

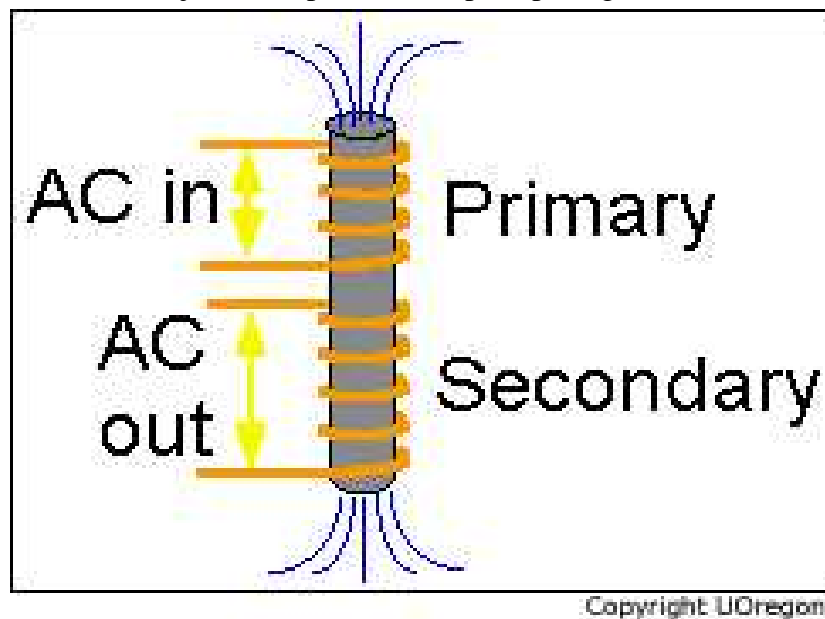


BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Transformator Daya

Transformator merupakan peralatan listrik yang berfungsi untuk menyalurkan daya/tenaga dari tegangan tinggi ke tegangan rendah atau sebaliknya. Transformator menggunakan prinsip hukum induksi Faraday dan hukum Lorentz dalam menyalurkan daya, dimana arus bolak-balik yang mengalir mengelilingi suatu inti besi maka inti besi itu akan berubah menjadi magnet dan apabila magnet tersebut dikelilingi oleh suatu belitan maka pada kedua ujung belitan tersebut akan terjadi beda potensial, seperti pada gambar 2.1.



Gambar 2.1. Arus bolak-balik mengelilingi inti besi

Arus yang mengalir pada belitan primer akan menginduksi inti besi transformator sehingga di dalam inti besi akan mengalir flux magnet dan flux magnet ini akan menginduksi belitan sekunder sehingga pada ujung belitan sekunder akan terdapat beda potensial.

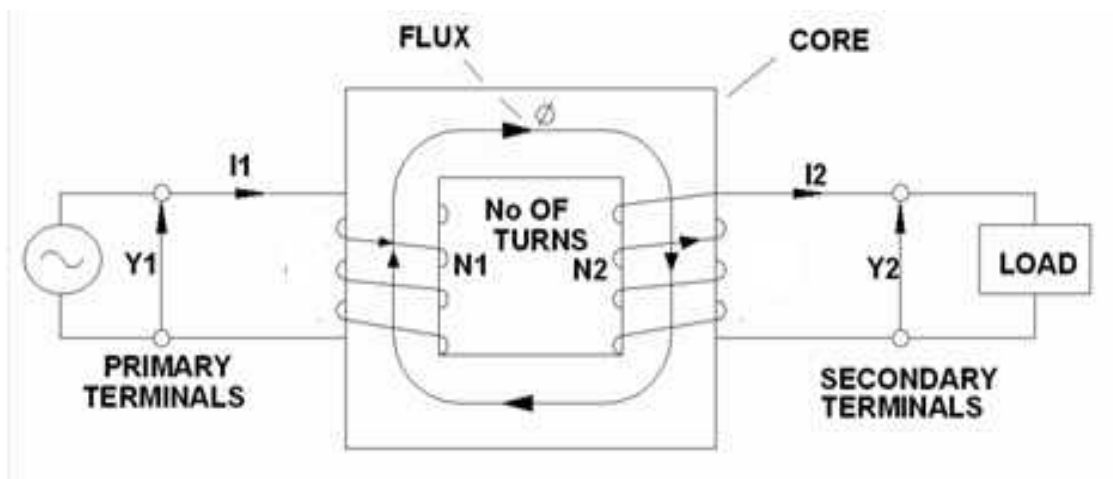
2.2 Prinsip-Prinsip Dasar Transformator

Salah satu keuntungan yang utama dari transmisi dan distribusi arus bolak-balik (AC) adalah karena tegangan yang berubah-ubah itu dapat dinaikkan



(*Stepped-Up*) atau diturunkan (*Stepped-down*). Tegangan yang dibangkitkan antara 11 sampai 24 kV dinaikkan ke 400 kV, 245kV dan 132 kV melalui transmisi sebelum diturunkan ke tegangan-tegangan yang sesuai untuk pemakaian dan penurunan ini di capai dengan menggunakan transformator. Suatu transformator terdiri atas :

- Inti besi yang terbuat dari laminasi-laminasi lembaran baja yang di isolasi satu sama lain dengan lapisan-lapisan isolasi yang tipis, bagian-bagian atas dan bagian-bagian bawah disebut yoke.
- Dua kumparan yang dililitkan sakeliling limb-limb, yang satu dihubungkan ke suplai disebut kumparan primer dan yang dihubungkan ke beban disebut kumparan sekunder.



dimana :

- I_1 : arus primer
- Y_1 : tahanan dalam sisi primer
- E_1 : tegangan primer
- N_1 : lilitan primer
- N_2 : lilitan sekunder
- E_2 : tegangan sekunder
- Y_2 : tahanan dalam sisi sekunder
- I_2 : arus sekunder

Gambar 2.2 Transformator dasar



Bila tegangan alternator V , dipakai untuk kumparan primer, maka ia akan menggerakkan arus bolak balik I , melalui kumparan yang menimbulkan medan magnet yang berubah-ubah bersikulasi di dalam inti. Kekuatan medan magnet ini ditentukan oleh besarnya arus yang mengalir dalam jumlah lilitan dari kumparan dan dinyatakan dalam ampere (A). Besarnya GGL yang diinduksikan tergantung pada kekuatan nilai pemutusan medan magnet dan jumlah lilitan dari kumparan. Karena itu hal dalam gambar akan diinduksikan GGL yang sama besarnya pada setiap lilitan baik di primer maupun sekunder, karena setiap lilitan mengalami perubahan medan magnet yang sama di dalam sirkuit yang sama. Arah dari GGL yang diinduksikan adalah sedemikian rupa, sehingga ia melawan arus yang memutus tegangan.

2.3 Gangguan Pada Transformator Daya

Gangguan yang berpengaruh terhadap kerusakan transformator tidak hanya karena adanya gangguan di dalam transformator atau di dalam daerah pengamanan transformator tetapi juga adanya gangguan di luar daerah pengaman. Justru kerusakan transformator cenderung terjadi karena terlalu seringnya terjadi gangguan di luar daerah pengaman.

2.3.1 Gangguan di luar daerah pengaman

Gangguan di luar daerah pengaman transformator daya ini sering terjadi dan dapat merupakan beban lebih, hubungan singkat fasa ke tanah maupun gangguan antar fasa. Gangguan ini mempunyai pengaruh terhadap transformator, sehingga transformator harus dilepaskan/dipisahkan bila gangguan tersebut terjadi setelah waktu tertentu untuk memberi kesempatan pengaman daerah yang terganggu bekerja.

Kondisi beban yang berlanjut dapat di deteksi dengan rele thermal atau termometer yang memberi sinyal sehingga beban berkurang. Untuk kondisi gangguan di luar daerahnya misalnya gangguan hubung singkat pada rel gangguan, hubung singkat disalurkan keluarannya, maka rele arus lebih dengan perlambatan waktu atau sering digunakan sebagai pengamannya. Koordinasi yang



baik, untuk daerah berikutnya yang terkait. Pengaman utama ini di rancang sedemikian rupa sehingga tidak boleh bekerja terhadap gangguan tersebut.

2.3.2 Gangguan di dalam daerah pengaman

Pengaman utama transformator daya ditunjukkan sebagai pengaman di dalam daerah pengamannya. Gangguan di dalam sangat serius dan selalu ada resiko terjadinya kebakaran. Gangguan di dalam dapat terjadi karena diakibatkan:

- Hubung singkat antar kumparan sisi primer dengan kumparan sisi primer.
- Hubung singkat antar kumparan sisi sekunder dengan kumparan sisi sekunder.
- Hubung singkat antar kumparan sisi primer dengan kumparan sisi sekunder.
- Hubung singkat antar kumparan dan bodi transformator.

Begitu pentingnya kerja dari transformator daya untuk kelangsungan kegiatan sehari-hari kita maka dari itu transformator daya harus di jaga kerjanya, agar tetap bekerja sehingga konsumen dapat menjalankan kegiatan kesehariannya, tanpa terkendala dan tidak ada yang dirugikan baik itu konsumen maupun PT. PLN (Persero) itu sendiri.

2.4 Dasar-Dasar Sistem Proteksi

Rele proteksi adalah susunan peralatan yang direncanakan untuk dapat merasakan atau mengukur adanya gangguan atau mulai merasakan adanya ketidak normalan pada peralatan atau bagian sistem tenaga listrik dan segera secara otomatis memberi perintah untuk pemutus tenaga, untuk memisahkan peralatan atau bagian yang terganggu dan memberi syarat berupa lampu dan bel. Sehingga dengan indikasi yang ada maka penanganan pada gangguan akan segera di tangani.

Tugas rele proteksi juga berfungsi menunjukkan lokasi dan macam gangguannya. Dengan data tersebut memudahkan analisa dari gangguannya. Dalam beberapa hal rele hanya memberi tanda adanya gangguan atau kerusakan, jika di pandang dan diketahui gangguan atau kerusakan tersebut tidak membahayakan terutama transformator daya itu sendiri.



Dari uraian di atas maka rele proteksi pada sistem tenaga listrik berfungsi untuk :

- a. Merasakan, mengukur dan menentukan bagian sistem yang terganggu serta memisahkan secepatnya sehingga sistem lain yang tidak terganggu dapat beroperasi secara normal.
- b. Mengurangi kerusakan yang lebih parah dari peralatan yang terganggu.
- c. Mengurangi pengaruh gangguan terhadap bagian sistem yang lain yang tidak terganggu di dalam sistem tersebut serta mencegah meluasnya gangguan.
- d. Memperkecil bahaya bagi manusia.

Untuk melaksanakan fungsi di atas rele pengaman harus memenuhi persyaratan sebagai berikut :

- a. Dapat diandalkan (reliable).
- b. Selektif.
- c. Waktu kerja rele cepat.
- d. Peka (sensitif)
- e. Ekonomis dan sederhana.

Karena adanya kemungkinan kegagalan pada sistem pengaman maka harus dapat diatasi yaitu dengan penggunaan pengaman cadangan (Back Protection). Dengan demikian pengamanan menurut fungsinya dapat dikelompokkan menjadi:

- a. Pengaman utama yang pada umumnya selektif dan cepat, dan malah jenis tertentu mempunyai sifat selektif mutlak misalnya rele differensial.
- b. Pengaman cadangan, umumnya mempunyai perlambatan waktu hal ini untuk memberikan kesempatan kepada pengaman utama bekerja lebih dahulu, dan jika pengaman utama gagal, baru pengaman cadangan bekerja dan rele ini tidak seselektif pengaman utama. (Ir. H. Hazairin.2004 Unsri)

2.5 Rele Differensial

Digunakan sebagai pengaman hubungan singkat untuk transformator daya tiga fasa ialah di mulai pada 5000 kVA ke atas, sedangkan berdasarkan standar PLN no. 51 bagian C, rele ini digunakan mulai kapasitas 30 MVA ke atas.



Gambar 2.3 Rele differensial

Rele differensial memberi perintah untuk membuka kedua pemutus beban dan memberi sinyal serta alarm, saat tidak normal/gangguan terjadi.

1. Sifat pengaman dengan rele differensial
 - a. Sangat efektif dan cepat, tidak perlu di koordinasi dengan rele lain.
 - b. Sebagai pengaman utama
 - c. Tidak dapat digunakan sebagai pengaman cadangan untuk daerah berikutnya.
 - d. Daerah pengamannya dibatasi oleh sepasang trafo arus dimana rele differensial di pasang.
2. Persyaratan pada pengaman rele differensial
 - a. CT_1 dan CT_2 harus mempunyai perbandingan transformasi yang sama, atau mempunyai perbandingan transformasi sedemikian, sehingga arus sekundernya sama.
 - b. Karakteristik CT_1 dan CT_2 sama.
 - c. Rangkaian CT ke rele harus betul.

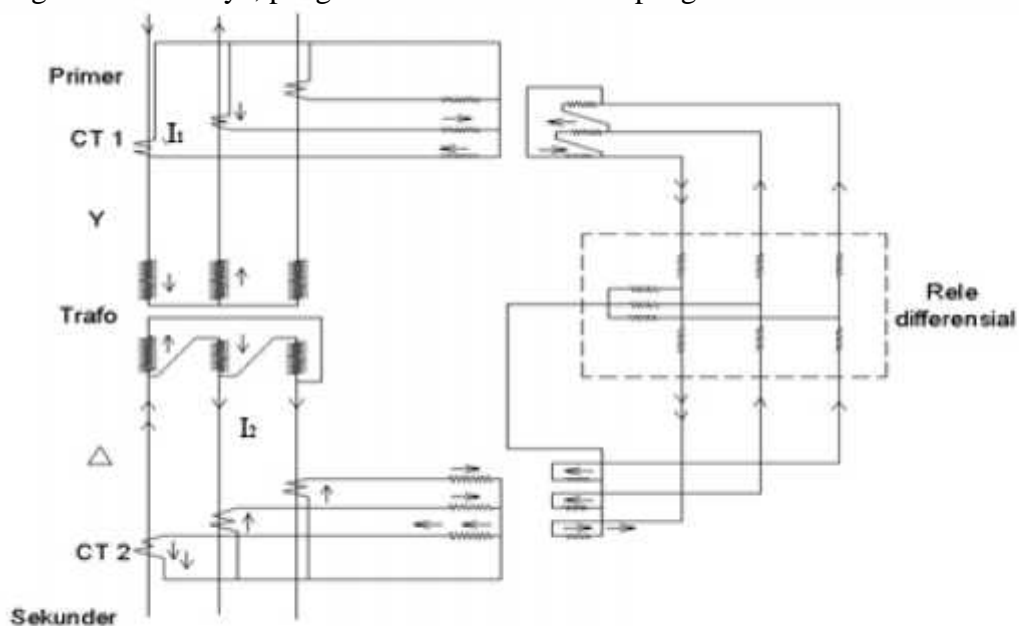
2.5.1 Prinsip kerja rele differensial

Menurut Mason “rele differensial itu merupakan suatu rele yang bekerja bila ada perbedaan vektor dari dua besaran listrik atau lebih, yang melebihi besaran yang telah ditentukan”.



Prinsip kerja rele differensial adalah membandingkan vektor arus I_1 (arus sisi primer) dan I_2 (arus sisi sekunder). Pada waktu tidak terjadi gangguan/keadaan normal atau gangguan berada di luar daerah pengamanan I_1 dan I_2 sama atau mempunyai perbandingan serta sudut fasa tertentu, dalam hal ini rele tidak bekerja. Pada waktu terjadi gangguan di daerah pengaman I_1 dan I_2 tidak sama perbandingan serta sudut fasanya berubah dari keadaan normal disini rele akan bekerja. Rele differensial ini kerjanya berdasarkan hukum arus kirchoff I (kirchoff current law I) yang bunyinya “arus yang masuk pada suatu titik sama dengan arus yang keluar pada titik tersebut”.

Sifat dari rele diferensial adalah sangat selektif dan cepat, tidak perlu di koordinasi dengan rele lain sebagai pengaman peralatan (equipment), tidak dapat digunakan sebagai pengaman cadangan untuk daerah berikutnya, daerah pengamannya dibatasi oleh pasangan trafo arus atau dimana rele diferensial di pasang. Adapun penggunaan rele diferensial adalah sebagai pengaman generator, pengaman trafo daya, pengaman motor-motor dan pengaman saluran transmisi.



Gambar 2.4 Diagram rele differensial

dimana :

- CT₁ : trafo arus sisi primer
- I₁ : arus sisi primer
- Y : kumparan trafo hubungan Y (bintang)
- Δ : kumparan trafo hubungan Δ (segitiga)



I_2 : arus sisi sekunder
 CT_2 : trafo arus sisi sekunder

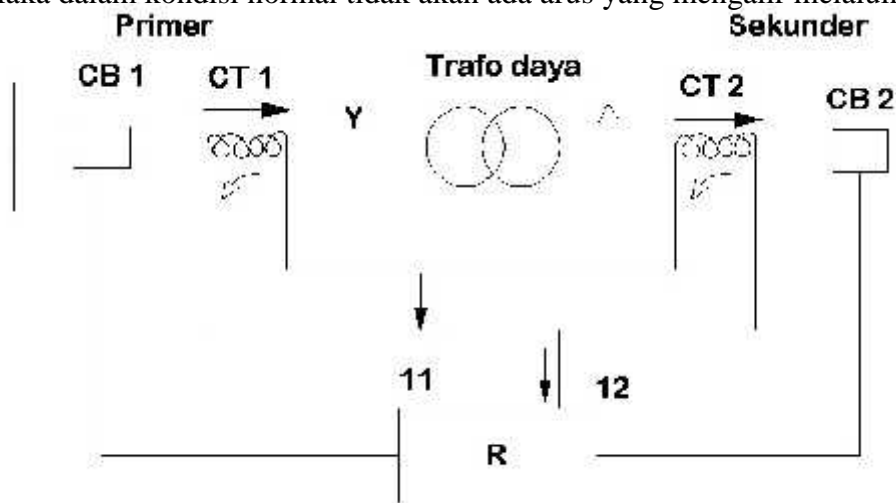
Rele differensial mempunyai bentuk yang bermacam-macam, tergantung dari peralatan yang diamankan. Pengertian dari rele differensial itu sendiri mengandung unsur membedakan satu dengan lainnya, semua besaran yang masuk ke rele.

Adapun prinsip kerja rele differensial ini terjadi dalam tiga keadaan, yaitu:

1. Pada keadaan normal

Dalam keadaan normal, arus mengalir melalui peralatan/insulasi listrik yang di proteksi yaitu transformator daya, dan arus-arus tranformator arus, yaitu I_1 dan I_2 bersirkulasi, jika rele differensial di pasang antara terminal 1 dan terminal

2. Maka dalam kondisi normal tidak akan ada arus yang mengalir melaluinya.



dimana :

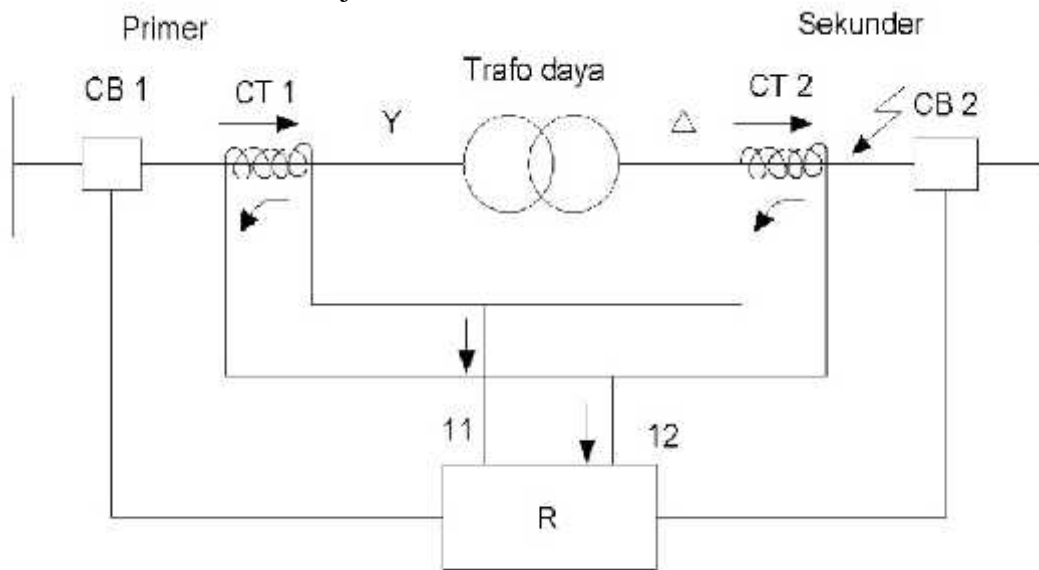
C_{B1} : circuit breaker pada sisi primer
 C_{T1} : current transformator pada sisi primer
Y : kumparan trafo hubungan Y (bintang)
 Δ : kumparan trafo hubungan Δ (segitiga)
 C_{T2} : current transformator pada sisi sekunder
 C_{B2} : circuit breaker pada sisi sekunder
 I_1 : arus sisi primer
 I_2 : arus sisi sekunder
R : rele differensial

Gambar 2.5 Rele differensial dalam keadaan normal



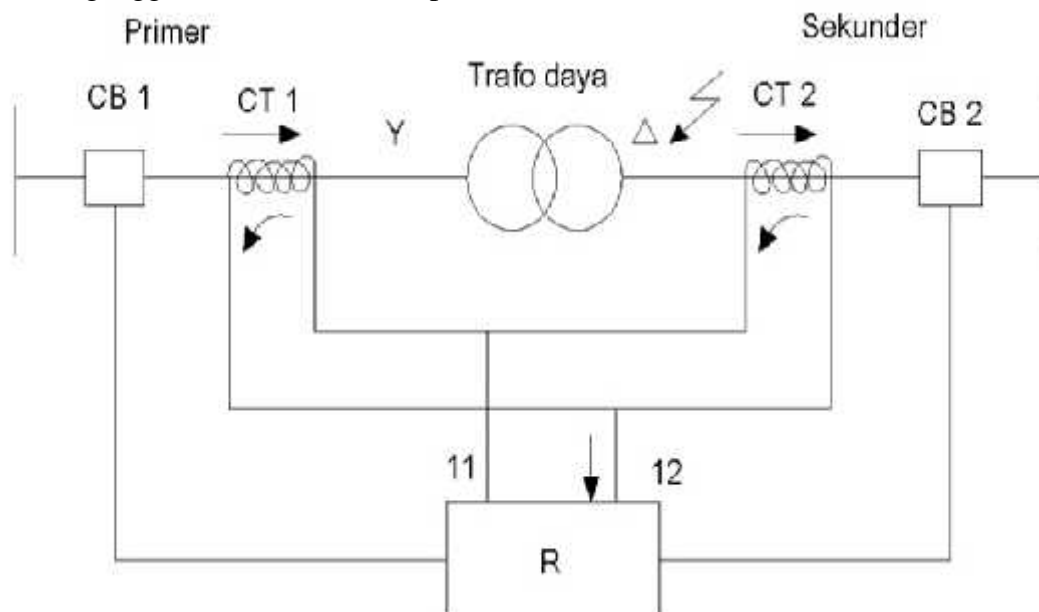
2. Pada gangguan di luar daerah proteksi

Bila dalam keadaan gangguan di luar dari transformator daya yang di proteksi (external fault), maka arus yang mengalir akan bertambah besar, akan tetapi sirkulasi tetap sama dengan pada kondisi normal dengan demikian rele differensial tidak akan bekerja.



Gambar 2.6 Gangguan dari luar daerah proteksi

3. Pada gangguan di dalam daerah proteksi



Gambar 2.7 Gangguan dari dalam daerah proteksi



Jika gangguan terjadi di dalam proteksinya pada transformator daya yang di proteksinya internal fault maka arah sirkulasi arus di salah satu sisi akan terbalik, menyebabkan keseimbangan pada kondisi normal terganggu, akibatnya arus I_D akan mengalir melalui rele differensial dari terminal 1 menuju ke terminal 2 maka terjadi selisih arus di dalam rele, selanjutnya rele tersebut akan mengoperasikan CB untuk memutus.

Selama arus-arus sekunder transformator arus sama besar, maka tidak akan ada arus yang mengalir melalui operating coil rele differensial, tetapi setiap gangguan yang mengakibatkan arus yang mengalir melalui operating coil rele differensial, bila arus tersebut lebih besar dari pada pick up setting rele differensial, maka rele differensial akan bekerja dan memberikan komando trapping kepada circuit breaker sehingga transformator daya yang terganggu dapat di isolir dari sistem tenaga listrik.

2.5.2 Fungsi rele differensial

Pengaman rele differensial merupakan alat pengaman utama untuk mengamankan transformator daya terhadap hubung singkat salah satunya yang terjadi di dalam kumparan fasa. Terjadi gangguan hubung singkat biasanya disebabkan oleh adanya kerusakan isolasi kawat. Akibat kemungkinan terjadi adalah :

- a. Hubung singkat antara kumparan fasa satu dengan fasa yang lainnya.
- b. Hubung singkat antara masing-masing lilitan dalam satu kumparan.
- c. Hubung singkat antara satu fasa dengan tanah.
- d. Hubung singkat antara kumparan sisi tegangan tinggi dengan kumparan sisi tegangan rendah.

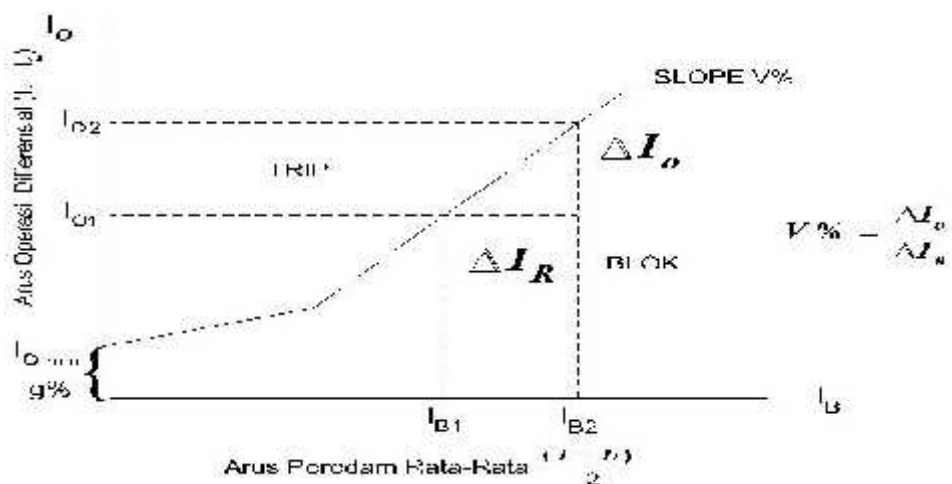
Dari masing-masing jenis hubung singkat tersebut di atas rele pengaman, rele differensial mempunyai sistem rangkaian sendiri-sendiri. Diantaranya adalah pengaman rele differensial longitudinal yang digunakan untuk mengamankan transformator daya terhadap hubung singkat antara kumparan yang satu dengan kumparan yang lainnya, pengaman rele differensial untuk masing- masing lilitan membujur (longitudinal) merupakan sistem yang paling banyak di jumpai



pemakaiannya di lapangan. Karena sulitnya pengaman rele differensial ini hanya di pasang pada transformator daya berkapasitas besar saja.

2.5.3 Karakteristik rele differensial

Rele differensial merupakan suatu rele yang karakteristik kerjanya berdasarkan keseimbangan (balance), yang membandingkan arus-arus sekunder transformator arus (CT) terpasang pada terminal-terminal peralatan atau instalasi listrik yang diamankan.



Gambar 2.8 Karakteristik rele differensial

2.5.4 Pemasangan rele differensial

Di dalam pemasangan rele differensial pada transformator daya, sering mengalami kesulitan ketepatan kerja rele, sehingga pada akhirnya rele akan mengalami salah kerja. Salah kerja pada rele differensial disebabkan oleh hubungan transformator daya sisi tegangan tinggi dan sisi tegangan rendah sering berbeda, sehingga terjadi transformator arusnya menjadi tidak sesuai lagi.

Sehubungan dengan pemasangan rele differensial ke transformator daya, maka perlu sekali untuk mengetahui persyaratan pemasangan rele differensial tersebut, yaitu:

- Besar arus-arus yang masuk ke rele harus sama.
- Fasa-fasa arus tersebut harus berlawanan.



2.5.5 Arus nominal primer dan sekunder

Arus nominal pada transformator daya dapat ditentukan dengan persamaan sebagai berikut:

Arus nominal pada sisi primer

$$I_{N1} = \frac{S}{V_P \cdot \sqrt{3}} \quad (2.1)$$

Arus nominal pada sisi sekunder

$$I_{N2} = \frac{S}{V_S \cdot \sqrt{3}} \quad (2.2)$$

dimana:

I_{N1} = arus nominal pada sisi primer

I_{N2} = arus nominal pada sisi sekunder

S = tegangan pada transformator daya

V_P = tegangan pada sisi primer

V_S = tegangan pada sisi sekunder

2.5.6 Seting kerja rele differensial

Arus dasar pada kedua sisi transformator diturunkan lagi dengan menggunakan trafo arus menjadi arus keluaran sekunder trafo arus adalah:

$$I_{SA} = \frac{I_{N1}}{K_{CT1}} \quad (2.3)$$

$$I_{SB} = \frac{I_{N2}}{K_{CT2}} \quad (2.4)$$

dimana:

I_{N1} = arus nominal pada sisi primer transformator daya.

I_{N2} = arus nominal pada sisi sekunder transformator daya.

I_{SA} = arus primer trafo arus CT_1 dari sisi primer transformator daya

I_{SB} = arus sekunder trafo arus CT_2 dari sisi sekunder transformator daya

K_{CT1} = rasio transformator arus CT_1 dari sisi primer transformator daya

K_{CT2} = rasio transformator arus CT_2 dari sisi sekunder transformator daya

2.5.7 Menentukan persentase rele

$$I_D = I_{SA} - I_{SB} \quad (2.5)$$

Sedangkan persentase rele adalah

$$\Delta = \frac{I_D}{I_{SA}} \times 100 \% \quad (2.6)$$



2.6 Trafo arus (CT)

Trafo arus (CT) adalah peralatan pada sistem tenaga listrik yang berupa trafo yang digunakan untuk pengukuran arus yang besarnya mencapai ratusan ampere dan arus yang mengalir pada jaringan tegangan tinggi. Di samping untuk pengukuran arus, trafo arus juga digunakan untuk pengukuran daya dan energi, pengukuran jarak jauh. Kumparan primer trafo arus dihubungkan seri dengan rangkaian atau jaringan yang akan di ukur arusnya sedangkan kumparan sekunder dihubungkan dengan meter atau rele proteksi.



Gambar 2.9 Transformator arus (CT)

Penggunaan trafo arus adalah untuk menurunkan arus yang besar pada sisi primer menjadi arus sekunder yang lebih kecil serta memisahkan sisi primer dengan sisi sekunder, trafo arus dapat bekerja dengan besar arus yang aman.

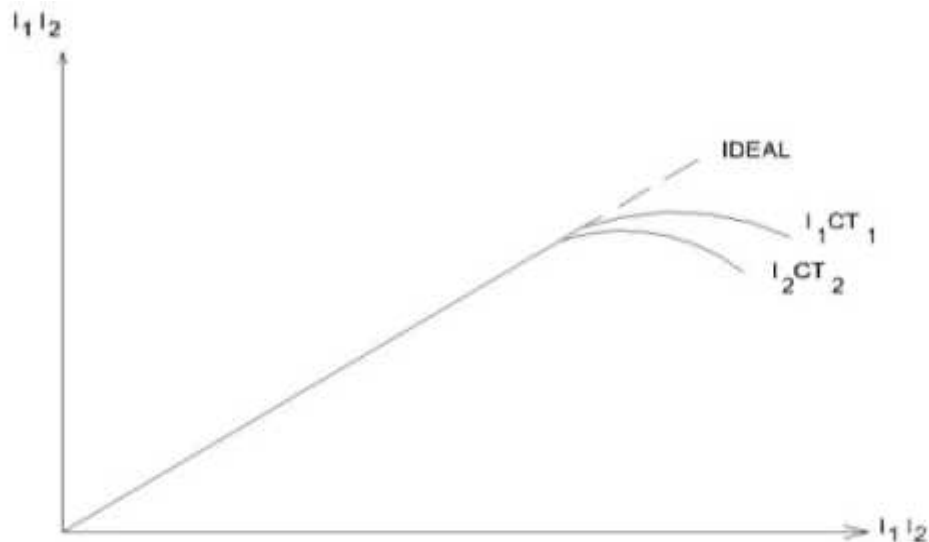
Sisi primer trafo arus hanya terdiri dari beberapa lilitan dan dihubungkan secara seri dengan sistem tenaga listrik, transformasi arus didapatkan dengan memberikan lilitan yang lebih banyak pada sisi sekunder. Pada trafo arus ideal besar arus sekunder yang mengalir merupakan transformasi langsung dari perbandingan.

Pada kenyataannya, arus sekunder lebih dari harga tersebut, hal ini disebabkan adanya pergeseran fasa dan kesalahan perbandingan arus. Kesalahan perbandingan arus dan kesalahan sudut fasa ini harganya tidak pernah tetap akan tetapi berubah sesuai dengan kondisi arus kerja.



2.6.1 Karakteristik trafo arus (CT)

Rele differensial dalam operasinya bahwa dalam keadaan normal atau terjadi gangguan di luar daerah pengamannya arus pada rele sama dengan nol.



Gambar 2.10 Karakteristik trafo arus (CT) pada rele differensial

Karena itu kemungkinan salah kerja dari rele differensial dapat terjadi, arus yang dapat menyebabkan rele salah kerja tersebut dinamakan arus ketidak seimbangan. Bila suatu arus yang besar mengalir melalui suatu trafo arus, maka arus pada terminal sekunder tidak lagi linear terhadap arus primer.

2.6.2 Rasio trafo arus

Trafo arus untuk pengaman rele differensial di pasang pada sisi tegangan tinggi dan sisi tegangan rendah transformator, oleh karena itu rasio transformasi harus di pilih sedemikian rupa sehingga besar arus sekunder pada kedua trafo arus sama atau paling tidak mendekati sama, sebab apabila terdapat perbedaan arus maka selisih arus ini akan semakin besar ketika berlangsung gangguan hubung singkat di luar daerah pengaman.

Untuk memenuhi persyaratan tersebut perlu di pilih trafo arus yang sesuai untuk mendapatkan $I_1=I_2$, tetapi kadang-kadang hal ini tidak selalu dapat dilakukan hanya dengan trafo arus, karena rasio perbandingan transformasi telah di buat standar pada arus-arus tertentu, sehingga apabila terdapat perbedaan dengan hasil perhitungan, maka di ambil harga standar yang mendekati



selisih I_1 dan I_2 tidak jauh berbeda jika terlalu besar maka diperlukan trafo arus bantu untuk menyamakan selisih ini.

Untuk menentukan rasio trafo arus dapat ditentukan besar rasio transformasinya :

$$K_{CT1} = \frac{I_{P1}}{I_{P2}} \quad (2.7)$$

$$K_{CT2} = \frac{I_{S1}}{I_{S2}} \quad (2.8)$$

dimana :

K_{CT1} = rasio transformator CT_1 dari sisi primer transformator daya

K_{CT2} = rasio transformator CT_2 dari sisi sekunder transformator daya

I_{P1} = trafo arus CT_1 primer pada sisi keluaran (arus yang masuk)

I_{P2} = trafo arus CT_1 primer pada sisi masukan (arus yang keluar)

I_{S1} = trafo arus CT_2 sekunder pada sisi masukan (arus yang masuk)

I_{S2} = trafo arus CT_2 sekunder pada sisi keluaran (arus yang keluar)

Bila kedua arus I_1 dan I_2 ini sudah sama maka tidak diperlukan lagi trafo arus bantu, tetapi bila arus-arus ini belum sama, maka harus disamakan dengan menggunakan trafo arus bantu.

$$\frac{I_{SA}}{I_{SB}} = 100 K \quad (2.9)$$

2.7 Pemutus Tenaga (PMT)



Gambar 2.11 Pemutus tenaga (PMT)



Circuit Breaker (CB) atau Sakelar Pemutus Tenaga (PMT) adalah suatu peralatan pemutus rangkaian listrik pada suatu sistem tenaga listrik yang mampu untuk membuka dan menutup rangkaian listrik pada semua kondisi, termasuk hubungan singkat, sesuai dengan ratingnya. Juga pada kondisi tenaga yang normal ataupun tidak normal.

2.8 Pengertian Gangguan

Gangguan adalah setiap ketidak normalan pada suatu sistem tenaga listrik yang berakhir dengan pembukaan PMT. Dikecualikan pembukuan PMT oleh operator atau kesalahan manusia. Gangguan pada sistem tenaga listrik dapat terjadi di pembangkit, jaringan transmisi, atau jaringan distribusi. Dimanapun gangguan itu terjadi sistem proteksi yang baik harus dapat mengidentifikasi dan memisahkan bagian yang terganggu secepat mungkin dari bagian lainnya serta dapat menghindarkan kerusakan yang dapat menimbulkan kerugian.

Dalam sistem tenaga listrik sistem pengamanan di bagi dalam bagian-bagian yang dibatasi oleh pemutus tenaga (PMT). Setiap bagian diamankan oleh rele pengaman dan setiap rele pengaman mempunyai daerah pengaman (zone protection) masing-masing yaitu daerah dimana bila terjadi gangguan di dalamnya rele ini dapat merasakan dan rele ini dengan bantuan sistem yang lainnya. Daerah pengaman (zone protection) mempunyai daerah yang saling tumpang tindih (overlapping) antara daerah pengaman yang satu dengan sebelahnyanya, sebab kalau tidak akan terjadi daerah kosong (gap), yaitu daerah dimana tidak ada rele bekerja jika terjadi gangguan atau biasa disebut zona mati (dead zone).

Gangguan di daerah overlapping akan dirasakan oleh rele bersamaan sehingga koordinasi waktu kerja antara keduanya sangat penting untuk diperhatikan.

2.8.1 Macam-macam gangguan

Karena transformator di Gardu Induk pada umumnya berhubungan dengan rel dan rel langsung berhubungan dengan saluran transmisi kebanyakan adalah saluran udara yang jumlah gangguannya relatif tinggi, maka kemungkinan



bahwa transformator mendapat gangguan yang disebabkan oleh gangguan disalurkan transmisi adalah lebih besar dari pada generator.

Petir yang banyak menyambar saluran udara kemudian menuju transformator. Tetapi sebelum sampai transformator terlebih dulu di potong oleh lightning arrester (LA). Walaupun gelombang petir ini telah diperhatikan terhadap gelombang petir yang terpotong, namun hal ini tetap menimbulkan stress di dalam isolasi transformator. Apabila pemotongan gelombang ini oleh lightning arrester kurang sempurna maka gelombang petir ini bisa lebih besar yang sampai di transformator dan dapat menjebolkan isolasi lilitan transformator dan akhirnya menimbulkan gangguan transformator.

Gangguan ini merupakan gangguan di dalam transformator yaitu apabila disebabkan hubung singkat di dalam lilitan transformator, walaupun hubung singkat ini sesungguhnya disebabkan oleh gangguan di luar transformator, petir yang merambat ke dalam transformator

Untuk menghindari hal tersebut di atas maka pada transformator yang berukuran besar di pasang rele, baik rele utama maupun rele cadangan. Sedangkan untuk transformator distribusi yang daya terpasangnya relatif lebih kecil, hanya diamankan dengan sekering lebur. Hal ini disebabkan karena untuk memasang rele differensial memerlukan investasi tambahan yang tidak sedikit nilainya.

2.8.2 Gangguan tegangan lebih

Beban lebih mungkin tidak tepat disebut gangguan, namun beban lebih adalah suatu keadaan abnormal yang apabila dibiarkan terus menerus dapat membahayakan peralatan karena beban lebih dapat menyebabkan panas yang berlebihan sehingga dapat mempercepat proses penuaan peralatan. Gangguan tegangan lebih dapat dibedakan :

1. Tegangan lebih dengan power frekuensi. Tegangan ini dapat terjadi karena :
 - Over speed pada generator karena kehilangan beban.
 - Gangguan pada AVR generator.
2. Tegangan lebih transient.
 - Tegangan ini dapat dibedakan :



- Surja petir yaitu tegangan yang disebabkan oleh sambaran petir yang mengenai suatu peralatan listrik.
- Surja hubung yaitu tegangan yang disebabkan oleh hubung singkat atau bekerjanya circuit breaker yang dapat menyebabkan tegangan transient yang tinggi.

2.8.3 Gangguan hubung singkat

Gangguan hubung singkat yang mungkin terjadi pada setiap titik di dalam sistem yang diketahui terutama adalah besarnya arus gangguan hubung singkat pada setiap cabang bisa di transmisi, distribusi, trafo maupun sumber pembangkit disamping perlu diketahuinya pula besar tegangan pada setiap bagian. Besar arus dan atau tegangan hasil studi inilah yang diperlukan oleh engineer proteksi untuk penyetelan proteksi, sehingga bila gangguan hubung singkat itu benar-benar terjadi di dalam sistem, peralatan proteksi dapat bekerja mengamankan bagian sistem yang terganggu sesuai yang diharapkan.

Karena setiap gangguan menyebabkan mengalirnya arus yang tidak seimbang dalam sistem metode komponen-komponen berguna sekali dalam suatu analisis untuk menentukan arus dan tegangan di semua bagian setelah terjadinya gangguan.

Persamaan sistem tenaga listrik yang bisa digunakan

$$V_{a0} = -I_{a0} \cdot Z_0$$

$$V_{a1} = E_a - I_{a1} \cdot Z_1$$

$$V_{a2} = -I_{a2} \cdot Z_2 \quad (2.10)$$

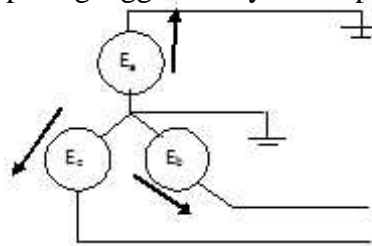
Dalam bentuk matriksnya didapat :

$$\begin{pmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ E_a \\ 0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{pmatrix}$$



1. Gangguan satu fasa ketanah

Untuk gangguan satu fasa ketanah dimana fasa *a* adalah tempat terjadinya gangguan. Persamaan yang akan dikembangkan dalam jenis gangguan ini akan berlaku apabila gangguannya adalah pada fasa *a*, akan tetapi hal ini tidak perlu menimbulkan kesulitan karena fasa-fasa tersebut telah dinamakan dengan sembarang saja. Keadaan pada gangguan dinyatakan pada persamaan berikut :



Gambar 2.12 Gangguan satu fasa tanah

$I_b=0$ $I_c=0$ $V_a=0$

Karena $I_b=0$ dan $I_c=0$ komponen – komponen simetris di dapat dari :

$$I_{a0} = \frac{1}{3} I_a$$

$$I_{a1} = \frac{1}{3} I_a$$

$$I_{a2} = \frac{1}{3} I_a$$

Dari persamaan di atas di dapat matriksnya :

$$\begin{pmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a \\ 1 & a^2 & a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_a \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Sehingga I_{a0} , I_{a1} , dan I_{a2} masing-masing sama dengan $I_a/3$ dan di dapat :

$$I_{a1} = I_{a2} = I_{a0} \tag{2.11}$$

maka akan didapatkan hasil sebagai berikut :

$$V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} = -I_{a0} Z_0 - I_{a1} Z_1 - I_{a1} Z_a \tag{2.12}$$

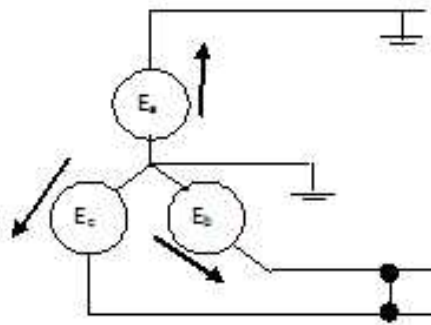


Karena $V_a = V_{a_0} + V_{a_1} + V_{a_2} = 0$, maka kita dapatkan persamaan untuk I_{a_1} adalah :

$$I_{a_1} = \frac{E_a}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \quad (2.13)$$

Persamaan di atas adalah persamaan untuk gangguan satu fasa ketanah (impedansi urutan positif, negatif, dan nol).

2. Gangguan antar fasa (dua fasa)



Gambar. 2.13 Gangguan antar fasa (dua fasa)

Dalam keadaan gangguan seperti pada gambar di atas di dapat persamaan sebagai berikut :

$$I_{a_0} = \frac{1}{3} (-I_c + I_c) = 0$$

$$I_{a_1} = \frac{1}{3} (-I_c \cdot a + I_c \cdot a^2)$$

$$I_{a_2} = \frac{1}{3} (-I_c \cdot a^2 + I_c \cdot a)$$

Maka di dapat bentuk matriksnya :

$$\begin{bmatrix} I_{a_0} \\ I_{a_1} \\ I_{a_2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ -I_c \\ I_c \end{bmatrix}$$

Dan karena itu



$$Ia_0 = 0 \quad (2.14)$$

$$Ia_1 = -Ia_2 \quad (2.15)$$

Karena netral transformator ditanahkan, Z_0 menjadi terbatas sehingga di dapat :

$$V_{ac} = 0 \quad (2.16)$$

Karena Ia_0 adalah nol

Dengan pergantian-pergantian menurut menjadi sebagai berikut :

$$Va_1 = Ea - Ia_1 \cdot Z_1$$

$$Va_2 = -Ia_1 \cdot Z_2$$

$$v_B - v_C = | 0 \ 1 \ -1 |$$

$$\begin{matrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{matrix} = \begin{matrix} | 0 & 1 & -1 | \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{matrix} \begin{matrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{matrix}$$

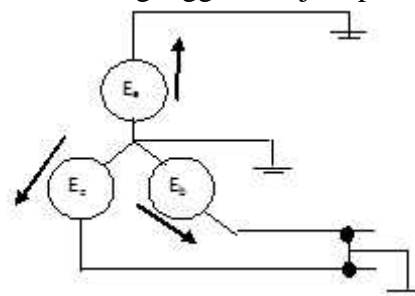
Hasil penyelesaian untuk Ia_1 menghasilkan :

$$Ia_1 = \frac{Ea}{Z_1 + Z_2} \quad (2.17)$$

Persamaan di atas adalah persamaan untuk gangguan dua fasa (impedansi urutan positif dan negatif)

3. Gangguan Dua Fasa Ketanah

Diagram rangkain untuk suatu gangguan antar fasa ketanah ditunjukan dalam gambar (2.14) dengan asumsi gangguan terjadi pada fasa b dan c.



Gambar. 2.14 Gangguan dua fasa ketanah



Dalam keadaan gangguan seperti pada gambar di atas di dapat persamaan sebagai berikut :

$$V_b = 0 \quad V_c = 0 \quad I_a = 0$$

Dengan $V_b = 0$ dan $V_c = 0$ komponen-komponen simetris tegangan di dapat dari :

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

$$V_{a1} = \frac{1}{3} (V_a)$$

$$V_{a2} = \frac{1}{3} (V_a)$$

Maka dari persamaan diatas didapat matriksnya :

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Dari persamaan diatas dapat kita peroleh V_{a0} sama dengan $V_a/3$ dan

$$V_{a1} = V_{a2} = V_{a0} \tag{2.18}$$

$I_{a1} + I_{a2} + I_{a0} = 0$ maka akan kita dapatkan persamaan :

$$\frac{Ea}{Z_0} - I_{a1} \frac{Z_1}{Z_0} + \frac{Ea}{Z_1} - I_{a1} + \frac{Ea}{Z_2} - I_{a1} \frac{Ea}{Z_1} = \frac{Ea}{Z_1} \tag{2.19}$$

Dan dengan menggabungkan suku – sukunya akan kita dapatkan persamaan

$$I_{a1} \left[1 + \frac{Z_1}{Z_0} + \frac{Z_1}{Z_2} \right] = \frac{Ea (Z_2 + Z_0)}{Z_2 Z_0} \tag{2.20}$$

$$\begin{aligned} I_{a1} &= \frac{Ea}{Z_1 + Z_2 [Z_0 + 3Z_1]} \\ &= \frac{Ea}{Z_1 + \frac{Z_2(Z_0 + 3Z_1)}{Z_2 + Z_0 + 3Z_1}} \end{aligned} \tag{2.21}$$

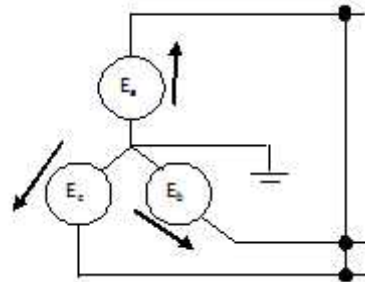
Persamaan diatas adalah persamaan untuk gangguan dua fasa ketanah.



4. Gangguan Tiga Fasa

Gangguan tiga fasa adalah gangguan dalam sistem tenaga listrik yang jarang terjadi, tetapi dalam analisisnya harus tetap diperhitungkan.

Diagram rangkain untuk suatu gangguan tiga fasa dengan asumsi gangguan terjadi pada semua fasa (a, b, dan c).



Gambar 2.15 Gangguan tiga fasa

Dari gambar di atas didapatkan rumus

$$I_a = \frac{E_a}{Z_1} \quad (2.22)$$

dimana:

I_a = arus yang mengalir pada setiap fasa sewaktu terjadi gangguan hubung singkat di suatu titik di dalam sistem (A).

E_a = besar tegangan tiap fasa terhadap netral sistem (V).

Z_1 = impedansi ekivalen urutan positif. Dikatakan ekivalen karena mewakili seluruh impedansi di dalam sistem yang terhubung seri atau paralel dari sumber sampai dengan titik gangguan.

2.8.4 Gangguan simetris dan gangguan tak simetris

Menurut teori Fortescue, dalam sistem tak seimbang yang terdiri dari n buah pasor yang saling berhubungan dapat diuraikan menjadi n buah sistem dengan pasor seimbang, ini dikatakan sebagai komponen simetris

Jika tiga pasor tak seimbang dari suatu sistem tiga fasa dapat diuraikan menjadi tiga sistem pasor yang seimbang, dimana komponen-komponennya sebagai berikut:

- Komponen urutan positif yang terdiri dari tiga pasor yang sama besarnya dalam magnitude, dimana masing-masing terpisah satu dengan lainnya dalam sudut fasa 240^0 dan mempunyai urutan fasa sama seperti pasor aslinya.



- b. Komponen urutan negatif yang terdiri dari tiga pasor yang sama besarnya dalam magnitude, dimana masing-masing terpisah satu dengan lainnya dalam sudut fasa 120^0 dan mempunyai urutan fasa berlawanan dengan pasor aslinya.
- c. Komponen urutan nol yang terdiri dari tiga pasor yang sama besarnya dalam magnitude, dengan pergeseran fasa nol antara fasa yang satu dengan yang lainnya.

Secara umum, bahwa notasi untuk penyelesaian komponen simetris dalam system tiga fasa mempergunakan notasi a, b, dan c. Untuk urutan fasa tegangan atau arus urutan positif adalah a b c dan urutan negative a c b.

Jika pasor aslinya adalah tegangan, maka tegangan tersebut dapat dinyatakan sebagai berikut :

Tegangan urutan positif : $V_a^{(1)}, V_b^{(1)}, V_c^{(1)}$

Tegangan urutan negatif : $V_a^{(2)}, V_b^{(2)}, V_c^{(2)}$

Tegangan urutan nol : $V_a^{(0)}, V_b^{(0)}, V_c^{(0)}$

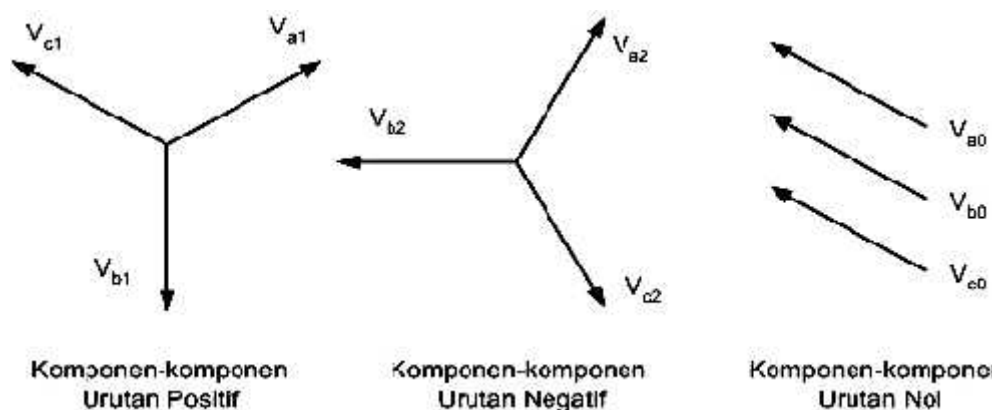
dimana:

V_a : Tegangan fasa a

V_b : Tegangan fasa b

V_c : Tegangan fasa c

Tujuan lain adalah untuk memperlihatkan bahwa setiap fasa dari sistem tiga fasa tak seimbang dapat di pecah menjadi tiga set komponen.



Gambar 2.16 Vektor diagram untuk komponen simetris

Cara yang biasa dilakukan dalam menghitung besar arus gangguan hubung singkat pada komponen simetris adalah memulai perhitungan pada rel



daya tegangan primer di gardu induk untuk berbagai jenis gangguan, kemudian menghitung pada titik-titik lainnya yang letaknya semakin jauh dari gardu induk tersebut.

Impedansi saluran suatu sistem tenaga listrik tergantung dari jenis konduktornya yaitu dari bahan apa konduktor itu di buat yang juga tentunya pula dari besar kecilnya penampang konduktor dan panjang saluran yang digunakan jenis konduktor ini. Suatu komponen urutan arus menyebabkan tegangan jatuh sesuai dengan urutan arusnya dan tidak mempengaruhi urutan arus lainnya, berarti tiap urutan yang seimbang akan terdiri dari suatu jaringan. Ketidak seimbangan arus atau tegangan ini akan menimbulkan pula impedansi urutan positif, urutan negatif dan urutan nol. Impedansi urutan dapat didefinisikan sebagai suatu impedansi yang dirasakan arus urutan bila tegangan urutannya di pasang pada peralatan atau pada sistem tersebut. Seperti juga tegangan dan arus di dalam metode komponen simetris di kenal tiga macam impedansi urutan yaitu :

a. Impedansi urutan positif (Z_1)

Impedansi urutan positif adalah impedansi tiga fasa simetris yang terukur bila dialiri oleh arus urutan positif.

b. Impedansi urutan negatif (Z_2)

Impedansi urutan negatif adalah impedansi tiga fasa simetris yang terukur bila dialiri oleh arus urutan negatif

c. Impedansi urutan nol (Z_0)

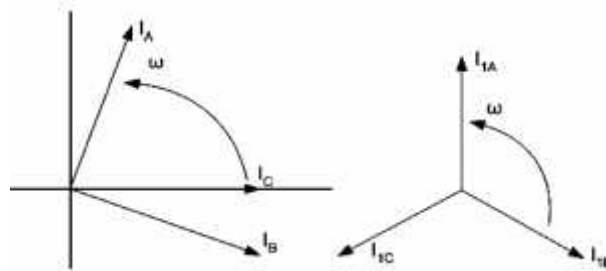
Impedansi urutan nol adalah impedansi tiga fasa simetris yang terukur bila dialiri arus urutan nol.

Metoda komponen simetris yang digunakan dalam perhitungan yang berhubungan dengan keadaan yang tidak seimbang pada perangkat listrik tiga fasa, dan secara khusus untuk perhitungan hubung singkat yang tidak seimbang pada perangkat listrik. Cara yang biasa dilakukan dalam menghitung besar arus gangguan hubung singkat pada komponen simetris adalah memulai perhitungan pada rel daya tegangan primer di gardu induk untuk berbagai jenis gangguan, kemudian menghitung pada titik-titik lainnya yang letaknya semakin jauh dari gardu induk tersebut.



Untuk suatu transformator, impedansi urutan positifnya sama dengan impedansi bocor transformator tersebut. Begitu juga dengan impedansi urutan negatifnya. Sedangkan besar impedansi urutan nol transformator tergantung dari hubungan transformator dengan impedansi pentanahannya. Sedangkan pada busbar impedansi yang dihitung adalah impedansi pada saluran yang digunakan. Impedansi saluran suatu sistem tenaga listrik tergantung dari jenis konduktornya yaitu dari bahan apa konduktor itu di buat yang juga tentunya pula dari besar kecilnya penampang konduktor dan panjang saluran yang digunakan jenis konduktor ini.

Metode komponen simetris di dalam perhitungan tak seimbang dari sistem 3 fasa dan khususnya pada keadaan hubungan singkat. Arus 3 fasa tak seimbang I_A , I_B , dan I_C seperti gambar di bawah ini.



Gambar 2.17 Arus 3 fasa tak seimbang I_A , I_B , dan I_C

Komponen urutan positif, negatif, dan urutan nol dari arah dan tegangan dihubungkan satu dengan yang lainnya dengan impedansi yang sesuai dengan urutan positif, negatif, dan nol.

Pada perhitungan arus hubungan singkat dengan metode komponen simetris biasanya aktif resistansi sangat kecil sehingga sering diabaikan, sehingga yang di pandang adalah reaktansi yang dinyatakan berturut-turut X_1 , X_2 , dan X_0 (urutan positif, negatif, dan nol).

Urutan fasa positif reactance X_1 adalah reactance dari keadaan rangkaian seimbang 3 fasa. Urutan fasa negatif reaktansi X_2 untuk semua sistem elemen listrik tanpa perputaran medan magnet adalah sama, dengan urutan positif. Komponen urutan positif, negatif, dan urutan nol dari arah dan tegangan dihubungkan satu dengan yang lainnya dengan impedansi yang sesuai dengan urutan positif, negatif, dan nol.



Pada perhitungan arus hubungan singkat dengan metode komponen simetris biasanya aktif resistansi sangat kecil sehingga sering diabaikan, sehingga yang di pandang adalah reaktansi yang dinyatakan berturut-turut X_1 , X_2 , dan X_0 (urutan positif, negatif, dan nol).

Urutan fasa positif reaktansi X_1 adalah reaktansi dari keadaan rangkaian seimbang 3 fasa. Urutan fasa negatif reaktansi X_2 untuk semua sistem elemen listrik tanpa perputaran medan magnet adalah sama, dengan urutan positif.

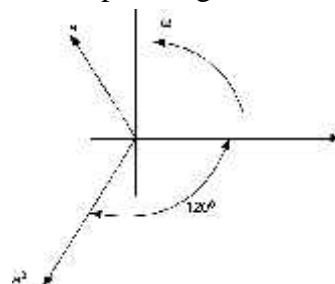
Jadi, untuk transformator, reaktor, kawat penghantar daya = $X_2 = X_1$. Untuk mesin sinkron $X_2=X_1$ tergantung dari perencanaan. Urutan fasa nol reaktansi pada umumnya berbeda dasarnya dengan urutan positif dan negatif. Setiap arus sistim ini dapat dipecahkan menjadi penjumlahan vektor yang membentuk sistim 3 fasa yang simetris yaitu urutan fasa positif, fasa negatif, dan fasa nol.

$$I_A = I_{1A} + I_{2A} + I_{0A}. \quad (2.23)$$

$$I_B = I_{1B} + I_{2B} + I_{0B}. \quad (2.24)$$

$$I_C = I_{1C} + I_{2C} + I_{0C}. \quad (2.25)$$

Fasa urutan positif ditandai dengan indeks 1, urutan fasa negatif ditandai dengan indeks 2, urutan nol dengan indeks 0. Semua urutan fasa reaktor arus dimisalkan mempunyai kecepatan dan arah putaran yang sama. Arah putaran positif diambil berlawanan dengan arah jarum jam. Pada analisa simetri hubungan singkat sering bahwa komponen fasa B dan C dinyatakan dengan komponen fasa A dengan mempergunakan fasa operator a . Operator a adalah unit vektor yang membentuk sampai dengan 120° dengan nyala positif.



.Gambar 2.18 Vektor diagram untuk komponen simetris positif

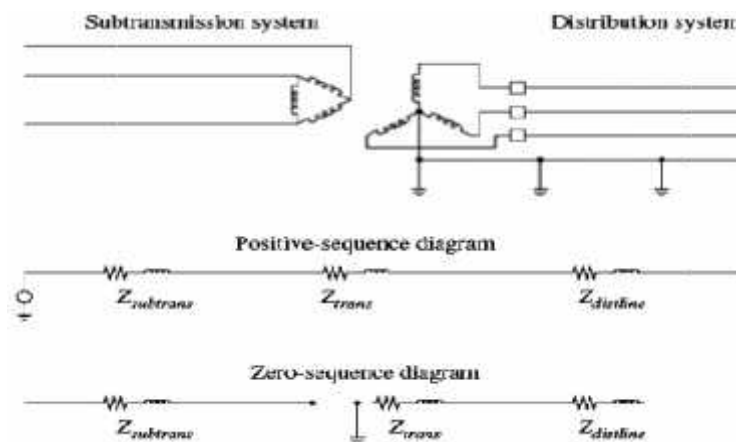


Mengalikan vektor dengan a menghasilkan putaran 120° , mengalikan dengan a^2 menghasilkan putaran 240° . Dengan adanya operator a cukup menghitung arus dan tegangan untuk 1 fasa pada hubungan singkat, impedansi urutan positif sama dengan impedansi urutan negatif. Impedansi untuk kedua komponen urutan pada gangguan fasa ke fasa adalah $Z+Z_2$ dapat disederhanakan menjadi $2Z_1$. Arus maksimum terjadi jika $R_F=0$.

Arus maksimum pada gangguan fasa-fasa 86,6% dari arus maksimum gangguan tiga fasa. Pada kebanyakan kasus arus beban diabaikan, hal ini disebabkan karena arus beban tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap hasil perhitungan.

Arus gangguan tiga fasa hampir selalu mempunyai magnitude yang lebih besar. Pada beberapa jaringan, impedansi urutan nol lebih signifikan dibandingkan komponen urutan positif. Pada lokasi tertentu arus gangguan fase ke tanah dapat menjadi lebih besar, misalnya pada gardu induk. Alasannya adalah :

1. Hubungan delta-ye transformator adalah sumber komponen urutan nol. Komponen urutan positif merupakan impedansi saluran sistem subtransmisi atau sistem transmisi, komponen urutan nol tidak.
2. Jika transformator gardu jenis three-legged, komponen urutan nol lebih rendah dibandingkan komponen urutan positif, impedansi urutan nol 85% dari komponen urutan positif. Jika terjadi gangguan fasa tanah meningkat 2,5%.



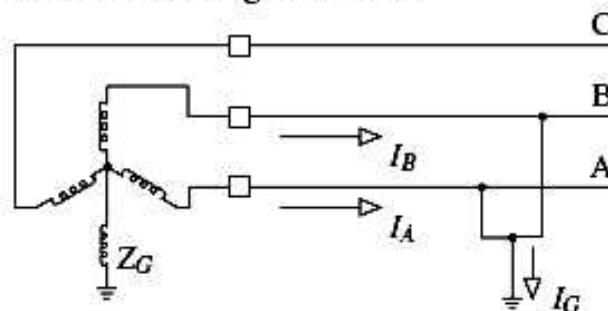
Gambar 2.19 Diagram urutan positif dan urutan nol pada transformator terhubung delta dan way



Pada beberapa kasus dimana impedansi urutan nol lebih kecil dibandingkan impedansi urutan positif, gangguan fase ke tanah mengakibatkan arus fasa yang lebih tinggi. Gangguan dua fasa ke tanah menghasilkan arus tanah yang lebih tinggi.

Untuk mengurangi arus gangguan pada gangguan fasa ketanah, dapat digunakan reaktor netral pada transformator.

Line-to-line-to-ground fault



dimana :

Z_G : impedansi pada pentanahan

I_A : arus pada fasa A

I_B : arus pada fasa B

I_G : arus gangguan ke tanah

Gambar 2.20 Gangguan 2 fasa ketanah

1. Gangguan Simetris

Gangguan simetris merupakan gangguan dimana besar magnitudo dari arus gangguan sama pada setiap fasa. Gangguan ini terjadi pada gangguan hubung singkat tiga fasa. Perhitungan arus gangguan dari dihitung menggunakan persamaan (1), hanya saja ketikagangguan simetris terjadi, tidak terjadi busur dikarenakan konduktor tidak menyentuh tanah.

Sehingga persamaannya menjadi :

$$I_{fault} = \frac{V_{source}}{Z_s + Z_l}$$

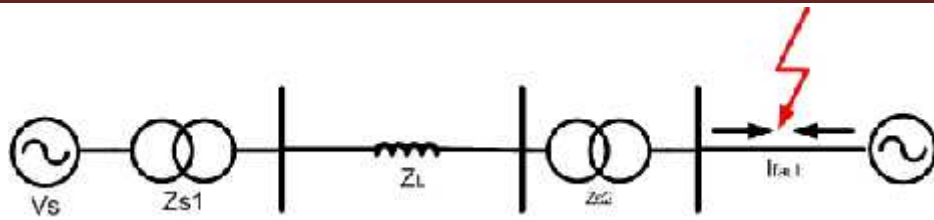
dimana

I_{fault} : arus gangguan

V_{source} : tegangan system

Z_s : impedansi peralatan sistem.

Z_l : impedansi saluran sistem.



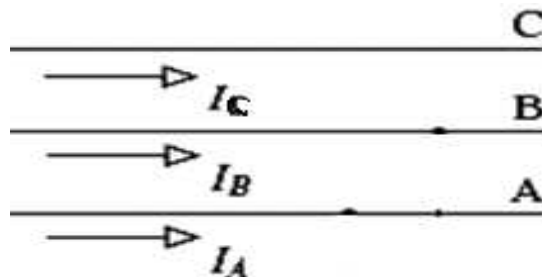
Gambar 2.21 Diagram garis tunggal sederhana

Pada gambar di atas jika kita ingin mencari besarnya gangguan pada I_{fault} , maka sesuai dengan persamaan besarnya arus gangguan hubung singkat tiga fasa adalah:

$$I_{fault} = \frac{V_{source}}{Z_{s1} + Z_l + Z_{s2}} \quad (2.26)$$

2. Gangguan Tak Simetris

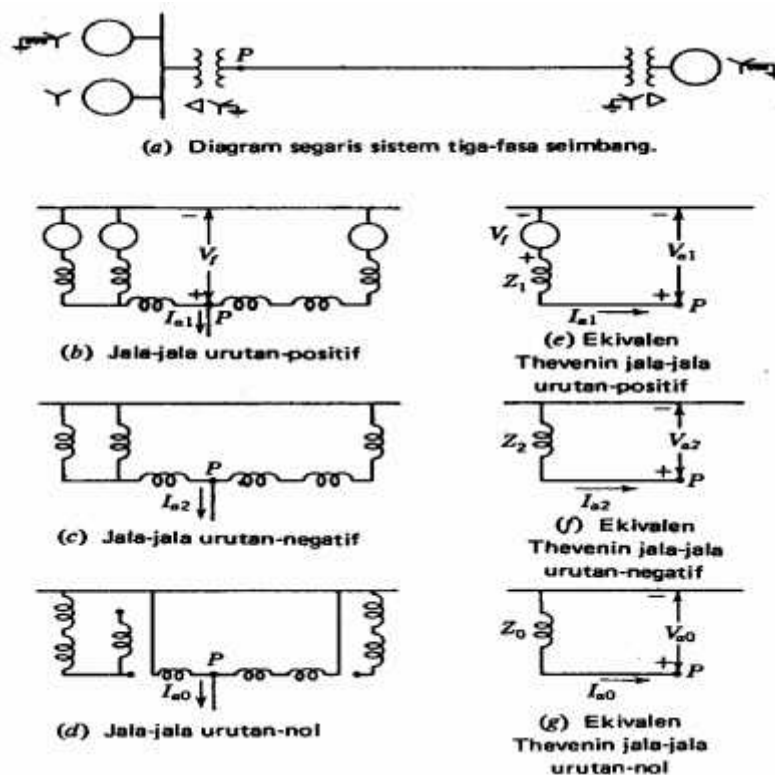
Dalam penurunan persamaan untuk komponen simetris arus dan tegangan dalam satu jaringan umum ketika terjadi gangguan, kita akan menetapkan bahwa I_a , I_b , dan I_c adalah arus yang mengalir ke luar dari sistem seimbang yang asli pada gangguan, berturut-turut dari fasa a, b, dan c. Kita dapat membayangkan arus I_a , I_b , dan I_c dengan berpedoman pada Gambar 2.24, yang menunjukkan ketiga saluran sistem tiga fasa pada bagian jaringan dimana gangguan itu terjadi. Aliran arus dari setiap saluran menuju gangguan ditunjukkan oleh panah yang digambarkan pada diagram di samping batang hipotesis yang dihubungkan ke masing-masing saluran pada tempat terjadinya gangguan. Sambungan yang sesuai dari batang tersebut melukiskan berbagai jenis gangguan. Misalnya, dengan menghubungkan batang b dan c, dihasilkan gangguan antar-saluran melalui impedansi nol. Jadi, arus pada batang a adalah nol, dan I_b sama dengan I_c



Gambar 2.22 Tiga penghantar untuk sistem tiga fasa.



Batang yang mengalirkan arus I_a , I_b , dan I_c dapat saling dihubungkan untuk melukiskan bermacam-macam jenis gangguan. Tegangan dari-saluran-ke tanah pada gangguan itu dinamakan V_a , V_b , dan V_c . Sebelum terjadinya gangguan, tegangan dari-saluran-ke netral fasa a pada itu dianggap seimbang. Diagram segaris dari sistem daya yang mengandung tiga buah mesin serempak ditunjukkan dalam Gambar 2.24. Sistem seperti ini telah di kenal sehingga persamaan yang diturunkan dari sistem tersebut dapat diterapkan pada setiap sistem seimbang.



Gambar 2.23 Diagram segaris suatu sistem tiga-fasa

Ketiga jala-jala urutannya, dan ekivalen thevenin dari setiap jala-jala untuk suatu gangguan pada P. Betapapun rumitnya. Gambar 2.25 juga menunjukkan jaringan urutan sistem. Titik yang dianggap tempat terjadinya gangguan ditandai dengan P pada diagram segaris dan pada jaringan urutan itu. Seperti telah kita ketahui bersama bahwa arus beban yang mengalir dalam jaringan urutan positif adalah sama, dan tegangan ke tanah di luar mesin juga sama, tanpa memandang apakah mesin itu dilukiskan sebagai tegangan internal sub peralihan dan reaktansi sub



peralihannya, sebagai tegangan internal peralihan dan reaktansi-peralihannya, atau sebagai tegangan tanpa beban dan reaktansi serempaknya. Karena dalam menggambar jaringan urutan telah dimisalkan adanya keadaan linier, jaringan tadi dapat diganti dengan ekivalen theveninnya di antara kedua terminal yang terdiri dari rel pedoman dan titik tempat terjadinya gangguan. Dalam gambar 2.25 rangkaian ekivalen thevenin setiap jaringan diperlihatkan di dekat diagram jaringan bersesuaian. Tegangan internal generator tunggal, pada rangkaian ekivalen untuk jaringan urutan-positif adalah V_f , yaitu tegangan pra gangguan ke netral pada titik terjadinya gangguan. Impedansi Z_t dari rangkaian ekivalen ialah impedansi yang dapat diukur di antara titik P dan rel pedoman pada jaringan urutan positif dengan semua emf dalam keadaan terhubung-singkat. Nilai Z_v tidak tergantung pada reaktansi yang digunakan dalam jaringan itu. Kita ingat misalnya, bahwa reaktansi sub peralihan generator dan 1.5 kali reaktansi subperalihan motor serempak atau reaktansi peralihan motor adalah nilai yang digunakan untuk menghitung arus simetris yang akan diputuskan.

Karena tidak ada arus urutan negatif atau nol yang mengalir sebelum terjadinya gangguan, tegangan pragangguan antara titik P dan rel pedoman pada jaringan urutan negatif dan urutan nol adalah nol. Oleh karena itu, tidak terdapat emf dalam rangkaian ekivalen jaringan urutan-negatif dan urutan-nol. Impedansi Z_2 dan Z_0 diukur antara titik P dan rel pedoman pada jaringan yang bersangkutan dan tergantung pada lokasi gangguan.

Karena I_a adalah arus yang mengalir dari sistem menuju gangguan, komponen I_{a1} , I_{a2} , dan I_{a0} mengalir keluar dari jaringan urutannya yang bersangkutan dan keluar dari rangkaian ekivalen jaringan tersebut pada P, seperti terlihat dalam gambar 2.25. Ekivalen thevenin dari jaringan urutan positif, dan persamaan matrik untuk komponen simetris tegangan pada gangguan harus sama, pengecualian bahwa V_f menggantikan E_a jadi,

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ V_f \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix}$$

(2.27)



Sudah tentu, kita harus menghitung impedansi urutan dengan semestinya sesuai dengan teorema thevenin dan menyadari bahwa arus itu adalah komponen urutan pada batang hipotetis seperti yang telah kita tunjukkan.

2.9 Menghitung Impedansi

Kumparan (gulungan) primer dan sekunder selalu mempunyai rating kVA yang sama, tetapi kumparan-kumparan dari transformator mempunyai rating kVA yang berbeda impedansi masing-masing tiga kumparan transformator dapat di berikan dalam persen atau satuan dengan dasar rating kumparan itu sendiri atau pengujian yang dapat dilakukan untuk menentukan impedansi. Impedansi di ambil dari arus beban puncak yang mengalir dari sistem interkoneksi ke gardu induk. Besar arus dan tegangan hasil analisa inilah yang diperlukan oleh engineer proteksi, sehingga bila gangguan hubung singkat itu benar-benar terjadi di dalam sistem, peralatan proteksi dapat bekerja mengamankan bagian sistem yang terganggu sesuai yang diharapkan.

Berdasarkan beberapa persamaan maka dapat kita cari urutan impedansi adalah sebagai berikut :

$$Z_1 = \frac{(KV)^2}{MVA} \times Z \% \quad (2.28)$$

$$Z_2 = Z_1 \quad (2.29)$$

Besar urutan nol (0) untuk transformator hubungan Yny0 adalah

$$Z_0 = 10 \times Z_2 \quad (2.30)$$