

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengertian Sistem Proteksi

Proteksi sistem tenaga listrik merupakan sistem proteksi yang dilakukan kepada peralatan-peralatan listrik yang terpasang pada suatu sistem tenaga misalnya generator, transformator jaringan dan lain-lain, terhadap gangguan atau kondisi tidak normal operasi sistem itu sendiri. Gangguan pada pusat pembangkit listrik dapat terjadi kapan saja, untuk itu diperlukan sistem proteksi, yang berfungsi selain mengamankan peralatan pada pusat pembangkit juga untuk melokalisir dampak dari gangguan. Alat pendeteksi gangguan adalah rele, yang selanjutnya memberi perintah kepada trip coil untuk membuka pemutus tenaga (PMT).(Wahyudin et al., 2018)

2.1.1 Fungsi Sistem Proteksi

Adapun fungsi dari sistem proteksi adalah sebagai berikut:(Tasiam, 2012)

1. Untuk menghindari ataupun untuk mengurangi kerusakan peralatan-peralatan akibat gangguan (kondisi abnormal operasi sistem).
2. Untuk melokalisir luas daerah terganggu menjadi sekecil mungkin dengan cepat.
3. Untuk dapat memberikan pelayanan listrik dengan keandalan yang tinggi dan juga mutu listrik yang baik kepada pelanggan.
4. Untuk mengamankan manusia terhadap bahaya yang ditimbulkan oleh listrik.

2.1.2 Persyaratan Kualitas Proteksi

Adapun beberapa persyaratan yang harus diperhatikan dalam suatu perencanaan sistem proteksi yang efektif adalah sebagai berikut:(Yudha et al., 2023)

a. Selektivitas dan Diskriminasi

Sistem proteksi dirancang dalam zona operasi tertentu yang mencakup seluruh sistem tenaga listrik tanpa pengecualian, sehingga tidak ada area yang tidak terlindungi. Ketika terjadi gangguan, sistem proteksi berfungsi untuk mendeteksi dan memutus pemutus tenaga yang paling dekat dengan titik gangguan. Kemampuan pemutusan yang selektif ini disebut diskriminasi, yang dapat dicapai melalui dua metode berikut:

1. Sistem Tingkatan Waktu

Sistem proteksi pada zona yang berdekatan diatur agar beroperasi dengan tingkat waktu yang berbeda melalui pengaturan urutan kerja peralatan. Saat terjadi gangguan, beberapa peralatan proteksi mungkin merespons, tetapi hanya peralatan yang berada dalam zona gangguan yang akan menyelesaikan seluruh proses pemutusan. Sementara itu, sistem proteksi lainnya tidak akan menyelesaikan pemutusannya dan akan kembali ke kondisi semula.

2. Sistem Unit

Sistem proteksi dapat dirancang agar hanya merespons gangguan yang terjadi dalam zona tertentu yang telah ditetapkan. Proteksi semacam ini, atau yang dikenal sebagai daerah proteksi, dapat diterapkan pada sistem tenaga listrik. Karena operasi sistem tidak bergantung pada waktu, maka

proteksi dapat bekerja lebih cepat. Proteksi unit umumnya dilakukan dengan membandingkan parameter sistem dalam batasan area operasi tertentu. Beberapa jenis sistem proteksi juga dapat dikategorikan sebagai proteksi unit berdasarkan keterbatasan konfigurasi sistem tenaga listrik.

Apa pun metode yang digunakan, penting untuk diingat bahwa selektivitas bukan merupakan bagian dari desain rele itu sendiri. Sebaliknya, selektivitas bergantung pada koordinasi yang tepat antara Transformator Arus (CT) dan rele, dengan penyesuaian pengaturan yang sesuai. Faktor-faktor seperti arus gangguan, arus beban maksimum, dan impedansi sistem harus diperhitungkan agar sistem proteksi bekerja secara optimal sesuai dengan kebutuhan.

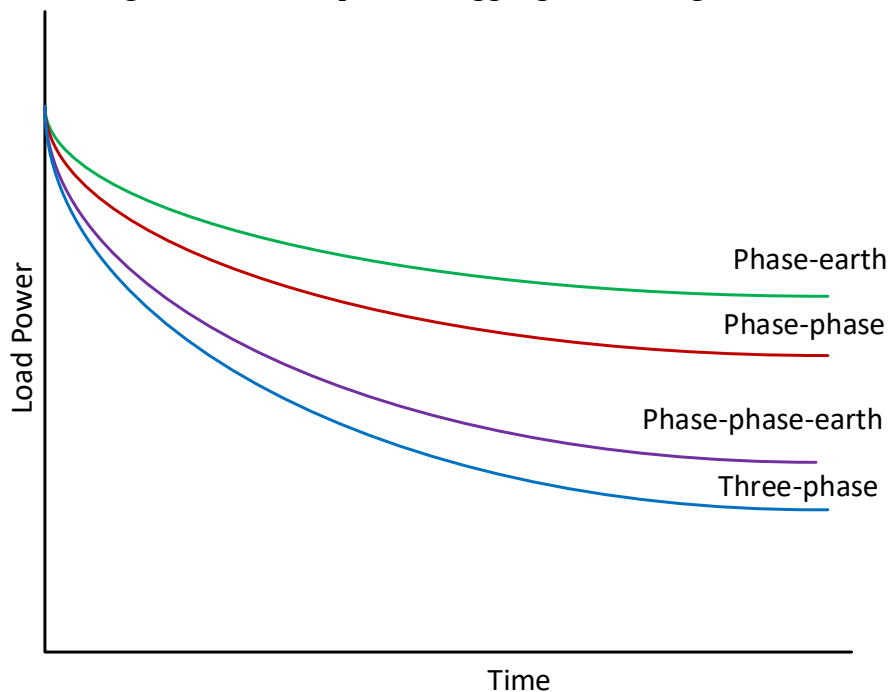
b. Stabilitas

Istilah ini juga digunakan dalam sistem proteksi untuk membedakan jaringan sistem tenaga, yang mengacu pada kemampuan sistem untuk tetap tidak terpengaruh dalam segala kondisi beban dan gangguan eksternal di luar zona proteksinya.

c. Kecepatan Operasi

Fungsi utama sistem proteksi adalah mengisolasi gangguan pada sistem tenaga listrik secepat mungkin. Tujuan utamanya adalah menjaga kontinuitas suplai dengan memutus gangguan sebelum menyebabkan hilangnya sinkronisasi dalam sistem, yang dapat mengakibatkan penghentian operasi pembangkit. Beban sistem menyebabkan pergeseran fasa antar tegangan di berbagai titik, yang dapat meningkatkan risiko kehilangan sinkronisasi ketika

sistem mengalami gangguan. Semakin cepat gangguan diisolasi, semakin besar kemungkinan sistem dapat menanggung beban dengan stabil.



Gambar 2. 1 Tipikal besar daya yang dapat ditransmisikan sebagai fungsi dari waktu pemulihan

Sumber:(Yudha et al., 2023)

Pada Gambar 2.1 diperlihatkan tipikal relasi antara pembebanan sistem dan waktu pemutusan gangguan untuk berbagai tipe gangguan. Dapat dilihat bahwa, gangguan phasa memiliki pengaruh yang lebih besar terhadap stabilitas sistem bila dibanding dengan gangguan tanah. Oleh karena itu diperlukan waktu pemutusan yang lebih cepat. Tidak cukup hanya untuk menjaga stabilitas sistem, kemungkinan kerusakan yang tidak diharapkan harus dihindari. Daya rusak dari semburan akibat gangguan membawa arus yang sangat besar yang dapat mengakibatkan konduktor tembaga terbakar atau melelehkan laminasi dari inti transformator atau mesin-mesin listrik dalam waktu singkat. Meski lokasinya jauh dari sumber gangguan, arus gangguan yang sangat besar dapat menimbulkan kerusakan pada pembangkit bilamana

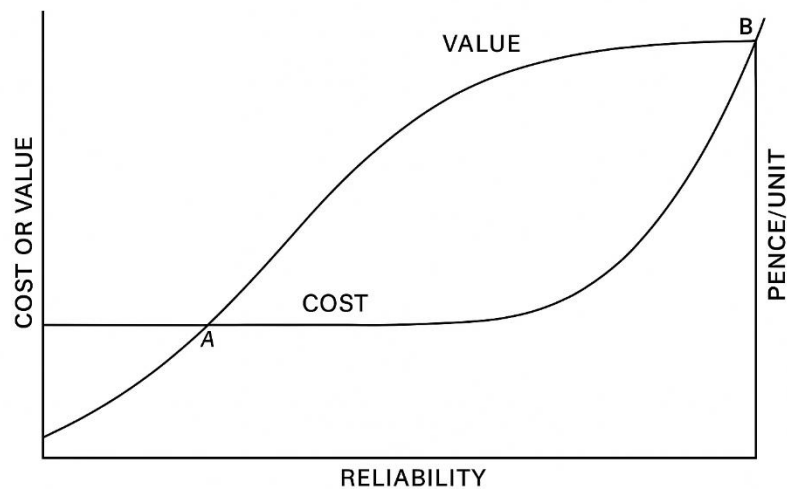
gangguan ini dibiarkan lebih dari beberapa menit. Terlihat bahwa peralatan proteksi harus beroperasi segera. Kecepatan menjadi penting, namun pertimbangan ekonomis tetap menjadi perhatian. Oleh karena alasan tersebut, sistem distribusi yang tidak begitu dipengaruhi kecepatan operasi sistem proteksi biasanya menggunakan metoda perbedaan waktu pada sistem proteksinya, namun pada sistem transmisi EHV memerlukan peralatan proteksi yang memiliki kecepatan operasi tinggi, pertimbangan penentuan kecepatan operasi hanya dipengaruhi oleh faktor kebenaran operasi rele.

d. Sensitivitas (kepekaan)

Sensitivitas adalah istilah yang sering digunakan untuk merujuk pada arus operasi minimum yang dibutuhkan agar sistem proteksi dapat berfungsi. Sistem proteksi dianggap sensitif jika memerlukan arus operasi utama yang rendah. Jika istilah ini diterapkan pada rele secara individu, sensitivitas tidak berkaitan dengan penyetelan arus atau tegangan, melainkan dengan konsumsi daya (VA) pada arus operasi minimum.

Sebagian besar elemen rele terdiri dari kumparan dengan rentang penyetelan arus yang cukup luas. Impedansi kumparan ini berbanding terbalik dengan kuadrat nilai arus penyetelan, sehingga daya (VA) yang dikonsumsi tetap konstan untuk setiap penyetelan. Daya ini merupakan input yang diperlukan untuk mengaktifkan rele serta menjadi indikator tingkat sensitivitasnya.

e. Realiabilitas (Keandalan)



Gambar 2. 2 Hubungan antara keandalan suplai biaya,dan harga bagi konsumen

Sumber:(Yudha et al., 2023)

Pada gambar 2.2 diperlihatkan hubungan antara keandalan, dan biaya untuk berbagai jumlah pelanggan. Sangat penting untuk dimengerti bahwa sistem hanya variable diantara dua titik persinggungan A dan B. Diagram pada Gambar 2.2 memperlihatkan hubungan penting antara desain dan tingkat keandalan sistem dan besarnya biaya yang dibutuhkan untuk mencapai tingkat keandalan yang diinginkan. Dengan kata lain tingkat keandalan tidak dapat dicapai dengan cara mengurangi biaya, tetapi dibutuhkan kompromi antara keduanya, dengan tetap mempertimbangkan faktor-faktor lainnya.

Kesalahan operasi pada suatu sistem tenaga listrik dapat terjadi disebabkan oleh salah satu dari keadaan berikut:

1. Kesalahan Desain

Aspek ini sangat penting, karena pemahaman yang mendalam tentang kondisi sistem tenaga listrik diperlukan untuk menghasilkan desain yang optimal. Pengujian yang menyeluruh sangat dibutuhkan dan harus

mencakup semua aspek sistem proteksi sedekat mungkin dengan kondisi nyata. Dalam sistem proteksi pada umumnya, pengujian rele, transformator arus, serta peralatan pendukung lainnya menjadi hal yang krusial. Pengujian ini harus mampu mensimulasikan berbagai kemungkinan gangguan yang dapat terjadi.

2. Kesalahan Instalasi

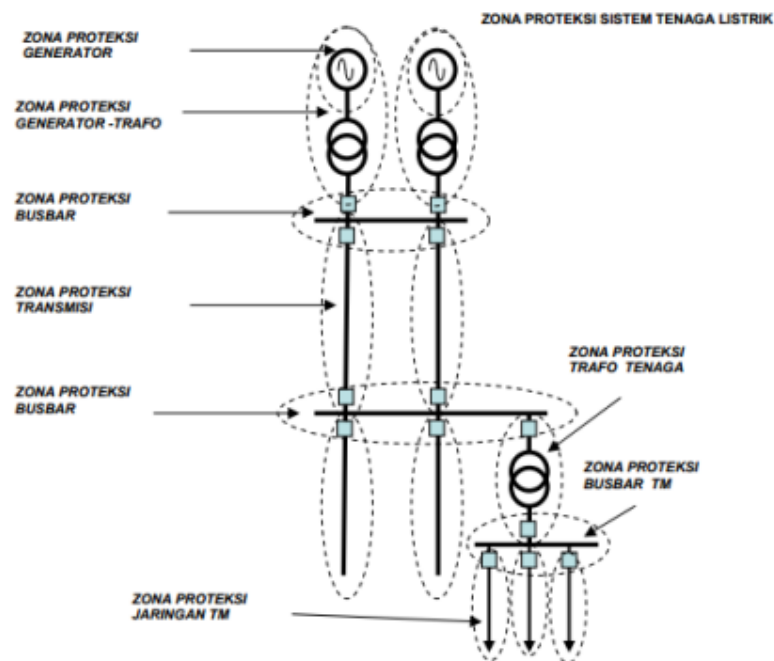
Instalasi sistem proteksi yang baik sangat diperlukan, namun kompleksitas rangkaian dalam sistem proteksi dapat menyulitkan proses pemeriksaan dan pengujian. Oleh karena itu, pengujian menjadi langkah penting untuk memastikan bahwa instalasi telah terpasang dengan benar dan setiap komponen berfungsi sesuai dengan perannya. Karena sulit untuk mensimulasikan semua kondisi gangguan secara akurat, pengujian ini harus dilakukan untuk mengevaluasi kondisi instalasi sistem. Inilah tujuan dari pengujian di lokasi, yang dilakukan secara terbatas dan sederhana untuk memastikan bahwa seluruh koneksi telah benar serta bebas dari potensi kerusakan peralatan.

3. Penuaan dalam Operasi

Setelah bagian-bagian sistem diinstal dengan sempurna, penuaanpun dapat terjadi sejalan dengan waktu yang akan mengganggu fungsi sistem. Sebagai contoh, kontak-kontak mungkin menjadi rusak dan atau terbakar akibat seringnya beroperasi atau akibat kontaminasi dari lingkungan sekitar. Koil atau bagian lain dari rangkaian menjadi terbuka, komponen-komponen bantu mungkin gagal dan sistem mekanis tertutup dengan debu atau mengalami korosi yang akan menghambat pergerakan sistem.

2.1.3 Pembagian Daerah Proteksi

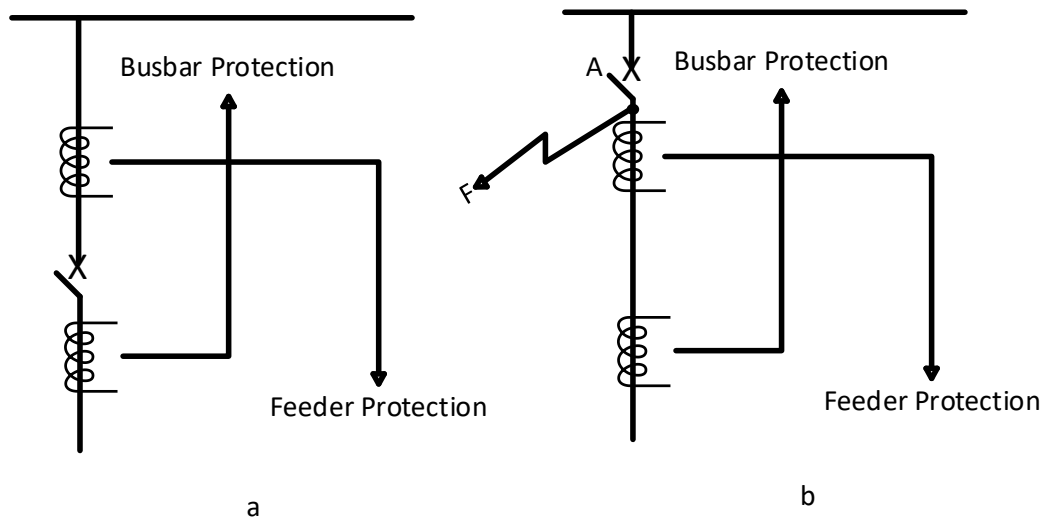
Pembagian daerah proteksi atau zona proteksi bertujuan untuk memperoleh tingkat selektifitas yang tinggi pada sebuah jaringan listrik yang mengalami gangguan. Zona ini biasanya dibatasi oleh pemutus tenaga (*circuit breaker*) yang dapat memutuskan dan menghubungkan antar zona proteksi yang mengalami gangguan.



Gambar 2. 3 Zona Proteksi pada Komponen Jaringan

Sumber:(Izzuddin & Jatmiko, 2020)

Sebuah jaringan listrik memiliki kehandalan tinggi apabila dapat menyeleksi gangguan sesuai dengan wilayah pengamannya. Pada gambar 2.3 diatas menunjukan zona jaringan yang menjadi kawasan masing masing rele yang dipasang.



Gambar 2. 4 a. Lokasi CT pada kedua sisi PMT; b. Lokasi CT pada satu sisi PMT;

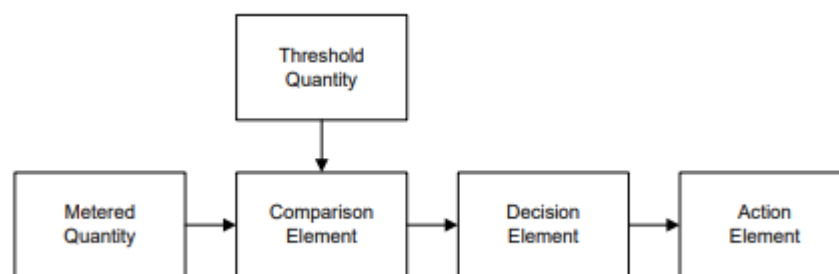
Sumber:(Yudha et al., 2023)

Zona proteksi seperti yang disebutkan terdahulu idealnya harus overlap melewati Pemutus Tenaga (PMT atau CB) seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2.4 a, dimana PMT menjadi bagian dari kedua zona. Karena alasan fisis, kondisi ideal ini kerap kali sukar dicapai, sehingga dalam beberapa kasus hanya dimungkinkan CT berada pada salah satu sisi PMT, seperti pada Gambar 2.4 b. Keadaan ini mengakibatkan bagian diantara CT dan PMT A menjadi tidak terlindungi dengan baik bila terjadi gangguan di daerah tersebut. Pada Gambar 2.4 b, gangguan pada titik F akan mengakibatkan proteksi pada busbar bekerja membuka PMT, namun demikian gangguan tetap berlanjut karena suplai datang dari arah penyulang.

2.1.4 Komponen Sistem Proteksi

Sistem proteksi tenaga listrik pada umumnya terdiri dari beberapa komponen yang di rancang untuk mengidentifikasi kondisi pada sistem tenaga listrik dan bekerja berdasarkan informasi yang diperoleh dari sistem tersebut seperti arus,

tegangan atau sudut fasa antara keduanya. Informasi yang diperoleh dari sistem tenaga listrik akan digunakan untuk membandingkan besarnya dengan besaran ambang-batas (*threshold setting*) pada peralatan proteksi. Apabila besaran arus yang diperoleh dari sistem melebihi *setting* ambang-batas peralatan proteksi, maka sistem proteksi tersebut akan bekerja untuk mengamankan kondisi tersebut. Peralatan proteksi pada umumnya terdiri dari beberapa elemen yang dirancang untuk mengamati kondisi sistem dan melakukan suatu tindakan berdasarkan kondisi sistem yang diamatinya. (Mastian Noor, 2017)



Gambar 2. 5 Elemen Sistem Proteksi

Sumber : (Mastian Noor, 2017)

Waktu pemutusan gangguan merupakan waktu total yang dibutuhkan peralatan proteksi sampai terbukanya pemutus tenaga atau disebut juga *fault clearing time*.

$$T_c = T_p + T_d + T_a \dots \dots \dots (1)$$

Keterangan:

T_c = *clearing time*.

T_p = *comparation time*.

T_d = *decision time*.

T_a = *action time, including circuit breaker operating time*.

Waktu pemutusan gangguan merupakan salah satu faktor yang sangat penting dalam menentukan suatu skema proteksi. Hal ini dikarenakan suatu peralatan proteksi harus dikoordinasikan waktunya dengan peralatan proteksi yang lain agar hanya peralatan proteksi yang paling dekat dengan gangguan saja yang bekerja.

a. *Current Transformer (CT)*

Untuk memperoleh besaran arus yang proporsional dengan arus sistem yang dapat digunakan dalam peralatan kontrol, rele proteksi dan peralatan instrumen yang lain, umumnya digunakan trafo arus atau Current Transformer. Current Transformer merupakan suatu peralatan yang digunakan untuk mengambil sample atau masukan arus sistem dan mentransformasikannya ke level yang lebih rendah untuk peralatan-peralatan proteksi, pengukuran maupun peralatan kontrol. Trafo arus mempunyai beberapa fungsi yaitu:

1. Memperkecil besaran arus listrik (ampere) pada sistem tenaga listrik menjadi besaran arus untuk sistem pengukuran dan proteksi.
2. Mengisolasi rangkaian sekunder terhadap rangkaian primer, yaitu memisahkan instalasi pengukuran dan proteksi rasio primer tegangan tinggi.

Rating dari trafo arus ditentukan berdasarkan ratio arus primer dengan arus sekunder. Umumnya ratio trafo arus yang digunakan adalah 600:5, 800:5, 1000:5, 1600:1. Rating arus 5 ampere atau 1 ampere banyak digunakan sebagai standar pada trafo arus. Beberapa rele proteksi menggunakan arus sekunder CT sebagai input masukan seperti rele jarak, rele arus lebih, rele diferensial dan lain-lain.

b. Rele Proteksi

Rele adalah suatu alat yang berkerja saat diberi energi oleh besaran-besaran sistem yang tepat dapat memberi indikasi suatu kondisi abnormal. Apabila kontak-kontak rele menutup, maka rangkaian-rangkaian tersebut akan trip pemutus tenaga yang terkait mendapat energi dan kontak-kontak breaker membuka, mengisolasi bagian yang terganggu dari sistem. Rele proteksi dapat diklasifikasi berdasarkan fungsi atau kegunaannya. Berikut ini adalah klasifikasi rele berdasarkan fungsi atau kegunaannya:

1. *Overcurrent Rele*

Rele yang bekerja apabila arus yang dirasakan oleh Rele lebih besar dari setelan nilai ambang batas arusnya.

2. *Differential Rele*

Rele yang di khususkan untuk mendeteksi perbedaan antara arus yang masuk dalam daerah atau zona yang diproteksinya dengan arus yang keluar. Rele ini akan bekerja apabila arus yang masuk tidak sinkron dengan arus yang keluar.

3. *Directional Rele*

Rele yang di rancang untuk mengidentifikasi perbedaan fasa antara arus yang satu dengan yang lain atau perbedaan fasa antar tegangan. Rele ini dapat membedakan apakah gangguan yang terjadi berada di belakang (*reverse fault*) atau di depan (*forward fault*).

4. *Distance Rele*

Rele ini biasa digunakan untuk proteksi pada saluran transmisi kerana Rele jarak dapat mengukur impedansi untuk mencapai titik tertentu.

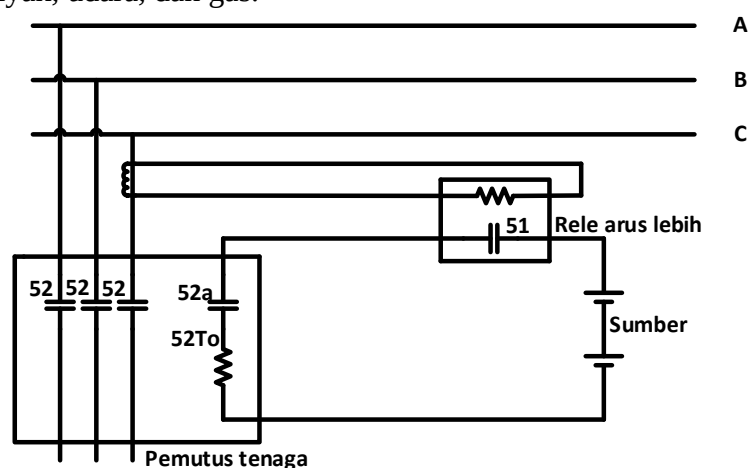
Distance Rele dapat bekerja untuk mendeteksi gangguan hubung singkat yang terjadi antara lokasi rele dan batas jangkauan yang telah ditentukan.

5. *Ground Fault Rele*

Rele ini bekerja untuk mendeteksi gangguan ke tanah atau lebih tepatnya dengan mengukur besarnya arus residu yang mengalir ke tanah.

c. Pemutus Tenaga

Pemutus tenaga (PMT) atau circuit breaker (CB) merupakan peralatan yang dapat digunakan untuk menghubungkan atau memutuskan arus listrik sesuai dengan kapasitas ratingnya. CB mempunyai kemampuan untuk memutuskan arus beban dan arus gangguan hubung singkat pada tegangan tinggi dalam waktu yang relatif sangat cepat. Energi mekanik yang diperlukan untuk membuka kontak utama diperoleh dari gaya pegas, tekanan hidrolik, tekanan pneumatik atau dari beberapa kombinasi diantaranya. Pada saat CB memutuskan atau menghubungkan arus listrik akan timbul busur api dan untuk memadamkan busur api tersebut digunakan beberapa bahan pada CB antara lain : minyak, udara, dan gas.



Gambar 2. 6 Elemen Sistem Proteksi

Sumber :(Mastian Noor, 2017)

2.2 Pengertian Gangguan

Gangguan adalah suatu ketidaknormalan dalam sistem tenaga listrik yang mengakibatkan mengalirnya arus yang tidak seimbang dalam sistem tiga fasa. Gangguan juga didefinisikan sebagai semua kecacatan yang mengganggu aliran normal arus ke beban.(Mastian Noor, 2017)

2.2.1 Klasifikasi Gangguan

Berikut merupakan klasifikasi gangguan berdasarkan kesimetrisannya dan lama terjadinya gangguan:(Mastian Noor, 2017)

a. Berdasarkan Kesimetrisannya

1. Gangguan Asimetris

Merupakan gangguan yang mengakibatkan tegangan dan arus yang mengalir pada setiap fasanya menjadi tidak seimbang, gangguan ini terdiri dari:

- Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah
- Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa
- Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah

2. Gangguan Simetris

Merupakan gangguan yang terjadi pada semua fasanya sehingga arus maupun tegangan setiap fasanya tetap seimbang setelah gangguan terjadi, gangguan ini terdiri dari:

- Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa
- Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah

b. Berdasarkan Lama Terjadinya Gangguan

1. Gangguan Transient (temporer)

Merupakan gangguan yang hilang dengan sendirinya apabila pemutus tenaga terbuka dari saluran transmisi untuk waktu yang singkat dan setelah itu dihubungkan kembali.

2. Gangguan Permanen

Merupakan gangguan yang tidak hilang atau tetap ada apabila pemutus tenaga terbuka pada saluran transmisi untuk waktu yang singkat dan setelah itu dihubungkan kembali.

Selain klasifikasi gangguan yang telah disebutkan di atas, terbukanya pemutus tenaga tidak selalu disebabkan oleh terjadinya gangguan pada sistem, tetapi juga dapat disebabkan oleh adanya kerusakan pada Rele, kabel kontrol atau adanya pengaruh dari luar seperti induksi atau interferensi. Gangguan seperti ini disebut juga gangguan non-sistem.

2.2.2 Metode Komponen Simetris untuk Gangguan Hubung Singkat

Gangguan yang terjadi pada sistem tenaga listrik umumnya merupakan gangguan asimetris, dimana gangguan tersebut mengakibatkan tegangan dan arus yang mengalir pada setiap fasanya menjadi tidak seimbang.

Pada tahun 1918, C.L Fortesque menemukan suatu metode yang dapat digunakan untuk menganalisa sistem tiga fasa yang tidak seimbang. Fortesque membuktikan bahwa suatu sistem yang tidak seimbang yang terdiri dari tegangan atau arus yang tidak seimbang antar fasanya dapat dipecah menjadi tiga komponen simetris dari sistem tiga fasa seimbang. Tiga komponen tersebut adalah:(Mastian Noor, 2017)

a. Komponen Urutan Positif (*positive sequence components*)

Merupakan komponen yang terdiri dari tiga fasor yang sama besarnya, terpisah satu dengan yang lain dalam fasa sebesar 120° , dan mempunyai urutan fasa yang sama seperti fasor aslinya (ditandai dengan angka 1). Saat sistem berada dalam kondisi normal, hanya terdapat arus dan tegangan urutan positif saja, sehingga impedansi sistem pada kondisi normal adalah impedansi urutan positif. Ketika terjadi gangguan, cabang yang terganggu pada sistem dapat digantikan dengan perubahan $\Delta V = V - V_1$ dan semua sumber tegangan yang ada pada sistem dihubungkan singkat, sehingga akan diperoleh arus gangguan ΔI yang mengalir ke dalam sistem, yaitu:

$$\Delta I = \frac{(V - V_1)}{Z_1} \dots \dots \dots (2)$$

$$\text{dan } \Delta I = I - I_1 \dots \dots \dots (3)$$

Karena arus awal sistem sebelum terjadi gangguan adalah nol ($I = 0$), maka arus yang mengalir di cabang yang mengalami gangguan

$$I_1 = -\Delta I \dots \dots \dots (4)$$

sehingga di dapat,

$$V_1 = V - I_1 Z_1 \dots \dots \dots (5)$$

Persamaan di atas merupakan persamaan komponen urutan positif arus dan tegangan pada cabang yang mengalami gangguan.

b. Komponen Urutan Negatif (*negative sequence components*)

Merupakan komponen yang terdiri dari tiga fasor yang sama besarnya, terpisah satu dengan yang lain dalam fasa sebesar 120° , dan mempunyai urutan fasa yang berlawanan dengan fasor aslinya (ditandai dengan angka 2). Jika pada kondisi normal hanya terdapat komponen urutan positif, maka komponen

urutan negatif hanya ada pada saat terjadi gangguan, maka apabila terjadi gangguan akan timbul perubahan tegangan sebesar $-V_2$, dan arus I_2 yang mengalir dari sistem ke gangguan adalah:

$$I_2 = \frac{V_2}{Z_2} \dots \dots \dots (6)$$

$$V_2 = -I_2 Z_2 \dots \dots \dots (7)$$

Z_2 merupakan impedansi urutan negatif dan pada umumnya sama dengan urutan positif.

c. Komponen Urutan Nol (zero sequence components)

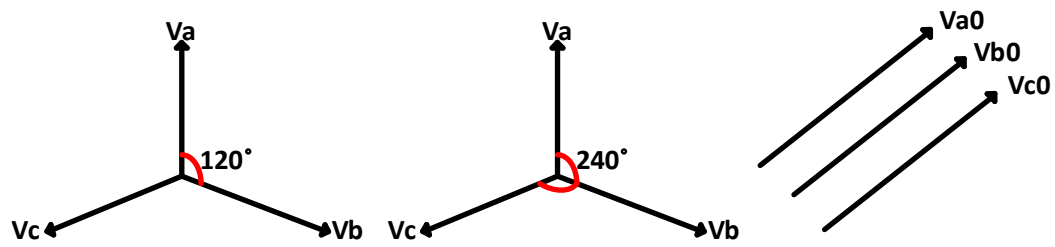
Merupakan komponen yang terdiri dari tiga fasor yang sama dan tidak ada pergeseran fasa antara fasor yang satu dengan yang lain (ditandai dengan angka 0). Persamaan untuk komponen urutan nol saat terjadi gangguan yaitu:

$$I_0 = \frac{V_0}{Z_0} \dots \dots \dots (8)$$

$$V_0 = -I_0 Z_0 \dots \dots \dots (9)$$

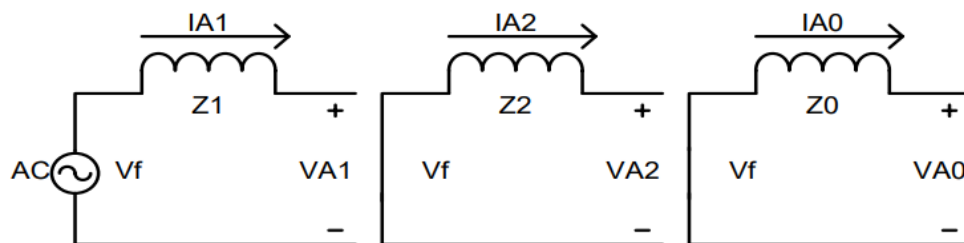
Arus dan tegangan pada komponen urutan nol adalah sefasa, oleh karena itu arus urutan nol untuk dapat mengalir di sistem memerlukan jalan balik (return connection) melalui pentanahan netral sistem. Impedansi urutan nol umumnya tidak sama dengan impedansi urutan positif dan tergantung dari beberapa faktor seperti jenis peralatan sistem, cara menghubungkan belitan (Δ atau Y), dan cara pentanahan titik netral.

Gambar ketiga komponen simetris adalah sebagai berikut :



Gambar 2. 7 Komponen-Komponen Simetris

Sumber:(Mastian Noor, 2017)



Gambar 2. 8 Rangkaian Komponen-Komponen Simetris

Sumber:(Mastian Noor, 2017)

Karena adanya pergeseran fasa pada komponen simetris tegangan dan arus dalam sistem tiga fasa, akan lebih mudah bila didapatkan metode penulisan yang dapat langsung menunjukkan perputaran fasor dengan 120° . Operator merupakan suatu operator fasor yang menghasilkan putaran sebesar 120° dalam arah yang tidak searah jarum jam (*counterclockwise*), dengan tidak mengubah besar fasornya. Operator ini disebut juga bilangan kompleks yang besarnya satu dan sudutnya 120° dan didefinisikan sebagai :

$$a = 1 \angle 120^\circ = 1e^{j\frac{2\pi}{3}} = -0,5 + j0,866 \dots \dots \dots (10)$$

Jika operator a dikenakan pada fasor dua kali berturut-turut, maka fasor itu akan diputar dengan sudut sebesar 240° atau -120° . Untuk pengenaaan tiga kali berturut-turut fasor akan diputar dengan 360° atau 0° Jadi :

$$a^2 = 1 \angle 240^\circ = -0,5 - j0,866 \dots \dots \dots (11)$$

Dan

$$a^3 = 1 \angle 360^\circ = 1 \angle 0^\circ = 1 \dots \dots \dots (12)$$

Telah disebutkan bahwa tiga fasor asimetris dapat direpresentasikan menjadi tiga buah himpunan fasor simetris. Persamaannya adalah sebagai berikut :

$$V_a = V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} \dots \dots \dots (13)$$

$$V_b = V_{b0} + V_{b1} + V_{b2} \dots \dots \dots (14)$$

$$V_c = V_{c0} + V_{c1} + V_{c2} \dots \dots \dots (15)$$

Dengan menggunakan himpunan fasor dari komponen-komponen simetris, maka dapat diketahui bahwa :

$$V_{b0} = V_{c0} = V_{a0} \dots \dots \dots (16)$$

$$V_{b1} = a^2 V_{a1} \quad V_{c1} = a V_{a1} \dots \dots \dots (17)$$

$$V_{b2} = a V_{a2} \quad V_{c2} = a^2 V_{a2} \dots \dots \dots (18)$$

Atau dalam bentuk matriks :

$$\begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a_2 & a \\ 1 & a & a_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{pmatrix} \dots \dots \dots (19)$$

Untuk lebih sederhana dituliskan kembali :

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a_2 & a \\ 1 & a & a_2 \end{pmatrix} \dots \dots \dots (20)$$

Dan

$$A^{-1} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{pmatrix} \dots\dots\dots (21)$$

Sehingga diperoleh persamaan :

$$\begin{pmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} \dots\dots\dots (22)$$

$$V_{a0} = \frac{1}{3} (V_a + V_b + V_c) \dots\dots\dots (23)$$

$$V_{a1} = \frac{1}{3} (V_a + aV_b + a^2V_c) \dots\dots\dots (24)$$

$$V_{a2} = \frac{1}{3} (V_a + a^2V_c + aV_b) \dots\dots\dots (25)$$

Persamaan di atas merupakan persamaan komponen simetris untuk tegangan. Persamaan tersebut dapat juga dituliskan kembali pada persamaan komponen simetris untuk arus.

$$I_a = I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} \dots\dots\dots (26)$$

$$I_b = I_{b0} + I_{b1} + I_{b2} = I_{a0} + a^2I_{a1} + aI_{a2} \dots\dots\dots (27)$$

$$I_c = I_{c0} + I_{c1} + I_{c2} = I_{a0} + aI_{a1} + a^2I_{a2} \dots\dots\dots (28)$$

Dalam bentuk matriks,

$$\begin{pmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{pmatrix} \dots\dots\dots (29)$$

Dengan mengikuti langkah-langkah yang sama seperti pada persamaan komponen simetis untuk tegangan, maka dapat diperoleh persamaan komponen simetris untuk arus :

$$I_{a0} = \frac{1}{3} (I_a + I_b + I_c) \dots\dots\dots (30)$$

$$I_{a1} = \frac{1}{3}(I_a + aI_b + a^2I_c) \dots\dots\dots(31)$$

$$I_{a2} = \frac{1}{3}(I_a + a^2I_b + aI_c) \dots\dots\dots(32)$$

Dalam sistem tiga fasa, jumlah arus dari setiap fasanya sama dengan arus I_n dalam jalur balik ke netral.

$$I_n = I_a + I_b + I_c \dots\dots\dots(33)$$

Sedangkan,

$$I_{a0} = \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c) \dots\dots\dots(34)$$

Sehingga dengan memperbandingkan kedua persamaan di atas, didapatkan:

$$I_n = 3I_{a0} \dots\dots\dots(35)$$

Jika tidak ada saluran yang melalui netral dalam sistem tiga fasa, I_n adalah nol dan arus saluran tidak mengandung komponen urutan nol. Hal ini berarti suatu beban hubungan Δ ataupun Y yang tidak menyediakan jalur ke netral, maka arus salurannya tidak dapat mengandung komponen urutan nol.

2.2.3 Gangguan Hubung Singkat

Perhitungan hubung singkat adalah analisis suatu sistem tenaga listrik pada keadaan gangguan hubung singkat, dimana dengan cara ini diperoleh nilai besaran besaran listrik yang dihasilkan sebagai akibat gangguan hubung singkat tersebut. Gangguan hubung singkat dapat didefinisikan sebagai gangguan yang terjadi akibat adanya penurunan kekuatan dasar isolasi antara sesama kawat fasa dengan tanah yang menyebabkan kenaikan arus secara berlebihan. Analisis gangguan hubung singkat diperlukan untuk mempelajari sistem tenaga listrik baik waktu perencanaan maupun setelah beroperasi. (Hendriyadi, 2017)

a. Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah

Gambar 2.9 (a) menunjukkan bahwa fasa a dari sistem tiga fasa mengalir ke tanah melalui impedansi Z_f . Aliran arus gangguan tanah tergantung pada metode pentanahan sistem. Diasumsikan sistem pentanahan solid dengan resistansi tanah nol. Akan ada beberapa impedansi terhadap aliran arus gangguan dalam bentuk impedansi konduktor tanah balik atau resistansi jaringan pentanahan. Resistansi pentanahan dapat ditambahkan secara seri dengan impedansi gangguan Z_f . Arus gangguan tanah harus memiliki jalur balik melalui netral tanah generator atau transformator. Jika tidak ada jalur balik untuk arus tanah, $Z_0 = \infty$ dan arus gangguan tanah adalah nol. Ini adalah kesimpulan yang jelas.(El-Keib, 2002)

Fasa a mengalami gangguan pada Gambar 2.9 (a). Karena arus beban diabaikan, arus pada fasa b dan c adalah nol, dan tegangan pada titik gangguan, $V_a = I_a Z_f$. Komponen urutan arus diberikan oleh

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} I_a \\ I_a \\ I_a \end{bmatrix} \dots\dots\dots(36)$$

Juga,

$$I_0 = I_1 = I_2 = \frac{1}{3} I_a \dots\dots\dots(37)$$

$$3I_0 Z_f = V_0 + V_1 + V_2 = -I_0 Z_0 + (V_a - I_1 Z_1) - I_2 Z_2 \dots\dots\dots(38)$$

Yang memberikan,

$$I_0 = \frac{V_a}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + 3Z_f} \dots\dots\dots(39)$$

Arus gangguan I_a adalah,

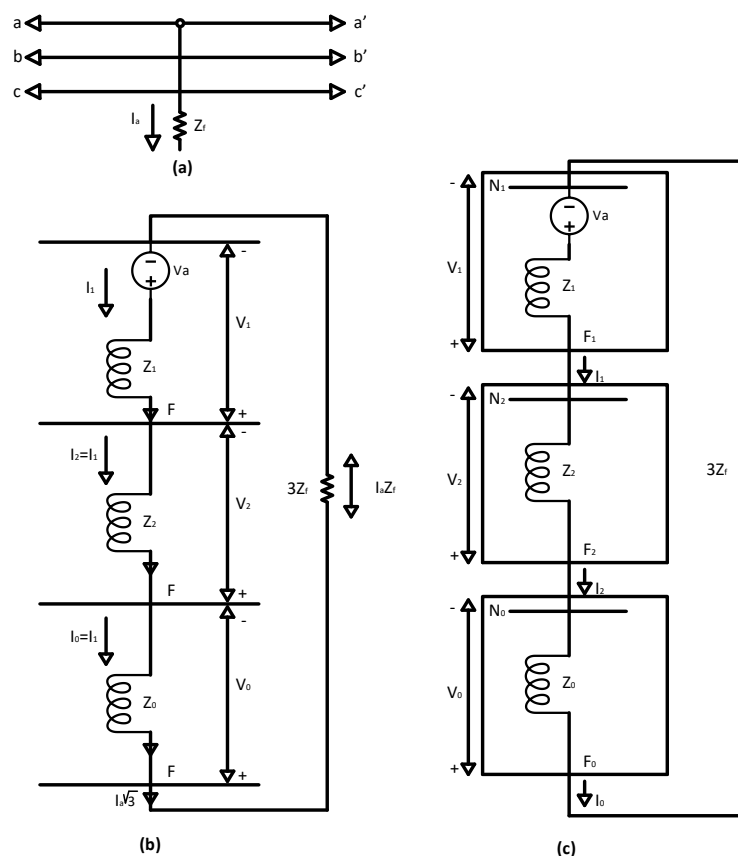
$$I_a = 3I_0 = \frac{3V_a}{(Z_0 + Z_1 + Z_2) + 3Z_f} \dots\dots\dots(40)$$

Hal ini menunjukkan bahwa rangkaian gangguan ekivalen yang menggunakan impedansi urutan dapat dibuat seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.9 (b). Dalam hal blok jaringan impedansi urutan, koneksinya ditunjukkan pada Gambar 2.9 (c).

Hasil ini juga dapat diperoleh dari Gambar 2.9 (b):

$$(V_a - I_1 Z_1) + (-I_2 Z_2) + (-I_0 Z_0) - 3Z_f I_0 = 0 \dots\dots\dots(41)$$

Yang memberikan persamaan yang sama. Tegangan fasa b ke tanah pada kondisi gangguan adalah



Gambar 2. 9(a) Gangguan fasa ke tanah dalam sistem tiga fasa; (b) Rangkaian ekivalen gangguan fasa ke tanah; (c) Interkoneksi jaringan urutan.

Sumber: (El-Keib, 2002)

$$V_b = a^2 V_1 + a V_2 + V_0$$

$$= V_a \frac{3a^2 Z_f + Z_2(a^2 - a) + Z_0(a^2 - 1)}{(Z_1 + Z_2 + Z_0) + 3Z_f} \dots\dots\dots (42)$$

Demikian pula, tegangan fasa c dapat dihitung.

Ekspresi untuk arus gangguan tanah yang digunakan dalam desain jaringan pentanahan dan sistem pentanahan adalah sebagai berikut:

$$I_a = \frac{3V_a}{(R_0 + R_1 + R_2 + 3R_f + 3R_g) + j(X_0 + X_1 + X_2)} \dots\dots\dots (43)$$

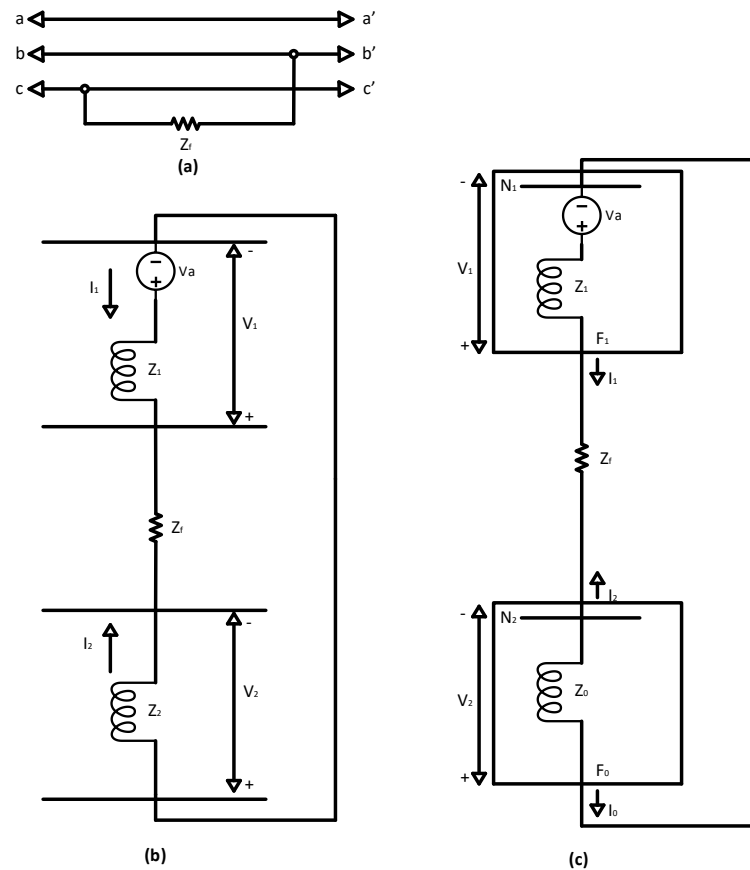
Di mana R_f adalah resistensi gangguan dan R_g adalah resistensi jaringan pentanahan; R_0 , R_1 , dan R_2 adalah resistensi urutan dan X_0 , X_1 , dan X_2 adalah reaktansi urutan.

b. Gangguan Hubung Singkat Fasa ke Fasa

Gambar 2.10 (a) menunjukkan gangguan fasa ke fasa. Hubung singkat terjadi antara fasa b dan c, melalui impedansi gangguan Z_f . Arus gangguan bersirkulasi antara fasa b dan c, mengalir kembali ke sumber melalui fasa b dan kembali melalui fasa c; $I_a = 0$, $I_b = -I_c$. Komponen urutan arus adalah (El-Keib, 2002)

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ -I_c \\ I_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 0 \\ -a + a^2 \\ -a^2 + a \end{bmatrix} \dots\dots\dots (44)$$

Dari persamaan di atas, $I_0 = 0$ dan $I_1 = -I_2$



Gambar 2. 10(a) Gangguan fasa ke fasa dalam sistem tiga fasa; (b) rangkaian ekivalen gangguan fasa ke fasa; (c) interkoneksi jaringan berurutan.

Sumber: (El-Keib, 2002)

$$\begin{aligned}
 V_b - V_c &= \begin{vmatrix} 0 & 1 & -1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & 1 & -1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{vmatrix} \\
 &= \begin{vmatrix} 0 & a^2 & -a & a & -a^2 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{vmatrix} \dots\dots\dots(45)
 \end{aligned}$$

Oleh karena itu,

$$\begin{aligned}
 V_b + V_c &= (a^2 - a)(V_1 - V_2) \\
 &= (a^2 I_1 + a I_2) Z_f \\
 &= (a^2 - a) I_1 Z_f \dots\dots\dots(46)
 \end{aligned}$$

Hal ini memberikan

$$(V_1 - V_2)I_1 Z_f \dots\dots\dots(47)$$

Rangkaian ekivalen ditunjukkan pada Gambar 2.10 (b) dan (c).

Juga,

$$I_b = (a^2 - a)I_1 = -j\sqrt{3}I_1 \dots\dots\dots(48)$$

Dan,

$$I_1 = \frac{V_a}{Z_1 + Z_2 + Z_f} \dots\dots\dots(49)$$

Arus gangguan adalah,

$$I_b = -I_c = \frac{-j\sqrt{3}V_a}{Z_1 + Z_2 + Z_f} \dots\dots\dots(50)$$

c. Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah

Gangguan dua fasa ke tanah ditunjukkan pada Gambar 2.11 (a) Fasa b dan c masuk ke tanah melalui impedansi gangguan Z_f . Arus pada fasa yang tidak ditanahkan adalah nol. Yaitu, (El-Keib, 2002)

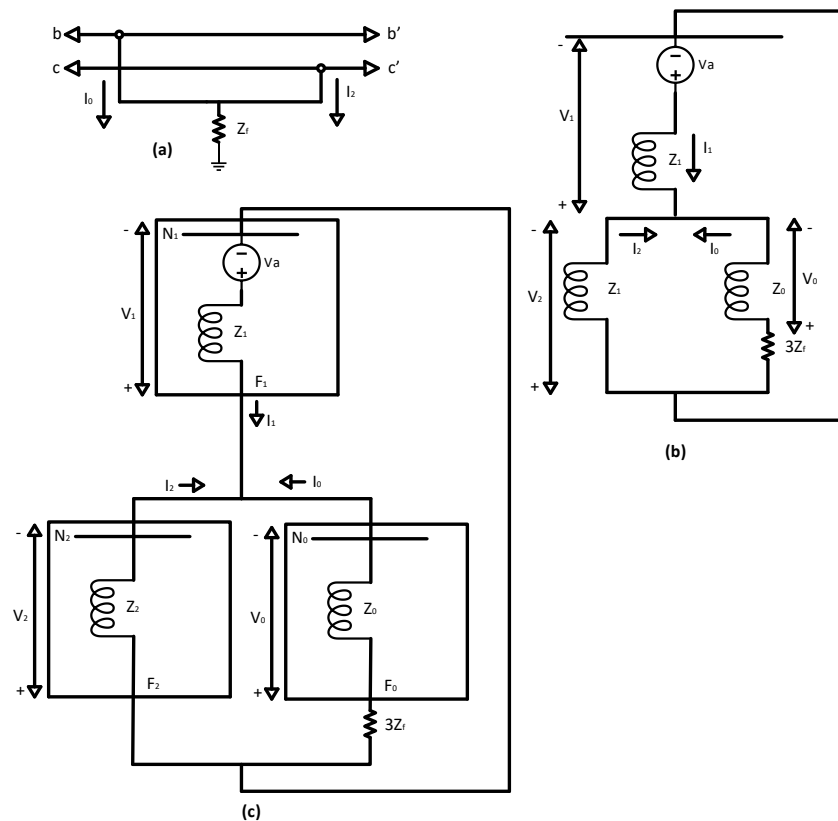
$$I_a = 0 \dots\dots\dots(51)$$

Oleh karena itu, $I_1 + I_2 + I_0 = 0$

$$V_b = V_c = (I_b + I_c)Z_f \dots\dots\dots(52)$$

Dengan demikian,

$$\begin{vmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{vmatrix} = \frac{1}{3} \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{vmatrix} \begin{vmatrix} V_a \\ V_b \\ V_b \end{vmatrix} = \frac{1}{3} \begin{vmatrix} V_a + 2V_b \\ V_a + (a + a^2)V_b \\ V_a + (a + a^2)V_b \end{vmatrix} \dots\dots\dots(53)$$



Gambar 2. 11(a) Gangguan dua fasa-ke-tanah dalam sistem tiga fasa; (b) Rangkaian ekivalen gangguan dua fasa-ke-tanah; (c) Interkoneksi jaringan berurutan.

Sumber:(El-Keib, 2002)

Yang memberikan, $V_1 = V_2$ dan

$$V_0 = \frac{1}{3}(V_a + 2V_b) \dots \dots \dots (54)$$

$$= \frac{1}{3}[(V_0 + V_1 + V_2) + 2(I_b + I_c)Z_f] \dots \dots \dots (55)$$

$$= \frac{1}{3}[(V_0 + 2V_1) + 2(3I_0)Z_f] \dots \dots \dots (56)$$

$$= V_1 + 3Z_f I_0 \dots \dots \dots (57)$$

Hal ini memberikan rangkaian ekivalen pada Gambar 2.11 (b) dan (c).

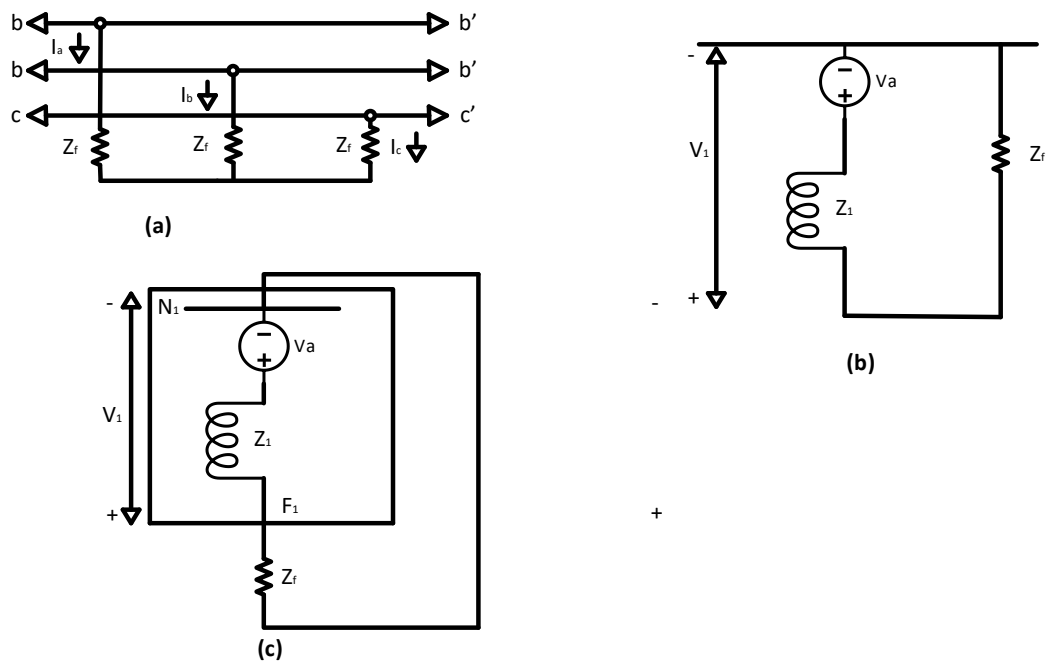
Arus gangguan adalah,

$$I_1 = \frac{V_a}{Z_1 + [Z_2 \parallel (Z_0 + 3Z_f)]} \dots \dots \dots (58)$$

$$= \frac{V_a}{Z_1 + \frac{Z_2(Z_0 + 3Z_f)}{Z_2 + Z_0 + 3Z_f}} \dots \dots \dots (59)$$

d. Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa

Ketiga fasa hubung singkat melalui impedansi gangguan yang sama Z_f , Gambar 2.12 (a). Jumlah vektor arus gangguan adalah nol, karena gangguan simetris dianggap tidak ada saluran ke tanah.(El-Keib, 2002)



Gambar 2. 12(a) Gangguan simetris tiga fasa; (b) rangkaian ekivalen; (c) jaringan urutan.

Sumber:(El-Keib, 2002)

$$I_0 = 0I_a + I_b + I_c = 0 \dots \dots \dots (60)$$

Karena gangguan tiga fasa simetris, maka:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_a \\ V_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_f & 0 & 0 \\ 0 & Z_f & 0 \\ 0 & 0 & Z_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \dots \dots \dots (61)$$

Tegangan urutan diberikan oleh,

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = [T_s]^{-1} \begin{bmatrix} Z_f & 0 & 0 \\ 0 & Z_f & 0 \\ 0 & 0 & Z_f \end{bmatrix} [T_s] \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_f & 0 & 0 \\ 0 & Z_f & 0 \\ 0 & 0 & Z_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (62)$$

Hal ini memberikan rangkaian ekivalen pada Gambar 2.12 (b) dan (c).

$$I_a = I_1 = \frac{V_a}{Z_1 + Z_f} \dots \dots \dots (63)$$

$$I_b = a^2 I_1 \dots \dots \dots (64)$$

$$I_c = a I_1 \dots \dots \dots (65)$$

2.3 Rele Diferensial

Relai diferensial adalah salah satu relai pengaman utama sistem tenaga listrik yang bekerja seketika tanpa koordinasi relai disekitarnya sehingga waktu kerja dapat dibuat secepat mungkin.

Daerah pengamanannya dibatasi oleh pasangan trafo arus dimana relai diferensial dipasang sehingga relai diferensial tidak dapat dijadikan sebagai pengaman cadangan untuk daerah berikutnya. Proteksi relai diferensial bekerja dengan prinsip keseimbangan arus (current balance).

Prinsip ini berdasarkan hukum *kirchhoff* yaitu membandingkan jumlah arus masuk ke primer (I_p) sama dengan jumlah arus yang keluar dari sekunder (I_s). (Ek Bien & Helna, 2007)

$$I_{diferensial} = I_d = |\vec{I_p}| + |\vec{I_s}|$$

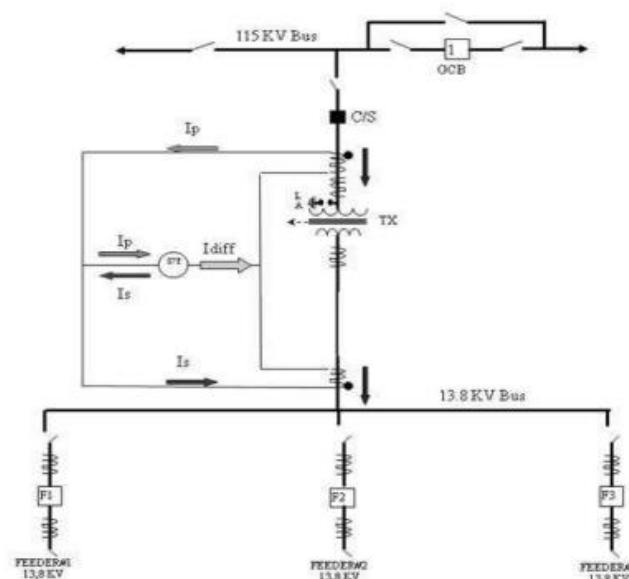
Dimana:

$$I_d = \text{Arus Diferensial (A)}$$

$$I_p = \text{Arus Sisi Masuk (A)}$$

$$I_s = \text{Arus Sisi Sekunder (A)}$$

Gambar 2. menunjukkan relai diferensial dalam keadaan arus normal, dimana I_p dan I_s sama besar dan berlawanan arah.



Gambar 2. 13 Relé Diferensial pada Saat Kondisi Normal

Sumber:(Ek Bien & Helna, 2007)

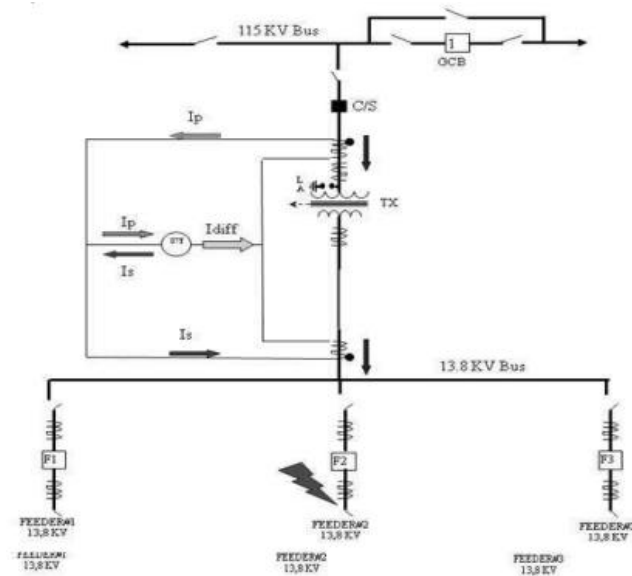
$$I_d = I_p + I_s = 0 A$$

$$I_{diff} = I_p + I_s = 0 A$$

Maka tidak ada tegangan yang melintasi coil relay dan tidak ada arus yang mengalir pada relai tersebut, sehingga relai diferensial tidak bekerja. (Ek Bien & Helna, 2007)

2.3.1 Gangguan Diluar Daerah yang Dilindungi

Pada gangguan diluar (eksternal) daerah proteksi relai diferensial (diluar kedua trafo arus), relai diferensial tidak akan bekerja, karena I_p dan I_s sama besar dan berlawanan arah ($I_d = I_p + I_s = 0 A, I_{diff} = I_p + I_s = 0 A$), seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.14 berikut.(Ek Bien & Helna, 2007)



Gambar 2. 14 Relé Diferensial pada Saat Terjadi Gangguan Eksternal

Sumber:(Ek Bien & Helna, 2007)

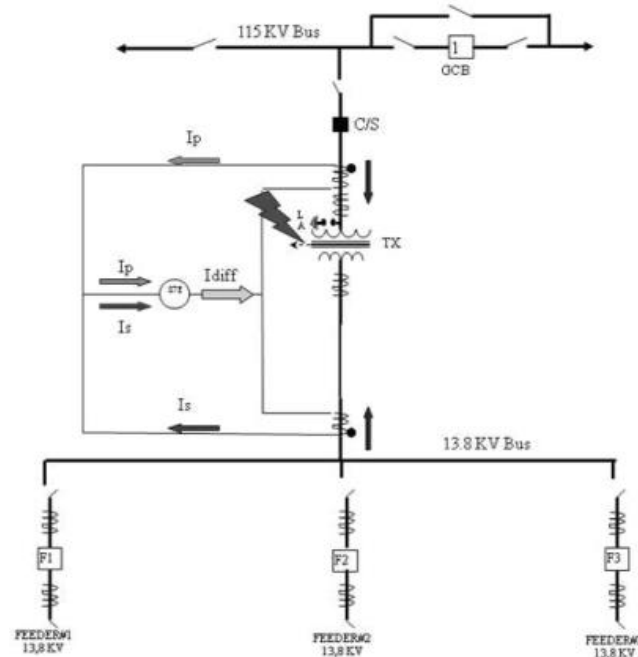
2.3.2 Gangguan Didalam Daerah yang Dilindungi

Untuk gangguan didalam (internal) daerah proteksi relai diferensial (diantara kedua trafo arus), I_p dan I_s searah.(Ek Bien & Helna, 2007)

$$I_d = I_p + I_s > 0 A$$

$$I_{diff} = I_p + I_s > 0 A$$

Karena arus akan menuju titik gangguan, sehingga relai diferensial akan bekerja, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.15.



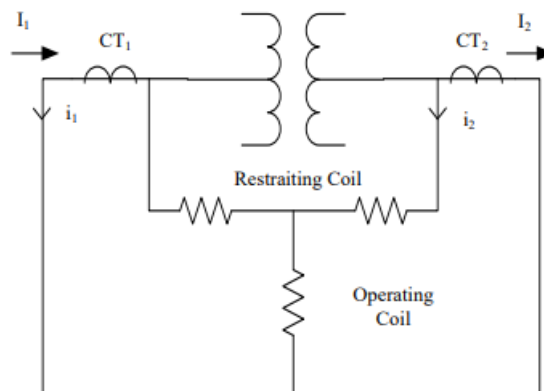
Gambar 2. 15 Relé Diferensial pada Saat Terjadi Gangguan Eksternal

Sumber:(Ek Bien & Helna, 2007)

Pada saat ada arus yang mengalir lewat relai, maka relai akan mengirim sinyal pada lock out relay. Sinyal ini akan di teruskan ke C/S dan memerintahkannya untuk lock out sehingga aliran energi listrik terputus, maka transformator tenaga yang diamankan bebas dari pengaruh gangguan yang ada.(Ek Bien & Helna, 2007)

2.3.3 Karakteristik Relé Diferensial

Karakteristik diferensial dibuat sejalan dengan *unbalances current* (I_{μ}), untuk menghindari terjadinya kesalahan kerja. Kesalahan kerja disebabkan karena CT ratio mismatch, adanya pergeseran fasa akibat belitan transformator tenaga terhubung (Y) – (Δ). (Ek Bien & Helna, 2007)



Gambar 2. 16 Prinsip Pengoprasian Relé Diferensial

Sumber:(Ek Bien & Helna, 2007)

Perubahan tap tegangan (perubahan posisi tap changer) pada transformator tenaga oleh On Load Tap Changer (OLTC) yang menyebabkan CT mismatch juga ikut berubah.

Kesalahan akurasi CT, Perbedaan kesalahan CT di daerah jenuh (Saturasi CT), dan *Inrush current* pada saat transformator *energize* menimbulkan *unbalances current* (I_μ) yang bersifat transient.

Untuk mengatasi masalah unbalance current (I_μ) pada relai diferensial caranya dengan menambahkan kumparan yang menahan bekerjanya relai di daerah I_μ . Kumparan ini di sebut *Restraining Coil*, sedangkan kumparan yang mengerjakan relai tersebut di sebut *Operating Coil*.

Arus diferensial didapat dari menjumlahkan komponen arus sekunder perfasa di belitan 1 ($|\vec{I}_1|$) dan belitan 2 ($|\vec{I}_2|$) secara vektor perfasa.

$$I_{restrain} = I_r$$

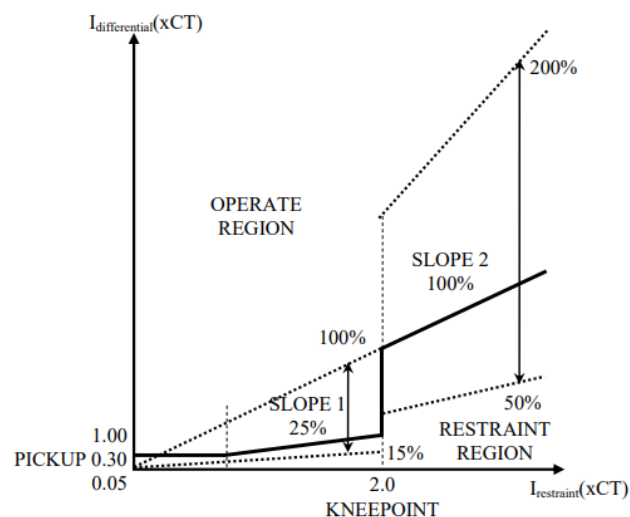
$$= \max (|\vec{I}_1|, |\vec{I}_2|)$$

Slope didapat dengan membagi antara komponen arus diferensial dengan arus penahan. Slope 1 akan menentukan arus diferensial dan arus penahan pada saat

kondisi normal dan memastikan sensitifitas relai pada saat gangguan internal dengan arus gangguan yang kecil. Sedangkan Slope 2 berguna supaya relai tidak kerja oleh gangguan eksternal yang berarus sangat besar sehingga salah satu CT mengalami saturasi (diset dengan slope lebih dari 50%).

$$\%Slope = \frac{I_d}{I_r} \times 100\%$$

Pada Gambar 2.17 berikut merupakan karakteristik relai diferensial. Daerah di atas kurva adalah daerah kerja relai diferensial, sedangkan pada daerah di bawah kurva, relai tidak akan bekerja.



Gambar 2. 17 Karakteristik Rele Diferensial

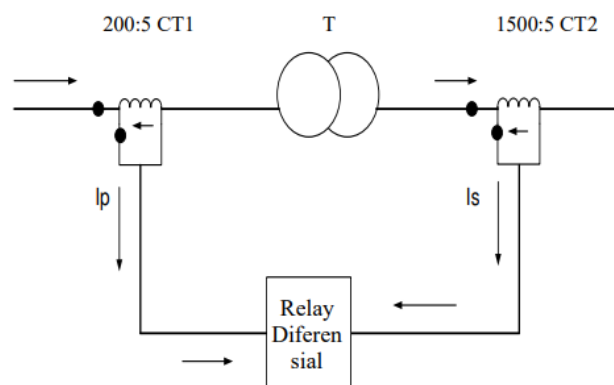
Sumber:(Ek Bien & Helna, 2007)

2.3.4 Syarat Pengaman Rele Diferensial

- a) Trafo arus yang digunakan oleh relai diferensial ini harus memiliki rasio perbandingan CT1 dan CT2 sama, contohnya 200:5 dan 1500:5, sehingga $I_p = I_s$, serta sambungan dan polaritas CT1 dan CT2 sama. Polaritas trafo arus memperlihatkan arah arus yang masuk dan keluar dari trafo arus. Jika tidak, akan terjadi kesalahan dalam melihat arus yang masuk dan keluar

melalui transformator tenaga. Hal ini, menyebabkan kesalahan dalam menentukan adanya gangguan di transformator tenaga.

- b) Adanya pergeseran fasa akibat hubungan trafo tenaga yang terhubung delta (Δ) - (Y) maka untuk mengembalikan sudut fasa arus yang tergeser tersebut, hubungan trafo arus di buat berbeda dan sudut pada CT di sisi primer dan CT di sisi sekunder trafo berbeda 180° . Hubungan CT di primer berbeda dengan CT di sekunder yaitu satu sisi terhubung Y, lainnya Δ . Yang terhubung Δ menghasilkan dan adanya arus magnetisasi dari trafo tenaga di sisi primer menyebabkan pergeseran fasa, Oleh karena itu diperlukan suatu CT tambahan (*auxiliary CT* – ACT) yang terhubung Y, karena proteksi diferensial harus membandingkan arus pada dua sisi tanpa perbedaan fasa.
- c) Karakteristik kejenuhan CT1 dan CT2 harus sama.



Gambar 2. 18 Polaritas Trafo Arus

Sumber:(Ek Bien & Helna, 2007)

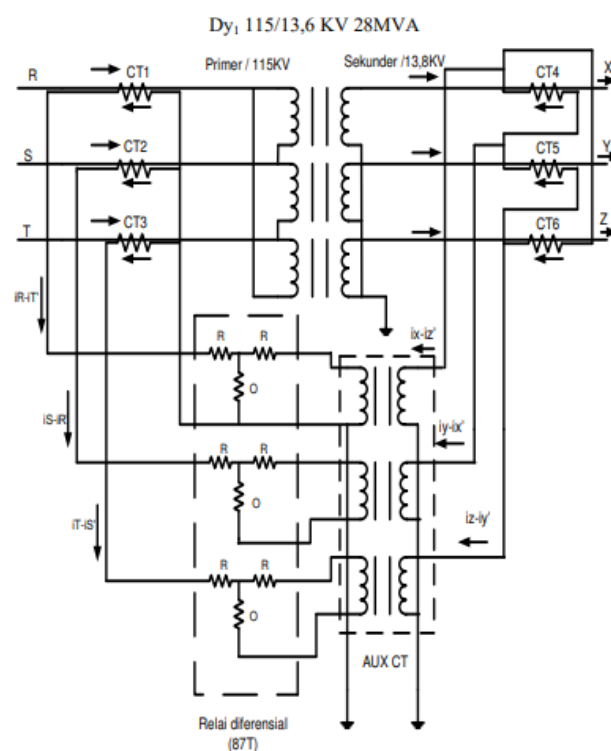
2.3.5 Skema Pemasangan Rele Diferensial

Gambar 2.19 mengilustrasikan skema pengaman diferensial trafo tiga fasa yang disederhanakan. Sisi tegangan tinggi 115 kV hubung Δ RST yang mendahului

sisi tegangan rendah 13.8 kV hubung (Y) XYZ dengan sudut 30° . (Ek Bien & Helna, 2007)

Untuk pemasangan relai diferensial perlu diperhatikan arus urutan nol, agar relai diferensial tidak salah kerja atau beroperasi pada saat gangguan luar. (Ek Bien & Helna, 2007)

Selain itu, Trafo arus pada sisi primer trafo tenaga yang terhubung dengan belitan Delta dihubungkan Y dan trafo arus pada sisi sekunder trafo tenaga yang belitannya terhubung Y dihubungkan Δ sehingga menghilangkan komponen urutan nol yang ada di sisi sekunder tranformer dan menyamakan arus yang keluar dari CT sehingga arus yang luar dari CT tetap sama fasa yakni $i_R - i_T'$, $i_S - i_R'$ dan $i_T - i_S'$. (Ek Bien & Helna, 2007)



Gambar 2. 19 Skema Rele Diferensial Trafo Tenaga

Sumber:(Ek Bien & Helna, 2007)

Keterangan:

R : Restraint coil

O : Operation coil

i_R, i_S, i_T : arus yang mengalir di sisi primer

i_x, i_y, i_z : arus yang mengalir di sisi sekunder

R, S, T : line di sisi primer

X, Y, Z : line di sisi sekunder

$CT1 = CT2 = CT3 = CT4 = CT5 = CT6$: Current Transformer

2.4 Rele *Overall* Diferensial Sebagai Proteksi Generator dan Transformator

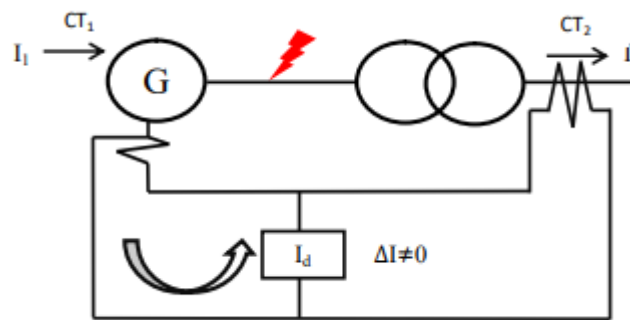
Relai diferensial digunakan untuk mengamankan generator dari kerusakan akibat adanya gangguan internal pada kumparan stator. Dua unit transformator arus (CT) masing-masing dipasang pada kedua sisi kumparan generator, Sekunder CT terhubung bintang yang ujung-ujungnya dihubungkan melalui kawat-kawat pilot. Pada kondisi normal dan tidak ada gangguan internal, besarnya arus kedua sisi kumparan sama, sehingga arus yang mengalir pada sisi-sisi sekunder CT juga sama. Hal ini menyebabkan tidak ada arus yang mengalir pada relai. Pada saat terjadi gangguan pada kumparan generator, mungkin fase dengan fase atau fase dengan ground, maka arus yang mengalir pada kedua sisi kumparan akan berbeda, sehingga ada arus yang mengalir pada relai. Relai bekerja menarik kontak sehingga kumparan tripping mendapat tenaga dari catudaya searah yang selanjutnya akan menarik kontak pemutus tenaga untuk memutuskan hubungan generator dengan system. (Hardi et al., 2020)

2.4.1 Prinsip Kerja Rele *Overall* Diferensial pada Generator dan Transformator

Rele diferensial akan melindungi generator dan Transformator dari gangguan akibat hubung singkat (short circuit) antar fasa-fase atau fase ke tanah. Prinsip kerja Rele diferensial adalah dengan cara membandingkan arus pada sisi primer dan sisi sekunder, Dalam kondisi normal jumlah arus yang mengalir melalui peralatan listrik yang diproteksi bersirkulasi melalui loop pada kedua sisi di daerah kerja. Jika terjadi gangguan didalam daerah kerja Rele diferensial, maka arus dari kedua sisi akan saling menjumlah dan Rele akan memberi perintah kepada PMT/CB untuk memutuskan arus.

Cara kerja rele *overall* diferensial :(Hardi et al., 2020)

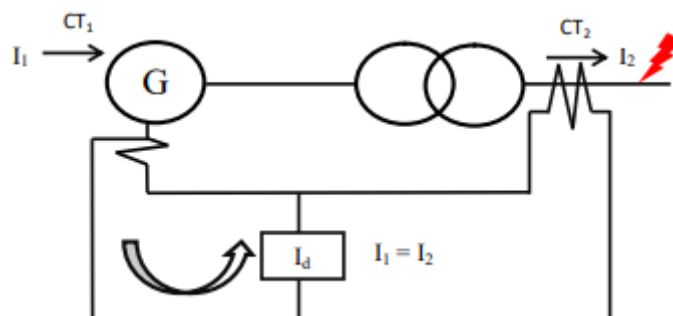
- a. Jika terjadi gangguan dalam daerah pengamanannya: Jika rele *overall* diferensial dipasang sebagai proteksi suatu peralatan dan terjadi gangguan di daerah pengamanannya maka rele diferensial harus bekerja, pada saat CT_1 mengalir arus I_1 maka pada CT_2 tidak ada arus yang mengalir ($I_2 = 0$). Disebabkan karena arus gangguan mengalir pada titik gangguan sehingga pada CT_2 tidak ada arus yang mengalir, maka di sisi sekunder CT_2 tidak ada arus yang mengalir ($I_2 = 0$) yang mengakibatkan $I_1 \neq I_2$ ($\Delta I \neq 0$) sehingga rele diferensial bekerja.



Gambar 2. 20 Kondisi Gangguan dalam Relé *Overall* Diferensial

Sumber :(Hardi et al., 2020)

- b. Jika terjadi gangguan luar daerah pengamanannya: Apabila terjadi gangguan luar daerah pengamanannya maka rele diferensial tidak bekerja, pada saat sisi primer kedua CT dialiri arus I_1 dan I_2 , dengan adanya rasio CT_1 dan CT_2 yang sedemikian, maka besar arus yang mengalir pada sekunder CT_1 dan CT_2 yang menuju rele besarnya sama ($I_1 = I_2$) atau dengan kata lain tidak ada selisih arus yang mengalir pada rele sehingga rele tidak bekerja.



Gambar 2. 21 Kondisi Gangguan luar Relé *Overall* Diferensial

Sumber :(Hardi et al., 2020)

2.4.2 Fungsi Relé *Overall* Diferensial pada Generator dan Transformator

Relai diferensial pada Generator dan Transformator Berfungsi untuk mengamankan generator Dan Transformator dari kerusakan akibat adanya

gangguan internal pada kumparan stator. Dua unit transformator arus (CT) masing-masing dipasang pada kedua sisi kumparan generator, Sekunder CT terhubung bintang yang ujung-ujungnya dihubungkan melalui kawat-kawat pilot. Pada kondisi normal dan tidak ada gangguan internal, besarnya arus kedua sisi kumparan sama, sehingga arus yang mengalir pada sisi-sisi sekunder CT juga sama. Hal ini menyebabkan tidak ada arus yang mengalir pada relai. Pada saat terjadi gangguan pada kumparan generator, mungkin fase dengan fase atau fase dengan ground, maka arus yang mengalir pada kedua sisi kumparan akan berbeda, sehingga ada arus yang mengalir pada relai. Relai bekerja menarik kontak sehingga kumparan tripping mendapat tenaga dari catu daya searah yang selanjutnya akan menarik kontak pemutus tenaga untuk memutuskan hubungan generator dengan sistem.(Hardi et al., 2020)

2.4.3 Prinsip Perhitungan *Setiing Rele Overall Diferensial* pada Generator dan Transformator

Berikut merupakan prinsip dasar perhitungan *setting Rele overall* diferensial pada transformator.(Hardi et al., 2020)

a. Arus Rating

Arus rating digunakan sebagai acuan dalam menentukan rasio CT.

Perhitungan arus rating dapat dilakukan dengan rumus berikut:

$$I_{rating} = I_{nominal} \dots \dots \dots (66)$$

Dimana:

$$I_{nominal} = \frac{S}{\sqrt{3} \times V} \dots \dots \dots (67)$$

Keterangan:

I_n = Arus nominal (A)

S = Daya tersalur (MVA)

V = Tegangan pada sisi primer dan sekunder

Arus nominal adalah arus yang mengalir pada setiap jaringan, baik di sisi tegangan tinggi maupun tegangan rendah.

b. Error Mismatch

Error mismatch adalah kesalahan dalam mengukur perbedaan arus dan tegangan antara sisi primer dan sekunder transformator, termasuk pergeseran fasa yang terjadi pada trafo. Besarnya arus mismatch dapat dihitung dengan membandingkan rasio CT ideal dengan rasio CT yang tersedia di pasaran, dengan ketentuan bahwa kesalahan tidak boleh melebihi 5% dari rasio CT yang dipilih. Perhitungan mismatch dilakukan menggunakan rumus berikut:

$$Error\ Mismatch = \frac{CT_{ideal}}{CT_{terpasang}} \dots\dots\dots (68)$$

Dimana :

$$\frac{CT_1}{CT_2} = \frac{V_1}{V_2} \dots\dots\dots (69)$$

Keterangan :

CT_{ideal} = Trafo arus ideal

V_1 = Tegangan sisi tinggi

V_2 = Tegangan sisi rendah

c. Koreksi Pembacaan CT HV-LV

Koreksi pembacaan CT HV-LV adalah suatu konstanta yang perlu ditambahkan untuk menentukan arus sekunder CT pada sisi tegangan tinggi dan tegangan rendah transformator. Rumus yang digunakan untuk menghitung koreksi pembacaan CT HV-LV adalah sebagai berikut:

$$CT_{HV} = \frac{I_{rating\ LV\ GSUT}}{CT_{sekunder\ rasio}} \times CT_{primer\ rasio} \dots\dots\dots(70)$$

$$CT_{LV} = \frac{I_{rating\ HV\ GSUT}}{CT_{sekunder\ rasio}} \times CT_{primer\ rasio} \dots\dots\dots(71)$$

$$Koreksi\ pembacaan\ CT\ HV = \frac{CT_{LV}}{CT_{HV}} \dots\dots\dots(72)$$

$$Koreksi\ pembacaan\ CT\ LV = \frac{CT_{HV}}{CT_{LV}} \dots\dots\dots(73)$$

d. Arus Sekunder CT

Arus sekunder CT adalah arus yang dihasilkan oleh pembacaan CT.

Perhitungan arus sekunder CT dapat dilakukan menggunakan rumus berikut:

$$I_{sekunder} = \frac{1}{rasio\ CT} \times I_n \times Koreksi\ pembacaan\ CT \dots\dots\dots(74)$$

e. Arus Diferensial

Arus diferensial adalah selisih antara arus sekunder CT pada ketiga sisi tegangan. Perhitungan arus diferensial dapat dilakukan menggunakan rumus berikut:

$$I_{dif} = I_1 - (I_2 + I_3) \dots\dots\dots(75)$$

Keterangan :

I_{dif} = Arus Diferensial

I_1 = Arus Sekunder CT_1

I_2 = Arus Sekunder CT_2

I_3 = Arus Sekunder CT_3

f. Arus Restrained (penahan)

Arus restrained dihitung dengan menjumlahkan arus sekunder dari CT1, CT2, dan CT3, lalu membaginya dengan 2. Rumus yang digunakan untuk menentukan arus restrained adalah:

$$I_r = \frac{I_1 + I_2 + I_3}{3} \dots\dots\dots(76)$$

Keterangan :

I_r = Arus penahan (A)

I_1 = Arus sekunder CT_1 (A)

I_2 = Arus sekunder CT_2 (A)

I_3 = Arus sekunder CT_3 (A)

g. Percent Slope (*setting* kecuraman)

Slope diperoleh dengan membagi arus diferensial dengan arus restrain. Slope 1 berfungsi untuk menentukan hubungan antara arus diferensial dan arus restrain dalam kondisi normal serta memastikan sensitivitas rele terhadap gangguan internal dengan arus kecil. Sementara itu, slope 2 berperan dalam mencegah rele diferensial beroperasi akibat gangguan eksternal dengan arus besar, yang dapat menyebabkan salah satu CT mengalami saturasi. Rumus untuk menghitung persentase slope 1 dan slope 2 adalah sebagai berikut:

$$Slope_1 = \frac{I_d}{I_r} \times 100\% \dots\dots\dots(77)$$

$$Slope_2 = (\frac{I_d}{I_r} \times 2) \times 100\% \dots\dots\dots(78)$$

Keterangan :

$Slope_1$ = *Setting* kecuraman 1

$Slope_2$ = *Setting* kecuraman 2

I_d = Arus diferensial (A)

I_r = Arus restrain (A)

h. Arus Setting (I_{set})

Arus *setting* diperoleh dengan mengalikan slope dengan arus restrain. Arus *setting* ini nantinya akan dibandingkan dengan arus diferensial. Rumus matematis untuk menentukan $I_{setting}$ adalah:

$$I_{set} = \%slope \times I_{restrain} \dots\dots\dots(79)$$

Keterangan :

I_{set} = Arus *setting*

$\%slope$ = *Setting* kecuraman (%)

2.5 Unjuk Kerja Rele

Menentukan atau mengevaluasi kinerja rele secara spesifik menggunakan teknik statistik sangatlah sulit. Seperti yang telah dijelaskan, rele terhubung ke sistem tenaga dan dalam kondisi berenergi, tetapi tetap tidak aktif (dalam mode diam) hingga terjadi gangguan di zona operasinya. Oleh karena itu, tidak mungkin mengetahui dari pengalaman atau kondisi normal apakah rele akan merespons dan beroperasi dengan benar saat dibutuhkan.

Inilah alasan utama mengapa pemeliharaan sistem rele sangat penting. Dengan tingkat gangguan yang relatif rendah, muncul pertanyaan apakah rele akan berfungsi dengan baik ketika gangguan benar-benar terjadi. Jika terjadi kegagalan atau kondisi yang tidak diinginkan dalam sistem tenaga, bukti bahwa rele bekerja dengan benar mungkin baru dapat diperoleh pada kejadian berikutnya. Oleh sebab itu, pemeliharaan rele bertujuan untuk memastikan rele dapat beroperasi sebagaimana mestinya, bukan untuk memperbaiki kesalahan. Tidak mengherankan jika ada rele yang tetap berfungsi dengan baik bahkan setelah lebih dari 40 tahun digunakan. (Marta yudha, 2008)

Ketika terjadi gangguan pada sistem tenaga, rele utama diharapkan beroperasi dan mengisolasi gangguan. Namun, rele-rele lain yang berada di sekitar titik gangguan juga akan menerima sinyal gangguan dan mulai merespons. Rele-rele ini tidak akan memicu pembukaan PMT jika rele utama berfungsi dengan benar.

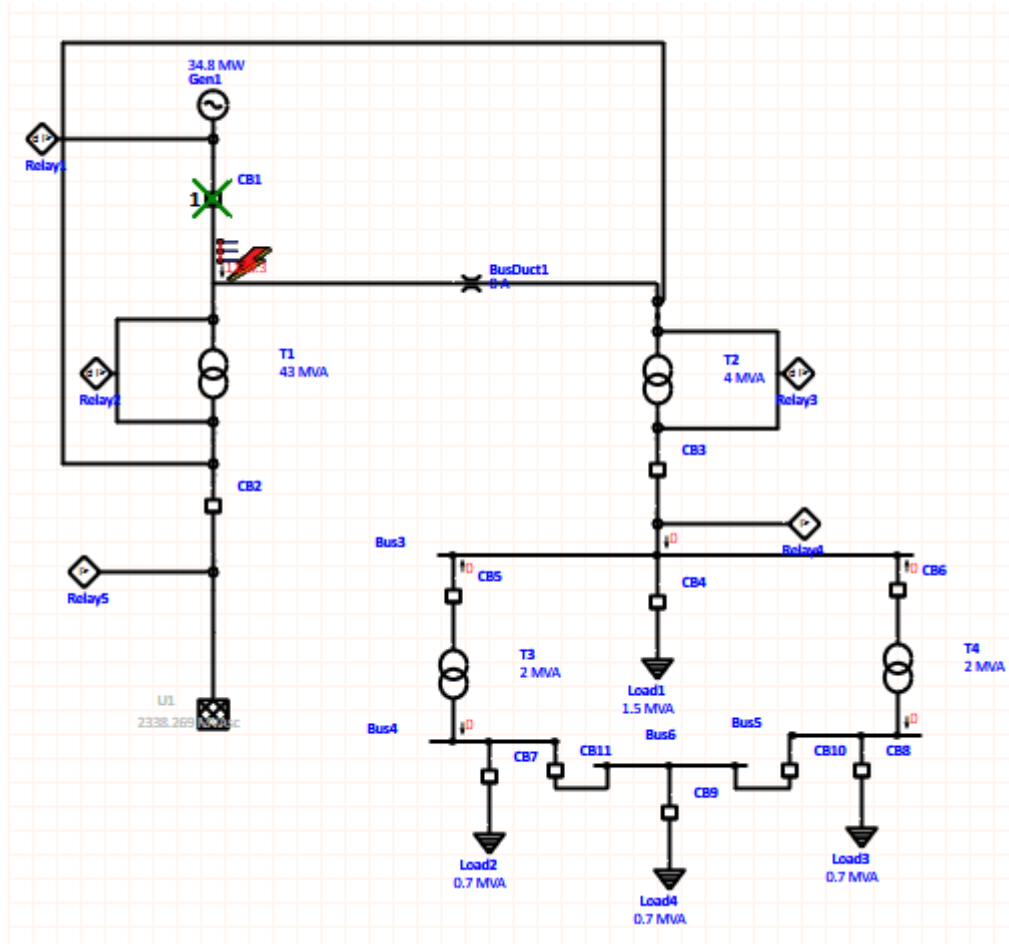
Informasi mengenai kinerja rele cadangan tidak akan terlihat jika rele tersebut tidak melakukan trip, namun perannya tetap penting. Hampir semua sistem proteksi dapat merespons gangguan, tetapi hanya satu rele yang sebenarnya mengaktifkan tripping koil pada PMT, meskipun tidak selalu ada bukti langsung mengenai hal ini. Kinerja rele dapat didokumentasikan apabila terdapat bukti yang menunjukkan operasinya. Secara umum, kinerja rele dapat diklasifikasikan ke dalam tiga kategori utama, yaitu: (Marta yudha, 2008)

2.5.1 Operasi Benar

Operasi benar diperlihatkan oleh:

- Paling sedikit terdapat 1 buah Rele primer yang beroperasi dengan benar.
- Tidak ada satupun Rele cadangan yang bekerja karena gangguan yang sama.
- Areal gangguan dapat diisolir secepat yang diharapkan.

Hampir 99% atau hampir semua Rele beroperasi dengan benar sesuai yang diinginkan, yaitu sesuai dengan rencana dan program. Operasi yang benar tapi tidak diinginkan menjelaskan beberapa kasus Rele dan peralatan pendukungnya bekerja namun operasinya tidak diharapkan. Sebagai contoh terjadinya black-out total pada suatu sistem, hal ini sebetulnya tidak diharapkan.



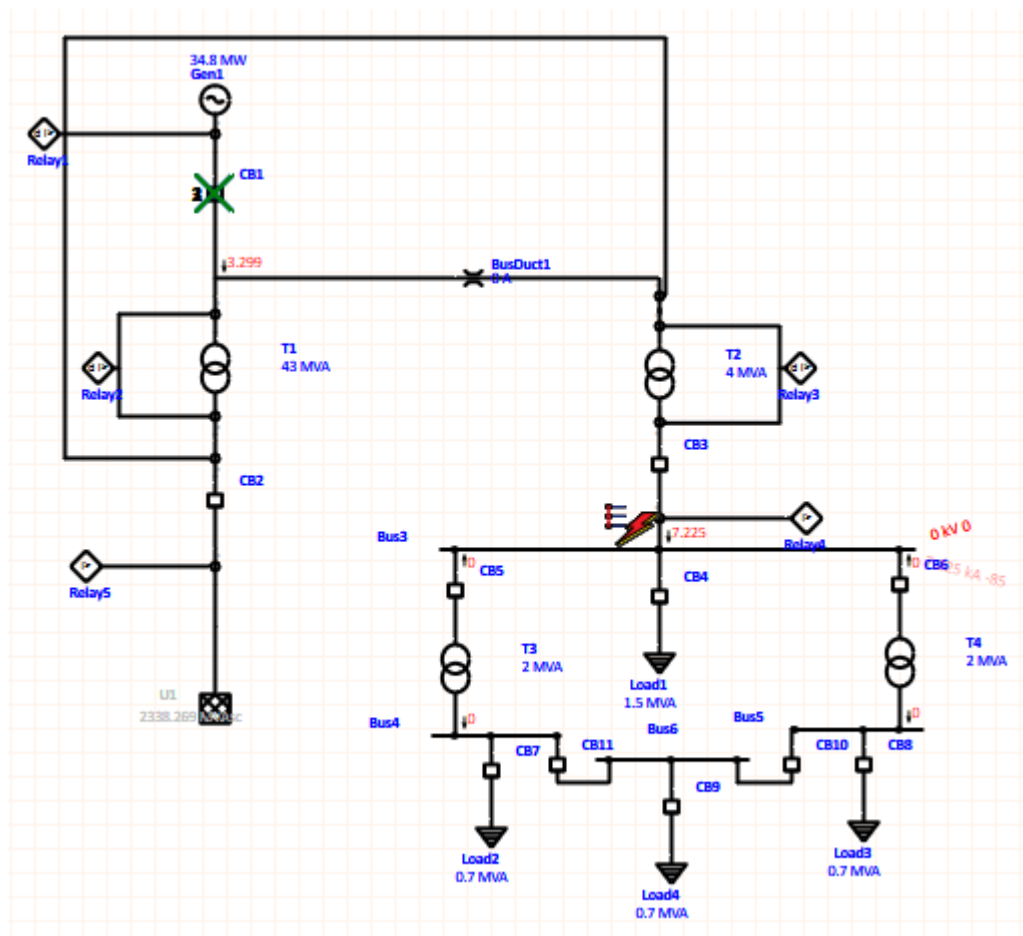
Gambar 2. 22 Keberhasilan Proteksi

2.5.2 Operasi Salah

Operasi yang salah dapat terjadi akibat kesalahan atau kegagalan fungsi atau operasi sistem proteksi yang tidak diharapkan. Kondisi ini dapat menyebabkan pengisoliran yang tidak dibutuhkan. Alasan terjadinya operasi tidak benar dapat berupa satu atau beberapa kombinasi hal-hal berikut ini:

- Aplikasi Rele yang salah.
- *Setting* yang salah
- Kesalahan personal

- Masalah peralatan atau kegagalan (Rele, breaker, CT, PT, baterai, wiring, pilot channel, auxilliary, etc).



Gambar 2. 23 Kegagalan Proteksi

2.5.3 Tanpa Kesimpulan

Kasus tanpa kesimpulan merujuk pada situasi di mana satu atau beberapa rele tampaknya beroperasi, yang ditandai dengan terbukanya PMT, namun penyebab pastinya tidak dapat dipastikan. Tidak ditemukan bukti adanya masalah atau gangguan dalam sistem, serta tidak ada kerusakan pada peralatan. Investigasi terhadap kasus semacam ini biasanya memerlukan waktu yang cukup lama dan sering kali tidak didokumentasikan atau dilaporkan. Namun, dengan adanya peralatan modern seperti osiloskop dan perekam data, kejadian tersebut dapat dibuktikan dan menjadi kunci dalam mengungkap penyebabnya.

2.6 Penelitian Terkait

No	Judul Jurnal	Nama Peneliti	Tempat dan Tahun Penelitian	Pembahasan Jurnal	Kebaruan Jurnal
1	Analisa Penggunaan Rele Diferensial Sebagai Proteksi pada Transformaator Daya Gardu Induk Paya Pasir (PT. PLN PERSERO)	Yusniati, Elvy Syahnur Nasution, Muhammad Arfianda	Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara (UMSU) (2019)	Peneitian ini membahas mengenai metode perhitungan matematis <i>setting</i> rele diferensial untuk menentukan rasio current transformer (CT), error mismatch, dan parameter-parameter rele diferensial sebagai proteksi transformator baik dalam kondisi normal maupun saat terjadi gangguan.	Pebedaan dari peneitian ini dengan penelitian terkait adalah pada penelitian terkait perangkat rele yang digunakan adalah rele diferensial dengan dua terminal CT sebagai proteksi transformator dan pada penelitian ini perangkat rele yang digunakan adalah rele <i>overall</i> diferensial dengan tiga terminal CT sebagai proteksi yang dapat memproteksi generator dan transformator.
2	Analisa Proteksi Diferensial Pada Generator Di Pltu Suralaya.	Wahyudin SN, Retno Aita Diantari, Teuku Mardhi Rahmatullah	Teknik Elektro, Sekolah Tinggi Teknik – PLN (2018)	Peneitian ini membahas mengenai metode perhitungan arus gangguan hubung singkat dan metode perhitungan <i>setting</i> rele diferensial sebagai proteksi generator pada PLTU Suralaya	Pebedaan dari peneitian ini dengan penelitian terkait adalah pada penelitian terkait perangkat rele yang digunakan adalah rele diferensial dengan dua terminal CT sebagai proteksi generator dan pada penelitian ini perangkat rele yang digunakan adalah rele <i>overall</i> diferensial dengan tiga terminal CT sebagai proteksi yang dapat memproteksi generator dan transformator.

No	Judul Jurnal	Nama Peneliti	Tempat dan Tahun Penelitian	Pembahasan Jurnal	Kebaruan Jurnal
3	Analisis Kerja Rele <i>Overall</i> Diferensial pada Generator dan Transformator PLTG Paya Pasir PT. PLN Persero	Surya Hardi, Muhammad Adam, Io Arisandy	Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara (UMSU) (2020)	Penelitian ini membahas mengenai Rele <i>Overall</i> Diferensial yang digunakan untuk melindungi Generator sekaligus Transformator dari gangguan-gangguan yang bersifat internal.	Perbedaan dari penelitian ini dengan penelitian terkait adalah pada penelitian terkait tidak dilakukan simulasi dan pada penelitian ini dilengkapi menggunakan simulasi pada software ETAP 19.0.1
4	Analisis Kerja Rele <i>Overall</i> Differential pada Generator Unit I PLTA Ketenger PT Indonesia Power UBP Mrica	Hari Prasetyo, Firman Arif Romadona	Program Studi Teknik Elektro Unsoed (2010)	Penelitian ini membahas mengenai tanggapan sistem proteksi Rele <i>Overall</i> Diferensial terhadap gangguan hubung singkat pada daerah pengamanannya dan di luar daerah pengamanannya serta pada saat terjadi gangguan petir.	Perbedaan dari penelitian ini dengan penelitian terkait adalah pada penelitian terkait dilakukan simulasi menggunakan software MATLAB dan pada penelitian ini dilakukan pembaruan simulasi menggunakan software ETAP 19.0.1