

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Sistem Transmisi Tenaga Listrik**

Sistem transmisi berfungsi untuk menyalurkan listrik dari pusat pembangkit ke berbagai wilayah (Corio et al., 2023). Pada sistem transmisi, tenaga listrik dari pusat pembangkit dikirim melalui sistem transmisi ke gardu distribusi atau langsung ke pengguna industri. Transmisi memungkinkan penyaluran daya dalam jumlah besar dan melalui jarak yang jauh (Aan Sumiyati et al., 2024).

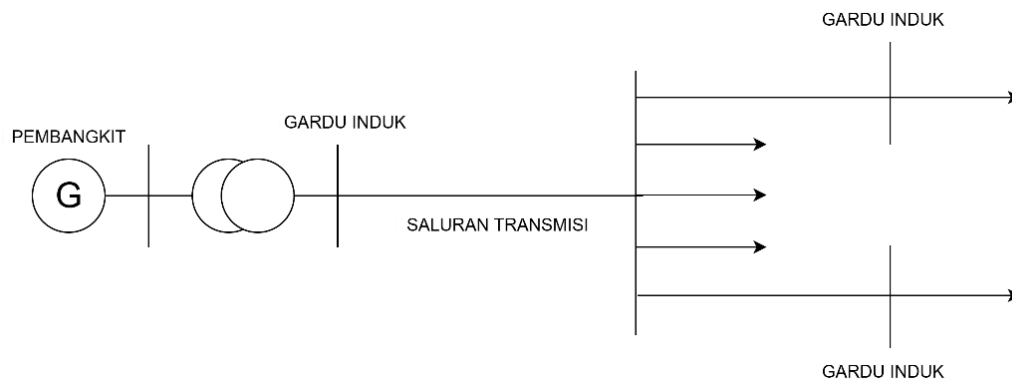
Menurut Sumiyati et al., (2024), klasifikasi saluran transmisi berdasarkan tegangannya, saluran transmisi dapat dibedakan yaitu:

- a) Saluran transmisi tegangan menengah dengan tegangan operasi 6 kV, 20 kV, dan 30 kV.
- b) Saluran transmisi tegangan tinggi dengan tegangan operasi 70 kV sampai dengan 150 kV.
- c) Saluran transmisi tegangan sangat tinggi (*Extra High Voltage/EHV*) dengan tegangan operasi 500 kV sampai dengan 750 kV.
- d) Saluran transmisi tegangan ultra tinggi (*Ultra High Voltage/UHV*) dengan tegangan operasi di atas 750 kV.

Sistem transmisi merupakan saluran transmisi yang saling terhubung satu sama lain dalam proses menyalurkan daya listrik dari pusat pembangkit ke gardu induk atau dari satu gardu induk ke gardu induk lainnya. Dalam sistem hubungan saluran transmisi dibedakan menjadi:

### 2.1.1 Saluran Transmisi Sistem Radial

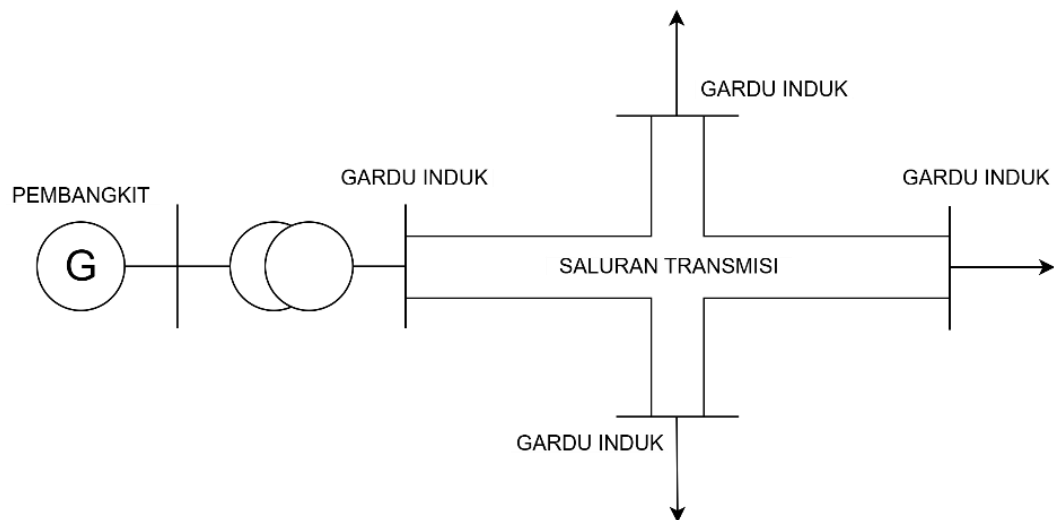
Saluran transmisi sistem radial ini hanya terdapat satu saluran transmisi yang terhubung dari pusat pembangkit dengan banyak cabang beban. Atau dalam kata lain, penyaluran daya listrik dari sumbernya hanya melalui satu saluran untuk diteruskan ke beberapa titik beban.



Gambar 2. 1 Saluran Transmisi Sistem Radial

Hubungan seperti pada Gambar 2.1 ini merupakan bentuk yang paling sederhana dan hanya terdapat satu arah aliran daya yang berasal dari sumber menuju beban. Karena bentuknya yang sederhana, biaya yang dibutuhkan juga terjangkau. Namun, hubungan saluran transmisi ini pun memiliki kekurangan yaitu ketika terjadi gangguan pada suatu titik, maka saluran setelah titik gangguan akan padam.

### 2.1.2 Saluran Transmisi Sistem *Ring (Loop)*

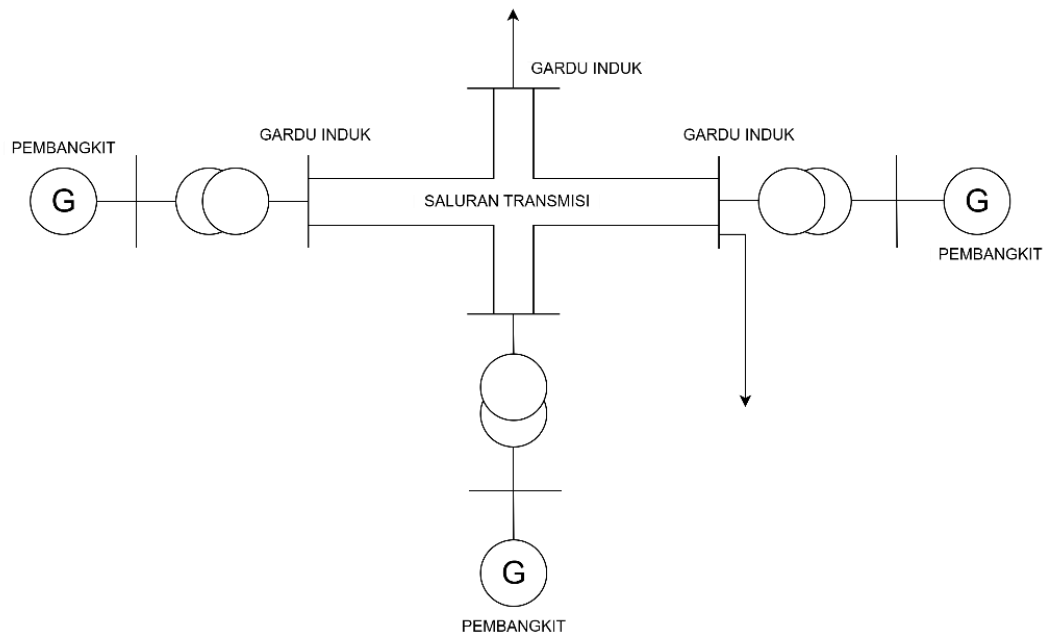


Gambar 2. 2 Saluran Transmisi Sistem *Ring (Loop)*

Sesuai dengan namanya, saluran transmisi sistem *ring (loop)* membentuk seperti lingkaran atau lebih tepatnya rangkaian tertutup. Dalam sistem ini, setiap gardu induk saling terhubung satu sama lain menjadi sebuah rangkaian tertutup. Suplai energi listriknya hanya terdapat satu pembangkitan yang sama seperti pada Gambar 2.2.

Hubungan saluran transmisi model ini lebih andal dibanding dengan sistem radial, karena jika terdapat gangguan disuplai dapat dialihkan dari sisi lain. Kekurangan sistem ini yakni pengaturan pengamanan sulit dilakukan terutama untuk gardu induk yang letaknya jauh.

### 2.1.3 Saluran Transmisi Sistem Interkoneksi



Gambar 2. 3 Saluran Transmisi Sistem Interkoneksi

Saluran transmisi sistem ini lebih andal dari sistem radial dan *ring*, karena sumbernya yakni pusat pembangkit tenaga listrik terdapat lebih dari satu yang saling terhubung melalui saluran transmisi seperti pada Gambar 2.3.

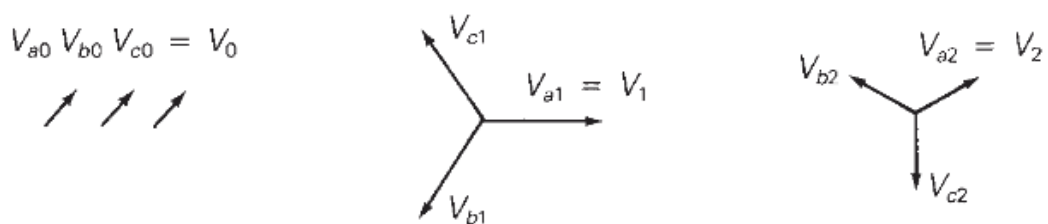
Aliran daya pada sistem ini banyak alternatif yang membuat kontinuitas penyaluran tenaga listrik sangat baik. Namun, sistem ini pun memiliki kekurangan yaitu pengaturan pengamanannya sangat kompleks dan sulit.

## 2.2 Komponen Simetris

Karya Fortescue menyatakan bahwa sistem tidak seimbang dengan  $n$  *phasor* yang saling berhubungan dapat diuraikan menjadi  $n$  sistem yang seimbang atau dikenal sebagai komponen simetris. Dalam sistem tiga fasa, tiga *phasor* tidak

seimbang dapat dijabarkan menjadi tiga *phasor* seimbang (Rahmaniar et al., 2022), sebagai berikut:

1. Komponen urutan positif terdiri dari tiga *phasor* yang sama besar, saling terpisah satu sama lain dalam fasa sebesar  $120^\circ$ , serta memiliki urutan fasa seperti *phasor* aslinya seperti yang terdapat pada Gambar 2.4. Komponen ini selalu ada dalam kondisi seimbang maupun tidak seimbang atau dalam kata lain komponen ini menunjukkan kondisi normal atau stabil.
2. Komponen urutan negatif terdiri dari tiga *phasor* yang besarnya sama dan terpisah satu sama lainnya dalam fasa sebesar  $120^\circ$ , serta memiliki urutan fasa yang berlawanan dengan *phasor* aslinya seperti yang terdapat pada Gambar 2.4. Komponen ini muncul saat kondisi tidak seimbang misalnya ada gangguan satu fasa maupun dua fasa atau dalam kata lain komponen ini menunjukkan ketidakseimbangan.
3. Komponen urutan nol terdiri dari tiga *phasor* dengan besar yang sama dan tanpa adanya pergeseran fasa antar *phasor* seperti yang terdapat pada Gambar 2.4. Komponen ini muncul saat kondisi gangguan ke tanah karena ada jalur ke tanah.



Gambar 2. 4 *Phasor* Komponen Urutan Nol, *Phasor* Komponen Urutan Positif, *Phasor* Komponen Urutan Negatif

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

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

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

Untuk gangguan simetris, masing-masing tegangan pada fasa 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:

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

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

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

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

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

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

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

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

Dimana matriks A dapat dinyatakan dengan Persamaan 2.9:

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

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

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

Dalam bentuk persamaan matriks, tegangan  $V_a$ ,  $V_b$ , dan  $V_c$  ditulis dengan Persamaan 2.11:

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

Berdasarkan Persamaan 2.10, tegangan  $V_{a0}$ ,  $V_{a1}$ , dan  $V_{a2}$  dituliskan 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:

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

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

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

Untuk komponen-komponen fasa 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 fasa a, b, dan c dituliskan dalam Persamaan 2.18, 2.19, dan 2.20 berikut:

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

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

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

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

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

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

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

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

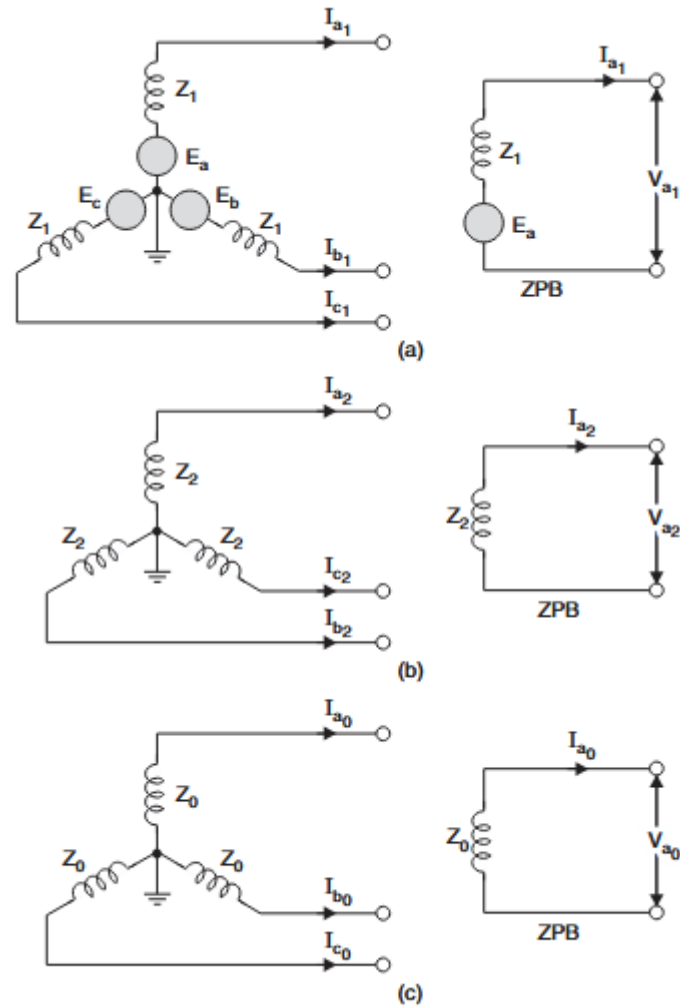
$$I_n = I_a + I_b + I_c \quad (2.24)$$

Dengan membandingkan Persamaan 2.24 dan 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 2.5 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. 5 Rangkaian Komponen Urutan: (a) Komponen Urutan Positif, (b) Komponen Urutan Negatif, dan (c) Komponen Urutan Nol

### 2.3 Gangguan Hubung Singkat

Gangguan pada sistem tenaga listrik dapat diartikan sebagai suatu kondisi abnormal yang menyebabkan ketidakseimbangan sehingga sistem tidak beroperasi sebagaimana fungsinya (Prasetyo et al., 2023). Saat terjadi hubung singkat, arus yang mengalir bisa jauh lebih besar dari pada arus normal. Jika gangguan tidak segera diatasi, maka dapat menyebabkan berbagai efek merugikan pada sistem tenaga listrik.

### 2.3.1 Jenis Gangguan

#### 2.3.1.1 Berdasarkan Lamanya Gangguan

##### 2.3.1.1.1 Gangguan Permanen

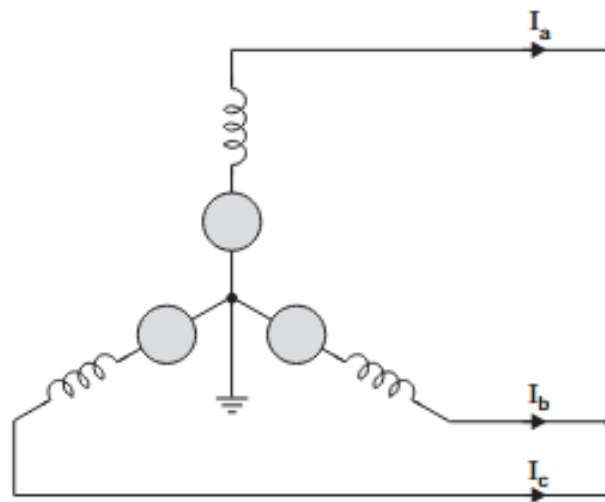
Gangguan permanen biasanya terjadi disebabkan oleh kerusakan peralatan, dan gangguan ini baru hilang setelah dilakukan perbaikan atau karena ada sesuatu yang mengganggu secara permanen.

##### 2.3.1.1.2 Gangguan Temporer (Sementara)

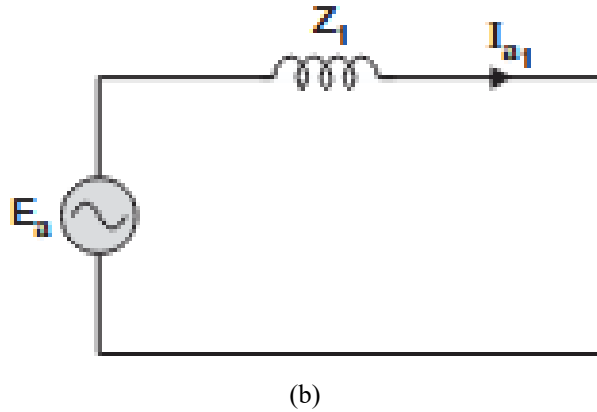
Gangguan ini berlangsung sementara atau dalam waktu yang singkat, dan setelahnya sistem dapat beroperasi kembali dengan normal.

#### 2.3.1.2 Berdasarkan Kesimetrisannya

##### 2.3.1.2.1 Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa



(a)



Gambar 2. 6 Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa: (a) Rangkaian Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa, (b) Rangkaian Komponen Urutan Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa

Gangguan hubung singkat tiga fasa seperti Gambar 2.6(a) yaitu kondisi dimana arus dan tegangan antar fasa seimbang setelah gangguan terjadi. Dengan demikian, pada keadaan ini yang dianalisa hanya urutan positifnya aja (F. Ahmad et al., 2025). Berdasarkan Gambar 2.6(b), apabila terjadi gangguan simetris pada sistem tiga fasa karena impedansi urutan yang digunakan hanya urutan positif saja, maka parameter yang perlu diperhatikan dalam komponen fasa dapat ditulis pada Persamaan 2.27 dan 2.28 berikut:

$$V_a = V_b = V_c \quad (2.27)$$

$$I_a + I_b + I_c = 0 \quad (2.28)$$

Dengan referensi  $I_b = a^2 I_a$  dan  $I_c = a I_a$ , serta menggunakan Persamaan 2.21, 2.22, dan 2.23 di atas, kemudian substitusi  $I_b$  dan  $I_c$  menjadi Persamaan 2.29, 2.30, dan 2.31:

$$I_{a1} = \frac{1}{3}(I_a + a^3 \cdot I_a + a^3 \cdot I_a) = I_a \quad (2.29)$$

$$I_{a2} = \frac{1}{3}(I_a + a^4 \cdot I_a + a^2 \cdot I_a) = 0 \quad (2.30)$$

$$I_{a0} = \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c) = 0 \quad (2.31)$$

Hal ini berarti pada gangguan tiga fasa, komponen urutan nol maupun komponen urutan negatif dari arus tidak ada (tidak muncul), serta komponen urutan positif dari arus sama dengan arus fasanya. Ditinjau dari Persamaan 2.26, maka tegangan dalam komponen urutan dapat dituliskan menjadi Persamaan 2.32, 2.33, dan 2.34:

$$V_{a1} = \frac{1}{3}(V_a + a.V_a + a^2.V_a) = 0 \quad (2.32)$$

$$V_{a2} = \frac{1}{3}(V_a + a^2V_b + aV_c) = 0 \quad (2.33)$$

$$V_{a0} = 0 \quad (2.34)$$

Maka,

$$V_{a1} = 0 = E_a - I_{a1}.Z_1 \quad (2.35)$$

Apabila  $V_{a1}$  dituliskan pada Persamaan 2.35, maka untuk arusnya dapat dihitung melalui Persamaan 2.36:

$$I_{a1} = \frac{E_a}{Z_1} \quad (2.36)$$

Dengan keterangan:

$E_a$  = Tegangan sumber (V)

$V_a$  = Tegangan fasa a (V)

$V_b$  = Tegangan fasa b (V)

$V_c$  = Tegangan fasa c (V)

$V_{a1}$  = Tegangan urutan positif (V)

$V_{a2}$  = Tegangan urutan negatif(V)

$V_{a0}$  = Tegangan urutan nol (V)

$I_a$  = Arus fasa a (A)

$I_b$  = Arus fasa b (A)

$I_c$  = Arus fasa c (A)

$I_{a1}$  = Arus urutan positif (A)

$I_{a2}$  = Arus urutan negatif (A)

$I_{a0}$  = Arus urutan nol (A)

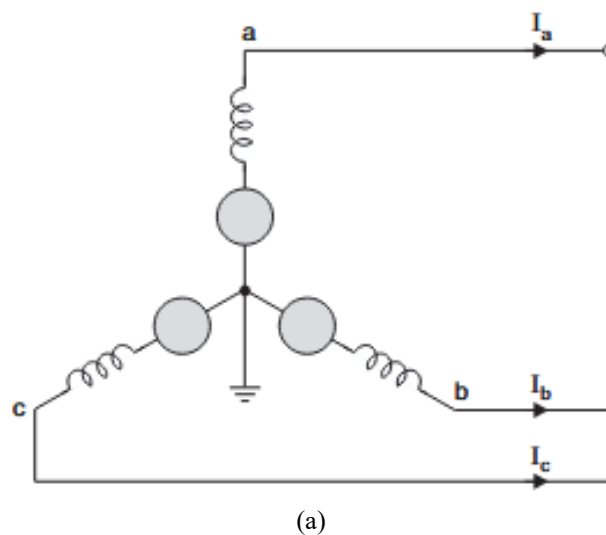
$Z_0$  = Impedansi urutan nol ( $\Omega$ )

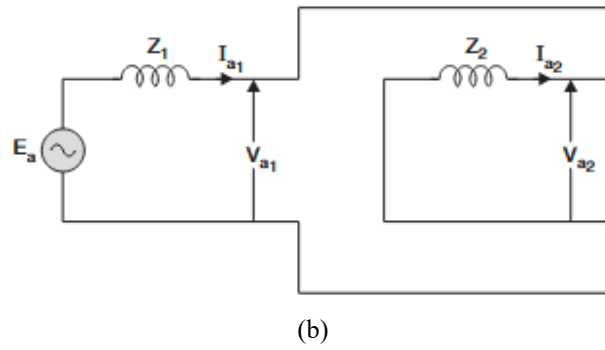
$Z_1$  = Impedansi urutan positif ( $\Omega$ )

$Z_2$  = Impedansi urutan negatif ( $\Omega$ )

#### 2.3.1.2.2 Gangguan Hubung Singkat Fasa–Fasa

Gangguan hubung singkat fasa–fasa terjadi dikarenakan bersentuhannya dua konduktor fasa yang kemudian menimbulkan arus berlebih (Anshar & Budiman, 2022). Ketika terjadi gangguan hubung singkat antar fasa, arus yang mengalir hanya terdiri dari komponen urutan positif dan negatif, tanpa melibatkan komponen urutan nol karena tidak ada arus yang mengalir ke tanah.





Gambar 2. 7 Gangguan Hubung Singkat Fasa–Fasa: (a) Rangkaian Gangguan Hubung Singkat Fasa–Fasa, (b) Rangkaian Komponen Urutan Gangguan Hubung Singkat Fasa–Fasa

Dapat dilihat pada Gambar 2.7(a) dan 2.7(b) pada kondisi gangguan hubung singkat fasa–fasa atau dua fasa rangkaian impedansi urutan positif tersusun secara paralel dengan impedansi urutan negatif, maka parameter yang perlu diperhatikan dalam komponen fasa dapat ditulis pada Persamaan 2.37, 2.38 dan 2.39 berikut:

$$I_a = 0 \quad (2.37)$$

$$I_c = -I_b \quad (2.38)$$

$$V_b = V_c \quad (2.39)$$

Transformasi komponen fasa menjadi komponen urutan menggunakan Persamaan 2.21, 2.22, 2.23, 2.37, dan 2.38, dapat dituliskan pada Persamaan 2.40 berikut:

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ I_b \\ -I_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{3}(a - a^2)I_a \\ \frac{1}{3}(a^2 - a)I_a \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

Maka setelah disubstitusikan akan didapatkan Persamaan 2.41 berikut:

$$I_{a1} = -I_{a2} \quad (2.41)$$

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

$$(V_{a0} + a^2V_{a1} + aV_{a2}) = (V_{a0} + aV_{a1} + a^2V_{a2}) \quad (2.42)$$

$$(a^2 - a)V_{a1} = (a^2 - a)V_{a2} \quad (2.43)$$

$$V_{a1} = V_{a2} \quad (2.44)$$

$$E_a - I_{a1} \cdot Z_1 = -I_{a2} \cdot Z_2 \quad (2.45)$$

$$E_a - I_{a1} \cdot Z_1 = I_{a1} \cdot Z_2 \quad (2.46)$$

Berdasarkan Persamaan 2.46, maka berikut digunakan untuk menghitung arus gangguan hubung singkat fasa–fasa melalui Persamaan 2.47 :

$$I_{a1} = \frac{E_a}{Z_1 + Z_2} \quad (2.47)$$

Dengan keterangan:

$E_a$  = Tegangan sumber (V)

$V_a$  = Tegangan fasa a (V)

$V_b$  = Tegangan fasa b (V)

$V_c$  = Tegangan fasa c (V)

$V_{a1}$  = Tegangan urutan positif (V)

$V_{a2}$  = Tegangan urutan negatif (V)

$V_{a0}$  = Tegangan urutan nol (V)

$I_a$  = Arus fasa a (A)

$I_b$  = Arus fasa b (A)

$I_c$  = Arus fasa c (A)

$I_{a1}$  = Arus urutan positif (A)

$I_{a2}$  = Arus urutan negatif (A)

$I_{a0}$  = Arus urutan nol (A)

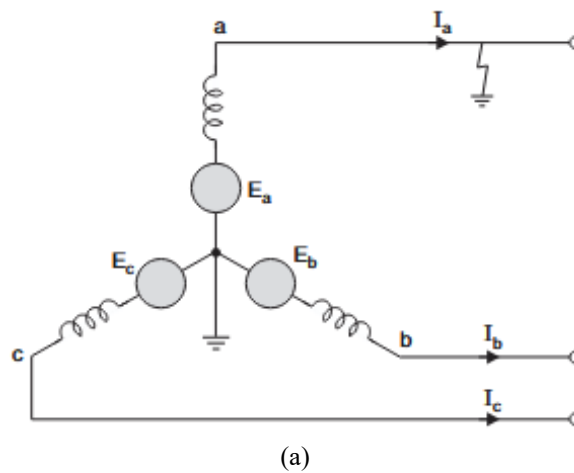
$Z_0$  = Impedansi urutan nol ( $\Omega$ )

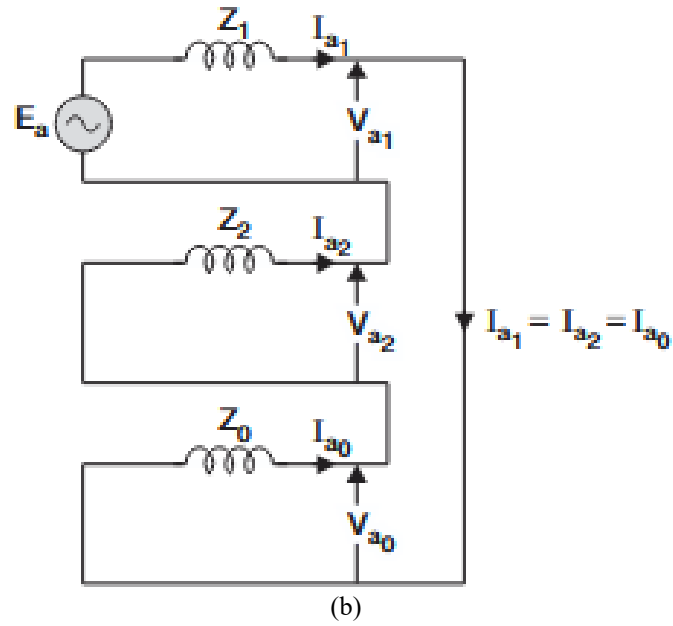
$Z_1$  = Impedansi urutan positif ( $\Omega$ )

$Z_2$  = Impedansi urutan negatif ( $\Omega$ )

### 2.3.1.2.3 Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah

Gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah merupakan hubung singkat yang menghubungkan salah satu fasanya dengan tanah (*ground*) (Prasetyo et al., 2023). Pada fasa yang terganggu, arusnya akan meningkat hingga tegangannya turun menjadi nol seperti pada Gambar 2.8(a), sementara pada fasa lain arusnya hilang dan tegangannya mengalami kenaikan.





Gambar 2. 8 Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah: (a) Rangkaian Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah, (b) Rangkaian Komponen Urutan Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah

Berdasarkan Gambar 2.8(b), pada kondisi gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah ini rangkaian impedansi urutan positif, urutan negatif dan urutan nol tersusun secara seri, maka parameter yang perlu diperhatikan dalam komponen fasa dapat ditulis pada Persamaan 2.48 dan 2.49 berikut:

$$I_a = I_b = 0 \quad (2.48)$$

$$V_a = 0 \quad (2.49)$$

Transformasi komponen fasa menjadi domain urutan menggunakan Persamaan 2.10 dan 2.48, sehingga menjadi Persamaan 2.51 berikut:

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} I_a \\ I_a \\ I_a \end{bmatrix} \quad (2.50)$$

$$I_{a0} = I_{a1} = I_{a2} = \frac{I_a}{3} \quad (2.51)$$

Berdasarkan Persamaan 2.26, tegangan komponen urutan untuk gangguan satu fasa ke tanah dituliskan dalam Persamaan 2.52 , 2.53 , dan 2.54 berikut:

$$V_{a0} = -I_{a0} \cdot Z_0 \quad (2.52)$$

$$V_{a1} = E_a - I_{a1} \cdot Z_1 \quad (2.53)$$

$$V_{a2} = -I_{a2} \cdot Z_2 \quad (2.54)$$

Dengan menggunakan Persamaan 2.49 dan substitusikan  $V_{a0}$ ,  $V_{a1}$ ,  $V_{a2}$  menjadi Persamaan 2.56:

$$V_a = 0 = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \quad (2.55)$$

$$E_a - I_{a1} \cdot Z_1 - I_{a2} \cdot Z_2 - I_{a1} \cdot Z_0 = 0 \quad (2.56)$$

Berdasarkan Persamaan 2.56 dan mengingat Persamaan 2.51 maka persamaannya menjadi:

$$E_a - I_a \cdot Z_1 - I_a \cdot Z_2 - I_a \cdot Z_0 = 0 \quad (2.57)$$

Dari Persamaan 2.57, maka Persamaan 2.58 berikut digunakan untuk menghitung arus gangguan hubung singkat fasa ke tanah:

$$I_{a1} = \frac{E_a}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \quad (2.58)$$

Dengan keterangan:

$E_a$  = Tegangan sumber (V)

$V_a$  = Tegangan fasa a (V)

$V_b$  = Tegangan fasa b (V)

$V_c$  = Tegangan fasa c (V)

$V_{a1}$  = Tegangan urutan positif (V)

$V_{a2}$  = Tegangan urutan negatif (V)

$V_{a0}$  = Tegangan urutan nol (V)

$I_a$  = Arus fasa a (A)

$I_b$  = Arus fasa b (A)

$I_c$  = Arus fasa c (A)

$I_{a1}$  = Arus urutan positif (A)

$I_{a2}$  = Arus urutan negatif(A)

$I_{a0}$  = Arus urutan nol (A)

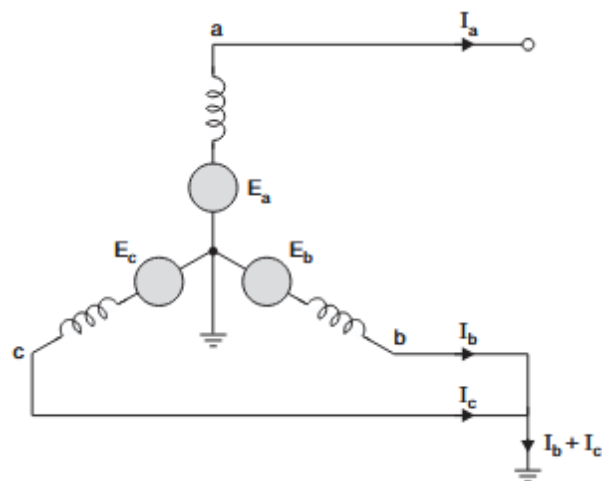
$Z_0$  = Impedansi urutan nol ( $\Omega$ )

$Z_1$  = Impedansi urutan positif ( $\Omega$ )

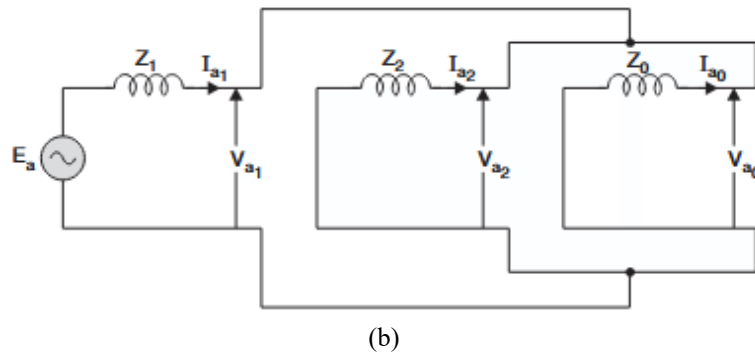
$Z_2$  = Impedansi urutan negatif ( $\Omega$ )

#### 2.3.1.2.4 Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah

Dapat dilihat pada Gambar 2.9(a), gangguan dua fasa ke tanah terjadi ketika dua buah fasa dari sistem tenaga listrik terhubung singkat dengan tanah.



(a)



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

Pada kondisi gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah seperti pada Gambar 2.9(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 fasa dapat ditulis pada Persamaan 2.59 dan 2.60 berikut:

$$I_a = 0 \quad (2.59)$$

$$V_b = V_c \quad (2.60)$$

Transformasi komponen fasa menjadi komponen urutan menjadi Persamaan 2.61 berikut:

$$I_a = I_{a1} + I_{a1} + I_{a0} = 0 \quad (2.61)$$

Untuk tegangannya dapat menggunakan Persamaan 2.11 menjadi Persamaan 2.62:

$$V_{a0} = V_{a1} = V_{a2} \quad (2.62)$$

$$\frac{1}{3}(V_a + V_b + V_c) = \frac{1}{3}(V_a + aV_b + V_c) = \frac{1}{3}(V_a + a^2V_b + aV_c) \quad (2.63)$$

$$\frac{V_a}{3} = \frac{V_a}{3} = \frac{V_a}{3} \quad (2.64)$$

Selanjutnya menggunakan Persamaan 2.26 dan 2.62 , sebagai hubungan tegangan dan substitusi ke dalam komponen urutan menjadi Persamaan 2.66 dan 2.68 berikut:

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

$$-I_{a0} \cdot Z_0 = E_a - I_{a1} \cdot Z_1 \quad (2.65)$$

$$I_{a0} = \frac{E_a - I_{a1} \cdot Z_1}{Z_0} \quad (2.66)$$

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

$$-I_{a2} \cdot Z_2 = E_a - I_{a1} \cdot Z_1 \quad (2.67)$$

$$I_{a2} = \frac{E_a - I_{a1} \cdot Z_1}{Z_2} \quad (2.68)$$

Maka berdasarkan Persamaan 2.61 dengan mensubstitusikan  $I_{a2}$  dan  $I_{a0}$  dapat dituliskan menjadi Persamaan 2.69 berikut.

$$I_{a1} = \frac{E_a - I_{a1} \cdot Z_1}{Z_2} - \frac{E_a - I_{a1} \cdot Z_1}{Z_0} = 0 \quad (2.69)$$

Maka Persamaan 2.70 berikut digunakan untuk menghitung arus gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah:

$$I_{a1} = \frac{E_a}{Z_1 + \left[ \frac{Z_2(Z_0)}{Z_2 + Z_0} \right]} \quad (2.70)$$

Dengan keterangan:

$E_a$  = Tegangan sumber (V)

$V_a$  = Tegangan fasa a (V)

$V_b$  = Tegangan fasa b (V)

$V_c$  = Tegangan fasa c (V)

$V_{a1}$  = Tegangan urutan positif (V)

$V_{a2}$  = Tegangan urutan negatif(V)

$V_{a0}$  = Tegangan urutan nol (V)

$I_a$  = Arus fasa a (A)

$I_b$  = Arus fasa b (A)

$I_c$  = Arus fasa 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 ( $\Omega$ )

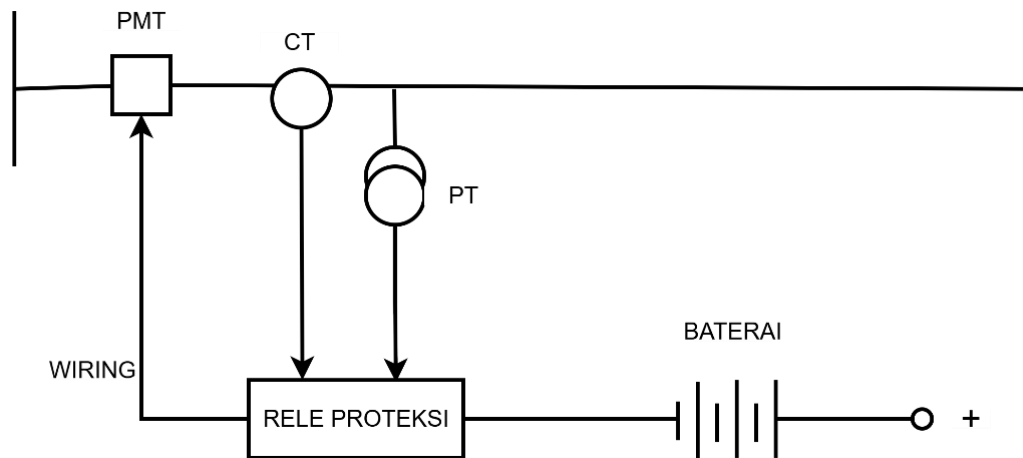
$Z_1$  = Impedansi urutan positif ( $\Omega$ )

$Z_2$  = Impedansi urutan negatif ( $\Omega$ )

#### **2.4 Sistem Proteksi Tenaga Listrik (Rele Proteksi)**

Sistem proteksi pada sistem transmisi sangat penting guna memastikan energi listrik tersalurkan dengan baik dan terlindungi dengan aman terutama dari gangguan. Sistem proteksi pada tenaga listrik bertujuan untuk melindungi peralatan, misalnya generator, trafo, dan jaringan dari kondisi abnormal. Gangguan tersebut dapat berupa hubung singkat, atau arus berlebih. Apabila tidak ada proteksi, arus hubung singkat dapat merusak peralatan listrik (Saputra, 2022). Sistem proteksi dibuat untuk mendeteksi adanya gangguan atau keabnormalan pada sistem tenaga listrik. Meskipun sistem proteksi tidak bisa menghentikan gangguan sejak awal, fungsinya adalah mengurangi dampak yang ditimbulkan setelah adanya gangguan (Utami et al., 2024).

### 2.4.1 Komponen Sistem Proteksi



Gambar 2. 10 Komponen-komponen Sistem Proteksi

Dalam operasinya seperti pada Gambar 2.10, sistem proteksi memiliki beberapa komponen sebagai berikut (Firdaus, 2021):

#### 1. *Circuit Breaker* (CB) atau Pemutus Tenaga (PMT)

CB atau PMT adalah saklar listrik otomatis yang berfungsi memutus dan menghubungkan rangkaian dalam keadaan normal maupun gangguan. Saat terjadi gangguan, rele proteksi akan mengirimkan perintah *trip* kepada CB untuk melakukan pemutusan. Hal ini sangat penting karena untuk mencegah terjadinya kerusakan peralatan serta menjaga keandalan sistem tenaga listrik.

#### 2. *Current Transformer* (CT)

CT atau trafo arus merupakan jenis transformator ukur yang berfungsi untuk menurunkan besaran arus yang besar menjadi kecil. Dalam konteks sistem proteksi, CT memiliki dua fungsi utama yakni sebagai pengukuran dan proteksi. CT sebagai pengukuran bekerja menurunkan arus sistem yang besar (ribuan ampere) menjadi arus kecil standar (biasanya 1 A atau 5 A). Sedangkan, CT

sebagai proteksi yakni menjadi penghubung antara sistem tenaga dengan rele proteksi. Arus sekunder CT digunakan sebagai input rele proteksi, misalnya saat terjadi gangguan maka CT akan meneruskan sinyal ke rele, kemudian oleh rele akan diteruskan perintah *trip* kepada CB.

### 3. *Potential Transformer* (PT)

PT atau trafo tegangan adalah trafo ukur yang berfungsi mengubah nilai tegangan yang besar atau tinggi menjadi tegangan rendah standar (biasanya 110 V atau 100 V). Fungsi trafo tegangan ini dalam konteks proteksi sama seperti CT sebagai pengukuran dan proteksi, hanya saja berbeda pada besaran yang ditransformasikannya.

### 4. Rele proteksi

Rele proteksi berfungsi mendeteksi dan melokalisir gangguan dan memerintahkan CB untuk memutuskan elemen terganggu (Syahputra, 2022). Saat terjadi gangguan, sinyal yang dikirimkan oleh CT dan PT akan masuk ke rele, kemudian akan dibandingkan nilai besaran listrik yang diterima dengan nilai *setting* rele. Apabila terjadi penyimpangan melebihi batas, rele akan mengambil keputusan untuk memberikan perintah kepada CB agar rangkaian diputus, baik secara instan maupun dengan penundaan waktu (*time delay*) sesuai dengan kebutuhan proteksi tersebut.

### 5. Baterai

Baterai berfungsi sebagai suplai energi cadangan (*DC supply*) untuk peralatan proteksi dan kontrol. Untuk menjaga keandalan sistem tenaga listrik, ketika terjadi gangguan atau bahkan yang menyebabkan suplai utama padam, maka

perangkat proteksi masih mendapatkan suplai energi dari baterai agar tetap bekerja untuk mengirimkan perintah *trip* kepada CB.

#### 6. Pengawatan/*wiring*

Pengawatan atau *wiring* adalah proses penyambungan atau pengaturan kabel pada sistem tenaga listrik agar peralatan proteksi dapat bekerja sesuai fungsinya.

### 2.4.2 Karakteristik Rele Proteksi

Rele proteksi dibuat untuk mendeteksi adanya gangguan atau kondisi abnormal pada bagian dari sistem tenaga listrik. Oleh karena itu, rele proteksi harus memenuhi karakteristik berikut (AS et al., 2022):

#### 1. *Reliability* (Keandalan)

Rele proteksi harus mampu bekerja dengan baik dan benar pada berbagai kondisi sistem. Rele dikatakan andal apabila dapat bekerja dengan baik saat kondisi abnormal (gangguan) dan tidak bekerja saat kondisi normal.

#### 2. *Selectivity* (Selektif)

Rele harus memiliki kemampuan mendeteksi letak gangguan dan memberikan sinyal kepada *circuit breaker* terdekat dari titik gangguan untuk memutus jaringan. Zona proteksi harus tepat, agar saat terjadi gangguan atau kondisi abnormal, hanya bagian yang bermasalah saja yang diputus dari sistem.

#### 3. *Sensitive* (Kepekaan)

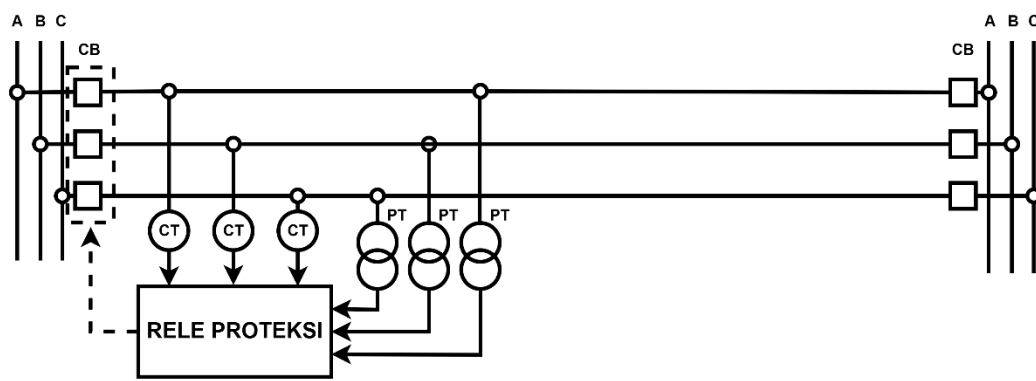
Rele proteksi harus dapat mendeteksi dan bereaksi terhadap gangguan sejak awal terjadinya gangguan dalam sistem.

#### 4. *Fast* (Cepat)

Rele mampu bekerja dengan cepat saat terjadi gangguan untuk memisahkan bagian yang terkena gangguan dari jaringan yang masih normal serta meminimalkan kerusakan yang lebih serius.

### 2.5 *Distance Relay*

#### 2.5.1 Prinsip Kerja *Distance Relay*



Gambar 2. 11 *Single Line Diagram Distance Relay Saluran Tiga Fasa*

*Distance relay* seperti pada Gambar 2.11 merupakan salah satu jenis rele proteksi pada saluran transmisi karena memiliki kemampuan untuk menghilangkan gangguan secara cepat serta pengaturan *setting*nya mudah (Supriyatna, 2021). Rele ini mengamankan saluran dari arus gangguan. Menurut Ardianto (2021), prinsip kerja rele jarak berdasarkan pengukuran impedansi saluran transmisi yang nilainya sebanding dengan panjang salurannya. Rele ini membandingkan tegangan dan arus yang akan kemudian diperoleh nilai impedansi hasil pengukuran rele tersebut. Impedansi yang terukur nantinya akan dibandingkan dengan impedansi *setting*.

### 2.5.1.1 Perhitungan Impedansi Gangguan Fasa-Fasa

Pada gangguan fasa–fasa komponen yang terlibat yakni urutan positif dan negatif tanpa melibatkan urutan nol, sehingga untuk impedansi gangguannya cukup dengan membandingkan tegangan dan arus dari fasa yang terganggu tersebut. Perhitungan impedansi gangguan fasa–fasa dapat dilakukan menggunakan Persamaan 2.77 berikut:

$$Z_f = \frac{V_f}{I_f} \quad (2.77)$$

Dengan keterangan:

$Z_f$  = Impedansi gangguan ( $\Omega$ )

$V_f$  = Tegangan gangguan (V)

$I_f$  = Arus gangguan (A)

Rele dikatakan bekerja, apabila impedansi yang terukur tidak melebihi impedansi *setting* rele itu sendiri ( $Z_f < Z_s$ ). Apabila impedansi yang terukur melebihi impedansi *setting* relenya ( $Z_f < Z_s$ ), maka rele tidak akan membaca bahwa impedansi tersebut merupakan sebuah gangguan sehingga rele tidak akan bekerja.

### 2.5.1.2 Perhitungan Impedansi Gangguan Fasa ke Tanah

Pada gangguan fasa ke tanah, terdapat arus yang mengalir ke tanah ikut berperan sehingga impedansi yang terlihat dipengaruhi arus urutan nol. Sehingga untuk impedansi yang akan dibaca oleh rele pada gangguan fasa ke tanah dinyatakan dalam Persamaan 2.78 dan 2.79 berikut:

$$Z_{fe} = \frac{V_f}{I_f + k_{z0} \cdot I_{res}} \quad (2.78)$$

$$I_{res} = I_n = 3I_0 \quad (2.79)$$

Dengan keterangan:

$Z_{fe}$  = Impedansi gangguan fasa ke tanah ( $\Omega$ )

$V_a$  = Tegangan gangguan hubung singkat (V)

$I_a$  = Arus gangguan hubung singkat (A)

$k_{z0}$  = Kompensasi impedansi urutan nol

$I_{res}$  = Arus residual (A)

### 2.5.1.3 Perhitungan Jarak Gangguan

Untuk menentukan jarak gangguan yang terjadi dapat menggunakan Persamaan 2.80 berikut (Sutrisno, 2023).

$$\text{Jarak Gangguan} = \frac{Z_f}{Z_L} \quad (2.80)$$

Dengan keterangan:

Jarak Gangguan = Jarak antara rele dengan titik gangguan (km)

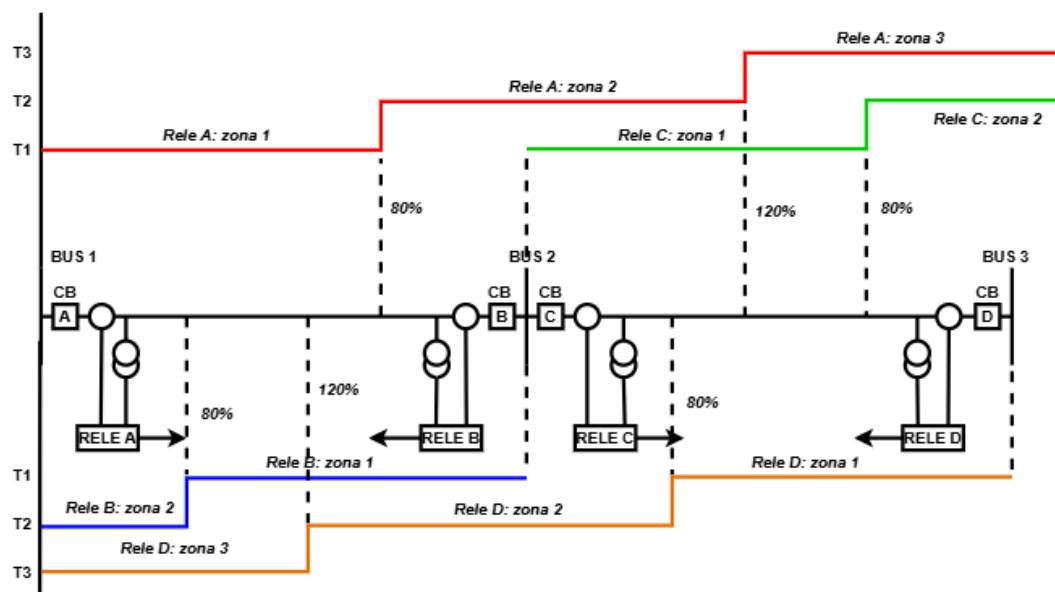
$Z_f$  = Impedansi gangguan yang dibaca oleh *distance relay* ( $\Omega$ )

$Z_L$  = Impedansi saluran transmisi ( $\Omega/\text{km}$ )

### 2.5.2 Zona Proteksi *Distance Relay*

Rele jarak berfungsi sebagai proteksi utama pada SUTT/SUTET serta sebagai proteksi cadangan untuk bagian belakangnya. Rele ini bekerja dengan mengukur impedansi ( $Z$ ) pada saluran transmisi yang dibagi menjadi beberapa zona perlindungan yakni zona 1, zona 2, dan zona 3 (Agustian & Fauziah, 2021).

Dapat dilihat pada Gambar 2.12, terdapat dua saluran yang saling terhubung dengan empat buah rele jarak. Rele jarak masing-masing memiliki zona proteksinya. Zona 1 sebagai proteksi utama saluran yang diamankan sekitar 80% dengan T1 tanpa penundaan waktu atau instan. Zona 2 mengamankan sisa saluran yang tidak diamankan oleh zona 1 serta saluran di bus depannya. Zona 2 diatur sekitar 120% dengan penundaan waktu T2 yang ditentukan sesuai *setting* yang telah diperhitungkan. Zona 2 ini berfungsi sebagai proteksi cadangan apabila proteksi utama pada saluran tersebut gagal bekerja. Misalnya, pada saluran bus 2 dan bus 3 terjadi hubung singkat yang terletak sekitar 40% dari bus 2. Karena hubung singkat tersebut terjadi pada saluran yang diamankan oleh rele C, maka rele C akan memerintahkan CB C untuk *trip* secara instan yang mana hubung singkat tersebut berada pada zona 1 rele C.



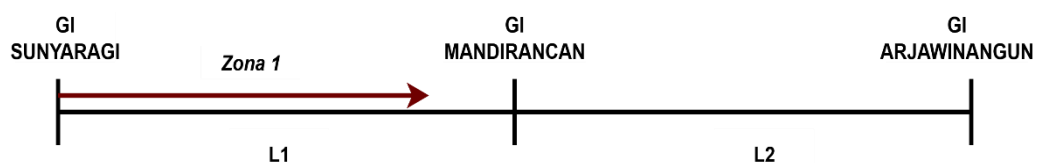
Gambar 2. 12 *Setting Zona Distance Relay*

Di sisi lain terdapat rele D yang mengamankan saluran yang sama namun dari arah yang berbeda. Apabila rele D melihat hubung singkat tersebut berada pada

zona 1 maka rele D akan memerintahkan CB D untuk *trip instant*. Sehingga saluran yang terjadi hubung singkat dapat diamankan baik dari sisi bus 2 maupun bus 3, maksud dari pengamanan tersebut agar penyaluran daya tetap andal dari bus 2 atau bus 3 ke bus yang seterusnya. Namun, apabila suatu kondisi terjadi dikarenakan mal fungsi pada peralatan rele C yang menyebabkan rele sebagai pengaman utama gagal bekerja. Maka rele A akan bekerja memutuskan CB A dengan penundaan waktu selama  $T_2$ , karena gangguan yang dideteksi berada pada zona 2. Pada saat itulah rele A bekerja sebagai pengaman cadangan saluran di bus atau gardu induk depannya.

Begitupun pada zona 3 yang berfungsi sebagai proteksi cadangan yang memiliki jangkauan paling jauh sekitar 200% dengan penundaan waktu  $T_3$  lebih lama. Dengan pengaturan yang bertingkat seperti ini, sistem proteksi bisa bekerja lebih selektif. Atau dengan kata lain, gangguan akan diputus oleh rele yang paling dekat dengan lokasi gangguan terlebih dahulu. Namun, apabila rele terdekat gagal bekerja, maka rele berikutnya akan bekerja dengan penundaan waktu.

#### 2.5.2.1 Setting Zona 1



Gambar 2. 13 Setting Zona 1 Distance Relay

Zona 1 adalah proteksi utama pada rele jarak, cakupannya harus melindungi sepanjang saluran dari gardu induk tersebut, namun tidak boleh

melebihi saluran transmisi di depannya (Supriyatna, 2021). Dengan mempertimbangkan kemungkinan kesalahan data saluran maupun peralatan penunjang lainnya, jangkauan zona 1 biasanya diatur sebesar 80% dari panjang saluran yang diamankan, diilustrasikan pada Gambar 2.13. Untuk menentukan *setting* zona 1 dapat menggunakan Persamaan 2.81, 2.82, dan 2.83 berikut:

$$Z_{1p} = 0.8 \times Z_{L1} \quad (2.81)$$

$$Z_{1s} = Z_{1p} \times n_1 \quad (2.82)$$

$$n_1 = \frac{CT}{PT} \quad (2.83)$$

Dengan keterangan:

$Z_{1p}$  = Impedansi primer zona 1 ( $\Omega$ )

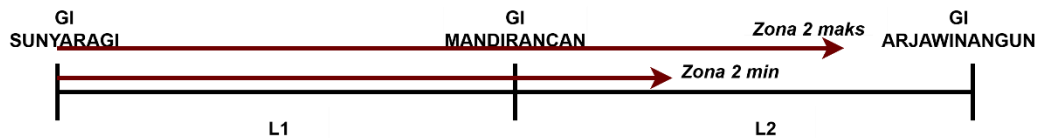
$Z_{1s}$  = Impedansi sekunder zona 1 ( $\Omega$ )

$Z_{L1}$  = Impedansi saluran yang dilindungi ( $\Omega$ )

$n_1$  = Rasio trafo arus dan trafo tegangan

Karena zona 1 merupakan proteksi utama, waktu rele bekerja yakni instan atau  $t = 0$  s.

### 2.5.2.2 *Setting* Zona 2



Gambar 2. 14 *Setting* Zona 2 *Distance Relay*

Zona 2 disebut juga sebagai proteksi cadangan, karena bekerja jika proteksi utama seksi di depannya gagal bekerja. Menurut Herman et al. (2023), zona

2 jangkauannya diatur harus melindungi bagian saluran transmisi yang tidak terjangkau oleh zona 1, namun tidak boleh tumpang tindih dengan jangkauan zona 2 pada saluran transmisi di seksi berikutnya. Zona 2 diatur dengan jangkauan diatur dengan jangkauan sekitar 120% dari panjang saluran yang dilindungi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.14, dengan persamaan 2.84, 2.85, 2.86 dan 2.87 sebagai berikut:

$$Z_{2min} = 1.2 \times Z_{L1} \quad (2.84)$$

$$Z_{2maks} = 0.8 \times (Z_{L1} + 0.8Z_{L2} \cdot k) \quad (2.85)$$

$$Z_{trafo} = 0.8 \times (Z_{L1} + 0.5 X_T) \quad (2.86)$$

$$Z_{2s} = Z_{2p} \times n_1 \quad (2.87)$$

Dengan keterangan:

$Z_{2min}$  = Impedansi minimum zona 2 ( $\Omega$ )

$Z_{2maks}$  = Impedansi maksimum zona 2 ( $\Omega$ )

$Z_{L1}$  = Impedansi saluran yang diamankan ( $\Omega$ )

$Z_{L2}$  = Impedansi saluran berikutnya yang terpendek ( $\Omega$ )

$X_T$  = Reaktansi transformator terkecil di gardu induk depannya ( $\Omega$ )

$Z_{2p}$  = Impedansi primer zona 2 ( $\Omega$ )

$Z_{2s}$  = Impedansi sekunder zona 2 ( $\Omega$ )

$n_1$  = Rasio trafo arus dan trafo tegangan

Zona 2 ini biasanya diatur minimum mencakup impedansi saluran hingga gardu induk berikutnya, namun tidak boleh melampaui impedansi terkecil dari trafo di gardu induk tersebut. Dalam pengaturan *setting* zona 2 pada rele jarak terdapat beberapa hal yang perlu diperhatikan sebagai berikut (Ardianto, 2021):

- Jika saluran seksi berikutnya memiliki beberapa cabang, dengan kondisi  $Z_{2maks} > Z_{2min}$ , maka *setting*  $Z_{2maks}$  diambil dari impedansi saluran terkecil, serta *setting* waktunya dipilih  $t = 0.4$  s.
- Jika saluran seksi berikutnya lebih panjang dari saluran seksi berikutnya, dengan kondisi  $Z_{2maks} < Z_{2min}$ , maka *setting*  $Z_{2min}$  diambil dari impedansi saluran terkecil, serta *setting* waktunya dipilih  $t = 0.8$  s.

### 2.5.2.3 Setting Zona 3

Dapat dilihat pada Gambar 2.15, zona 3 berfungsi sebagai proteksi cadangan jauh dari zona 2 dan zona 2 pada saluran transmisi. Cakupan zona 3 meliputi panjang saluran yang diamankan serta bagian yang tidak tercakup oleh zona 2, dengan pengaturan sebesar 200% dari panjang saluran (Agustian & Fauziah, 2021). Waktu kerja zona 3 yakni 1.2 – 1.6 detik. Zona 3 diatur dengan jangkauan hingga menutupi dua gardu induk di depannya atau dua seksi saluran ke depan, dengan waktu tunda maksimal 1600 milidetik. Pengaturan proteksi cadangan jauh tidak dibuat sampai masuk ke area impedansi transformator yang berada di depannya (H. Ahmad et al., 2023). Zona 3 dipilih dari nilai impedansi terbesar antara  $Z_{3min}$ ,  $Z_{3maks1}$ , dan  $Z_{3maks2}$  namun tidak melebihi 0.8 impedansi trafonya.



Gambar 2. 15 Setting Zona 3 Distance Relay

Untuk menghitung *setting* zona 3 dapat menggunakan persamaan 2.88, 2.89, 2.90, 2.91 dan 2.92 berikut:

$$Z_{3min} = 1.2 \times (Z_{L1} + Z_{L3} \cdot k) \quad (2.88)$$

$$Z_{3maks1} = 0.8 \times ((Z_{L1} + 1.2Z_{L2}) \cdot k) \quad (2.89)$$

$$Z_{3maks2} = 0.8 \times (Z_{L1} + (0.8(Z_{L3} + 0.8Z_{L4}))) \cdot k) \quad (2.90)$$

$$Z_{trafo} = 0.8 \times (Z_{L1} + 0.8X_T) \quad (2.91)$$

$$Z_{3s} = Z_{3p} \times n_1 \quad (2.92)$$

Dengan keterangan:

$Z_{3min}$  = Impedansi minimum zona 3 ( $\Omega$ )

$Z_{3maks1}$  = Impedansi maksimum 1 zona 3 ( $\Omega$ )

$Z_{3maks2}$  = Impedansi maksimum 2 zona 3 ( $\Omega$ )

$Z_{L1}$  = Impedansi saluran yang diamankan ( $\Omega$ )

$Z_{L2}$  = Impedansi saluran berikutnya yang terpendek ( $\Omega$ )

$Z_{L3}$  = Impedansi saluran berikutnya yang terbesar ( $\Omega$ )

$Z_{L4}$  = Impedansi saluran berikutnya yang terpendek dari bus terakhir ( $\Omega$ )

$X_T$  = Reaktansi transformator terkecil di gardu induk depannya ( $\Omega$ )

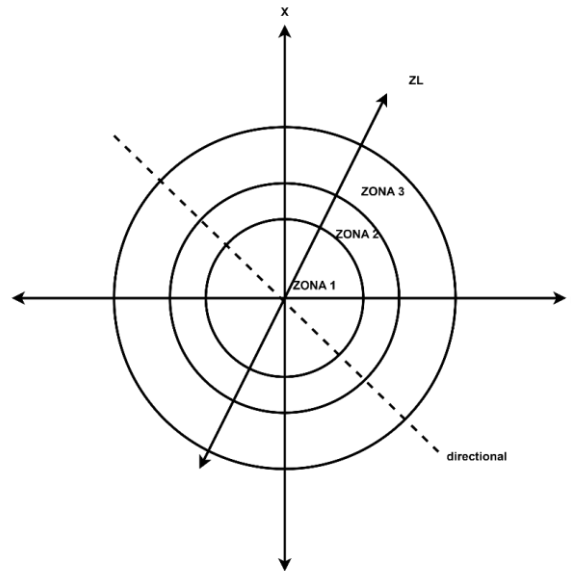
$Z_{3p}$  = Impedansi primer zona 3 ( $\Omega$ )

$Z_{3s}$  = Impedansi sekunder zona 3 ( $\Omega$ )

$n_1$  = Rasio trafo arus dan trafo tegangan

### 2.5.3 Karakteristik Rele Jarak

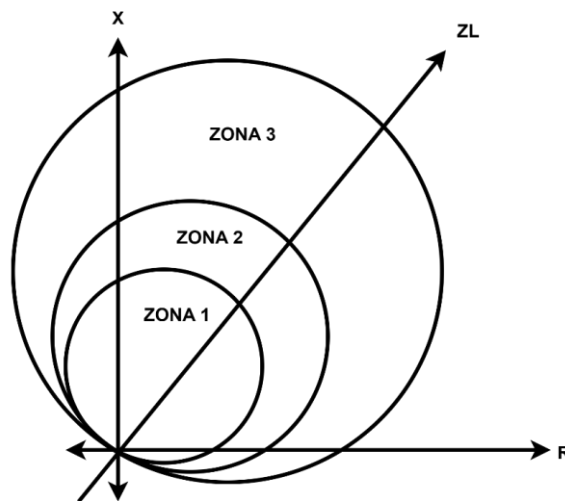
#### 2.5.3.1 Karakteristik Impedansi



Gambar 2. 16 Karakteristik Impedansi

Menurut Firdaus (2021), karakteristik ini mempunyai sifat tidak berarah (*non directional*) dengan titik pusatnya di tengah–tengah seperti pada Gambar 2.16. Nilai impedansinya relatif akan berubah sesuai dengan lokasi gangguan pada saluran transmisi. Semakin dekat gangguan ke rele, maka nilai impedansi yang terlihat semakin kecil.

### 2.5.3.2 Karakteristik Mho

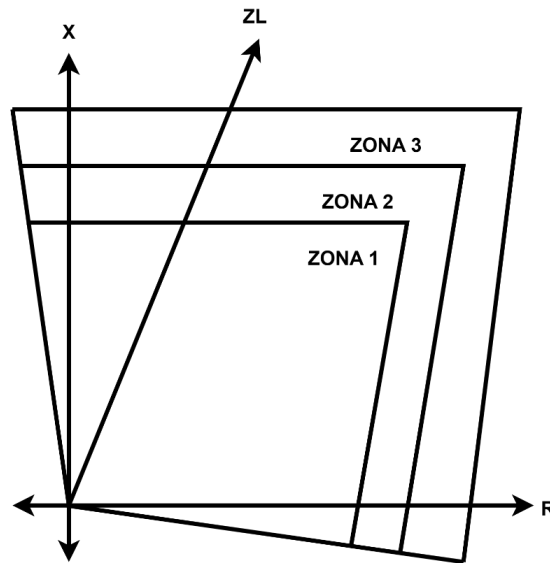


Gambar 2. 17 Karakteristik Mho

Berdasarkan Gambar 2.17, dan menurut Gusti et al. (2021), karakteristik mho ditunjukkan dalam tiga lingkaran yang mewakili zona 1, 2, dan 3 pada rele jarak. Jenis karakteristik pada *distance relay* merupakan bentuk penerapan prinsip dasar rele jarak yang divisualisasikan melalui diagram R-X. Pada karakteristik ini, pusat lingkaran proteksi bergeser dari titik nol sehingga bersifat *directional*. Namun, karakteristik ini memiliki keterbatasan dalam menangani gangguan tanah dengan resistansi tinggi.

Menurut Adi Prasetyo et al. (2023), gangguan dengan tahanan tinggi akan meningkatkan nilai resistansi gangguan  $R_f$ , sehingga menyebabkan rele tidak lagi merespon sesuai proteksi sebenarnya. Misalnya, gangguan yang seharusnya terdeteksi di zona 1 justru terbaca sebagai zona 2 akibat sifatnya resistif. Hal serupa juga berlaku pada gangguan dengan sifat kapasitif maupun induktif, di mana muncul tambahan  $X_f$ .

### 2.5.3.3 Karakteristik Quadrilateral



Gambar 2. 18 Karakteristik Quadrilateral

Karakteristik quadrilateral yang dapat dilihat pada Gambar 2.18 adalah kombinasi tiga komponen reaktansi, berarah dan resistif. Jika setelan jangkauan resistif cukup besar, maka karakteristik ini mampu mengantisipasi gangguan tanah dengan resistansi tinggi, namun tetap dibatasi maksimal 50% dari impedansi beban. Pada rele elektromekanik dan statis, umumnya kecepatan rele karakteristik quadrilateral lebih lambat dibanding dengan karakteristik mho. Namun, pada rele digital berbasis DSP, kecepatan antara karakteristik mho dan quadrilateral relatif sama. Karakteristik ini dapat digunakan untuk gangguan fasa–fasa dan fasa–tanah (Adi Prasetyo et al., 2023).

## 2.6 Pengaruh *Infeed Current*

Kondisi *infeed current* terjadi ketika ada arus yang masuk atau keluar ke titik gangguan dari sumber lain di luar dari jalur yang sedang dilindungi oleh rele. Arus

tersebut tidak sepenuhnya dirasakan oleh rele, karena rele hanya melihat perbandingan antara tegangan di titik gangguan dengan arus yang melewati CT. Akibatnya, rele mendeteksi nilai impedansi yang tidak sesuai, dapat lebih besar atau bahkan lebih kecil dari kondisi sebenarnya (Supriyatna, 2021). Atau dalam kata lain, arus *infeed* adalah arus hubung singkat (gangguan) tambahan yang disuplai ke lokasi gangguan pada saluran yang diproteksi, di mana arus tambahan tersebut berasal dari sumber atau terminal yang berbeda dari terminal tempat rele jarak yang ditinjau dan arus tersebut tidak melewati trafo arus (CT) dari rele yang ditinjau. Kondisi demikian juga menyebabkan jangkauan zona kerja *distance relay* tidak sesuai, dapat terjadi *underreach* (jangkauan kurang) atau *overreach* (jangkauan lebih). Pengaruh *infeed current* ini harus dipertimbangkan terutama pada zona 2 dan zona 3.

Nilai faktor *infeed current* ( $k$ ) merupakan parameter yang digunakan untuk menggambarkan pengaruh *infeed current* terhadap pembacaan impedansi oleh rele jarak. Nilai faktor *infeed current* ( $k$ ) dapat didefinisikan sebagai perbandingan antara arus total gangguan dengan arus yang masuk ke rele. Apabila tidak terdapat *infeed current* dari sisi lain, maka nilai  $k = 1$  dan rele akan membaca impedansi dengan akurat.

Jenis gangguan yang berbeda-beda mempengaruhi arus gangguan, yang akan berpengaruh pula impedansi gangguan dan nilai faktor *infeed current* ( $k$ ). Pada gangguan tiga fasa, arus gangguan total merupakan penjumlahan simetris dari arus tiga fasa sumber lokal dan *infeed* sehingga arusnya sangat besar karena melibatkan impedansi urutan positif (Saifussalam, 2025). Karena rele hanya mengukur sebagian kecil dari arus gangguan total, namun merasakan tegangan yang

dihasilkan oleh arus gangguan total tersebut, maka rele akan menghitung nilai impedansi yang jauh lebih besar. Karena arusnya seimbang/simetris, sehingga nilai  $k$  cenderung linear dan stabil.

Pada gangguan fasa-fasa melibatkan arus gangguan total yang berputar hanya di antara dua fasa yang saling bersentuhan, sehingga arusnya bergantung pada impedansi urutan positif dan negatif. Arus gangguan total lebih besar daripada arus yang dibaca oleh rele menyebabkan rele melihat tegangan yang dihasilkan arus gangguan total tersebut. Hal ini membuat rele membaca impedansi gangguan lebih besar. Nilai *faktor infeed current* ( $k$ ) cenderung linear dan stabil seperti pada gangguan tiga fasa.

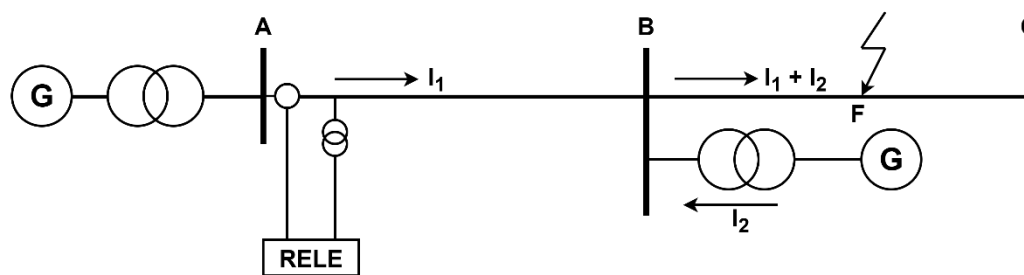
Menurut F. Ahmad et al. (2025), arus gangguan total pada gangguan satu fasa ke tanah melibatkan impedansi urutan positif, impedansi urutan negatif, dan impedansi urutan nol tersusun seri. Arus gangguan total akibat kontribusi urutan nol menyebabkan deviasi impedansi gangguan yang ekstrem jika terhubung ke *infeed* yang diketanahkan. Namun, apabila pada kondisi *infeed current* yang tidak diketanahkan, walaupun tidak ada kontribusi arus urutan nol dari *infeed* tetapi impedansi gangguan tetap lebih besar. Sehingga, nilai faktor *infeed* ( $k$ ) cenderung linear juga. Sedangkan, pada *infeed* yang melibatkan arus urutan nol maka nilai  $k$  akan jauh lebih tinggi.

Gangguan dua fasa ke tanah pada gangguan dua fasa ke tanah, impedansi urutan nol tersusun secara paralel dengan impedansi urutan negatif dan terhubung seri dengan impedansi urutan positif. Arus gangguan total pada gangguan ini biasanya dimodelkan mendekati karakteristik gangguan fasa-fasa karena kontribusi

arus fasa lebih dominan. Sehingga, impedansi gangguan akan lebih besar juga, dan nilai  $k$  cenderung linear dan stabil.

Dari keempat jenis gangguan tersebut, pada kondisi arus gangguan yang besar, impedansi gangguan yang terbaca bernilai kecil, kemudian akan menghasilkan nilai  $k$  yang cenderung kecil ( $k < 0$ ). Sedangkan, saat arus gangguannya kecil, impedansi gangguan yang dibaca oleh rele bernilai besar, maka nilai  $k$  yang dihasilkan cenderung besar ( $k > 0$ ).

### 2.6.1 Adanya Pembangkit Pada Gardu Induk di Depannya



Gambar 2. 19 Adanya Pembangkit Pada Gardu Induk di Depannya

Dapat dilihat pada Gambar 2.19, adanya pusat pembangkit pada gardu induk di depan saluran transmisi yang dilindungi akan menyumbang arus yang menuju ke titik gangguan F dan akan mempengaruhi nilai impedansi yang dibaca oleh rele. Berdasarkan PT. PLN (Persero) (2013), untuk menghitung impedansi gangguan dapat menggunakan Persamaan 2.93, 2.94, 2.95, dan 2.96 berikut:

$$Z_{AF} = \frac{V_{AF}}{I_{AF}} = \frac{I_1 Z_{AB} + (I_1 + I_2) Z_{BF}}{I_1} \quad (2.93)$$

$$Z_{AF} = Z_{AB} + \frac{(I_1 + I_2)}{I_1} Z_{BF} \quad (2.94)$$

$$Z_{AF} = Z_{AB} + k \cdot Z_{BF} \quad (2.95)$$

Dimana,

$$k = \frac{(I_1 + I_2)}{I_1} \quad (2.96)$$

Dengan keterangan:

$k$  = Nilai faktor *infeed current*

$Z_{AF}$  = Impedansi rele A ( $\Omega$ )

$V_{AF}$  = Tegangan yang diukur oleh rele A (V)

$I_{AF}$  = Arus yang diukur oleh rele A (A)

$I_1$  = Arus pada saluran A-B (A)

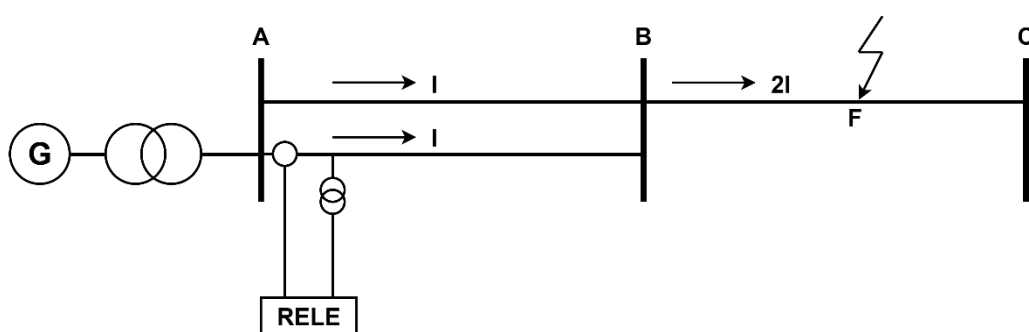
$I_2$  = Arus pada sisi pembangkit (A)

$Z_{AB}$  = Impedansi saluran A-B ( $\Omega$ )

$Z_{BF}$  = Impedansi bus B sampai titik gangguan ( $\Omega$ )

Pada kondisi ini *setting* jangkauan rele jarak perlu dikalikan dengan faktor *infeed*,  $k = 1.2$  s.d.  $1.6$ .

### 2.6.2 Adanya Perubahan Dari Saluran Ganda ke Tunggal



Gambar 2. 20 Adanya Perubahan Dari Saluran Ganda ke Tunggal

Adanya perubahan saluran ganda menjadi saluran tunggal dapat mempengaruhi impedansi yang dilihat oleh rele. Hal ini dikarenakan pada saluran

ganda, nilai impedansi saluran besarannya akan kecil karena saluran terhubung paralel seperti pada Gambar 2.20, sedangkan pada saluran tunggal nilai impedansinya lebih besar. Ketika di titik F terdapat gangguan, untuk menghitung impedansi yang terbaca pada rele dapat menggunakan Persamaan 2.97, 2.98, dan 2.99 berikut:

$$Z_{AF} = \frac{V_{AF}}{I_{AF}} = \frac{I \cdot Z_{AB} + 2I \cdot Z_{BF}}{I} \quad (2.97)$$

$$Z_{AF} = Z_{AB} + 2 \cdot Z_{BF} \quad (2.98)$$

Dimana,

$$k = 2 \quad (2.99)$$

Dengan keterangan:

$k$  = Nilai faktor *infeed current*

$Z_{AF}$  = Impedansi rele A ( $\Omega$ )

$V_{AF}$  = Tegangan yang diukur oleh rele A (V)

$I_{AF}$  = Arus yang diukur oleh rele A (A)

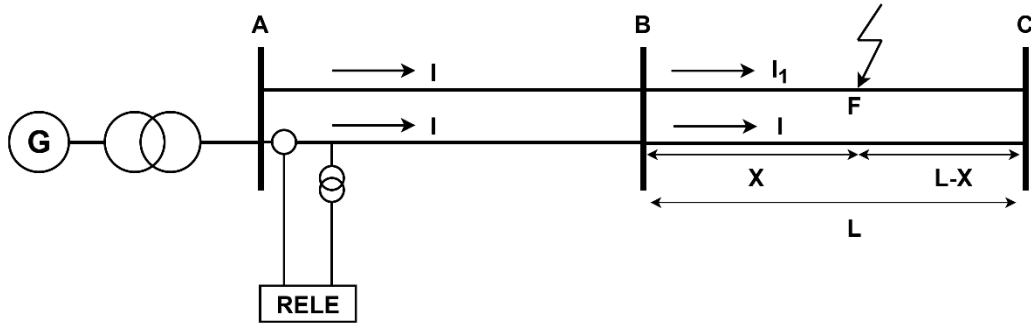
$I$  = Arus saluran A-B (A)

$Z_{AB}$  = Impedansi saluran A-B ( $\Omega$ )

$Z_{BF}$  = Impedansi bus B sampai titik gangguan ( $\Omega$ )

Pada kondisi ini *setting* jangkauan rele jarak perlu dikalikan dengan faktor *infeed*,  $k = 2$ .

### 2.6.3 Adanya Perubahan Dari Saluran Ganda ke Ganda



Gambar 2. 21 Adanya Perubahan Dari Saluran Ganda ke Ganda

Rele yang dipasang berdasarkan kondisi tunggal namun pada kondisi saluran ganda ke ganda maka akan menyebabkan tidak akuratnya impedansi gangguan yang dibaca oleh rele. Hal ini dikarenakan impedansi saluran nilainya relatif kecil karena masing – masing saluran terhubung paralel. Dapat dilihat pada Gambar 2.21, apabila gangguan terjadi di titik F, maka impedansi yang terukur oleh rele dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.100, 2.101, 2.102, 2.103, dan 2.104 berikut:

$$Z_{AF} = \frac{V_{AF}}{I_{AF}} = \frac{I \cdot Z_{AB} + I_1 \cdot Z_{BF}}{I} \quad (2.100)$$

$$Z_{AF} = Z_{AB} + \frac{I_1}{I} Z_{BF} \quad (2.101)$$

Dengan,

$$I_1 = 2I \frac{(2L-X)}{2L} \quad (2.102)$$

$$Z_{AF} = Z_{AB} + \frac{(2L-X)}{L} \cdot Z_{BF} \quad (2.103)$$

Dimana,

$$k = \frac{(2L-X)}{L} \quad (2.104)$$

Dengan keterangan:

$k$  = Nilai faktor *infeed current*

$Z_{AF}$  = Impedansi rele A ( $\Omega$ )

$V_{AF}$  = Tegangan yang diukur oleh rele A (V)

$I_{AF}$  = Arus yang diukur oleh rele A (A)

$I$  = Arus saluran A-B (A)

$I_1$  = Arus saluran yang terkena gangguan (A)

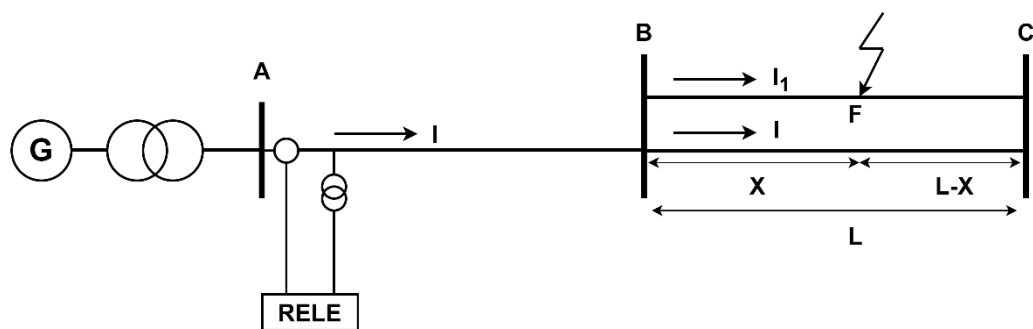
$Z_{AB}$  = Impedansi saluran A-B ( $\Omega$ )

$Z_{BF}$  = Impedansi bus B sampai titik gangguan ( $\Omega$ )

Pada kondisi ini *setting* jangkauan rele jarak perlu dikalikan dengan faktor *infeed*:

- Untuk gangguan F dekat bus B ( $X=0$ ), faktor *infeed*  $k = 2$ .
- Untuk gangguan F dekat bus C ( $X=1$ ), faktor *infeed*  $k = 1$ .
- Untuk gangguan F di antara bus B dan bus C, faktor *infeed*  $1 \leq k \leq 2$ .

#### 2.6.4 Adanya Perubahan Dari Saluran Tunggal ke Ganda



Gambar 2. 22 Adanya Perubahan Dari Saluran Tunggal Ke Ganda

Pada kondisi ini terjadi perubahan saluran transmisi dari tunggal ke ganda yang dapat menyebabkan impedansi saluran yang semula besar dari saluran tunggal menjadi lebih kecil karena berubahnya ke saluran ganda. Jika gangguan muncul di titik F seperti pada Gambar 2.22, serta berdasarkan Persamaan 2.99, nilai impedansi

gangguan yang dibaca oleh rele dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.105, 2.106, 2.107, dan 2.108 berikut:

$$Z_{AF} = Z_{AB} + \frac{I_1}{I} Z_{BF} \quad (2.105)$$

Dengan,

$$I_1 = I \frac{(2L-X)}{2L} \quad (2.106)$$

$$Z_{AF} = Z_{AB} + \frac{(2L-X)}{2L} \cdot Z_{BF} \quad (2.107)$$

Dimana,

$$k = \frac{(2L-X)}{2L} \quad (2.108)$$

Dengan keterangan:

$k$  = Nilai faktor *infeed current*

$Z_{AF}$  = Impedansi rele A ( $\Omega$ )

$V_{AF}$  = Tegangan yang diukur oleh rele A (V)

$I_{AF}$  = Arus yang diukur oleh rele A (A)

$I$  = Arus saluran A-B (A)

$I_1$  = Arus saluran yang terkena gangguan (A)

$Z_{AB}$  = Impedansi saluran A-B ( $\Omega$ )

$Z_{BF}$  = Impedansi bus B sampai titik gangguan ( $\Omega$ )

Pada kondisi ini *setting* jangkauan rele jarak perlu dikalikan dengan faktor *infeed*:

- Untuk gangguan F dekat bus B ( $X=0$ ), faktor *infeed*  $k = 0.5$ .
- Untuk gangguan F dekat bus C ( $X=1$ ), faktor *infeed*  $k = 1$ .
- Untuk gangguan F di antara bus B dan bus C, faktor *infeed*  $0.5 \leq k \leq 1$ .

## 2.7 Komponen Sumber Sistem

Dalam pemodelan sistem yang akan di teliti berdasarkan kondisi eksisting, suplai didapatkan dari Pembangkit Tenaga Listrik Uap (PLTU). Sehingga pada bab ini, dibahas secara teori dasar komponen yang menjadi sumber atau suplai bagi sistem.

### 2.7.1 Generator Sinkron

Generator sinkron berfungsi mengubah energi mekanik menjadi energi listrik melalui proses elektromagnetik. Generator sinkron merupakan salah satu jenis dari generator AC yang memiliki fungsi utama dalam menghasilkan arus bolak-balik dengan frekuensi tetap sesuai kebutuhan sistem kelistrikan (Azis et al., 2024).

### 2.7.2 Trafo *Step-Up*

Trafo *step-up* adalah peralatan listrik yang bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik (Tiasmoro & Topan, 2021). Trafo *step-up* merupakan transformator yang digunakan untuk menaikkan tegangan karena jumlah lilitan pada sisi sekundernya lebih banyak dibandingkan sisi primer. Trafo ini biasanya dipasang di pembangkit listrik untuk meningkatkan tegangan dari generator sebelum disalurkan melalui jaringan transmisi jarak jauh (Mustari et al., 2024).

Pada praktisnya menurut Umans (2014), *rating* daya semu (MVA) pada trafo *step-up* dipilih sedikit lebih besar dibandingkan dengan *rating* MVA generatornya. Hal ini dikarenakan untuk mengakomodasi rugi-rugi daya (*losses*) pada trafo, serta memberikan margin keandalan terhadap *overload* jangka pendek.

Impedansi tranformator pada praktisnya yang sering diwakili dalam nilai presentase (%) dan terdapat pada *nameplat*enya atau merupakan nilai pabrikan.

Namun, apabila nilai tersebut tidak diketahui, berdasarkan IEC 60076-5:2006, terdapat nilai standar impedansi hubung singkat (%) yang dapat digunakan seperti termuat pada Tabel 2.2 berikut.

Tabel 2. 1 Nilai Standar Impedansi Hubung Singkat Berdasarkan IEC 60076-5:2006

| <b>Rating Daya (kVA)</b> | <b>Impedansi Hubung Singkat (%)</b> |
|--------------------------|-------------------------------------|
| 25 – 630                 | 4.0                                 |
| 631 – 1250               | 5.0                                 |
| 1251 – 2500              | 6.0                                 |
| 2501 – 6300              | 7.0                                 |
| 6301 – 25000             | 8.0                                 |
| 25001 – 40000            | 10.0                                |
| 40001 – 63000            | 11.0                                |
| 63001 – 100000           | 12.5                                |
| $\geq 100000$            | $\geq 12.5$                         |

## 2.8 Penelitian Terkait

Tabel 2. 2 Penelitian Terkait

| No. | Judul                                                                    | Penulis, Tahun          | Pembahasan                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|-----|--------------------------------------------------------------------------|-------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1.  | <i>The Effect of Wind Power Generation on Distance Relay Performance</i> | (Adrianti et al., 2022) | Penggunaan pembangkit angin yang menghasilkan arus hubung singkat lebih kecil dibanding generator sinkron, sehingga berpotensi mempengaruhi keakuratan kerja <i>distance relay</i> . Penyelesaian dilakukan dengan simulai IEEE 5 bus pada <i>software</i> DigSILENT dengan beberapa percobaan diantaranya, sistem awal terdapat dua generator sinkron kemudian salah satunya diganti dengan pembangkit tenaga angin (model <i>static converter</i> dan <i>no-fault current contribution</i> ), lalu kinerja rele dianalisis pada kondisi gangguan 3 fasa tanpa resistansi serta dengan resistansi 1 ohm dan 10 ohm. Hasilnya menunjukkan bahwa pada zona 1, rele masih bekerja sama, namun pada zona 2 dan 3 terjadi perubahan jangkauan yakni sebagian |

| No. | Judul                                                                                                                                 | Penulis, Tahun                          | Pembahasan                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|-----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|     |                                                                                                                                       |                                         | <p>rele mengalami <i>overreach</i> akibat berkurangnya efek <i>infeed</i>, sementara lainnya mengalami <i>underreach</i> karena arus gangguan lebih kecil dari pembangkit angin. Selain itu, adanya resistansi gangguan semakin menurunkan jangkauan rele, bahkan pada resistansi tinggi (10 ohm) beberapa rele gagal mendeteksi gangguan di zona 1.</p>                                                                                                                                                                                                               |
| 2.  | <p><i>Performance Evaluation of Distance Relay Operation in Distribution Systems with Integrated Distributed Energy Resources</i></p> | <p>(Garibello-Narváez et al., 2024)</p> | <p>Integrasi <i>Distributed Energy Resources</i> (DERs) dalam sistem distribusi menimbulkan masalah proteksi terutama pada <i>distance relay</i>. Masalah tersebut dapat meliputi kesalahan estimasi impedansi, pergeseran zona serta keterlambatan <i>trip</i>. Penyelesaian dilakukan dengan simulasi IEEE 13 <i>Node Test Feeder</i> di DigSILENT dengan cara membandingkan rele mho dan quadrilateral pada berbagai jenis dan tingkat penetrasi DERs. Hasil simulasi menunjukkan zona 1 stabil, tetapi zona 2 dan 3 terganggu terutama oleh PV dan <i>wind</i></p> |

| No. | Judul                                                                                                   | Penulis, Tahun        | Pembahasan                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|-----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|     |                                                                                                         |                       | <i>turbine</i> . Dan Solusi yang ditawarkan <i>quadrilateral relay</i> lebih andal karena mampu menahan penetrasi DERs lebih tinggi dibanding mho.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| 3.  | <p><i>New Infeed Correction<br/>Methods for Distance<br/>Protection in Distribution<br/>Systems</i></p> | (Hariri & Crow, 2021) | <p>Integrasi <i>Distrbuted Generation</i> (DG) meimbulkan masalah proteksi berupa <i>infeed effect</i>, yakni kesalahan pembacaan impedansi oleh <i>distance relay</i> yang dapat menyebabkan <i>underreach</i> atau mal operasi. Diusulkan tiga metode koreksi <i>infeed</i> meliputi, tidak memerlukan komunikasi antar terminal, membandingkan dua kurva impedansi rele (dengan dan tanpa DG) untuk menghitung impedansi sebenarnya, dan menggunakan pengukuran lokal serta data lokasi DG tanpa perhitungan <i>offline</i> rumit. Metode tersebut dilakukan pada <i>software</i> PSCAD. Hasil yang didapatkan yakni dari ketiga metode tersebut mampu mengoreksi <i>infeed effect</i> secara akurat, murah dan andal sehingga meningkatkan keandalan kinerja <i>distance relay</i> pada sistem</p> |

| No. | Judul                                                                                                                              | Penulis, Tahun       | Pembahasan                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|-----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|     |                                                                                                                                    |                      | distribusi dengan DG.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| 4.  | Proteksi Rele Jarak<br><i>(Distance Relay)</i> Pada<br>Saluran Udara Tegangan<br>Tinggi (SUTT) 150 kV<br>Sistem Kelistrikan Lombok | (Wahyuningsih, 2020) | <p>Sistem kelistrikan Lombok 150 kV rawan gangguan sehingga diperlukan proteksi andal dengan rele jarak. Penyelesaian dilakukan dengan cara menghitung <i>setting</i> impedansi rele jarak, simulasi gangguan hubung singkat (3 fasa dan 1 fasa ke tanah) pada berbagai titik (25%, 50%, 75%, dan 100% dari panjang saluran) dengan menggunakan ETAP 7.5, menganalisis pengaruh faktor <i>infeed</i> akibat adanya pembangkit di ujung saluran, serta mengecek koordinasi rele jarak dari grafik impedansi waktu. Hasil yang didapatkan dari penelitian ini rele sudah bekerja sesuai dengan zonanya tanpa <i>overlap</i> dan sistem terlindungi. Faktor <i>infeed</i> dari pembangkit mempengaruhi zona 3 dan memerlukan penyesuaian <i>setting</i> agar proteksi tetap efektif.</p> |

| No. | Judul                                                                                                                                                  | Penulis, Tahun  | Pembahasan                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|-----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 5.  | Efek Pembangkit Listrik<br>Tenaga Angin Terhadap<br>Kerja Rele Jarak Pada<br>Sistem IEEE 5 Bus Dengan<br>Menggunakan DigSILENT<br><i>Power Factory</i> | (Firdaus, 2021) | PLTB menghasilkan arus gangguan lebih kecil dibanding generator sinkron sehingga mempengaruhi kerja rele jarak. Metode yang dilakukan menggunakan simulasi IEEE 5 bus di DigSILENT dengan uji gangguan 3 fasa dengan atau tanpa resistansi. Hasil dari penelitian menunjukkan bahwa PLTB tidak mempengaruhi zona 1, namun bisa memperluas atau mempersempit jangkauan rele pada zona 2 dan 3 tergantung posisi rele. |

Dapat dilihat pada Tabel 2.1 di atas merupakan beberapa penelitian yang dapat dijadikan sebagai referensi bagi penelitian ini. Pada penelitian–penelitian tersebut membahas pengaruh *infeed* akibat adanya pembangkit seperti *Distributed Generation*(GD), *Distributed Energi Resources*(DER), dan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) terhadap kinerja *distance relay* menggunakan simulasi IEEE 5 bus, IEEE 13 *node* melalui *software* DigSilent, PSCAD dan ETAP 7.5. Secara garis besar yang dianalisis pada penelitian–penelitian tersebut yakni perubahan jangkauan zona *distance relay* saja, sedangkan pada penelitian ini dilakukan perhitungan nilai faktor *infeed current* (k) yang kemudian dijadikan parameter untuk melakukan *resetting* zona *distance relay*. Perbedaan lainnya yakni pengaruh *infeed current* yang dianalisis, pada penelitian sebelumnya hanya berfokus pada sumber baru berupa pembangkit, sedangkan pada penelitian ini pengaruh *infeed current* bukan hanya karena ada pembangkit saja namun ketika ada perubahan kondisi saluran pun dianalisis. Serta perangkat lunak yang digunakan pada penelitian ini yakni ETAP 19.0.1.