



## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Sistem Distribusi Tenaga Listrik<sup>1</sup>

Sistem distribusi merupakan bagian dari sistem tenaga listrik. System distribusi ini berguna untuk menyalurkan tenaga listrik dari sumber daya listrik besar (*Bulk Power Source*) sampai ke konsumen. Tenaga listrik yang dihasilkan oleh pembangkit dengan tegangan dari 6 kV sampai 20 kV dan dinaikkan tegangannya oleh gardu induk menggunakan transformator *step up* menjadi 70 kV, 150 kV, 275 kV atau 500 kV kemudian disalurkan melalui saluran transmisi. Tujuan menaikkan tegangan adalah untuk memperkecil kerugian daya listrik pada saluran transmisi, di mana dalam hal ini kerugian daya adalah sebanding dengan kuadrat arus yang mengalir ( $I^2 \cdot R$ ).

Dari saluran transmisi, tegangan diturunkan lagi menjadi 20 kV menggunakan transformator penurun tegangan pada gardu induk distribusi yang kemudian dengan sistem tegangan tersebut penyaluran tenaga listrik dilakukan oleh saluran distribusi primer. Dari saluran distribusi primer inilah gardu –gardu distribusi menurunkan tegangannya menjadi sistem tegangan rendah, yaitu 220V/400V. Selanjutnya disalurkan oleh saluran distribusi sekunder ke konsumen-konsumen.

##### 2.1.1 Sistem Jaringan Distribusi Primer<sup>1</sup>

Sistem jaringan distribusi primer atau sering disebut jaringan distribusi tegangan menengah ini terletak antara gardu induk dengan gardu distribusi (gardu pembagi) yang memiliki tegangan sistem lebih tinggi dari tegangan terpakai untuk konsumen. Standar tegangan untuk jaringan distribusi primer ini adalah tegangan sistem di atas 1000 V sampai dengan 20.000 V.

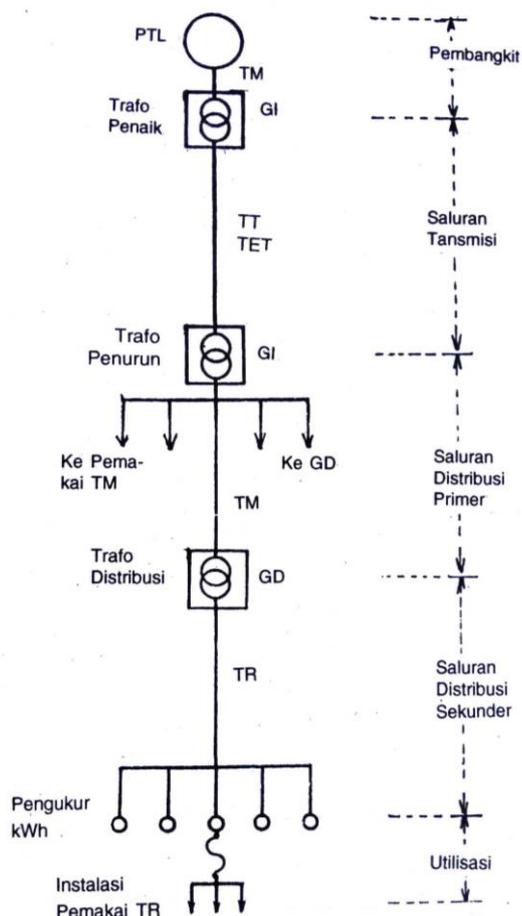
---

<sup>1</sup>Abdul Kadir, *Distribusi dan Utilisasi Tenaga Listrik* (Jakarta: Universitas Indonesia, 2006), Hal. 5 dan 21



### 2.1.2 Sistem Jaringan Distribusi Sekunder<sup>1</sup>

Sistem jaringan distribusi sekunder atau sering disebut jaringan distribusi tegangan rendah merupakan jaringan yang berfungsi sebagai penyalur tenaga listrik dari gardu-gardu distribusi ke pusat-pusat beban (konsumen tenaga listrik). Besarnya standar tegangan untuk jaringan distribusi sekunder ini adalah 127/220 V untuk system lama, dan 220/400 V untuk sistem baru, serta 440/550 V untuk keperluan industri. Besarnya tegangan maksimum yang diizinkan adalah 3 % sampai 4 % lebih besar dari tegangan nominalnya. Penetapan ini sebanding dengan besarnya nilai tegangan jatuh (*drop voltage*) yang telah ditetapkan berdasarkan PUIL 661 F.1 bahwa rugi-rugi daya pada suatu jaringan adalah 15%. Dengan adanya pembatasan tersebut, stabilitas penyaluran daya ke pusat-pusat beban tidak terganggu.



Gambar 2.1 Sistem Tenaga Listrik

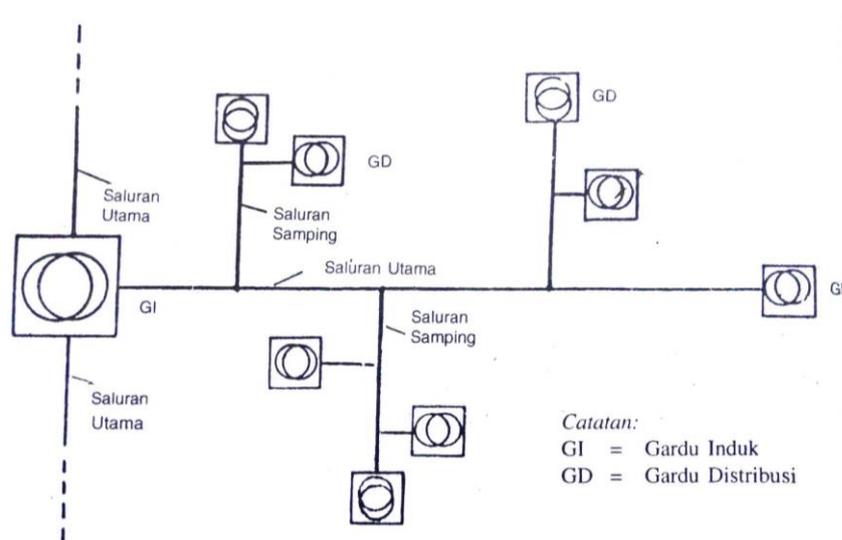


## 2.2 Konfigurasi Sistem Jaringan Distribusi<sup>1</sup>

Konfigurasi suatu jaringan tenaga listrik mempunyai dua jenis dasar, yang pertama adalah sistem *radial* dan yang kedua adalah sistem *loop* (tertutup).

### 2.2.1 Sistem Jaringan Distribusi Radial<sup>1</sup>

Sistem jaringan radial adalah yang paling sederhana dan paling banyak dipakai, terdiri atas fider (*feeder*) atau rangkaian tersendiri, yang seah-olah keluar dari suatu sumber atau wilayah tertentu secara radial. Fider dapat juga dianggap sebagai terdiri atas suatu bagian utama dari saluran samping atau lateral lain bersumber dan dihubungkan dengan transformator distribusi. Saluran samping sering disambung pada fider dengan sekering (*fuse*). Dengan demikian maka gangguan pada saluran samping tidak akan mengganggu seluruh fider. Apabila sekering itu tidak bekerja atau terdapat gangguan pada fider, proteksi pada saklar daya di gardu induk akan bekerja, dan seluruh fider akan kehilangan energi.



Gambar 2.2 Sistem Jaringan Distribusi Radial

### 2.2.2 Sistem Jaringan Distribusi Loop<sup>1</sup>

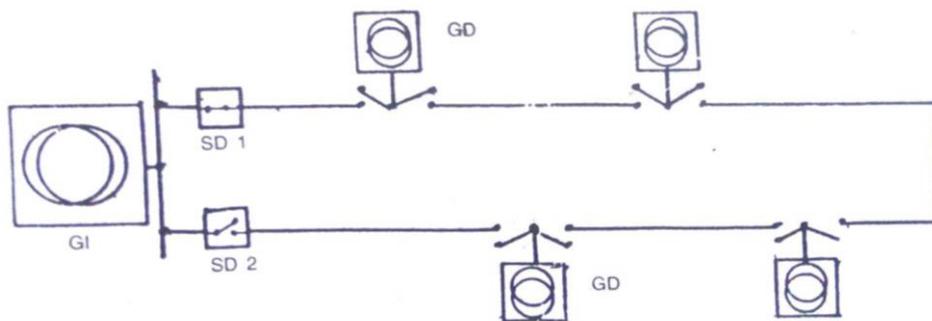
Suatu cara lain guna mengurangi lama interupsi daya yang disebabkan gangguan adalah dengan mendesain fider sebagai lup (*loop*) dengan menyambung kedua ujung saluran. Hal ini mengakibatkan bahwa suatu pemakai dapat memperoleh pasokan energi dari dua arah. Apabila pasokan dari salah satu arah



terganggu, pemakai itu akan disambung pada pasokan arah lainnya. Kapasitas cadangan yang cukup besar harus tersedia pada tiap fider. Sistem lup dapat dioperasikan secara terbuka, ataupun secara tertutup.

Pada sistem lup terbuka, bagian-bagian fider tersambung melalui alat pemisah (*disconnectors*), dan kedua ujung fider tersambung pada sumber energi. Pada suatu tempat tertentu pada fider, alat pemisah sengaja dibiarkan dalam keadaan terbuka. Pada dasarnya, sistem ini terdiri atas dua fider yang dipisahkan oleh suatu pemisah, yang dapat berupa sekring, alat pemisah, atas daya. Bila terjadi gangguan, bagian saluran dari fider yang terganggu dapat dilepas dan menyambungkannya pada fider yang tidak terganggu. Sistem demikian biasanya dioperasikan secara manual dan dipakai pada jaringan-jaringan yang relatif kecil.

Pada sistem lup tertutup diperoleh suatu tingkat keandalan yang lebih tinggi. Pada sistem ini alat-alat pemisah biasanya berupa saklar daya yang lebih mahal. Saklar-saklar daya itu digerakkan oleh relay yang membuka saklar daya pada tiap ujung dari bagian saluran yang terganggu, sehingga bagian fider yang tersisa tetap berada dalam keadaan berenergi.



Gambar 2.3 Sistem Jaringan Distribusi Loop

### 2.3 Jenis Penghantar Pada Sistem Jaringan Distribusi<sup>2</sup>

Jaringan distribusi SUTM 20 kV pada umumnya menggunakan jenis kawat, yaitu saluran yang konduktornya tidak dilapisi isolasi sebagai pelindung luar. Namun, untuk daerah yang masih ditumbuhi pepohonan atau daerah hutan,

<sup>2</sup>Suhadi, *Teknik Distribusi Tenaga Listrik Jilid 1*, (Departemen Pendidikan Nasional, 2008) Hal. 18



jenis penghantar yang digunakan sudah memiliki isolasi agar dapat memperkecil terjadinya gangguan *short circuit* (hubung singkat).

Bahan konduktor yang paling sering digunakan adalah tembaga (*copper*) dan aluminium. Tembaga mempunyai kelebihan dibandingkan dengan kawat penghantar aluminium karena konduktivitas dan kuat tariknya jauh lebih tinggi. Namun, adapun kelemahan dari penghantar tembaga adalah besar tahanan yang sama, massa yang berat, dan juga lebih mahal. Oleh karena itu, kawat penghantar aluminium sekarang lebih sering digunakan, bahkan dapat dikatakan telah menggantikan penghantar tembaga. Untuk memperbesar kuat tarik dari penghantar kawat aluminium ini digunakanlah campuran aluminium (*aluminium alloy*). Macam-macam jenis penghantar yang sekarang digunakan adalah sebagai berikut :

1. AAAC (*All Aluminium Alloy Conductor*), seluruhnya terbuat dari campuran aluminium.
2. AAAC-S (*All Aluminium Alloy Conductor – Shielded*), seluruhnya terbuat dari campuran aluminium, telah berisolasi *PVC*.
3. Kabel MVTIC (*Medium Voltage Twisted Insulated Cable*), kabel berisolasi yang berukuran 240 mm<sup>2</sup> dan tahan terhadap timpaan ranting pohon serta gangguan hewan buas.
4. XLPE (*Cross Linked Polyethylene*), kabel berlapis *PVC* yang digunakan pada SKTM.

#### **2.4 Gardu Induk<sup>3</sup>**

Gardu Induk merupakan sub sistem dari sistem penyaluran (transmisi) tenaga listrik atau merupakan satu kesatuan dari sistem penyaluran (transmisi). Penyaluran (transmisi) merupakan sub sistem dari sistem tenaga listrik. Berarti, gardu induk merupakan sub-sub sistem dari sistem tenaga listrik. Sebagai sub sistem dari sistem penyaluran (transmisi), gardu induk mempunyai peranan yang penting, dimana dalam pengoperasiannya tidak dapat dipisahkan dari sistem penyaluran (transmisi) secara keseluruhan.

---

<sup>3</sup>Gabriel Aditia Tarigan, *Pengertian Gardu Induk dan Jenis Gardu Induk*, diakses dari <https://bielisme.wordpress.com>, pada tanggal 6 Juni 2019, pukul 19.20 WIB



### 2.4.1 Fungsi Gardu Induk<sup>3</sup>

Adapun fungsi dari gardu induk adalah untuk mentransformasikan daya listrik. Daya yang ditransformasikan terbagi menjadi beberapa tegangan sebagai berikut :

- Dari tegangan ekstra tinggi ke tegangan tinggi (500 KV/150 KV).
- Dari tegangan tinggi ke tegangan yang lebih rendah (150 KV/ 70 KV).
- Dari tegangan tinggi ke tegangan menengah (150 KV/ 20 KV, 70 KV/20 KV).
- Dengan frekuensi tetap (50 Hertz).

### 2.5 Transformator<sup>4</sup>

**Transformator** atau sering disingkat dengan istilah **trafo** adalah suatu alat listrik yang dapat mengubah taraf suatu tegangan AC ke taraf yang lain. Maksud dari perubahan taraf tersebut diantaranya seperti menurunkan Tegangan AC dari 20 KV ke 220 V ataupun menaikkan Tegangan dari 110 V ke 220 V.



Gambar 2.4 Transformator

Trafo memegang peranan yang sangat penting dalam pendistribusian tenaga listrik. Trafo akan menaikkan listrik yang berasal dari pembangkit listrik PLN hingga ratusan KV untuk didistribusikan, kemudian trafo lainnya menurunkan tegangan listrik tersebut ke tegangan yang diperlukan oleh setiap rumah tangga maupun perkantoran yang pada umumnya menggunakan Tegangan AC 220 V.

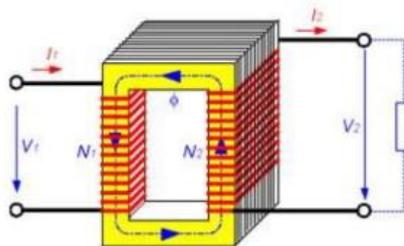
---

<sup>4</sup>Dickson Kho, *Pengertian Transformator (Trafo) dan Prinsip Kerjanya*, diakses dari <https://teknikelektronika.com>, pada tanggal 6 Juni 2019, pukul 19.30 WIB



### 2.5.1 Konstruksi Transformator<sup>4</sup>

Gambar dibawah ini memperlihatkan bentuk fisik dari transformator, dimana tegangan masukan ( $V_1$ ) berbentuk sinusioda dihubungkan pada kumparan primer ( $N_1$ ). Arus masukan ( $I_1$ ) menyebabkan munculnya aliran fluk ( $\phi$ ) pada kumparan ( $N_1$ ) maupun kumparan ( $N_2$ ). Fluk pada kumparan sekunder ( $N_2$ ) menyebabkan munculnya aliran arus ( $I_2$ ) dan tegangan ( $V_2$ ).



Gambar 2.5 Hubungan Kumparan Transformator

### 2.5.2 Prinsip Kerja Transformator<sup>4</sup>

Sebuah Transformator yang sederhana pada dasarnya terdiri dari 2 lilitan atau kumparan kawat yang terisolasi yaitu kumparan primer dan kumparan sekunder. Pada kebanyakan Transformator, kumparan kawat terisolasi ini dililitkan pada sebuah besi yang dinamakan dengan Inti Besi (*core*). Ketika kumparan primer dialiri arus AC (bolak-balik) maka akan menimbulkan medan magnet atau fluks magnetik disekitarnya. Kekuatan medan magnet (densitas fluks magnet) tersebut dipengaruhi oleh besarnya arus listrik yang dialirinya. Semakin besar arus listriknya maka akan semakin besar pula medan magnetnya. Fluktuasi medan magnet yang terjadi di sekitar kumparan pertama (primer) akan menginduksi GGL (Gaya Gerak Listrik) dalam kumparan kedua (sekunder) dan akan terjadi pelimpahan daya dari kumparan primer ke kumparan sekunder. Dengan demikian, terjadilah perubahan taraf tegangan listrik baik dari tegangan rendah menjadi tegangan yang lebih tinggi maupun dari tegangan tinggi menjadi tegangan yang rendah.

Sedangkan inti besi pada Transformator atau Trafo pada umumnya adalah kumpulan lempengan-lempengan besi tipis yang terisolasi dan ditempel berlapis-lapis dengan kegunaannya untuk mempermudah jalannya Fluks Magnet yang



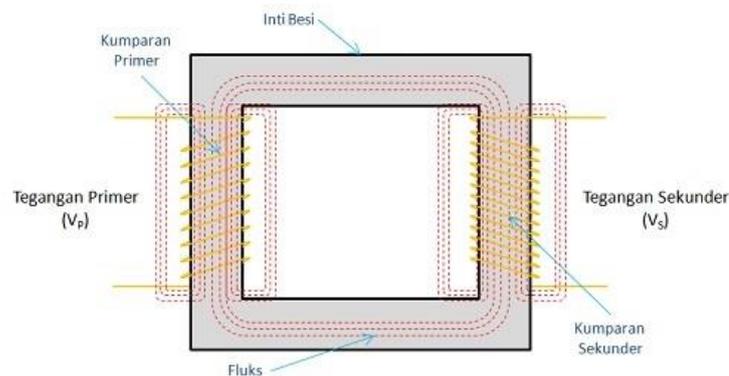
ditimbulkan oleh arus listrik kumparan serta untuk mengurangi suhu panas yang ditimbulkan.

Beberapa bentuk lempengan besi yang membentuk Inti Transformator tersebut diantaranya seperti :

- E – I Lamination
- E – E Lamination
- L – L Lamination
- U – I Lamination

Rasio lilitan pada kumparan sekunder terhadap kumparan primer menentukan rasio tegangan pada kedua kumparan tersebut. Sebagai contoh, 1 lilitan pada kumparan primer dan 10 lilitan pada kumparan sekunder akan menghasilkan tegangan 10 kali lipat dari tegangan input pada kumparan primer. Jenis Transformator ini biasanya disebut dengan Transformator Step Up. Sebaliknya, jika terdapat 10 lilitan pada kumparan primer dan 1 lilitan pada kumparan sekunder, maka tegangan yang dihasilkan oleh Kumparan Sekunder adalah  $1/10$  dari tegangan input pada Kumparan Primer. Transformator jenis ini disebut dengan Transformator Step Down.

Dibawah ini adalah Fluks pada Transformator :



Gambar 2.6 Fluks Pada Transformator



## 2.6 Teori Hubung Singkat (*Short Circuit*)<sup>5</sup>

Hubung singkat atau *short circuit* adalah salah satu gangguan yang bisa terjadi di sistem tenaga listrik. Definisi hubung singkat menurut IEC 60909 adalah “hubungan konduksi sengaja atau tidak sengaja melalui hambatan atau impedansi yang cukup rendah antara dua atau lebih titik yang dalam keadaan normalnya mempunyai beda potensial”.

### 2.6.1 Menghitung Impedansi Sumber<sup>6</sup>

Untuk menghitung impedansi sumber, maka data yang diperlukan adalah data hubung singkat pada bus primer transformator. Berikut adalah persamaan untuk menghitung impedansi sumber :

$$X_{Sprimer} = \frac{kV_{primer}^2}{MVA_{SC}} \dots\dots\dots 2.1$$

Di mana,  $X_{Sprimer}$  = Impedansi sumber hubung singkat ( $\Omega$ )

$kV_{primer}$  = Tegangan pada sisi primer transformator daya ( $kV$ )

$MVA_{SC}$  = Daya hubung singkat sumber ( $MVA$ )

Dikarenakan arus gangguan hubung singkat yang perlu dihitung adalah gangguan hubung singkat pada sisi sekunder (20 kV), maka impedansi sumber di atas harus dikonversikan terlebih dahulu ke sisi sekunder (20 kV).

Untuk mengkonversikan impedansi sumber yang terletak pada sisi primer menjadi impedansi sumber sisi sekunder dapat digunakan persamaan berikut ini :

$$X_{Ssekunder} = \frac{kV_{sekunder}^2}{kV_{primer}^2} \cdot X_{Sprimer} \dots\dots\dots 2.2$$

Di mana,  $X_{Sprimer}$  = Impedansi sisi primer ( $\Omega$ )

<sup>5</sup>Griyatengger, *Teori Hubung Singkat/ Short Circuit*, diakses dari <https://wongelit.wordpress.com>, pada tanggal 7 Juni, pukul 14.00 WIB

<sup>6</sup>Eya Effilionita, *Analisa Gangguan Penyulang Kelingi Pada Gardu Induk Sungai Juara di PT PLN Rayon Rivai Palembang* (Laporan Akhir: Politeknik Negeri Sriwijaya, 2014)



$X_{S_{sekunder}}$  = Impedansi sisi sekunder ( $\Omega$ )

$kV_{primer}$  = Tegangan pada sisi primer ( $kV$ )

$kV_{sekunder}$  = Tegangan pada sisi sekunder ( $kV$ )

### 2.6.2 Menghitung Reaktansi Transformator<sup>6</sup>

Besarnya nilai reaktansi transformator biasanya dinyatakan dalam bentuk persentase. Maka dari itu, untuk mendapatkan nilai reaktansi dalam satuan ohm dapat dicari dengan menggunakan persamaan berikut :

$$X_{t(100\%)} = \frac{kV_{sekunder}^2}{S} \dots\dots\dots 2.3$$

$$X_t = X_{t(\%)} \cdot X_{t(100\%)} \dots\dots\dots 2.4$$

Di mana,  $X_{t(100\%)}$  = Reaktansi transformator pada 100 persen ( $\Omega$ )

$X_{t(\%)}$  = Reaktansi trafo (%)

$kV_{sekunder}$  = Tegangan pada sisi sekunder ( $kV$ )

$S$  = Daya transformator ( $MVA$ )

### 2.6.3 Menghitung Impedansi Penyulang<sup>6</sup>

Untuk menghitung nilai impedansi dari penyulang digunakan perhitungan impedansi berdasarkan panjang penyulang per  $km$  atau sama dengan  $Z = (R+jX) / km$ . Dalam perhitungan kali ini lokasi gangguan disimulasikan terjadi pada masing-masing bus yang telah dirancang pada *software* ETAP 12.6.

### 2.6.4 Menghitung Impedansi Ekuivalen Jaringan<sup>6</sup>

Impedansi ekuivalen jaringan adalah perhitungan besarnya nilai impedansi urutan positif ( $Z_{1eq}$ ), impedansi urutan negatif ( $Z_{2eq}$ ), dan impedansi urutan nol ( $Z_{0eq}$ ) dari titik gangguan sampai ke sumber.

Dikarenakan sumber ke titik gangguan impedansi yang terbentuk tersambung seri, maka perhitungan  $Z_{1eq}$  dan  $Z_{2eq}$  dapat langsung dijumlahkan.



Sedangkan untuk perhitungan  $Z_{0eq}$  dimulai dari titik gangguan sampai ke transformator daya yang netralnya ditanahkan.

Untuk menghitung  $Z_{1eq}$  dan  $Z_{2eq}$  digunakan persamaan :

$$Z_{1eq} = Z_{2eq} = X_{Ssekunder} + X_{t1/2} + Z_{1penyulang} \dots\dots\dots 2.5$$

Di mana,  $Z_{1eq}$  = Impedansi ekivalen jaringan urutan positif ( $\Omega$ )

$Z_{2eq}$  = Impedansi ekivalen jaringan urutan negatif ( $\Omega$ )

$Z_{1penyulang}$  = Impedansi penyulang urutan positif/negatif ( $\Omega$ )

$X_{Ssekunder}$  = Impedansi sumber sisi sekunder ( $\Omega$ )

$X_{t1/2}$  = Impedansi trafo daya urutan positif/negatif ( $\Omega$ )

Untuk menghitung  $Z_{0eq}$  digunakan persamaan :

$$Z_{0eq} = X_{t0} + 3R_N + Z_{0penyulang} \dots\dots\dots 2.6$$

Di mana,  $R_N$  = Tahanan tanah trafo daya ( $\Omega$ )

$X_{t0}$  = Impedansi trafo daya urutan nol ( $\Omega$ )

$Z_{0penyulang}$  = Impedansi penyulang urutan nol ( $\Omega$ )

$Z_{0eq}$  = Impedansi ekivalen jaringan urutan nol ( $\Omega$ )

### 2.6.5 Penyebab Terjadinya Gangguan Hubung Singkat<sup>5</sup>

Gangguan hubung singkat pada jaringan listrik dapat terjadi antara fasa dengan fasa (2 fasa atau 3 fasa) dan gangguan antara fasa ke tanah. Timbulnya gangguan hubung singkat ini bisa bersifat temporer (sementara) dan juga bisa bersifat permanent (permanen).

Gangguan yang bersifat temporer adalah timbulnya gangguan yang bersifat sementara sehingga tidak memerlukan tindakan. Gangguan tersebut akan hilang dengan sendirinya dan jaringan listrik akan bekerja normal kembali. Jenis



gangguan ini adalah timbulnya loncatan api antar penghantar dengan tanah karena sambaran petir, loncatan api dengan pohon-pohon, dan lain sebagainya.

Gangguan yang bersifat permanen, yaitu gangguan yang bersifat tetap. Agar jaringan dapat berfungsi kembali, maka perlu dilaksanakan tindakan perbaikan dengan cara menghilangkan gangguan tersebut. Gangguan ini akan menyebabkan terjadinya pemadaman yang tetap pada jaringan listrik dan pada titik gangguan akan terjadi kerusakan yang permanen.

Beberapa penyebab yang mengakibatkan terjadinya gangguan hubung singkat, antara lain :

1. Terjadinya angin kencang, sehingga menimbulkan gesekan pohon dengan jaringan listrik.
2. Kesadaran masyarakat yang kurang, misalnya bermain layang-layang dengan menggunakan benang yang bisa menghantarkan aliran listrik. Ini akan sangat berbahaya jika benang tersebut mengenai jaringan listrik.
3. Pemasangan jaringan yang kurang baik misalnya pemasangan konektor pada JTR yang memakai TC, apabila pemasangannya kurang baik, maka hal ini akan menyebabkan timbulnya bunga api dan akan menyebabkan kerusakan fasa yang lainnya. Akibatnya akan terjadi hubung singkat.
4. Terjadinya hujan, adanya sambaran petir, umur jaringan (kabel tanah) sudah tua yang mengakibatkan pengelupasan isolasi dan menyebabkan hubung singkat dan sebagainya.

#### **2.6.6 Akibat Terjadinya Gangguan Hubung Singkat<sup>5</sup>**

Selain dapat merusak peralatan listrik, gangguan hubung singkat juga dapat membahayakan keselamatan manusia. Adapun akibat yang dapat ditimbulkan oleh gangguan hubung singkat adalah sebagai berikut :

1. Membahayakan keselamatan manusia apabila terdapat arus yang mengalir ke tanah.
2. Putusnya suplai tenaga listrik.
3. Kerusakan peralatan listrik karena peningkatan tekanan termal dan mekanis yang akhirnya tidak bisa ditoleransi oleh peralatan listrik.



## 2.6.7 Jenis – Jenis Gangguan Hubung Singkat<sup>5</sup>

Gangguan hubung singkat dapat dibedakan menjadi dua jenis, yaitu gangguan hubung singkat simetri dan gangguan hubung singkat asimetri.

### 2.6.7.1 Gangguan Hubung Singkat Simetri<sup>5</sup>

Gangguan simetri merupakan gangguan yang terjadi pada ketiga fasa sehingga arus maupun tegangan setiap fasanya tetap seimbang setelah gangguan terjadi. Hanya 5% dari total kejadian gangguan hubung singkat adalah hubung singkat 3 fasa.

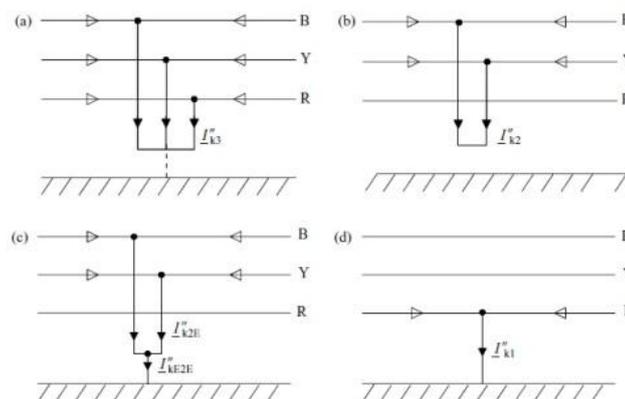
### 2.6.7.2 Gangguan Hubung Singkat Asimetri<sup>5</sup>

Gangguan asimetri merupakan gangguan yang mengakibatkan tegangan dan arus yang mengalir pada setiap fasanya menjadi tidak seimbang, gangguan ini terdiri dari :

1. Fasa - fasa (2 fasa) tanpa ke tanah
2. Fasa - fasa (2 fasa) ke tanah
3. Fasa ke tanah (80% dari total gangguan hubung singkat)

## 2.6.8 Diagram Gangguan Hubung Singkat<sup>5</sup>

Diagram hubung singkat ditunjukkan seperti dibawah:



Gambar 2.7 Diagram Gangguan Hubung Singkat

Di mana :

- a. Gangguan hubung singkat 3 fasa ke tanah atau tanpa ke tanah
- b. Gangguan hubung singkat fasa – fasa (2 fasa) tanpa ke tanah



- c. Gangguan hubung singkat phasa – phasa (2 phasa) ke tanah
- d. Gangguan hubung singkat phasa ke tanah

### 2.6.9 Gangguan Hubung Singkat 3 Phasa<sup>6</sup>



Gambar 2.8 Gangguan Hubung Singkat 3 Phasa<sup>7</sup>

$$I_f = \frac{V_{L-N}}{Z_1} \dots\dots\dots 2.7$$

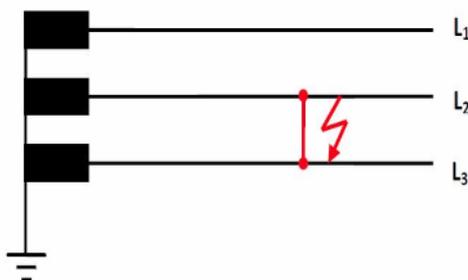
Keterangan :

$I_f$  = Arus Gangguan

$V_{L-N}$  = Tegangan *line-netral*  $\frac{20000}{\sqrt{3}}$

$Z_1$  = Impedansi urutan positif dilihat dari titik gangguan

### 2.6.10 Gangguan Hubung Singkat 2 Phasa Tanpa ke Tanah<sup>6</sup>



Gambar 2.9 Gangguan Hubung Singkat 2 Phasa Tanpa Ke Tanah<sup>7</sup>

<sup>7</sup>LUCAS-NÜLLE, *Theoretical fundamentals*, (L@Bsoft)



$$I_f = \frac{V_{L-L}}{Z_1 + Z_2} \dots\dots\dots 2.8$$

Keterangan :

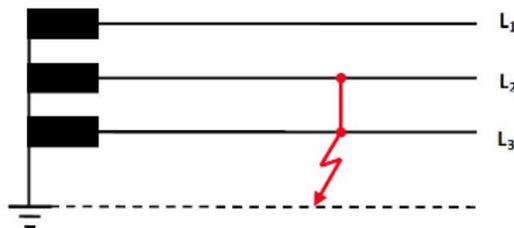
$I_f$  = Arus Gangguan

$V_f$  = Tegangan phasa-phaasa 20000 V

$Z_1$  = Impedansi urutan positif dilihat dari titik gangguan

$Z_2$  = Impedansi urutan negatif dilihat dari titik gangguan

### 2.6.11 Gangguan Hubung Singkat 2 Fasa ke Tanah<sup>6</sup>



Gambar 2.10 Gangguan Hubung Singkat 2 Fasa Ke Tanah<sup>7</sup>

$$I_f = \frac{V_{L-N}}{Z_1 + \frac{Z_2 \cdot Z_0}{Z_2 + Z_0}} \dots\dots\dots 2.9$$

Keterangan :

$I_f$  = Arus Gangguan

$V_{L-N}$  = Tegangan *line-netral*  $\frac{20000}{\sqrt{3}}$

$Z_0$  = Impedansi urutan nol dilihat dari titik gangguan

$Z_1$  = Impedansi urutan positif dilihat dari titik gangguan

$Z_2$  = Impedansi urutan negatif dilihat dari titik gangguan



### 2.6.12 Gangguan Hubung Singkat 1 Phasa Ke Tanah<sup>6</sup>



Gambar 2.11 Gangguan Hubung Singkat 1 Phasa Ke Tanah<sup>7</sup>

$$I_f = \frac{\sqrt{3} \cdot V_{L-L}}{Z_0 + Z_1 + Z_2} \dots\dots\dots 2.10$$

Keterangan :

$I_f$  = Arus Gangguan

$V_{L-N}$  = Tegangan phasa-phaa dikali akar 3,  $\sqrt{3} \cdot 20000$  V

$Z_0$  = Impedansi urutan nol dilihat dari titik gangguan

$Z_1$  = Impedansi urutan positif dilihat dari titik gangguan

$Z_2$  = Impedansi urutan negatif dilihat dari titik gangguan

### 2.7 Relai Arus Lebih (*Over Current Relay*)<sup>8</sup>

Relai arus lebih merupakan salah satu relai proteksi yang digunakan untuk mengamankan trafo daya, *Neutral Grounding Resistor* (NGR), dan penyulang 20 kV. Relai ini akan bekerja dengan cara membandingkan arus yang terbaca dengan nilai setelannya, apabila arus yang dibaca lebih besar daripada nilai setelan maka relai akan membuka (*trip*) Pemutus Tenaga (PMT) atau *Circuit Breaker* (CB) setelah waktu tertentu. Besarnya waktu tunda ini tergantung dari nilai setelan relai. Pada jaringan 20 kV relai ini berfungsi untuk memproteksi SUTM terhadap gangguan antar phasa atau tiga phasa, dan pada trafo tenaga relai ini berfungsi untuk mengamankan transformator terhadap gangguan hubung singkat antar phasa di dalam maupun di luar daerah pengaman transformator.

<sup>8</sup>Anggerrose, *Relai Arus Lebih*, diakses dari <https://anggerrose.wordpress.com>, pada tanggal 9 Juni 2019, pukul 09.40 WIB



### 2.7.1 Prinsip Kerja Relai Arus Lebih (*Over Current Relay*)<sup>8</sup>

Relai arus lebih bekerja dengan membaca input berupa besaran arus, kemudian membandingkan dengan nilai setting ( $I_s$ ). Apabila nilai arus yang terbaca oleh relai melebihi nilai setting, maka relai akan mengirim perintah *trip* (lepas) kepada Pemutus Tenaga (PMT) atau *Circuit Breaker* (CB) setelah waktu tunda yang diterapkan pada setting.

Relai arus lebih memproteksi instalasi listrik terhadap gangguan hubung singkat antar fasa, sedangkan untuk memproteksi terhadap gangguan fasa tanah digunakan Relai Arus Gangguan tanah (*Ground Fault Relay*). Prinsip kerja GFR sama dengan OCR, yang membedakan hanyalah pada fungsi dan elemen sensor arus. OCR biasanya memiliki dua atau tiga sensor arus (untuk dua atau tiga fasa) sedangkan GFR hanya memiliki satu sensor arus (satu fasa).

### 2.7.2 Karakteristik Waktu Kerja Relai Arus Lebih (*Over Current Relay*)<sup>8</sup>

Macam-macam karakteristik relay arus lebih adalah sebagai berikut :

1. Relai arus lebih waktu seketika (*instantaneous over current relay*), yaitu jika jangka waktu relai mulai saat relai arusnya *pick up* (kerja) sampai selesainya kerja relai sangat singkat (20 – 100 ms), yaitu tanpa penundaan. Relai ini pada umumnya dikombinasikan dengan relai arus lebih dengan karakteristik waktu tertentu (*definite time*) atau waktu terbalik (*inverse time*) dan hanya dalam beberapa hal berdiri secara khusus.
2. Relai arus lebih waktu tertentu (*definite time over current relay*), yaitu jika jangka waktu mulai relai arus *pick up* sampai selesainya kerja relai diperpanjang dengan nilai tertentu dan tidak tergantung dari besarnya arus yang menggerakkan. Relai ini bekerja berdasarkan waktu tunda yang telah ditentukan sebelumnya dan tidak tergantung pada perbedaan besarnya arus.
3. Relai arus lebih waktu terbalik (*inverse time over current relay*), yaitu jika jangka waktu mulai relai arus *pick up* sampai selesainya kerja diperpanjang dengan besarnya nilai yang berbanding terbalik dengan arus yang menggerakkan. Relai ini bekerja dengan waktu operasi berbanding



terbalik terhadap besarnya arus yang terukur oleh relai. Relai ini mempunyai karakteristik kerja yang dipengaruhi baik oleh waktu maupun oleh arus.

4. *Inverse definite time relay*, yaitu relai yang mempunyai karakteristik kerja berdasarkan kombinasi Antara relai *inverse* dan relai *definite*. Relai ini akan bekerja secara *definite* bila arus gangguannya besar dan bekerja secara *inverse* jika arus gangguannya kecil.

### 2.7.3 Setting Koordinasi OCR, GFR, dan Recloser<sup>9</sup>

Untuk menghitung nilai arus beban penuh pada transformator dapat menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$I_{FL} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot V_{L-L}} \dots\dots\dots 2.11$$

Di mana,  $I_{FL}$  = Arus beban penuh transformator

$S$  = Kapasitas transformator

$V_{L-L}$  = Tegangan fasa netral 20000 V

Sedangkan untuk menghitung arus *setting* ( $I_s$ ) dan *tms* dapat menggunakan persamaan berikut :

- OCR

$$I_{set(primer)} = 1,05 \cdot I_{FL} \dots\dots\dots 2.12$$

$$I_{set(sekunder)} = I_{set(primer)} \cdot \frac{1}{RasioCT} \dots\dots\dots 2.13$$

$$tms = \frac{\left[ \frac{I_{SC3phasa}}{I_{set(primer)}} \right]^{0,02} - 1}{0,14} \cdot t \dots\dots\dots 2.14$$

Di mana,  $I_{SC3phasa}$  = Besarnya arus hubung singkat diambil dari arus hubung singkat 3 fasa terbesar

<sup>9</sup>Taufiq Hidayat, *Analisis Resetting Recloser Pada Saluran WLI 06 Trafo 30 MVA 150 KV Gardu Induk Weleri Kendal dengan Simulasi ETAP 12.6*, (Departemen Teknik Elektro: Universitas Diponegoro, 2016)



- $I_{set(primer)}$  = Arus *setting* primer  
 $I_{set(sekunder)}$  = Arus *setting* sekunder  
 1,05 = Standar karakteristik *standard inverse*  
 $tms$  = *Time-multiple-setting*  
 $t$  = Waktu *trip*, untuk sisi *outgoing* standarnya selama 0,5 detik, sisi *incoming* selama 1,2 detik, dan *Recloser* selama 0,2 detik

- GFR

$$I_{set(primer)} = \% \cdot I_{SC1\text{phasa}} \dots\dots\dots 2.15$$

$$I_{set(sekunder)} = I_{set(primer)} \cdot \frac{1}{RasioCT} \dots\dots\dots 2.13$$

$$tms = \frac{\left[ \frac{I_{SC1\text{phasa}}}{I_{set(primer)}} \right]^{0,02} - 1}{0,14} \cdot t \dots\dots\dots 2.16$$

Di mana,  $I_{SC1\text{phasa}}$  = Besarnya arus hubung singkat diambil dari arus hubung singkat 1 phasa terbesar

- $I_{set(primer)}$  = Arus *setting* primer  
 $I_{set(sekunder)}$  = Arus *setting* sekunder  
 % = Standar *setting* GFR, sisi *outgoing* sebesar 8%, sisi *incoming* sebesar 10%, dan untuk *Recloser* 4%  
 $tms$  = *Time-multiple-setting*  
 $t$  = Waktu *trip*, untuk sisi *outgoing* standarnya selama 0,5 detik, sisi *incoming* selama 1,2 detik, dan *Recloser* selama 0,2 detik  
 $Rasio CT$  = Rasio dari CT yang digunakan

## 2.8 Transformator Arus (*Current Transformer*)<sup>10</sup>

Transformator arus atau *current transformer* (CT) adalah peralatan yang digunakan untuk melakukan pengukuran besaran arus pada instalasi tenaga listrik

<sup>10</sup>Suprianto, *Trafo Arus (Current Transformer)*, diakses dari <http://blog.unnes.ac.id>, pada tanggal 11 Juni 2019, pukul 13.00 WIB



di sisi primer (TET, TT, dan TM) yang berskala besar dengan melakukan transformasi dari besaran arus yang besar menjadi arus yang kecil secara akurat dan teliti untuk keperluan pengukuran dan pengamanan (proteksi).

### 2.8.1 Prinsip Kerja Transformator Arus<sup>10</sup>

Prinsip kerja dari transformator arus adalah sebagai berikut :

1. Pada saat arus primer  $I_p$  mengalir pada lilitan primer, maka akan muncul medan magnet disekeliling lilitan primer tersebut.
2. Medan magnet tersebut akan terkumpul lebih banyak daripada inti atau *core*. Medan magnet yang berputar di dalam inti akan menghasilkan perubahan *flux* primer dan memotong lilitan sekunder sehingga menginduksikan tegangan pada lilitan sekunder sesuai *hukum faraday*.
3. Karena lilitan sekunder membentuk *loop* tertutup, maka akan mengalir arus sekunder  $I_s$  yang akan membangkitkan medan magnet yang dihasilkan oleh belitan primer sesuai *hukum lenz*.

### 2.8.2 Fungsi Transformator Arus<sup>10</sup>

Adapun fungsi dari transformator arus adalah sebagai berikut :

1. Mengkonversi besaran arus pada sistem tenaga listrik dari besaran primer menjadi besaran sekunder untuk keperluan pengukuran sistem metering dan proteksi.
2. Mengisolasi rangkaian sekunder terhadap rangkaian primer (sebagai pengamanan terhadap manusia atau operator yang melakukan pengukuran).
3. Standarisasi besaran sekunder, untuk arus nominal 1 A dan 5 A.

## 2.9 ETAP (*Electric Transient and Analysis Program*)<sup>11</sup>

ETAP (*Electric Transient and Analysis Program*) merupakan suatu perangkat lunak yang mendukung sistem tenaga listrik. Perangkat ini mampu bekerja dalam keadaan offline untuk simulasi tenaga listrik, sedangkan online untuk pengelolaan data *real-time* atau digunakan untuk mengendalikan sistem secara *real-time*. Fitur yang terdapat di dalamnya pun bermacam-macam antara

<sup>11</sup>LSTDE UNAND, *Tentang ETAP (Electric Transient and Analysis Program) Power Station*, diakses dari <http://stdelaboratory.blogspot.com>, pada tanggal 11 Juni 2019, pukul 14.30 WIB



lain fitur yang digunakan untuk menganalisa pembangkitan tenaga listrik, sistem transmisi maupun sistem distribusi tenaga listrik. ETAP ini awalnya dibuat dan dikembangkan untuk meningkatkan kualitas keamanan fasilitas nuklir di Arnerika Serikat yang selanjutnya dikembangkan menjadi sistem monitor manajemen energi secara *real-time*, simulasi, kontrol, dan optimasi sistem tenaga listrik.

ETAP dapat digunakan untuk membuat proyek sistem tenaga listrik dalam bentuk diagram satu garis (*one line diagram*) dan jalur sistem pentanahan untuk berbagai bentuk analisis, antara lain: aliran daya, hubung singkat, starting motor, *trancient stability*, koordinasi relay proteksi dan sistem harmonisasi. Proyek sistem tenaga listrik memiliki masing-masing elemen rangkaian yang dapat diedit langsung dari diagram satu garis dan atau jalur sistem pentanahan. Untuk kemudahan hasil perhitungan analisis dapat ditampilkan pada diagram satu garis.