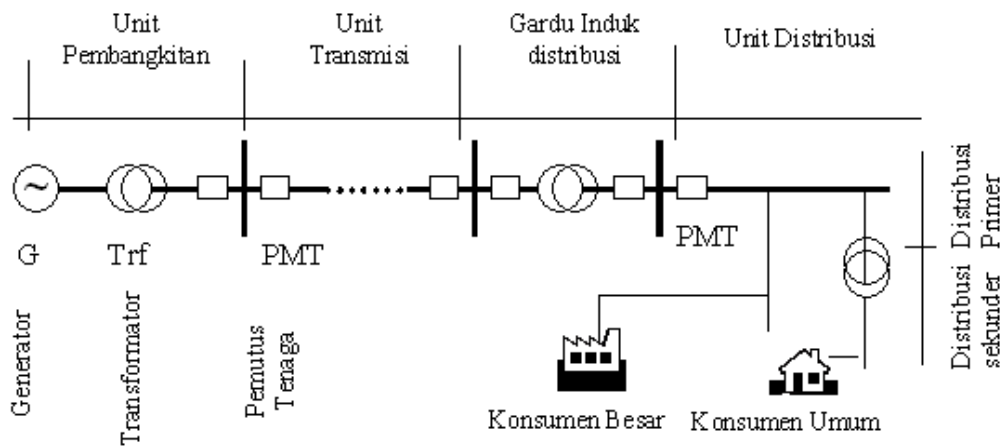


BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1. SISTEM TENAGA LISTRIK

Sistem tenaga listrik dibagi menjadi 3 komponen utama, yaitu pusat pembangkit listrik, saluran transmisi dan sistem distribusi. Suatu sistem dapat terdiri dari beberapa sub sistem yang saling terhubung atau sering disebut sistem interkoneksi. Berikut adalah contoh skema suatu sistem tenaga listrik.



Gambar 2.1. Skema sistem tenaga listrik

Didalam sistem tenaga listrik sering kali terjadi gangguan yang dapat merusak peralatan. Untuk melindungi peralatan terhadap gangguan di dalam sistem diperlukan alat pengaman atau proteksi. Sistem pengaman atau proteksi bertujuan untuk mencegah atau membatasi kerusakan pada jaringan beserta peralatannya dan keselamatan umum yang disebabkan oleh gangguan.

2.2. PENGERTIAN SALURAN TRANSMISI

Sistem transmisi adalah suatu sitem penyaluran energi listrik dari suatu tempat ketempat lain seperti dari stasiun pembangkitan ke gardu induk. Tenaga listrik di transmisikan oleh suatu bahan konduktor yang mengalirkan tipe saluran transmisi listrik. Pemakaian sistem transmisi didasarkan atas besarnya daya yang

harus disalurkan dari pusat-pusat pembangkit ke pusat beban dan jarak penyaluran yang cukup jauh antara pusat pembangkit dengan pusat beban tersebut. Sistem transmisi menyalurkan daya dengan tegangan tinggi yang digunakan untuk mengurangi adanya rugi-rugi akibat jatuh tegangan.

Berdasarkan sistem transmisi dan kapasitas tegangan yang disalurkan terdiri:

1) Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) 200kV-500kV

Pada umumnya saluran transmisi di Indonesia digunakan pada pembangkit 500kV. Dimana tujuannya adalah agar drop tegangan dari penampang kawat dapat diminimalisasi secara maksimal, sehingga diperoleh operasional yang efektif dan efisien. Namun dalam pembangunannya, konstruksi SUTET memerlukan tiang yang besar dan tinggi, tanah yang lebih luas, isolator yang banyak sehingga membutuhkan biaya yang besar.

2) Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) 30kV-150kV

Pada saluran transmisi ini memiliki tegangan operasi antara 30kV sampai 150kV. Kelebihan pada SUTT yaitu konstruksinya lebih kecil dan lebih murah. Namun losses lebih besar dan drop tegangan lebih tinggi dibandingkan dengan SUTET. Apabila kapasitas daya yang disalurkan besar, maka penghantar pada masing-masing fasa terdiri dari dua atau empat kawat.

3) Saluran Kabel Tegangan Tinggi (SKTT) 30kV-150kV

Saluran kabel bawah tanah (*underground cable*), saluran transmisi yang menyalurkan energi listrik melalui kabel yang dipendam di tanah. Katagori saluran seperti ini adalah pemasangan yang ada di dalam kota, karna berada di dalam tanah maka tidak mengganggu keindahan kota dan tidak mudah terjadi gangguan akibat kondisi cuaca atau kondisi alam. Namun kekurangannya adalah biaya investasi yang mahal serta sulitnya menentukan titik gangguan dan perbaikannya. Berikut ini adalah beberapa pertimbangan transmisi menggunakan kabel bawah tanah :

- Ditengah kota besar tidak memungkinkan pemasangan SUTT karena sangat sulit mendapatkan tanah untuk tower.
- Untuk ruang bebas juga sangat sulit dikarenakan padat bangunan dan gedung gedung yang tinggi.
- Pertimbangan keamanan dan estetika.
- Adanya permintaan dan pertumbuhan beban yang tinggi.

Untuk saluran transmisi tegangan tinggi, dimana jarak antara menara/tiang berjauhan maka diperlukan penghantar dengan kemampuan yang lebih baik dalam menyalurkan energi listrik. Oleh karena itu digunakan kawat penghantar ACSR. Berikut ini adalah jenis-jenis kawat penghantar Aluminium:

- AAC (*All Aluminium Conductor*), yaitu kawat penghantar yang seluruhnya terbuat dari aluminium.
- AAAC (*All Aluminium-Alloy Conductor*), yaitu kawat penghantar yang seluruhnya terbuat dari campuran aluminium.
- ACSR (*All Conductor, Steel-Reinforced*), yaitu kawat penghantar aluminium berinti baja.
- ACAR (*All Conductor Alloy-Reinforced*), yaitu kawat penghantar aluminium yang diperkuat dengan logam campuran.

2.3. GARDU INDUK

2.3.1. Pengertian Gardu Induk

Gardu induk merupakan gabungan dari transformator dan rangkaian *switchgear* yang tergabung dalam satu kesatuan melalui sistem kontrol yang saling mendukung untuk keperluan operasional. Gardu induk bekerja dengan mengubah level tegangan yang dibangkitkan oleh pusat pembangkit tenaga listrik menjadi level tegangan yang lebih tinggi untuk level saluran transmisi dan juga sebaliknya merubah level tegangan saluran transmisi ke level tegangan saluran distribusi.

Gardu induk juga merupakan bagian dari sistem penyaluran transmisi tenaga listrik. Gardu induk mempunyai peranan penting dalam pengoperasiannya dan tidak dapat dipisahkan dari sistem penyaluran transmisi secara keseluruhan. Melalui gardu induk, pengaturan penyaluran daya listrik dapat dilakukan.

2.3.2 Fungsi Gardu Induk

Fungsi gardu induk secara umum :

- 1) Mentransformasikan daya listrik :
 - Dari tegangan ekstra tinggi ke tegangan tinggi (500KV/15 KV)
 - Dari tegangan tinggi ke tegangan lebih rendah (150KV/70KV)

- Dari tegangan tinggi ke tegangan menengah (150KV/20KV, 70KV/20KV)
 - Dengan frekuensi tetap (di Indonesia 50/60 Hertz)
- 2) Untuk pengukuran, pengawasan operasi serta pengamanan dari sistem tenaga listrik.
 - 3) Untuk sarana telekomunikasi (pada umumnya untuk internal PLN) yang kita kenal dengan istilah SCADA
 - 4) Pengaturan pelayanan beban ke gardu-gardu induk lain melalui tegangan tinggi dan ke gardu gardu distribusi, setelah melalui proses penurunan tegangan melalui penyulang-penyulang (*feeder-feeder*) tegangan menengah yang ada di gardu induk.
 - 5) Menyalurkan tenaga listrik (KVA,MVA) sesuai dengan kebutuhan pada tegangan tertentu. Daya listrik dapat berasal dari pembangkit atau dari gardu induk lain.

2.3.3. Klasifikasi Gardu Induk

Gardu induk dapat diklasifikasikan menjadi beberapa jenis, menurut dari segi fungsi, pemasangan, dan lain-lain. Berikut ini adalah jenis-jenis dari gardu induk :

2.3.3.1 Jenis-Jenis Gardu Induk Berdasarkan Pemasangan Peralatan

Berdasarkan dari pemasangan peralatan, gardu induk dapat diklasifikasikan menjadi beberapa jenis, antara lain :

a. Gardu Induk Pasangan Luar (*Outdoor Substation*)

Gardu induk jenis pasangan luar terdiri dari peralatan tegangan tinggi pasangan luar. Pasangan luar yang dimaksud adalah diluar gedung atau bangunan. Walaupun terdapat beberapa peralatan yang berada di dalam gedung, seperti peralatan panel kontrol, meja penghubung dan baterai. Gardu induk jenis ini memerlukan tanah yang begitu luas namun biaya konstruksinya lebih murah dan pendinginnya murah.

b. Gardu Induk Pasangan Dalam (*Indoor Substation*)

Pada gardu induk pasangan dalam, peralatannya berada dalam suatu bangunan. Peralatan yang ada dalam gardu induk ini sama halnya dengan yang ada

di gardu induk pasangan luar. Jenis pasangan dalam ini dipakai untuk menjaga keselarasan dengan daerah sekitarnya dan untuk menghindari bahaya kebakaran dan gangguan suara.

c. Gardu Induk Semi-Pasangan Luar (*Semi-Outdoor Substation*)

Sebagian Peralatan tegangan tingginya terpasang di dalam gedung dan yang lainnya dipasang diluar dengan mempertimbangkan situasi dan kondisi lingkungan. Karena konstruksi yang berimbang antara pasangan luar dan pasangan dalam, inilah tipe gardu induk semi pasangan luar.

d. Gardu Induk Pasangan Bawah Tanah (*Underground Substation*)

Sesuai dengan namanya, gardu induk pasangan bawah tanah hamper semua peralatannya terpasang dalam bangunan bawah tanah. Hanya alat pendinginan biasanya berada diatas tanah, dan peralatan-peralatan yang tidak memungkinkan untuk ditempatkan di bangunan bawah tanah. Gardu induk jenis ini umumnya berada dipusat kota, karena tanah yang tidak memadai.

2.3.3.2 Jenis Gardu Induk Berdasarkan Tegangan

Gardu induk berdasarkan dari tegangan dapat diklasifikasikan menjadi beberapa jenis, antara lain :

a. Gardu Induk Transmisi

Gardu induk transmisi yaitu gardu induk yang mendapat daya dari saluran transmisi untuk kemudian menyalurkannya ke daerah beban (industri, kota, dan sebagainya). Gardu induk transmisi yang ada di PLN adalah tegangan tinggi 150 KV dan tegangan tinggi 30 KV.

b. Gardu Induk Distribusi

Gardu induk distribusi yaitu gardu induk yang menerima tenaga dari gardu induk transmisi dengan menurunkan tegangannya melalui transformator tenaga menjadi tegangan menengah (20 KV, 12 KV atau 6 KV) untuk kemudian tegangan tersebut diturunkan kembali menjadi tegangan rendah (127/220 V atau 220/380 V) sesuai dengan kebutuhan.

2.4. SISTEM PROTEKSI

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

Kerja dari sistem proteksi membutuhkan 2 hal yang saling berkaitan yaitu :

- Sistem tenaga listrik harus mempunyai *Circuit Breaker* dengan jumlah yang cukup untuk melakukan tugas pegisolasian
- Setiap CB dilengkapi alat pengendali yang dapat mendeteksi keadaan abnormal, dan hanya mengaktifkan CB yang diperlukan untuk mengisolasi kondisi abnormal. Hal ini dikenal dengan nama "*selective fault clearance*"

Untuk dapat melakukan "*selective fault clearance*", *relay* proteksi harus diberi informasi yang memungkinkan untuk membedakan antara kondisi abnormal yang berada di zona tanggung jawabnya (dimana harus terjadi *tripping*), dan gangguan eksternal atau arus beban normal (dimana tidak boleh terjadi *tripping*).

2.4.1. Tujuan Proteksi

Tujuan utama proteksi adalah untuk mencegah terjadinya gangguan atau memadamkan gangguan yang telah terjadi dan melokalisirnya, dan membatasi pengaruh-pengaruhnya, biasanya dengan mengisolir bagian-bagian yang terganggu tanpa mengganggu bagian-bagian yang lain.

Ada pula tujuan lainnya yaitu:

- 1) Memperkecil luas daerah lokalisir pada saat terjadi gangguan.
- 2) Merasakan, mengukur dan menentukan bagian sistem yang terganggu serta memutuskan dengan waktu seminimal mungkin.
- 3) Untuk mengamankan manusia dari bahaya yang ditimbulkan oleh listrik.
- 4) Memberikan pelayanan listrik yang memiliki keandalan tinggi terhadap beban yang terpasang.

2.4.2. Persyaratan Sistem Proteksi

a. Kepekaan (*Sensitivity*)

Sensitifitas adalah kepekaan rele proteksi terhadap segala macam gangguan dengan tepat yakni gangguan yang terjadi di daerah perlindungannya. Kepekaan suatu sistem proteksi ditentukan oleh nilai terkecil dari besaran penggerak saat peralatan proteksi mulai beroperasi. Nilai terkecil besaran penggerak berhubungan dengan nilai minimum arus gangguan dalam daerah yang dilindunginya.

b. Keandalan (*Reliability*)

Suatu sistem proteksi dapat dikatakan andal jika selalu berfungsi sebagaimana yang diharapkan. Sistem proteksi disebut tidak andal bila gagal bekerja pada saat dibutuhkan dan bekerja pada saat proteksi itu tidak seharusnya bekerja. Keandalan rele dikatakan cukup baik bila mempunyai harga 90-99 %. Keandalan dapat dibagi 2 macam, yaitu :

1) *Dependability*

Yaitu tingkat kepastian untuk mampu bekerja saat terjadi gangguan tinggi. Dapat mendeteksi dan melepaskan bagian yang terganggu secara pasti dan tidak gagal bekerja.

2) *Security*

Yaitu tingkat kepastian untuk tidak salah kerja tinggi.

c. Selektivitas (*Selectivity*) dan Diskriminatif

Selektif berarti suatu sistem proteksi harus dapat memilih bagian sistem yang harus diisolir apabila rele proteksi mendeteksi gangguan. Bagian yang dipisahkan dari sistem yang sehat sebisanya adalah bagian yang terganggu saja. Diskriminatif berarti suatu sistem proteksi harus mampu membedakan antara kondisi normal dan kondisi abnormal. Ataupun membedakan apakah kondisi abnormal tersebut terjadi di dalam atau di luar daerah proteksinya, dengan demikian segala tindakannya akan tepat.

d. Kecepatan (*speed*)

Sistem proteksi perlu memiliki tingkat kecepatan sebagaimana ditentukan sehingga meningkatkan mutu pelayanan, keamanan manusia, peralatan dan stabilitas operasi. Untuk memperkecil kerugian/kerusakan akibat gangguan, maka bagian yang terganggu harus dilepaskan secepat mungkin dari bagian sistem lainnya.

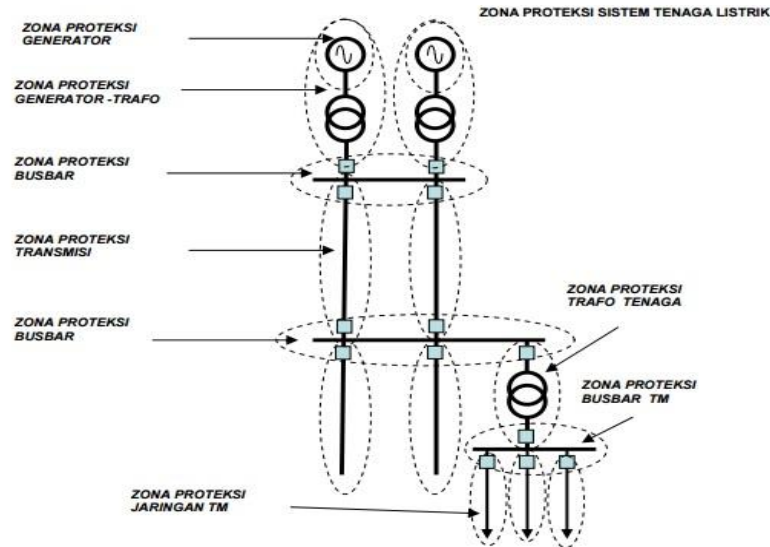
Keterlambatan melepaskan sistem yang terganggu dapat mengakibatkan gangguan kestabilan pada sistem atau dapat merusak peralatan dan komponen jaringan yang disebabkan oleh thermal stress.

e. Ekonomis

Suatu perencanaan teknik yang baik tidak terlepas tentunya dari pertimbangan nilai ekonomisnya. Suatu rele proteksi yang digunakan hendaknya memiliki nilai seekonomis mungkin dengan tidak mengesampingkan fungsi dan keandalannya. Tipe Proteksi Ada dua kategori proteksi yang dikenal yaitu proteksi utama (*main protection*) dan proteksi pembantu (*back up protection*). Proteksi utama adalah pertahanan utama dan akan membebaskan gangguan pada bagian yang akan diproteksi secepat mungkin. Mengingat keandalan 100 % tidak hanya dari perlindungan tetapi juga dari trafo arus, trafo tegangan dan pemutus rangkaian yang tidak dapat dijamin, untuk itu diperlukan perlindungan pembantu (*auxiliary protection*) pada alat proteksi tersebut. Proteksi pembantu bekerja bila rele utama gagal dan tidak hanya melindungi daerah berikutnya dengan perlambatan waktu yang lebih lama dari pada rele utamanya. Dengan adanya *main* dan *back up protection* maka dalam perencanaannya harus diperhitungkan dengan baik.

2.5. ZONA PROTEKSI SISTEM TENAGA LISTRIK

Untuk memperoleh tingkat selektifitas yang tinggi pada sebuah jaringan listrik yang mengalami gangguan maka pada sistem proteksi dibentuk daerah daerah proteksi yang dinamakan zona proteksi. Zona ini biasanya dibatasi oleh pemutus tenaga (*circuit breaker*) yang dapat memutuskan dan menghubungkan antar zona proteksi yang mengalami gangguan.



Gambar 2.2 Zona proteksi sistem tenaga listrik

2.5.1. Zona Proteksi Utama

Zona utama terdiri atas peralatan utama yang harus beroperasi untuk zona yang diproteksinya. Untuk *relay* cepat dan pemutus beban cepat, waktu mulai terjadinya gangguan sampai selesainya pembukaan pemutus beban maksimum 100ms yaitu terdiri dari waktu kerja *relay* 20-40 ms dan waktu pembukaan pemutus beban 40-60 ms. Pada pengamanan jenis tertentu, misalnya pada pengamanan *relay* arus lebih.

Waktu kerjanya justru diperlambat untuk mendapatkan selektivitas karena terjadi pengamanan yang tumpang tindih dengan sesi berikutnya. Elemen pengamanan utama terdiri atas *relay*, trafo tegangan, catu daya, kumparan trip, dan pemutus tenaga. Kegagalan kerja pada elemen elemen pengamanan utama dapat dikelompokkan sebagai berikut.

- 1) Kegagalan *relay*nya sendiri
- 2) Kegagalan catu arus atau catu tegangan ke *relay*. Hal ini disebabkan kerusakan trafo arus dan atau trafo tegangannya. Bisa juga rangkaian catu ke *relay* dari trafo tersebut terbuka atau hubung singkat.
- 3) Kegagalan sistem catu arus search untuk tripping pemutus beban. Hal ini disebabkan baterai lemah karena kurang perawatan, terbuka, atau terhubung singkatnya arus search.

- 4) Kegagalan pada pemutus tenaga. Kegagalan ini dapat disebabkan karena kumparan trip tidak menerima catu, terjadi keusakan mekanis atau kegagalan pemutusan arus karena besarnya arus hubung singkat melampui dari pemutus bebannya.

2.5.2. Zona Proteksi Cadangan

Zona proteksi cadangan ini diperlukan untuk mengantisipasi kegagalan peralatan pada zona proteksi utama. Pengaman cadangan umumnya mempunyai perlambatan waktu untuk memberikan kesempatan pengaman utama bekerja lebih dahulu. Jika pengaman utama gagal, maka pengaman cadangan bekerja. Jenis pengaman cadangan ada 2, yaitu pengaman cadangan setempat (*local backup*) dan pengaman cadangan jauh (*remote backup*).

a. Pengaman Cadangan Setempat

Pengaman cadangan setempat merupakan sistem pengaman yang bekerja jika pengaman utamanya gagal bekerja. Akan tetapi, jika pengamanannya masih gagal karena pemutus beban gagal bekerja, maka *relay* tersebut akan memberikan perintah untuk membuka semua pemutus beban yang ada kaitannya dengan pemutus beban tersebut.

Sistem pengaman cadangan setempat umumnya digunakan pada sistem tenaga listrik dengan tegangan ekstra tinggi. Dalam hal ini *relay* cadangan mempunyai kecepatan sama dengan pengaman utamanya, karena sistem ini mempunyai pengaman ganda. Disebut pengaman ganda, sebab trafo arus, baterai, maupun kumparan trip semuanya ganda. Di Indonesia untuk sistem dengan tegangan tinggi, yaitu tegangan 150KV dan 70 KV, biasanya pengaman cadangannya hanya berupa *relay* cadangan.

b. Pengaman Cadangan Jauh

Pengaman cadangan jauh merupakan pengaman yang digunakan untuk mengantisipasi adanya kegagalan kerja pengaman di daerah tertentu. Dalam hal ini suatu gangguan pada daerah tertentu akan dihilangkan atau dipisahkan oleh pengaman dari tempat lain berikutnya (cadangan jauh). Pengaman cadangan jauh yang banyak dipakai adalah pengaman dengan *relay* arus lebih dan pengaman dengan *relay*

jarak. Pengaman cadangan jauh kurang memadai untuk sistem yang besar, antara lain karena dapat gagal bekerja dan dapat terjadi tripping yang tidak diharapkan.

2.6. KOMPONEN SISTEM PROTEKSI

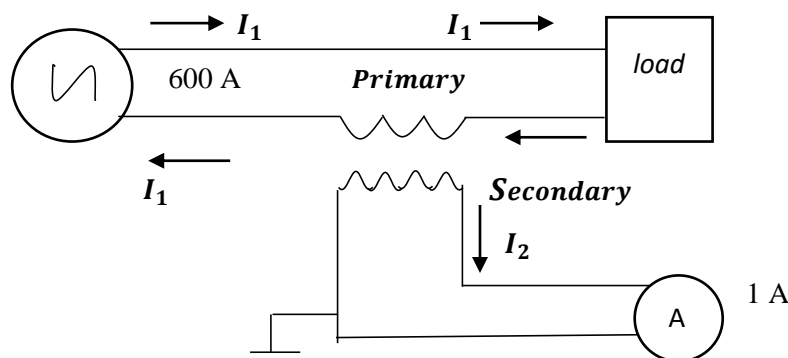
Dalam usaha untuk meningkatkan keandalan penyediaan dan penyaluran energi listrik, kebutuhan sistem proteksi yang memadai tidak dapat dihindarkan. Sistem proteksi atau pengaman tenaga listrik tersebut adalah merupakan suatu kesatuan antara PMT atau CB, transduser dan *relay*. Adanya kesalahan dari salah satu komponen tersebut dapat berakibat sistem proteksi tersebut tidak dapat berjalan dengan baik. sangat penting bagi suatu perusahaan dalam menjalankan setiap gerak usahanya agar dapat mencapai tujuannya dengan baik.

2.6.1. Trafo Instrumen

a. *Current Transformer* / Trafo Arus

Trafo arus adalah suatu perangkat listrik yang berfungsi menurunkan arus yang besar menjadi arus dengan ukuran yang lebih kecil. CT digunakan karena dalam pengukuran arus tidak mungkin dilakukan langsung pada arus beban atau arus gangguan, hal ini disebabkan karena arus sangat besar dan bertegangan sangat tinggi. Karakteristik CT ditandai oleh *Current Transformer Ratio* (CTR) yang merupakan perbandingan antara arus yang dilewatkan oleh sisi primer dengan arus yang dilewatkan oleh sisi sekunder.

$$\text{rasio} = 600 : 1$$



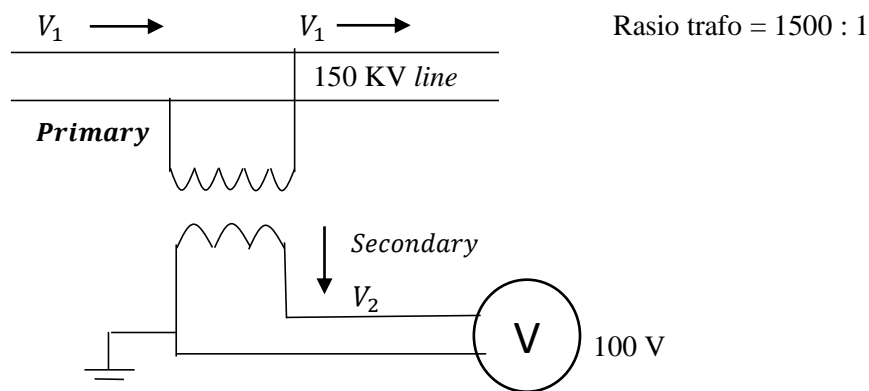
Gambar 2.3 Instalasi trafo arus

Dari gambar 2.3 dapat dijelaskan bahwa trafo arus tersebut memiliki rasio sebesar 600 : 1. Arti dari rasio tersebut adalah arus yang dilewati pada sisi primer

trafo sebesar 600 A dan arus yang dihasilkan pada sisi sekunder trafo sebesar 1 A. Arus mengalir dari sumber menuju beban dengan I_1 sebesar 600 A. Kemudian arus I_1 mengalir dari beban (*load*) menuju trafo CT melewati sisi primer trafo dengan besar arus yang sama. Namun pada bagian sisi sekunder trafo, arus dikecilkan dan menghasilkan output sebesar I_2 dengan nilai 1 A.

b. *Potential Transformer (PT) / Trafo Tegangan*

Potential Transformer adalah suatu peralatan listrik yang berfungsi menurunkan tegangan yang tinggi menjadi tegangan yang lebih rendah yang sesuai dengan pengaturan *relay*. Trafo ini juga memiliki angka perbandingan lilitan/tegangan.



Gambar 2.4 Instalasi trafo tegangan

Pada gambar 2.4 adalah salah satu contoh dari pemasangan trafo tegangan, dimana trafo tersebut memiliki rasio sebesar 1500 : 1. Arti dari rasio tersebut adalah apabila sisi primer trafo dialiri tegangan sebesar 1500 V maka, sisi sekunder trafo menghasilkan output sebesar 1 V. Trafo PT dipasang secara parallel pada pemasangannya. Dari gambar tersebut, tegangan pada V_1 sebesar 150 KV. Lalu tegangan tersebut melewati sisi primer trafo dengan tinggi tegangan yang sama (V_1). Namun pada sisi sekunder trafo, tegangan diturunkan dengan output V_2 sebesar 100 V.

2.6.2. *Circuit Breaker (CB) / Pemutus Tenaga (PMT)*

PMT berfungsi untuk memisahkan bagian sistem yang terganggu. PMT dapat dioperasikan dengan cara ditutup atau dibuka dengan menggunakan sistem proteksi. Dengan demikian sebuah pemutus tenaga dapat secara otomatis membuka

suatu rangkaian bilamana arus saluran, tegangan saluran atau frekuensi sistem melampaui batas tertentu. Berdasarkan media pemutus listrik/pemadam bunga api, terdapat 4 jenis CB:

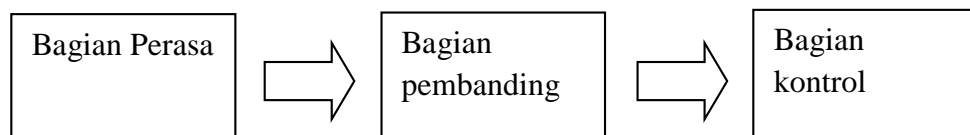
- 1) *Air Circuit Breaker* (ACB), menggunakan media berupa udara.
- 2) *Vacum Circuit Breaker* (VCB), menggunakan media berupa vakum.
- 3) *Gas Circuit Breaker* (GCB), menggunakan media berupa gas.
- 4) *Oil Circuit Breaker* (OCB), menggunakan media berupa minyak.

Berikut ini adalah syarat-syarat yang harus dipenuhi oleh suatu peralatan untuk menjadi pemutus daya:

- 1) Mampu menyalurkan arus maksimum secara kontinyu.
- 2) Mampu memutus/ menutup jaringan dalam keadaan berbeban ataupun dalam keadaan hubung singkat tanpa menimbulkan kerusakan pada pemutus daya itu sendiri.
- 3) Mampu memutus arus hubung singkat dengan kecepatan tinggi.

2.6.3. Relay

Relay proteksi adalah susunan peralatan pengaman yang dapat merasakan atau mengukur adanya gangguan atau ketidakstabilan sistem yang kemudian secara otomatis dapat memberikan respon berupa sinyal untuk menggerakkan sistem mekanisme pemutus tenaga untuk memisahkan sistem yang terganggu sehingga sistem yang lainnya dapat beroperasi secara normal. Secara garis besar bagian dari sistem proteksi terdiri dari tiga bagian utama, seperti gambar di bawah ini :



Gambar 2.5 Bagian *relay* pengaman

1) **Bagian perasa**

Pada bagian ini, perubahan dari besaran ukur yang dirasakan yang selanjutnya diteruskan ke bagian pembanding.

2) **Bagian pembanding**

Yang akan membandingkan dan menentukan apakah besaran ukur itu

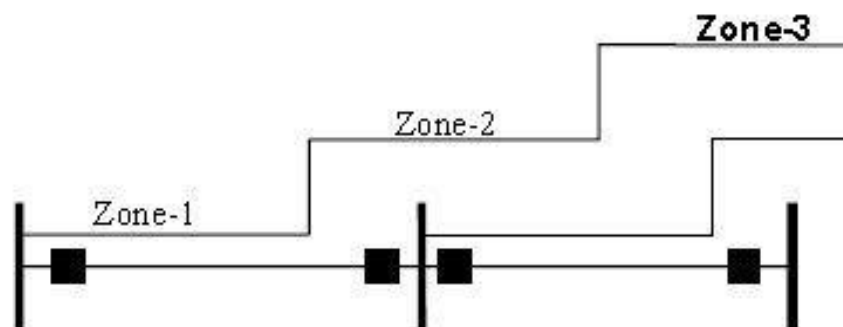
masih dalam keadaan normal atau tidak.

3) Bagian kontrol

Pada bagian ini pembukaan pemutus tenaga (PMT) atau pemberian sinyal/tanda diatur dan dilaksanakan.

2.7. RELAY JARAK

Relay jarak atau distance relay digunakan sebagai pengamanan utama (*main protection*) pada suatu sistem transmisi, baik SUTT maupun SUTET, dan sebagai cadangan atau backup untuk seksi didepan. *Relay jarak* menggunakan pengukuran tegangan dan arus untuk mendapatkan impedansi saluran yang harus diamankan. Jika impedansi yang terukur di dalam batas pengaturannya, maka *relay* akan bekerja. Disebut *relay jarak*, karena impedansi pada saluran besarnya akan sebanding dengan panjang saluran. Oleh karena itu, *relay jarak* tidak tergantung pada besarnya arus gangguan yang terjadi, tetapi tergantung jarak gangguan yang terjadi pada *relay* proteksi. *Relay jarak* bekerja dengan membagi daerah cakupan pengamanan yaitu zona 1, zona2, dan zona 3, serta dilengkapi dengan teleproteksi (TP) sebagai upaya agar proteksi bekerja selalu cepat dan selektif didalam daerah pengamanannya.



Gambar 2.6 Pengamanan saluran dengan *relay jarak*

2.7.1. Prinsip Kerja *Relay Jarak*

Relay jarak mengukur tegangan pada titik *relay* dan arus gangguan yang terlihat dari *relay*, dengan membagi besaran tegangan dan arus, maka impedansi

sampai titik terjadinya gangguan dapat di tentukan. Perhitungan impedansi dapat dihitung menggunakan rumus sebagai berikut :

$$Z = \frac{V}{I}$$

Dimana : Z = Impedansi (Ohm)

V = Tegangan (Volt)

I = Arus Gangguan (Ampere)

Relay jarak akan bekerja dengan cara membandingkan impedansi gangguan yang terukur dengan impedansi seting, dengan ketentuan :

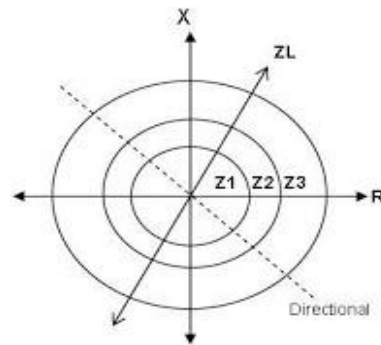
- 1) Bila harga impedansi gangguan lebih kecil dari pada impedansi seting *relay* maka *relay* akan trip.
- 2) Bila harga impedansi gangguan lebih besar dari pada impedansi seting *relay* maka *relay* akan tidak trip.

2.7.2. Karakteristik *Relay* Jarak

Karakteristik *relay* jarak merupakan penerapan langsung dari prinsip dasar *relay* jarak, karakteristik ini biasa digambarkan didalam diagram R-X.

a. Karakteristik Impedansi

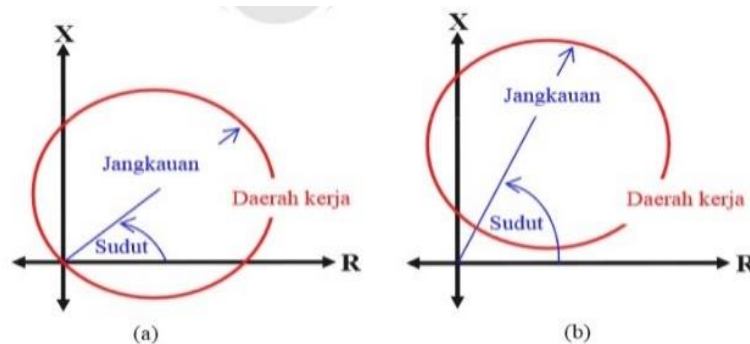
Karakteristik *relay* ini mempunyai lingkaran dengan titik pusatnya di tengah-tengah. Kelemahan *relay* ini adalah tidak berarah, karena kedua besaran yang dibandingkan yaitu arus dan tegangan dibangkitkan secara mekanis, masing-masing kopel yang dibangkitkan tidak tergantung fasanya. *Relay* akan bekerja untuk gangguan didepan dan dibelakang *relay*. Oleh karena itu, *relay* ini harus dilengkapi dengan *relay* arah untuk digunakan sebagai *relay* pengukur.



Gambar 2.7 Karakteristik *relay* impedansi

b. Karakteristik Mho atau admitansi

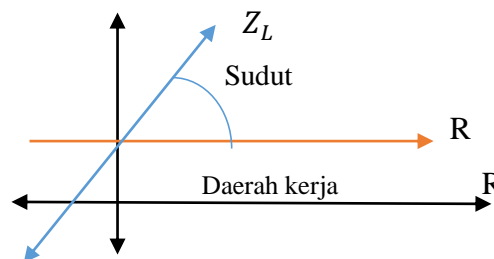
Karakteristik *relay* ini dapat digambarkan dalam diagram R-X merupakan suatu lingkaran yang melalui titik pusat yang ditunjukkan pada gambar 2.8 (a). Dari diagram tersebut, terlihat karakteristik *relay* ini sudah berarah. Sehingga pada *relay* jenis ini tidak perlu ditambahkan elemen penyearah karena *relay* hanya akan mengamankan gangguan didepannya. *Relay* jenis Mho ini dapat digeser karakteristik kerjanya dengan memasukkan faktor arus pada trafo arus pembantu dan impedansi pada kumparan tegangan sehingga karakteristiknya menjadi seperti gambar 2.8 (b).



Gambar 2.8 Karakteristik Mho

c. Karakteristik Reaktansi

Pada karakteristik *relay* jarak ini, impedansi yang dilihat *relay* tidak memperhatikan adanya tahanan busur., karena dianggap tahanan busur untuk berbagai gangguan yang hamper sama. *Relay* ini hanya untuk mengukur komponen reaktif dari impedansi jaringan. Berikut karakteristik reaktansi :

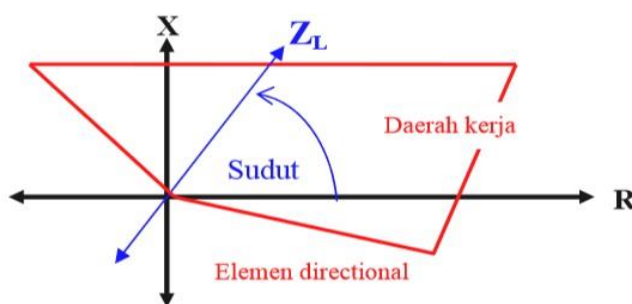


Gambar 2.9 Karakteristik Reaktansi

Relay akan bekerja jika reaktansi yang dilihat *relay* lebih kecil dari reaktansi yang diatur. Karakteristik *relay* ini kurang dipengaruhi adanya tahanan busur sewaktu terjadinya gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah sehingga baik digunakan untuk pengamanan gangguan tanah.

d. Karakteristik Quadrilateral

Karakteristik kerja quadrilateral dapat dibentuk dengan menentukan setelan *forward reach* dan *resistive reach* yang masing-masing dapat disetel independen. Gambar 2.10 menunjukkan 4 pengaturan batasan atau jangkauan karakteristik kerja quadrilateral. Empat pengaturan batas *relay* yaitu batas paling atas menunjukkan pengaturan jangkauan reaktansi, kemudian batas kiri dan kanan yaitu pengaturan jangkauan resistansi positif dan resistansi negative serta batas bawah menunjukkan elemen *directional*.



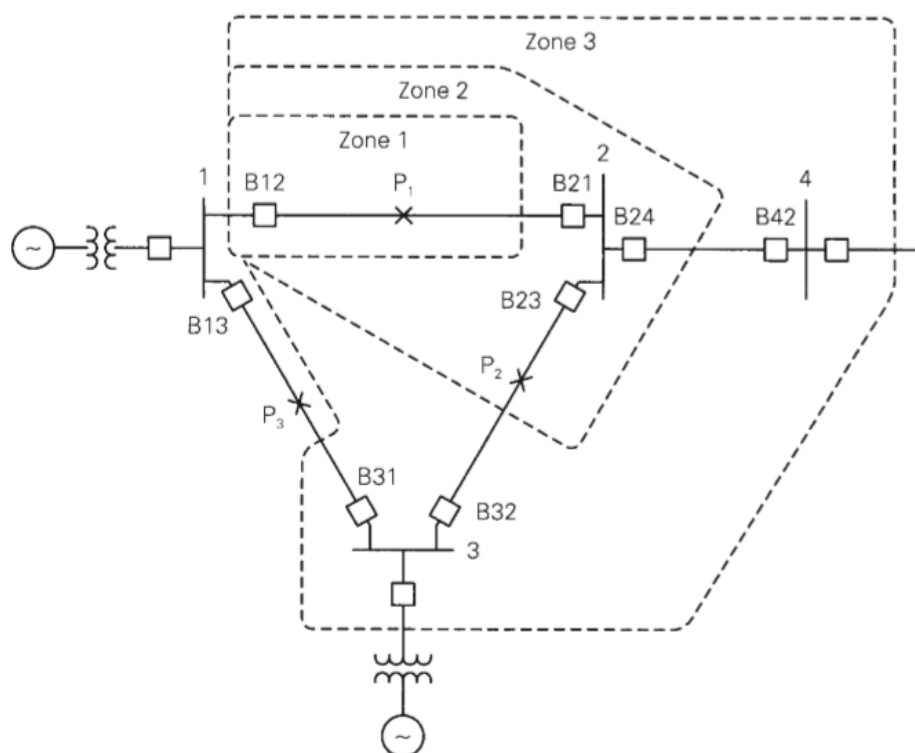
Gambar 2.10 Karakteristik quadrilateral

Relay dengan karakteristik quadrilateral akan bekerja apabila impedansi yang terukur oleh *relay* berada didalam bidang yang dibatasi oleh empat garis yang disebutkan. Quadrilateral mempunyai batasan resistensi 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 diakibatkan oleh busur api dan impedansi ketanah itu sendiri sehingga menyebabkan resistensi gangguan ke tanah mempunyai nilai yang cukup signifikan.

2.8. PENGATURAN *RELAY* JARAK

Pengaturan *relay* jarak berdasarkan pada daerah atau zona dari saluran transmisi yang akan diproteksi. Zona ini menggambarkan seberapa panjang saluran yang diproteksi oleh *relay* jarak. Adapun gambar dibawah ini menunjukkan penyetelan jangkauan pada *relay* jarak.



Gambar 2.11 Penyetelan *relay* jarak

- 1) Zona 1 : Mengamankan saluran yang diproteksi (*protected line*). Pengaturannya adalah 70-80% untuk memberikan perlindungan pada bus 1 dan 2
- 2) Zona 2 : Mengamankan saluran yang diproteksi (*protected line*) dan saluran sebelahnya (*adjacent line*). Pengaturannya adalah 120% impedansi saluran, melampaui bus 2 dengan delay waktu kerja mencapai 0.2 sampai 0.3 detik.

- 3) Zona 3 : Jangkauan *relay* zona 3 diatur untuk melampaui bus 3 dan 4, untuk memberikan back up pada jangkauan disebelahnya. Pengaturannya adalah 100% dari jalur 1 dan 2 ditambah dengan 120% dari bus 2-3 atau 2-4 dan diatur dengan penundaan waktu kerja yang lebih besar, biasanya 1 detik

Ada 2 hal yang yang harus dikoordinasikan pada *relay* jarak, yaitu :

- 1) Koordinasi antara suatu *relay* salah satu ujung dengan *relay* ujung lainnya dalam satu saluran yang diamankan sehingga jika *relay* pada salah satu ujung saluran yang diamankan bekerja seketika, maka *relay* pada ujung yang lain akan bekerja seketika pula.
- 2) Koordinasi antara suatu *relay* dengan *relay* sesi berikutnya, sehingga tidak terjadi tumpang tindih dengan pengamanan sesi berikutnya. Ataupun jika terjadi tumpang tindih dilakukan perlambatan waktu untuk *relay* yang bukan pada daerah pengamanannya.

Relay jarak pada dasarnya bekerja mengukur impedansi saluran, apabila impedansi yang terukur / dirasakan *relay* lebih kecil impedansi tertentu akibat gangguan ($Z_{set} < Z_F$) maka *relay* akan bekerja. Prinsip ini dapat memberikan selektivitas pengamanan, yaitu dengan mengatur hubungan antara jarak dan waktu kerja *relay*.

2.8.1. Perhitungan Resistansi Bahan konduktor

Resistansi adalah kemampuan suatu benda untuk menahan aliran arus listrik. Setiap konduktor memiliki hambatan. Konduktor yang tebal memiliki hambatan yang kecil. Kawat yang tebal mempunyai penampang lintang yang lebih lebar, sehingga mengandung lebih banyak elektron. Sebaliknya, konduktor yang panjang, memiliki hambatan yang besar. Ini dikarenakan semakin panjang suatu konduktor semakin banyak pula atom-atom yang akan menghadang gerak elektron bebasnya sehingga arus listrik yang dialirkan akan berkurang. Resistansi (juga resistivitas) suatu bahan akan meningkat dengan naiknya temperatur, dalam hal ini yang terjadi adalah kenaikan temperatur membuat electron bergerak lebih aktif dan lebih banyak tumbukan yang terjadi sehingga arus listrik menjadi terhambat. Berikut ini adalah rumus resistansi untuk bahan konduktor yang digunakan pada saluran transmisi :

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

Keterangan :

R = Resistansi

ρ = Resistivitas bahan

l = Panjang kawat

A = Luas Penampang kawat

Untuk memperoleh resistansi arus bolak balik maka harus dikalikan dengan faktor:

- 1) 1,0 untuk konduktor padat (*solid wire*)
- 2) 1,01 untuk konduktor pilin yang terdiri dari 2 lapis
- 3) 1,02 untuk konduktor pilin lebih dari 2 lapis.

Contoh perhitungan resistansi

Diketahui : Kabel CU 97,5%

$$\rho_{25} = 1,8 \text{ mikro ohm cm}$$

$$l = 1 \text{ km} = 10^5 \text{ cm}$$

$$A = 253 \text{ mm}^2 = 253 \times 10^{-2} \text{ cm}^2$$

$$\begin{aligned} R_{25} &= \rho_{25} \frac{l}{A} \\ &= 1,8 \times 10^{-6} \times 10^5 / (253 \times 10^{-2}) \\ &= 0,0711 \Omega/\text{km} \end{aligned}$$

Dengan memperhitungkan pengaruh lapisan (umumnya konduktor-konduktor terdiri dari 3 lapis), :

$$\begin{aligned} R_{25} &= 1,02 \times 0,0711 \Omega/\text{km} \\ &= 0,0726 \Omega/\text{km} \end{aligned}$$

Berikut ini adalah tabel resistivitas bahan penghantar dan tabel koefisien temperatur dari material konduktor standar :

Tabel 2.1 resistivitas bahan konduktor standar

Material	Mikro – ohm – cm						
	ρ_0	ρ_{20}	ρ_{25}	ρ_{50}	ρ_{75}	ρ_{80}	ρ_{100}
Cu 100 %	1,58	1,72	1,75	1,92	2,09	2,12	2,26
Cu 97.5%	1,63	1,77	1,80	1,97	2,14	2,18	2,31
AL 61 %	2,60	2,83	2,89	3,17	3,46	3,51	3,74

Tabel 2.2 koefisien *temperature* bahan konduktor

Material	T_0 ° C	Koefisien <i>temperature</i> resistansi x 10^{-3}						
		α_0	α_{20}	α_{25}	α_{50}	α_{75}	α_{80}	α_{100}
Cu 100 %	234,5	4,27	3,93	3,85	3,52	3,25	3,18	2,99
Cu 97.5%	241,0	4,15	3,83	3,76	3,44	3,16	3,12	2,93
AL 61 %	228,1	4,38	4,03	3,95	3,60	3,30	3,25	3,05

Resistansi berubah terhadap temperatur. Dalam batas temperature 10° C sampai dengan 100° sehingga berlaku hubungan :

$$R_{t_2} = R_{t_1} [1 + \alpha_{t_1} (t_2 - t_1)]$$

Dimana :

$$R_{t_2} = \text{tahanan temperatur } t_2$$

$$R_{t_1} = \text{tahanan temperatur } t_1$$

$$\alpha_{t_1} = \text{koefisien temperature tahanan pada temperatur } t_1^\circ \text{ C}$$

jadi $\frac{R_{t_2}}{R_{t_1}} = 1 + \alpha_{t_1} (t_2 - t_1)$

$$\frac{R_{t_2}}{R_{t_1}} = \frac{T_0 + T_2}{T_0 + T_1}$$

$$R_{t_2} = R_{t_1} \left[\frac{T_0 + T_2}{T_0 + T_1} \right]$$

Dimana :

$$T_0 = \left(\frac{1}{\alpha_{t_1}} \right) - T_1$$

2.8.2. Perhitungan Reaktansi Induktif

Reaktansi Induktif adalah nilai hambatan tahanan induktor terhadap sinyal AC. Besarnya nilai reaktansi induktif sebuah induktor dinyatakan dengan satuan Ohm seperti satuan hambatan listrik. Sebenarnya hambatan pada sinyal AC disebut dengan impedansi, namun pada rangkaian induktor disebut dengan reaktansi induktif. Hambatan yang timbul pada induktor terjadi karena adanya perubahan medan listrik dan medan magnet pada induktor ketika dialiri arus secara bolak-balik. Induktansi kawat 3 fasa pada umumnya berlainan untuk masing-masing

kawat. Namun, karena perbedaannya kecil, nilai induktansi dari penghantar yang ditransposisikan yang diambil, bila ketidak-seimbangannya tidak besar.

Berikut ini adalah rumus reaktansi induktif :

$$Xl = 2 \cdot \pi \cdot F \cdot L$$

Dimana :

Xl = Reaktansi induktif

F = Frekuensi sinyal sinus

L = Nilai induktansi

Contoh perhitungan Reaktansi Induktif :

Besarnya reaktansi induktif dari induktor sebesar 1 mH pada frekuensi 100 Hz adalah :

$$Xl = 2 \times 3.14 \times 100 \times 10^{-3}$$

$$Xl = 6.28 \times 10^{-1} = 0,628 \Omega$$

Harga- harga L untuk kawat lilit tertera dalam tabel berikut ini 2.1.

Induktansi urutan negatif dengan induktansi urutan positif.

2.8.3. Perhitungan Impedansi Saluran

Untuk perhitungan impedansi saluran, digunakan rumus sebagai berikut :

$$Z_L = \text{panjang saluran} \times Z_{\text{saluran}}/\text{km}$$

Contoh perhitungan :

Diketahui : panjang saluran = 8.65 km

$$Z_{\text{saluran}} = (0,3178 + j0,5761) \Omega/\text{km}$$

$$Z_L = 8,65 \times (0,3178 + j0,5761) \Omega/\text{km}$$

$$= 2,7493 + j4,9836 \Omega/\text{km}$$

2.8.4. Perhitungan *Setting Relay Jarak*

a. Penyetelan zona 1

Dengan mempertimbangkan adanya kesalahan-kesalahan dari data saluran, CT, PT, dan peralatan penunjang lain sebesar 10% - 20 % , zona-1 *relay* disetel 80 % dari panjang saluran yang diamankan.

Zona-1

$$Z_1 = 0,8 \cdot Z_{L1}$$

Z_{L1} = Impedansi pada saluran transmisi pada panjang saluran L_1

Contoh perhitungan :

Diketahui :

Impedansi saluran (Z_{L1}) sebesar $0.3178 + j0.5761 \Omega$

$$Z_1 = 0.8 \times (0.3178 + j0.5761)$$

$$Z_1 = 0.254 + j0.460 \Omega$$

Perhitungan impedansi pada *relay* adalah sebagai berikut :

$$Z_{\text{sekunder Relay}} = \frac{n_{CT}}{n_{PT}} \times Z_1$$

n_{CT} = Rasio Transformator Arus

n_{PT} = Rasio Transformator Tegangan

Waktu kerja *relay* seketika, ($t_1 = 0$) tidak dilakukan penyetelan waktu.

Contoh perhitungan :

Rasio Trafo CT (n_{CT}) = 600 : 1

Rasio Trafo PT (n_{PT}) = 1500 : 1

$$Z_s \text{ Relay} = \frac{600/1}{1500/1} = 0.4$$

$$\begin{aligned} Z_s \text{ Relay } 1 &= 0.4 \times (0.254 + j0.460 \Omega) \\ &= 0.1016 + j0.184 \Omega \end{aligned}$$

b. Penyetelan Zona 2

Prinsip penyetelan Zona-2 adalah berdasarkan pertimbangan-pertimbangan sebagai berikut :

Zona-2 max

$$1,2 \times (Z_{L1})$$

Z_{L1} = Impedansi pada saluran transmisi pada panjang saluran L_1

Contoh perhitungan :

Diketahui :

Impedansi saluran Z_{L1} sebesar $0.3178 + j0.5761 \Omega$

$$Z_{L2} = 0,8 \times (0.3178 + j0.5761 \Omega)$$

$$= 0,8 \times (0,3178 + j0,5761 \Omega)$$

$$= 0,25424 + j0,46088 \Omega$$

Perhitungan impedansi pada *relay* adalah sebagai berikut :

$$Z_{\text{sekunder}} \text{Relay} = \frac{n_{CT}}{n_{PT}} \times Z_2$$

n_{CT} = Rasio Transformator Arus

n_{PT} = Rasio Transformator Tegangan

Waktu kerja *relay* $t_2 = 0.4$ s/d 0.8 dt.

Contoh perhitungan :

Rasio Trafo CT (n_{CT}) = 600 : 1

Rasio Trafo PT (n_{PT}) = 1500 : 1

$$Z_s \text{ Relay} = \frac{600/1}{1500/1} = 0.4$$

$$\begin{aligned} Z_s \text{ Relay } 2 &= 0.4 \times (0,25424 + j0,46088 \Omega) \\ &= 0,1016 + j0.18435 \Omega \end{aligned}$$

c. Penyetelan zona 3

Prinsip penyetelan zona-3 adalah berdasarkan pertimbangan-pertimbangan sebagai berikut :

Zona-3 min

$$Z_3 = 1,2 \times (Z_{L1} + Z_{L2})$$

Dengan :

Z_{L1} = Impedansi pada saluran transmisi pada panjang saluran L_1

Z_{L2} = Impedansi pada saluran transmisi pada panjang saluran L_2

Contoh perhitungan :

Impedansi saluran Z_{L1} sebesar $0.3178 + j0.5761 \Omega$

Impedansi saluran Z_{L2} sebesar $0.254 + j0.460 \Omega$

$$Z_3 = 1.2 (0.3178 + j0.5761) + (0.254 + j0.460)$$

$$Z_3 = 1,2 (0.5718 + j1,0361)$$

$$Z_3 = 0,69372 + j1,24332 \Omega$$

Perhitungan nilai impedansi yang terbaca pada *relay* adalah :

$$Z_{\text{sekunder}} \text{Relay} = \frac{n_{CT}}{n_{PT}} \times Z_3$$

n_{CT} = Rasio Transformator Arus

n_{PT} = Rasio Transformator Tegangan

Waktu kerja *relay* $t_3 = 1.2$ s/d 1.6 dt.

Contoh perhitungan :

Rasio Trafo CT (n_{CT}) = 600 : 1

Rasio Trafo PT (n_{PT}) = 1500 : 1

$$Z_s \text{ Relay} = \frac{600/1}{1500/1} = 0,4$$

$$\begin{aligned} Z_3 &= 0,4 \times 0,69372 + j1,24332 \, \Omega \\ &= 0,277488 + 0,497328 \, \Omega \end{aligned}$$