

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1. Transmisi

2.1.1 Saluran Transmisi

Pembangkit listrik biasanya jauh dari tempat di mana tenaga listrik di gunakan, karena hal tersebutlah energi listrik yang di bangkitkan harus di salurkan oleh saluran transmisi. Pamaikaian saluran transmisi di dasarkan dari besarnya daya yang di salurkan oleh pusat-pusat pembangkit ke pusat beban. Dalam penyaluran sistem transmisi daya dengan tegangan tinggi di perlukan untuk mengurangi rugi-rugi daya akibat panjangnya saluran menuju pusat beban. (Cekdin & Barlian, 2013)

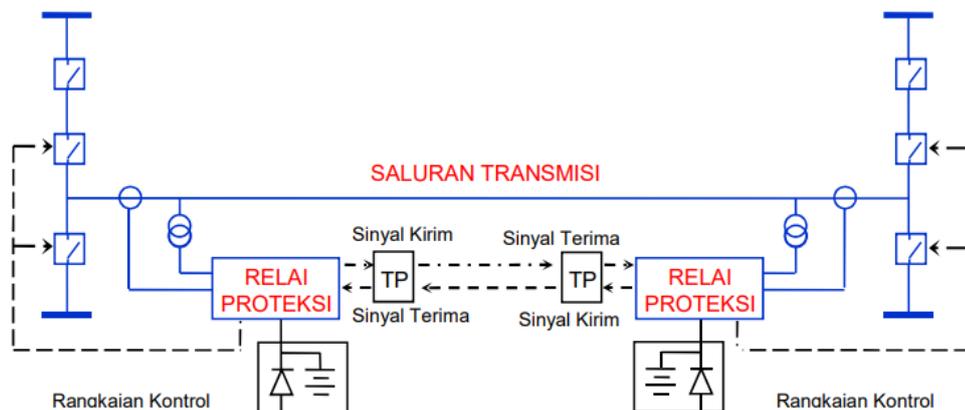
2.1.2 Dasar Sistem Proteksi

Sistem proteksi adalah susunan perangkat proteksi secara lengkap yang terdiri dari perangkat utama dan perangkat-perangkat lain yang dibutuhkan untuk melakukan fungsi tertentu berdasarkan prinsip prinsip proteksi sesuai dengan definisi yang terdapat pada standar IEC 6255-20

Perangkat proteksi adalah kumpulan atau koleksi perangkat proteksi seperti sekring, rele, dan lain lainnya di luar perangkat trafo arus, perangkat pemutus tenaga(PMT), kontaktor dan lain sebagainya(Bonar Pandjaitan, Tahun 2012)

Sistem proteksi bay penghantar adalah suatu sistem yang berfungsi untuk mengamankan/mengisolir penghantar (saluran udara/saluran kabel) tegangan tinggi atau tegangan ekstra tinggi dari gangguan temporer dan gangguan

permanen yang terjadi pada penghantar tersebut. Secara umum, bagian dari sistem proteksi penghantar dapat digambarkan pada Gambar 2.1 dan Gambar 2.2 sebagai berikut.



Gambar 2.1 Typical Komponen Sistem Proteksi SUTET

Komponen sistem proteksi terdiri dari transformator arus (CT), transformator tegangan (PT/CVT), *relay* proteksi, pemutus tenaga (PMT), catu daya rangkaian pengawatannya (*wiring*) dan teleproteksi.



Gambar 2.2 Typical Komponen Sistem Proteksi SUTT

Daerah kerja proteksi bay penghantar adalah daerah di antara 2 (dua) atau lebih CT pada gardu-gardu induk berhadapan yang disebut sebagai unit proteksi penghantar. (PT.PLN(Persero), 2013)

Current Transformer (CT) atau Trafo Arus adalah peralatan yang dapat menurunkan besaran arus listrik (Ampere) pada sistem tenaga listrik menjadi besaran arus. tanpa mengubah frekuensinya. Fungsi utama *Current Transformer* (CT) adalah merubah besaran arus listrik berskala besar ke skala lebih kecil pada sistem tenaga listrik. Hal ini dapat berguna untuk keperluan pengukuran, transformator instrumen, dan proteksi.

Transformator Tegangan / Potensial (PT) adalah trafo instrument yang berfungsi untuk merubah tegangan tinggi menjadi tegangan rendah untuk keperluan, peralatan indikator, alat ukur / meter dan *relay*.

2.1.3 Impedansi Saluran

Pada perhitungan *setting distance relay*, impedansi merupakan parameter pokok yang digunakan dalam perhitungan. Untuk menghitung impedansi (Z) saluran transmisi, terlebih dahulu kita menghitung resistansi saluran (R) dan reaktansi saluran (X), dimana nilai dari reaktansi bisa didapat dari 2 parameter yaitu nilai kapasitansi dan induktansi (Sepang et al., 2017)

Impedansi saluran penghantar udara terdiri dari tahanan, reaktansi induktif dan reaktansi kapasitif yang masing-masing yang nilainya lumayan besar yang tidak dapat di abaikan begitu saja

Reaktansi induktif suatu kawat penghantar dalam kebanyakan hal tergantung pada karakteristik kawat penghantar dan jarak fisis antara kawat-kawat penghantar. Semakin besar jarak antar kawat fasa dengan fasa, maka reaktansi induktif saluran penghantar yang membentuk sistem tiga fasa akan semakin besar

Reaktansi kapasitif atau Capacitive Reactance ini dapat diartikan sebagai hambatan yang timbul pada Kapasitor yang dilewati oleh arus bolak-balik (arus AC). Sebaliknya, semakin rendah frekuensi tegangan AC yang melalui kapasitor tersebut, semakin tinggi nilai reaktansi kapasitif. arus listrik yang mengalir melewati kapasitor tersebut dibatasi oleh resistansi pada kapasitor itu sendiri. (Sepang et al., 2017a)

Dalam setiap bagian rangkaian, jatuh tegangan yang disebabkan oleh arus dengan urutan tertentu tergantung pada impedansi bagian rangkaian itu terhadap arus dengan urutan tersebut. Impedansi setiap bagian suatu jaringan yang seimbang terhadap arus salah satu urutan dapat berbeda dengan impedansi terhadap arus dari urutan lain.

Impedansi suatu rangkaian yang hanya mengalir arus urutan positif disebut impedansi terhadap arus urutan positif. Demikian pula, bila hanya ada arus urutan negatif, impedansinya dinamakan impedansi terhadap arus urutan negatif. Jika hanya ada urutan nol, impedansinya dinamakan impedansi terhadap arus urutan nol. Sebutan impedansi rangkaian terhadap arus dari urutan yang berbeda ini biasanya disingkat menjadi istilah yang sebenarnya kurang jelas artinya, yaitu impedansi urutan positif, impedansi urutan negatif dan impedansi urutan nol. Analisa suatu gangguan tak simetris pada suatu sistem yang simetris terdiri dari penentuan komponen-komponen simetris dari arus-arus tak seimbang yang mengalir. Karena arus-arus komponen dari salah satu urutan fasa menimbulkan tegangan jatuh dengan urutan yang sama dan tidak tergantung pada arus-arus dari urutan-urutan yang lain, dalam suatu sistem yang seimbang arus-arus dari salah satu

urutan dapat dianggap mengalir dalam suatu jala-jala bebas yang terdiri hanya dari impedansi-impedansi terhadap arus dari urutan. Rangkaian ekuivalen fasatunggal yang hanya terdiri dari impeansi-impedansi terhadap arus dari salah satu urutan dinamakan jalajala urutan untuk urutan tersebut. Jala-jala urutan meliputi setiap emf yang dibangkitkan pada urutan yang sama. Jala-jala urutan yang mengalirkan arus I_{a1} , I_{a2} dan i_{a0} di interkoneksi untuk melukiskan berbagai-bagai keadaan gangguan yang tak seimbang. Karena itu, untuk menghitung pengaruh suatu gangguan dengan metode komponen-komponen simetris, adalah penting sekali untuk menentukan impedansi-impedansi urutannya dan menggabungkannya untuk membentuk jala-jala urutannya.

Analisa suatu gangguan tak simetris pada suatu sistem yang simetris terdiri dari penentuan penentuan komponen simetris dari arus-arus tak seimbang yang mengalir. Karena arus-arus komponen dari salah satu urutan fasa menimbulkan tegangan-jatuh dengan urutan yang sama saja dan tidak tergantung pada arus-arus dari urutan urutan yang lain, dalam suatu sistem yang siembang arus-arus dari salah satu urutan dapat dianggap dalam suatu jala-jala bebas yang terdiri dari impedansi-impedansi terhadap dari urutan itu saja. Jala-jala urutan meliputi setiap emf yang dibangkitkan pada urutan yang sama. Jala-jala urutan yang mengalir

Mengitung Impedansi sumber dalam perhitungan arus hubung singkat pada dari sistem 150 kV yang dipasok dari gardu induk, maka untuk menghitung impedensi saluran.

Hubungan antara suseptansi (B) dan reaktansi kapasitif (X_c)

$$B = \frac{1}{X_c} \quad (2.1)$$

Reaktansi Kapasitif (X_c)

$$X_c = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \quad (2.2)$$

Nilai C di tentukan oleh jenis penghantar dan konfigurasi penghantar antar pada transmisi.

Hubungan antara Suseptansi (B) dan kapasitansi (C)

$$B = \frac{1}{2\pi f C} \quad (2.3)$$

Keterangan :

B = Suseptansi (S/km)

X_c = Reaktansi Kapasitif (Ohm)

π = 3,14

f = Frekuensi (50 Hz)

C = kapasitansi (F/km)

Impedansi

$$Z = R + jX \quad (2.4)$$

$$Z = R + jX_L + jX_c \quad (2.5)$$

$$Z = R + j(X_L + X_c) \quad (2.6)$$

Keterangan :

Z = Impedansi(Ohm)

R = Resistansi(Ohm)

X = Reaktansi(Ohm/Km)

X_L = Reaktansi Induktif(Ohm/km)

X_c = Reaktansi Kapasitif(Ohm/km)

Penyebab terjadinya hubung singkat

- a. Dikarenakan adanya isolasi yang tembus / rusak karena tidak mampu menahan tegangan lebih, (akibat manipulasi / *switching*) atau tegangan lebih luar (akibat petir) maupun karena isolasi tersebut telah tua / usang.
- b. Bisa disebabkan juga oleh pengaruh mekanis yang menyebabkan hantaran putus dan mengenai phase / phase lainnya seperti akibat layang-layang, angin kencang maupun akibat galian yang kurang hati-hati dan lain sebagainya.
- c. Arus dan tegangan hubung singkat yang bisa terjadi dalam sistem kelistrikan yaitu arus hubung singkat tiga fasa, arus hubung singkat dua fasa, dan arus hubung singkat satu fasa ke tanah. (Sepang et al., 2017b)

2.1.4 Komponen Simetris

Prinsip dasar komponen simetris adalah, suatu kumpulan tiga hubungan vektor yang tidak seimbang, yang dapat diuraikan menjadi tiga set vektor yang seimbang. Ketiga set vektor yang seimbang itu biasa disebut dengan komponen urutan positif, komponen urutan negatif, dan komponen urutan nol.

Penggunaan komponen simetris pada sistem tiga fasa memerlukan suatu satuan fasor atau operator yang akan memutar rotasi fasor dengan fasor lainnya yang berbeda fasa 120° . Bila dipakai fasor operator satuan adalah a , maka :

$$a = -0.5 + j0.866 \text{ dan } a^2 = -0.5 - j0.866$$

Fasor tiga fasa tidak seimbang dari sistem tiga fasa dapat dipecahkan ke dalam fasor tiga fasa seimbang sebagai berikut :

- Komponen urutan positif, terdiri dari seperangkat komponen tiga fasa seimbang dan mempunyai urutan fasa yang sama dengan fasor-fasor aslinya.
- Komponen urutan negatif, terdiri dari seperangkat komponen tiga fasa seimbang dan mempunyai urutan fasa yang berlawanan dengan fasor-fasor aslinya.
- Komponen urutan nol, terdiri dari komponen satu fasa yang semuanya sama besar dan mempunyai sudut fasa yang sama.

Komponen simetris arus tak seimbang :

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

$$I_{a1} = \frac{1}{3} (I_a + aI_b + a^2I_c)$$

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

Komponen simetris tegangan tak seimbang adalah :

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

$$V_{a1} = \frac{1}{3} (V_a + aV_b + a^2V_c)$$

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

Gangguan yang sering terjadi pada sistem tenaga listrik merupakan gangguan tidak simetris sehingga memerlukan metode komponen simetris

untuk menganalisa tegangan dan arus pada saat terjadinya gangguan. Gangguan yang terjadi dapat dianalisa dengan menghubungkan-singkatkan semua sumber tegangan yang ada pada sistem dan mengganti titik (node) gangguan dengan sebuah sumber tegangan yang besarnya sama dengan tegangan sesaat sebelum terjadinya gangguan di titik gangguan tersebut. Dengan menggunakan metode ini sistem tiga fasa tidak seimbang dapat direpresentasikan dengan menggunakan teori komponen simetris yaitu berdasarkan komponen urutan positif, komponen urutan negatif dan komponen urutan nol. (Saputra et al., 2020)

2.1.5 Arus Gangguan Hubung Singkat

Gangguan yang terjadi pada saluran transmisi akan dideteksi dan diamankan oleh rele jarak. Nilai gangguan yang terjadi dapat diukur

Untuk menghitung arus hubung singkat pada sistem, pertama – tama dimulai dari perhitungan impedansi sumber, impedansi trafo tenaga, impedansi saluran transmisi, dan nilai impedansi ekivalen (Maisyarah, 2019)

$$MVA_{hs} = I_{hs} 3\phi_{max} \times V_{primer\ trafo} \times \sqrt{3} \quad (2.7)$$

Keterangan :

MVA_{hs} = kapasitas daya hubung singkat GI (MVA)

$I_{hs} 3\phi_{max}$ = Arus hubung singkat 3 fasa maks GI (kA)

$V_{primer\ trafo}$ = Tegangan sisi primer trafo tenaga (kV)

Untuk menghitung impedansi sumber digunakan persamaan:

$$Z_s(sisi\ 150\ kV) = \frac{kV^2(Sisi\ Primer)}{MVA_{hs}} \quad (2.8)$$

Keterangan

$Z_s(Primer)$ = Impedansi sumber primer (Ohm)

$kV^2(Primer)$ = Tegangan sisi primer trafo tenaga (kV)

MVA_{hs} = kapasitas daya hubung singkat GI (MVA)

$$Z_s(Sisi\ 20kV) = \frac{kV^2(Sisi\ Sekunder)}{kV^2(Sisi\ Primer)} \times Z_s(sisi\ 150\ kV) \quad (2.9)$$

Keterangan

$Z_s(Sekunder)$ = Impedansi sumber sekunder (Ohm)

$Z_s(Primer)$ = Impedansi sumber primer (Ohm)

$kV^2(sekunder)$ = Tegangan sisi sekunder trafo tenaga (kV)

$kV^2(Primer)$ = Tegangan sisi primer trafo tenaga (kV)

Menghitung Impedansi trafo tenaga :

Impedansi urutan positif dan negative ($Z_{t_1} = Z_{t_2}$)

$$Z_t = Xt\% \times \frac{kV^2}{MVA} \quad (2.10)$$

Impedansi urutan nol (Z_{t_0}) Impedansi urutan nol ini didapat dengan memperhatikan data trafo tenaga itu sendiri yaitu dengan melihat kapasitas belitan delta yang ada dalam trafo itu :

1. Untuk trafo tenaga dengan hubungan belitan Δ/Y dimana kapasitas belitan delta sama besar dengan kapasitas belitan Y, maka :

$$Z_{t_0} = Z_{t_1} \quad (2.11)$$

2. Untuk trafo tenaga dengan belitan Y_{yd} dimana kapasitas belitan delta (d) biasanya sepertiga dari kapasitas belitan Y (belitan yang dipakai untuk menyalurkan daya, sedangkan belitan delta tetap ada di dalam

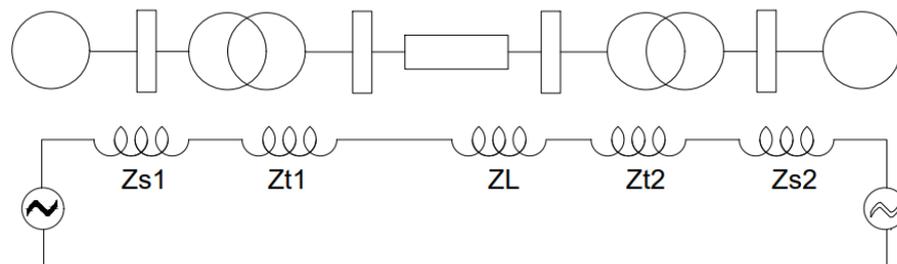
tetapi tidak dikeluarkan kecuali satu terminal delta untuk ditanahkan),
maka :

$$Z_{t_0} = 3Z_{t_1} \quad (2.12)$$

3. Untuk trafo tenaga dengan hubungan YY dan tidak mempunyai belitan delta di dalamnya, maka besarnya X_{t0} berkisar antara 9 sampai dengan 14 kali Z_{t1} .

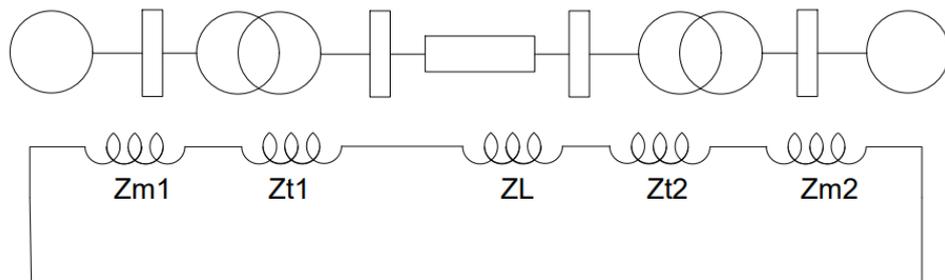
$$Z_{t_0} = 10Z_{t_1} \quad (2.13)$$

Menghitung Impedansi Ekuivalen Jaringan Perhitungan yang akan dilakukan disini adalah perhitungan besarnya nilai impedansi positif (Z_{1eq}), negative (Z_{2eq}), dan nol ($Z_0 eq$) dari titik gangguan sampai ke sumber, sesuai dengan urutan di atas. Karena dari sumber ke titik gangguan impedansi yang terbentuk adalah tersambung seri, maka perhitungan Z_{1eq} dan Z_{2eq} dapat langsung menjumlahkan impedansi impedansi tersebut.



Gambar 2. 3 Rangkaian Urutan Positif

Gambar 2.3 Rangkaian urutan negative di pengaruhi oleh Impedansi urutan positif ekuivalen yang terdiri dari impedansi sumber, impedansi trafo urutan positif dan impedansi saluran dengan. Pada umumnya impedansi terdiri dari resistansi(R) dan reaktansi(JX)akan tetapi di karenakan resistansi pada impedansi sumber dan impedansi trafo sangat kecil sehingga resistansi dapat di abaikan.



Gambar 2. 4 Rangkaian Impedansi Urutan Negatif ekuivalen

Gambar 2.4 Rangkaian urutan negative di pengaruhi oleh impedansi urutan negative. Pada umumnya impedansi Impedansi urutan negative ekuivalen di asumsikan sama dengan impedansi urutan positif ekuivalen di karenakan perbedaan terdapat pada pengaruh impedansi sumber yang nilainya sangat kecil dari perbedaan kecil tersebut dapat diabaikan.

Sehingga untuk impedansi ekivalen jaringan dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

$$Z_{1eq} = Z_{2eq} = Z_{S(Primer)} + Z_{t1} + Z_1(\text{penyulang}) \quad (2.14)$$

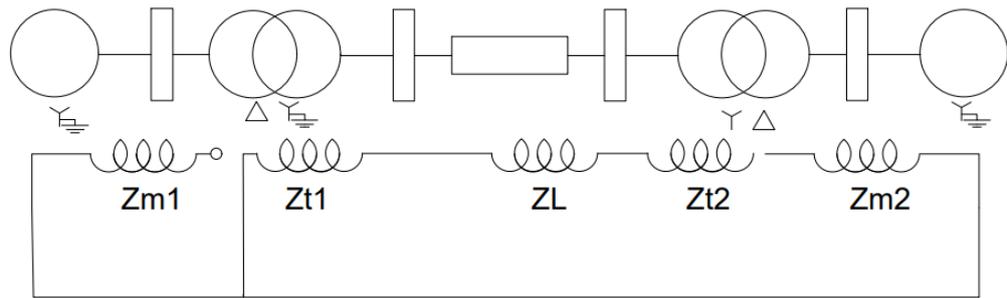
Keterangan

Z_{1eq} = Impedansi ekivalen jaringan urutan positif (ohm)

Z_{2eq} = Impedansi ekivalen jaringan urutan negative (ohm)

$Z_{S(Primer)}$ = Impedansi Sumber Primer(Ohm)

Z_{t1} = Impedansi trafo tenaga urutan positif dan negative(Ohm)



Gambar 2.5 Rangkaian Urutan Nol equivalen

Sedangkan untuk perhitungan Z_{0eq} nilai Δ/Y sangat berpengaruh dalam menentukan nilai impedansi urutan nol equivalen (Gambar 2.5) Dimana faktor yang mempengaruhi seperti nilai impedansi trafo urutan nol, tahanan trafo tenaga impedansi saluran urutan nol

$$Z_{0eq} = Z_{t0} + 3R_N + Z_0 \quad (2.15)$$

Keterangan:

Z_{0eq} = Impedansi ekivalen jaringan nol (ohm)

Z_{t0} = Impedansi trafo tenaga urutan nol (ohm)

$3R_N$ = Tahanan tanah trafo tenaga (ohm)

Z_0 = Impedansi urutan nol

Kemungkinan terjadinya gangguan 3 fasa adalah putusnya salah satu kawat fasa yang letaknya paling atas pada transmisi atau distribusi, dengan konfigurasi kawat antar fasanya disusun secara vertikal. Kemungkinan terjadinya memang sangat kecil, tetapi dalam analisisnya tetap harus diperhitungkan. Kemungkinan lain adalah akibat pohon yang cukup tinggi dan berayun sewaktu angin kencang, kemudian menyentuh ketiga kawat pada transmisi atau distribusi (Maisyarah, 2019):

$$I_{3fasa} = \frac{V_{ph}}{Z_{1eq}} \quad (2.16)$$

Keterangan:

I_{3fasa} : Arus gangguan hubung singkat tiga fasa (A)

V_{ph} : Tegangan fasa – netral sistem $150kV = \frac{150.000}{\sqrt{3}}$ (V)

Z_{1eq} : Impedansi Urutan Positif(Ohm)

Arus hubung singkat 2 fasa ke fasa dapat dihitung menggunakan persamaan dibawah ini:

$$I_{2fasa} = \frac{V_{ph}}{Z_{1eq} + Z_{2eq}} \quad (2.17)$$

Keterangan:

I_{2fasa} : Arus gangguan hubung singkat dua fasa (A)

V_{ph} : Tegangan fasa – netral sistem 150kV

Z_{1eq} : Impedansi Urutan Positif(Ohm)

Z_{2eq} : Impedansi Urutan Negatif(Ohm)

Arus hubung singkat 1 fasa ke tanah dapat dihitung menggunakan persamaan dibawah ini:

$$I_{1fasa} = \frac{3 \times V_{ph}}{Z_{1eq} + Z_{2eq} + Z_{0eq}} \quad (2.18)$$

Keterangan:

I_{1fasa} : Arus gangguan hubung singkat satu fasa (A)

V_{ph} : Tegangan fasa – netral sistem $150kV = \frac{150.000}{\sqrt{3}}$ (V)

Z_{1eq} : Impedansi Urutan Positif Ekuivalen(Ohm)

Z_{2eq} : Impedansi Urutan Negatif Ekuivalen (Ohm)

Z_{0eq} : Impedansi Urutan Nol Ekuivalen (Ohm)

Nilai arus gangguan yang di dapat akan di gunakan untuk mendapatkan nilai impedansi gangguan yang didapatkan kemudian dibandingkan dengan nilai impedansi setting pada rele. Apabila nilai impedansi gangguan lebih besar daripada nilai impedansi setting, maka rele tidak akan memberi perintah trip. Apabila impedansi gangguan lebih kecil daripada impedansi setting, maka rele akan memberi perintah trip.

$$Z_f = \frac{V_f}{I_f} \quad (2.19)$$

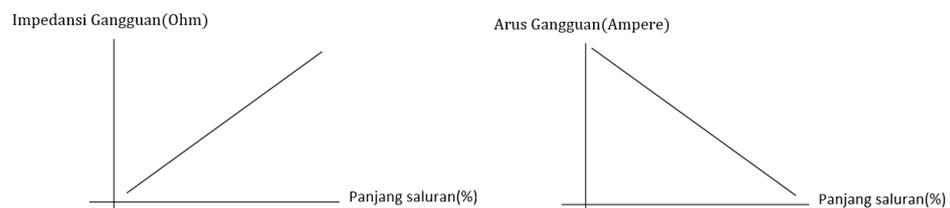
Keterangan;

Z_f = Impedansi Gangguan (Ohm)

V_f = Tegangan Gangguan (Volt)

I_f = Arus Gangguan (Ampere)

Sehingga dari rumus di dapat di artikan sebagaimana semakin jauh letak gangguan dari bus semakin besar nilai impedansi gangguan dan semakin dekat letak gangguan pada bus semakin besar juga nilai arus gangguan, hal inila yang membuat perbedaan waktu trip pada zona 1, zona 2 dan zona 3 seperti pada grafik 2.6.



Gambar 2.6 Grafik Perbandingan Arus dan Impedansi dengan Panjang Saluran

2.2 Relay Distance

Rele jarak (*distance relay*) merupakan protkesi yang paling utama pada saluran transmisi. Rele jarak menggunakan pengukuran tegangan dan

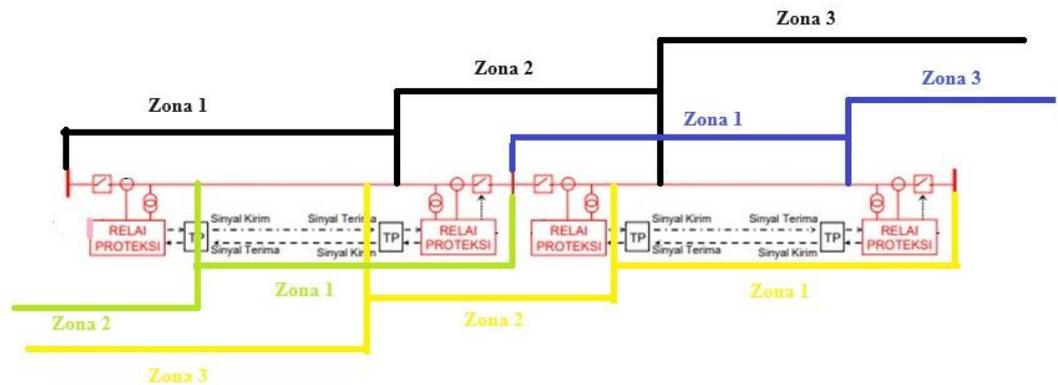
arus untuk mendapatkan impedansi saluran yang harus diamankan. Jika impedansi yang terukur di dalam batas *setting*, maka rele akan bekerja. Disebut rele jarak, karena impedansi pada saluran besarnya akan sebanding dengan panjang saluran. Oleh karena itu, rele jarak tidak tergantung oleh besarnya arus gangguan yang terjadi, tetapi tergantung pada jarak gangguan yang terjadi terhadap rele proteksi. Impedansi yang diukur dapat berupa Z, R saja ataupun X saja, tergantung jenis rele yang dipakai.

2.2.1 Prinsip Kerja

Prinsip kerja dari *distance relay* yaitu dengan mengukur tegangan pada titik *relay* dan arus gangguan yang dirasakan oleh *relay* dengan membagi besaran tegangan dan arus, maka impedansi sampai titik terjadinya gangguan dapat ditentukan. (Buku PLN Persero, 2006).

Rele ini di rancang sedemikian sehingga torsi kerja sebanding dengan besarnya arus dan torsi *restraining* sebanding dengan tegangan, maka pada keadaan normal dengan mengatur jumlah relatif belitan arus dan tegangan pada nilai tertentu bisa di peroleh di mana kedua torsi sama besar sehingga rele akan berada dalam keadaan seimbang dan tidak bekerja. Pada komposisi tersebut, untuk setiap kenaikan perkalian arus dan belitan (*ampere turn*), rasio V/I akan turun sedemikian yang dapat akan lebih besar dari torsi tegangan (*restrain*) sehingga rele akan bekerja. Untuk mengetahui letak gangguan maka hasil pengukuran impedansi tersebut di bandingkan dengan impedansi saluran. Jika impedansi yang di ukur lebih kecil dari impedansi saluran maka letak titik gangguan boleh di pastikan akan berada

antara lokasi rele dan batas zona capaian rele.



Gambar 2.7 Sistem Kerja Rele Jarak

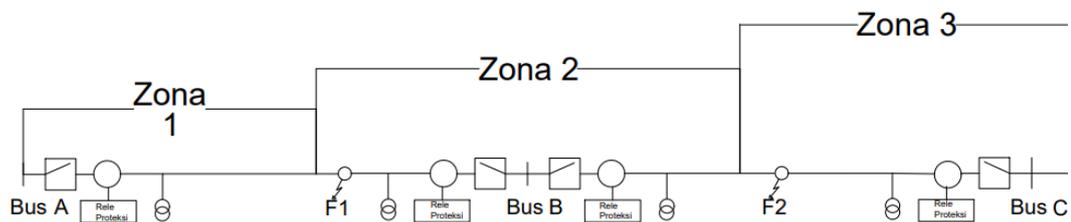
Pada gambar 2.7 sistem rele jarak di letakan pada 2 sisi bus. Rele harus di setting dengan baik agar tidak ada zona yang tumpang tindih agar rele diskriminasi berikutnya terangsang beroperasi.

Kinerja rele jarak dapat di ukur dari tingkat akurasi capaian dan waktu kerja rele. Sedangkan akurasi capaian adalah perbandingan nilai aktual capain dengan nilai setelan impedansi rele yang di nyatakan dalam ohm, kinerja rele juga tergantung pada Teknik dan cara-cara yang di gunakan pada waktu pengukuran tegangan transien keluaran trafo tegangan pembagi kapasitor dan pengukuran arus terutama pada kondisi trafo-trafo arus dalam keadaan jenuh. (Bonar Pandjaitan, Tahun 2012)

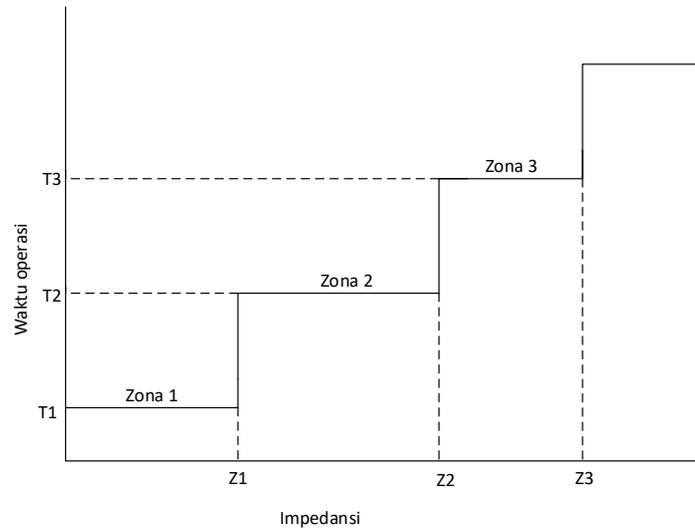
2.2.2 *Setting relay jarak*

Prinsip dasar proteksi jarak di dasarkan atas karakteristik pengukuran jarak gangguan yang bisa di setel atas lebih dari satu zona proteksi. Yang pertama adalah Zona 1 dengan waktu trip sesaat, kemudian proteksi Zona 2, Zona 3, dan seterusnya berturut-turut dengan waktu trip

yang lebih lambat. Pembagian zona pada rele jarak (Gambar 2.8) berfungsi untuk memproteksi. Ketika zona 1 pada bus B terjadi kegagalan sistem, zona 1 akan mentrip secara *instant* ketika impedansi yang di baca di bawah impedansi yang di setting pada zona 1, Ketika impedansi pada F1 di baca pada bus A melebihi setting impedansi zona 1 maka PMT pada bus A akan mentrip dalam waktu 0.4 s/d 0.8s sesuai kondisi lapangan dan PMT pada bus B akan trip secara instan, batas kondisi ketika masih dalam ratio setting impedansi zona 2. Begitu juga Ketika impedansi pada F2 melebihi ratio setting impedansi zona 2 maka PMT pada bus A akan trip pada waktu 1s. setting relay pada tiap zona harus memiliki perbedaan waktu seperti gambar 2.9



Gambar 2.8 Capaian zona pada rele jarak



Gambar 2.9 Waktu Operasi Zona Proteksi

Keterangan:

Z1 = Nilai impedansi zona 1

Z2 = Nilai impedansi zona 2

Z3 = Nilai impedansi zona 3

T1 = Waktu *tripping* zona 1

T2 = Waktu *tripping* zona 2

T3 = Waktu *tripping* zona 3

Dalam membuat *setting*, pertama-tama ditetapkan dahulu nilai impedansi di sistem tenaga (primer). Impedansi sekunder dihitung dengan persamaan :

Impedansi Saluran

$$Z_L = \text{Panjang Saluran} \times Z_0$$

$$Z_L = \text{Panjang Saluran} \times Z_1 \quad (2.20)$$

Primer

$$Z_p = \frac{CTratio}{PTratio} \quad (2.21)$$

Sekunder

$$Z_{Ls} = Z_p \times \text{Impedansi sumber zone} \quad (2.22)$$

Keterangan :

Z_s = Impedansi Saluran Sekunder(Ohm)

Z_p = Impedansi Saluran Primer(Ohm)

CT rasio = Rasio Transformator arus

PT rasio = Rasio Transformator tegangan

Z_{L1} = Impedansi Panjang Saluran 1

Z_{L2} = Impedansi Panjang Saluran 2

Z_o = Impedansi Urutan Nol

Z_1 = Impedansi Urutan Positif

Zona 1 adalah daerah proteksi rele jarak yang paling penting dan kritis di banding zona proteksi yang lain. Mengingat pentingnya maka akurasi pengukuran terhadap daerah proteksi zona 1 sepanjang saluran harus dilakukan dengan tingkat ketelitian dan kecepatan kerja yang tinggi (Pandjaitan, 2012)

Daerah ini harus mencakup daerah sejauh mungkin dari saluran yang diamankan, tetapi tidak boleh melampaui saluran didepannya. Dengan mempertimbangkan adanya kesalahan- kesalahan dari data saluran, CT, PT dan peralatan lainnya sebesar 20%, zona I mulai di set 80 % dari panjang saluran yang diamankan dan untuk menentukan jarak jangkauan pada relay.

$$\text{Zone 1} = 0,8 ZL_1 \quad (2.23)$$

Panjang jangkauan *relay*

$$\text{Panjang Jangkauan Zone1} = 0,8 \times \text{Panjang saluran1} \quad (2.24)$$

Margin keamanan dibuat 15-20%. Margin ini diperukan untuk memastikan agar prediksi zona 1 tidak akan kerja pada zona capaian lebih saluran yang di proteksi.

Daerah proteksi Zona 2 adalah daerah proteksi rele mulai ujung akhir zona 1 hingga saluran yang tidak tercakup termasuk sebagian saluran berikutnya. Namun mengingat adanya keterlambatan waktu tripping, terdapat beberapa kontroversi dan kesulitan pada waktu menentukan beberapa lama waktu yang tepat.

Pada sisi lain Zona 2 ini tidak begitu mementingkan jarak yang terlalu akurat sebab zona dua tersebut dapat diterminasi di sembarang titik pada bus berikutnya tanpa kehilangan selektivitasnya kecuali pada saluran yang sangat pendek.

Untuk memastikan perlindungan dapat mencakup seluruh saluran termasuk kompensasi terhadap sumber kesalahan, maka stelan capain rele proteksi zona 2 harus di buat sekurang kurangnya 120% dari impedansi saluran yang dilindungi.

Hal ini dilakukan untuk memastikan bahwa hasil capaian maksimum efektivitas zona 2 tidak meluas melbihi capain minimum efektivitas proteksi zona 1 rele jarak ujung lain saluran berdekatan.

Tripping Zona 2 harus di buat mempunyai waktu tunda atau *time-delayed* yang berguna untuk memasatkan terjadinya waktu dengan rele

proteksi utama yang diterapkan pada saluran berdekatan yang jatuh antara pencapain Zona 2.

Waktu kerja rele adalah seketika, sehingga dilakukan penyetelan waktu dengan $T1 = 0$ detik. Penyetelan Zona II. Dasar pemilihan zona II berdasarkan pertimbangan – Pertimbangan sebagai berikut :

1. Daerah ini harus pasti dapat menjangkau sisa saluran yang tidak diamankan zona I, tetapi tidak boleh overlap dengan zona II seksi berikutnya. Dengan mengasumsikan kesalahan – kesalahan seperti pada penyetelan zona I sekitar 20 %, maka didapat panjang saluran yang diamankan untuk menentukan jarak jangkauan pada *relay* penyetelan minimum dan maksimum untuk zona II sebagai berikut :

$$Zone\ 2\ min = 1,2Z_{L1} \quad (2.25)$$

$$Zone\ 2\ max = 0,8(Z_{L1} + 0,8Z_{L2}) \quad (2.26)$$

Panjang jangkauan *relay*

$$Z2\ min = 1,2 \times \text{Panjang saluran 1} \quad (2.27)$$

$$Z2\ max = \quad (2.28)$$

$$0,8(\text{panjang saluran 1} + 0,8 \times \text{panjang saluran 2})$$

2. Jika pada saluran seksi berikutnya terdapat beberapa cabang, untuk mendapatkan selektifitas yang baik, maka *setting* $Z2max$ diambil dengan nilai impedansi penghantar (ohm) yang terkecil. seperti pada *Setting* zona II (Zona 2 *max* dengan $T2 = 0,4 - 0,5$ detik) dan *Setting* zona II (Zona 2 maks dengan $T2 = 0,4$ detik). Jika saluran yang diamankan jauh lebih panjang dari saluran seksi berikutnya, maka akan terjadi $Z_2max < Z_2min$. Pada keadaan demikian, untuk

mendapatkan selektifitas yang baik, maka zona II dapat diambil = Z_2min dengan *setting* waktunya dinaikkan satu tingkat.

Dasar pemilihan zona III adalah berdasarkan pertimbangan – pertimbangan, daerah ini diusahakan dapat meliputi seluruh saluran seksi berikutnya (harus mencapai “far dan bus” terpanjang) sehingga di dapat penyetelan zona III dan panjang saluran yang diamankan dan untuk menentukan jarak jangkauan pada relay :

$$\text{Zone 3 min} = 1.2(Z_{L1} + Z_{L2}) \quad (2.29)$$

$$\text{Zone 3 Max} = 0.8(Z_{L1} + 0.8(Z_{L2} + 0.8Z_{L3})) \quad (2.30)$$

Panjang jangkauan relay:

$$Z3 \text{ min} = \quad (2.31)$$

$$1,2(\text{panjang saluran 1} + \text{panjang 2})$$

$$Z3 \text{ max} = \quad (2.32)$$

$$0,8 (\text{Panjang saluran 1} + 0,8(\text{panjang saluran 2} + 0,8 \text{ panjang saluran 3}))$$

Keterangan :

Z_{L1} =Impedansi saluran transmisi 1 yang di amankan (dalam Ω)

Z_{L2} =Impedansi saluran transmisi 2 yang di amankan(dalam Ω)

Z_{L3} =Impedansi saluran transmisi 3 yang di amankan(dalam Ω)

Seperti halnya pada penyetelan zona II, maka pada penyetelan zona III, jika $Z3min > Z3max$ dan zona III harus menjadi pengaman cadangan seksi berikutnya secara keseluruhan, maka T3 dinaikkan satu tingkat lebih lama dari pada T3 dalam keadaan normal.(Hidayatullah et al., 2019)

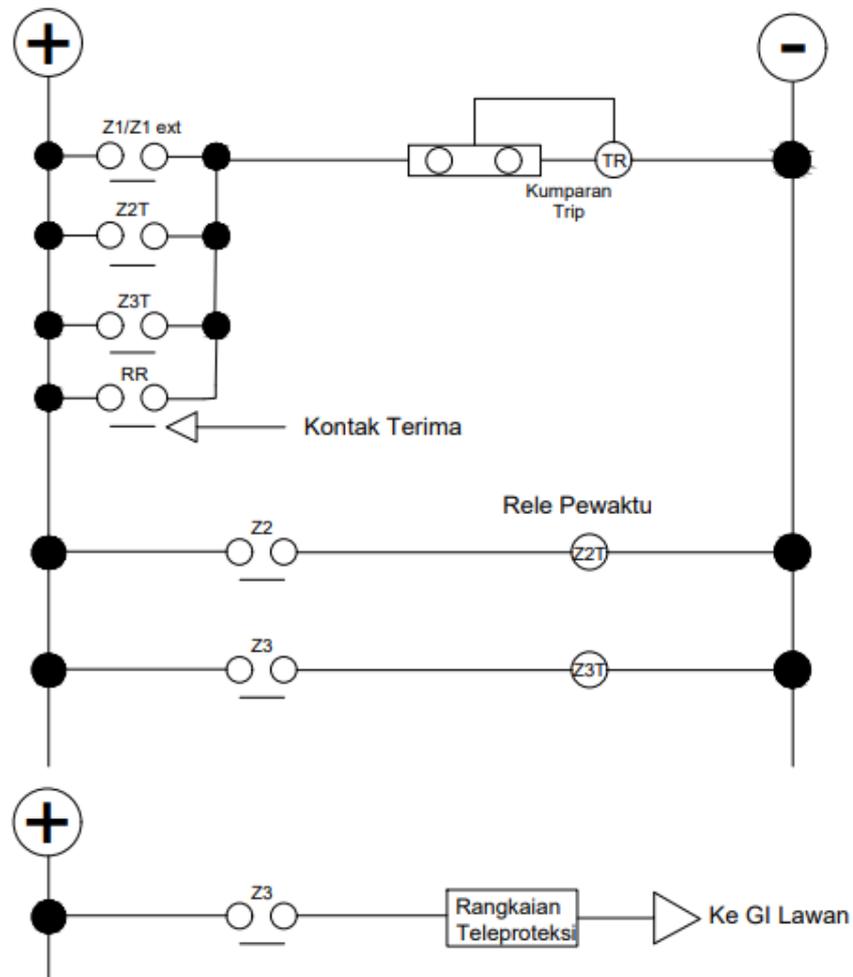
2.2.4 Transfer Tripping

Metode sistem pengamanan dengan skema transfer tripping banyak dijumpai pada bagian instalasi jaringan sistem tenaga Listrik yang diperlukan untuk memperoleh sistem proteksi yang lengkap dan dapat bekerja secara efektif untuk mengamankan saluran di manapun letak titik gangguan.

Untuk melakukan transfer tripping secara tepat perlu dilakukan studi sistem proteksi tergantung dari kebutuhan sistem pengamanan saluran yang diharapkan. Terdapat beberapa skema transfer trip sebagaimana akan diuraikan sebagai berikut:

2.2.4.1 Transfer Tripping Langsung Capaian Kurang

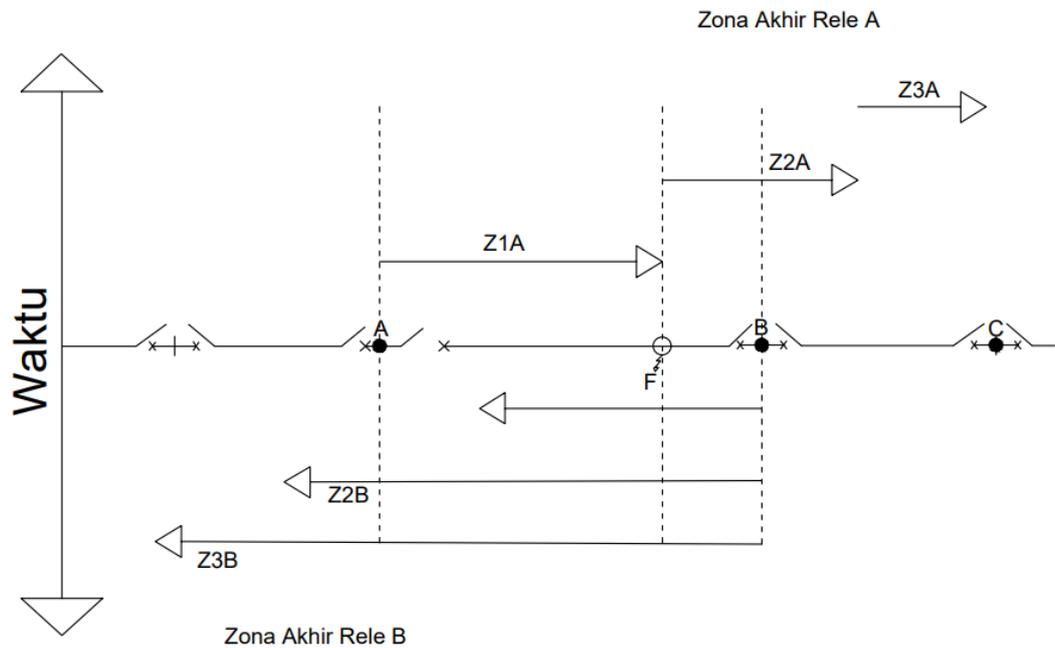
Cara termudah untuk mengurangi lama waktu peanggulangan (*Clearing*) gangguan pada terminal rele jarak yang merasakan dan melihat gangguan dengan jelas berada pada daerah waktu zona 2 adalah dengan menerapkan skema Teknik transfer trip langsung.



Gambar 2.10 Rangkaian Kendali Transfer Tripping Langsung Capaian Kurang

Pada gambar 2.10 sebuah kontak yang dikerjakan oleh elemen rele zona 1 secara bersamaan digunakan juga untuk mengirim sinyal trip ke rele remote untuk melakukan trip pada ujung jauh dari saluran tersebut.

Sekma ini di sebut transfer *tripping* langsung capaian kurang (*direct under-reaching transfer tripping scheme*) karena elemen skema transfer trip capaian kurang tidak mencakup seluruh bagian jaringan transmisi. (Pandjaitan, 2012)



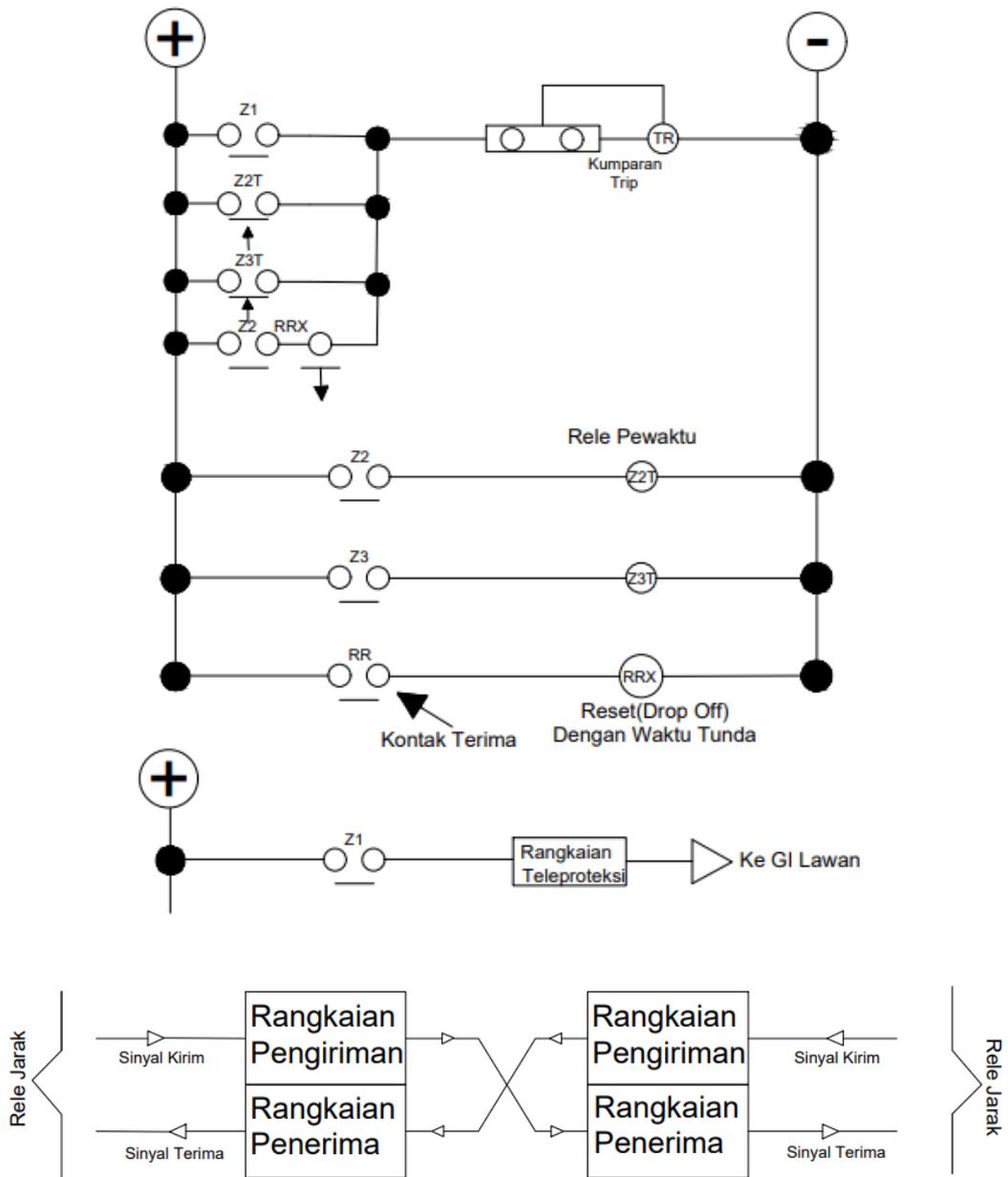
Gambar 2.11 Karakteristik Waktu Bertingkat Rele Jarak

Gangguan F yang terjadi pada daerah di ujung saluran B dalam gambar 2.11 akan mengakibatkan elemen zona 1 rele jarak B bekerja dan mentrip PMT-B Pada ujung B. Permintaan trip zona 1 tersebut juga dimintakan oada rele a sehingga PMT-A di ujung A dapat trip secara bersamaan. Permintaan tripping ke rele jarak A dilakukan melalui media komunikasi yang menghubungkan kedua ujung saluran. Dalam hal ini sinyal perintah trip yang diterima rele A langsung digunakan untuk mentrip PMT A. Karena pada skema ini rangkaian penerima rele A langsung dihubungkan dengan rele tripping PMT A tanpa ada kondisi yang harus dipenuhi sebelum melaksanakan tripping maka aka nada kemungkinan salah tripping yang sebenarnya tidak perlu terjadi.(Pandjaitan, 2012)

2.2.4.2 Transfer tripping capaian kurang permisif

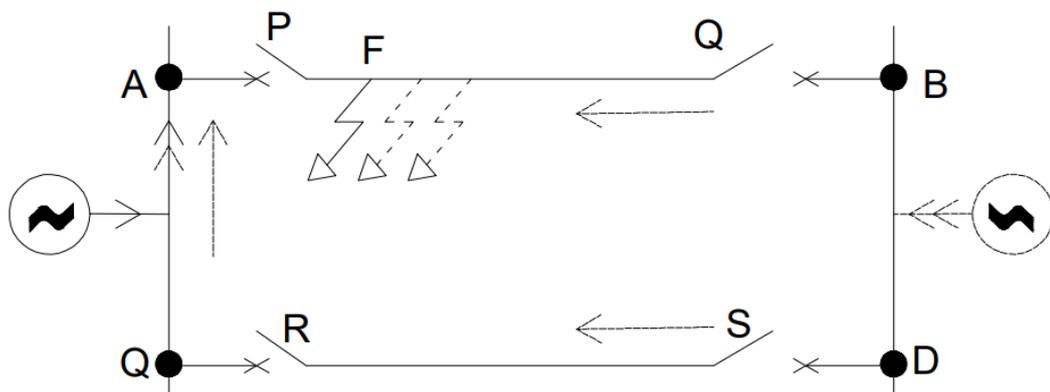
Skema proteksi dengan transfer tripping capaian kurang permisif dengan mengenali sinyal yang diterima(dalam bentuk kontak). Kontak sinyal intertripping

dihubung seri dengan kontak elemen rele jarak di mana gangguan terlihat pada daerah zona 2. Dengan menggabungkan kombinasi kedua kontak sedemikian rupa, misal dengan rangkaian kendali, maka tripping terjadi apabila kedua kontak hadir secara bersamaan. Dalam hal ini kontak rele zona 2 disebut sebagai kontak pengendali yang menyaring perintah trip yang diterima dari ujung jauh apakah dilaksanakan atau diblok. Artinya *tripping* remote baru dilaksanakan apabila sudah menerima sinyal trip dan rele remote tersebut juga sudah merasakan gangguan pada zona, skema ini kemudian dikenal sebagai rele jarak capaian kurang permisif (Gambar 2.12). Dengan kata lain dapat dikatakan bahwa kondisi tripping akan tercapai apabila kedua rele sudah sama-sama mendeteksi adanya gangguan sebelum rele pada ujung remote diizinkan untuk melakukan trip pada zona 1 (Pandjaitan, 2012)



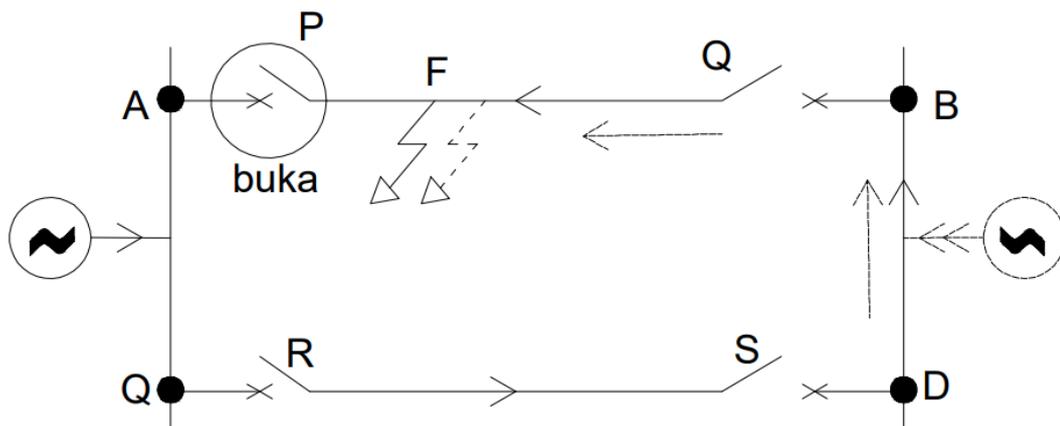
Gambar 2. 12 Skema Transfer tripping capaian kurang permisif

Rangkaian penyetelan ulang elemen time delay rele penerima perlu untuk dirancang memastikan bahwa rele pada kedua ujung salah satu saluran yang terganggu dari sirkuit saluran paralel mempunyai waktu trip pada waktu gangguan terjadi dekat salah satu saluran.



Gambar 2.13 Gangguan Terjadi, Tegangan Busbar Rendah Sehingga Arus

Gangguan dari sisi B dapat diabaikan



Gambar 2.14 Rele A Trip PMT Pada Sisi Ujung A Sehingga Arus Gangguan Mulai

Beralih dari sisi B

Gangguan pada titik F dalam saluran paralel terjadi dekat gardu A maka ada daya yang kecil yang (dapat diabaikan) akan mengalir ke titik gangguan (*infeed*) dari gardu B (Gambar 2.13). Meskipun gardu PMT A pernah mengalami tripping akibat elemen zona 1, namun karena arus yang tetap bertahan melalui gardu B demikian kecil maka relai jarak pada gardu B hanya bisa merasakan arus gangguan pada daerah zona 2 (Gambar 2.14). Untuk mengatasi

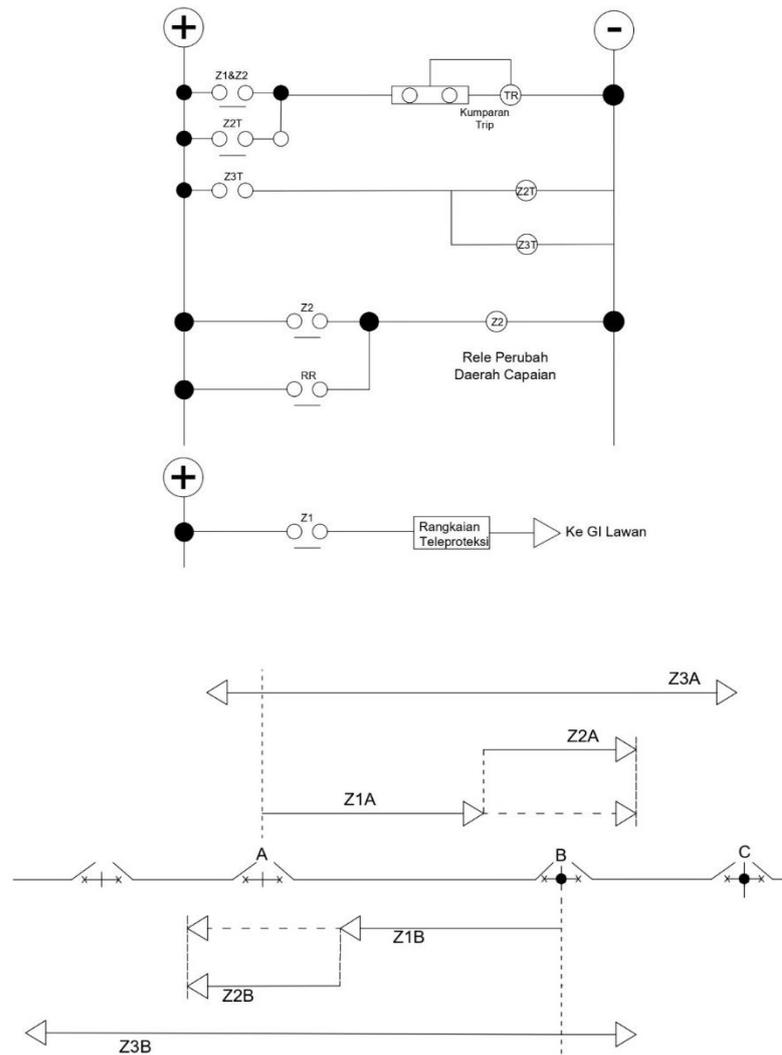
kendala ini maka pada waktu elemen rele zona 1 melakukan tripping lokal sekaligus dia mengirimkan sinyal perintah tripping ke PMT Q gardu B. Di samping untuk melakukan perintah tripping, sinyal tripping permisif ini sekaligus digunakan untuk mereset rele di ujung B sehingga tidak perlu menunggu *tripping* pada waktu Zona 2 B. (Pandjaitan, 2012)

2.2.4.3 Skema percepatan capaian kuran permisif

Skema percepatan capaian kurang permisif ini diterapkan pada saluran yang dilengkapi dengan kanal komunikasi yang diperlukan untuk memungkinkan daerah rele-rele jarak yang terpasang pada kedua ujung saluran dapat di- switch dari satu zona ke zona lain. Skema ini secara umum dikenal dengan zona *switched distance relay*.

Dengan teknik tertentu hasil pengukuran elemen Zona 1 diperlebar hingga Zona 2 sehingga tripping dapat dilakukan dengan lebih cepat tanpa mengalami kelambatan waktu tunda Zona 2. Cara ini disebut skema proteksi jarak capaian kurang (*under reach distance protection scheme*).

Pada skema rele capaian kurang Zona 1 dibuat fasilitas yang dirancang untuk mengirimkan sinyal ke ujung remote saluran sebagai kondisi tambahan yang dapat digunakan untuk mempercepat *tripping* PMT remote ujung saluran. Kontak rele yang diterima dibuat untuk memperluas capaian elemen pengukur dari Zona 1 hingga mencakup Zona 2 dapat di lihat pada gambar (2.15).



Gambar 2.15 Rangkaian Kendali Proteksi Percepatan Capaian Kurang Permisif

2.2.4.5 Transfer trip capaian lebih permisif

Pada skema transfer trip capaian lebih permisif (*Permissive over reach transfer trip*) yang secara populer disingkat POP, elemen capaian lebih rele jarak disetel untuk dapat mencapai daerah pengamanan hingga melebihi ujung saluran yang diproteksi. Skema yang biasa dilakukan adalah dengan mengirimkan sinyal *intertrip* Zona 2 ke ujung remote saluran. Sama seperti pada skema capaian kurang permisif maka untuk menghindarkan terjadinya *tripping* di luar daerah cakupan

proteksi sebagaimana mestinya maka sinyal kontak terima dibuat untuk dapat dipandu dan dikombinasikan dengan kontak rele direksional.

Kontak-kontak *instant* (tanpa pewaktu seperti pada gambar) elemen rele Zona 2 digunakan untuk mengirim dan menerima sinyal, yang kemudian dipandu dan disupervisi oleh kontak elemen rele direksional Zona 2 sebelum melakukan perintah tripping. Dalam hal ini bila kedua sinyal terjadi secara bersamaan maka tripping sesaat dapat dilaksanakan tanpa menunggu waktu tunda Zona 2. Skema ini kemudian dinamai sebagai skema *transfer trip* capaian lebih permisif yang kadang-kadang disingkat POP atau skema perbandingan direksional (*directional comparison scheme*) atau skema proteksi rele jarak capaian lebih permisif

Mengingat pensinyalan kanal harus dapat dilakukan secara bersama pada saat yang bersamaan oleh masing-masing elemen capaian lebih Zona 2 pada kedua ujung saluran, maka skema ini memerlukan sistem komunikasi dupleks di mana masing-masing sinyal dapat dikirimkan menggunakan kanal khusus secara bebas. Untuk menghindari salah kerja pada kondisi di mana arah arus dapat terbalik saluran paralel (lihat Gambar yang dilengkapi sistem proteksi dilengkapi dengan garis titik-titik), maka rangkaian trip permisif dengan rangkaian pewaktu (time delay) yang berguna untuk memblokir permisif yang diterima dari ujung remote sebagai akibat terjadinya pembalikan arah arus, di mana rele lokal sebelumnya sudah melihat gangguan tersebut sebagai gangguan Zona 2.

Skema ini dikenal sebagai pengaman terhadap arus terbalik yang dalam praktiknya baru perlu diperhatikan bila setelan Zona 2 dilakukan lebih dari 150% panjang saluran yang diproteksi. Untuk menghindari kemungkinan pengaruh arus

berbalik pada jaringan paralel maka rangkaian permisif perlu dilengkapi dengan rangkaian pewaktu yang bisa ditala sesuai keperluan.(Pandjaitan, 2012)

2.2.3 Perlambatan Waktu kerja(Δt)

Penentuan besarnya perlambatan waktu kerja (Δt) untuk zona II dan III sebagai pengaman cadangan umumnya diambil 0,4 sampai dengan 0,5 detik, dengan perincian hal yang mempengaruhi pengambilan nilai tersebut adalah :

1. Kesalahan *relay* waktu dari kedua ujung = $0,1 + 0,1 = 0,2$ detik
2. Waktu pembukaan efektif PMT = 0,05 detik
3. Waktu reset PMT = 0,05 detik
4. Toleransi waktu = 0,1 s/d 0,2 detik. (Jendry Sepang, tahun 2017)

Alat pemutus tenaga PMT yang digunakan untuk memutuskan arus gangguan harus mampu memutuskan arus gangguan secara sempurna sebelum rele diskriminasi berikutnya terangsang beroperasi

2.2.4 Karakteristik Rele Jarak

Beberapa rele numerik tertentu yang terdapat di berbagai industri dilengkapi dengan perangkat yang bisa di gunakan untuk melakukan pengukuran nilai absolute impedansi gangguan dan kemudian menentukan apakah perlu beroperasi sesuai daerah atau batas (*boundary*) impedansi yang ditentukan pada diagram R/X.

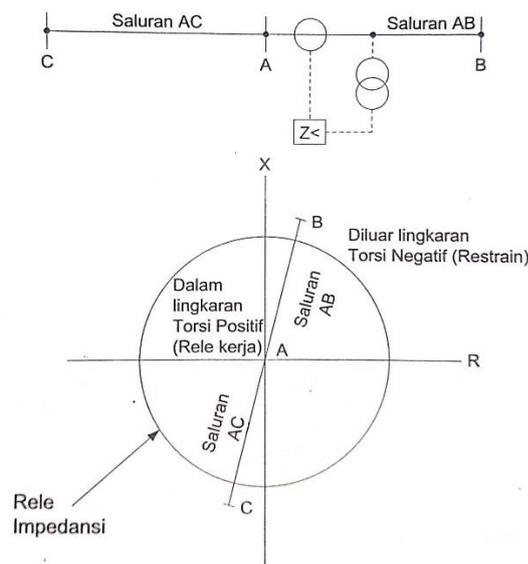
Rele jarak tradisional dan rele numerik mengemulasikan elemen impedansi dari rele konvensional tidak mengukur nilai absolut impedansi melainkan membandingkan tegangan gangguan yang diukur dengan suatu

tegangan tiruan yang di peroleh dari arus gangguan dan impedansi zona yang menentukan apakah gangguan ada di dalam zona atau di luar zona..

Adapun Karakteristik *Relay* jarak sebagai berikut:

a. Rele impedansi

Pada rele jarak, jenis impedansi sudut fasa tegangan dan arus yang diterapkan pada rele tidak di perhatikan. Oleh karena itu karakteristik impedansi. yang kalau dilukiskan pada diagram R/X adalah suatu lingkaran dengan pusat di sumbu koordinat dengan jari-jari sama dengan tahanan setelan dalam ohm. Dalam rele impedansi torsi yang di timbulkan arus di seimbangkan dengan torsi yang ditimbulkan oleh elemen tegangan.

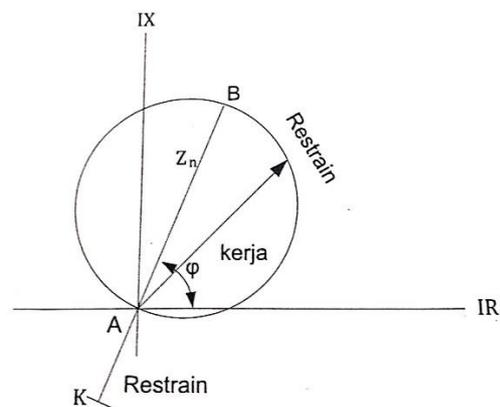


Gambar 2.16 Karakteristik Impedansi Saluran

Dalam karakteristik ini(Gambar 2.16) rele akan beroperasi untuk semua gangguan sepanjang vektor AB dan juga untuk semua gangguan di belakang busbar sampai kepada suatu impedansi AC. Dapat di catat bahwa A adalah titik atau lokasi rele dan RAB adalah sudut dengan mana arus gangguan terbelakang terhadap tegangan rele untuk gangguan pada saluran

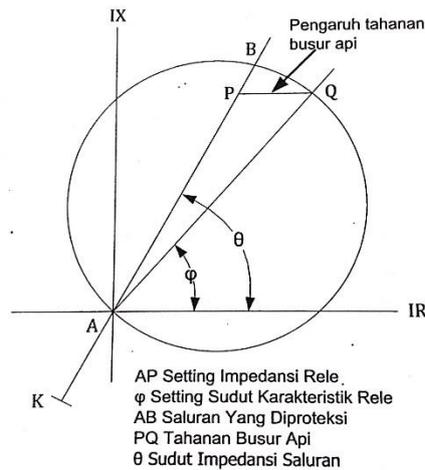
Untuk menghindari kesalahan pengukuran jarak maupun arah yang diakibatkan tegangan gangguan yang terlalu kecil maka rele modern selalu dilengkapi dengan perangkat polarisasi tegangan fasa yang sehat (*healthy phase voltage polarization*) dan atau dengan hasil rekaman tegangan beberapa saat(*cycle*).

Sebuah rele mho polarisasi sendiri(*self polarized*) mampu melakukan diskriminasi baik terhadap akurasi capaian maupun akurasi arah dalam satu kesatuan rele yang di lengkapi dengan sinyal polarizing tambahan.



Gambar 2.18 Karakteristik Impedansi MHO

Dari gambar 2.18 terlihat dengan jelas bahwa elemen impedansi adalah elemen arah yang secara inherent sudah melekat menjadi bagian yang tak terpisahkan dari elemen lain sehingga hanya akan beroperasi pada gangguan dalam arah maju sepanjang saluran



Gambar 2.19 Cakupan Naiknya Tahanan Busur Api

Karakteristik yang dihasilkan ditunjukkan pada gambar 2.19 Di mana AB adalah representasi panjang saluran yang dilindungi. Dengan setelan ϕ lebih kecil dari θ maka semua saluran yang terlindungi (AB) akan sama dengan nilai setelan AQ dikalikan dengan $\text{Cos}(\theta - \phi)$. Dengan demikian kebutuhan setelan AQ adalah sebagai berikut:

$$AQ = \frac{AB}{\text{Cos}(\theta - \phi)} \quad (2.32)$$

Karena secara alami hubungan antara tegangan busur dengan arus busur pada gangguan busur api tidak linear, maka biasanya tahanan busur api juga tidak linear (Pandjaitan, 2012).

Dengan menggunakan rumus empiris yang di buat AR. Van C. Warrington, tahanan busur dapat dihitung sebagai berikut:

$$R_a = \frac{28710}{I} L \quad (2.33)$$

Kerteangan:

R_a = Tahanan busur api(ohm)

L = Panjang busur api(meter)

I = Arus busur api(A)

c. Rele jarak quadrilateral

Karakteristik quadrilateral suatu rele jarak dibentuk dengan empat elemen pengukuran, yaitu satu elemen pengukur reaktansi yang dicirikan sebuah garis lurus paralel dengan sumbu absis dan dua elemen pengukuran tahanan, yaitu satu garis sebelah kiri dan satu garis lurus sebelah kanan, dan yang keempat adalah elemen direksional yaitu garis lurus bawah.

Di sini zona 1 dan zona 2 di polarisasi maju sedangkan zona 3 juga dipolarisasikan maju namun mencakup gangguan-gangguan yang terjadi sedikit di belakang rele. Rele jarak dengan karakteristik quadrilateral ini dapat menghasilkan cakupan tahanan yang lebih baik ketimbang cakupan yang dapat diperoleh pada karakteristik jenis mho khususnya pada saluran transmisi yang pendek.(Pandjaitan,2012)