut sebesar 120° dan mempunyai urutan *Phase* yang berlawanan dengan fasor aslinya (Basir & Helmi, 2024). Jika pada kondisi normal hanya terdapat komponen urutan positif, maka komponen urutan negatif hanya ada pada saat terjadinya gangguan. Komponen urutan negatif ini hanya berbeda arah putaran dengan komponen urutan positif. Jadi misal urutan positif berputar dengan urutan a, b, c maka urutan negatif menjadi a, c, b. Z_2 merupakan impedansi urutan negatif dan pada umumnya sama dengan impedansi urutan positif.



Gambar 2. 5 Komponen Urutan Negatif

3. Komponen Urutan Nol (Nol Sequence Components)

Komponen urutan nol yang terdiri dari tiga fasor yang sama besarnya dan dengan pergeseran *Phase* nol antara yang satu dengan yang lainnya (Basir & Helmi,. 2024). Arus dan tegangan pada komponen urutan nol adalah se*Phase*, oleh karena itu arus urutan nol untuk dapat mengalir di sistem memerlukan jalan balik melalui pentanahan netral.



Gambar 2. 6 Komponen Urutan Nol

Tiga phasor yang tidak seimbang dapat diuraikan menjadi simetris dan dinyatakan dalam bentuk matriks pada persamaan 2.1 dan 2.2 berikut:

$$V_{abc} = A \cdot V_{012} \quad (2.1)$$

$$V_{012} = A^{-1} \cdot V_{abc} \quad (2.2)$$

Untuk gangguan simetris, masing–masing tegangan pada *Phase* a, b, dan c direpresentasikan dengan penanda indeks 1 menunjukkan urutan positif, indeks 2 menunjukkan urutan negatif, dan indeks 0 menunjukkan urutan nol. Ketiganya secara berturut–turut dapat dilihat dalam persamaan 2.3, 2.4 dan 2.5:

$$V_{b1} = a^2 \cdot V_{a1} \qquad V_{c1} = a \cdot V_{a1} \qquad (2.3)$$

$$V_{b2} = a \cdot V_{a2} \qquad V_{c2} = a^2 \cdot V_{a2} \qquad (2.4)$$

$$V_{b0} = V_{a0} \qquad V_{c0} = V_{a0} \qquad (2.5)$$

Dimana, $a = 120^\circ$ dan $a^2 = 240^\circ$

Sehingga didapatkan tegangan pada *Phase* a, b, dan c dituliskan dalam Persamaan 2.6, 2.7 dan 2.8 berikut:

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \qquad (2.6)$$

$$V_b = a^2 V_{a1} + a \cdot V_{a2} + V_{a0} \qquad (2.7)$$

$$V_c = a \cdot V_{a1} + a^2 V_{a2} + V_{a0} \qquad (2.8)$$

Dimana matriks A dapat dinyatakan dengan Persamaan 2.9:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \qquad (2.9)$$

Maka, diperoleh A^{-1} pada persamaan 2.10 berikut :

$$A^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \qquad (2.10)$$

Dalam bentuk persamaan matriks, tegangan V_a, V_b dan V_c di tulis dengan persamaan 2.11 berikut:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Berdasarkan 2.10 persamaan tegangan V_{a0}, V_{a1} dan V_{a2} di tuliskan dalam persamaan 2.12 berikut:

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Sehingga untuk masing–masing tegangan dapat dijabarkan menjadi Persamaan berikut:

$$V_{a0} = \frac{1}{3} (V_a + V_a + V_a) \quad (2.13)$$

$$V_{a1} = \frac{1}{3} (V_a + a \cdot V_b + a^2 \cdot V_c) \quad (2.14)$$

$$V_{a2} = \frac{1}{3} (V_a + a^2 V_b + a V_c) \quad (2.15)$$

Untuk komponen–komponen *Phase* b dan c, berlaku hal yang sama seperti pada persamaan 2.13, 2.14 dan 2.15. Transformasi komponen simetris juga dapat diterapkan pada arus melalui persamaan matriks pada persamaan 2.16 dan 2.17 berikut :

$$I_{abc} = A \cdot I_{012} \quad (2.16)$$

$$I_{012} = A^{-1} \cdot I_{abc} \quad (2.17)$$

Sehingga didapatkan arus pada *Phase* a, b, dan c dituliskan dalam Persamaan 2.18, 2.19 dan 2.20 berikut:

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} + I_{a0} \quad (2.18)$$

$$I_b = a^2 I_{a1} + a \cdot I_{a2} + I_{a0} \quad (2.19)$$

$$I_c = a \cdot I_{a1} + a^2 I_{a2} + I_{a0} \quad (2.20)$$

Sehingga untuk masing – masing arus dapat dijabarkan menjadi Persamaan 2.21, 2.22 dan 2.23:

$$I_{a0} = \frac{1}{3}(I_a + I_a + I_a) \quad (2.21)$$

$$I_{a1} = \frac{1}{3}(I_a + a \cdot I_b + a^2 \cdot I_c) \quad (2.22)$$

$$I_{a2} = \frac{1}{3}(I_a + a^2 I_b + a I_c) \quad (2.23)$$

Dalam sistem tiga *Phase* yang terhubung bintang (*Y-connected*), arus netral (I_n) merupakan hasil penjumlahan dari ketiga arus saluran *Phase*, seperti pada persamaan 2.24 berikut:

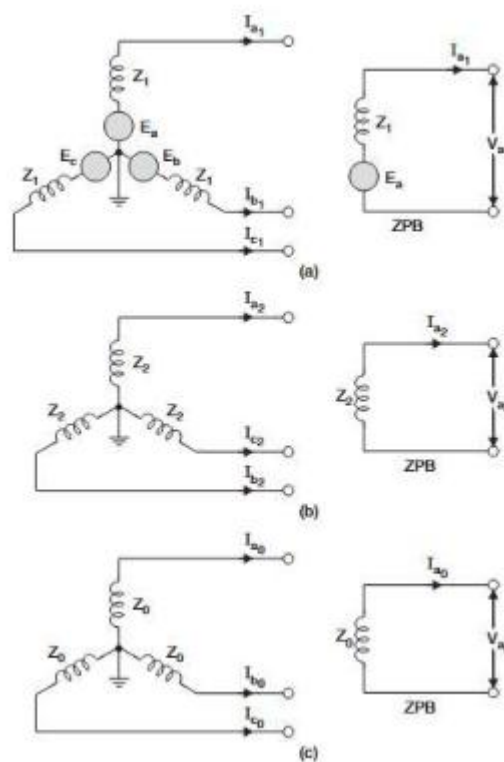
$$I_n = I_a + I_b + I_c \quad (2.24)$$

Dengan membandingkan Persamaan 2.24 dn 2.21, maka I_n dapat juga dinyatakan pada Persamaan 2.25 berikut:

$$I_n = 3I_{a0} \quad (2.25)$$

Untuk jaringan yang terdapat sumber tanpa beban maka komponen urutan yang sesuai dapat ditunjukkan pada Gambar 2.7 dengan melalui persamaan 2.26 berikut:

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ E_a \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad (2.26)$$



Gambar 2. 7 Rangkaian Komponen Urutan: (a) Komponen Urutan Positif, (b) Komponen Urutan Negatif, dan (c) Komponen Urutan Nol

2.6 Gangguan Hubung Singkat

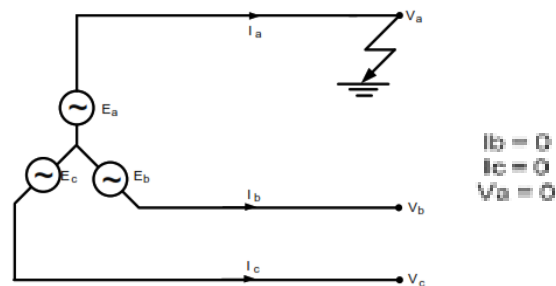
Menurut Anshar & Budiman, (2022) Gangguan hubung singkat merupakan gangguan yang paling sering terjadi pada sistem tenaga listrik yang menyebabkan arus yang mengalir lebih besar sehingga dapat merusak peralatan bila tidak dilengkapi dengan proteksi yang tepat.

2.6.1 Klasifikasi Gangguan Hubung Singkat

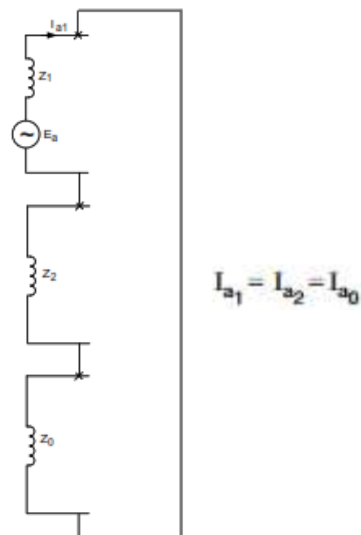
Gangguan hubung singkat dapat diklasifikasi menjadi empat jenis, yaitu :

1. Gangguan hubung singkat satu *Phase* ke tanah
2. Gangguan hubung singkat dua *Phase*
3. Gangguan hubung singkat dua *Phase* ke tanah
4. Gangguan hubung singkat tiga *Phase*

2.6.1.1 Gangguan Hubung Singkat Satu *Phase* Ke Tanah



(a)



(b)

Gambar 2. 8 Gangguan Hubung Singkat Satu *Phase* Ke Tanah: (a) Rangkaian Gangguan Hubung Singkat Satu *Phase* Ke Tanah, (b) Rangkaian Komponen Urutan Gangguan Hubung Singkat Satu *Phase* Ke Tanah

Hubung singkat satu *Phase* ke tanah adalah gangguan hubung singkat yang terjadi karena flashover antara penghantar *Phase* dan tanah. Kenaikan dari arus listrik pada *Phase* dengan gangguan dan tegangan jadi 0 seperti gambar 2.8(a) merupakan dampak dari gangguan arus satu *Phase* ke tanah oleh karena itu peristiwa ini dapat menyebabkan *Phase* lain mengalami arus yang menjadi nol disertai dengan kenaikan tegangan pada *Phase* lain (Rohman Syah et al., 2021)

Berdasarkan Gambar 2.8(b), pada kondisi gangguan hubung singkat satu *Phase* ke tanah ini rangkaian impedansi urutan positif, urutan negatif dan urutan nol tersusun secara seri, maka parameter yang perlu diperhatikan dalam komponen *Phase* dapat ditulis pada Persamaan 2.27 dan 2.28 berikut:

$$I_a = I_b = 0 \quad (2.27)$$

$$V_a = 0 \quad (2.28)$$

Transformasi komponen *Phase* menjadi domain urutan menggunakan Persamaan 2.10 dan 2.27, sehingga menjadi Persamaan 2.30 berikut:

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} I_a \\ I_a \\ I_a \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

$$I_{a0} = I_{a1} = I_{a2} = \frac{I_a}{3} \quad (2.30)$$

Berdasarkan Persamaan 2.26, tegangan komponen urutan untuk gangguan satu *Phase* ke tanah dituliskan dalam Persamaan 2.31, 2.32 dan 2.33 berikut:

$$= -I_{a0} \cdot Z_0 \quad (2.31)$$

$$V_{a1} = E_a - I_{a1} \cdot Z_1 \quad (2.32)$$

$$V_{a2} = -I_{a2} \cdot Z_2 \quad (2.33)$$

Dengan menggunakan Persamaan 2.28 dan substitusikan V_{a0} , V_{a1} , V_{a2} menjadi Persamaan 2.35 :

$$V_a = 0 = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \quad (2.34)$$

$$E_a - I_{a1} \cdot Z_1 - I_{a2} \cdot Z_2 - I_{a1} \cdot Z_0 = 0 \quad (2.35)$$

Berdasarkan Persamaan 2.35 dan mengingat Persamaan 2.30 maka persamaannya menjadi :

$$E_a - I_a \cdot Z_1 - I_a \cdot Z_2 - I_a \cdot Z_0 = 0 \quad (2.36)$$

Dari Persamaan 2.36 maka Persamaan 2.37 berikut digunakan untuk menghitung arus gangguan hubung singkat *Phase* ke tanah:

$$I_{a1} = \frac{3 \times E_a}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \quad (2.37)$$

Sedangkan untuk gangguan yang terjadi Bus Menggunakan rumus di bawah ini :

$$I_{a1} = \frac{3 \times V_f}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \quad (2.38)$$

Dengan Keterangan :

I_a = Arus gangguan hubung singkat *Phase* ke tanah (A)

V_f = *Tegangan Sebelum Gangguan* (V)

E_a = Tegangan sumber (V)

V_a = Tegangan *Phase a* (V)

V_b = Tegangan *Phase* b (V)

V_c = Tegangan *Phase* c (V)

V_{a1} = Tegangan urutan positif (V)

V_{b2} = Tegangan urutan negatif(V)

V_{a0} = Tegangan urutan nol (V)

I_a = Arus *Phase* a (A)

I_b = Arus *Phase* b (A)

I_c = Arus *Phase* c (A)

I_{a1} = Arus urutan positif (A)

I_{a2} = Arus urutan negatif(A)

I_{a0} = Arus urutan nol (A)

Z_0 = Impedansi urutan nol (Ω)

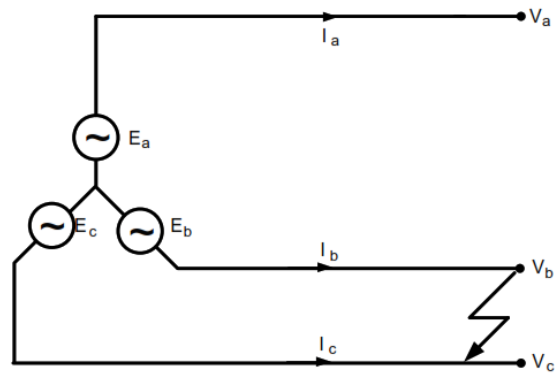
Z_1 = Impedansi urutan positif (Ω)

Z_2 = Impedansi urutan negatif (Ω)

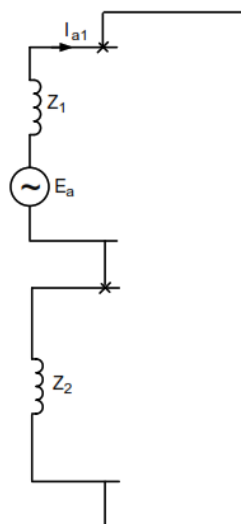
2.6.1.2 Gangguan Hungbung Singkat Dua *Phase*

Hubung singkat dua *Phase* adalah gangguan hubung singkat yang terjadi karena bersetuhannya antara penghantar *Phase* yang satu dengan satu penghantar *Phase* yang lainnya sehingga terjadi arus lebih (over current). Gangguan ini sering terjadi karena terputusnya kawat penghantar *Phase* ditengah

pada distribusi dan transmisi dengan pengaturan yang disusun vertikal. Ada kemungkinan lain penyebab gangguan ini diantaranya black flashover antara dua buah kawat penghantar *Phase* 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 (Anshar & Budiman, 2022a).



(a)



(b)

Gambar 2. 9 Gangguan Hubung Singkat Dua Phase: (a) Rangkaian Gangguan Hubung Singkat Dua Phase, (b) Rangkaian Komponen Urutan Gangguan Hubung Singkat Dua Phase

Dapat dilihat pada Gambar 2.9(a) dan 2.9(b) pada kondisi gangguan hubung singkat dua *Phase* rangkaian impedansi urutan positif tersusun secara paralel dengan impedansi urutan negatif, maka parameter yang perlu diperhatikan dalam komponen *Phase* dapat ditulis pada Persamaan 2.39, 2.40 dan 2.41 berikut:

$$I_a = 0 \quad (2.39)$$

$$I_c = -I_b \quad (2.40)$$

$$V_b = V_c \quad (2.41)$$

Transformasi komponen *Phase* menjadi komponen urutan menggunakan Persamaan 2.21, 2.22, 2.23, 2.39, 2.40 dapat dituliskan pada persamaan 2.42 berikut:

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ I_b \\ -I_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{3}(a - a^2)I_a \\ \frac{1}{3}(a^2 - a)I_a \end{bmatrix} \quad (2.42)$$

Maka setelah disubstitusikan akan didapatkan Persamaan 2.43 berikut:

$$I_{a1} = -I_{a2} \quad (2.43)$$

Untuk tegangannya dapat menggunakan Persamaan 2.14, 2.15 dan 2.26 menjadi Persamaan berikut:

$$(V_{a0} + a^2 \cdot V_{a1} + a \cdot V_{a2}) = (V_{a0} + a \cdot V_{a1} + a^2 \cdot V_{a2}) \quad (2.44)$$

$$(a^2 - a)V_{a1} = (a^2 - a)V_{a2} \quad (2.45)$$

$$V_{a1} = V_{a2} \quad (2.46)$$

$$E_a - I_{a1} \cdot Z_1 = -I_{a2} \cdot Z_2 \quad (2.47)$$

$$E_a - I_{a1} \cdot Z_1 = I_{a1} \cdot Z_2 \quad (2.48)$$

Berdasarkan Persamaan 2.48, maka berikut digunakan untuk menghitung

arus gangguan hubung singkat dua *Phase* melalui Persamaan 2.49 :

$$I_{a1} = \frac{E_a}{Z_1 + Z_2} \quad (2.49)$$

Sedangkan untuk hubung singkat dua *Phase* di bus menggunakan rumus :

$$I_{a1} = \frac{V_f}{Z_1 + Z_2} \quad (2.50)$$

Dengan Keterangan :

I_a = Arus gangguan hubung singkat *Phase* ke tanah (A)

V_f = Tegangan sebelum gangguan (V)

E_a = Tegangan sumber (V)

V_a = Tegangan *Phase* a (V)

V_b = Tegangan *Phase* b (V)

V_c = Tegangan *Phase* c (V)

V_{a1} = Tegangan urutan positif (V)

V_{b2} = Tegangan urutan negatif (V)

V_{a0} = Tegangan urutan nol (V)

I_a = Arus *Phase* a (A)

I_b = Arus *Phase* b (A)

I_c = Arus *Phase* c (A)

I_{a1} = Arus urutan positif (A)

I_{a2} = Arus urutan negatif(A)

I_{a0} = Arus urutan nol (A)

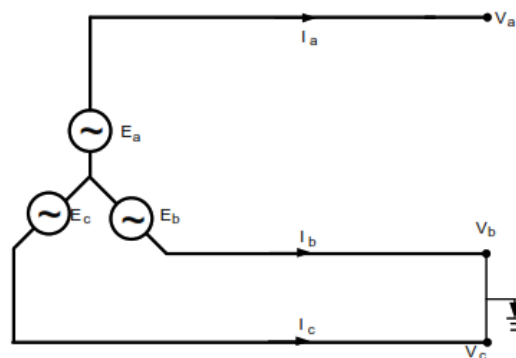
Z_0 = Impedansi urutan nol (Ω)

Z_1 = Impedansi urutan positif (Ω)

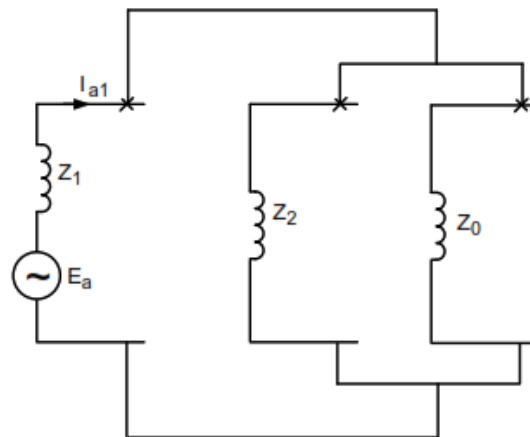
Z_2 = Impedansi urutan negatif (Ω)

2.6.1.3 Gangguan Hubung Singkat Dua *Phase* ke Tanah

Ketika terjadi gangguan pada arus ini biasanya disebabkan oleh dua *Phase* atau dua kawat yang terjadi gangguan terhubung pada tanah atau ke netral pada saat sistem pertanahan tiga *Phase*.



(a)



(b)

Gambar 2. 10 Gangguan Hubung Singkat Dua Phase Ke Tanah: (a) Rangkaian Gangguan Hubung Singkat Dua Phase Ke Tanah, (b) Rangkaian Komponen Urutan Gangguan Hubung Singkat Dua Phase Ke Tanah

Dapat dilihat pada gambar 2.10(a) ketika terjadi gangguan pada arus ini biasanya disebabkan oleh dua *Phase* atau dua kawat yang terjadi gangguan terhubung pada tanah atau ke netral pada saat sistem pertanahan tiga *Phase* (Rohman Syah., 2022).

Pada kondisi gangguan hubung singkat dua *Phase* ke tanah seperti pada Gambar 2.10(b) dimana impedansi urutan nol tersusun secara paralel dengan impedansi urutan negatif dan terhubung seri dengan impedansi urutan positif, maka parameter yang perlu diperhatikan dalam komponen *Phase* dapat ditulis pada Persamaan 2.51 dan 2.52 berikut:

$$I_a = 0 \quad (2.51)$$

$$V_a = V_c \quad (2.52)$$

Transformasi komponen *Phase* menjadi komponen urutan menjadi Persamaan 2.53 berikut:

$$I_a = I_{a1} = I_{a2} = I_{a0} = 0 \quad (2.53)$$

Untuk tegangannya dapat menggunakan Persamaan 2.11 menjadi Persamaan :

$$V_{a0} = V_{a1} = V_{a2} \quad (2.54)$$

$$\frac{1}{3}(V_a + V_b + V_c) = \frac{1}{3}(V_a + aV_b + V_c) = \frac{1}{3}(V_a + a^2V_b + V_c) \quad (2.55)$$

$$\frac{V_a}{3} = \frac{V_a}{3} = \frac{V_a}{3} \quad (2.56)$$

Selanjutnya menggunakan Persamaan 2.26 dan 2.50, sebagai hubungan tegangan dan substitusi ke dalam komponen urutan menjadi Persamaan 2.57 dan 2.58 berikut:

Hubungan $V_{a0} = V_{a1}$:

$$-I_{a0}.Z_0 = E_a - I_{a1}.Z_1 \quad (2.57)$$

$$I_{a0} = \frac{E_a - I_{a1}.Z_1}{Z_0} \quad (2.58)$$

Hubungan $V_{a2} = V_{a1}$:

$$I_{a2}.Z_2 = E_a - I_{a1}.Z_1 \quad (2.59)$$

$$I_{a2} = \frac{E_a - I_{a1}.Z_1}{Z_2} \quad (2.60)$$

Maka berdasarkan Persamaan 2.53 dengan mensubstitusikan I_{a2} dan I_{a0} dapat dituliskan menjadi Persamaan 2.61 berikut :

$$I_{a1} = \frac{E_a - I_{a1}.Z_1}{Z_2} - \frac{E_a - I_{a1}.Z_1}{Z_0} = 0 \quad (2.61)$$

Maka Persamaan 2.60 berikut digunakan untuk menghitung arus gangguan hubung singkat dua *Phase* ke tanah:

$$I_{a1.} = \frac{E_a}{Z_1 + \left[\frac{Z_2(Z_0)}{Z_2 + Z_0} \right]} \quad (2.62)$$

Sedangkan untuk menghitung arus gangguan hubung singkat dua *Phase* ke tanah di Bus :

$$I_{a1.} = \frac{V_f}{Z_1 + \left[\frac{Z_2(Z_0)}{Z_2 + Z_0} \right]} \quad (2.63)$$

Dengan Keterangan :

I_a = Arus gangguan hubung singkat *Phase* ke tanah (A)

V_f = Tegangan sebelum gangguan (V)

E_a = Tegangan sumber (V)

V_a = Tegangan *Phase* a (V)

V_b = Tegangan *Phase* b (V)

V_c = Tegangan *Phase* c (V)

V_{a1} = Tegangan urutan positif (V)

V_{b2} = Tegangan urutan negatif(V)

V_{a0} = Tegangan urutan nol (V)

I_a = Arus *Phase* a (A)

I_b = Arus *Phase* b (A)

I_c = Arus *Phase* c (A)

I_{a1} = Arus urutan positif (A)

I_{a2} = Arus urutan negatif(A)

I_{a0} = Arus urutan nol (A)

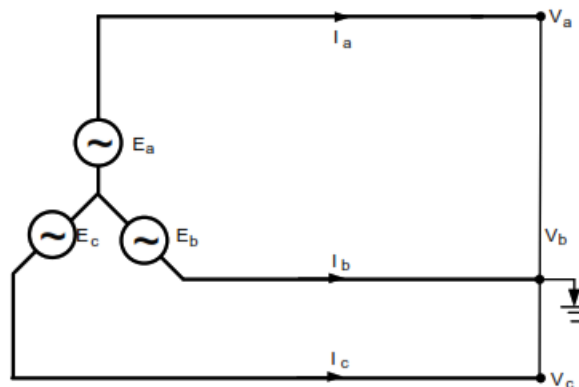
Z_0 = Impedansi urutan nol (Ω)

Z_1 = Impedansi urutan positif (Ω)

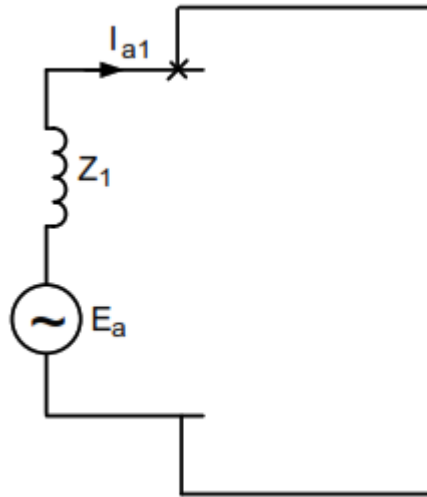
Z_2 = Impedansi urutan negatif (Ω)

2.6.1.4 Gangguan Hubung Singkat Tiga *Phase*

Hubung singkat tiga *Phase* seperti pada gambar 2.11(a) adalah gangguan hubung singkat yang terjadi karena bersatunya semua ketiga penghantar *Phase* (Anshar & Budiman, 2022). Gangguan ini dapat diakibatkan oleh tumbangnya pohon kemudian menimpa kabel jaringan. Menurut Rohman Syah (2021) gangguan ini merupakan tipe gangguan yang terparah dibanding dengan gangguan arus hubung singkat yang lainnya namun gangguan ini sangat jarang sekali terjadi.



(a)



(b)

Gambar 2. 11 Gangguan Hubung Singkat Tiga Phase: (a) Rangkaian Gangguan Hubung Singkat Tiga Phase, (b) Rangkaian Komponen Urutan Gangguan Hubung Singkat Tiga Phase

Berdasarkan Gambar 2.11(b), apabila terjadi gangguan simetris pada sistem tiga *Phase* karena impedansi urutan yang digunakan hanya urutan positif saja, maka parameter yang perlu diperhatikan dalam komponen *Phase* dapat ditulis pada Persamaan 2.64 dan 2.65 berikut:

$$V_a = V_b = V_c \quad (2.64)$$

$$I_a + I_b + I_c = 0 \quad (2.65)$$

Dengan referensi $I_b = a^2 I_a$ dan $I_c = a I_a$, serta menggunakan persamaan 2.21, 2.22, 2.23 diatas kemudian substitusi I_b dan I_c menjadi persamaan 2.66, 2.67 dan 2.68 :

$$I_{a1} = \frac{1}{3}(I_a + a^3 \cdot I_a + a^3 \cdot I_a) = I_a \quad (2.66)$$

$$I_{a2} = \frac{1}{3}(I_a + a^4 \cdot I_a + a^2 \cdot I_a) = 0 \quad (2.67)$$

$$I_{a0} = \frac{1}{3}(I_a + I_a + I_a) = 0 \quad (2.68)$$

Hal ini berarti pada gangguan tiga *Phase*, komponen urutan nol maupun komponen urutan negatif dari arus tidak ada (tidak muncul), serta komponen urutan positif dari arus sama dengan arus *Phasenya*. Ditinjau dari persamaan 2.26 maka tegangan dalam komponen urutan dapat dituliskan menjadi persamaan 2.69, 2.70 dan 2.71:

$$V_{a1} = \frac{1}{3}(V_a + a \cdot V_a + a^2 \cdot V_a) = 0 \quad (2.69)$$

$$V_{a2} = \frac{1}{3}(V_a + a^2 V_b + a V_c) = 0 \quad (2.70)$$

$$V_{a0} = 0 \quad (2.71)$$

$$V_{a0} = 0 = E_a - I_{a1} \cdot Z_1 \quad (2.72)$$

Apabila V_{a1} dituliskan pada persamaan 2.672, maka untuk arusnya dapat dihitung melalui Persamaan 2.73 :

$$I_{a1} = \frac{E_a}{Z_1} \quad (2.73)$$

Sedangkan Untuk menghitung Arus ganggaun di bus menggunakan rumus :

$$I_{a1} = \frac{V_f}{Z_1} \quad (2.73)$$

Dengan Keterangan :

I_a = Arus gangguan hubung singkat *Phase* ke tanah (A)

V_f = Tegangan sebelum gangguan (V)

E_a = Tegangan sumber (V)

V_a = Tegangan *Phase a* (V)

V_b = Tegangan *Phase b* (V)

V_c = Tegangan *Phase c* (V)

V_{a1} = Tegangan urutan positif (V)

V_{b2} = Tegangan urutan negatif(V)

V_{a0} = Tegangan urutan nol (V)

I_a = Arus *Phase a* (A)

I_b = Arus *Phase b* (A)

I_c = Arus *Phase c* (A)

I_{a1} = Arus urutan positif (A)

I_{a2} = Arus urutan negatif(A)

I_{a0} = Arus urutan nol (A)

Z_0 = Impedansi urutan nol (Ω)

Z_1 = Impedansi urutan positif (Ω)

Z_2 = Impedansi urutan negatif (Ω)

2.6.2 Impedansi

Impedansi (Z) merupakan hambatan total yang dihasilkan oleh rangkaian arus bolak-balik (AC) yang terdiri dari komponen resistansi (R) dan reaktansi (X). Berbeda dengan rangkaian arus searah (DC) yang hanya mengenal hambatan linear

(resistansi), pada rangkaian AC terdapat perbedaan fasa antara tegangan dan arus akibat adanya komponen induktif maupun kapasitif. Secara matematis, impedansi direpresentasikan sebagai bilangan kompleks yang terdiri dari bagian riil (resistansi) dan bagian imajiner (reaktansi). Persamaan dasar impedansi dituliskan pada rumus (2.74) sebagai berikut:

$$Z = R + jX \quad (2.74)$$

Di mana nilai reaktansi total (X) merupakan selisih antara reaktansi induktif (X_L) dan reaktansi kapasitif (X_C), yang dirumuskan dengan persamaan (2.75):

$$X = X_L - X_C \quad (2.75)$$

Sehingga persamaan (2.74) dapat dituliskan kembali menjadi:

$$Z = R + j(X_L - X_C) \quad (2.76)$$

Keterangan:

Z = Impedansi rangkaian (Ω)

R = Resistansi murni (Ω)

X = Reaktansi total (Ω)

X_L = Reaktansi Induktif (Ω)

X_C = Reaktansi Kapasitif (Ω)

j = Operator imajiner (Ω)

Operator j pada persamaan di atas berfungsi sebagai operator rotasi fasa sebesar 90° pada diagram fasor. Keberadaan operator j menunjukkan bahwa nilai

reaktansi bekerja secara tegak lurus terhadap resistansi murni pada bidang kompleks. Selain dalam bentuk persegi (rectangular) seperti pada Persamaan (2.76), impedansi juga dapat dinyatakan dalam bentuk polar untuk mempermudah perhitungan perkalian atau pembagian fasor, yaitu:

$$Z = |Z| \angle \theta \quad (2.77)$$

Dengan magnitudo impedansi ($|Z|$) dan sudut fasa (θ) ditentukan melalui persamaan (2.78) berikut:

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (2.78)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{X}{R} \right) \quad (2.79)$$

2.6.3 Sistem Per Unit

Satuan per Unit adalah standar yang digunakan dalam perhitungan, satuannya disebut dengan pu. Biasanya MVA_{dasar} dan KV_{dasar} berfungsi sebagai dasar untuk perhitungan satuan per unit sebelum impedansi dasar dan arus dasar dihitung. Penyebutnya menggunakan ketentuan dasar kemudian pembilangnya menggunakan parameter tegangan, daya, arus, impedansi pada sistem tenaga listrik untuk memperoleh besarnya satuan p.u (Palaha F at al., 2025). Biasanya sistem ini digunakan untuk memudahkan dalam perhitungan terutama pada sistem berbeda – beda level tegangannya maupun kesulitan – kesulitan karena berbagai ukuran sistem – sistem mulai dari pembangkit hingga konsumen.

Ada dua simbol untuk menyatakan kuantitas per unit dari suatu besaran pada peralatan/ komponen tenaga listrik, yaitu :

A. Per Unit atau PU

Per unit merupakan harga perbandingan antara harga / kualitas sebenarnya dengan suatu besaran dasar yang telah dipilih, atau bisa dinyatakan dalam persamaan 2.80 :

$$\text{Harga Per Unit}(pu) = \frac{\text{harga sebenarnya}}{\text{harga dasar (base)}} \quad (2.80)$$

B. Persen (%)

Persen adalah harga per unit dikalikan seratus atau dapat dinyatakan dalam persamaan 2.81 :

$$\text{Harga per Unit (pu)} = \frac{\text{harga sebenarnya}}{\text{harga dasar (base)}} \times 100\% \quad (2.81)$$

Harga dasar (base) yang dipilih / ditentukan tidak perlu secara keseluruhan untuk daya, tegangan, arus, atau impedansi, tetapi cukup ditentukan untuk base (MVA) dan tegangan (kV) sebagai relasi untuk mencari harga – harga dasar lainnya. Sedangkan untuk base nya yang lain dapat dicari dari kedua Base tersebut, yaitu (Palaha F at al., 2025) :

$$\text{Base Arus (KAmpere)} = \frac{\text{base daya (MVA)}}{\sqrt{3} \times \text{base tegangan (kV)}} \quad (2.82)$$

$$\text{Base Impedansi (ohm)} = \frac{[\text{base tegangan (kV)}]^2}{\text{base daya (MVA)}} \quad (2.83)$$

Sedangkan harga per unit dari masing – masing besaran dapat dicari dengan persaman 2.84, 2.85 dan 2.86 berikut :

$$\text{Per Unit Tegangan} = \frac{\text{harga tegangan sebenarnya}}{\text{harga dasar tegangan}} \quad (2.84)$$

$$\text{Per Unit Arus} = \frac{\text{harga arus sebenarnya}}{\text{harga base arus}} \quad (2.85)$$

$$\text{Per Unit Impedansi} = \frac{\text{harga impedansi sebenarnya}}{\text{harga base impedansi}} \quad (2.86)$$

Tetapi, jika base daya dan base tegangan yang ditentukan bukan daya dan komponen itu sendiri, maka harga per unit impedansinya akan berubah. Dari rumus di atas maka didapatkan persamaan untuk harga impedansi per unit yang baru, adalah:

$$\text{Impedansi}_{baru}(pu) = \text{Impedansi}_{lama}(pu) \times \left[\frac{kV_{lama}}{kV_{baru}} \right]^2 \times \left[\frac{MVA_{lama}}{MVA_{baru}} \right] \quad (2.87)$$

2.6.4 Daya Hubung Singkat

Menurut Camara (2024), salah satu metode yang dapat dilakukan untuk menganalisis hubung singkat yakni menggunakan metode MVA. Metode ini menghitung arus gangguan maksimum dengan asumsi sumber tak hingga. Dalam metode ini menggunakan konsep per-unit untuk menentukan daya hubung singkat (MVA_{SC}) dan arus hubung singkat (I_{SC}) dengan Persamaan 2.88 dan 2.89 berikut:

$$I_{SC} = \frac{I_{nominal}}{Z} \quad (2.88)$$

$$MVA_{SC} = I_{SC} \times V \times \sqrt{3} \quad (2.89)$$

Dengan keterangan:

MVA_{SC} = Daya hubung singkat (MVA)

$I_{nominal}$ = Arus Listrik Maksimum (A)

Z = Impedansi

I_{sc} = Arus hubung singkat (A)

2.7 Komponen Proteksi Sistem Tenaga Listrik

Komponen proteksi sistem tenaga listrik adalah komponen yang dirancang menjadi sebuah sistem untuk mengidentifikasi kondisi sistem tenaga listrik dan bekerja berdasarkan informasi seperti arus, tegangan atau sudut *Phase*. Komponen proteksi pada umumnya terdiri dari beberapa elemen yang dirancang untuk mengamati kondisi sistem dan melakukan suatu tindakan berdasarkan sistem yang diamatinya.

2.7.1 Transformator

Prinsip kerja dari sebuah transformator adalah trafo yang terdiri dari inti besi dan lilitan. Pada dua sisi inti besi tersebut dililit oleh kawat yang terhubung pada 2 buah terminal trafo yakni terminal primer dan terminal sekunder. Sisi primer merupakan bagian trafo yang terhubung dengan masukan (input) sedangkan sisi sekunder merupakan bagian trafo yang terhubung dengan keluaran (output) (Asfari Hariz Santoso et al., 2023). Penggunaan transformator yang sangat sederhana dan andal merupakan hal penting dalam pemakaian penyaluran tenaga listrik arus bolak-balik, karena arus bolak-balik sangat banyak dipergunakan untuk pembangkitan dan penyaluran tenaga listrik.

2.7.1.1 Impedansi Transformator

Dalam menghitung arus gangguan hubung singkat dibutuhkan perhitungan impedansi transformator. Dalam perhitungan impedansi transformator yang

dibutuhkan adalah nilai reaktansinya, sedangkan nilai tahananya diabaikan karena harganya kecil

$$Z = \frac{kV^2}{MVA} \quad (2.90)$$

Dengan Keterangan :

Z = Impedansi transformator (Ω)

kV = Tegangan sisi sekunder trafo tenaga (kV)

MVA = Kapasitas daya transformator (MVA)

2.7.1.2 Reaktansi Transformator

Untuk menghitung reaktansi transformator dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

$$X_T = X_t \times \frac{MVA_2}{MVA_1} \quad (2.91)$$

Dengan Keterangan :

X_T = Reaktansi total (Ω)

X_t = Reaktansi per unit

MVA = Kapasitas daya transformator (MVA)

2.7.2 *Current Transformator (CT) dan Potensial Transpormator (PT)*

Menurut (Mulyana, 2023) Transformator arus adalah transformator instrumen yang dalam kondisi pemakaian normal, arus sekundernya proporsional dengan arus primer dan berbeda fase dengan sudut mendekati nol,

untuk arah hubungan yang bersesuaian. Transformator Arus (CT) merupakan salah satu peralatan pengukuran pada proses transaksi energi yang memiliki fungsi krusial dalam perhitungan energi. Pengukuran transaksi energi harus dilakukan dengan tepat agar tidak ada losses yang timbul.

Sedangkan potensial Transformator adalah Transformator tegangan yang menurunkan tegangan dari 20.000 Volt menjadi 100 Volt untuk mensuplai tegangan pada alat ukur (Madia et al, 2025).

2.7.3 Relay Proteksi

Relay proteksi memiliki fungsi antara lain untuk melokalisir bagian sistem yang terganggu serta memisahkan secepatnya sehingga sistem lainnya tidak terganggu, mengurangi kerusakan yang lebih parah pada peralatan yang terganggu, mengurangi pengaruh gangguan terhadap sistem yang tidak terganggu didalam sistem tersebut. Adapun syarat-syarat *Relay* proteksi antara lain selektif, reliable (handal), peka, cepat dan ekonomis / sederhana (Sungkowo et al., 2022) .

Relay ini memiliki peran sangat penting dalam sistem tenaga listrik karena mampu mendeteksi gangguan secara cepat dan akurat, lalu mengirimkan sinyal ke pemutus sirkuit (*circuit breaker*) untuk memutuskan bagian sistem yang terganggu. *Relay* proteksi dirancang untuk mendeteksi, mengukur, dan mengidentifikasi komponen yang tidak berfungsi di dalam sistem, sambil segera mengisolasi elemen-elemen ini untuk memastikan operasi normal berkelanjutan dari sistem yang tidak

terpengaruh meningkatkan keselamatan baik untuk sistem tenaga listrik maupun bagi operator dan lingkungan sekitarnya.

2.7.4 Pemutus Tenaga

Pemutus Tenaga atau Circuit Breaker memiliki peran yang sangat vital dalam menjaga keamanan dan proteksi sistem tenaga listrik serta menangani suatu gangguan. Pemutus Tenaga (PMT) memiliki peranan utama dalam menangani arus hubung singkat yang berpotensi mencapai level yang jauh melampaui arus nominal yang biasanya mengalir melalui konduktor dan isolator. Sebaliknya, Pemutus adalah sebuah perangkat yang digunakan untuk memutus aliran listrik pada peralatan dalam sistem tegangan tinggi, khususnya untuk memisahkan beban yang membutuhkan perbaikan dari yang harus tetap terhubung (Prakoso & Joko, 2024).

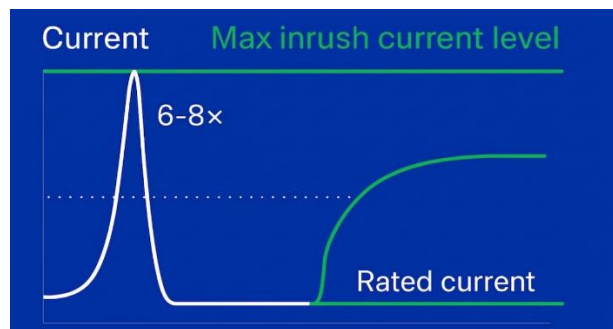
PMT dengan *Relay* OCR harus memiliki sinkronisasi dengan menyediakan jumlah dan waktu yang tepat, dan OCR mengarahkan pelaksanaan PMT untuk menghasilkan suatu tindakan dengan mengimbangi dan menjaga koordinasi antar komponen dengan keselarasan yang semestinya pada sistem.

2.8 Motor Induksi

Motor induksi merupakan suatu jenis motor listrik yang paling sederhana, konstruksi kuat dan mempunyai ukuran KVA yang berbedabeda. Motor induksi merupakan suatu motor yang dicatu arus bolak-balik pada statornya secara langsung dan pada rotornya dengan imbas atau transformator dari stator. Disebut motor induksi disebabkan dari kenyataan bahwa arus yang mengalir pada rotor

bukan diperoleh dari suatu sumber tertentu melainkan arus yang terinduksi akibat adanya perbedaan relatif antara putaran poros rotor dengan medan putar yang terjadi pada stator. Medan putar inilah yang menjadi prinsip dasar dari motor induksi 3 fasa, sedang motor induksi satu fasa tidak menghasilkan medan putar.

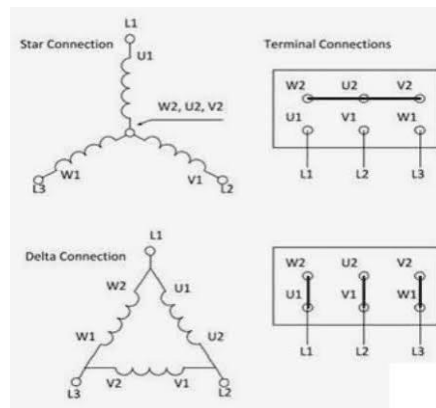
2.8.1 Starting Motor



Gambar 2. 12 Gambar Arus Starting Motor

Motor induksi tiga fasa adalah alat penggerak yang paling banyak digunakan dalam global industri. Hal ini dikarenakan motor induksi memiliki konstruksi yang sederhana, kokoh, harganya cukup murah, dan perawatannya yang praktis, pada mode starting ini, akan timbul arus induksi yang tinggi pada rotor, sehingga menimbulkan arus yang besar (*inrush current*) yang menuju keterminal stator. Besarnya arus start awal tersebut dapat mencapai 6 sampai 8 kali dari arus nominal motor tersebut. Fenomena melonjaknya arus awal saat start motor induksi tersebut dapat mengakibatkan terjadinya drop tegangan pada pasokan tegangan (Sahnur et al., 2023).

2.8.2 Rangkaian Star Delta



Gambar 2. 13 Rangkaian Star Delta

Pemilihan konfigurasi belitan antara hubungan Bintang (*Wye/Y*) dan Segitiga (*Delta/Δ*) memberikan implikasi yang signifikan terhadap karakteristik elektrik motor induksi, terutama pada saat proses pengasutan (*starting*). Pada konfigurasi hubungan Bintang, tegangan fase yang jatuh pada setiap belitan motor tereduksi sebesar $1/\sqrt{3}$ atau sekitar 57,7% dari *line voltage*, yang secara linear mengakibatkan arus pengasutan turun menjadi sepertiga (33,3%) dibandingkan jika motor langsung diasut dalam hubungan Delta (Don D. Ratnayaka at al.,). Penurunan arus pengasutan ini sangat menguntungkan bagi stabilitas sistem kelistrikan karena dapat meminimalisasi terjadinya kedipan tegangan (*voltage dip*). Namun, karena nilai torsi elektromagnetik motor berbanding lurus dengan kuadrat tegangan yang diterimanya, maka penurunan tegangan pada hubungan Bintang juga menyebabkan torsi pengasutan (*starting torque*) berkurang secara drastis hingga menyisakan sepertiga dari kapasitas torsi nominalnya pada hubungan Delta. Oleh karena itu, metode pengasutan *Star-Delta* umumnya diaplikasikan pada motor-motor induksi tiga fasa berkapasitas besar. Dengan metode star delta atau bintang segitiga digunakan untuk mengurangi arus start motor hingga 30% atau lebih dari arus start

normalnya. Metode ini umum digunakan untuk motor listrik dengan daya menengah hingga besar (Rahman et al., 2025). Keuntungan utama dari pengasutan star delta adalah mengurangi lonjakan arus start tanpa memerlukan biaya tambahan yang signifikan.

2.9 Impedansi Sumber

Impedansi sumber dapat dicari menggunakan persamaan (2.92) berikut :

$$Z_s = \frac{(kV_{l-l})^2}{MVA_{hs}} \quad (2.92)$$

Untuk mendapatkan nilai MVA_{hs} perlu adanya nilai hubung singkat pada busbar sisi tegangan tinggi yang mewakili dari nilai seluruh unit yang beroperasi. MVA_{hs} dapat diketahui dari persamaan (2.93) sebagai berikut:

$$MVA_{hs} = \sqrt{3} \times kV_{l-l} \times I_{hs} \quad (2.93)$$

Keterangan:

MVA_{hs} = Daya Hubung Singkat (MVA)

I_{hs} = Arus hubung singkat (A)

kV_{l-l} = Tegangan *Phase ke Phase* (V)

2.10 Impedansi Beban

Untuk Mencari nilai daya aktif menggunakan rumus di bawah ini:

$$P = S \times \cos\phi \quad (2.94)$$

Lanjutnya mencari daya reaktif yaitu sebagai berikut:

$$Q = S \times \sin\phi \quad (2.95)$$

Kemudian mencari nilai Impedansi dengan rumus sebagai berikut:

$$Z = (R + jX) \quad (2.96)$$

$$R = \frac{(V_{pu})^2 \times S_b \times P}{P^2 + Q^2} \quad (2.97)$$

$$X = \frac{(V_{pu})^2 \times S_b \times Q}{P^2 + Q^2} \quad (2.98)$$

Keterangan:

Z = Impedansi beban (Ohm)

R = Resistansi/hambatan (Ohm)

X = Beban Reaktansi (Ohm)

P = Daya nyata (Watt)

Q = Daya beban reaktif

2.11 Over Current *Relay*

Relay arus berlebih merupakan perangkat pelindung yang aktif ketika besarnya arus listrik melampaui ambang batas yang telah ditentukan. *Relay* ini berfungsi untuk melindungi peralatan dari gangguan korsleting interfase, korsleting fase tunggal ke ground, dan aplikasi tertentu dapat digunakan untuk perlindungan beban. Besarnya arus hubung singkat berkurang dengan jarak dari sumber, mempengaruhi waktu operasi *Relay* (Hasibuan et al., 2025).

Prinsip operasi *Relay* arus lebih ini difokuskan pada kondisi arus berlebih, di mana *Relay* akan diaktifkan ketika arus yang mengalir melebihi nilai ambang

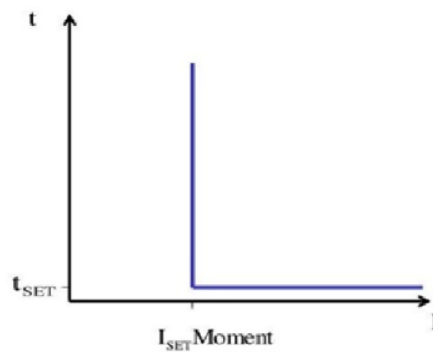
yang telah ditetapkan (I_s). *Relay* arus lebih bekerja pada dua kondisi, yaitu saat arus kembali (I_d) dan arus kerja (I_p). Arus kembali adalah arus maksimum yang mengakibatkan *Relay* gagal berfungsi secara normal, sedangkan arus kerja adalah arus minimum yang mengakibatkan *Relay* membuka dan menutup kontakannya (Ramandani et al., 2023). *Relay* arus berlebih ini berfungsi sebagai pelindung untuk berbagai komponen sistem tenaga listrik, termasuk jaringan transmisi, motor, generator, dan trafo.

2.11.1 Jenis Overcurrent *Relay* Berdasarkan Karakteristik Waktu

Berdasarkan karakteristik waktu *Relay* dibedakan menjadi beberapa jenis, yaitu sebagai berikut :

2.11.1.1 *Relay* Arus Lebih Sesaat (*Instantaneous Relay*)

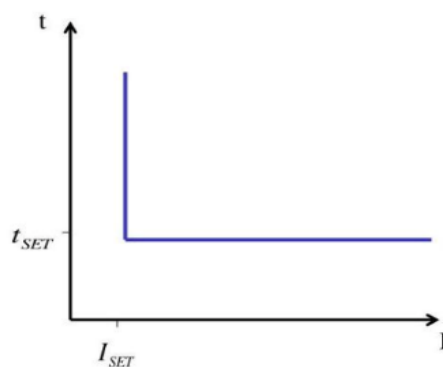
Relay Arus Lebih Sesaat adalah *Relay* yang dirancang untuk mendeteksi kondisi arus berlebih yang beroperasi tanpa penundaan waktu yang ditentukan, *Relay* ini segera aktif ketika arus melampaui ambang batas yang telah ditentukan (Hameed et al., 2020). Meskipun secara teoritis waktu kerja *Relay* sama dengan nol, namun di area kerja yang dekat dengan nilai pengaturan masih terdapat waktu tunda beberapa milidetik, untuk waktu kerjanya 20-100 ms (Laksono et al., 2022). Kurva karakteristik *Instantaneous Relay* dapat dilihat pada Gambar 2.12 :



Gambar 2. 14 Relay Arus Lebih Sesaat (*Instantaneous Relay*)

2.11.1.2 Relay arus lebih waktu tertentu (*Definite Time Relay*)

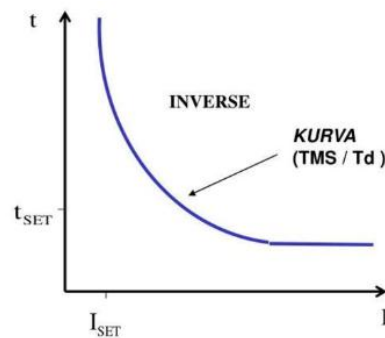
Relay Arus Lebih Definite didefinisikan sebagai *Relay* yang memiliki waktu tinggal yang telah ditentukan, *Relay* ini tidak bergantung pada besarnya nilai arus gangguan (Hendra Prasetya et al., 2022). *Definite Time Relay* beroperasi dengan interval waktu yang konstan, tanpa bergantung pada magnitudo arus gangguan. Ketika arus gangguan melampaui nilai ambang yang telah ditetapkan, *Relay* akan diaktifkan dalam periode waktu yang tetap, terlepas dari seberapa besar arus gangguan tersebut. Kurva karakteristik yang menggambarkan perilaku *Definite Time Relay* ini dapat diamati pada Gambar 2. 13:



Gambar 2. 15 Relay Arus Lebih Waktu Tertentu (*Definite Time Relay*)

2.11.1.3 Relay Arus Lebih Inverse (*Inverse time Relay*)

Relay arus lebih inverse merupakan *Relay* yang dimana waktu tundanya menunjukkan karakteristik yang bergantung pada besarnya arus gangguan. Akibatnya, peningkatan arus gangguan menyebabkan penurunan waktu operasi relé, sehingga terbentuk hubungan sebanding terbalik antara arus gangguan dan durasi operasi *Relay* (Multi & Addaus, 2022.). Kurva karakteristik *Inverse time Relay* dapat dilihat pada Gambar 2.14.



Gambar 2. 16 Relay Arus Lebih Inverse (*Inverse time Relay*)

2.11.2 Setting Over Current Relay

Perhitungan *Over Current Relay* Sebagai Berikut (Multi & Addaus, 2022) :

1. Arus Nominal

Arus nominal adalah arus kerja dari suatu peralatan listrik dapat diketahui melalui persamaan 2.99 :

$$I_n = I_{base} = \frac{S_{base}}{\sqrt{3} \times V_{base}} \quad (2.99)$$

Keterangan:

$$I_n = I_{base} = \text{Arus Nominal (A)}$$

S_{base} = Daya Semu (KVA)

V_{base} = Tegangan (KV)

2. Rasio CT

Rasio CT ditentukan dari arus nominal peralatan atau dari kabel pada umumnya dapat diketahui melalui persamaan 2.100 :

$$Rasio\ CT = \frac{Sekunder}{Primer} \quad (2.100)$$

3. Arus Setting *Relay* Arus Lebih Untuk karakteristik Invers dan Definit

Dalam *standart British* BS 142 batas settingannya ialah $1.1 I_{base} < I_{set} < 1,3 I_{base}$. Untuk mendapatkan nilai Arus setting *Relay* arus lebih dapat dihitung melalui persamaan 2.101 dan 2.102 :

$$I_{set\ OCR} = 1.2 \times I_{base} (Primer) \quad (2.101)$$

Nilai tersebut adalah nilai primer, untuk mendapatkan nilai sekunder, maka dapat di hitung menggunakan rumus :

$$I_{set\ OCR} = I_{set\ primer} \times \frac{1}{Rasio\ CT} (Sekunder) \quad (2.102)$$

Keterangan :

I_{set} = Besarnya arus setting sisi primer dan sekunder (A)

I_{base} = Arus Nominal (A)

4. Perhitungan Untuk Karakteristik *Instantaneous*

Relaya waktu instan berfungsi sebagai pengaman *sistem* tenaga listrik dari gangguan hubung singkat yang paling kecil. Untuk melindungi sistem dari

gangguan, pengaturan arus pada *Relay* waktu *instan* dilakukan dengan cara tertentu. dari arus hubung singkat antara *Phase*, sehingga setting di tetapkan (Prasetyo et al., 2022):

- Lowset

$$I_{Lowset} = 1,1 \times FLA < I_{sc} < 1,8 \times FLA \quad (2.103)$$

$$I_{Lowset} Pick up = \frac{I_{Lowset}}{Ratio_{CT}} \quad (2.104)$$

- Highset

Nilai *Highset* pada motor :

$$I_{starting} = \%LRC \times FLA \quad (2.105)$$

Penentuan nilai persentase *Locked Rotor Current* (%LRC) didasarkan pada standar *National Electrical Manufacturers Association* (NEMA). NEMA telah menetapkan kode huruf (*code letter*) untuk mengklasifikasikan karakteristik motor induksi berdasarkan nilai kVA locked-rotor per daya kuda (HP). Klasifikasi kode huruf beserta nilai batasan kVA minimum dan maksimum ditunjukkan pada Tabel 2.1.

Table 2. 1 Standar Nema Untuk menentukan LRC

Code Letter	kVA Minimum (per HP)	kVA Maksimum (per HP)
A	1	3,14
B	3,15	3,54
C	3,55	3,99

Code Letter	kVA Minimum (per HP)	kVA Maksimum (per HP)
D	4	4,49
E	4,5	4,99
F	5	5,59
G	5,6	6,29
H	6,3	7,09
I	7,1	7,99
K	8	8,99

Rentang nilai kVA minimum dan maksimum pada standar NEMA *Code Letter* digunakan secara selektif berdasarkan tujuan simulasi. Nilai kVA maksimum dipilih dengan pendekatan skenario terburuk (*worst-case scenario*) untuk menghitung arus pengasutan puncak guna menghindari terjadinya *nuisance* tripping pada *Relay* proteksi saat motor mulai berputar. Sebaliknya, nilai kVA minimum diaplikasikan untuk menguji sensitivitas kurva proteksi, guna menjamin bahwa *Relay* tetap andal dalam mendeteksi kondisi rotor terkunci (stalling) meskipun arus gangguan berada pada titik terendah dari toleransi karakteristik desain motor.

$$I_{Highset} = 1,1 \times I_{Starting} \quad (2.106)$$

$$I_{Lowset} \text{ Pick up} = \frac{I_{Lowset}}{Rasio_{CT}} \quad (2.107)$$

5. Setting Waktu (TMS) *Relay* Arus Lebih

Setting Waktu (TMS) adalah waktu yang dibutuhkan oleh suatu pengaman (*Relay*) untuk bekerja dapat diperoleh melalui persamaan (2.94).

$$TMS = \frac{\left[\left(\frac{I_{Fault}}{I_{Set}} \right)^{\alpha} - 1 \right]}{k} \times t \quad (2.108)$$

$$Td = \frac{k \times TMS}{\left[\left(\frac{I_{falt}}{I_{set}} \right)^{\alpha} - 1 \right]} \quad (2.109)$$

Keterangan :

t = Waktu operasi (s)

TMS = *Time multiple setting* (tanpa satuan)

k = Konstanta *standart inverse*

I_{Fault} = Arus gangguan hubung singkat (A)

I_{Set} = Arus setting primer pada *Relay* (A)

α : konstanta *standar invers*

Berikut adalah faktor α dan k tergantung pada kurva arus arus vs waktu menurut standar IEC 60255 ditunjukkan pada tabel 2.1.

Table 2. 2 Faktor α dan k tergantung pada kurva arus vs waktu

No	Nama Kurva	α	k
1	<i>Definite Time</i>	-	-
2	<i>Standarr Inverse</i>	0.02	0,14
3	<i>Very Inverse</i>	1,0	13,5
4	<i>Extremely Inverse</i>	2,0	80
5	<i>Long Invers</i>	1,0	120
5	<i>Instantaneous</i>	-	-

2.12 Koordinasi Proteksi

2.12.1 Konsep Koordinasi Proteksi

Menurut Fajar Dwiandra Tanjung et al., (2025) Koordinasi proteksi adalah pengaturan parameter-parameter peralatan proteksi (arus pickup, waktu kerja,

kurva) sedemikian rupa sehingga ketika terjadi gangguan, hanya peralatan proteksi yang paling dekat dengan gangguan yang bekerja, sementara peralatan proteksi yang lebih jauh (backup) tetap dalam kondisi standby.

Manfaat koordinasi proteksi yang baik:

1. Meminimalkan area pemadaman
2. Mengurangi kerusakan peralatan
3. Meningkatkan kontinuitas layanan
4. Meningkatkan selektivitas sistem proteksi

2.12.2 Metode Koordinasi Proteksi

1. Metode Arus Pickup

Mengatur arus pickup peralatan primary lebih kecil dari arus pickup peralatan backup. Metode ini hanya efektif untuk gangguan dekat.

2. Metode Waktu Kerja

Mengatur waktu kerja *Relay* sedemikian rupa sehingga *Relay* yang lebih dekat dengan gangguan bekerja lebih cepat, sementara *Relay* yang lebih jauh bekerja lebih lambat. Perbedaan waktu (time grading margin) umumnya ditetapkan sebesar 0.3-0.5 detik sesuai standar IEC 60255.

3. Metode Kurva Karakteristik

Menggunakan kurva karakteristik yang berbeda untuk *Relay* primary dan backup sehingga kurva tidak saling berpotongan (tidak intersect) dan *Relay* backup bekerja dengan jelas setelah *Relay* primary.

2.12.3 Indikator – Indikator Koordinasi Proteksi

Koordinasi *Relay* proteksi merupakan suatu pengaturan karakteristik dan waktu kerja antar *Relay* agar sistem proteksi dapat bekerja secara selektif, andal, dan efektif dalam mengamankan sistem tenaga listrik. Prinsip koordinasi ini mengacu pada standar internasional seperti yang ditetapkan oleh *International Electrotechnical Commission* dan *Institute of Electrical and Electronics Engineers*. Adapun indikator keberhasilan koordinasi *Relay* proteksi adalah sebagai berikut:

1. Selektivitas (*Selectivity / Discrimination*)

Relay yang terdekat dengan lokasi gangguan harus bekerja terlebih dahulu untuk mengisolasi bagian sistem yang terganggu, sedangkan *Relay* cadangan (backup) hanya bekerja apabila *Relay* utama gagal beroperasi. Hal ini bertujuan untuk meminimalkan daerah pemadaman dan menjaga kontinuitas pelayanan sistem tenaga listrik.

2. Margin Waktu Koordinasi (*Coordination Time Interval / CTI*)

Terdapat selisih waktu operasi antara *Relay* utama dan *Relay* cadangan untuk menghindari operasi bersamaan. Margin waktu koordinasi pada umumnya berada pada rentang 0,3–0,5 detik untuk *Relay* arus lebih, sehingga *Relay* cadangan memiliki waktu tunda yang cukup apabila *Relay* utama gagal bekerja.

3. Kurva Karakteristik Tidak Berpotongan (*Non-Intersecting TCC Curve*)

Kurva karakteristik waktu–arus (*Time Current Characteristic / TCC*) antara *Relay* utama dan *Relay* cadangan tidak boleh saling berpotongan pada seluruh rentang arus gangguan. *Relay* utama harus selalu

memiliki waktu operasi yang lebih cepat dibandingkan *Relay* cadangan pada setiap nilai arus gangguan.

4. Sensitivitas (*Sensitivity*)

Relay harus mampu mendeteksi arus gangguan minimum yang mungkin terjadi pada ujung terjauh sistem yang diamankan. Oleh karena itu, arus pickup *Relay* harus lebih kecil dari arus gangguan minimum, sehingga proteksi tetap efektif pada kondisi gangguan terendah.

5. Kecepatan Operasi (*Operating Time*)

Sistem proteksi harus mampu memutus gangguan dalam waktu yang secepat mungkin tanpa mengurangi aspek selektivitas. Untuk karakteristik *instantaneous* Waktu operasi yang cepat bertujuan untuk membatasi dampak kerusakan peralatan serta menjaga stabilitas sistem tenaga listrik.

6. Keandalan (*Reliability*)

Relay proteksi harus memiliki tingkat keandalan yang tinggi, yaitu mampu bekerja saat terjadi gangguan (*dependability*) dan tidak bekerja pada kondisi normal atau gangguan di luar zona proteksinya (*security*).

2.12.4 *Time Current Characteristic (TCC) Curve*

TCC Curve adalah representasi grafis dari waktu kerja *Relay* terhadap arus yang mengalir. Sumbu horizontal menunjukkan arus (skala logaritmik) dan sumbu vertical menunjukkan waktu kerja (skala logaritmik) Karakteristik *TCC Curve*:

1. Menunjukkan hubungan non-linear antara arus dan waktu
2. Memudahkan visualisasi koordinasi proteksi

3. Dapat menunjukkan apakah kurva *Relay* primary dan backup benar-benar terpisah (selektif)

2.13 Standar IEC 60255 dan IEEE 242-2001

2.13.1 Standar IEC 60255

Menurut standar IEC 60255, dalam perencanaan dan evaluasi koordinasi sistem proteksi berbasis *Relay* arus lebih, pengaturan waktu kerja antara *Relay* utama (*primary Relay*) dan *Relay* cadangan (*backup Relay*) harus memperhatikan adanya margin waktu (*grading time*) yang memadai. Secara umum, margin waktu yang direkomendasikan berada pada kisaran 0,3–0,5 detik untuk menjamin selektivitas, sehingga *Relay* utama memiliki kesempatan bekerja terlebih dahulu sebelum *Relay* cadangan beroperasi. Selain itu, karakteristik kurva waktu–arus (*Time Current Characteristic*) antar *Relay* yang terkoordinasi tidak boleh saling berpotongan (*intersect*), karena kondisi tersebut dapat menyebabkan ketidakteraturan urutan operasi dan berpotensi menurunkan keandalan sistem proteksi. Lebih lanjut, pada kondisi arus gangguan minimum sekalipun, margin waktu koordinasi tetap harus tersedia agar prinsip selektivitas tetap terpenuhi, yaitu *Relay* yang paling dekat dengan titik gangguan bekerja terlebih dahulu, sementara *Relay* cadangan hanya akan beroperasi apabila *Relay* utama gagal bekerja. Dengan demikian, pengaturan koordinasi yang sesuai standar IEC 60255 mampu menjamin sistem proteksi bekerja secara selektif, andal, dan aman. Untuk setting elemen *instantaneous* batas toleransi waktu tunda sebesar 0,01 – 0,02 detik.

2.13.2 IEEE 242-2001

Berdasarkan IEEE Std 242-2001 interval koordinasi waktu (*coordinating time interval/CTI*) antara *Relay* utama dan *Relay* cadangan berada pada kisaran 0,2–0,5 detik, tergantung jenis peralatan (*Relay* elektromekanik atau digital) dan waktu kerja circuit breaker. Nilai ini mencakup waktu kerja *Relay*, waktu buka pemutus tenaga, serta faktor toleransi kesalahan alat. Untuk penentuan arus pickup *Relay* arus lebih (OCR), biasanya disetel sebesar 110%–125% dari arus beban maksimum, agar *Relay* tidak bekerja pada kondisi beban normal tetapi tetap sensitif terhadap gangguan. Dalam analisis hubung singkat untuk setting *Relay*:

- Arus gangguan maksimum digunakan untuk mengecek kemampuan peralatan dan setting *instantaneous*.
- Arus gangguan minimum digunakan untuk memastikan *Relay* tetap dapat bekerja (sensitivitas minimal umumnya $\geq 1,5$ kali arus pickup).

Pada kurva koordinasi *Time Current Characteristic* (TCC), standar menekankan bahwa:

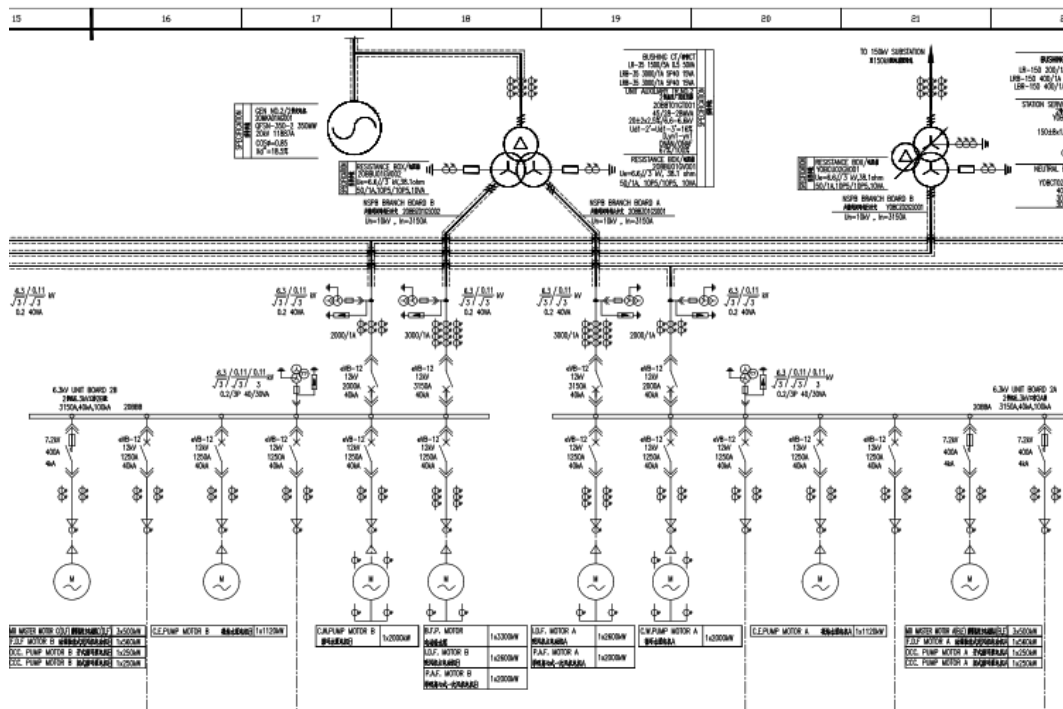
- Kurva *Relay* tidak boleh saling berpotongan.
- *Relay* yang paling dekat dengan titik gangguan harus memiliki waktu kerja paling cepat.
- *Relay* backup harus memiliki penundaan sesuai margin waktu koordinasi.

Untuk setting elemen *instantaneous*, umumnya disetel di atas arus gangguan maksimum pada sisi hilir agar tidak mengganggu selektivitas, tetapi tetap di bawah

arus gangguan pada zona proteksinya sendiri, durasi operasi *Relay* antara 0,01 – 0,05 detik.

2.14 Data Existing

2.14.1 Data Single Line Diagram Unit 2



Gambar 2. 17 Gambar Single Line Unit 2

2.14.2 Data Generator

Tabel 2.3 di bawah ini menyajikan karakteristik spesifik dari Data Generator berdasarkan nameplate rating.

Table 2. 3 Data Generator

Data Generator	
Type	QFSN – 350 - 2
Rated capacity	412 MVA

Data Generator	
Rated active power	350 MW
Rated voltage	20 kV
Rated current	11887 A
Rated frequency	50 Hz
Rated power factor	0.85
Xd''	18,5 %
Rated rotating speed	3000 rpm

2.14.3 Data Transformer

Tabel 2.4 di bawah ini menyajikan karakteristik spesifik dari Data Transformator berdasarkan nameplate rating.

Table 2. 4 Data Transformator

Data Transformer	
Type	SFPZ-45000/500TH
Vektor Grup	Dyn1yn1
Rated Power	45 MVA
Frequency	50 Hz
HV Side	20.000 V
HV Rated Current	1299.04 A
LV1/LV2 Side	6300 V / 6300 V
LV Rated Current	2499.36 A / 2499.36 A
Short Circuit Voltage	16 %

2.14.4 Data *Current Transformer*

Tabel 2.5, 2.6, dan 2.7 di bawah ini menyajikan karakteristik spesifik dari Data *Current Transformer* berdasarkan nameplate rating.

Table 2. 5 Data Transformer Generator

<i>Current Transformer</i>	Primer	Sekunder
Rated Current Rasio (A)	15000	5

Table 2. 6 Data Current Transformer Transformator

<i>Current Transformer</i>	Primer	Sekunder
Rated Current Rasio (A)	3000	1

Table 2. 7 Data Current Transformer di Motor Induksi

<i>Current Transformer</i>	Primer	Sekunder
Rated Current Rasio (A)	100	1
Rated Output (VA)	10	5
Accuracy Classes	0.5	5P25
I_{th}	40/1 (kA/s)	
I_{dyn}	100 kA	

2.14.5 Data Penghantar

Penghantar yang digunakan pada sistem setiap penyulang adalah jenis A3C-S atau AAAC S dengan luas penampang 150 mm^2 .

AAAC-S : All Aluminium Alloy Conductor, XLPE

Insulated

Konduktor	: Jalinan campuran alumunium. (Standed Alumunium Alloy (AAAC))
Isolasi	: XLPE terekstrusi
Penggunaan	: Digunakan untuk jalur Distribusi udara 20 -6,3 kV
Spesifikasi	: SPLN 41-8:1981 SPLN 41-10:1986

Table 2. 8 Data Penghantar

Luas Penampang (mm^2)	Inpedansi Urutan Positif dan Urutan Negatif (Ohm/Km)	Impedansi Urutan Nol (Ohm/Km)
35	0,9217 + j 0,3790	1,0697 + j 1,6665
50	0,6452 + j 0,3678	0,7932 + j 1,6553
70	0,4608 + j 0,3572	0,6088 + j 1,6447
95	0,3096 + j 0,3449	0,4876 + j 1,6324
120	0,2688 + j 0,3376	0,4168 + j 1,6324
150	0,2162 + j 0,3305	0,3631 + j 1,6180
185	0,1744 + j 0,3239	0,3224 + j 1,6114
240	0,1344 + j 0,3158	0,2824 + j 1,6034

2.14.6 Data Pembebanan

Tabel 2.9 di bawah ini menyajikan karakteristik spesifik dari Data Pembebanan motor induksi 3 *Phase* berdasarkan nameplate rating.

Table 2. 9 Data Pembebanan

Nama Motor Induksi	<i>Manufactur e</i>	<i>Type</i>	<i>Rated Volta ge (Volt)</i>	<i>Daya (kW)</i>	<i>Frequ ency (Hz)</i>	<i>Phase</i>	<i>Speed (Rpm)</i>	<i>Con necti on</i>	<i>Rated Curren t (Amper e)</i>	<i>Protecti on Degree</i>	<i>Pow er Fact or</i>	<i>Insulati on Class</i>	<i>Weig ht (Kg)</i>
<i>Motor Primary Air Fan A dan B</i>	<i>SHANGHAI ELECTRIC</i>	YKK63 0-4	6300	2000	50	3	1487	Y	208	IP 55	0,92 2	F	1055 0

Nama Motor Induksi	Manufaktur	Type	Rated Voltage (Volt)	Daya (kW)	Frequency (Hz)	Phase	Speed (Rpm)	Con necti on	Rated Current (Amper e)	Protecti on Degree	Pow er Fact or	Insulati on Class	Weig ht (Kg)
<i>Motor Force Draft Fan A dan B</i>	<i>SHANGHAI ELECTRIC</i>	YKK50 0-6	6300	550	50	3	991	Y	61.1	IP 55	0.88 8	F	4200
<i>Motor Inducted Draft Fan A dan B</i>	<i>SHANGHAI ELECTRIC</i>	YYKK8 00-8	6300	2600	50	3	746	Y	238	IP 55	0.86	F	1485 0

Nama Motor Induksi	Manufaktur	Type	Rated Voltage (Volt)	Daya (kW)	Frequency (Hz)	Phase	Speed (Rpm)	Connection	Rated Current (Amper e)	Protection Degree	Power Factor	Insulation Class	Weight (Kg)
<i>Motor Circulating Water Pump Adan B</i>	<i>SHANGHAI ELECTRIC</i>	YLKK1000-10	6000	1800	50	3	372	Y	233	IP 54	0.785	F	30400
<i>Motor Mill A, B, C, D, E, dan F</i>	<i>SHANGHAI ELECTRIC</i>	YHP560-6	6300	500	50	3	980	Y	59.3	IP 55	0.831	F	4200

Nama Motor Induksi	Manufaktur	Type	Rated Voltage (Volt)	Daya (kW)	Frequency (Hz)	Phase	Speed (Rpm)	Connection	Rated Current (Amper e)	Protection Degree	Power Factor	Insulation Class	Weight (Kg)
<i>Motor Condensate Extraction Pump A dan B</i>	<i>SHANGHAI ELECTRIC</i>	YLKS500-4	6300	1120	50	3	1490	Y	117.9	IP 55	0.912	F	4200
<i>Motor Close Cooling</i>	<i>SHANGHAI ELECTRIC</i>	YKK400-6	6300	250	50	3	989	Y	29.8	IP 55	0.82	F	4200

Nama Motor Induksi	Manufaktur	Type	Rated Voltage (Volt)	Daya (kW)	Frequency (Hz)	Phase	Speed (Rpm)	Connection	Rated Current (Amper e)	Protection Degree	Power Factor	Insulation Class	Weight (Kg)
<i>Circulating Water Pump A dan B</i>													
<i>Open Cooling Circulating Water</i>	<i>SHANGHAI ELECTRIC</i>	YKK40 0-6	6300	250	50	3	989	Y	29.8	IP 55	0.82	F	4200

Nama Motor Induksi	<i>Manufactur e</i>	<i>Type</i>	<i>Rated Volta ge (Volt)</i>	<i>Daya (kW)</i>	<i>Frequ ency (Hz)</i>	<i>Phase</i>	<i>Speed (Rpm)</i>	<i>Con necti on</i>	<i>Rated Curren t (Amper e)</i>	<i>Protecti on Degree</i>	<i>Pow er Fact or</i>	<i>Insulati on Class</i>	<i>Weig ht (Kg)</i>
<i>Pump A dan B</i>													

2.14.7 Data Setting *Relay*

Tabel 2.10 di bawah ini menyajikan karakteristik spesifik dari Data Setting *Relay* berdasarkan nameplate rating.

Table 2. 10 Data Setting Relay Generator

Nama Data	Spesifikasi Data	
Data Overcurrent Relay Generator 20 kV	<i>I > I Function</i>	IEC V Invers
	<i>I > I Current Set</i>	4,6 A
	<i>I > I TMS</i>	0,2 s
	<i>I > I t RESET</i>	10 ms

Table 2. 11 Data Setting Relay Transformator

Nama Data	Spesifikasi Data	
Data Overcurrent HV Transformator	<i>I > I Function</i>	IEC V Invers
	<i>I > I Current Set</i>	0,81 A
	<i>I > I TMS</i>	0,7 s
Data Overcurrent LV A Transformator	<i>I > I Function</i>	IEC V Invers
	<i>I > I Current Set</i>	1,55 A
	<i>I > I TMS</i>	1,5 s
Data Overcurrent LV B Transformator	<i>I > I Function</i>	IEC V Invers
	<i>I > I Current Set</i>	1,73 A
	<i>I > I TMS</i>	1,5 s

Table 2. 12 Data Setting Relay Beban

Nama Motor Induksi	Karakteristik	TYPE	SET. VALUE (A)		SET. TIME (s)
			Low	High	
Motor Primary Air Fan A dan B	Instantaneous	Wdz-430ex Motor Management Relay	4.01	8.02	0.05
Motor Force Draft Fan A dan B	Instantaneous	Wdz-430ex Motor Management Relay	3.36	6.72	0.30
Motor Inducted Draft Fan A dan B	Instantaneous	Wdz-430ex Motor Management Relay	3.91	7.82	0.05
Motor Circulating Water Pump A dan B	Instantaneous	Wdz-430ex Motor Management Relay	4.01	8.02	0.05

Nama Motor Induksi	Karakteristik	TYPE	SET. VALUE (A)		SET. TIME (s)
			Low	High	
Motor Mill A, B, C, D, E dan F	Instantaneous	Wdz-430ex Motor Management Relay	3.00	5.99	0.30
Motor Condensate Extraction Pump A dan B	Instantaneous	Wdz-430ex Motor Management Relay	3.36	6.72	0.05
Motor Close Cooling Circulating Water Pump A dan B	Instantaneous	Wdz-430ex Motor Management Relay	1.53	3.05	0.30
Motor Open Cooling Circulating Water Pump A dan B	Instantaneous	Wdz-430ex Motor Management Relay	1.53	3.05	0.30

2.15 Penelitian Terkait dan Kebaruan Penelitian

Pada Tabel 2. 13 adalah Beberapa penelitian Terkait Koordinasi dan Setting *Relay* proteksi.

Table 2. 13 Penelitian Terkait

Judul	Penulis Tahun	Isi Penelitian
Analisis Koordinasi dan Setting Over Current <i>Relay</i> (OCR) Pada Pemakaian Daya Sendiri PLTU SMS Energy menggunakan Software ETAP 12.6.0	(Sampeallo & L Willi, .2019)	Hasil pengaturan menunjukkan bahwa nilai arus hubung singkat dan waktu grading disesuaikan agar proteksi bekerja secara selektif dan cepat, sehingga mampu meminimalisasi kerusakan peralatan dan gangguan sistem. Hasil simulasi menunjukkan bahwa setting OCR pada bus 1 FCP adalah $I_p = 3 \text{ A}$ dengan TMS = 0,1 detik; <i>Relay</i> bus <i>auxiliary</i> I adalah $I_p = 2 \text{ A}$ dengan TMS = 0,21 detik; <i>Relay</i> bus OutGoing 1 adalah $I_p = 0,6666 \text{ A}$ dengan TMS = 0,30 detik; dan <i>Relay</i> bus G1 adalah $I_p = 1 \text{ A}$ dengan TMS = 0,45 detik. Pengaturan ini memastikan bahwa OCR paling hilir bekerja lebih cepat karena gangguan

Judul	Penulis Tahun	Isi Penelitian
		arus singkat yang lebih kecil, sesuai dengan standar IEEE 242 dan prinsip koordinasi proteksi. Selain itu, dari analisis kurva koordinasi yang diperoleh, diketahui bahwa waktu grading berada pada rentang yang sesuai standar, yakni 0,2 – 0,4 detik. Dengan pengaturan ini, sistem proteksi PLTU SMS Energy menjadi lebih andal, mampu melindungi peralatan dari gangguan arus pendek secara efektif, serta meningkatkan keandalan operasi sistem kelistrikan di area industri tersebut.
Studi Koordinasi Proteksi Transformator Pemakaian Sendiri Pada Unit-4 PLTP Kamojang Menggunakan ETAP	(Bahrul Mubarak et al., 2022)	Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan mensimulasikan kinerja koordinasi proteksi pada transformator TR-1412 di PLTP Kamojang menggunakan perangkat lunak ETAP 12.6.0. Hasil penelitian menunjukkan bahwa <i>Relay</i>

Judul	Penulis Tahun	Isi Penelitian
		diferensial mampu memutus arus gangguan internal dalam waktu 40 milidetik sesuai nilai pengaturan, sementara overcurrent <i>Relay</i> bekerja dengan baik dan memberikan respon waktu sekitar 1800 milidetik untuk gangguan eksternal tiga <i>Phase</i> dan dua <i>Phase</i>. Koordinasi proteksi yang diterapkan terbukti efektif dalam memisahkan perlindungan utama dan cadangan, sehingga sistem proteksi transformator dapat bekerja secara aman dan efisien saat menghadapi berbagai gangguan.
Analisis Koordinasi dan Pengaturan <i>Relay</i> Arus Berlebih pada Motor Induksi 6,3 kV di PLTU Mamuju	(Ramadan et al., 2021)	Studi ini membahas masalah kritis pengaturan <i>Relay</i> pelindung untuk motor induksi 6,3 kV di Pembangkit Listrik Tenaga Uap Mamuju (PLTU Mamuju), yang saat ini tidak memenuhi standar IEEE C37.96-2000 dan IEEE 242-1986 yang ditetapkan untuk perlindungan arus

Judul	Penulis Tahun	Isi Penelitian
		berlebih dan penilaian waktu . Koordinasi dan pengaturan <i>Relay</i> arus berlebih yang tidak memadai dapat membahayakan keandalan dan keamanan sistem kelistrikan, berpotensi menyebabkan kerusakan peralatan atau pemadaman luas selama kondisi kesalahan . Oleh karena itu, analisis komprehensif dan perhitungan ulang pengaturan ini sangat penting untuk memastikan kinerja dan perlindungan sistem yang optimal.
Analisis dan Koordinasi <i>Relay</i> Proteksi terhadap Gangguan Menghubungkan Singkat pada Sistem Tenaga Listrik Menggunakan ETAP	(Fajar Dwiandra Tanjung et al., 2025)	Penelitian ini menganalisis koordinasi <i>Relay</i> perlindungan terhadap kesalahan hubung singkat dalam sistem distribusi 20 kV menggunakan perangkat lunak ETAP, meliputi pemodelan sistem, analisis hubung singkat, penentuan pengaturan <i>Relay</i>, dan simulasi <i>Time Current Characteristic</i> (TCC) untuk

Judul	Penulis Tahun	Isi Penelitian
		memastikan isolasi kesalahan yang cepat, selektif, dan andal sesuai dengan standar IEC 60255 dan IEC 60909

Dapat dilihat pada table 2.13 di atas merupakan beberapa penelitian yang dapat di jadikan sebagai referensi bagi penelitian ini. Penelitian Sampeallo dan L. Willi (2019) membahas koordinasi dan setting Over Current *Relay* (OCR) pada sistem pemakaian daya sendiri PLTU SMS Energy menggunakan ETAP dengan tujuan memperoleh proteksi yang selektif dan sesuai standar IEEE. Penelitian Bahrul Mubarak et al. (2022) berfokus pada koordinasi proteksi transformator pemakaian sendiri di PLTP Kamojang, sedangkan Ramadan et al. (2021) mengkaji pengaturan *Relay* arus lebih pada motor induksi 6,3 kV di PLTU Mamuju. Selain itu, Fajar Dwiandra Tanjung et al. (2025) menganalisis koordinasi *Relay* proteksi pada sistem distribusi 20 kV berdasarkan standar IEC. Perbedaan mendasar antara penelitian ini dengan penelitian-penelitian sebelumnya terletak pada objek dan ruang lingkup studinya. Jika penelitian terdahulu banyak dilakukan pada sistem distribusi umum atau industri lain, penelitian ini secara spesifik menganalisis Jaringan Distribusi 6,3 kV Unit 2 di PT. PLN Indonesia Power UBP Jabar 2 Palabuhan Ratu, yang memiliki karakteristik beban motor induksi berkapasitas besar seperti *Primary Air Fan* dan *Force Draft Fan*. Topik ini dipilih karena belum adanya studi terdahulu yang secara khusus menganalisis komponen beban tersebut

di lokasi penelitian. Selain itu, penelitian ini menggunakan ETAP versi 19.0.1 untuk mendapatkan akurasi pemodelan yang lebih akurat, serta bertujuan untuk melakukan *resetting* koordinasi proteksi yang disesuaikan dengan kondisi pembebanan eksisting yang bersifat fluktuatif di lingkungan pembangkit tersebut.