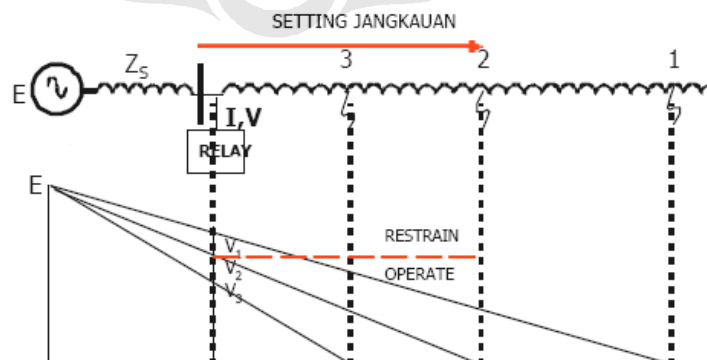


BAB 3

RELE PROTEKSI PADA SALURAN UDARA TEGANGAN TINGGI

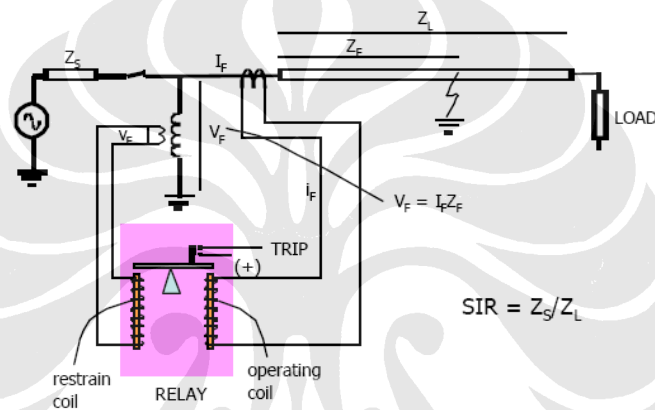
3.1 RELE JARAK

Pada proteksi saluran udara tegangan tinggi, rele jarak digunakan sebagai pengaman utama sekaligus sebagai pengaman cadangan untuk saluran transmisi yang berdekatan. Hal ini didasarkan bahwa impedansi saluran transmisi berbanding lurus dengan jaraknya sehingga memungkinkan dilakukan pengukuran impedansi berdasarkan panjang salurannya. Prinsip dasar dari rele jarak atau *distance relay* adalah berdasarkan rasio perbandingan tegangan dan arus gangguan yang terukur pada lokasi rele terpasang (*apparent impedance*), untuk menentukan apakah gangguan yang terjadi berada di dalam atau di luar zona yang diproteksinya. Rele jarak hanya bekerja untuk gangguan yang terjadi antara lokasi rele dan batas jangkauan (*reach setting*) yang telah ditentukan. Rele jarak juga dapat bekerja untuk mendeteksi gangguan antar fasa (*phase fault*) maupun gangguan ke tanah (*ground fault*).



Gambar 3.1. Prinsip Kerja Rele Jarak

Rele jarak pada umumnya telah dilengkapi elemen *directional* untuk menentukan arah atau letak gangguan sehingga membuat rele menjadi lebih selektif. Gambar dibawah ini menjelaskan secara sederhana prinsip kerja rele jarak elektro-mekanis yang didisain agar torsi operasi (*operating torque*) sebanding dengan arus yang terukur dan torsi penyeimbang (*restraint torque*) sebanding dengan tegangan yang terukur. Ketika terjadi gangguan akan timbul arus yang besar relatif terhadap tegangannya sehingga rasio V/I (impedansi) menjadi lebih kecil dan torsi operasi yang dihasilkan akan lebih besar daripada torsi penyeimbang. Kondisi ini akan menyebabkan kontak rele tertutup (trip).



Gambar 3.2. Balance beam distance relay

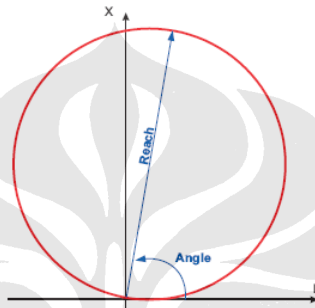
1. Lokasi gangguan jauh (di luar daerah jangkauan setting relay) : $I <, V >$
restrain $>$ operating = restrain (rele tidak bekerja)
2. Lokasi gangguan dekat (di dalam daerah jangkauan setting relay) : $I >, V <$
restrain $<$ operating = operate (rele bekerja)

3.2 KARAKTERISTIK KERJA RELE JARAK

Rele jarak dapat diklasifikasi berdasarkan karakteristik impedansi (R-X) di dalam koordinat polar, jumlah input atau masukan rele, dan metode yang digunakan untuk membandingkan input tersebut. Umumnya metode yang digunakan adalah dengan membandingkan dua input (dapat berupa besaran atau sudut fasa) untuk menentukan apakah gangguan yang terjadi berada di dalam atau di luar daerah kerja rele. Rele jarak memiliki beberapa karakteristik kerja, diantaranya adalah mho dan quadrilateral.

3.2.1 Karakteristik Mho

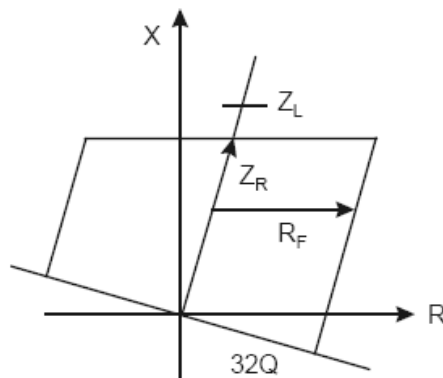
Karakteristik mho ketika digambar dalam diagram impedansi R-X merupakan lingkaran dimana diameter lingkaran tersebut memotong titik pusat dari sistem koordinat dan besarnya diameter tersebut menggambarkan setelan jangkauan dan sudut fasa dari karakteristik mho. Setelan jangkauan dan sudut fasa karakteristik mho dapat di atur sama dengan impedansi saluran transmisi yang diproteksinya. Rele jarak dengan karakteristik mho akan bekerja apabila impedansi yang terukur berada didalam lingkaran.



Gambar 3.3. Karakteristik kerja Mho

3.2.2 Karakteristik Quadrilateral

Karakteristik kerja quadrilateral dapat dibentuk dengan menentukan setelan *forward reach* dan *resistive reach* yang masing-masing dapat di setel independen. Gambar 3.4 menunjukkan 4 setelan batasan atau jangkauan karakteristik kerja quadrilateral. Empat setelan batas rele yaitu batas paling atas menunjukkan setelan jangkauan reaktansi, kemudian batas kiri dan kanan yaitu setelan jangkauan resistansi positif dan resistansi negatif serta batas bawah menunjukkan elemen *directional*.



Gambar 3.4. Karakteristik kerja quadrilateral

Keterangan :

Z_L = Impedansi saluran transmisi

Z_R = Setelan jangkauan reaktansi rele jarak

R_F = Setelan jangkauan resistansi rele jarak

32Q = Elemen arah (directional)

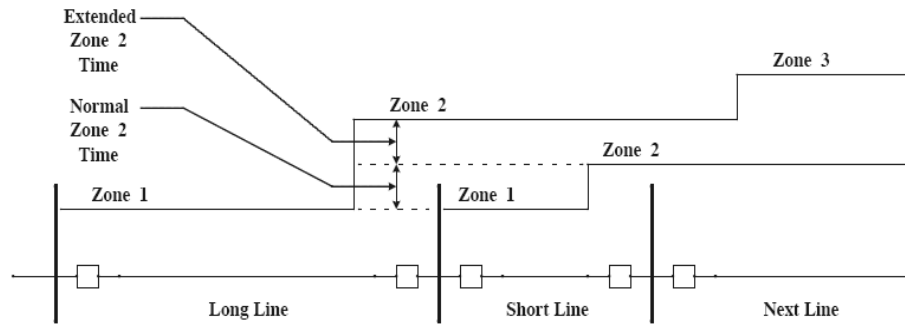
Rele dengan karakteristik quadrilateral akan bekerja apabila impedansi yang terukur oleh rele berada di dalam bidang yang dibatasi oleh empat garis yang telah disebutkan di atas. Quadrilateral mempunyai jangkauan resistansi yang lebih luas daripada karakteristik mho. Karakteristik kerja quadrilateral mempunyai kelebihan dalam hal pengukuran impedansi untuk gangguan ke tanah atau *ground fault*. Gangguan ke tanah, mempunyai resistansi yang cukup tinggi yang di akibatkan oleh busur api (*resistive arc*) dan impedansi ke tanah itu sendiri sehingga menyebabkan resistansi gangguan ke tanah mempunyai nilai yang cukup signifikan.

3.3 ZONA PROTEKSI RELE JARAK

Telah disebutkan bahwa rele jarak dapat digunakan sebagai proteksi utama maupun sebagai proteksi cadangan jauh (*remote back-up protection*) untuk saluran transmisi yang berdekatan. Daerah kerja rele jarak pada umumnya dibagi menjadi tiga zona yang dikoordinasikan dengan zona proteksi saluran transmisi seksi berikutnya agar tidak terjadi kondisi *overlapping*. Dasar pemilihan zona pengamanan rele jarak yang diaplikasikan adalah sebagai berikut :

1. Zone 1 Setting

Pemilihan daerah atau zona satu harus mencakup daerah sejauh mungkin dari saluran yang diamankan tetapi tidak boleh melampaui saluran di depannya. Setelan jangkauan yang digunakan adalah sebesar 80 % dari impedansi saluran transmisi yang diproteksinya. Adanya margin sebesar 20 % dari saluran transmisi adalah untuk menjamin bahwa zona satu rele tidak akan melebihi (*over-reaching*) saluran transmisi yang diproteksinya. *Over-reaching* rele dapat disebabkan kesalahan-kesalahan pengukuran dari CT, PT, data saluran dan lain-lain.



Gambar 3.5. Setelan zona proteksi rele jarak

$$Zone - 1 = 0.8xZ_{L1} \dots\dots\dots(3.1)$$

Keterangan :

Z_{L1} = Impedansi saluran transmisi yang diamankan

2. Zone 2 Setting

Daerah zona dua harus dapat menjangkau sisa saluran transmisi yang tidak dapat diamankan oleh zona satu, tetapi tidak boleh overlapping dengan jangkauan zona dua dari saluran transmisi seksi berikutnya. Zona dua harus di setel dengan waktu tunda atau *time delayed* agar dapat dikoordinasikan dengan rele di ujung terminal yang lain. Waktu tunda ini diperlukan untuk menjaga agar rele tidak trip secara langsung (*instantaneous*) untuk gangguan di luar saluran transmisi yang diproteksinya. Dengan mengasumsikan adanya kesalahan-kesalahan seperti pada penyetelan zona satu (*CT error* atau *PT error*), maka didapat penyetelan minimum dan maksimum untuk zona dua adalah:

$$Zone - 2_{min} = 1.2xZ_{L1} \dots\dots\dots(3.2)$$

$$Zone - 2_{max} = 0.8x(Z_{L1} + 0.8xZ_{L2}xk) \dots\dots\dots(3.3)$$

Keterangan :

Z_{L1} = Impedansi saluran transmisi yang diamankan

Z_{L2} = Impedansi saluran transmisi seksi berikutnya yang terpendek

k = faktor infeed

Jika pada saluran transmisi seksi berikutnya terdapat beberapa cabang, untuk mendapatkan selektivitas yang baik maka setting zone-2max diambil pada saluran transmisi seksi berikutnya yang terpendek (Z_{L2}), hal ini dimaksudkan

agar jangkauan zona dua maksimum tidak melebihi jangkauan minimum zona dua dari saluran transmisi seksi berikutnya.

Jika pada gardu induk di depannya terdapat trafo daya, maka jangkauan zona dua sebaiknya tidak melebihi impedansi trafo. Hal ini dimaksudkan jika terjadi gangguan pada sisi tegangan yang lebih rendah, rele tidak akan bekerja.

$$Z_{TR} = 0.8(Z_{L1} + K.Z_{TR}) \dots\dots\dots(3.4)$$

keterangan :

K = bagian trafo yang diproteksi, nilai k direkomendasikan sebesar 0.5

3. Zone 3 Setting

Zona tiga rele dapat berfungsi sebagai pengaman cadangan untuk saluran transmisi seksi berikutnya, sehingga di set agar dapat meliputi seluruh saluran transmisi seksi berikutnya yang terpanjang (Z_{L3}). Penyetelan jangkauan zona tiga adalah :

$$Zone - 3_{min} = 1.2(Z_{L1} + Z_{L3}) \dots\dots\dots(3.5)$$

$$Zone - 3_{max} = 0.8(Z_{L1} + k.Z_{L3}) \dots\dots\dots(3.6)$$

Keterangan :

Z_{L1} = Impedansi saluran transmisi yang diamankan

Z_{L3} = Impedansi saluran transmisi seksi berikutnya yang terpanjang

k = faktor infeed

Untuk pemilihan zona tiga dipilih nilai terbesar antara Zone-3min dan Zone-3max. Jika pada gardu induk di depannya terdapat trafo daya, maka jangkauan zona-3 sebaiknya tidak melebihi impedansi trafo. Jika terjadi kondisi *overlapping* dengan zona tiga seksi berikutnya maka waktu tunda zona tiga dapat dikoordinasikan waktunya dengan waktu tunda zona tiga seksi berikutnya.

$$Z_{TR} = 0.8(Z_{L1} + K.Z_{TR}) \dots\dots\dots(3.7)$$

Keterangan :

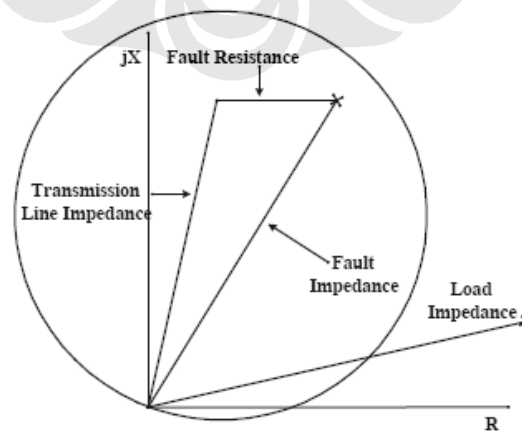
K = bagian trafo yang diproteksi, nilai k direkomendasikan sebesar 0.8

3.4 FAKTOR-FAKTOR YANG MEMPENGARUHI JANGKAUAN RELE JARAK

3.4.1 Resistansi Gangguan

Rele jarak harus dapat membedakan antara kondisi normal berbeban dan kondisi saat terjadinya gangguan. Rele dengan karakteristik kerja mho seperti ditunjukkan pada gambar 3.6 akan bekerja apabila impedansi yang terukur oleh rele berada di dalam lingkaran. Jika resistansi gangguan meningkat, rele jarak akan sulit untuk membedakan antara impedansi gangguan (ditambah resistansi) dengan impedansi beban. Dalam menentukan jangkauan setelan rele jarak, salah satu hal yang harus diperhatikan adalah impedansi saat beban maksimum harus berada di luar daerah kerja rele jarak.

Salah satu pengaruh resistansi gangguan terhadap operasi rele jarak adalah pergeseran impedansi yang terukur oleh rele ketika terjadi gangguan. Hal ini dapat menyebabkan rele menjadi *underreaching*, yaitu untuk gangguan yang seharusnya terdeteksi zona satu rele menjadi terdeteksi di zona dua rele atau gangguan di zona dua rele menjadi terdeteksi di zona tiga rele. Resistansi gangguan yang timbul pada saat gangguan ke tanah pada umumnya mempunyai resistansi yang lebih tinggi daripada gangguan antar fasa. Impedansi gangguan pada saat gangguan ke tanah dapat disebabkan impedansi menara (*tower impedance and tower footing resistance*) dan resistansi *arc*. Resistansi *arc* dipengaruhi oleh besarnya arus gangguan dan panjang dari *arc* itu sendiri [3].

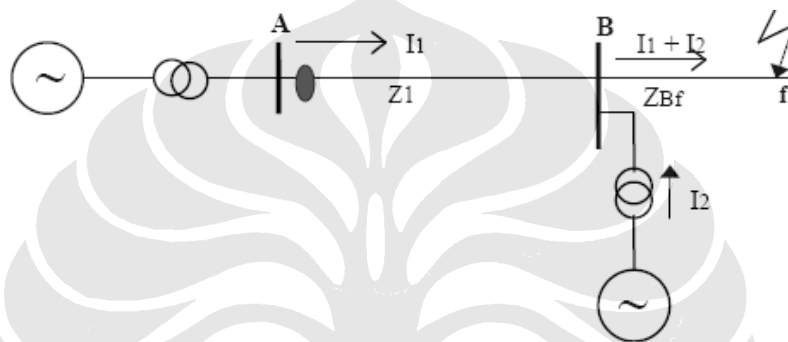


Gambar 3.6. Pengaruh resistansi gangguan pada rele jarak [3]

3.4.2 Arus Infeed [5]

Infeed adalah pengaruh penambahan atau pengurangan arus yang melalui titik terminal terhadap arus yang melalui rele yang ditinjau. Secara umum infeed dapat disebabkan adanya pembangkit antara rele dengan titik gangguan atau dapat juga disebabkan adanya perubahan konfigurasi saluran dari saluran transmisi ganda ke tunggal atau sebaliknya. Adanya pengaruh infeed ini akan membuat impedansi yang dilihat rele menjadi lebih besar (*overreaching*) atau menjadi lebih kecil (*underreaching*).

a) Adanya pembangkit pada rel ujung saluran yang diamankan



Gambar 3.7. Arus infeed pada saluran transmisi

Jika terjadi gangguan pada titik f, di luar daerah pengaman rele maka pada kondisi normal (tidak ada pembangkitan dari B) maka tegangan yang terukur oleh rele pada saat terjadi gangguan di f adalah :

$$V_{Af} = V_{AB} + V_{Bf} \dots\dots\dots(3.8)$$

$$V_{Af} = I_1 \cdot Z_1 + I_1 \cdot Z_{Bf} \dots\dots\dots(3.9)$$

sehingga impedansi yang terukur oleh rele A adalah

$$Z_{Af} = \frac{V_{Af}}{I_1} = \frac{I_1 \cdot Z_1 + I_1 \cdot Z_{Bf}}{I_1} \dots\dots\dots(3.10)$$

Adanya pembangkit di B akan menyebabkan terjadi penambahan arus pada titik gangguan sehingga tegangan yang terukur oleh rele adalah :

$$V_{Af} = I_1 \cdot Z_{AB} + (I_1 + I_2) \cdot Z_{Bf} \dots\dots\dots(3.11)$$

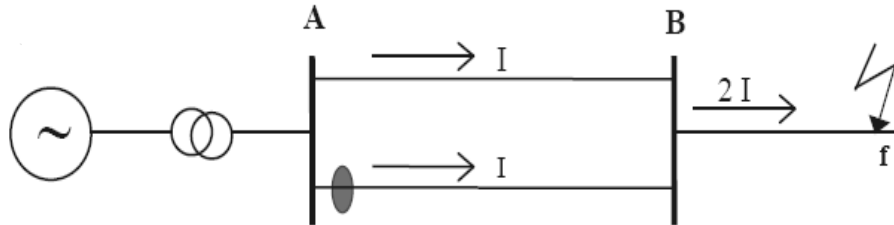
dan impedansi yang terukur oleh rele adalah :

$$V_{Af} = Z_{AB} + \frac{(I_1 + I_2) \cdot Z_{Bf}}{I_1} = Z_{AB} + k \cdot Z_{Bf} \dots\dots\dots(3.12)$$

Jadi faktor infeed

$$k = \frac{(I1 + I2)}{I1} \dots\dots\dots(3.13)$$

b) Konfigurasi saluran transmisi ganda ke tunggal



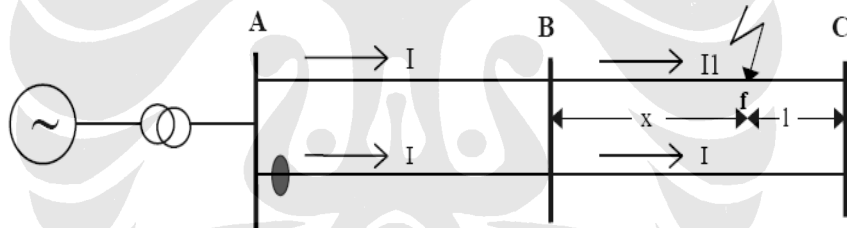
Gambar 3.8. Saluran transmisi ganda ke tunggal [5]

Jika terjadi gangguan pada titik f, maka impedansi yang terlihat oleh relai A adalah:

$$Z_{RA} = \frac{(I \cdot Z_{AB} + 2I \cdot Z_{Bf})}{I} = Z_{AB} + 2Z_{Bf} \dots\dots\dots(3.14)$$

Jadi faktor infeed $k = 2$

c) Konfigurasi saluran transmisi ganda ke ganda



Gambar 3.9. Saluran transmisi ganda ke ganda [5]

Pada konfigurasi saluran transmisi ganda ke ganda, jika terjadi gangguan di titik f, maka impedansi yang terlihat oleh rele A adalah :

$$Z_{RA} = \frac{IZ_{AB} + I1Z_{Bf}}{I} = Z_{AB} + \frac{I1}{I}Z_{Bf} \dots\dots\dots(3.15)$$

$$I1 = \frac{(2I - x)}{I} 2I \dots\dots\dots(3.16)$$

$$Z_{RA} = Z_{AB} + \frac{(2I - x)}{I} Z_{Bf} \dots\dots\dots(3.17)$$

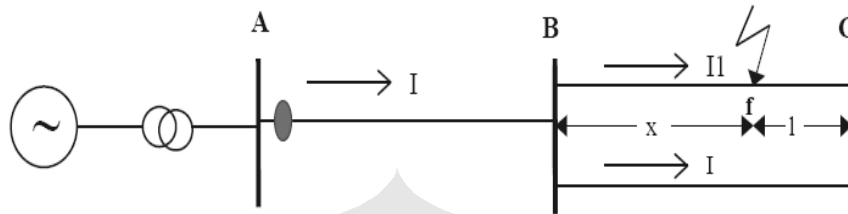
Jadi faktor infeed $k = \frac{(2I - x)}{I} \dots\dots\dots(3.18)$

- Untuk gangguan f dekat rel B ($x \approx 0$), faktor infeed $k = 2$

- Untuk gangguan f dekat rel C ($x \approx 0$), faktor infeed $k = 1$
- Untuk gangguan diantara rel B dan C nilai infeed bervariasi antara 1 - 2

d) Konfigurasi saluran transmisi tunggal ke ganda

Jika terjadi gangguan pada titik f impedansi yang terlihat oleh relai A adalah:



Gambar 3.10. Saluran transmisi tunggal ke ganda [5]

$$Z_{RA} = \frac{IZ_{AB} + I_1 Z_{Bf}}{I} = Z_{AB} + \frac{I_1}{I} Z_{Bf} \dots \dots \dots (3.19)$$

$$I_1 = \frac{(2I - x)}{2I} I \dots \dots \dots (3.20)$$

$$Z_{RA} = Z_{AB} + \frac{(2I - x)}{2I} Z_{Bf} \dots \dots \dots (3.21)$$

Jadi faktor infeed

$$k = \frac{(2I - x)}{2I} \dots \dots \dots (3.22)$$

- Untuk gangguan f dekat rel B ($x \approx 0$), faktor infeed $k = 1$
- Untuk gangguan f dekat rel c ($x \approx 0$), faktor infeed $k = 0.5$
- Untuk gangguan diantara rel B dan C nilai infeed bervariasi antara 0.5 - 1

3.5 POLA PENGAMAN TELEPROTEKSI RELE JARAK

Untuk dapat meningkatkan koordinasi waktu sistem proteksi pada saluran udara tegangan tinggi, diperlukan suatu peralatan yang dapat mengirim dan menerima sinyal dari satu atau beberapa rele di satu Gardu Induk (GI) ke rele di GI yang lain. Peralatan teleproteksi merupakan peralatan yang dapat mengirim dan menerima sinyal (*data or logic status*) dari satu rele ke rele yang lain. Dikarenakan jarak antara satu gardu induk dengan gardu induk yang lain cukup jauh maka diperlukan suatu media komunikasi yang dapat digunakan untuk

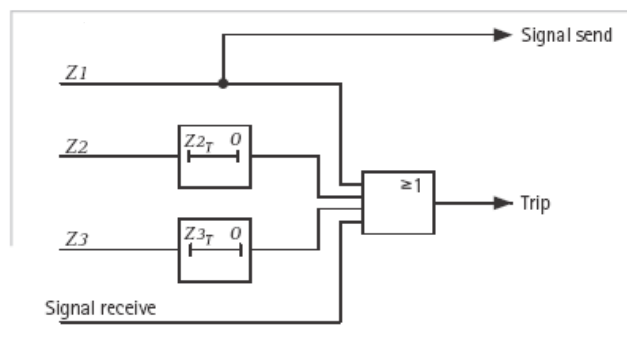
mengirimkan sinyal. Saluran komunikasi yang digunakan dapat berupa serat optik (*fiber optic*), *Power Line Comunication (PLC)* atau melalui gelombang mikro (*microwave*).

Dasar pemilihan pola pengaman dengan menggunakan teleproteksi adalah untuk meningkatkan keandalan sistem yaitu jika terjadi gangguan di luar zona satu rele tetapi masih berada pada saluran yang diamankan (ujung saluran transmisi), maka rele jarak yang telah dilengkapi teleproteksi akan bekerja lebih cepat dibandingkan rele jarak tanpa teleproteksi. Waktu pemutusan gangguan yang cepat pada saluran transmisi mempunyai beberapa keuntungan yaitu :

- Mengurangi kerusakan pada konduktor atau penghantar
- Meningkatkan stabilitas sistem
- Memungkinkan diterapkannya *auto reclosing* untuk meningkatkan ketersediaan penghantar sehingga peluang (lama dan frekuensi) pemadaman dapat dikurangi.

3.5.1 Pola DUTT (Direct Underreach Transfer Trip)

Salah satu cara yang paling sederhana untuk mengurangi waktu pemutusan gangguan yang terjadi di ujung saluran transmisi adalah dengan menerapkan *direct transfer trip* atau sinyal trip secara langsung, gambar 3.11 menunjukkan gambar rangkaian logika dari pola DUTT. Apabila terjadi gangguan pada zona satu rele jarak, maka rele akan bekerja mengirim sinyal trip ke CB dan pada saat yang bersamaan rele juga mengirim sinyal (*direct transfer trip signal*) ke rele lain di ujung terminal. Rele yang menerima sinyal tersebut akan langsung (*instantaneous*) mengirim sinyal tripping ke CB.

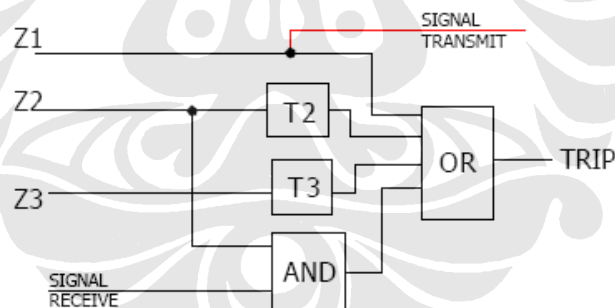


Gambar 3.11. Rangkaian logika direct underreach transfer trip

Salah satu kekurangan dari pola teleproteksi ini adalah adanya kemungkinan kesalahan tripping (*unwanted tripping*) yang disebabkan gangguan pada peralatan teleproteksi seperti timbulnya noise maupun interferensi pada saluran komunikasi.

3.5.2 Pola PUTT (Permissive Underreach Transfer Trip)

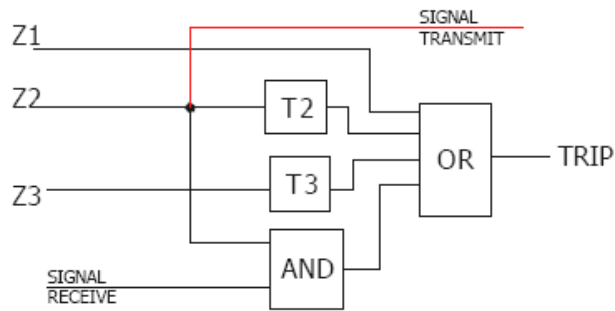
Pola *direct under-reach transfer tripping* yang telah dijelaskan sebelumnya dapat dibuat lebih aman dengan cara mengawasi sinyal yang diterima (*received signal*) dengan operasi dari zona dua rele jarak sebelum mengirim sinyal trip secara langsung ke CB seperti ditunjukkan pada gambar 3.12. Prinsip kerja dari pola PUTT adalah apabila gangguan dirasakan pada zona satu rele jarak, maka rele akan mengirim sinyal trip ke CB dan pada saat yang bersamaan juga mengirim sinyal ke rele di ujung terminal yang lain. Rele yang menerima sinyal *received* hanya akan bekerja secara langsung apabila telah merasakan adanya gangguan pada zona dua relenya. Pola PUTT mempunyai kelebihan yaitu untuk gangguan di daerah ujung saluran transmisi yang diamankan (zona dua) maka rele di kedua ujung saluran yang diamankan akan trip seketika karena menerima sinyal trip dari rele di ujung yang lain.



Gambar 3.12. Rangkaian logika permissive underreach transfer trip

3.5.3 Pola POTT (Permissive Overreach Transfer Trip)

Prinsip kerja pola POTT adalah apabila ada gangguan yang dirasakan oleh zona dua rele jarak, maka rele akan mengirim sinyal ke rele di ujung terminal yang lain dan rele di ujung terminal yang lain tersebut hanya akan bekerja apabila gangguannya juga dirasakan oleh zona dua rele tersebut Gambar rangkaian logikanya adalah seperti ditunjukkan pada gambar 3.13.

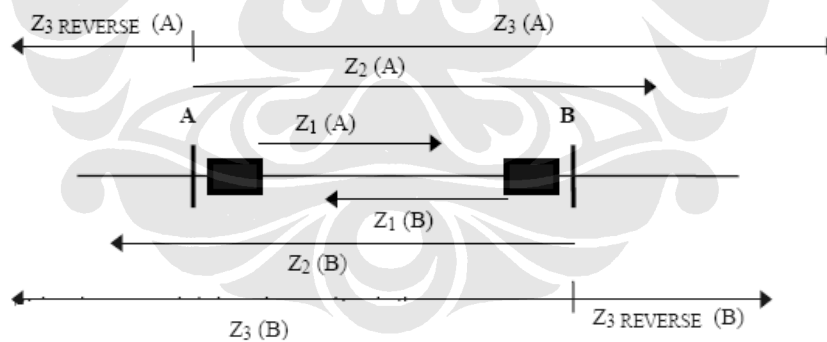


Gambar 3.13. Rangkaian logika permissive overreach transfer trip

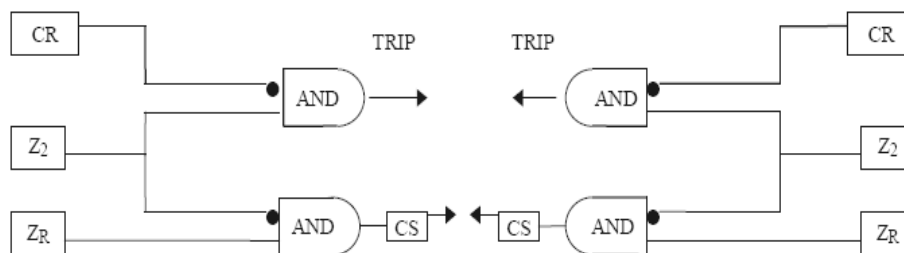
Sinyal yang diterima oleh rele, umumnya di monitor oleh kontak arah rele (*directional relay contact*) agar dapat bekerja (tripping) hanya jika zona dua *forward* rele bekerja.

3.5.4 Pola Blocking (Blocking Scheme)

Pola *blocking* menggunakan logika yang berbeda dibandingkan pola-pola yang telah dijelaskan sebelumnya. Pengirim sinyal blocking (agar rele tidak bekerja) dilakukan oleh zona arah belakang (*reverse*). Gambar logika diagramnya adalah sebagai berikut :



Gambar 3.14. Pola sinyal blocking



Gambar 3.15. Rangkaian logika pola *blocking*

Jika rele di A merasakan gangguan di zona dua dan rele di B mendeteksi gangguan tersebut berada pada zona tiga arah belakang atau reverse, maka rele di B akan mengirim sinyal blocking ke rele di A sehingga rele di A tidak trip seketika tetapi trip dengan waktu tunda t_2 (waktu zona dua). Rele jarak dengan pola *blocking* akan trip seketika jika memenuhi dua kondisi di bawah ini yaitu :

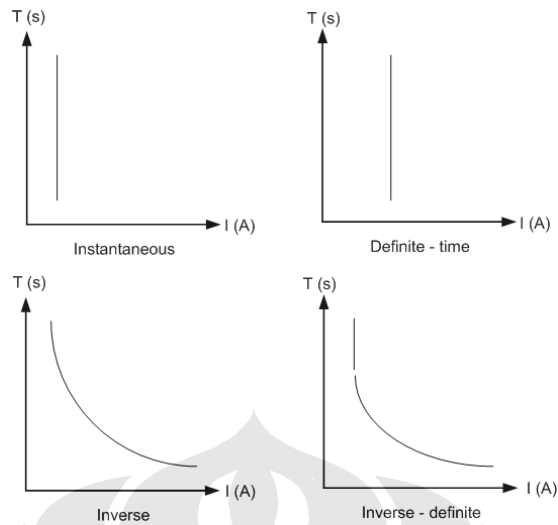
- Gangguan dirasakan oleh zona satu rele
- Rele di ujung terminal yang lain mendeteksi gangguan di zona dua dan pada saat yang bersamaan tidak menerima sinyal blocking

3.6 RELE ARUS LEBIH

Sistem proteksi pada saluran udara tegangan tinggi menggunakan rele arus lebih dan rele gangguan tanah sebagai proteksi cadangan lokal (*local back up protection*). Rele arus lebih atau OCR (*Overcurrent Relay*) merupakan rele yang bekerja ketika arusnya melebihi ambang-batas setelan yang telah ditentukan sebelumnya. Rele arus lebih memiliki beberapa karakteristik kerja yaitu :

1. Rele sesaat (*Instantaneous relay*), rele yang bekerja secara langsung atau tanpa waktu tunda berdasarkan perbedaan tingkat arus gangguan pada lokasi yang berbeda.
2. Rele arus lebih waktu pasti (*definite independent time*)
Rele yang bekerja berdasarkan waktu tunda yang telah ditentukan sebelumnya dan tidak tergantung pada perbedaan besarnya arus.
3. Rele waktu terbalik (*inverse time*)
Rele yang bekerja dengan waktu operasi berbanding terbalik terhadap besarnya arus yang terukur oleh rele. Rele ini mempunyai karakteristik kerja yang dipengaruhi baik oleh waktu maupun arus.
4. Inverse Definite Time Relay
Rele ini mempunyai karakteristik kerja berdasarkan kombinasi antara rele *invers* dan rele *definite*. Rele ini akan bekerja secara *definite* bila arus gangguannya besar dan bekerja secara *inverse* jika arus gangguannya kecil.

Berikut adalah gambaran kurva karakteristik rele arus lebih :



Gambar 3.16. Kurva karakteristik rele arus lebih

Pada umumnya ada dua setelan yang harus dilakukan terhadap rele arus lebih. Pertama adalah menghitung besarnya setelan arus dan yang ke dua adalah menghitung setelan waktu pengali atau TMS (*Time Multiplier Setting*). TMS merupakan faktor pengali terhadap waktu kerja dasar rele arus lebih.

$$\text{TMS} = \frac{\text{Waktu kerja yang diperlukan}}{\text{Waktu kerja pada TMS} = 1}$$

Perhitungan setelan arus dan TMS sebaiknya melihat kurva karakteristik yang dibuat oleh masing – masing pabrikan.

3.7 RELE GANGGUAN TANAH

Gangguan ke tanah merupakan salah satu gangguan yang paling sering terjadi pada saluran transmisi, dengan persentasi sebesar (70-80%) merupakan gangguan satu fasa ke tanah [4]. Untuk mendapatkan sensitivitas dan kecepatan operasi yang optimal, digunakan rele yang terpisah untuk mendeteksi adanya arus yang mengalir dari sistem ke tanah atau disebut juga *residual current*.

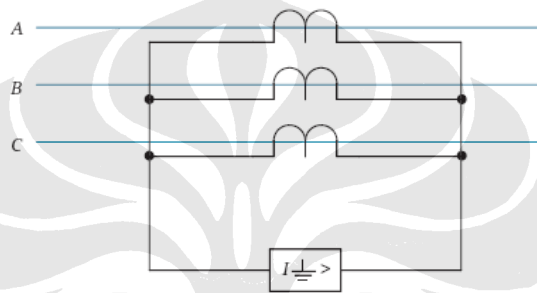
$$I_R = I_a + I_b + I_c = 3I_0 \dots \dots \dots (3.33)$$

Keterangan :

I_r = arus residu atau netral

I_0 = Arus urutan nol

Pada sistem tiga fasa yang seimbang atau pada kondisi normal, arus yang mengalir ke tanah relatif mempunyai nilai yang kecil dibandingkan arus yang mengalir saat terjadinya gangguan ke tanah. Rele gangguan tanah atau *ground fault relay* (GFR) merupakan rele yang bekerja berdasarkan besarnya arus residu yang mengalir dari sistem. Arus gangguan ke tanah dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti besarnya impedansi pentanahan (*ground resistance*), sehingga dapat menyebabkan level arus hubung singkat ke tanah menjadi kecil. Gambar 3.17 menunjukkan pengukuran arus residu dari sistem tiga fasa.



Gambar 3.17. Skema pengukuran arus residu