

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Tenaga Listrik¹

Dalam sepuluh tahun terakhir ini, masalah listrik menjadi polemik yang berkepanjangan dan telah memunculkan multi implikasi yang sangat kompleks di berbagai aspek kehidupan, antara lain: keuangan, ekonomi, sosial, budaya, politik, dan lain-lain. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa listrik telah menjadi bagian yang sangat penting bagi umat manusia. Oleh karenanya tak berlebihan bahwa listrik bisa dikatakan sebagai salah satu kebutuhan utama bagi penunjang dan pemenuhan kebutuhan hidup umat manusia. Beberapa tantangan besar yang dihadapi dunia pada masa kini, antara lain, bagaimana menemukan sumber energi baru, mendapatkan sumber energi yang pada dasarnya tidak akan pernah habis untuk masa mendatang, menyediakan energi di mana saja diperlukan, dan mengubah energi dari satu ke lain bentuk, serta memanfaatkannya tanpa menimbulkan pencemaran yang dapat merusak lingkungan hidup kita. Dibanding dengan bentuk energi yang lain, listrik merupakan salah satu bentuk energi yang praktis dan sederhana. Di samping itu listrik juga mudah disalurkan dari dan pada jarak yang berjauhan, mudah didistribusikan untuk area yang luas, mudah diubah ke dalam bentuk energi lain, dan bersih (ramah lingkungan).

Oleh karena itu, manfaat listrik telah dirasakan oleh masyarakat, baik pada kelompok perumahan, sosial, bisnis atau perdagangan, industri, dan publik. Tenaga listrik sebagai bagian dari bentuk energi dan cabang produksi yang penting bagi negara sangat menunjang upaya dalam memajukan dan mencerdaskan bangsa. Sebagai salah satu hasil pemanfaatan kekayaan alam yang menguasai hajat hidup

¹ Suhadi dkk. (2008). *Teknik Distribusi Tenaga Listrik Jilid 1*. Jakarta: Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan.

orang banyak, tenaga listrik perlu dipergunakan untuk kesejahteraan dan kemakmuran rakyat.

Yang dimaksud dengan sistem tenaga listrik adalah sekumpulan pusat listrik dan gardu induk (pusat beban) yang satu dengan yang lain dihubungkan oleh jaringan transmisi dan distribusi sehingga merupakan sebuah satu kesatuan yang terinterkoneksi. Suatu sistem tenaga listrik terdiri dari tiga bagian utama, yaitu: pusat pembangkit listrik, saluran transmisi, dan sistem distribusi. Suatu sistem distribusi menghubungkan semua beban yang terpisah satu dengan yang lain kepada saluran transmisi. Hal ini terjadi pada gardu-gardu induk (*substation*) di mana juga dilakukan transformasi tegangan dan fungsi - fungsi pemutusan (*breaker*) dan penghubung beban (*switching*). Gambar 3.1 Memperlihatkan sistem tenaga listrik mulai dari pembangkit sampai ke pengguna/pelanggan, yang berada di bidang Industri hingga perumahan.



Gambar 2. 1 Sistem Tenaga Listrik

Tegangan pada generator besar biasanya berkisar di antara 13,8 kV dan 24 kV. Tetapi generator besar yang modern dibuat dengan tegangan bervariasi antara 18kV dan 24 kV. Tegangan generator dinaikkan ke tingkat yang dipakai



untuk transmisi, yaitu 115 kV dan 765 kV. Tegangan tinggi standar (*high voltage*, *HV standard*) di luar negeri adalah 70 kV, 150 kV, dan 220 kV. Tegangan tinggi-ekstra standar (*extra high voltage*, *HV standard*) adalah 500 kV dan 700 kV. Keuntungan transmisi (*transmission capability*) dengan tegangan lebih tinggi akan menjadi jelas jika kita melihat pada kemampuan transmisi suatu saluran transmisi. Kemampuan ini biasanya dinyatakan dalam *Mega-Volt-Ampere* (MVA). Tetapi kemampuan transmisi dari suatu saluran dengan tegangan tertentu tidak dapat diterapkan dengan pasti, karena kemampuan ini masih tergantung lagi pada batasan-batasan termal dari penghantar, jatuh tegangan (*drop voltage*) yang diperbolehkan, keandalan, dan persyaratan kestabilan sistem.

Penurunan tegangan dari tingkat transmisi pertama-tama terjadi pada gardu induk bertenaga besar, di mana tegangan diturunkan ke daerah antara 70 kV dan 150 kV, sesuai dengan tegangan saluran transmisinya. Beberapa pelanggan yang memakai tenaga untuk keperluan industri sudah dapat dicatu dengan tegangan ini.

Penurunan tegangan berikutnya terjadi pada gardu distribusi primer, di mana tegangan diturunkan lagi menjadi 1 sampai 30 kV. Tegangan yang lazim digunakan pada gardu-distribusi adalah 20.000 V antar-fasa atau 11.500 V antara fasa ke tanah. Tegangan ini biasanya dinyatakan sebagai 20.000 V/11.500 V. Sebagian besar beban untuk industri dicatu dengan sistem distribusi primer, yang mencatu transformator distribusi. Transformator-transformator ini menyediakan tegangan sekunder pada jaringan tegangan rendah tiga-fasa empat-kawat untuk pemakaian di rumah-rumah tempat tinggal. Standar tegangan rendah yang digunakan adalah 380 V antara antar fasa dan 220V di antara masing-masing fasa dengan tanah, yang dinyatakan dengan 220/380 V.

2.2 Komponen Distribusi²

Komponen yang digunakan pada sistem distribusi tenaga listrik antara lain sebagai berikut

2.2.1 Tiang

Tiang listrik merupakan salah satu komponen utama dari konstruksi jaringan distribusi dengan saluran udara. Pada jaringan distribusi tiang yang biasa digunakan adalah :

- Tiang Listrik Beton (*concrete* / semen) adalah sebuah material tiang listrik yang terbuat dari beton atau semen dengan kriteria panjang 9 meter untuk tiang listrik tegangan rendah (TR) dan 12 meter untuk tiang listrik tegangan menengah (TM). Gambar 2.2 memperlihatkan contoh tiang listrik beton tegangan menengah (TM) yang digunakan oleh pihak PLN.



Gambar 2. 2 Tiang Beton

- Tiang Listrik Besi adalah tiang listrik yang terbuat dari material besi yang berbentuk pipa selanjutnya dimodifikasi khusus untuk penyangga listrik.

² PT PLN (Persero). 2010. Buku 5: *Standar Konstruksi Jaringan Tegangan Menengah Tenaga Listrik*. Jakarta.

Tiang listrik harus kuat karena selain digunakan untuk menopang hantaran listrik juga digunakan untuk meletakkan peralatan - peralatan pendukung jaringan distribusi tenaga listrik tegangan menengah. Penggunaan tiang listrik disesuaikan dengan kondisi lapangan.

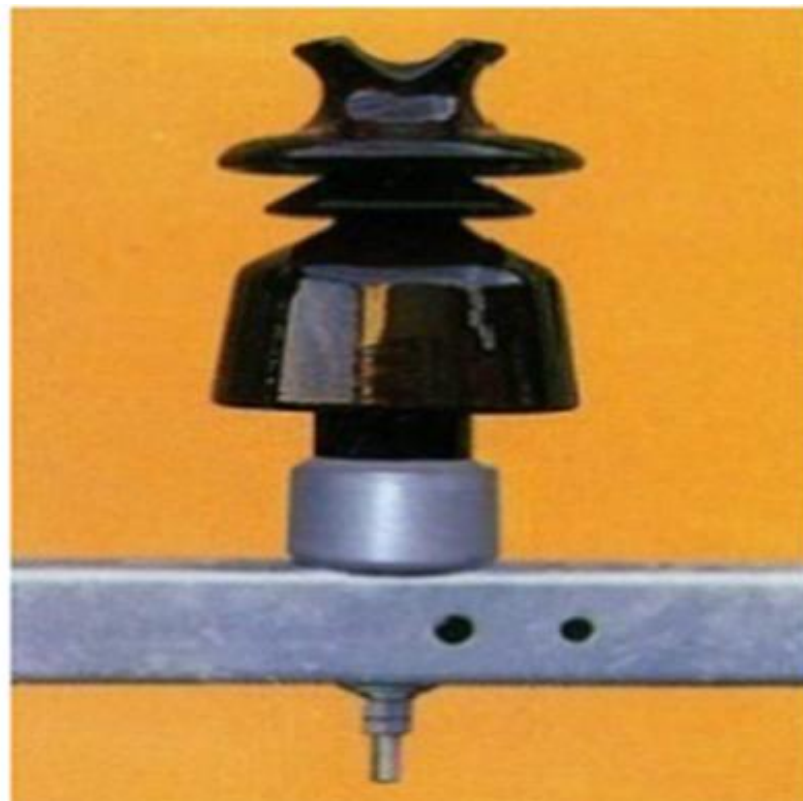
2.2.2 Isolator

Isolator adalah suatu peralatan listrik yang berfungsi untuk mengisolasi konduktor atau penghantar. Menurut fungsinya isolator dapat menahan berat dari konduktor / kawat penghantar, mengatur jarak dan sudut antar konduktor serta menahan adanya perubahan kawat penghantar akibat temperatur dan angin.

Jenis – jenis isolator yang sering dipakai pada jaringan distribusi :

- Isolator Tumpu

Gambar 2.3 Di bawah ini memperlihatkan contoh isolator tumpu tegangan menengah (TM) yang digunakan oleh pihak PLN.



Gambar 2. 3 Isolator Tumpu



- Isolator Tarik

Gambar 3.11 Di bawah ini, memperlihatkan contoh isolator tarik tegangan menengah (TM) yang digunakan oleh pihak PLN.



Gambar 2. 4 Isolator Tarik

2.2.3 Penghantar

Pada jaringan tegangan menengah sangat sering dijumpai penghantar yang tanpa berisolasi dan berisolasi. Ada penghantar yang penghantarnya itu berada di udara atau yang sering disebut penghantar Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM), Saluran Kabel Tegangan Menengah (SKTM), dan Saluran Kabel Udara Tegangan Menengah (SKUTM). Berikut macam – macam penghantar jaringan tegangan menengah :

- Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM)

Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM) adalah sebagai konstruksi termurah untuk penyaluran tenaga listrik pada daya yang sama. Konstruksi ini terbanyak digunakan untuk konsumen jaringan tegangan menengah yang digunakan di Indonesia. Ciri utama jaringan ini adalah penggunaan penghantar telanjang yang ditopang dengan isolator pada tiang besi / beton. Penggunaan penghantar telanjang, dengan sendirinya harus diperhatikan faktor yang terkait dengan keselamatan ketenagalistrikan



seperti jarak aman minimum yang harus dipenuhi penghantar bertegangan 20 kV tersebut antar fasa atau dengan bangunan atau dengan tanaman atau dengan jangkauan manusia. Termasuk dalam kelompok yang diklasifikasikan SUTM adalah juga bila penghantar yang digunakan adalah penghantar berisolasi setengah AAAC-S (*half insulated single core*). Penggunaan penghantar ini tidak menjamin keamanan terhadap tegangan sentuh yang dipersyaratkan akan tetapi untuk mengurangi resiko gangguan temporer khususnya akibat sentuhan tanaman. Gambar 3.12 memperlihatkan contoh penghantar AAAC tegangan menengah (TM).



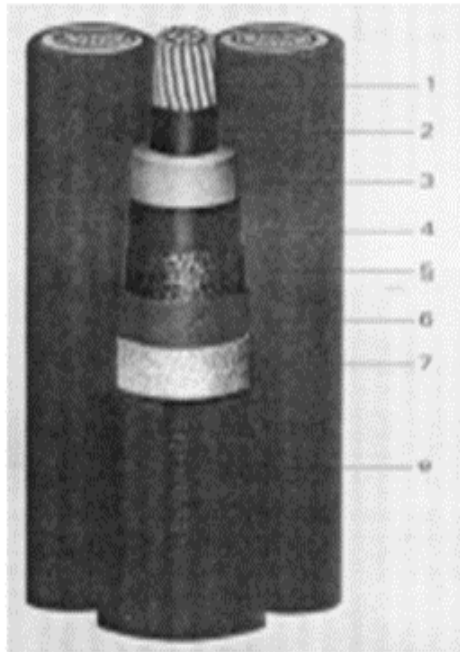
Gambar 2. 5 Penghantar SUTM

- Saluran Kabel Udara Tegangan Menengah (SKUTM)

Untuk lebih meningkatkan keamanan dan keandalan penyaluran tenaga listrik, penggunaan penghantar telanjang atau penghantar berisolasi setengah pada konstruksi jaringan Saluran Udara Tegangan Menengah 20 kV, dapat juga digantikan dengan konstruksi penghantar berisolasi penuh yang dipilin. Isolasi penghantar tiap Fasa tidak perlu di lindungi dengan pelindung mekanis. Berat kabel pilin menjadi pertimbangan terhadap pemilihan kekuatan beban kerja tiang beton penopangnya. Gambar 3.13



Memperlihatkan contoh penghantar Saluran Kabel Udara Tegangan Menengah (SKUTM).



Gambar 2. 6 Penghantar SKUTM

- Saluran Kabel Tegangan Menengah (SKTM)

Konstruksi SKTM ini adalah konstruksi yang aman dan andal untuk mendistribusikan tenaga listrik Tegangan Menengah, tetapi relatif lebih mahal untuk penyaluran daya yang sama. Keadaan ini dimungkinkan dengan konstruksi isolasi penghantar per fasa dan pelindung mekanis yang dipersyaratkan. Pada rentang biaya yang diperlukan, konstruksi ditanam langsung adalah termurah bila dibandingkan dengan penggunaan konduit atau bahkan *tunneling* (terowongan beton).

Penggunaan Saluran Kabel bawah tanah Tegangan Menengah (SKTM) sebagai jaringan utama pendistribusian tenaga listrik adalah sebagai upaya utama peningkatan kualitas pendistribusian. Dibandingkan dengan SUTM, penggunaan SKTM akan memperkecil resiko kegagalan operasi akibat faktor eksternal / meningkatkan keamanan ketenagalistrikan. Secara garis besar, termasuk dalam kelompok SKTM adalah :

1. SKTM bawah tanah – underground MV Cable.

2. SKTM laut – Submarine MV Cable

Selain lebih aman, namun penggunaan SKTM lebih mahal untuk penyaluran daya yang sama, sebagai akibat konstruksi isolasi penuh penghantar per Fase dan pelindung mekanis yang dipersyaratkan sesuai keamanan ketenagalistrikan. Penerapan instalasi SKTM seringkali tidak dapat lepas dari instalasi Saluran Udara Tegangan Menengah sebagai satu kesatuan sistem distribusi sehingga masalah transisi konstruksi diantaranya tetap harus dijadikan perhatian. Gambar 3.14 memperlihatkan contoh penghantar Saluran Kabel Tanah Tegangan Menengah (SKTM).



Gambar 2. 7 Penghantar SKTM

2.2.4 Peralatan Hubung (*Switching*)

Pada jaringan SUTM digunakan juga peralatan switching untuk optimasi operasi distribusi. Pada percabangan atau pengalokasian seksi pada jaringan SUTM untuk maksud kemudahan operasional harus dipasang Pemutus Beban (Load Break Switch : LBS) , selain LBS dapat juga dipasangkan Fused Cut-Out (FCO).



2.3 Jenis Gangguan³

Klasifikasi gangguan yang terjadi pada jaringan distribusi :

- a. Dari Jenis Gangguannya :
 - i) Gangguan dua fasa atau tiga fasa ke tanah.
 - ii) Gangguan fasa ke fasa
 - iii) Gangguan dua fasa ke tanah
 - iv) Gangguan satu fasa ke tanah atau gangguan tanah
- b. Dari Lamanya Gangguan
 - i) Gangguan Permanen

Gangguan permanen tidak akan dapat hilang sebelum penyebab gangguan dihilangkan terlebih dahulu. Gangguan yang bersifat permanen dapat disebabkan oleh kerusakan peralatan, sehingga gangguan ini baru hilang setelah kerusakan ini diperbaiki atau karena ada sesuatu yang mengganggu secara permanen. Untuk membebaskannya diperlukan tindakan perbaikan atau menyingkirkan penyebab gangguan tersebut. Terjadinya gangguan ditandai dengan jatuhnya pemutus tenaga, untuk mengatasinya operator memasukkan tenaga secara manual. Contoh gangguan ini yaitu adanya kawat yang putus, terjadinya gangguan hubung singkat, dahan yang menimpa kawat phasa dari saluran udara, adanya kawat yang putus, dan terjadinya gangguan hubung singkat.

- ii) Gangguan temporer

Gangguan yang bersifat temporer ini apabila terjadi gangguan, maka gangguan tersebut tidak akan lama dan dapat normal Kembali. Gangguan ini dapat hilang dengan sendirinya atau dengan memutus sesaat bagian yang terganggu dari sumber tegangannya. Kemudian disusul dengan penutupan kembali peralatan hubungannya. Apabila gangguan temporer sering terjadi dapat menimbulkan kerusakan pada peralatan dan akhirnya menimbulkan gangguan yang bersifat permanen. Salah satu contoh

³ Suswanto, Darman. 2009. "Sistem Distribusi Tenaga Listrik". Padang: Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Negeri Padang



gangguan yang bersifat temporer adalah gangguan akibat sentuhan pohon yang tumbuh disekitar jaringan, akibat binatang seperti burung kelelawar, ular dan layangan. Gangguan ini dapat hilang dengan sendirinya yang disusul dengan penutupan kembali peralatan hubungannya. Apabila gangguan temporer sering terjadi maka hal tersebut akan menimbulkan kerusakan pada peralatan dan akhirnya menimbulkan gangguan yang bersifat permanen.

2.4 Penyebab Gangguan⁴

2.4.1 Pengelompokan Gangguan

Penyebab gangguan dapat dikelompokkan menjadi:

1) Gangguan Internal (dari dalam):

yaitu gangguan yang disebabkan oleh sistem itu sendiri. Misalnya gangguan hubung singkat, switching kegagalan isolasi, kerusakan pada pembangkit, kesalahan termal, akibat tegangan lebih, karena bahan yang cacat atau rusak, dan penghantar putus. Gambar 2.8 memperlihatkan gangguan akibat kerusakan peralatan jaringan.



Gambar 2. 8 Gangguan akibat kerusakan peralatan Jaringan

⁴ Rizal A. Duyo, "Analisis Penyebab Gangguan Jaringan Pada Distribusi Listrik Menggunakan Metode *Fault Tree Analysis* di PT. PLN (Persero) Rayon Daya Makassar, Vertex Elektro, Vol. 12, No. 02, (Agustus 2020).

2) Gangguan Eksternal (dari luar)

yaitu gangguan yang disebabkan oleh alam atau diluar sistem. Misalnya terputusnya saluran/kabel karena angin, badai, petir, pepohonan, layang – layang, Surja petir atau surja hubung, Burung, Polusi debu, Pohon - pohon yang tumbuh di dekat jaringan, Andongan yang Terlalu Kendor. Gambar 2.2 memperlihatkan penyebab gangguan karena pohon yang tumbuh di dekat jaringan.



Gambar 2. 9 Pohon Tumbuh di Dekat Jaringan

3) Gangguan Karena Faktor Manusia

yaitu gangguan yang disebabkan oleh kecerobohan atau kelalaian operator, ketidaktelitian, tidak mengindahkan peraturan pengamanan diri, dan lain-lain

2.4.2 Gangguan Karena Kerusakan Isolasi

Gangguan ini terjadi karena kerusakan isolasi dan kejadian tak terduga dari benda asing. Kerusakan isolasi dapat terjadi karena polusi dan penuaan. Saat ini, level tahanan isolasi tertinggi (high insulation level) adalah sekitar 1000 kali nilai tegangan nominal (PUIL 2000). Namun adanya pencemaran pada isolator yang biasanya disebabkan oleh penumpukan jelaga atau debu di kawasan industri dan penumpukan garam akibat angin yang mengandung uap



garam menyebabkan kekuatan isolasi menurun. Hal ini menyebabkan penurunan resistansi isolator dan menyebabkan arus bocor. Arus bocor kecil ini mempercepat kerusakan isolator. Selain itu, ekspansi dan kontraksi yang berulang juga dapat menyebabkan penurunan resistansi isolator.

2.5 Akibat dari Gangguan⁵

Akibat dari gangguan yang paling serius adalah terjadinya kebakaran yang tidak hanya akan merusak peralatan-peralatan, dimana gangguan yang terjadi bisa berkembang ke sistem sehingga akan mengakibatkan kegagalan total dari sistem. Berikut ini adalah akibat- akibat yang disebabkan oleh gangguan :

- 1) Penurunan tegangan yang cukup besar pada sistem daya sehingga dapat merugikan pelanggan atau mengganggu kerja peralatan listrik.
- 2) Bahaya kerusakan pada peralatan yang diakibatkan oleh *arcing* (busur api listrik).
- 3) Bahaya kerusakan pada peralatan akibat (pemanasan berlebih) dan akibat tekanan mekanis (kerusakan parah pada peralatan listrik dan sebagainya).
- 4) Terganggunya stabilitas sistem dan ini dapat menimbulkan pemadaman menyeluruh pada sistem tenaga listrik.
- 5) Menyebabkan penurunan tegangan sehingga koil tegangan relai gagal bertahan.

2.6 Macam – Macam Gangguan⁶

Pada sistem tenaga listrik, sering terjadi gangguan, meliputi :

2.6.1 Gangguan Tegangan Lebih

Gangguan tegangan lebih sering terjadi akibat adanya kelainan pada sistem tenaga listrik, antara lain:

- 1) Tegangan lebih dengan *power frequency*, misalnya :
Pembangkin kehilangan beban yang diakibatkan adanya gangguan pada sisi jaringan, sehingga *over speed* pada generator. Tegangan

⁵ Nopi Aryanto, Maryani Balkis, “Tinjauan Gangguan Jaringan Distribusi 20 kV Penyulang Muara Aman PT. PLN (Persero) ULP Rayon Muara Aman”, JTERAF, Vol 1, No. 1, 2021, Politeknik Raflesia

⁶ Sarimun, Wahyudi. 2016. Proteksi Sistem Distribusi Tenaga Listrik. Depok, Garamond



lebih ini dapat juga terjadi karena adanya gangguan pada pengatur tegangan otomatis (*Automatic Voltage Regulator*) yang terpasang pada generator.

- 2) Tegangan lebih transient karena adanya surja petir yang mengenai peralatan listrik disebut surja petir atau saat pemutus (PMT) terbuka karena adanya gangguan listrik yang menimbulkan kenaikan tegangan disebut surja hubung.

2.6.2 Gangguan Beban Lebih

Gangguan beban lebih terjadi karena pembebanan sistem distribusi yang melebihi kapasitas sistem terpasang. Gangguan ini sebenarnya bukan gangguan murni, tetapi bila dibiarkan terus-menerus berlangsung dapat merusak peralatan. Beban lebih adalah sejumlah arus yang mengalir yang lebih besar dari arus nominal. Hal ini terjadi karena penggunaan daya listrik oleh konsumen melampaui kapasitas nominal mesin. Hal ini tidaklah segera merusak perlengkapan listrik tetapi mengurangi umur peralatan listrik. Untuk waktu yang singkat arus lebih tidaklah membawa akibat yang jelek terhadap perlengkapan listrik, umpamanya pada waktu menjalankan motor-motor, arus mulanya cukup besar dalam waktu yang singkat tetapi tidak banyak berpengaruh terhadap peralatan listrik.

2.6.3 Gangguan ketidakstabilan (*Instability*)

Gangguan ketidakstabilan sistem disebabkan karena adanya gangguan hubung singkat di sistem tenaga listrik atau lepasnya pembangkit, dapat menyebabkan unit-unit pembangkit lepas sinkron, ayunan dapat menyebabkan salah kerja relai. Lepas sinkron dapat menyebabkan berkurangnya pembangkit, karena trip nya pembangkitnya yang besar dari *spinning reserve*, maka frekuensi akan terus turun atau terpisahnya sistem tenaga listrik yang selanjutnya dapat menyebabkan gangguan yang lebih luas bahkan sistem terjadi keruntuhan listrik (*collapse*). Atau dapat juga karena gangguan listrik pada pasokan listrik ke beban yang men tripkan pengaman



yang terpasang di penghantar, sehingga generator mengalami kenaikan putaran sehingga dapat menaikkan tegangan dan frekuensi bila governor tidak respon dengan cepat untuk menutup bahan bakar, maka over voltage relay atau over frekuensi yang terpadang di generator akan trip.

2.6.4 Gangguan Hubung Singkat

Arus lebih karena hubung pendek yang disebabkan oleh gangguan atau hubungan yang salah pada sirkit listrik (*short-circuit current*) (PUIL, 2000 : 4).

a. Gangguan berdasarkan kesimetrisannya:

1. Gangguan Hubung Singkat Simetris

Merupakan gangguan hubung singkat yang terjadi pada ketiga fasa sehingga arus maupun tegangan setiap fasanya tetap seimbang setelah gangguan terjadi. Gangguan ini dibagi menjadi :

- Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa, yaitu gangguan yang terjadi ketika ketiga fasa saling terhubung singkat atau saling bersentuhan.

2. Gangguan Hubung Singkat Asimetris (Tak Simetris)

Merupakan gangguan hubung singkat yang mengakibatkan tegangan dan arus yang mengalir pada setiap fasanya menjadi tidak seimbang atau berbeda, Gangguan ini dibagi menjadi:

- Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah, yaitu gangguan yang disebabkan karena salah satu fasa terhubung singkat ke tanah.
- Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa, yaitu gangguan yang disebabkan karena fasa dan fasa antar kedua fasa terhubung singkat atau saling bersentuhan dan tidak terhubung ke tanah.
- Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah, yaitu gangguan yang terjadi ketika kedua fasa terhubung singkat ke tanah.

Yang membedakan antara gangguan hubung singkat tiga fasa, dua fasa dan satu fasa ke tanah 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 ini:

$$Z \text{ untuk gangguan tiga fasa, } Z = Z_1 + Z_f \dots \dots \dots (2.1)$$

$$Z \text{ untuk gangguan dua fasa, } Z = Z_1 + Z_2 + Z_f \dots \dots \dots (2.2)$$

$$Z \text{ untuk gangguan satu fasa, } Z = Z_1 + Z_2 + Z_0 + Z_f \dots \dots \dots (2.3)$$

Dimana :

Z_1 = Impedansi urutan positif (Ohm, pu)

Z_2 = Impedansi urutan negatif (Ohm, pu)

Z_0 = Impedansi urutan nol (Ohm, pu)

Z_f = Impedansi gangguan (Ohm, pu)

Dan rumus dasar menghitung hubung singkat adalah :

$$I = \frac{V}{R} \dots \dots \dots (2.4)$$

Dimana :

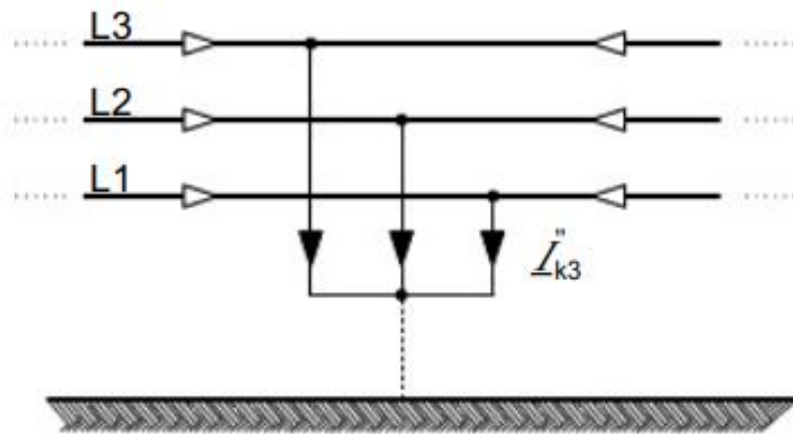
I = Arus (A)

V = Tegangan (V)

R = Resistansi (Ohm)

2.6.5 Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa

Gangguan hubung singkat tiga fasa dapat terjadi karena ketiga fasa saling bertemu, dimana arus maupun tegangan setiap fasanya tetap seimbang setelah gangguan terjadi. Sehingga pada sistem seperti ini dapat dianalisa hanya dengan menggunakan urutan positif saja. Gangguan hubung singkat tiga fasa diperlihatkan pada gambar dibawah ini:



Gambar 2. 10 Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa

Arus hubung singkat tiga fasa adalah :

$$I_{3fasa} = \frac{V_a}{Z_1 + Z_f} \dots \dots \dots (2.5)$$

Dimana :

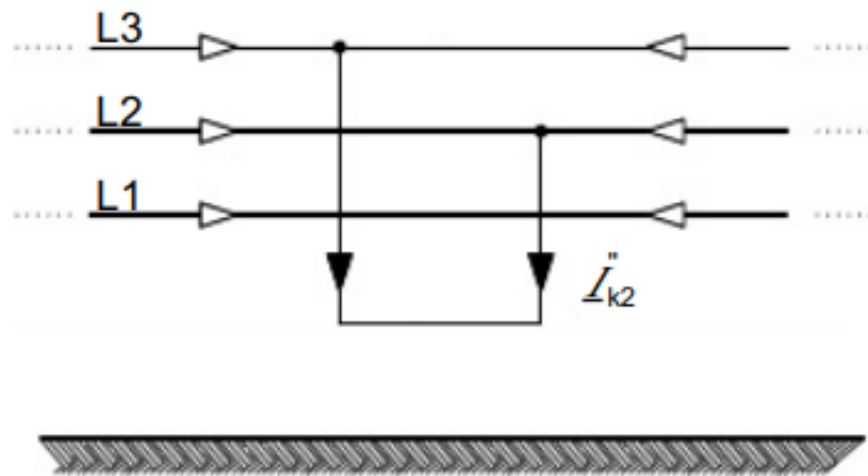
V_a = Tegangan gangguan (V)

Z_1 = Impedansi Urutan Positif (Ohm, pu)

Z_f = Impedansi gangguan (Ohm, pu)

2.6.6 Gangguan Hubung Singkat Fasa Ke Fasa

Hubung singkat fasa ke fasa adalah ketika antara fasa ke fasa saling terhubung. Pada gangguan hubung singkat ini, arus saluran jaringan tidak mengandung komponen urutan nol, dikarenakan tidak ada gangguan yang terhubung ke tanah. Gangguan terjadi pada fasa a dan b. Gangguan hubung singkat antar fasa diperlihatkan pada gambar dibawah ini :



Gambar 2. 11 Gangguan Hubung Singkat Fasa ke Fasa

Arus hubung singkat antar fasa adalah :

$$I_{2f\text{asa}} = \frac{V_a}{Z_1 + Z_2 + Z_f} \dots \dots \dots (2.6)$$

Dimana :

V_a = Tegangan gangguan (V)

Z_1 = Impedansi Urutan Positif (Ohm, pu)

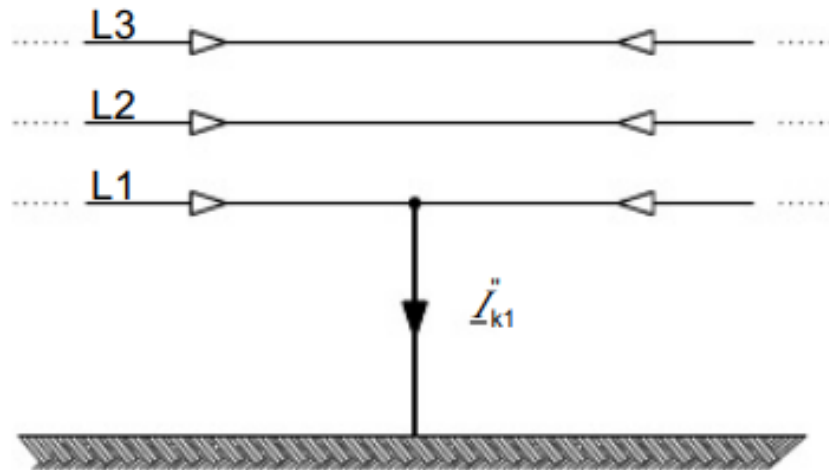
Z_2 = Impedansi Urutan Negatif (Ohm, pu)

Z_f = Impedansi gangguan (Ohm, pu)

2.6.7 Gangguan Hubung Singkat Fasa Ke Tanah

Gangguan yang sering terjadi pada sistem tenaga listrik merupakan gangguan asimetris, dimana gangguan ini mengakibatkan arus dan tegangan yang mengalir pada setiap fasanya menjadi tidak seimbang, sehingga, kita memerlukan metode komponen simetris untuk menganalisa tegangan dan arus pada saat terjadi gangguan. Gangguan yang terjadi dapat dianalisa dengan menghubungkan-singkatkan semua sumber tegangan yang ada pada sistem, dan mengganti titik gangguan dengan sebuah sumber tegangan yang besarnya sama dengan tegangan sesaat sebelum terjadinya gangguan di titik gangguan tersebut. Dengan menggunakan metode ini sistem tiga fasa tidak seimbang

dapat dijabarkan dengan menggunakan teori komponen simetris yaitu berdasarkan komponen urutan positif, komponen urutan negatif, dan komponen urutan nol. Gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah dapat ditunjukkan seperti pada gambar dibawah ini :



Gambar 2. 12 Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah

Arus hubung singkat satu fasa ke tanah adalah :

$$I_{1f\text{asa}} = \frac{3 \times V_a}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + Z_f} \dots \dots \dots (2.7)$$

Dimana

V_a = Tegangan gangguan (V)

Z_1 = Impedansi Urutan Positif (Ohm, pu)

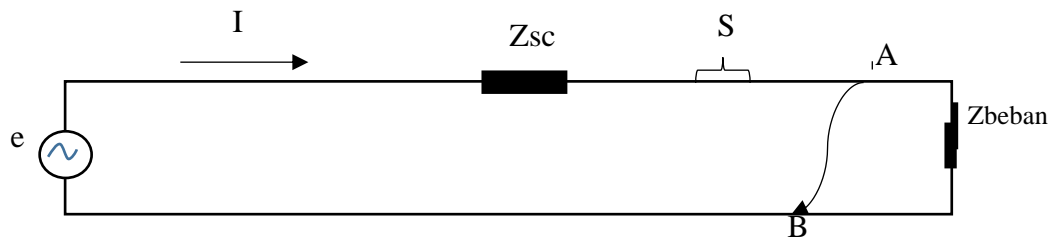
Z_2 = Impedansi Urutan Negatif (Ohm, pu)

Z_0 = Impedansi Urutan Nol (Ohm, pu)

Z_f = Impedansi gangguan (Ohm, pu)

2.7 Menghitung Impedansi

Impedansi hubung singkat Z_{SC} (*Short Circuit*) terdiri dari tahanan (R) dan Reaktansi/ Imajiner (jX), yang di peroleh dari prnjulahan impedansi sumber listrik dan jaringan listrik.



Gambar 2. 13 Jaringan Sistem Tenaga Listrik

Impedansi beban (Z_{beban}) tersambung pada suatu sistem tenaga listrik, bila saklar S ditutup, maka akan mengalir arus I dari sumber yang besarnya tergantung pada kapasitas dari beban (VA, Watt).

Saat jaringan beroperasi terjadi hubung singkat antara titik A dan B, maka timbul arus gangguan hubung singkat pada jaringan tersebut. Dalam hal ini kapasitas beban tidak berpengaruh pada arus gangguan, yang berpengaruh adalah kapasitas sumber, impedansi sumber, dan impedansi jaringan tenaga listrik menjadi impedansi hubung singkat. Besarnya impedansi hubung singkat, sebagai berikut :

$$Z_{SC} = \sqrt{(R^2 + X^2)} \dots \dots \dots (2.8)$$

Dimana

Z_{SC} = Impedansi Hubung Singkat (Ohm, pu)

R = Tahanan Sistem (Ohm, pu)

X = Reaktansi sistem (Ohm, pu)

Secara umum Kondisi kenaikan arus hubung singkat berbeda, tergantung lokasi titik gangguan hubung singkat.

Dalam menghitung impedansi dikenal tiga macam impedansi urutan, yaitu:

- Impedansi urutan positif (Z_1), yaitu impedansi yang hanya dirasakan oleh arus urutan positif
- Impedansi urutan negatif (Z_2), yaitu impedansi yang hanya dirasakan oleh arus urutan negatif.
- Impedansi urutan nol (Z_3), yaitu impedansi yang hanya dirasakan oleh urutan nol.

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.

2.7.1 Impedansi Daya Hubung Singkat

Untuk menghitung impedansi sumber pada bus 70 kV, terlebih dahulu untuk menghitung daya hubung singkat terlebih dahulu, beban dapat diambil dari data arus yang mengalir dari sistem interkoneksi ke gardu induk. Maka dapat kita gunakan persamaan:

$$MVA_{sc3\phi} = \sqrt{3} \times V \times I_{hs} \dots \dots \dots (2.9)$$

Dimana

$MVA_{sc3\phi}$ = Daya hubung singkat (MVA)

V = Tegangan sisi primer (V)

I_{hs} = Arus pada Gardu induk (A)

2.7.2 Impedansi Dasar Primer

Setelah mendapatkan daya hubung singkat, kita akan mencari impedansi dasar pada bus 70 kV. Untuk menghitung impedansi dasar dapat digunakan rumus sebagai berikut :

$$X_{sc}(sisi\ 70\ kV) = \frac{kV^2}{MVA_{sc\ 3\phi}} \dots \dots \dots (2.10)$$

Dimana

$MVA_{sc3\phi}$ = Daya hubung singkat (MVA)

kV = Tegangan sisi primer (V)

X_{sc} = Impedansi dasar (Ohm, pu)

Perlu diingat bahwa impedansi sumber ini adalah nilai tahanan pada sisi primer 70 kV. Karena arus gangguan hubung singkat disisi 20 kV, maka



impedansi sumber harus tersebut harus dikonversikan dulu ke sisi 20 kV, sehingga perhitungan arus gangguan hubung singkat nanti sudah menggunakan tegangan 20 kV (Sebagai sumber tidak lagi mempergunakan tegangan 150 kV karena semua impedansi sudah di konversikan ke sistem tegangan 20 kV).

2.7.3 Impedansi Dasar Sekunder

Untuk mengkonversikan impedansi yang terletak pada sisi 70 kV ke sisi 20 kV, maka dilakukan dengan cara berikut :

$$X_{s1}(\text{sisi } 20 \text{ kV}) = \frac{kV_2^2}{kV_1^2} \times X_1 \dots\dots\dots$$

(2.11)

Dimana

kV_1 = Tegangan sisi primer (kV)

kV_2 = Tegangan sisi sekunder (kV)

X_1 = Impedansi sisi primer (Ohm, pu)

X_{s1} = Impedansi sekunder (Ohm, pu)

2.7.4 Nilai Reaktansi Trafo Tenaga

Untuk dapat menghitung reaktansi trafo, dapat menggunakan rumus:

$$X_t (\text{pada } 100\%) = \frac{kV^2}{MVA} \dots\dots\dots (2.12)$$

dimana :

X_t = Reaktansi Transformator (Ω)

kV = Nilai tegangan pada sisi sekunder trafo (V)

MVA = Daya Trafo (MVA)

Setelah mendapatkan nilai reaktansi trafo, barulah kita bisa mencari reaktansi urutan sebagai berikut :

- Reaktansi urutan positif – negatif (X_{T1} / X_{T2})

Dimana dapat menggunakan rumus :

$$X_{t1} = X_{t1} (\%) \times X_{t1} (\text{Ohm}) \dots\dots\dots (2.13)$$



dimana :

X_t (%) = Reaktansi transformator pada *nameplate* (Ω)

X_t (Ohm) = Reaktansi transformator pada (Ω)

- Reaktansi urutan nol (X_{t0})

Sebelum menghitung reaktansi urutan nol (X_{t0}) terlebih dahulu diketahui data transformator tenaga itu sendiri, yaitu data dari kapasitas belitan delta yang ada dalam transformator :

Untuk transformator tenaga dengan hubungan belitan ΔY dimana kapasitas belitan delta sama besar dengan kapasitas belitan Y, maka $X_{t0} = X_{t1}$

Untuk transformator tenaga dengan hubungan belitan Y_{yd} dimana kapasitas belitan delta (d) biasanya adalah sepertiga dari kapasitas belitan Y (belitan yang dipakai untuk menyalurkan daya, sedangkan belitan delta tetap ada di dalam tetapi tidak dikeluarkan kecuali satu terminal delta ditanahkan, maka nilai $X_{t0} = 3 \times X_{t1}$

Untuk transformator tenaga dengan hubungan belitan YY dan tidak mempunyai belitan delta di dalamnya, maka untuk menghitung besarnya berkisar antara 9 sampai dengan 14 dikali $X_{t1} = X_{t2}$

$$X_0 = 9 \text{ s/d } 10 \times X_{t1} = X_{t2} \dots \dots \dots (2.14)$$

2.7.5 Impedansi Penyulang

Impedansi penyulang dapat dihitung, tergantung dari besarnya impedansi per km (ohm/km) dari penyulang yang di hitung, dimana nilainya di tentukan dari jenis penghantar, luas penampang dan panjang jaringan SUTM atau SKTM.

Sehingga untuk impedansi penyulang dapat ditentukan dengan menggunakan rumus :

- Urutan positif dan urutan negatif

$$Z_1 = Z_2 = \% \text{ panjang penyulang (km)} \times Z_1 \dots \dots \dots (2.15)$$

Di mana :

Z_1 = Impedansi urutan positif (ohm)



Z_2 = Impedansi urutan negatif (ohm)

- Urutan nol

$$Z_0 = \% \text{ panjang penyulang (km)} \times Z_0 \dots\dots\dots (2.16)$$

Di mana :

Z_0 = Impedansi urutan nol (ohm)

2.7.6 Impedansi Ekivalen Jaringan

Perhitungan yang dihitung di sini ialah perhitungan besarnya nilai impedansi ekivalen urutan positif (Z_{1eq}), impedansi ekivalen urutan negative (Z_{2eq}), dan impedansi ekivalen urutan nol (Z_{0eq}) dari titik gangguan sampai ke sumber.

Untuk menghitung impedansi ekivalen jaringan dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

- Urutan positif dan urutan negative ($Z_{1eq} = Z_{2eq}$)

$$Z_{1eq} = Z_{2eq} = Z_{s1} + Z_{t1} + Z_1 \text{ penyulang} \dots\dots\dots (2.17)$$

Di mana :

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 trafo tenaga urutan positif dan negatif (ohm)

- Urutan nol

$$Z_{0eq} = Z_{t0} + 3RN + Z_1 \text{ penyulang} \dots\dots\dots (2.18)$$

Di mana :

Z_{0eq} = Impedansi ekivalen jaringan nol (ohm)

Z_{t0} = Impedansi transformator tenaga urutan nol (ohm)

RN = Tahanan transformator tenaga (ohm)

Z_0 = Impedansi urutan nol (ohm)

