

BAB II

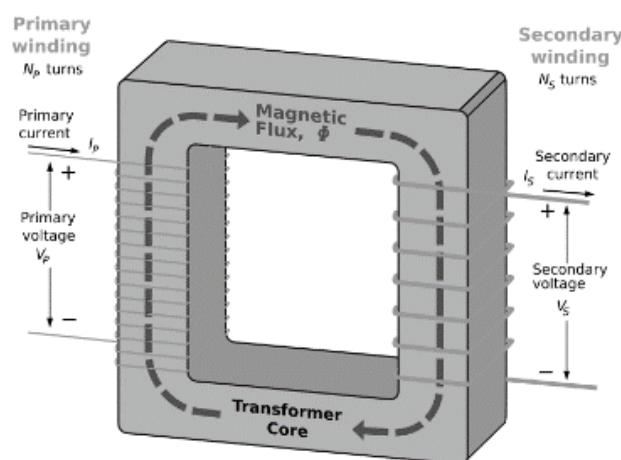
LANDASAN TEORI

2.1 Transformator

Transformator adalah suatu alat listrik yang dapat memindahkan dan mengubah energi listrik dari satu atau lebih rangkaian listrik ke rangkaian yang lain melalui suatu gandengan magnet dan berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik.

Landasan fisik transformator adalah induktansi mutual (timbal balik) antara kedua rangkaian yang dihubungkan oleh suatu fluks magnetik bersama yang melewati suatu jalur dengan reluktansi rendah. Kedua kumparan memiliki induktansi mutual yang tinggi. Jika satu kumparan disambung pada suatu sumber tegangan bolak-balik, suatu fluks bolak-balik terjadi di dalam inti berlaminasi, yang sebagian besar akan mengait pada kumparan lainnya, dan di dalamnya akan terinduksi suatu gaya gerak-gerak listrik sesuai dengan hukum induksi elektromagnetik Faraday.

Bilamana rangkaian sekunder ditutup, suatu arus akan mengalir, dengan demikian energi listrik dipindah (sepenuhnya secara magnetik) dari kumparan primer ke kumparan sekunder



Gambar 2.1 Skema Prinsip Kerja transformator dengan Kumparan Primer dan Sekunder serta Rangkaian Magnetik

Dalam bidang tenaga listrik pemakaian transformator dikelompokkan menjadi :

1. Transformator daya.
2. Transformator distribusi.
3. Transformator pengukuran (transformator arus dan transformator tegangan).

2.1.1 Konstruksi Transformator

Umumnya konstruksi transformator terdiri dari :

1. Inti

Inti yang terbuat dari lembaran-lembaran plat besi lunak atau baja silikon yang diklem menjadi satu. Inti tersebut berfungsi untuk membangkitkan fluksi yang timbul karena arus listrik dalam belitan atau kumparan trafo.

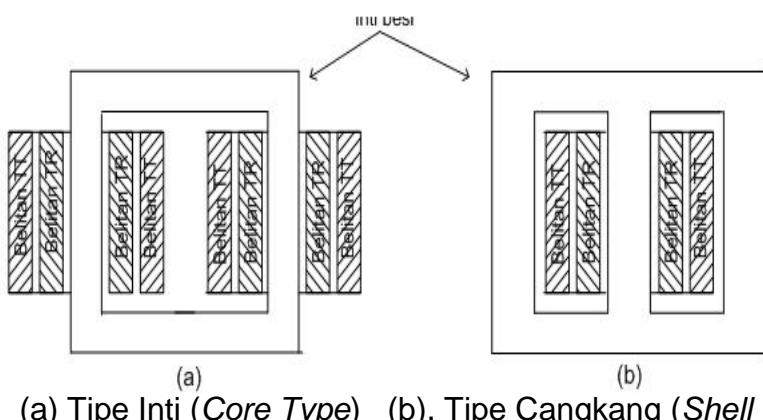
2. Kumparan atau Belitan

Kumparan atau belitan terbuat dari tembaga yang cara melilitkannya pada inti dapat konsentris atau spiral. Kumparan atau belitan terdiri dari belitan sekunder dan belitan primer. Kumparan primer adalah yang menerima daya dan kumparan sekunder yang tersambung pada beban.

3. Sistem Pendingin

4. *Bushing*

Bushing untuk menghubungkan rangkaian dalam transformator dengan rangkaian luar. Berdasarkan cara melilitkan kumparan pada inti, ada dua tipe inti besi transformator yaitu tipe cangkang (*Shell Type*) dan tipe inti (*Core Type*).



(a) Tipe Inti (*Core Type*) (b). Tipe Cangkang (*Shell Type*)

Gambar 2.2 Inti Besi Transformator

Transformator yang umum digunakan untuk sistem distribusi adalah transformator fasa tiga dan fasa satu, sedangkan transformator fasa tiga merupakan transformator yang paling banyak dipakai.

2.1.2 Peralatan Bantu

1. Pendingin

Pendingin pada transformator berfungsi untuk menjaga agar transformator bekerja pada suhu rendah. Untuk mempercepat pendinginan transformator dilengkapi dengan kipas yang dipasang pada radiator transformator dan pompa minyak agar sirkulasi minyak lebih cepat dan pendinginan lebih optimal.

2. *Tap Changer*

Tap changer merupakan alat penstabil tegangan keluaran pada sisi sekunder transformator daya. Prinsip kerja alat ini adalah dengan mengubah jumlah kumparan primer yang memiliki input tegangan yang berubah-ubah untuk mendapatkan nilai tegangan output yang konstan.

3. Alat Pernapasan (*Dehydrating Breather*)

Untuk mencegah terjadinya kontaminasi minyak transformator terhadap udara luar yang masuk kembali ke transformator, maka sebuah transformator daya dilengkapi dengan alat pernapasan berupa tabung yang berisi zat kristal (*silica gel*) yang terpasang dibagian luar transformator.

4. NGR (*Neutral Grounding Resistance*)

Tujuan dipasangnya NGR adalah untuk mengontrol besarnya arus gangguan yang mengalir dari sisi netral ke tanah.

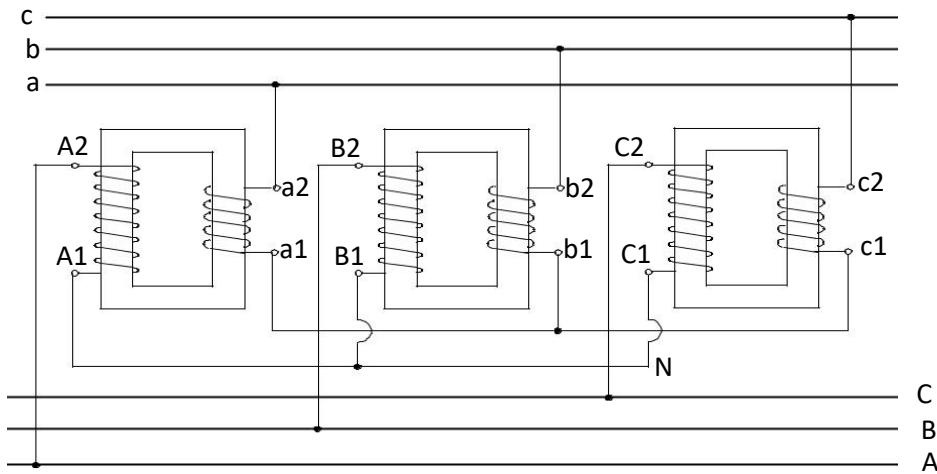
5. Indikator-indikator

Indikator transformator terdiri dari :

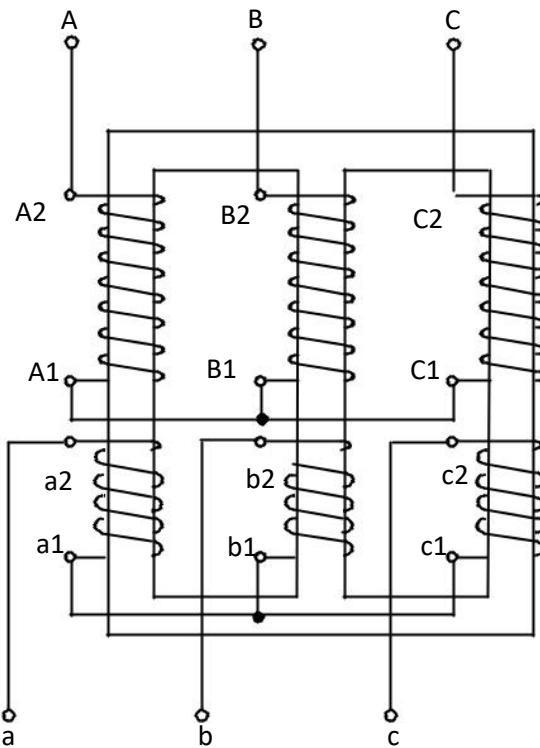
- a. Indikator suhu minyak
- b. Indikator permukaan minyak
- c. Indikator suhu belitan
- d. Indikator kedudukan tap

2.1.3 Transformator Tiga Fasa

Transformator fasa tiga dapat berupa: 1 unit transformator fasa tiga atau 3 unit dari transformator fasa tunggal.



Gambar 2.3 Transformator Fasa Tiga yang terdiri dari 3 buah Transformator Fasa Tunggal



Gambar 2.4 Satu Unit Transformator Fasa Tiga

2.2 Fungsi Transformator

Trafo adalah salah satu komponen yang terpenting dari bermacam rangkaian elektrik dengan rentang dari daya rendah, arus rendah dan rangkaian kontrol hingga sistem daya dengan tegangan sangat tinggi. Trafo dibangun dalam ukuran yang besar, mulai dari unit-unit yang kecil yang digunakan untuk komunikasi sampai ukuran besar dalam sistem transmisi dan pembangkitan dengan tegangan tinggi, yang mempunyai berat ratusan ton.

Tugas yang paling penting dari trafo adalah :

1. Mengubah level tegangan dan arus dalam sistem tenaga listrik,
2. *Matching* impedansi sumber dan beban untuk menyalurkan daya maksimum dalam rangkaian elektronik dan kontrol.
3. Sebagai isolasi elektrik, yang mengisolasi suatu rangkaian dengan rangkaian yang lain atau mengisolasi dc untuk mempertahankan ac diantara dua rangkaian.

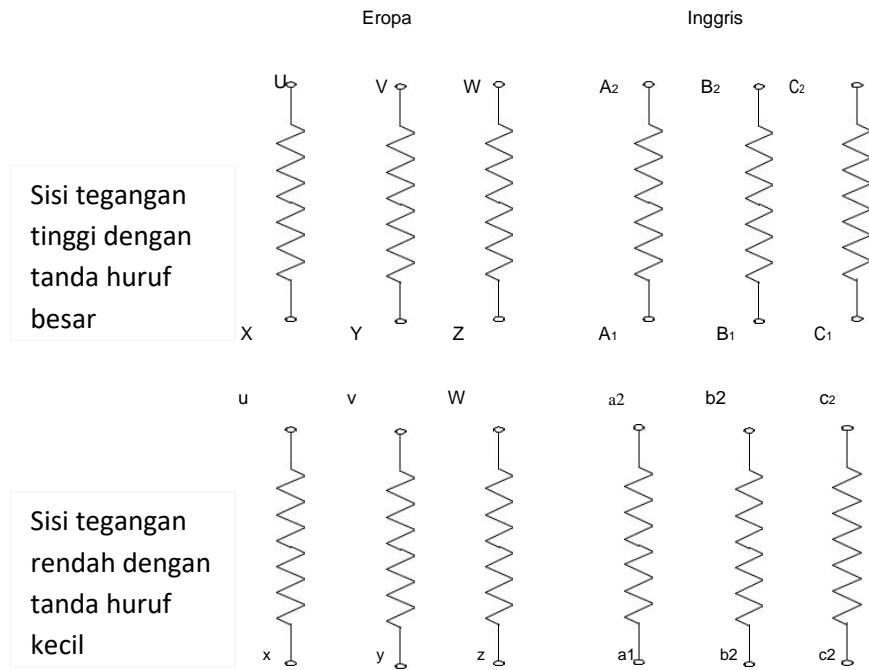
2.3 Polaritas dan Vektor Group Transformator

2.3.1 Polaritas Transformator Disisi Sumber dan Beban

Sisi tegangan tinggi pada transformator sebagai sisi primer dan sisi tegangan rendah pada transformator sebagai sisi sekunder. Tetapi dari arah aliran daya sisi primer adalah beban dan sisi sekunder adalah sumber.Untuk penandaan ujung-ujung belitan pada transformator dilakukan sesuai dengan standar yang dipakai oleh pabrikan dari beberapa negara yaitu:

Tabel 2.1. Standar Penandaan Ujung – ujung Belitan Beberapa Negara

Negara	Tanda Ujung Belitan					
	Sisi Tegangan Tinggi			Sisi Tegangan Rendah		
Eropa	U	V	W	U	v	W
Inggris	A	B	C	A	b	C
Amerika	H ₁	H ₂	H ₃	X ₁	X ₂	X ₃
IEC	I	II	III	I	ii	iii



Gambar 2.5 Penandaan Ujung-Ujung Belitan Pada Transformator

2.3.2 Vektor Group Transformator

Jika terminal-terminal primer dan sekunder transformator tiga fasa dihubungkan dengan hubungan Y atau D, maka antara urutan fasa yang sama di primer dan sekunder bisa terjadi perbedaan sudut. Artinya fasa R di primer dan fasa r di sekunder tidak lagi sefasa. Untuk menyatakan pergeseran sudut ini biasanya dilakukan patokan (referensi) penunjukan arah jarum jam.

Pergeseran sudut sebesar 1 jam sama dengan 30° listrik. Berikut adalah tabel vektor group transformator tiga fasa :

Tabel 2.2. Vektor Group Transformator Tiga Fasa

Group	Connection	Connection	Connection
0	 	 	
1	 	 	
5	 	 	
6	 	 	
11	 	 	

2.4 Sistem Kelistrikan Pada Pusat Pembangkit

2.4.1 Peralatan Bantu Pada Pusat Pembangkit

Peralatan bantu yang dikaitkan dengan unit disebut unit Peralatan-bantu, dan dipasok oleh generator melalui Trafo Pemakaian Sendiri / *Unit Auxiliary Transformer* (UAT), yang disebut sebagai transformator pelayanan unit.

Catu daya untuk peralatan-peralatan pembangkit / pemakaian sendiri diperoleh dari:

1. Transformator Pelayanan Stasiun (*Station Service Transformer*) atau disebut juga sebagai starting transformer diperuntukkan untuk melayani peralatan-peralatan pembangkit pada waktu menghidupkan (*start up*) dan untuk peralatan bantu stasiun yang dayanya diperoleh dari Gardu Induk (70kV atau 150kV/6kV atau 10kV). Transformator ini memberikan pelayanan pada Sistem Tegangan Menengah.
2. Transformator Pelayanan Unit (*Unit Auxiliary Transformer*) disebut juga sebagai Transformer Pemakaian Sendiri, diperuntukkan untuk melayani peralatan pembangkit setelah unit pembangkitnya mulai dibebani, yang dayanya diperoleh langsung dari generator. Transformator ini memberikan pelayanan pada Sistem Tegangan Menengah.
3. Rel *start-up* tegangan menengah, yang dapat terhubung dengan keseluruhan unit-unit pembangkit yang dayanya diperoleh dari transformator-transformator stasiun. Hal ini terdapat pada unit-unit besar, untuk keluwesan pemilihan catu daya.
4. Generator cadangan (*Standby Generator*), yang diperlukan apabila dari catu daya seperti tersebut dalam butir 1, 2 dan 3, oleh karena sesuatu hal tidak berfungsi. Generator ini pada umumnya membangkitkan daya listrik terbatas hanya untuk Sistem Tegangan Rendah dengan beban-beban penting yang dipilih. Secara umum, fungsi penyediaan sumber daya listrik untuk sistem tersebut akan dilayani oleh unit pembangkit yang bersangkutan, bila unit tersebut diistirahatkan, maka fungsi penyediaan sumber daya listrik ini akan dilayani oleh sumber.

2.4.2 Transformator Pemakaian Sendiri / *Unit Auxilliary Transformer*

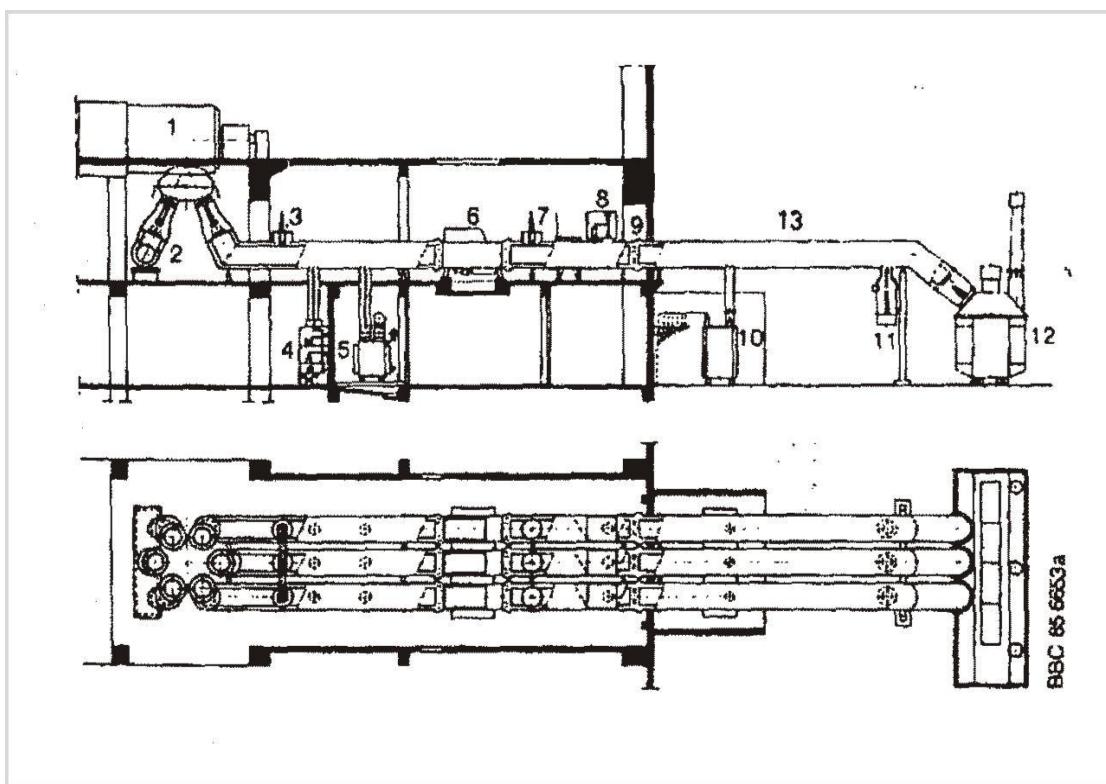
Transformator pemakaian sendiri mendapat pasokan daya dari rel pusat listrik kemudian memasok daya ke rel pemakaian sendiri. Rel pemakaian sendiri digunakan untuk memasok instalasi pemakaian (di dalam pusat listrik) sendiri, yaitu untuk :

1. Lampu penerangan
2. Penyejuk udara
3. Menjalankan alat-alat bantu unit pembangkit, seperti : pompa air pendingin, pompa minyak pelumas, pompa transfer bahan bakar minyak, mesin pengangkat, dan lain-lain.
4. Alat-alat dan mesin per Bengkelan yang merupakan unsur pendukung pemeliharaan dan perbaikan pusat listrik
5. Pengisian baterai aki yang merupakan sumber arus searah bagi pusat listrik

2.5 Sistem Rel Fasa Terisolasi (*Isolated Phase Bus System*) atau *Generator Busducts*

Sistem rel fasa terisolasi untuk generator atau generator busducts adalah bagian dari instalasi listrik dalam Pusat Pembangkit Tenaga. Dengan dengan tugas pokok melayani fungsi-fungsi berikut :

1. Penghubung generator dengan transformator utama, termasuk netralnya generator.
2. Penghubung cabang ke transformator pemakaian sendiri dan transformator penguatan dan e-kubikel trafo tegangan.
3. Dipasang dan dihubungkan dengan alat pengukuran isyarat dan alat pengamanan untuk arus, tegangan dan peralatan lainnya.
4. Dilengkapi dan dihubungkan dengan peralatan switching seperti PMT Generator, konektor arus besar dan sakelar pembumian.
5. Fasilitas tambahan yang terkait, misalnya untuk melindungi dan pemeliharaan sistem pembumian menjaga tekanan sistem ataupendingan paksa.



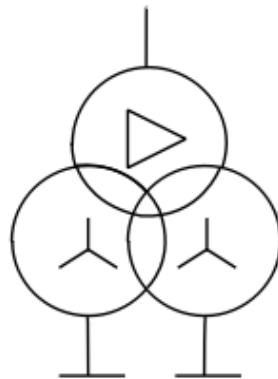
Gambar 2.6 Instalasi Peralatan Hubung Generator

Keterangan Gambar 2.6. Instalasi peralatan hubung Generator :

1. Generator,
2. Netral Generator,
3. Penghubung singkat dan peralatan pembumian,
4. Trafo pengukuran dalam kubikel,
5. Trafo *Exciter*,
6. PMT Generator,
7. Sakelar pembumian,
8. Transformator tegangan,
9. Sambungan untuk ekspansi tabung,
10. Transporimator pemakaian sendiri,
11. *Arrester*,
12. Transformator utama,
13. Rel terselubung untuk arus tinggi (*High Current Busduct*)

2.6 Transformator Dengan Tiga Gulungan

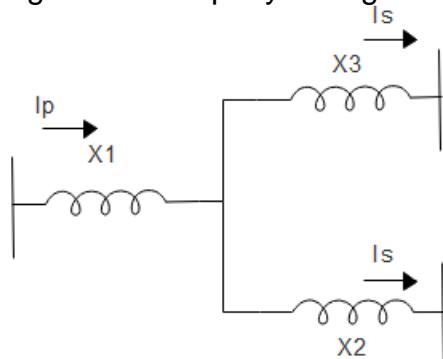
Secara umum trafo yang mempunyai tiga gulungan digunakan sebagai trafo daya, dimana fungsi trafo daya untuk menyalurkan tenaga atau daya listrik dari tegangan tinggi ke tegangan rendah atau sebaliknya. Trafo yang mempunyai tiga gulungan (*Three Winding*) berbeda dengan trafo biasanya, dikarenakan trafo yang mempunyai tiga gulungan mempunyai 1 sisi di sisi primer / sekunder dan 2 sisi di sisi primer / sekunder. Dimana masing-masing sisi mempunyai tahanan yang berbeda tergantung dari besar daya pemakaian trafo.



Gambar 2.7 Transformator Dengan 3 Gulungan (*Three Winding*)

2.6.1 Rangkaian Ekivalen Trafo 3 Gulungan

Trafo gulungan tiga fasa mempunyai rangkaian ekivalennya sebagai berikut :



Gambar 2.8 Rangkaian Ekivalen Trafo 3 Gulungan Dengan 2 Sisi Sekunder

Dari gambar diatas bahwa arus primer terbagi menjadi 2, dimana Pada transformator Ideal perbandingan antara tegangan sebanding dengan perbandingan jumlah lilitannya. Dengan demikian dapat dituliskan dengan persamaan berikut:

$$P_{\text{primer}} = P_{\text{sekunder}},$$

$$V_p \times I_p = V_s \times I_s$$

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{I_s}{I_p}$$

$$\frac{I_s}{I_p} = \frac{N_p}{N_s}$$

Sehingga besar jumlah lilitan mempengaruhi besar pada arus yang mengalir, dimana lilitan pada trafo merupakan nilai X yang terdapat pada gambar. Pada trafo yang mempunyai 3 belitan, arus primer terbagi menjadi 2 sisi, dimana setiap sisi mempunyai besar X yang berbeda maupun sama tergantung dari besar daya yang ingin di salurkan terhadap kebutuhan.

2.7 Pengertian Gangguan

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

2.8 Klasifikasi Gangguan

Berikut ini merupakan klasifikasim gangguan yang terdapat pada sistem tenaga listrik :

1. Berdasarkan Kesimetrisannya
 - a. Gangguan Asimetris, merupakan gangguan yang mengakibatkan tegangan dan arus yang mengalir pada setiap fasanya menjadi tidak seimbang, gangguan ini terdiri dari :
 - Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah
 - Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa
 - Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah
 - b. Gangguan Simetris, merupakan gangguan yang terjadi pada semua fasanya sehingga arus maupun tegangan setiap fasanya tetap seimbang setelah gangguan terjadi. Gangguan ini terdiri dari :
 - Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa
 - Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah

2. Berdasarkan lama terjadi gangguannya
 - a. Gangguan Transient (temporer), merupakan gangguan yang hilang dengan sendirinya apabila pemutus tenaga terbuka dari saluran transmisi untuk waktu yang singkat dan setelah itu dihubungkan kembali.
 - b. Gangguan Permanen, merupakan gangguan yang tidak hilang atau tetap ada apabila pemutus tenaga terbuka pada saluran transmisi untuk waktu yang singkat dan setelah itu dihubungkan kembali.

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

2.9 Sistem Proteksi

Sistem proteksi adalah perlindungan atau isolasi pada bagian yang memungkinkan akan terjadi gangguan atau bahaya. Tujuan utama proteksi adalah untuk mencegah terjadinya gangguan atau memadamkan gangguan yang telah terjadi dan melokalisirnya, serta membatasi pengaruh-pengaruhnya, biasanya dengan mengisolir bagian-bagian yang terganggu tanpa mengganggu bagian-bagian yang lain. Ada beberapa kriteria yang perlu diketahui pada pemasangan suatu sistem proteksi dalam sistem tenaga listrik diantaranya:

1. Sensitifitas (kepekaan)

Sensitifitas adalah kepekaan rele proteksi terhadap segala macam gangguan dengan tepat yakni gangguan yang terjadi didaerah perlindungannya. Sensitifitas 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.

2. Selektifitas 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 sebagian 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 diluar proteksinya.

3. Kecepatan

Sistem proteksi perlu memiliki tingkat kecepatan sebagaimana ditentukan sehingga meningkatkan mutu pelayanan, keamanan manusia, peralatan dan stabilitas operasi.

4. Keandalan

Suatu sistem proteksi dapat dikatakan andal jika selalu berfungsi sebagaimana yang diharapkan. Sistem proteksi tersebut disebut tidak andal bila gagal bekerja pada saat dibutuhkan dan bekerja pada saat proteksi itu tidak seharusnya bekerja.

5. Ekonomis

Suatu perencanaan teknik yang baik tidak terlepas tentunya dari pertimbangan nilai ekonomisnya. Suatu rele proteksi yang digunakan hendaknya ekonomis mungkin dengan tidak mengesampingkan fungsi dan keandalannya.

2.10 Tipe Proteksi

Secara garis besar sistem proteksi dibagi atas tiga yaitu:

1. Proteksi utama (*main protection*), merupakan proteksi utama yang ada dalam trafo serta bekerja dengan cepat dan selektif terhadap gangguan yang terjadi pada daerah yang diproteksi
2. Proteksi cadangan (*back up protection*), berfungsi jika pengaman utama mengalami kegagalan dalam mengamankan dari gangguan.
3. Proteksi tambahan untuk mengamankan / membantu proteksi utama.

2.11 Tujuan Proteksi

Tujuan pemasangan rele proteksi pada transformator daya adalah untuk mengamankan peralatan / sistem sehingga kerugian akibat gangguan dapat dihindari atau dikurangi menjadi sekecil mungkin dengan cara :

1. Mencegah kerusakan transformator akibat adanya gangguan / ketidak normalnya yang terjadi pada transformator atau gangguan pada transformator.
2. Mendeteksi adanya gangguan atau keadaan abnormal lainnya yang dapat membahayakan peralatan suatu sistem.
3. Melepaskan (memisahkan) bagian sistem yang terganggu atau yang mengalami keadaan abnormal lainnya secepat mungkin sehingga kerusakan instalasi yang terganggu atau yang dilalui arus gangguan dapat dihindari atau dibatasi minimum mungkin dan bagian sistem lainnya tetap dapat beroperasi.
4. Memberikan pengamanan cadangan bagi instalasi lainnya.
5. Memberikan pelayanan keandalan dan mutu listrik yang terbaik kepada konsumen.
6. Mengamankan manusia terhadap bahaya yang ditimbulkan oleh listrik

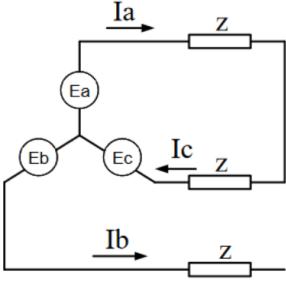
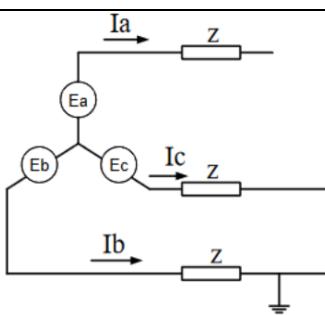
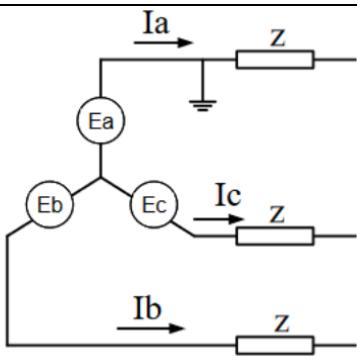
2.12 Macam-macam Gangguan Pada Transformator

2.11.1 Gangguan di Dalam Transformator

Ada beberapa jenis gangguan hubung singkat dalam sistem tenaga listrik antara lain hubung singkat 3 phasa, 2 phasa, 2 phasa ke tanah, dan satu phasa ke tanah.

Tabel 2.3 Jenis gangguan Hubung Singkat

No	Jenis Gangguan Hubung Singkat	Gambar Rangkaian
1	3 phasa	

2	2 Phasa	
3	2 phasa ke tanah	
4	1 phasa ke tanah	

2.11.2 Gangguan di Luar Transformator

Gangguan diluar, yaitu gangguan diluar jangkauan daerah perlindungan transformator daya, namun arus gangguan ini mengalir melalui transformator daya tersebut. Relai differensial tidak akan bekerja terhadap gangguan seperti ini dengan waktu tunda, yang berfungsi sebagai pengaman cadangan. Gangguan ini dapat berupa gangguan fasa ke fasa dan fasa kebumi.

Secara umum gangguan dalam kelompok (1) perlu ditangani secara serius, peralatan yang mengalami gangguan secepat mungkin dipisahkan setelah terjadi gangguan, hal ini tidak hanya membatasi kerusakan transformator daya itu sendiri tetapi juga membatasi lamanya waktu tegangan sistem turun. Bila tegangan sistem turun terlalu lama dapat menimbulkan hilangnya sinkronisasi antar mesin-mesin, dan bila ini terjadi arus lebih besar akan timbul karena

terjadinya lepas sinkron dari unit pembangkit sehingga akan ada rele yang salah bekerja, yang menyebabkan gangguan beruntun.

Gangguan pada kelompok (2) , tidak merupakan hal yang serius pada masa gangguan incipient, akan tetapi bila tidak ditangani sedini mungkin makin lama dapat menjadi besar.

2.13 Gangguan Hubung Singkat

Gangguan hubung singkat yang mungkin terjadi di dalam jaringan (sistem kelistrikan) ada 3, yaitu:

- a. Gangguan hubung singkat 3 fasa
- b. Gangguan hubung singkat 2 fasa, dan
- c. Gangguan hubung singkat 1 fasa ke tanah

Dari ketiga macam gangguan hubung singkat di atas, arus gangguannya dihitung dengan menggunakan rumus umum (hukum ohm) yaitu :

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

Dimana: I = Arus Yang mengalir pada hambatan Z

V = Tegangan Sumber (Volt)

Z = Impedansi Jaringan, nilai ekivalen dari seluruh impedansi di dalam jaringan dari sumber tegangan sampai titik gangguan (Ω/km)

Dengan mengetahui besarnya tegangan sumber dan besarnya nilai impedansi tiap komponen jaringan serta bentuk konfigurasi jaringan di dalam sistem, maka besarnya arus gangguan hubung singkat dapat dihitung dengan rumus di atas.

Yang membedakan antara gangguan hubung singkat 3 fasa dan 2 fasa adalah impedansi yang terbentuk sesuai dengan macam gangguan itu sendiri dan tegangan yang memasok arus ke titik gangguan, impedansi yang terbentuk dapat ditunjukkan seperti berikut :

Dimana: Z untuk gangguan 3 fasa $Z = Z_1$

Z untuk gangguan 2 fasa $Z = Z_1 + Z_2$

Z_1 = Impedansi urutan positif 3 fasa

Z_2 = Impedansi urutan negatif 2 fasa

Perhitungan arus gangguan hubung singkat adalah analisa suatu sistem tenaga listrik pada saat dalam keadaan gangguan hubung singkat, dimana nantinya akan diperoleh besar nilai besaran – besaran listrik yang dihasilkan sebagai akibat gangguan hubung singkat tersebut. Gangguan hubung singkat dapat didefinisikan sebagai gangguan yang terjadi akibat adanya penurunan kekuatan dasar isolasi (*basic insulation strength*) antara sesama kawat fasa, atau antara kawat fasa dengan tanah, yang menyebabkan kenaikan arus secara berlebihan atau biasa juga disebut gangguan arus lebih.

Perhitungan arus gangguan hubung singkat sangat penting untuk mempelajari sistem tenaga listrik baik pada waktu perencanaan maupun setelah beroperasinya. Perhitungan arus hubung singkat dibutuhkan untuk :

- a. *Setting* dan koordinasi peralatan proteksi
- b. Menentukan kapasitas alat pemutus daya
- c. Menentukan rating hubung singkat peralatan – peralatan yang digunakan
- d. Menganalisa sistem jika ada hal – hal yang tidak baik yang terjadi pada waktu sistem sedang beroperasi

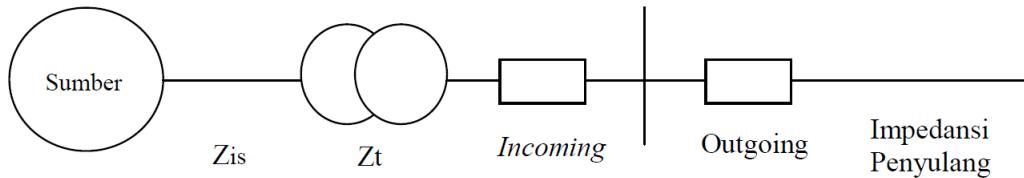
Untuk menghitung arus gangguan hubung singkat pada sistem seperti diatas dilakukan dengan beberapa tahap perhitungan, yaitu sebagai berikut :

2.13.1 Menghitung Impedansi

Dalam menghitung impedansi dikenal tiga macam impedansi urutan yaitu:

1. Impedansi urutan positif (Z_1), yaitu impedansi yang hanya dirasakan oleh arus urutan positif.
2. Impedansi urutan negatif (Z_2), yaitu impedansi yang hanya dirasakan oleh arus urutan negatif.

Sebelum melakukan perhitungan arus hubung singkat, maka kita harus 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 itu diperlukan pengetahuan mengenai dasar impedansi urutan rel daya tegangan tinggi atau bisa juga disebut sebagai impedansi sumber, impedansi transformator, dan impedansi penyulang.



Gambar 2.9 Sketsa Penyulang

Dimana :

Z_{is} = Impedansi Sumber

Z_t = Impedansi Trafo

a. Impedansi Sumber

Untuk menghitung impedansi sumber maka data yang diperlukan adalah data hubung singkat pada bus primer transformator.

$$Z_{is} = \frac{kV^2}{MVA}$$

Dimana : Z_{is} = Impedansi Sumber (ohm)

kV^2 = Tegangan sisi primer transformator tenaga (kV)

MVA = Kapasitas daya transformator tenaga (MVA)

Perlu diingat bahwa impedansi sumber ini adalah nilai ohm pada sisi *High Voltage* (HV), karena arus gangguan hubung singkat yang akan dihitung adalah gangguan hubung singkat di sisi *Low Voltage* (LV), maka impedansi sumber tersebut harus dikonversikan dulu ke sisi LV, sehingga pada perhitungan arus gangguan nanti sudah menggunakan sumber LV. Untuk mengkonversikan impedansi yang terletak di sisi HV, dilakukan dengan cara sebagai berikut:

$$Z_{is} (\text{sisi LV}) = \frac{kV^2}{MVA} \times Z_{is} (\text{sisi HV})$$

b. Menghitung Impedansi Transformator

$$Z_{it} = \frac{kV^2}{MVA (\text{trafo})}$$

Dimana : Z_{is} = Impedansi Sumber (ohm)

kV^2 = Tegangan sisi primer transformator tenaga (kV)

MVA = Kapasitas daya transformator tenaga (MVA)

Nilai impedansi urutan positif, negative ($Z_{it1}=Z_{it2}$) transformator tenaga :

$$Z_{it} = Z_{it} \% \times Z_{it} (\text{ pada } 100\%)$$

c. Menghitung Impedansi Penyulang

Menghitung impedansi penyulang, impedansi penyulang ini dihitung tergantung dari besarnya impedansi per meter penyulang yang bersangkutan, dimana besar nilainya ditentukan dari konsfigurasi tiang yang digunakan untuk jaringan SUTM atau dari jenis kabel tanah untuk jaringan SKTM. Dalam perhitungan disini diambil dengan impedansi $Z = (R + jX)$.

Dengan demikian nilai impedansi penyulang untuk lokasi gangguan yang dalam perhitungan ini disimulasikan terjadi pada lokasi dengan jarak 0%, 25%, 50%, 75% dan 100% panjang penyulang.

Untuk impedansi penyulang dapat ditentukan dengan menggunakan rumus:

$$Z_1 = Z_2 = \% \text{ panjang} \times \text{panjang penyulang (km)} \times \frac{Z_1}{Z_2}$$

Dimana :

Z_1 = Impedansi urutan positif (ohm)

Z_2 = Impedansi urutan negatif (ohm)

d. Menghitung Impedansi Ekivalen Jaringan

Perhitungan yang akan dilakukan di sini adalah perhitungan besarnya nilai impedansi ekivalen positif, negatif, dan nol dari titik gangguan sampai ke sumber. Karena dari sumber ke titik gangguan impedansi yang terbentuk adalah tersambung seri maka perhitungan dan dapat langsung dengan cara menjumlahkan impedansi tersebut. Sehingga untuk impedansi ekivalen jaringan dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

$$Z_{1eq} = Z_{2eq} = Z_{s1} + Z_{t1} + Z_1 \text{ penyulang}$$

Dimana :

Z_{1eq} = Impedansi ekivalen jaringan urutan positif (ohm)

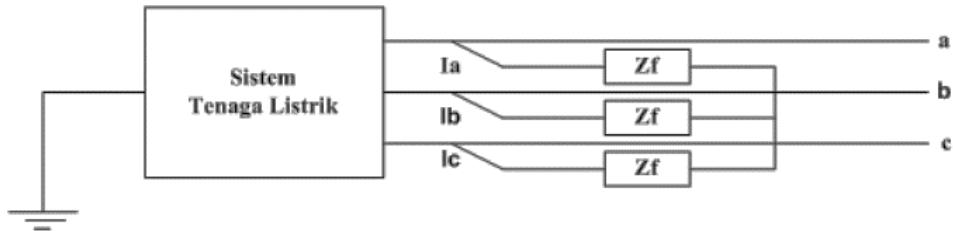
Z_{2eq} = Impedansi ekivalen jaringan urutan negatif (ohm)

Z_{s1} = Impedansi sumber sisi 20 kV (ohm)

Z_{t1} = Impedansi transformator tenaga urutan positif dan negatif (ohm)

Z_1 = Impedansi urutan positif dan negatif (ohm)

2.13.2 Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa



Gambar 2.10 Gangguan Hubung Singkat Tiga Phasa

Kemungkinan terjadinya gangguan 3 fasa adalah putusnya salah satu kawat fasa yang letaknya paling atas pada transmisi atau distribusi, dengan konfigurasi kawat antar fasanya disusun secara vertikal. Kemungkinan terjadinya memang sangat kecil, tetapi dalam analisanya tetap harus diperhitungkan. Kemungkinan lain adalah akibat pohon yang cukup tinggi dan berayun sewaktu angin kencang, kemudian menyentuh ketiga kawat pada transmisi atau distribusi.

Gangguan hubung singkat 3 fasa dapat dihitung dengan menggunakan rumus dasar hukum ohm, sehingga arus hubung singkat tiga fasa dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

$$I_{3 \text{ fasa}} = \frac{V_{ph}}{Z_{1eq}}$$

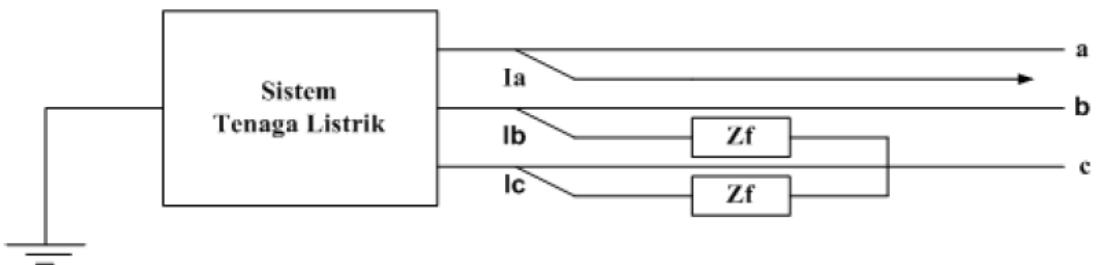
Dimana :

$I_{3 \text{ fasa}}$ = Arus gangguan hubung singkat 3 fasa (A)

V_{ph} = Tegangan fasa-netral system

Z_{1eq} = Impedansi ekivalen urutan positif (ohm)

2.13.3 Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa



Gambar 2.11 Hubung Singkat Dua Fasa

Kemungkinan terjadinya gangguan 2 fasa disebabkan oleh putusnya kawat fasa tengah pada transmisi atau distribusi. Kemungkinan lainnya adalah

dari rusaknya isolator di transmisi atau distribusi sekaligus 2 fasa. Gangguan seperti ini biasanya mengakibatkan 2 fasa ke tanah.

Gangguan hubung singkat 2 fasa dapat dihitung dengan menggunakan rumus dasar hukum ohm, sehingga arus hubung singkat dua fasa dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

$$I_{2fasa} = \frac{Vph - ph}{Z1eq + Z2eq}$$

Karena $Z1eq = Z2eq$, maka :

$$I_{2fasa} = \frac{Vph - ph}{2 \times Z1eq}$$

Dimana :

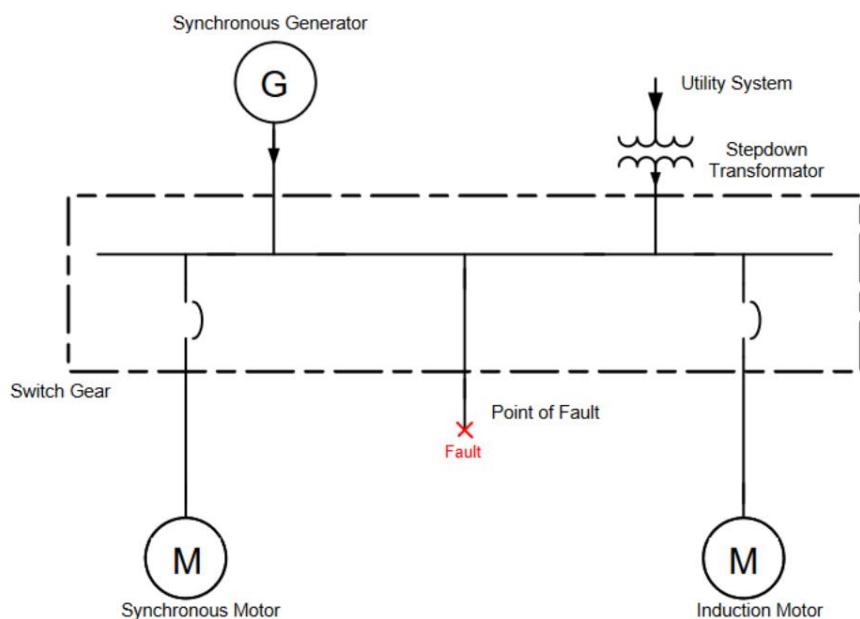
I_{2fasa} = Arus gangguan hubung singkat 2 fasa (A)

$Vph - ph$ = Tegangan fasa-fasa sistem

$Z1eq$ = Impedansi ekivalen urutan positif (ohm)

2.14 Kontribusi Arus Hubung Singkat

Besar arus hubung singkat bergantung pada besar sumber yang membangkitkan sistem, nilai reaktansi peralatan dan nilai reaktansi sistem keseluruhan sampai ke titik gangguan. Sumber arus hubung singkat dapat berasal dari sistem pembangkit (PLN), generator, motor sinkron dan motor induksi.



Gambar 2.12 Kontribusi Arus Hubung Singkat

2.14.1 Sistem Jaringan (PLN)

PLN memberikan suplai daya pada pelanggan khususnya industry melalui trafo (*step down*) dari jaringan distribusi tegangan menengah ke tegangan yang dipakai oleh konsumen. Trafo sering sekali dimengerti sebagai sumber hubung singkat, tentu saja hal ini sama sekali tidak benar. Trafo Distribusi hanya mengubah (menaikkan/menurunkan) level tegangan dan besar arus.

Arus hubung singkat yang melewati trafo bergantung pada besar tegangan sekundernya dan persen reaktansinya. Sistem pembangkit dalam hal ini PLN juga memberikan informasi tentang kontribusi daya hubung singkat yang memungkinkan (MVAsc) dari sistem pembangkit.

2.14.2 Generator

Generator adalah alat pembangkit energi listrik yang bekerja mengubah energi mekanis menjadi energi listrik. Di dalam sistem listrik industri, selain mendapat suplay daya dari PLN sebagai sistem pembangkit listrik utama, beberapa industri besar juga memiliki suplay daya sendiri dari generator yang dapat berfungsi :

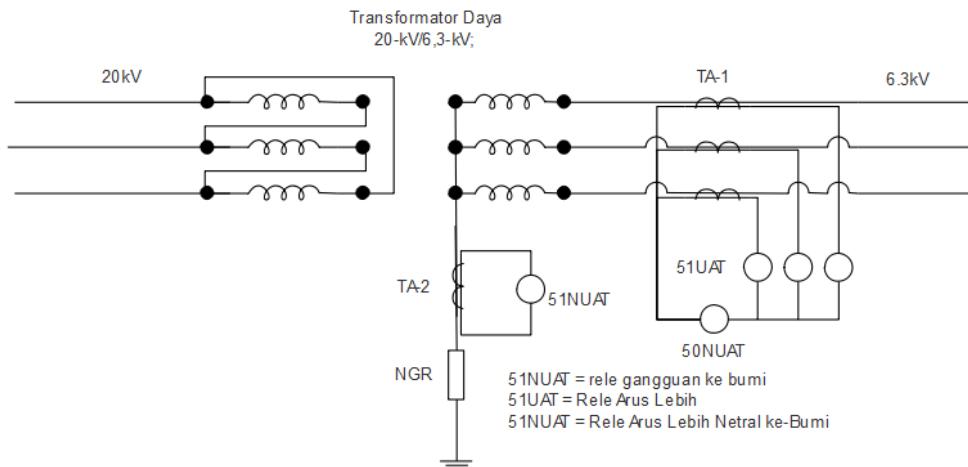
1. Sebagai unit cadangan (*emergency*) yang dijalankan pada saat keadaan darurat atau saat terjadi pemadaman pada sistem pembangkit utama (PLN).
2. Sebagai unit pembangkit bantuan yang dapat membantu suplay daya listrik dari PLN pada saat beban puncak (*peak load*).

Pada saat terjadi gangguan hubung singkat, generator memberi kontribusi terhadap besar arus hubung singkat yang terjadi seperti yang dapat dilihat pada gambar 2.3 (b). Generator digerakkan oleh penggerak mula (*prime mover*). Biasanya dalam industri adalah mesin diesel. Ketika hubung singkat terjadi, generator akan terus dikendalikan oleh *prime mover* dan tetap menghasilkan tegangan selama medan eksitasinya tetap dipertahankan putaran generator pada kecepatan normal. Tegangan yang dihasilkan ini menghasilkan arus yang besar yang mengalir ke titik gangguan.

Arus yang mengalir ini hanya dibatasi oleh impedansi generator dan impedansi rangkaian dari generator sampai ke titik gangguan.

2.15 Relai Arus Lebih (Over Current Relay)

Relai Arus Lebih (Over Current Relay) bekerja berdasarkan adanya kenaikan arus yang melebihi suatu nilai pengaman yang telah ditentukan dan dalam jangka waktu yang telah ditetapkan. Relai arus lebih akan *pick up* jika besar arus melebihi nilai setting. Pada proteksi transformator daya, relai arus lebih digunakan sebagai tambahan bagi relai differensial untuk memberikan tanggapan terhadap gangguan luar. Relai ini digunakan untuk mengamankan peralatan terhadap gangguan hubung singkat antar fasa, hubung singkat satu fasa ke tanah dan beberapa hal dapat digunakan sebagai pengaman beban lebih.



Gambar 2.13 Proteksi pada Transformator

2.16 Prinsip Kerja Relay Arus Lebih

Relay arus lebih adalah relay yang bekerja terhadap arus lebih, ia akan bekerja bila arus yang mengalir melebihi nilai settingnya (I_{set}) atau relay arus lebih merupakan pengaman yang bekerja karena adanya besaran arus dan terpasang pada jaringan tegangan tinggi, tegangan menengah juga pada pengaman transformator tenaga. Pada dasarnya relay arus lebih adalah suatu alat yang mendeteksi besaran arus yang melalui suatu jaringan dengan bantuan trafo arus. Harga atau besaran yang boleh melewatkannya disebut dengan setting.

2.17 Pengaman Pada Relay Arus Lebih

Pada relay arus lebih memiliki 2 jenis pengamanan yang berbeda antara lain:

1. Pengamanan hubung singkat fasa. Relay mendeteksi arus fasa. Oleh karena itu, disebut pula “Relay fasa”. Karena pada relay tersebut dialiri oleh arus fasa, maka settingnya (I_s) harus lebih besar dari arus beban maksimum. Ditetapkan $I_s = 1,2 \times I_n$ (I_n = arus nominal peralatan terlemah).
2. Pengamanan hubung tanah. Arus gangguan satu fasa tanah ada kemungkinan lebih kecil dari arus beban, ini disebabkan karena [entanahan netral sistemnya melalui impedansi/tahanan yang tinggi, atau bahkan tidak ditanahkan Dalam hal demikian, relay pengaman hubung singkat (relay fasa) tidak dapat mendeteksi gangguan tanah tersebut.

2.18 Perhitungan Koordinasi Relay Arus Lebih

Hasil perhitungan arus gangguan hubung singkat, dipergunakan untuk nilai setelan arus lebih, terutama nilai setelan TMS (*Time Multiple Setting*) dari rele arus lebih dengan karakteristik jenis inverse. Disamping itu setelah nilai setelan rele diperoleh, nilai arus gangguan hubung singakat pada setiap lokasi gangguan yang diasumsikan, dipakai untuk memeriksa rele arus lebih itu, apakah masih dapat dinilai selektif atau nilai setelan harus dirubah kenilai lain yang memberikan kerja rele yang lebih selektif, atau didapatkan kerja selektifitas yang optimum (Rele bekerja tidak bekerja terlalu lama tetapi menghasilkan selektifitas yang baik). Sedangkan setelan arus dari rele arus lebih dihitung berdasarkan arus beban yang mengalir dipenyulang atau *incoming feeder*, artinya :

1. Untuk rele arus lebih yang terpasang dipenyulang keluar (*Outgoing Feeder*) dihitung berdasarkan arus beban maksimum (Beban Puncak) yang mengalir dipenyulang tersebut.
2. Untuk rele arus lebih yang terpasang dipenyulang masuk (*incoming feeder*) dihitung berdasarkan arus nominal transformator tenaga.

Sesuai british standard untuk :

- a. Rele *inverse* biasa disetting sebesar 1,05 s/d 1,3 x I_{Beban}
- b. Sedangkan rele *definite* disett sebesar 1,2 s/d 1,3 x I_{Beban}

Persyaratan lain yang harus dipenuhi adalah penyetelan waktu minimum dari rele arus lebih (terutama di penyulang) tidak lebih kecil dari 0,3 detik. Pertimbangan ini diambil agar rele tidak sampai trip lagi akibat arus *inrush* dari trafo distribusi yang memang sudah tersambung dijaringan distribusi, sewaktu PMT penyulang tersebut dioperasikan

2.19 Perhitungan Impedansi

Dalam menghitung impedansi ekivalen yaitu resistansi dan reaktansi (baik transient maupun sub transient), ada 3 cara yang dapat digunakan yaitu dalam satuan ohm, persen dan per unit dengan kVA base yang sudah ditentukan. Perhitungan impedansi ekivalen dalam tugas akhir ini adalah mempergunakan sistem per unit.

Sistem per unit adalah suatu metode perhitungan dengan menggunakan angka perbandingan sehingga mempermudah proses perhitungan. Nilai per unit adalah menyatakan sebuah nilai perbandingan (ratio).

Sistem per unit ini digunakan dalam perhitungan arus hubung singkat untuk mengkonversikan semua nilai resistansi dan reaktansi yang berbeda dalam *one line* diagram menjadi sebuah nilai perbandingan berdasarkan sebuah nilai base yang telah dipilih. Nilai base adalah sebuah bilangan, biasanya nilai ini dipilih sama dengan nilai kVA trafo terbesar dalam *one line* diagram. Nilai ini disebut sebagai kVA base.

Berikut adalah beberapa persamaan yang digunakan untuk mengkonversikan data impedansi ke sistem per unit dan juga persamaan untuk menyederhanakan diagram impedansi dan menghitung jumlah (total) impedansi per unit berdasarkan base yang telah dipilih.

1. Mengkonversi nilai impedansi kabel, bus dan lain sebagainya dalam satuan ohm ke satuan per unit.

$$\text{Impedansi per unit} = \frac{\text{ohm} \times \text{kVA Base}}{1000 \times V_L - L^2 (\text{kV})}$$

2. Mengkonversi nilai persen impedansi ke satuan per unit.

$$\text{Impedansi per unit} = \frac{\text{persen impedansi}}{100}$$

3. Mengkonversi nilai satuan per unit ke satuan persen impedansi.

$$\text{Persen Impedansi} = 100 \times \text{Impedansi Perunit}$$

4. Mengkonversi nilai per unit impedansi berdasarkan kVA rating peralatan kesatuan per unit berdasarkan kVA base. Nilai impedansi motor, generatormaupun trafo biasanya diberikan dalam satuan persen berdasarkan rating kVA peralatan tersebut sehingga perlu dikonversikan ke satuan per unit berdasarkan kVA base yang telah dipilih.

$$\text{Impedansi per unit} = \frac{\text{impedansi per unit (base kVA rating peralatan)} \times kVA \text{ Base}}{kVA \text{ rating peralatan}}$$

5. Mengkonversi kontribusi daya hubung singkat (MVAsc) yang memungkinkan dari sistem jaringan atas (tegangan menengah) ke satuan per unit.

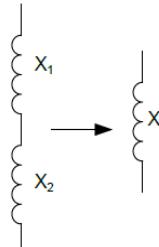
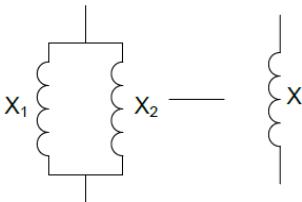
$$\text{Impedansi per unit} = \frac{kVA \text{ Base}}{MVAsc (kVA)}$$

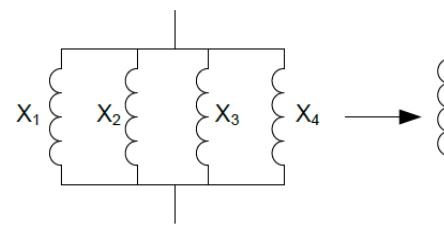
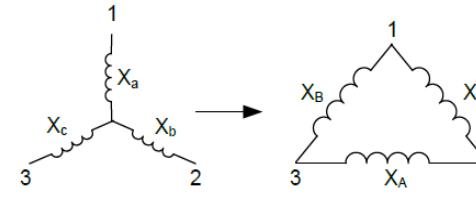
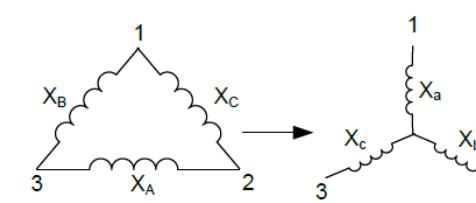
6. Menghitung arus hubung singkat simetris rms (Ampere)

$$I_{sc} \text{ Sym (Amp)} = \frac{kVA \text{ Base}}{\sqrt{3}VL-L(kV) \times \text{total impedansi per unit}}$$

7. Menyederhanakan diagram impedansi dan menghitung jumlah (total) impedansi per unit seperti yang diperlihatkan dalam tabel

Tabel 2.4 Penyederhanaan Diagram Impedansi

No	Hubungan	Diagram	Persamaan
1	Seri		$X=X_1+X_2$
2	Pararel		$X=\frac{X_1 \times X_2}{X_1 + X_2}$

3	Pararel		$\frac{1}{X} = \frac{1}{X_1} + \frac{1}{X_2} + \frac{1}{X_3} + \frac{1}{X_4}$
4	Wye to Delta		$X_a = \frac{X_b \cdot X_c}{X_a} + X_b + X_c$ $X_b = \frac{X_a \cdot X_c}{X_b} + X_a + X_c$ $X_c = \frac{X_a \cdot X_b}{X_c} + X_a + X_b$
5	Delta to Wye		$X_a = \frac{X_b \cdot X_c}{X_a + X_b + X_c}$ $X_b = \frac{X_a \cdot X_c}{X_a + X_b + X_c}$ $X_c = \frac{X_a \cdot X_b}{X_a + X_b + X_c}$

2.20 Setelan Time Multiple Setting (TMS)

Setelan TMS dan setelan waktu rele pada jaringan distribusi menggunakan standar *inverse* yang dihitung menggunakan rumus kurva waktu berbanding dengan arus, dalam hal ini juga diambil persamaan kurva arus waktu dari standar *british*, sebagai berikut :

$$t = \frac{\beta \times (TMS)}{(I/I_S)^\alpha - 1}$$

Dimana :

β , α : Karakteristik *Inverce*

t : Waktu trip (Detik)

I : Besarnya Arus Gangguan Hubung Singkat (Amp)

I_S : Besarnya Arus Setting Sisi Primer (Amp)

TMS : *Time multiple Setting* (tanpa satuan)

β dan α untuk setiap karakteristik besarnya seperti pada tabel di bawah ini:

Tabel 2.5 Karakteristik Waktu-Arus Lebih

Karakteristik	β	A
Standard Inverse	0.14	0.02
Very Inverse	13.5	1.00
Extremely Inverse	80.0	2.00
Long Time Inverse	120.0	1.00

Arus setting OCR adalah sebagai berikut :

$$I_{set\ OCR} = I_{set} \times I_n$$

$$I_n = \text{Arus Nominal}$$

Perhitungan waktu kerja OCR dengan cara :

$$t = \frac{0.14 \times (TMS)}{\left(\frac{I_f}{I_{Set}}\right)^\alpha - 1}$$

If : Arus gangguan yang mengalir pada transformator (A)

I_{set} : Arus setting OCR (A)

TMS : *Time Multipler Setting*

α : 0.02