

BAB II

DASAR – DASAR SISTEM PENGAMANAN SALURAN TRANSMISI

2.1 Pendahuluan

Suatu sistem tenaga listrik yang handal harus dapat menjamin ketersediaan energi listrik bagi setiap beban yang dihubungkan pada sistem tersebut tanpa adanya pemadaman. Saluran transmisi tegangan tinggi menyalurkan daya dari sumber utama dengan jarak yang sangat jauh. Pada umumnya saluran transmisi berupa saluran udara. Maka banyak hal yang akan menyebabkan terjadinya gangguan pada saluran transmisi tersebut.

Pada saat ini proses menghilangkan gangguan seperti hubung singkat dilaksanakan secara otomatis. Peralatan dari sistem perlindungan atau sistem pengamanan terdiri dari rele pengaman dan peralatan pemutus rangkaian atau pemutus tenaga (PMT).

Rele pengaman dan sistem perelean mendeteksi keadaan yang tidak normal, seperti gangguan pada jaringan listrik dan mengoperasikan secara otomatis peralatan pemutus rangkaian guna memisahkan peralatan yang terganggu dari sistem secepat mungkin. Peralatan pemutus rangkaian (PMT) harus mampu memutus arus normal maupun arus gangguan. Dan rele pengaman harus mengenal kondisi abnormal dari sistem dan bila terjadi kondisi seperti ini mengambil langkah – langkah agar sedikit mungkin bagian dari sistem yang mengalami pemadaman.

2.2 Syarat – syarat yang harus di miliki dalam sistem proteksi

Sistem proteksi harus dapat mendeteksi adanya gangguan sekecil mungkin pada sistem tenaga listrik dan memisahkan bagian yang terganggu secepat mungkin agar tidak merusak peralatan dan mencegah efek dari gangguan tersebut menjalar ke sistem. Oleh sebab itu, setiap sistem perlindungan yang bertugas memisahkan bagian yang terganggu, di syaratkan dapat memenuhi empat persyaratan pokok yaitu :

1. Kepekaan (sensitivity)

Pada prinsipnya relai harus cukup peka dalam mendeteksi adanya gangguan di daerah pengamanannya, meskipun pada kondisi gangguan sekecil mungkin.

2. Keandalan (reliability)

Keandalan merupakan ukuran tingkat sistem perlindungan dalam mengatasi kemungkinan terjadinya kegagalan, sehingga daerah perlindungannya di jamin aman. Pada keandalan pengaman ada 3 aspek, yaitu :

2.1 Dependability

Yaitu tingkat kepastian bekerjanya (keandalan kemampuan bekerjanya). Pada prinsipnya pengaman harus dapat di andalkan bekerjanya (dapat mendeteksi dan melepaskan bagian yang terganggu), tidak boleh gagal bekerja.

2.2 Security

Yaitu tingkat kepastian untuk tidak salah kerja (keandalan untuk tidak salah kerja). Salah kerja adalah kerja yang semestinya tidak

harus kerja, misalnya karena lokasi gangguan di luar kawasan pengamanannya atau sama sekali tidak ada gangguan, atau kerja terlalu cepat atau terlalu lambat.

2.3 Availability

Yaitu perbandingan antara waktu dimana pengaman dalam keadaan siap kerja (actually in service) dan waktu total operasinya.

3. Selektifitas (selectivity)

Selektifitas suatu sistem perlindungan ialah dapat mendeteksi adanya gangguan dan mentrip semimum mungkin jumlah PMT untuk menghilangkan gangguan. Kualitas sistem perlindungan ditentukan oleh dapat tidaknya ia membedakan antara dua kondisi, yaitu kondisi dimana diinginkan harus beroperasi, dan pada kondisi lainnya harus tidak beroperasi. Jadi relai harus dapat membedakan gangguan yang terletak di daerah pengamanan utamanya dimana ia harus bekerja cepat atau terletak di seksi berikutnya dimana ia harus bekerja dengan waktu tunda atau harus tidak bekerja sama sekali karena gangguannya terletak diluar daerah pengamanannya atau sama sekali tidak ada gangguan.

4. Kecepatan (speed)

Untuk memperkecil kerugian/kerusakan akibat gangguan, maka bagian yang terganggu harus dipisahkan secepat mungkin dari bagian sistem lainnya. Untuk menciptakan selektifitas yang baik, mungkin saja suatu pengaman diberi waktu tunda (time delay). Namun waktu tunda itu harus

secepat mungkin, karena kelambatan kerja proteksi dapat mengganggu kestabilan sistem atau merusak peralatan karena thermal stress¹.

$$t_{\text{total}} = t_{\text{start}} + t_d + t_{\text{PMT}}$$

dimana,

t_{total} = waktu total pembebasan gangguan

t_{start} = waktu start relai (waktu kerja tanpa waktu tunda)

t_d = waktu tunda relai untuk koordinasi

t_{PMT} = waktu pemutusan arus gangguan PMT

Dengan peralatan proteksi sekarang yang mempunyai t_{start} sekitar 20 – 30 mili detik, $t_{\text{PMT}} = 2 - 3$ cycle (40 – 60 mili detik), maka t_{total} pengaman utama tanpa waktu tunda, bisa kurang dari 100 mili detik.

2.3 Peralatan pengaman

Peralatan – peralatan yang biasa dipergunakan pada sistem proteksi yang saling berkoordinasi dalam mengatasi suatu gangguan antara lain:

2.3.1 Rele

Fungsi utama dari rele pengaman adalah memisahkan bagian – bagian yang mengalami gangguan dengan mengendalikan PMT – PMT nya agar bila terjadi kondisi abnormal tidak merusak peralatan sistem tenaga listrik dan masuk ke sistem. Jadi rele dirancang untuk mendeteksi dan mengukur kondisi abnormal dan menutup kontak – kontak dari sirkit trip PMT nya.

¹ Wahyudi Sarimun, “Proteksi Sistem Distribusi Tenaga Listrik”, (Depok: Garamond, 2012) hal. 12.

Dalam keadaan tertentu rele pengaman tidak dapat bekerja sesuai dengan keadaan yang diharapkan atau rele mengalami kesalahan rele. Hal – hal yang memungkinkan kegagalan pada rele pengaman:

1. Kerusakan rele atau rele bekerja tidak semestinya.
2. Terganggunya rangkaian transformator arus (CT) atau transformator tegangan (PT).
3. Terganggunya sumber arus searah (DC) yang disebabkan oleh:
 - Baterai lemah/turunnya tegangan baterai.
 - Rangkaian dc terhubung singkat atau terbuka.

2.3.2 Pemutus Tenaga (PMT)

PMT (Pemutus Tenaga) adalah suatu peralatan yang dapat digunakan untuk menghubungkan atau memutuskan arus/daya listrik sesuai dengan ratingnya. Arus nominal, tegangan pengenalan dan kapasitas pemutus (MVA) dari PMT tersebut harus disesuaikan dengan beban dan daya hubung singkat pada titik tertentu pada sirkit dimana PMT tersebut dipasang. Pada saat PMT menghubungkan atau memutuskan arus listrik terjadi busur api. Untuk memadamkan busur api dapat dilakukan dengan beberapa bahan antara lain : minyak, udara, dan gas. Dalam kaitannya dengan pengamanan, untuk memisahkan bagian dari sistem tenaga yang mengalami gangguan, dibutuhkan satu atau lebih PMT. PMT dapat dioperasikan secara manual maupun otomatis. Membukanya (trip) PMT bila kumparan kerjanya diberi energi, dan ini menyebabkan mekanisme PMT bekerja sehingga membuka kontak – kontak utamanya. Rele menutup kontak – kontaknya secara langsung atau melalui rele bantu menutup sirkit kumparan kerja (trip coil) melalui batere sehingga mengalir

arus ke kumparan kerja PMT, sehingga PMT tersebut membuka. Waktu pengoperasian PMT tergantung pada desainnya dan biasanya berkisar antara 0,05 detik sampai 0,25 detik.

Syarat – syarat yang harus dipenuhi oleh suatu PMT agar dapat digunakan sebagai pengaman sistem tenaga listrik, sebagai berikut:

1. Dapat menyalurkan arus maksimum sistem secara terus – menerus.
2. Dapat memutuskan dan menutup jaringan dalam keadaan berbeban maupun terhubung singkat tanpa menimbulkan kerusakan pada pemutus tenaga itu sendiri.
3. Dapat memutuskan arus hubung singkat dengan kecepatan tinggi agar arus hubung singkat tidak sampai merusak peralatan sistem, membuat sistem kehilangan kestabilan, dan merusak pemutus tenaga itu sendiri.

2.3.3 Trafo Tegangan (Potensial Transformer)

Trafo tegangan adalah suatu peralatan listrik yang dapat menurunkan tegangan tinggi menjadi tegangan rendah, yang dipergunakan dalam rangkaian arus bolak – balik. Transformator tegangan dapat dibedakan menjadi dua yaitu menurut konstruksinya dan menurut pemasangannya.

Klasifikasi menurut konstruksinya :

1. Trafo Tegangan Induktif (Inductive voltage transformer)

Terdiri dari belitan primer dan belitan sekunder, dan tegangan pada belitan primer akan menginduksikannya ke belitan sekunder melalui inti besi (core).

2. Trafo Tegangan Kapasitif (Capacitor voltage transformer)

Terdiri dari rangkaian kondensator yang berfungsi sebagai pembagi tegangan pada sisi tegangan tinggi dari trafo pada tegangan menengah yang menginduksikan tegangan ke belitan sekunder melalui media capasitor.

Dalam penggunaan rele, biasanya dijumpai dua jenis transformator tegangan. Untuk penggunaan pada tegangan rendah tertentu, jenis transformator tegangan ini banyak persamaannya dengan transformator daya biasa. Untuk tegangan sistem pada tingkat tegangan tinggi dan tegangan ekstra tinggi, biasa menggunakan rangkaian pembagi. Transformator tegangan kapasitor gandengan sering disingkat CVT (coupling capacitor voltage transformator). CVT menggunakan alat yang berdiri bebas yang ditempatkan pada susunan isolasi penyangga dan banyak digunakan pada sistem tegangan tinggi dan tegangan ekstra tinggi.

Trafo tegangan memiliki beberapa fungsi yaitu :

- ✓ Memperkecil besaran tegangan pada sistem tenaga listrik menjadi besaran tegangan untuk sistem pengukuran atau proteksi.
- ✓ Mengisolasi rangkaian sekunder terhadap rangkaian primer.
- ✓ Memungkinkan standarisasi rating tegangan untuk peralatan sisi sekunder.

2.3.4 Trafo Arus

Trafo arus adalah suatu peralatan listrik yang dapat memperkecil arus listrik, dipergunakan dalam rangkaian arus bolak – balik. Transformator arus digunakan untuk pengukuran arus yang besarnya ratusan ampere lebih yang

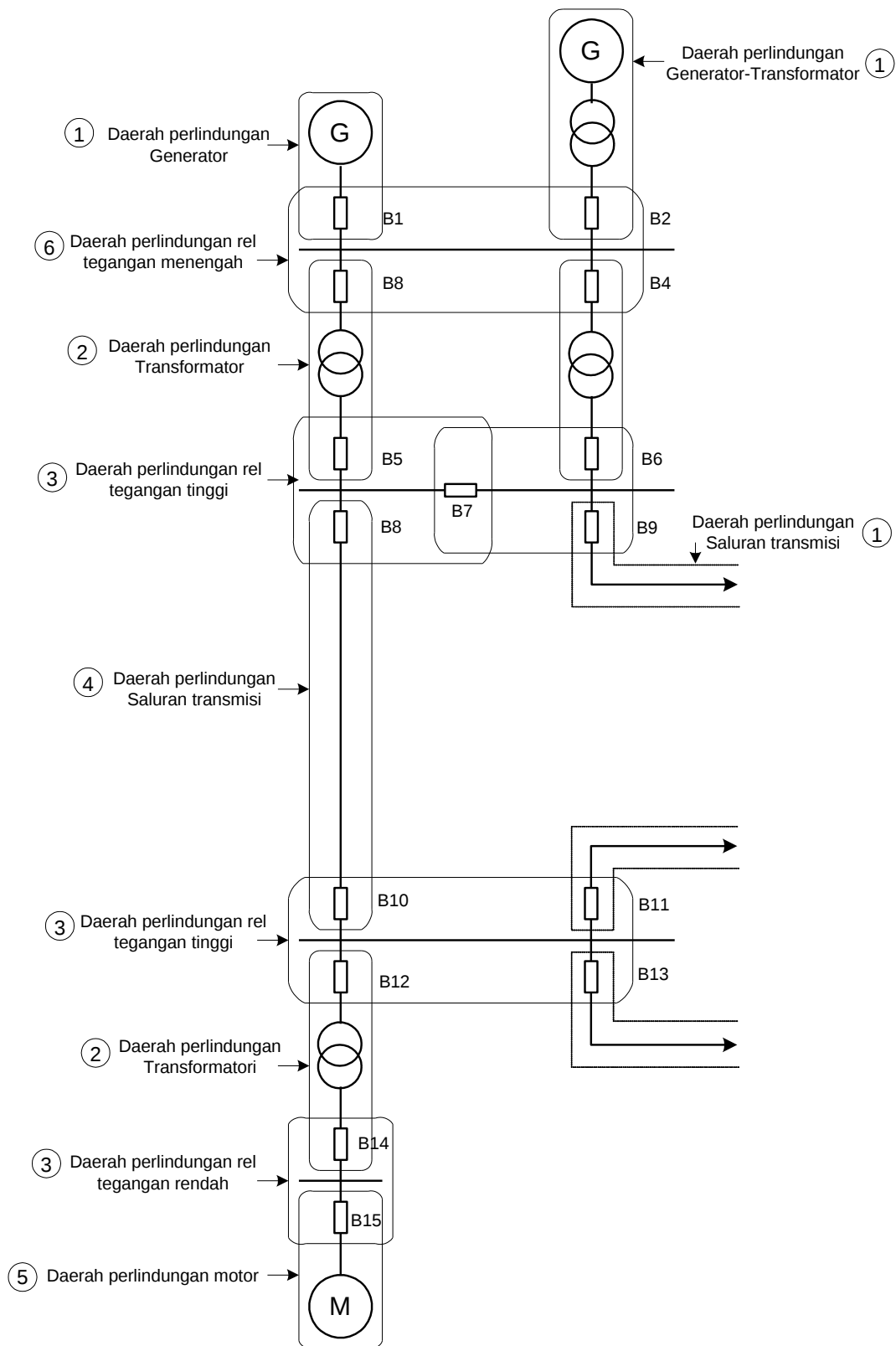
mengalir pada jaringan tegangan tinggi. Pada kumparan primer transformator arus dihubungkan secara seri dengan jaringan atau peralatan yang akan diukur arusnya, sedangkan kumparan sekunder dihubungkan dengan peralatan meter dan rele proteksi.

Trafo arus mempunyai kesalahan perbandingan yang pada beberapa jenis dapat dihitung, dan jenis – jenis lainnya harus ditentukan dengan pengujian. Kesalahan ini dapat menjadi cukup besar jika beban impedansinya terlalu besar, tetapi dengan memilih trafo arus yang tepat terhadap bebannya, kesalahan tersebut dapat dipertahankan pada suatu nilai yang dapat diterima. Arus pengenal nominal dari trafo arus telah dibakukan pada 5A dan 1A.

2.4 Daerah Pengamanan

Suatu sistem pengamanan atau proteksi mempunyai daerah tanggung jawab, daerah ini disebut daerah pengamanan atau zona proteksi. Masing – masing daerah mengandung satu atau dua komponen pemutus tenaga (PMT), setiap PMT dimasukkan ke dalam dua daerah perlindungan yang berdekatan.

Berkaitan dengan peralatan yang diproteksi, sistem tenaga listrik dibagi atas berbagai zona proteksi, dengan pembagian tersebut diharapkan hanya zona atau bagian yang mengalami gangguan saja yang dilokalisir atau dipisahkan dari bagian yang tidak terganggu, yaitu dengan cara membuka pemutus tenaga (PMT) pada zona yang bersangkutan dengan bantuan rele.



Gambar 2.1 Daerah pengamanan yang saling tumpang - tindih

2.5 Rele Pengaman yang digunakan pada saluran transmisi udara

Sistem pengaman suatu peralatan karena berbagai macam faktor dapat mengalami kegagalan operasi. Berdasarkan hal – hal tersebut maka suatu sistem proteksi dapat dibagi dalam dua kelompok yaitu:

1. Pengaman Utama

Merupakan sistem proteksi yang diharapkan segera bekerja jika terjadi kondisi abnormal atau gangguan pada daerah pengamanannya.

2. Pengaman cadangan

Diperlukan apabila pengaman utama tidak dapat bekerja atau terjadi gangguan pada sistem pengaman utama itu sendiri.

Pada dasarnya sistem proteksi cadangan dapat dibagi menjadi dua kategori, yaitu

➤ Sistem proteksi cadangan lokal (local back up protection system)

Pengaman cadangan lokal adalah pengamanan yang dicadangkan bekerja bilamana pengaman utama yang sama gagal bekerja.

➤ Sistem proteksi jarak jauh (remote back up protection)

Pengaman cadangan jarak jauh adalah pengaman yang dicadangkan bekerja bilamana pengaman utama di tempat lain gagal bekerja.

Pengaman cadangan lokal dan jarak jauh di usahakan dikoordinasikan waktunya dengan pengaman utama ditempat berikutnya. Koordinasi waktu dibuat sedemikian hingga pengaman cadangan dari jauh bekerja lebih dahulu dari pengaman cadangan lokal. Hal ini berarti pengaman cadangan dari jauh akan bekerja lebih efektif dari pengaman cadangan lokal. Dengan penjelasan di atas berarti waktu penundaan bagi pengaman cadangan lokal cukup lama sehingga dapat mengorbankan kemandirian sistem untuk keselamatan peralatan. Dengan

demikian berarti pula bahwa pengaman cadangan lokal hanya sekedar pengaman cadangan terakhir demi keselamatan peralatan.

Untuk memperoleh waktu pemutusan yang cepat maka pemakaian relai jarak sebagai pengaman utama SUTT pada sistem 70 dan 150 kv harus dilengkapi dengan tele proteksi. Pada dasarnya pemilihan pola pengaman dengan pilot dimaksudkan untuk meningkatkan keandalan sistem yaitu jika terjadi gangguan diluar zone 1 nya tetapi berada pada saluran yang diamankan maka relai jarak yang menggunakan tele proteksi akan bekerja lebih cepat dibandingkan relai jarak tanpa tele proteksi. Pada sistem pengaman SUTT waktu pembebasan gangguan untuk sistem 150kv lebih singkat dari pada sistem 70kv.

Waktu pemutusan gangguan pada SUTT yang menggunakan relai jarak yang dilengkapi dengan tele proteksi adalah :

Tabel 2.1 Pembagian waktu pemutusan gangguan pada SUTT yang menggunakan relai jarak yang dilengkapi dengan tele proteksi.

No	Urutan pembagian waktu	Sistem 150 kV (mili detik)	Sistem 70 kV (mili detik)
1.	Trip relai : - o Sinyal pembawa (PLC/FO) - o Relai	20 40	20 70
2.	Pembukaan PMT	60	60
	Total	120	150

2.6 Gangguan pada saluran transmisi udara

Gangguan listrik merupakan kondisi abnormal yang disebabkan oleh adanya hubungan secara langsung antar fasa (fasa R-S, fasa R-T, fasa T-S, atau R-S-T yang terhubung secara langsung) atau fasa ke tanah yang dapat terjadi pada sistem tenaga listrik di jaringan, gardu induk atau di pusat listrik. Dalam sistem tenaga listrik bagian terbesar yang sering mengalami gangguan adalah pada kawat transmisi (kira-kira 70%-80% dari seluruh gangguan). Hal ini dikarenakan luas dan panjangnya saluran transmisi tersebut. Jenis gangguan yang umumnya terjadi pada saluran transmisi adalah gangguan hubung singkat. Gangguan hubung singkat ini terbagi menjadi gangguan hubung singkat simetris atau hubung singkat 3 fasa dan gangguan hubung singkat asimetris meliputi hubung singkat 1 fasa ke tanah, hubung singkat 2 fasa ke tanah, dan hubung singkat 2 fasa. Hampir semua gangguan hubung singkat yang terjadi di jaringan transmisi adalah hubung singkat asimetris. Setiap gangguan tidak simetris menyebabkan mengalirnya arus tidak seimbang dalam sistem, oleh karena itu metode komponen simetris sangat berguna sekali dalam menganalisa arus dan tegangan di semua bagian sistem yang mengalami gangguan. Secara fisik gangguan pada saluran transmisi udara dapat disebabkan oleh surja petir, angin/badai, kerusakan isolator, pepohonan, manusia dan lain – lain.

Sedangkan secara elektrik, gangguan saluran transmisi udara diantaranya :

- Hubung singkat satu fasa ke tanah
- Hubung singkat dua fasa ke tanah
- Hubung singkat tiga fasa
- Hubung singkat dua fasa

Menurut lamanya gangguan yang terjadi, gangguan pada saluran transmisi udara dapat dibedakan menjadi :

➤ Gangguan sementara (temporer)

Merupakan gangguan yang berlangsung singkat dan sesaat, tidak menimbulkan kerusakan fisik. Misalnya, akibat petir, pepohonan, burung dll.

➤ Gangguan menetap (permanen)

Merupakan gangguan yang berlangsung relatif lama, ada bagian yang rusak sehingga perlu diperbaiki dulu untuk memulihkannya kembali. Artinya gangguan seperti ini hanya dapat dihilangkan apabila sudah dilakukan tindakan terhadap gangguan tersebut. Misalnya, akibat bencana alam, pohon tumbang, kerusakan isolator dan lain – lain.

Tabel 2.2 Frekuensi dari bermacam gangguan yang berbeda yang terjadi pada saluran udara².

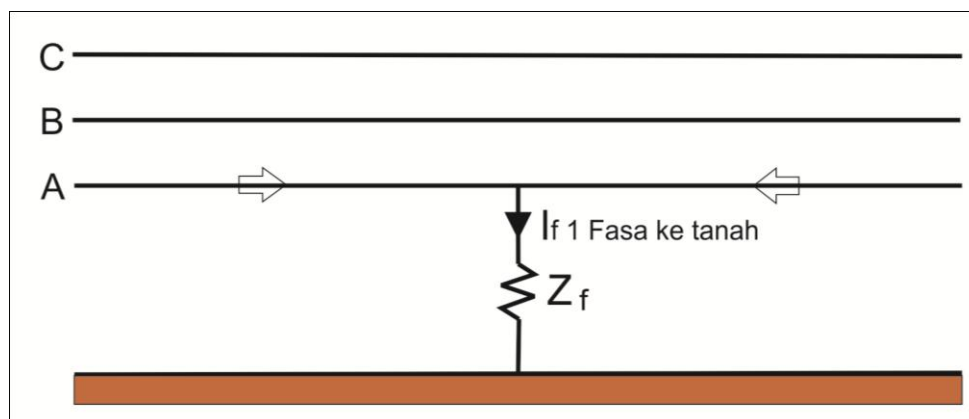
No.	Nama Gangguan	Prosentase gangguan (%)
1.	Gangguan satu fasa ke tanah	85
2.	Gangguan fasa ke fasa	8
3.	Gangguan dua fasa ke tanah	5
4.	Gangguan tiga fasa	3 atau lebih

² Hasan Basri, "Proteksi Sistem Tenaga Listrik", (Jakarta: ISTN, 2003) hal. 4.

2.7 Macam – macam gangguan hubung singkat

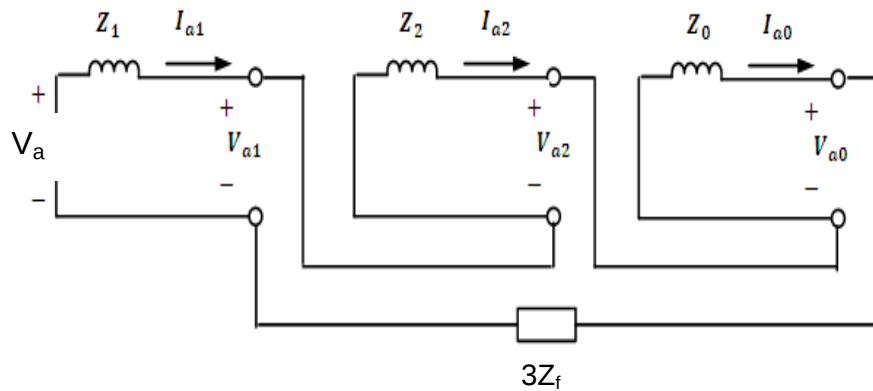
Akibat dari kejadian – kejadian di atas, gangguan pada saluran transmisi dapat berupa gangguan hubung singkat, baik gangguan hubung singkat seimbang (simetris) atau gangguan hubung singkat tiga fasa tak seimbang (asimetris) yang meliputi gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah, dua fasa ke tanah, dan dua fasa. Setiap gangguan hubung singkat tak seimbang akan menyebabkan terjadinya ketidakseimbangan arus maupun tegangan. Macam – macam gangguan yang mungkin terjadi pada sistem tenaga listrik adalah :

2.7.1 Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa ke tanah



Gambar 2.2 Gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah

Arus diperoleh dari pasor yang tidak seimbang, disebabkan karena adanya gangguan pada salah satu fasanya, dalam hal ini dimisalkan arus gangguan terjadi pada fasa A. Gangguan satu fasa ke tanah biasanya diterjadi bila salah satu penghantar terkena pohon atau kawat yang terhubung dengan tanah. Hubungan jaringan urutannya adalah :



Gambar 2.3 Rangkaian Urutan Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa ke tanah.

$$I_b = I_c = 0 \dots \dots \dots (2.1)$$

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} I_a \\ I_a \\ I_a \end{bmatrix} \dots \dots \dots (2.2)$$

Diperoleh :

$$I_0 = I_1 = I_2 = \frac{1}{3} I_a \dots \dots \dots (2.3)$$

$$3I_0 Z_f = V_{a0} + V_{a1} + V_{a2}$$

$$= -I_0 Z_0 + (V_a - I_1 Z_1) - I_2 Z_2$$

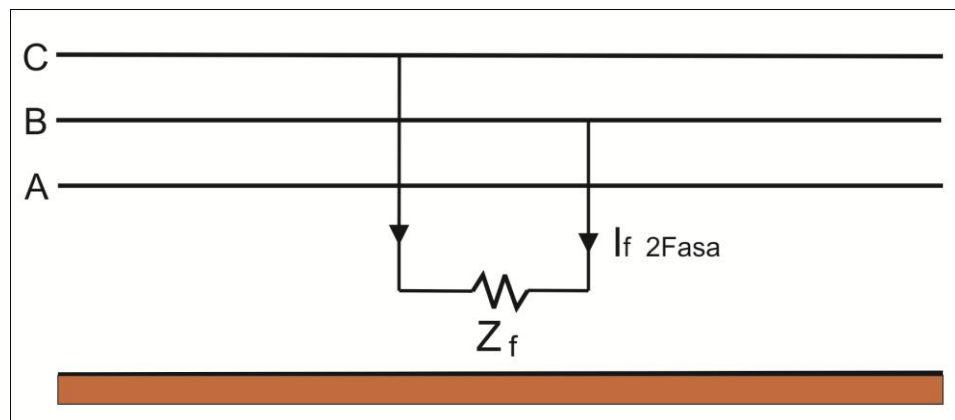
Maka :

$$I_{a0} = \frac{V_a}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + 3Z_f} \dots \dots \dots (2.4)$$

Jadi besarnya arus gangguan adalah

$$I_{f1\phi \text{ ke tanah}} = 3I_{a0} = \frac{3V_a}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3Z_f}$$

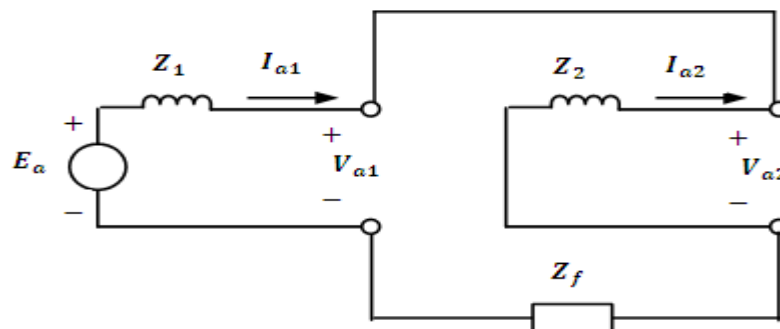
2.7.2 Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa



Gambar 2.4 Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa.

Gangguan hubung singkat terjadi antara fasa b dan fasa c, dalam hal ini terhubungnya fasa B dan fasa C karena adanya tahanan Z_f seperti yang terlihat pada gambar di atas. Gangguan fasa – fasa yang terjadi pada sistem tenaga listrik, biasanya karena terkena pohon atau benang layang – layang.

Rangkaian jaringan urutannya adalah :



Gambar 2.5 Rangkaian Urutan Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa.

Keadaan pada gangguan tersebut dinyatakan oleh persamaan :

$$V_b - V_c = Z_f I_b \dots\dots\dots (2.5)$$

$$I_b = -I_c \text{ dan } I_a = 0 \dots\dots\dots (2.6)$$

$$\bar{V}_b = \bar{V}_0 + a^2 \bar{V}_1 + a \bar{V}_2$$

$$\bar{V}_c = \bar{V}_0 + a\bar{V}_1 + a^2\bar{V}_2$$

$$\bar{I}_b = \bar{I}_0 + a^2\bar{I}_1 + a\bar{I}_2$$

Dari persamaan 2.5 maka dapat diperoleh :

$$(\bar{V}_0 + a^2\bar{V}_1 + a\bar{V}_2) - (\bar{V}_0 + a\bar{V}_1 + a^2\bar{V}_2) = Z_f (\bar{I}_0 + a^2\bar{I}_1 + a\bar{I}_2)$$

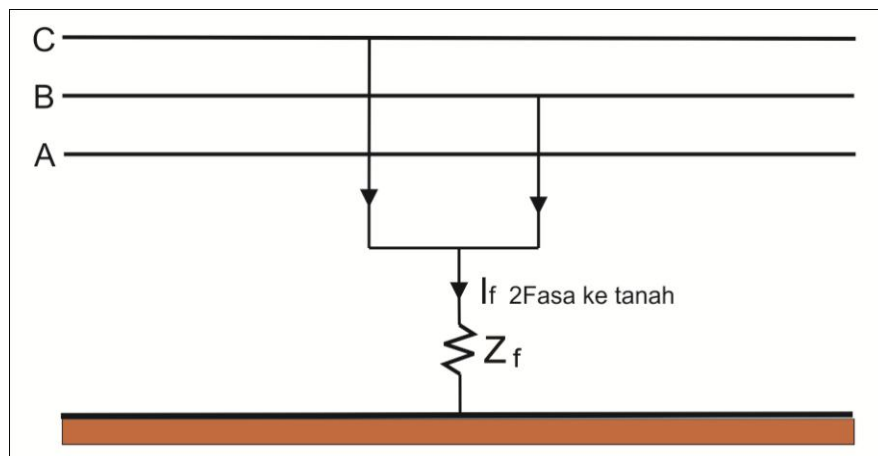
$$(a^2 - a)\bar{V}_1 - (a^2 - a)\bar{V}_2 = (a^2\bar{I}_1 - a\bar{I}_1)Z_f$$

$$\bar{V}_1 - \bar{V}_2 = \bar{I}_1 Z_f \dots\dots\dots (2.7)$$

Sehingga arus gangguannya adalah:

$$I_1 = -I_2 = \frac{V_a}{(Z_1 + Z_2 + Z_f)}$$

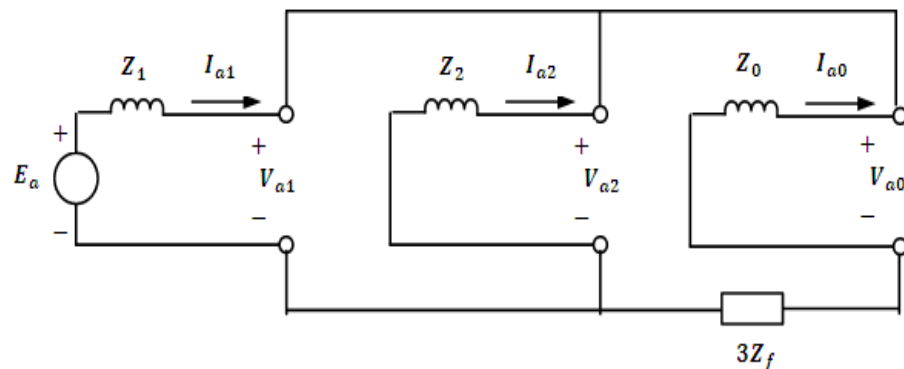
2.7.3 Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah



Gambar 2.6 Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa ke tanah.

Gangguan hubung singkat ini terjadi antara fasa b dan fasa c yang terhubung ke tanah. Biasanya gangguan hubung singkat ini terjadi karena ranting pohon yang mengenai 2 fasa penghantar.

Rangkaian jaringan urutannya adalah



Gambar 2.7 Rangkaian Urutan Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah.

Keadaan pada gangguan itu dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$V_{a1} = E_a - I_{a1} \cdot Z_1 \dots\dots\dots (2.8)$$

$$V_{a2} = -I_{a2} \cdot Z_2 \dots\dots\dots (2.9)$$

$$V_{a0} = -I_{a0} \cdot Z_0 \dots\dots\dots (2.10)$$

$$V_b = V_c = Z_f(I_b + I_c) \dots\dots\dots (2.11)$$

$$I_a = I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} = 0 \dots\dots\dots (2.12)$$

$$V_b = V_{a0} + a^2 V_{a1} + a V_{a2} \dots\dots\dots (2.13)$$

$$V_c = V_{a0} + a V_{a1} + a^2 V_{a2} \dots\dots\dots (2.14)$$

karena $V_b = V_c$, maka di dapat:

$$V_{a1} = V_{a2} \dots\dots\dots (2.15)$$

Dengan mensubtitusikan komponen simetris dari fasor arus ke dalam persamaan

(2.11) didapat

$$\begin{aligned} V_b &= Z_f(I_{a0} + a^2 I_{a1} + a I_{a2} + I_{a0} + a I_{a1} + a^2 I_{a2}) \\ &= Z_f(2I_{a0} - I_{a1} - I_{a2}) \\ &= 3Z_f I_{a0} \dots\dots\dots (2.16) \end{aligned}$$

Dan mensubstitusikan V_b dari persamaan (2.16) dan V_{a2} dari persamaan (2.15), ke dalam persamaan (2.13) sehingga didapat

$$\begin{aligned} 3Z_f I_{a0} &= V_{a0} + (a^2 + a)V_{a1} \\ &= V_{a0} - V_{a1} \dots\dots\dots(2.17) \end{aligned}$$

Dari persamaan (2.8) dan (2.10) disubstitusikan ke dalam persamaan (2.17) maka didapat :

$$I_{a0} = -\frac{E_a - Z_1 I_{a1}}{Z_0 + 3Z_f}$$

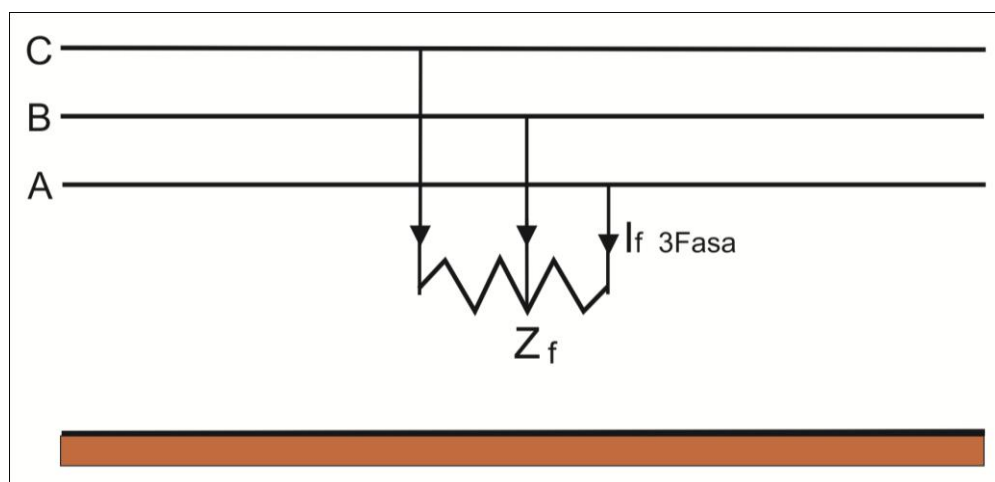
Dengan cara yang sama maka besarnya I_{a2} adalah

$$I_{a2} = -\frac{E_a - Z_1 I_{a1}}{Z_2}$$

Maka besarnya gangguan dua fasa ke tanah I_{a1} adalah

$$I_{a1} = \frac{E_a}{Z_1 + \frac{Z_2(Z_0 + 3Z_f)}{Z_2 + Z_0 + 3Z_f}}$$

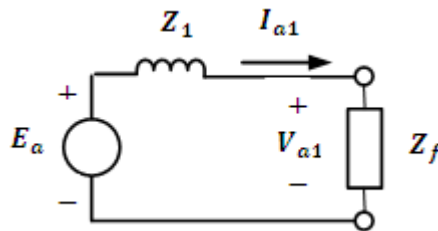
2.7.4 Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa



Gambar 2.8 Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa.

Gangguan 3 fasa dapat terjadi pada sistem tenaga listrik yang disebabkan karena terkena pohon atau dari benang layang – layang pada ketiga fasa penghantar.

Hubungan jaringan urutannya adalah



Gambar 2.9 Rangkaian Urutan Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa.

Dengan impedansi gangguan Z_f yang sama di semua fasa, maka besarnya tegangan pada gangguan adalah

$$V_{a1} = I_a Z_f \dots\dots\dots(2.18)$$

karena hanya arus urutan positif yang mengalir, maka

$$V_{a1} = I_{a1} Z_f = E_a \dots\dots\dots(2.19)$$

Maka besarnya gangguan hubung singkat 3 fasa adalah :

$$I_{a1} = \frac{E_a}{Z_1 + Z_f}$$