

BAB 2 LANDASAN TEORI

2.1 Sistem Proteksi Tenaga Listrik

Sistem proteksi pada tenaga listrik merupakan sistem perlindungan yang dapat dilakukan pada peralatan-peralatan listrik yang terpasang pada sistem jaringan kelistrikan, seperti: transformator, generator, busbar, dan peralatan lainnya yang terhubung dalam sistem kelistrikan. Sistem proteksi ini melindungi dari kondisi abnormal sistem yang dapat berupa: tegangan lebih, beban lebih, hubung singkat dan kondisi abnormal lainnya. Sistem proteksi akan dapat melindungi peralatan listrik apabila sistem proteksi dapat mendeteksi gangguan, yang selanjutnya suatu sistem proteksi akan mengisolasi daerah gangguan tersebut agar tidak merambat dan memberikan dampak pada daerah yang normal dengan memutus aliran listrik di lokasi terjadinya gangguan. Tujuan dari sistem proteksi ini antara lain:

- a. Mengurangi dan mencegah kerusakan peralatan akibat gangguan
- b. Mengisolasi area yang terganggu secepat dan sekecil mungkin
- c. Mencegah meluasnya daerah gangguan
- d. Melindungi manusia dari bahaya yang timbul karena gangguan listrik
- e. Memberi pelayanan kontinuitas listrik dengan tingkat keandalan dan mutu listrik yang tinggi kepada pengguna.

Ada beberapa hal yang mempengaruhi keandalan sistem proteksi, yaitu:

- a. Ketepatan dalam pemilihan jenis relay
- b. Perhitungan yang tepat untuk menentukan *setting*
- c. Penempatan dan pemasangan relay
- d. Koordinasi antara relay lainnya
- e. Pemeliharaan relay proteksi

Pada suatu sistem proteksi mempunyai beberapa syarat yang akan menjadi tolak ukur apakah sistem proteksi itu telah bekerja dengan baik atau tidak. Sistem proteksi dikatakan baik apabila memenuhi syarat-syarat, sebagai berikut:

- a. Kecepatan, peralatan proteksi harus dapat memisahkan sub sistem yang mengalami gangguan secepat mungkin. Kemampuan dalam mendeteksi gangguan yang paling kecil dan dapat beroperasi dengan benar sesuai nilai *setting* yang optimal.

- b. Sensitifitas, peralatan proteksi harus dapat bekerja dengan kepekaan yang sangat tinggi dalam kondisi operasi yang cenderung menyimpang atau dapat mendeteksi gangguan di daerah pengamannya walau hanya dengan merasakan rangsangan terkecil.
- c. Selektifitas, kemampuan peralatan proteksi harus dapat selektif menentukan area yang terjadi gangguan dan mengambil langkah yang tepat agar penanganan gangguan dapat dilakukan sesuai dengan kondisinya.
- d. Keandalan, keandalan peralatan proteksi dikatakan baik apabila mempunyai tingkatan keandalan yang dihitung berdasarkan jumlah angka 9, seperti 99% dan 99,99% semakin banyak angkanya semakin tinggi nilai keandalannya.
- e. Ekonomis, suatu peralatan proteksi yang telah memenuhi syarat-syarat di atas juga harus ekonomis sesuai dengan kualitas dari pengaman utama dan pengaman *backup*.

Pembagian tugas dalam sistem proteksi dapat dibagi menjadi:

- a. Proteksi utama, berfungsi meningkatkan kecepatan kerja, keandalan, dan fleksibilitas sistem pengaman pada sistem kelistrikan.
- b. Proteksi pengganti (*backup*), berfungsi apabila proteksi utama mengalami kegagalan dalam menangani gangguan yang muncul.
- c. Proteksi tambahan, berfungsi ketika penggunaan waktu tertentu untuk membantu proteksi utama dalam area tertentu yang diperlukan.

2.2 Gangguan Sistem Tenaga Listrik

Dalam sistem tenaga listrik, gangguan yang terjadi memiliki jenis yang beragam. Gangguan pada sistem tenaga listrik merupakan keadaan abnormal yang dapat menyebabkan kerugian pada kontinuitas sistem kelistrikan terganggu. Klasifikasi gangguan pada sistem listrik secara umum disebabkan oleh 2 faktor, yaitu:

- a. Gangguan dari dalam sistem, diantaranya:
 - Kesalahan pemasangan atau instalasi sistem kelistrikan pada gedung.
 - Umur peralatan dan kualitas isolasi peralatan yang tidak sesuai dengan standart.
 - Beban lebih, yang akan menimbulkan tegangan dan arus listrik yang tidak normal.
- b. Gangguan dari luar sistem, diantaranya:
 - Kesalahan manusia, kesalahan saat melakukan *maintenance* atau perbaikan.
 - Pengaruh lingkungan seperti tidak ada aturan pelarangan makan dan minum diarea sistem kelistrikan.

- Pengaruh cuaca seperti terjadinya gempa atau petir yang dapat mempengaruhi kerusakan peralatan pada sistem kelistrikan.

2.2.1 Gangguan Beban Lebih

Gangguan beban lebih dalam suatu sistem tenaga listrik ini pada dasarnya merupakan sebuah kondisi abnormal dari sistem di mana apabila dibiarkan secara terus menerus akan dapat membahayakan peralatan dan sistem kelistrikannya, sehingga gangguan ini harus segera dapat ditinjau dan diamankan. Gangguan beban lebih ini terjadi akibat arus yang mengalir pada peralatan listrik seperti, transformator, generator, motor, dan peralatan lainnya atau pada saluran yang telah melebihi arus nominal yang ditetapkan ($I > I_n$). Pada saat terjadinya gangguan arus yang mengalir melebihi kapasitas peralatan listrik dan pengaman yang terpasang. Gangguan ini dapat mengakibatkan pemanasan yang berlebihan dan apabila gangguan ini dibiarkan akan mempercepat penuaan dan memperpendek umur peralatan listrik.

2.2.2 Gangguan Hubung Singkat

Gangguan hubung singkat dapat mengakibatkan kenaikan arus lebih pada fasa yang terganggu dan dapat membahayakan peralatan listrik. Gangguan hubung singkat ini dapat dibagi menjadi 2 jenis yaitu hubung singkat simetri dan hubung singkat asimetri.

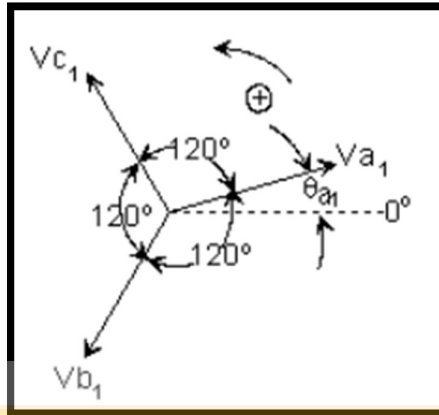
a. Hubung singkat simetri

Hubung singkat simetri merupakan gangguan hubung singkat yang terjadi pada seluruh fasa atau gangguan yang seimbang antar tiap fasanya. Pada hubung singkat simetri ini, besar arus tiap fasa adalah sama dan terpisah sebesar 120° .

b. Hubung singkat asimetri

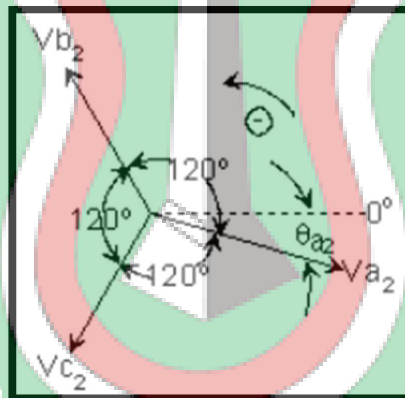
Hubung singkat asimetri merupakan gangguan hubung singkat yang mengakibatkan magnitudo pada setiap fasanya tidaklah sama, dengan magnitudo setiap fasa yang tidak sama. Contoh hubung singkat ini yaitu hubung singkat dua fasa, hubung singkat dua fasa ke tanah dan hubung singkat satu fasa ke tanah. Hubung singkat asimetri membutuhkan komponen simetri untuk mempresentasikan keadaan asimetri menjadi keadaan simetri.

- Komponen urutan positif, yang terdiri dari tiga fasor yang sama besarnya, terpisah satu dengan yang lain dalam fasa sebesar 120° , dan mempunyai urutan fasa yang sama dengan fasor aslinya (abc). Gambar (2.1) merupakan gambar fasor komponen urutan positif.



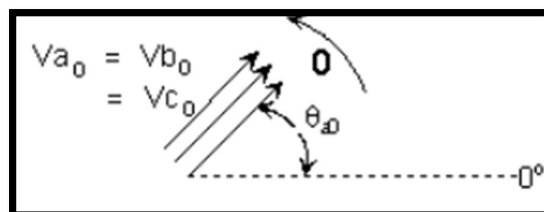
Gambar 2.1 Komponen Urutan Positif

- Komponen urutan negatif, yang terdiri dari phasor yang sama besarnya, terpisah satu dengan yang lain dalam fasa sebesar 120° , dan mempunyai urutan fasa yang berlawanan dengan phasor aslinya (acb). Gambar (2.2) merupakan gambar phasor komponen urutan negatif.



Gambar 2.2 Komponen Urutan Negatif

- Komponen urutan nol, yang terdiri dari tiga phasor yang sama besarnya dan dengan pergeseran fasa nol antara yang satu dengan yang lainnya. Gambar (2.3) merupakan gambar phasor komponen urutan nol.



Gambar 2.3 Komponen Urutan Nol

2.2.3 Perhitungan Arus Hubung Singkat

Perhitungan untuk menentukan besar arus hubung singkat dalam sistem tenaga listrik didapatkan dengan cara:

a) Hubung singkat 3 fasa

Hubung singkat 3 fasa bisa juga disebut dengan arus hubung singkat maksimum, hubung singkat ini dapat diperhitungkan dengan persamaan:

$$I_{sc3\phi} = \frac{V_{ln}}{Z_1} \dots \dots \dots (2.1)$$

Di mana, V_{ln} = Tegangan fasa ke netral

Z_1 = Impedansi urutan positif

b) Hubung singkat 2 fasa

Hubung singkat 2 fasa ini terjadi antara 2 fasa tanpa terhubung ke tanah dapat diperhitungkan dengan persamaan:

$$I_{sc2\phi} = \frac{V_{ll}}{Z_1 + Z_2} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{sc3\phi} = 0.866 I_{sc3\phi} \dots \dots \dots (2.2)$$

Di mana, V_{ll} = Tegangan fasa ke fasa

Z_1 = Impedansi urutan positif

Z_2 = Impedansi urutan negatif

c) Hubung singkat fasa ke tanah

Hubung singkat ini melibatkan impedansi urutan nol (Z_0), dan besarnya arus hubung singkat ini tergantung sistem pentanahan yang digunakan. Arus hubung singkat ini dapat diperhitungkan dengan persamaan:

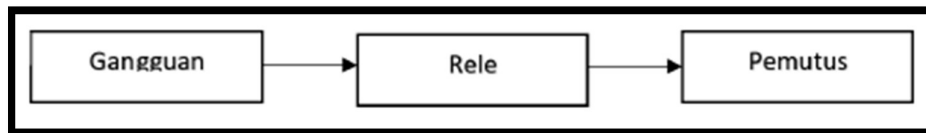
$$I_{sc\phi} = \frac{3V_{ln}}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + (3 \times Z_g)} \dots \dots \dots (2.3)$$

Jika sistem menggunakan pentanahan solid maka $Z_g = 0$, sehingga persamaan menjadi:

$$I_{sc\phi} = \frac{3V_{ln}}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \dots \dots \dots (2.4)$$

2.3 Relay Proteksi

Relay adalah salah satu peralatan pengaman yang berfungsi sebagai pendeteksi, penerima, dan pemberi perintah sebagai respon besaran yang diterima oleh relay tersebut. Relay merupakan peralatan elektrik yang didesain untuk memberi respon terhadap kondisi input sesuai dengan kondisi *setting* yang telah ditetapkan. *Setting* pada relay harus tepat agar terhindar dari kegagalan dan kesalahan kerja. Gambar (2.4) merupakan gambar diagram blok urutan kerja relay proteksi.



Gambar 2.4 Diagram Blok Urutan Kerja Relay Proteksi

Relay proteksi sebagai pendeteksi adanya abnormal pada sistem kelistrikan, khususnya untuk:

- Membuka pemutus tenaga ketika mendeteksi gangguan sehingga memisahkan antara daerah yang terganggu dengan daerah yang beroperasi normal
- Memutus bagian sistem yang yang abnormal sehingga mencegah terjadinya kegagalan atau kerusakan pada peralatan.

2.3.1 Relay Arus Lebih

Relay arus lebih merupakan relay proteksi yang bekerja berdasarkan arus lebih yang disebabkan oleh terjadinya gangguan beban lebih dan hubung singkat yang kemudian akan memberikan perintah *trip* pada *Circuit Breaker* sesuai dengan karakteristik waktu relay arus lebih. Relay arus lebih bekerja berdasarkan besarnya arus masukan, dan apabila besarnya arus masukan melebihi suatu harga tertentu yang dapat diatur (I_p) maka relay arus lebih bekerja. Di mana I_p merupakan arus kerja yang dinyatakan menurut gulungan sekunder dari trafo arus (*Current Transformer*). Bila suatu gangguan terjadi di dalam daerah perlindungan relay, besarnya arus gangguan (I_f) yang juga juga dinyatakan terhadap gulungan sekunder CT. Relay arus lebih dapat bekerja apabila memenuhi keadaan:

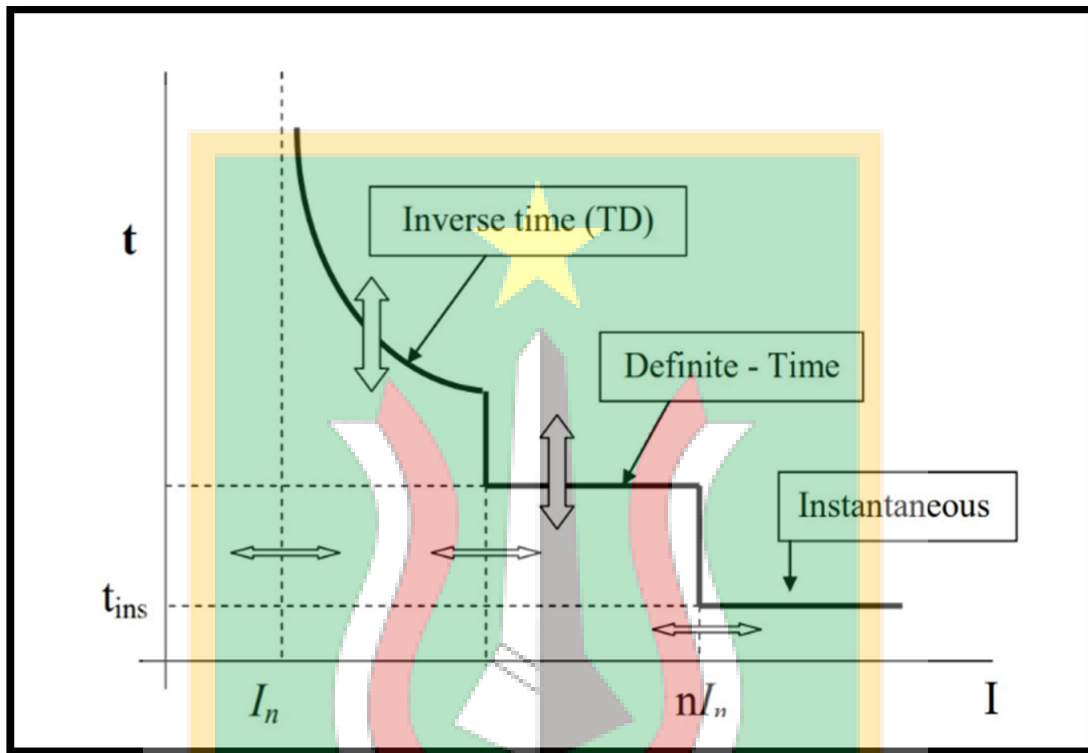
$I_f > I_p$ relay bekerja (*trip*)

$I_f < I_p$ relay tidak bekerja

2.3.2 Relay Arus Lebih Waktu *Inverse*

Relay arus lebih waktu *inverse* ini memiliki sifat kerja di mana waktu operasi yang berbanding terbalik dengan besarnya arus gangguan. Dapat diartikan bahwa, semakin besar arus gangguan maka relay akan beroperasi dalam waktu yang sangat cepat dan juga sebaliknya jika arus gangguan kecil maka waktu operasi relay akan lebih lama. Kurva karakteristik kerja relay arus lebih waktu *inverse* digambarkan dalam kurva arus-waktu atau *time-current characteristic* (TCC). Standar karakteristik *inverse* ini dijelaskan dalam IEC 60255-3 dan *British Standard* 142, pada standar ini dijelaskan beberapa jenis perlindungan waktu *inverse* yang dibedakan oleh gradien kurva yaitu *standar inverse*, *very inverse*, dan *extremely inverse*. Karakteristik kurva *inverse* ini juga disebut dengan istilah *inverse definite*

minimum time (IDMT), karena dengan seiringnya arus yang bertambah besar maka waktu operasi relay turun semakin cepat seolah mendekati waktu *definite minimumnya*. Relay dengan karakteristik kurva *inverse definite minimum time* (IDMT) memiliki tipe-tipe kurva penundaan waktu opsainya, yaitu kurva *instantaneous*, *definite time*, dan *inverse time*. Kurva tersebut dapat dilihat pada Gambar (2.5) di bawah ini:



Gambar 2.5 Tipe Kurva Penundaan Waktu Relay IDMT

(Sumber: <https://testguy.net/content/370-Inverse-Time-Overcurrent-Relays-and-Curves-Explained>)

Pada relay ini terdiri dari dua parameter bagian penyettingan yaitu pada *setting arus pickup* dan *seting time dial*. Adapun untuk menentukan nilai tap yang digunakan menggunakan persamaan:

$$\text{Tap} = \frac{I_{\text{set}}}{CT_{\text{primary}}} \dots \dots \dots (2.5)$$

Berdasarkan *British Standard 142* batas penyetelan I_{set} adalah:

$$1,05 \times FLA < I_{\text{set}} < 1,4 \times FLA \dots \dots \dots (2.6)$$

Sedangkan untuk *setting time dial* digunakan penentuan waktu kerja relay. Berikut persamaan karakteristik waktu operasi relay *inverse* sebagai berikut:

$$t = \left[\frac{k}{\left(\frac{I}{I_{set}} \right)^\alpha - 1} \right] \times \frac{TD}{\beta} \dots\dots\dots (2.7)$$

Di mana,

t = Waktu operasi

I = Arus ubung singkat maksimum (Ampere)

I_{set} = Arus *setting* aktual relay

TD = *Time Dial*

α, β, k = koefisien *inverse*

Nilai dari α, β , dan k merupakan konstanta masing-masing karakteristik relay *inverse* pada Tabel (2.1) yaitu:

Tabel 2.1 Koefisien *Inverse Time Dial*

No	Tipe Kurva	Koefisien		
		k	α	β
1	<i>Standart Inverse</i>	0,14	0,02	2,97
2	<i>Very Inverse</i>	13,5	1	1,5
3	<i>Extremely Inverse</i>	80	2	0,808
4	<i>Ultra Inverse</i>	315,2	2,5	1

2.3.3 Relay Arus Lebih Waktu Instan

Relay arus lebih waktu instan bekerja tanpa penundaan waktu, akan tetapi bekerja dengan waktu tercepat sebesar 0,1 detik dan pada biasanya dengan waktu tercepat 0.08 detik. relay jenis ini memiliki sifat kerja yang didasarkan besarnya gangguan hubung singkat yang dipilih. Berdeda dibandingkan dengan relay arus lebih waktu *inverse*, relay arus lebih waktu instan akan mengalami *trip* dalam waktu yang sama walaupun besar arus hubung singkat berbeda-beda selama besar arus hubung singkat masih didalam cakupan *setting* relay dalam waktu instan. Dalam penentuan *setting pickup* instan ini digunakan arus hubung singkat minimum arus hubung singkat 2 phasa. Sehingga *setting* ditetapkan:

$$1,6 \times FLA < I_{set} < 0,8 \times I_{sc} \dots\dots\dots (2.8)$$

$$Tap = \frac{I_{set}}{CT_{primary}} \dots\dots\dots (2.9)$$

Sedangkan *setting time delay* dapat ditentukan berdasarkan IEEE 242 di mana waktu kerja relay sampai *circuit breaker* membuka adalah 0,2 – 0,4 detik.

2.3.4 Setting Relay Arus Lebih Waktu *Inverse* dan Instan

Relay ini merupakan gabungan antara relay arus lebih waktu *inverse* dengan relay arus lebih waktu instan. Relay ini memiliki dua sifat kerja, pertama relay akan bekerja pada kurva daerah instan apabila sumber gangguan terlalu dekat sehingga *Circuit Breaker* dapat *trip* lebih cepat. Kedua, relay ini akan bekerja *inverse* apabila gangguan berada jauh dari relay.

2.3.5 Koordinasi Relay Arus Lebih dan Waktu

Koordinasi relay arus lebih pada dasarnya terdiri dari relay pengaman utama dan relay pengaman *backup*, di mana kedua relay pengaman tersebut tidak boleh *tripping* secara bersamaan. Relay harus bergantian pada saat *tripping* dimulai dari relay utama, jika relay utama gagal dalam beroperasi maka ada relay *backup* yang menggantikannya. Untuk itu diperlukan adanya jeda waktu atau *time delay* (Δt) antara relay pengaman utama dan relay pengaman *backup*. Berdasarkan IEEE 242:

Waktu terbuka CB : 0,04 – 0,1 detik (2 -5 cycle)

Overtravel dari relay : 0,1 detik

Faktor keamanan : 0,12 – 0,22 detik

Untuk relay static dan relay digital berbasis *microprocessor*, *overall time* dari relay dapat diabaikan. Sehingga total waktu : 0,2 – 0,4 detik

Jadi waktu kerja relay pengaman utama dan relay *backup* memiliki interval waktu dari 0,2 sampai 0,4 detik. Interval waktu ini sangat berguna dalam koordinasi antar relay.

2.3.6 Relay Gangguan Tanah

Relay gangguan tanah (*Ground Fault Relay*) merupakan pelindung atau pengaman terhadap gangguan hubung singkat ke tanah. Pada dasarnya relay gangguan tanah mempunyai prinsip yang sama dengan relay arus lebih, namun memiliki perbedaan dalam kegunaanya. Bila relay arus lebih mendeteksi adanya hubungan singkat antar fasa, maka relay gangguan tanah mendeteksi adanya hubung singkat fasa ke tanah.

Setting relay gangguan tanah:

$$5\% - 10\% \times I_{sc LG} < I_{set} < 50\% \times I_{sc LG} \dots\dots\dots (2.10)$$

$$Tap = \frac{I_{set}}{CT_{primary}} \dots\dots\dots (2.11)$$

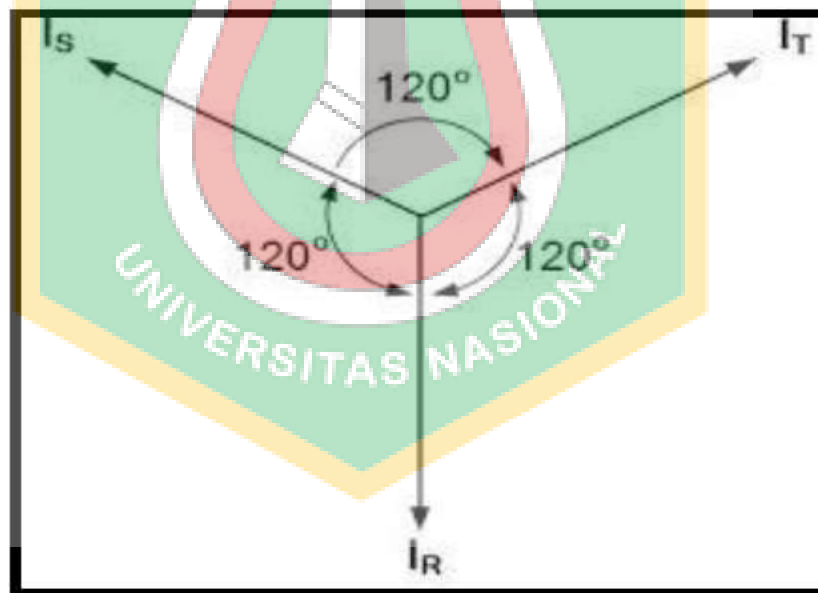
Pada gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah, pentanahan sistem mempengaruhi besarnya nilai arus gangguan. Pentanahan sistem mempengaruhi besarnya nilai arus gangguan. Pentanahan sistem merupakan sistem yang menghubungkan titik netral transformator ke tanah. Pada dasarnya ada tiga macam sistem pentanahan yaitu:

- Pentanahan *solid*, pentanahan di mana netral transformator dihubungkan ke tanah secara langsung.
- Pentanahan dengan impedansi, pentanahan netral dengan transformator dihubungkan ke tanah dengan impedansi berupa resistor ataupun reaktor. Impedansi pentanahan akan membatasi besarnya arus gangguan.
- Pentanahan mengambang, pentanahan netral dengan transformator tidak dihubungkan ke tanah. Arus gangguan tidak bisa mengalir apabila terjadi gangguan.

2.4 Ketidakseimbangan Beban

Beban kelistrikan memiliki dua kondisi keadaan, yaitu: keadaan seimbang dan keadaan tidak seimbang. Keadaan seimbang di mana:

- Ketiga vektor arus atau tegangan sama besar
- Ketiga vektor saling membentuk sudut 120° satu sama lain

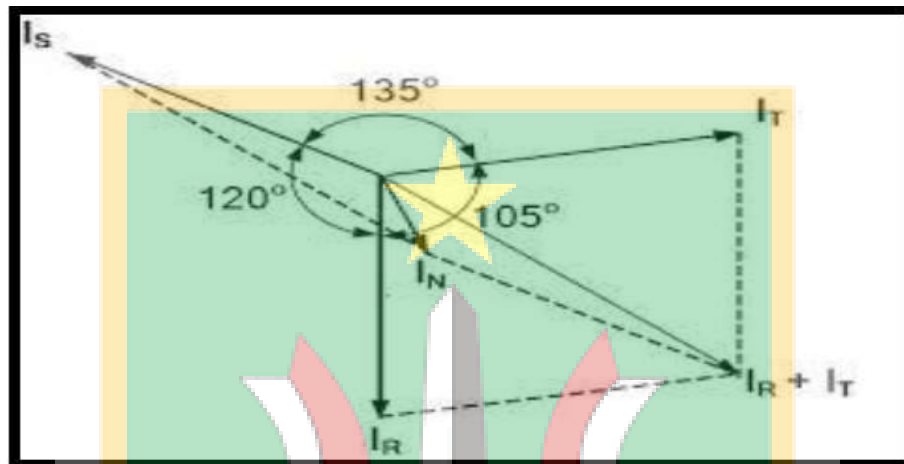


Gambar 2.6 Diagram Arus Dalam Keadaan Seimbang

Dari Gambar (2.6) menunjukkan vektor diagram arus dalam keadaan seimbang. Terlihat bahwa penjumlahan ketiga vektor arusnya (I_R , I_S , I_T) adalah sama dengan nol. Sehingga tidak muncul arus netral (I_N).

Sedangkan yang dimaksud dengan keadaan tidak seimbang adalah keadaan di mana salah satu atau kedua syarat keadaan seimbang tidak terpenuhi. Kemungkinan tidak seimbang ada 3 yaitu:

- Ketiga vektor sama besar tetapi tidak membentuk sudut 120° satu sama lain
- Ketiga vektor tidak sama besar tetapi membentuk sudut 120° satu sama lain
- Ketiga vektor tidak sama besar dan tidak membentuk sudut 120° satu sama lain



Gambar 2.7 Diagram Arus Dalam Keadaan Tidak Seimbang

Gambar (2.7) menunjukkan vektor diagram arus yang tidak seimbang, terlihat bahwa penjumlahan ketiga vektor arusnya (I_r, I_s, I_t) tidak sama dengan nol sehingga muncul sebuah besaran arus netral (I_N) yang besarnya bergantung dari seberapa faktor ketidakseimbangannya.

2.7 Rugi Rugi Daya

Rugi rugi daya terjadi jika suatu arus mengalir pada suatu penghantar, maka pada penghantar tersebut akan terjadi rugi-rugi daya menjadi panas karena pada penghantar tersebut terdapat hambatan atau resistansi. Rugi rugi dapat dipengaruhi beberapa faktor yang antara lain faktor konfigurasi dari sistem jaringan kelistrikan, transformator, isolator, dan lain lain. Selain rugi rugi daya, terdapat rugi rugi netral pada sistem kelistrikan yang disebabkan karena pembagian beban pada distribusi yang tidak seimbang, mengakibatkan adanya arus yang mengalir pada penghantar netral trafo. Sehingga timbul rugi rugi pada penghantar netral atau rugi rugi netral.

2.8 Tinjauan Pustaka

Penelitian yang membahas tentang koordinasi relay proteksi dan rugi-rugi daya saat ini telah banyak dilakukan sebelumnya. Beberapa penelitian maupun jurnal ilmiah yang

telah didaftarkan sebelumnya terkait dengan pengaruh hubung singkat dan ketidakseimbangan beban dapat dijadikan sebagai referensi dalam pengembangan pembahasan penelitian ini. Beberapa tinjauan pustaka tersebut adalah sebagai berikut:

- a. Penelitian oleh Hari Prasetyo, Widhiatmoko H.P dan Edwin Triwijaya (2019) dengan judul “Simulasi Koordinasi Relay Arus Lebih Pola Non Kaskade”. Penelitian ini membahas tentang koordinasi Relay pada gardu induk 150 kV Rawalo, saat ini dengan koordinasi kaskade, namun kelemahan pada pola ini adalah pengaturan waktu kerja OCR selama 1 detik. Hasil dari penelitian ini memperoleh hasil dengan pengaturan waktu kerja OCR selama 0.6 detik.
- b. Penelitian oleh Soetjipto Soewono dan Enni Noprianti (2020) dengan judul “Analisis Relay Arus Lebih dan Relay Gangguan Tanah Sistem Proteksi pada Sub-Stasiun SP-2 Tanah Miring Menggunakan Koordinasi Relay dengan ETAP”. Penelitian ini membahas tentang relay proteksi pada Sub Stasiun SP-2 Tanah Miring Merauke Papua. Penelitian ini menemukan bahwa relay dilarang beroperasi di atas 1100 A (maksimum) dan di bawah 98 (minimum) karena jika bekerja di luar rentang beban maka waktu koordinasi tidak akan memenuhi standar manual.
- c. Penelitian oleh Erwin Dermawan dan Dimas Nugroho dengan judul “ Analisa Koordinasi Over Current Relay dan Ground Fault Relay di Sistem Proteksi *Feeder* Gardu Induk 20 Kv Jababeka”. Pada penelitian ini membahas perbandingan antara setting relay proteksi hasil perhitungan dengan setting proteksi yang terpasang pada jaringan distribusi 20 kV GI Jababeka di penyulang Rambutan.
- d. Penelitian oleh Ruliyanta (2020) dengan judul “Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral dan Arus *Ground* pada Trafo 1 dan Trafo 2 pada Beban Puncak Sesaat”. Penelitian ini membahas akibat ketidakseimbangan beban pada 2 buah Trafo yang terpasang pada Mall Cijantung yang menyebabkan timbulnya rugi rugi netral.
- e. Penelitian oleh Ivaq Nursyamsi Aprilia (2021) dengan judul “ Analisis Perhitungan Rugi-Rugi Daya pada Tranformator *Step Down* di PLTD Pusklat Migas Cepu”. Penelitian ini menggunakan bantuan aplikasi ETAP dan SPLN 50. Terdapat perbedaan rugi daya antara perhitungan, namun selisihnya tidak terlalu besar di mana rugi daya berdasarkan perhitungan sebesar 2,56 Kw, ETAP sebesar 2,1 kW dan pengukuran besar sebesar 2.17 kW.
- f. Penelitian oleh Zulkhulaifah, Bakhtiar dan Hatma Rudito (2021) dengan judul “Analisis Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Trafo Distribusi 20 kV Terhadap

Rugi-Rugi Daya dan Efisiensi pada Penyulang Hertasning Baru PT PLN (Persero) ULP Panakukkang Makasar”. Penelitian ini menyimpulkan bahwa terdapat 4 gardu yang mengalami penyeimbangan beban dengan rata-rata persentasi ketidakseimbangan beban yaitu 32,75%, besar rugi-rugi daya jaringan sebesar 79,35 kW dan efisiensi pada trafo sebesar 98.03%.

- g. Penelitian oleh S Zaini, E Triansyah, W Adipradana dan Herlina (2021) dengan judul “Perhitungan Rugi-Rugi Daya Dan Jatuh Tegangan Pada Transformator Akibat Adanya Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral”. Pada penelitian ini fokus pada hubungan yang terjadi jika terjadi ketidakseimbangan pembebanan pada transformator terhadap arus netral, rugi-rugi daya dan jatuh tegangan yang terjadi pada sistem, dengan hasil perhitungan didapatkan penurunan rugi-rugi daya sebesar 6.241 atau 7,41%.

