

## BAB II

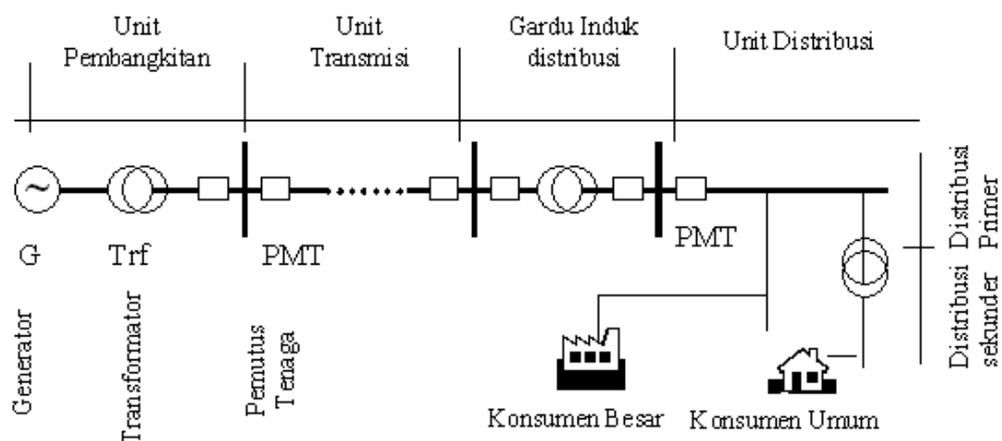
### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Jaringan Distribusi<sup>6</sup>

Jaringan Distribusi tenaga listrik adalah jaringan tenaga listrik yang memasok kelistrikan ke beban (Pelanggan) mempergunakan tegangan menengah 20kV dan tegangan rendah 220-380 V atau 231-400V. Setiap elemen jaringan distribusi pada lokasi tertentu dipasang trafo-trafo distribusi, dimana tegangan distribusi 20 KV diturunkan ke level tegangan yang lebih rendah menjadi 380/220 Volt. Jaringan distribusi dengan tegangan menengah 20kV disebut jaringan distribusi primer, dimana jaringannya mempergunakan, antara lain:

- Saluran kabel tegangan menengah (SKTM), mempergunakan kabel XLPE
- Saluran udara tegangan menengah (SUTM), mempergunakan kawat A3C, A2C, ACSR atau *twisted cable*.

Sumber kelistrikannya diperoleh dari garu induk atau Pusat Listrik Tenaga Diesel. Jaringan distribusindengan tegangan rendah 220/380V atau 231/400V disebut jaringan distribusi sekunder, dimana jaringannya mempergunakan kabel lilit (*Twisted cable*). Dan sumber kelistrikannya diperoleh dari gardu distribusi (gardu beton,portal dan cantol).



**Gambar 2.1 Sistem Distribusi Tenaga Listrik<sup>7</sup>**

<sup>6</sup> Wahyudi Sarimun, Buku Saku Pelayanan Teknik (Depok: Garamond, 2014), hal. 81

<sup>7</sup> <https://armanbacktrak5.wordpress.com/2013/02/25/jaringan-distribusi/>. Diakses 19 Mei 2019

## 2.2 Macam-macam Gangguan Sistem Tenaga Listrik<sup>5</sup>

### 2.2.1 Gangguan Beban Lebih

Gangguan ini sebenarnya bukan gangguan murni, tetapi bila dibiarkan terus menerus berlangsung dapat merusak peralatan listrik yang dialiri oleh arus tersebut. Hal ini disebabkan karena arus yang mengalir melebihi dari Kemampuan Hantar Arus (KHA) dari peralatan listrik, dimana pengaman listrik (Relai, MCB atau fuse) yang terpasang arus pengenalnya atau setelahnya melebihi KHA peralatan listrik.

### 2.2.2 Gangguan Hubung Singkat

Gangguan hubung singkat, dapat terjadi antar fasa (3 fasa atau 2 fasa), dua fasa ketanah dan satu fasa ketanah yang sifatnya bisa temporer atau permanen.

#### 1. Gangguan Permanen

Gangguan hubung singkat permanen, bisa terjadi pada kabel atau pada belitan trafo tenaga yang disebabkan karena arus gangguan hubung singkat antara fasa atau fasa-tanah, sehingga penghantar menjadi panas yang berpengaruh pada isolasi atau minyak trafo tenaga, sehingga isolasi tembus. Pada generator, yang disebabkan adanya gangguan hubung singkat atau pembebanan yang melebihi kemampuan generator. Sehingga rotor memasok arus dari eksitasi berlebih yang dapat menimbulkan pemanasan pada rotor yang dapat merusak isolasi sehingga isolasi tembus, terjadilah gangguan hubung singkat. Di titik gangguan terjadi kerusakan yang permanen, dan peralatan yang terganggu baru bias dioperasikan kemali setelah bagian yang rusak diperbaiki atau diganti.

#### 2. Gangguan Temporer

Gangguan ini biasanya terjadi pada saluran udara tegangan menengah yang tidak mempergunakan isolasi, antara lain:

- Disebabkan karena adanya sambaran petir pada penghantar listrik yang tergelar diudara (Saluran Udara Tegangan Menengah) yang menyebabkan flashover antara penghantar dengan traves melalui isolator.
- Penghantar tertiuip angin yang dapat menimbulkan gangguan antar fasa atau penghantar fasa menyentuh pohon yang dapat menimbulkan gangguan 1 fasa ke

---

<sup>5</sup> Wahyudi Sarimun, Proteksi Sistem Distribusi Tenaga Listrik (Depok: Garamond, 2011), hal. 2

tanah. Gangguan ini yang tembus (*breakdown*) adalah isolasi udaranya, oleh karena itu tidak ada kerusakan yang permanen. Setelah arus gangguannya terputus, misalnya karena terbukanya *circuit breaker* oleh relai pengamannya, peralatan atau saluran yang terganggu tersebut siap dioperasikan kembali. Gangguan hubung singkat dapat merusak peralatan, antara lain:

#### 1. Secara *Thermis*

*Thermis* atau pemanasan berlebih pada peralatan listrik yang dilalui oleh arus gangguan dapat merusak peralatan listrik. Dimana kerusakan akibat gangguan tergantung pada besar dan lamanya arus gangguan, hal ini dapat dilihat pada persamaan dibawah ini:

$$\text{Panas} \quad : \int_0^t I^2 R dt \text{ (Joule) } \dots\dots\dots 2.1$$

$$\text{Konstanta Panas} \quad : I^2 \cdot t \text{ (A}^2 \text{ detik ) } \dots\dots\dots 2.2$$

Dimana:

I : Arus gangguan (amp)

R : Tahanan penghantar/konduktor (ohm)

t : waktu lamanya arus gangguan (detik)

Panas yang terjadi, akan menaikkan suhu penghantar yang dilalui oleh arus gangguan. Jika terlalu lama, suhu penghantar akan naik sehingga dapat merusak isolasinya atau mempercepat penuaanya. Hal ini dapat dilihat pada persamaan (2.1) arus juga dapat merusak atau menghancurkan selain isolasi juga penghantar tersebut. Hal ini dapat dibuktikan dengan mempergunakan persamaan (2.2)

#### 2. Secara Mekanis

Mekanis atau gaya tarik menarik/ tolak-menolak pada penghantar fasa yang terganggu karena adanya frekuensi listrik yang dapat menimbulkan frekuensi mekanis. Dimana arus gangguan hubung singkat yang terjadi, dapat menimbulkan gaya Tarik menarik atau tolak menolak pada penghantar yang dilalui arus gangguan tersebut. Seperti material busbar, belitan pada trafo tenaga atau generator listrik, material ini harus memiliki kekuatan mekanis sehingga tahan terhadap gaya-gaya mekanis tersebut. Misal pada trafo tenaga saat terjadi gangguan listrik disisi sekunder maka belitannya akan mengalami gaya radial dan axial yang dapat mengendurkan jepitan dan belitannya.

### 2.2.3 Gangguan Tegangan Lebih

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

1. Tegangan lebih dengan power frekuensi, misal: pembangkit kehilangan beban yang diakibatkan adanya gangguan pada sisi jaringan sehingga *overspeed* pada generator. Tegangan lebih ini dapat juga terjadi adanya gangguan pada pengatur tegangan secara otomatis (*Automatic Voltage Regulator*) yang terpasang pada generator
2. Tegangan lebih transient karena adanya surya petir yang mengenai peralatan listrik disebut surya petir atau saat pemutus (PMT) terbuka karena adanya gangguan listrik yang menimbulkan kenaikan tegangan disebut surya hubung.

### 2.2.4 Gangguan ketidakstabilan (*instability*)

Gangguan ketidakstabilan sistem disebabkan karena adanya gangguan hubung singkat disistem atau lepasnya pembangkit, dapat menimbulkan ayunan daya (*power swing*) atau menyebabkan unit-unit pembangkit lepas sinkron, ayunan dapat menyebabkan salah kerja relai. Lepas sinkron dapat menyebabkan berkurangnya pembangkit, Karena tripnya 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 mentripan pengaman yang terpasang dipenghantar, sehingga generator mengalami kenaikan putaran sehingga dapat menaikkan tegangan dan frekuensi bila generator tidak respon dengan cepat untuk menutup bahan bakar, maka *over voltage relay* atau *over frekuensi* yang terpasang digenerator trip.

## 2.3 Upaya Mengatasi Gangguan

Untuk mengurangi akibat-akibat negatif dari berbagai macam gangguan tersebut diatas, maka diperlukan relai pengaman. Upaya mengatasi gangguan yaitu:

1. Mengurangi terjadinya gangguan:
  - Memakai peralatan yang dapat diandalkan (memenuhi persyaratan standart)

- Penentuan spesifikasi yang tepat dan desain yang baik (tahan terhadap kondisi kerja normal / gangguan)
- Pemasangan yang benar sesuai dengan desain
- Penggunaan kawat tanah pada saluran udara tegangan tinggi atau tegangan menengah dan kawat udara/kabel secara selektif.
- Penebangan/ pemangkasan pohon-pohon yang dekat dengan saluran udara tegangan tinggi atau tegangan menengah

## 2. Mengurangi akibat gangguan

- Mengurangi besarnya arus gangguan
- Menghindari konsentrasi pembangkit disatu lokasi
- Menggunakan tahanan pentanahan netral
- Penggunaan *Lightning Arrester* dan koordinasi isolasi
- Melepas bagian terganggu dengan memgunakan relai dan pemutus(PMT)
- Pelepasan bagian sistem, yang terganggu, antara lain: penggunaan jenis relai yang tepat dan koordinasi relai, penggunaan saluran *double*, penggunaan sistem loop, penggunaan *automatic reclosing/sectionalizer*, penggunaan *spindle* pada jaringan tegangan menengah
- Penggunaan peralatan cadangan.

## 2.4 Sistem Proteksi

Sistem proteksi ialah cara untuk mencegah atau membatasi kerusakan peralatan terhadap gangguan, sehingga kelangsungan penyaluran tenaga listrik dapat dipertahankan. Sistem proteksi penyulang tegangan menengah ialah pengamanan yang terdapat pada sistem tegangan menengah di gardu induk dan pengamanan yang terdapat pada jaringan tegangan menengah. Implementasi suatu sistem proteksi pada dasarnya diwujudkan sebagai rangkaian peralatan yang saling terkait dan bekerja sama. Rangkaian peralatan tersebut dinamakan *Fault Clearing System*.

### 2.4.1 Daerah Pengamanan<sup>7</sup>

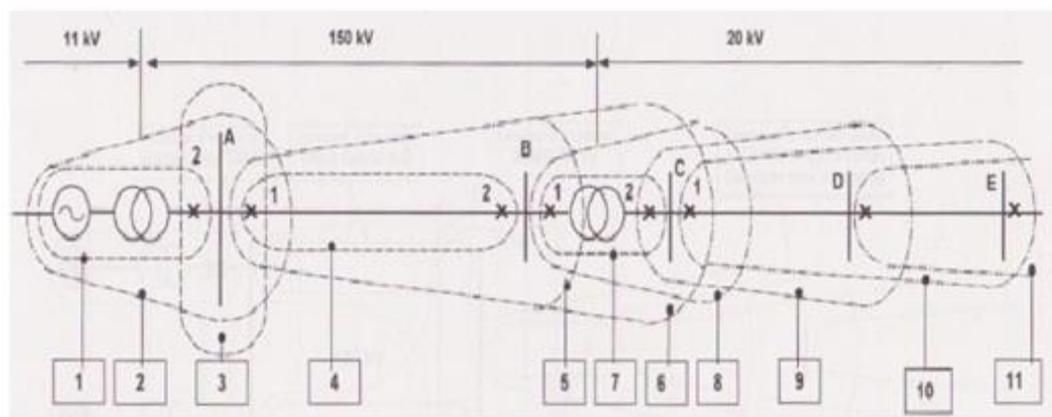
Daerah pengaman dibagi dalam seksi-seksi yang dibatasi pemutus (PMT) seperti yang terlihat pada gambar 2.2 dimana tiap seksi ada relai pengaman dan

---

<sup>7</sup> Ibid: halaman 7

punya daerah pengamanan. Pengamanan local terletak ditempat yang sama dengan pengaman utamanya. Sedangkan pengaman cadangan jauh terletak diseksi sebelah hulunya. Sudah barang tentu terjadi tumpang tindih(*over lapping*) antara kawasan pengaman utama dan kawasan pengaman cadangannya, baik cadangan lokal maupun cadangan jauh. Ini berarti gangguan yang terjadi pada kawasan pengaman utama akan dideteksi baik oleh pengaman utama maupun pengaman cadangan lokal ataupun pengaman cadangan jauhnya. Untuk menghindari terlepasnya dua seksi. Sekaligus(seksi kawasan pengaman utama oleh Relai pengaman utama dan seksi sebelah hulunya oleh Relai pengaman cadangan jauh), maka Relai pengaman cadangan jauh diberi waktu tunda.

Kegagalan PMT dapat terjadi untuk mendeteksi arus gangguan yang seharusnya sudah terbuka tapi gagal, disebabkan karena lemahnya baterai, terputusnya rangkaian trip atau gangguan mekanis pada PMT, hal ini perlu adanya cadangan pengaman seperti yang telah dijelaskan diatas. Jadi dalam sistem proteksi berlaku kriteria (n-1), dimana 1 adalah cadangan dan n adalah banyak proteksi yang terpasang (2buah), atau  $(2-1) = 1$  (Sebagai utama)



**Gambar 2.2 Daerah Pengamanan**

Keterangan

- 1 : Pengaman Utama Generator – Trafo (Differential Relay)
- 2 : Pengaman Cadangan Lokal Generator – Trafo, pengaman Cadangan Busbar A (Over Current Relay)
- 3 : Pengaman Utama Busbar A (Differential Busbar)
- 4 : Pengaman Utama Saluran AB (Distance Relay Zone 1 di A1)

- 5 : Distance Relay Zone 2 di A1, pengaman Utama busbar B.
- 6 : Distance Relay Zone 3 di A1, pengaman cadangan-jauh trafo di B sampai di busbar C
- 7 : Pengaman Utama Trafo (Differential Relay)
- 8 : Pengaman Cadangan Lokal Trafo (Over Current Relay 150kV), Pengaman cadangan-jauh busbar C
- 9 : Pengaman Distribusi (OCR & GFR)
- 10 : Pengaman Distribusi (OCR & GFR)/Recloser
- 11 : Pengaman Distribusi (OCR & GFR)/Recloser

Gambar 2.2 menunjukkan bahwa pengaman listrik pada sistem tenaga listrik mulai dari generator sampai dengan beban, sebagai pengaman listrik yang bertingkat artinya bila ada gangguan disisi hilir ada backupnya (cadangan) disisi hulunya, atau dikatakan  $n-1$ , 1 sebagai cadangan dan  $n$  = banyak proteksi yang bekerja. Tujuan dari pengaman utama dan pengaman cadangan adalah karena ada kemungkinan suatu relai atau komponen lainnya gagal bekerja. Oleh karena itu sistem dilengkapi dengan pengaman cadangan disamping pengaman utamanya. Pengaman cadangan baru bekerja jika pengaman utamanya gagal bekerja, dengan tunda waktu (*time delay*). Maksud waktu tunda adalah untuk memberikan kesempatan kepada pengaman utama bekerja lebih dahulu.

Macam-macam pengaman cadangan :

- Pengaman cadangan local (*local backup*)
- Pengaman cadangan jauh (*remote back up*)
- Pengaman kegagalan pemutus

#### 2.4.2 Syarat dalam Pengamanan<sup>5</sup>

Sistem proteksi bertujuan untuk memisahkan bagian sistem yang terganggu secepat mungkin agar kontinuitas pelayanan dalam sistem tenaga listrik dapat terus berjalan. Adanya kerusakan dapat mengganggu kontinuitas atau keandalan sistem menjadi kurang baik. Untuk menghindari kerusakan tersebut, maka perlu dipasang peralatan proteksi. Selain itu, potensi bahaya listrik terhadap manusia sebagai

---

<sup>5</sup> Ibid: halaman 10

akibat sengatan aliran listrik dan kerusakan lingkungan sebagai akibat panas yang berlanjut menjadi kebakaran, maka dengan sistem proteksi yang terkoordinasi secara baik hal tersebut dapat dihindarkan.

Skema proteksi harus cocok dan sesuai dengan semua peralatan proteksi yang terpasang pada sistem itu. Pemutusan dari bagian-bagian yang terganggu harus selektif mungkin, jadi hanya dibatasi hanya pada komponen yang terganggu saja, maka sistem proteksi harus memenuhi persyaratan sebagai berikut:

a. Kepekaan (*Sensitivity*)

Pada prinsipnya Relai harus cukup peka sehingga dapat mendeteksi gangguan dikawasan pengamanannya meskipun dalam kondisi yang memberikan rangsangan yang minimum. Rangsangan minimum ini, biasanya terjadi saat penghantar udara tersentuh pohon (karena tahanan pohon besar). Bila 1 fasa (fasa R) tersentuh pohon, arus gangguan 1 fasa ketanah dapat menjadi kecil (lebih kecil dari penghantar udara langsung terkena tanah).

b. Keandalan (*Reability*)

Sistem proteksi harus dapat diandalkan selama mungkin, sehingga ketika terjadi gangguan atau kondisi yang tidak normal maka sistem proteksi tersebut dapat bekerja sewaktu-waktu untuk melindungi peralatan distribusi. Keandalan sistem proteksi dari awal *setting* harus terjaga untuk jangka waktu selama mungkin.

Ada 3 aspek keandalan pengaman, yaitu:

1. Tingkat kepastian bekerjanya (keandalan kemampuan bekerjanya). Pada prinsipnya pengaman harus dapat diandalkan bekerjanya (dapat mendeteksi dan melepaskan bagian yang terganggu), tidak boleh gagal bekerja. Dengan lain prkataan dependability-nya harus tinggi
2. Tingkat kepastian untuk tidak salah kerja (keandalan untuk tidak salah kerja). Salah kerja adalah karena yang semestinya tidak harus kerja, misalnya karena lokasi gangguan diluar kawasan pengamanannya atau sama sekali tidak ada gangguan, atau kerja yang terlalu cepat atau terlalu lambat. Salah kerja mengakibatkan pemadaman yang sebenarnya tidak perlu terjadi.
3. Perbandingan antara waktu dimana pengaman dalam keadaan siap kerja (*actually in service*) dan waktu total operasinya.

c. Selektifitas (*Selectivity*)

Peralatan proteksi harus selektif bekerja pada sistem yang terkena gangguan sehingga sistem yang tidak terkena gangguan tidak terpengaruhi oleh sistem proteksi tersebut. Selain itu proteksi juga dapat membedakan apakah gangguan terdapat di daerah pengaman utama atau pengaman cadangan, dan proteksi harus bekerja secara *instant* atau dengan *delay* waktu.

d. Kecepatan (*Speed*)

Untuk meminimalkan atau meminimalisir kerugian akibat gangguan, maka bagian yang terganggu harus dipisahkan secepat mungkin, sehingga peralatan proteksi juga harus bekerja secara cepat untuk membebaskan bagian yang terganggu. Untuk menciptakan selektivitas yang baik, mungkin saja suatu pengaman diberi waktu tunda (*Time delay*). Namun waktu tunda itu harus secepat mungkin, karena keterlambatan kerja peralatan proteksi dapat mengganggu kestabilan sistem atau merusak peralatan karena *thermal stress*.

$$t_{total} : t_{start} + t_d + t_{pmt} \dots\dots\dots 2.3$$

Dimana:

$t_{total}$  : waktu total pembebasan gangguan

$t_{start}$  : waktu start relai (waktu kerja tanpa tunda waktu)

$t_d$  : waktu tunda relai untuk koordinasi

$t_{pm}$  : waktu pemutusan arus gangguan PMT

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

## 2.4 Relai Proteksi<sup>4</sup>

Relai proteksi merupakan bagian penting dalam sebuah sistem tenaga listrik. Peralatan ini sangat dibutuhkan bilamana sistem mengalami gangguan atau kondisi tidak normal. Relai proteksi dibutuhkan untuk menginisiasi pemutusan dan mengisolasi daerah yang mengalami gangguan dan menjaga agar daerah yang tidak mengalami gangguan tetap dapat menjalankan fungsinya.

---

<sup>4</sup> Muhalan Budi Yanti Husodo, “Analisa Perhitungan dan Pengaturan Relai Arus Lebih dan Relai Gangguan Tanah pada Kubikel Cakra 20KV di PT XYZ” hal. 1



**Gambar 2.3 Relai Proteksi<sup>10</sup>**

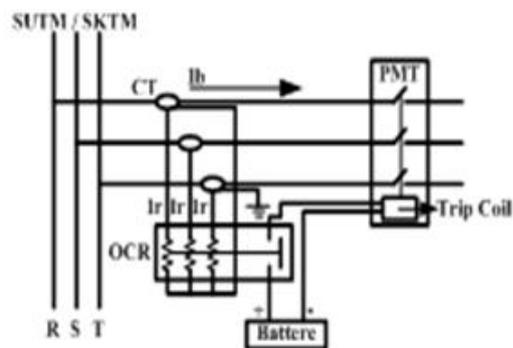
Adapun relai yang terpasang terdiri dari:<sup>5</sup>

- Pengaman gangguan antar fasa (*Over Current Relay*)

Pengaman gangguan antar fasa (OCR) dipergunakan untuk mengamankan sistem distribusi, jika ada gangguan hubung singkat 3 fasa atau 2 fasa. Pemasangannya dapat *incoming feeder* (Penyulang masuk) atau di *Outgoing feeder* (penyulang keluar) atau di gardu hubung.

- Pengaman gangguan satu fasa ke tanah (*Ground Fault Relay*)

Dipergunakan untuk mengamankan sistem distribusi, jika ada gangguan hubung satu fasa ketanah. Pemasangannya dapat *incoming feeder* (Penyulang masuk) atau di *Outgoing feeder* (penyulang keluar) atau di gardu hubung.



**Gambar 2.4 Rangkaian Relai Proteksi Arus Lebih<sup>8</sup>**

<sup>10</sup> [https://wijayaelektrik.com/blog/119\\_.html](https://wijayaelektrik.com/blog/119_.html). Diakses pada 28 Mei 2019

<sup>5</sup> Wahyudi Sarimun, Op. Cit hal. 27

<sup>8</sup> <https://dayat-akmal.blogspot.com/2017/05/relay-arus-lebih-over-current-relay.html>. Diakses 28 Mei 2019

- Peralatan bantu untuk pengaman, terdiri dari:
  - a. *Current Transformer* atau trafo arus gunanya adalah jika ada gangguan pada sistem, meneruskan arus dari sirkit sistem tenaga listrik ke sirkit relai
  - b. Relai pengaman sebagai elemen perasa yang sinyalnya diperoleh dari trafo arus
  - c. Pemutus Tenaga(PMT) sebagai pemutus arus untuk mengisolir sirkit terganggu
  - d. Batterai atau Aki sebagai sumber tenaga untuk mentripkan PMT.

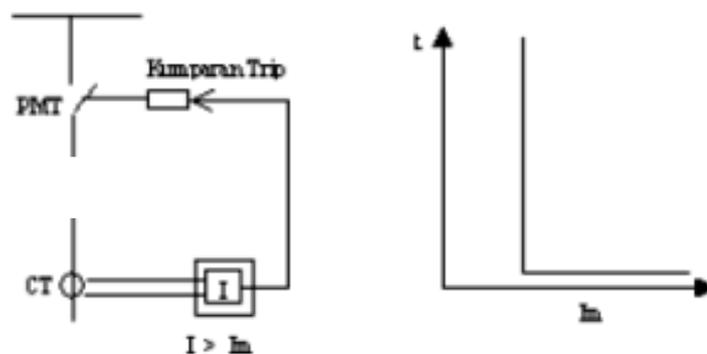
*Relay* proteksi berfungsi menunjukkan lokasi dan macam gangguannya. Dengan data tersebut memudahkan analisa dari gangguannya. Dalam beberapa hal *relay* hanya memberi tanda adanya gangguan atau kerusakan, jika dipandang dari gangguan atau kerusakan tersebut yang tidak membahayakan.

## 2.5 Karakteristik Rele Arus Lebih<sup>3</sup>

Rele arus lebih adalah suatu alat yang bekerjanya didasarkan adanya kenaikan arus yang melebihi suatu nilai pengaman tertentu dan dalam jangka waktu tertentu. Hubungan kerja antara besar arus dan waktu kerja rele antara lain:

### 2.5.1 Rele Arus Lebih Waktu Seketika (*Instantaneous Time( I >>)*)

Rele arus lebih dengan karakteristik waktu kerja seketika ialah jika jangka waktu rele mulai saat rele arusnya *pick up* sampai selesainya kerja rele sangat singkat (20-100ms), yaitu tanpa penundaan waktu. Rele ini umumnya dikombinasikan dengan rele arus lebih dengan karakteristik waktu tertentu(*definite time*) atau waktu terbalik (*inverse time*) dan hanya dalam beberapa hal berdiri sendiri secara khusus

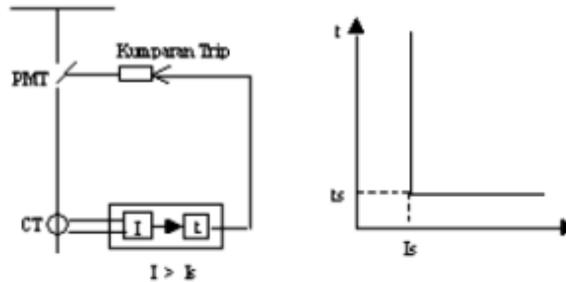


**Gambar 2.5 Karakteristik Rele Arus Lebih Waktu Seketika**

<sup>3</sup> Ir. H. Samaulah, Hazairin Ph.D, M. Eng, 2004. *Sistem Proteksi Tenaga Listrik*. Palembang: Universitas Negeri Sriwijaya. Hal:53

### 2.5.2 Rele Arus Lebih Dengan Waktu Tertentu (*Definite Time Relay*)

Rele arus lebih dengan karakteristik waktu tertentu ialah jangka waktu mulai rele arus *pickup* sampai selesainya kerja rele diperpanjang dengan nilai tertentu dan tidak tergantung dari besarnya arus yang menggerakkan



Gambar 2.6 Karakteristik Rele Arus Lebih Waktu Tertentu

### 2.5.3 Rele Arus Lebih Waktu Berbanding Terbalik (*Inverse Time*)

Rele dengan karakteristik waktu terbalik adalah jika jangka waktu mulai rele arus *pickup* sampai selesainya kerja rele diperpanjang dengan besarnya nilai yang berbanding terbalik dengan arus yang menggerakkan.

Setelan proteksi dengan mempergunakan karakteristik *inverse time relay* adalah karakteristik yang grafiknya terbaik antara arus dan waktu, dimana makin besar arus makin kecil waktu yang dibutuhkan untuk membuka pemutus(PMT). Karakteristik *inverse* sebagai berikut:

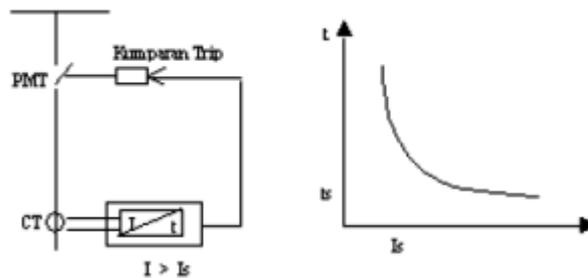
$$t = \frac{0,14}{I^{0,02-1}} \times t_{ms} \dots\dots\dots 2.4$$

$$T_{ms} = \frac{t \times \left[ \frac{I_{FAULT}}{I_{Set}} \right]^{0,02} - 1}{0,14} \dots\dots\dots 2.5$$

Tabel 2.1 Faktor  $\alpha$  dan  $\beta$  pada Kurva Arus dan Waktu

Nama Kurva	A	B
Standart Inverse	0,02	0,14
Very Inverse	1	13,2
Extremely Inverse	2	80
Long Inverse	1	120

Setelan relai dengan mempergunakan karakteristik inverse biasanya dipergunakan pada sistem distribusi tenaga listrik sebagai setelan relai yang terpasang di *incoming feeder*, *outgoing feeder* atau relai yang terpasang di gardu hubung atau *recloser*, dimana penyetelan arus dan waktu pada relai *Over Current Relay* dan *Ground Fault Relay*, di dasarkan pada besarnya arus gangguan hubung singkat yang disetel dari sisi hilir sampai dengan sisi hulu atau mulai dari gardu hubung dan recloser, penyulang sampai dengan gardu induk.



**Gambar 2.7 Karakteristik Rele Arus Lebih Waktu Berbanding Terbalik**

#### 2.5.4 *Inverse Definite Minimum Time (IDMT)*

Rele arus lebih dengan karakteristik *inverse definite minimum time (IDMT)* ialah jika jangka waktu rele arus mulai *pickup* sampai selesainya kerja rele mempunyai sifat waktu terbalik untuk nilai arus yang kecil setelah rele *pickup* dan kemudian mempunyai sifat waktu tertentu untuk nilai arus yang lebih besar. Rele arus lebih dengan karakteristik waktu arus tertentu, berbanding terbalik dan IDMT dapat dikombinasikan dengan rele arus lebih dengan karakteristik seketika.

#### 2.6 *Recloser Sebagai Proteksi Pada Penyulang 20KV<sup>1</sup>*

*Recloser* adalah rangkaian listrik yang terdiri pemutus tenaga yang dilengkapi kotak kontrol elektronik (*Electronic Control Box*). *Recloser* yaitu suatu peralatan elektronik sebagai kelengkapan *recloser* dimana peralatan ini tidak berhubungan dengan tegangan menengah dan pada peralatan ini *recloser* dapat dikendalikan cara pelepasannya. Dari dalam kotak kontrol inilah pengaturan (*setting*) *recloser* dapat ditentukan. Alat pengaman ini bekerja secara otomatis guna mengamankan suatu sistem dari arus lebih yang diakibatkan adanya gangguan hubung singkat.

<sup>1</sup> Ario Putra dan Firdaus, Analisa Penggunaan Recloser Untuk Pengaman Arus Lebih Pada Jaringan Distribusi 20kV Gardu Induk Garuda Sakti (FTEKNIK:2017) Hal. 2.



**Gambar 2.8 Recloser dan Remote Terminal Unit**

Cara bekerjanya adalah untuk menutup balik dan membuka secara otomatis yang dapat diatur selang waktunya, dimana pada sebuah gangguan temporer, *recloser* tidak membuka tetap (*lock out*), kemudian *recloser* akan menutup kembali setelah gangguan itu hilang. Apabila gangguan bersifat permanen, maka setelah membuka atau menutup balik sebanyak setting yang telah ditentukan kemudian *recloser* akan membuka tetap (*lock out*).

Pada suatu gangguan permanen, *recloser* berfungsi memisahkan daerah atau jaringan yang terganggu sistemnya secara cepat sehingga dapat memperkecil daerah yang terganggu sistemnya secara cepat sehingga dapat memperkecil daerah yang terganggu. Pada gangguan sesaat, *recloser* akan memisahkan daerah gangguan secara sesaat sampai gangguan tersebut akan dianggap hilang, dengan demikian akan masuk kembali sesuai *settingnya* sehingga jaringan akan aktif kembali secara otomatis.

### **2.6.1 Prinsip Kerja Recloser**

Prinsip kerja *recloser* hampir sama dengan *circuit breaker*, hanya *recloser* dapat diseting untuk bekerja membuka dan menutup kembali beberapa kali secara otomatis. Apabila *feeder* mendapat gangguan sementara, bila *circuit breaker* yang digunakan untuk *feeder* yang mendapat gangguan sementara, akan menyebabkan hubungan *feeder* terputus. Tetapi jika *recloser* yang digunakan diharapkan gangguan sementara tersebut membuat *feeder* terputus, maka *recloser* bekerja beberapa kali sampai akhirnya *recloser* membuka. Waktu membuka dan menutup

pada *recloser* dapat diatur pada kurva karakteristiknya. Berikut ini merupakan cara kerja *recloser*:

1. Arus yang mengalir normal bila tidak terjadi gangguan
2. Ketika terjadi sebuah gangguan, arus yang mengalir melalui *recloser* membuka dengan operasi "*fast*"
3. Kontak *recloser* akan menutup kembali setelah beberapa detik, sesuai dengan setting yang ditentukan. Tujuan memberikan selang waktu adalah memberi setting yang ditentukan. Tujuan memberikan selang waktu adalah memberi kesempatan agar gangguan tersebut hilang dari sistem, terutama gangguan yang bersifat temporer
4. Apabila yang terjadi adalah gangguan permanen, maka *recloser* akan membuka dan menutup balik sesuai setting yang ditentukan dan kemudian *lock out*
5. Setelah gangguan permanen dibebaskan oleh petugas, baru dapat dikembalikan pada keadaan normal

### 2.6.2 Klasifikasi *Recloser*

*Recloser* dapat diklasifikasikan sebagai berikut:

a. Menurut media redam busbar apinya adalah :

1. Media minyak (*Bulb Oil*)

Dalam hal ini minyak dipergunakan untuk melindungi isolasi dari tegangan impuls frekuensi rendah.

2. Media hampa udara (*Vaccum*)

Pada *recloser* jenis ini udara digunakan sebagai media redam terhadap busbar api. Di sini masalah pemeliharaan dapat dikurangi.

3. Media gas (SF<sub>6</sub>)

Gas juga dimanfaatkan sebagai media redam busbar api.

b. Menurut peralatan pengendalinya adalah :

1. *Recloser* terkendali *hidraulik*

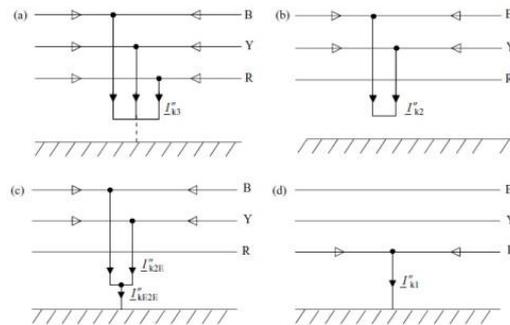
*Recloser* ini menggunakan kumparan penjatuh yang dipasang seri terhadap beban (*seri trip coil*). Bila arus yang mengalir pada *recloser* 200% dari arus setting-nya, maka kumparan penjatuh akan menarik tuas yang secara mekanik membuka kontak utama *recloser*.

2. *Recloser* terkontrol elektronis

Cara kontrol elektronis lebih fleksibel, lebih mudah diatur dan diuji secara lebih teliti dibanding *recloser* terkontrol hidrolis. Perlengkapan elektrolis diletakkan dalam kotak yang terpisah. Pengubah karakteristik, tingkat arus penjatuh, urutan operasi dari *recloser* terkontrol elektronis dapat dilakukan dengan mudah tanpa mematikan dan mengeluarkan dari tangki *recloser*.

**2.7 Hubung Singkat Pada Sistem Tenaga Listrik<sup>6</sup>**

Besarnya hubung singkat tergantung dari sumber yang memasok, luas penampang jaringan dan lokasi dimana gangguan hubung singkat tersebut terjadi. Hubung singkat ini disebut arus gangguan hubung singkat. Gangguan hubung singkat direpresentasikan seperti gambar dibawah ini.



**Gambar 2.9 Macam-macam Gangguan Hubung Singkat**

Keterangan gambar:

- a: Gangguan 3 fasa
- b: Gangguan 2 fasa
- c: Gangguan 2 fasa-tanah
- d: Gangguan 1 fasa-tanah

Perhitungan Arus Gangguan:

- Arus gangguan 3 fasa
 
$$I_{f3\theta} = \frac{E_{ph}}{Z_{1eq}} \dots\dots\dots 2.6$$
- Arus gangguan 2 fasa
 
$$I_{f2\theta} = \frac{V_{ph-ph}}{2 \times Z_{1eq}} \dots\dots\dots 2.7$$

<sup>6</sup> Wahyudi Sarimun, Buku Saku Pelayanan Teknik (Depok: Garamond, 2012), hal. 263

- Arus gangguan 2 fasa-tanah

$$I_{f_{2\theta \text{ tanah}}} = \frac{E_{ph}}{Z_{1eq} + \frac{(Z_{2eq} \times Z_{0eq} + 3Z_f)}{(Z_{2eq} + Z_{0eq} + 3Z_f)}} \dots\dots\dots 2.8$$

- Arus gangguan 1 fasa-tanah

$$I_{f_{1\theta}} = \frac{3 \times V_{ph}}{2 \times Z_{1eq} + Z_{0eq}} \dots\dots\dots 2.9$$

Dimana:

$I_{f_{3\theta}}$  : Arus gangguan 3 fasa (A)

$I_{f_{2\theta}}$  : Arus gangguan 2 fasa (A)

$I_{f_{2\theta \text{ tanah}}}$  : Arus gangguan 2 fasa-tanah (A)

$I_{f_{1\theta}}$  : Arus gangguan 1 fasa-tanah (A)

$E_{ph}$  : Tegangan fasa netral (V)

$Z_{1eq}$  : Impedansi ekuivalen urutan positif ( $Z_{1sc} + Z_{1t} + Z_{1jar(ohm)}$ )

$Z_{2eq}$  : Impedansi ekuivalen urutan negative ( $Z_{2sc} + Z_{2t} + Z_{1jar(ohm)}$ )

$Z_{0eq}$  : Impedansi ekuivalen urutan nol ( $3R_n + Z_{0t} + Z_{0jar(ohm)}$ )

$Z_f$  : Impedansi gangguan (ohm)

## 2.8 Perhitungan Koordinasi Proteksi

### 2.8.1 Impedansi Sumber

Untuk menghitung impedansi sumber di sisi Busbar 20 KV, maka harus dihitung dulu impedansi sumber di Busbar 70 kV. dengan menggunakan MVA hubung singkat tiga fasa, dalam ohm ditentukan dengan :

$$X_{\text{sumber}(70Kv)} = \frac{KV_p^2}{MVA_{sc}} \text{ Ohm} \dots\dots\dots 2.10$$

Untuk mengkonversikan impedansi yang terletak di sisi primer ke sisi sekunder dengan menggunakan persamaan, sebagai berikut :

$$X_{\text{sumber}(20Kv)} = \frac{KV_s^2}{KV_p^2} \times X_{\text{sumber}(70Kv)} \dots\dots\dots 2.11$$

Dimana:

$X_s$  : Reaktansi (Impedansi) sumber (Ohm)

$KV_p$  : Tegangan sisi primer trafo tenaga (kV)

$KV_s$  : Tegangan sisi sekunder trafo tenaga (kV)

$MVA_{sc}$  : Arus Hubung Singkat sisi 70kV (MVA)



### 2.8.2 Reaktansi Trafo

Nilai reaktansi trafo tenaga urutan positif sama dengan urutan negatif  $X_{T1} = X_{T2}$  sedangkan nilai impedansi urutan nol trafo bergantung pada lilitan trafo tersebut, Nilai impedansi trafo dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut :

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

$$X_{T1} = X_{T1}(\%) \times X_T(\text{ohm}) \dots\dots\dots 2.13$$

Untuk trafo tenaga dengan hubungan belitan  $YY\Delta$  dimana kapasitas belitan delta biasanya adalah sepertiga dari kapasitas belitan bintang (belitan Y adalah belitan yang digunakan untuk menyalurkan daya, sedangkan belitan  $\Delta$  tetap ada didalam tetapi tidak dikeluarkan kecuali satu terminal delta untuk ditanahkan, maka nilainya adalah:

$$X_{T0} = 3 \times X_{T1}(\text{ohm}) \dots\dots\dots 2.14$$

Dimana:

- $X_T$  (pada 100%) : Reaktansi (Impedansi) trafo ( $\Omega$ )
- $X_{T0}$  : Reaktansi (Impedansi) urutan Nol
- $kV^2$  : Tegangan sekunder trafo (kV)
- MVA : Kapasitas daya trafo tenaga (MVA)
- $X_{T1}(\%)$  : Impedansi pada name plat trafo (%)
- $X_{T1}$  : Reaktansi urutan positif ( $\Omega$ )

### 2.8.3 Impedansi Penyulang

Impedansi penyulang besarnya tergantung dengan jenis penghantar yang digunakan dan panjang Penyulang tersebut. Semakin panjang penyulang maka impedansi jaringan juga akan semakin besar. Impedansi bahan penghantar yang besar juga membuat impedansi penyulang tersebut menjadi besar. Untuk mencari Impedansi urutan positif dan negatif dari penyulang menggunakan rumus:

$$Z_1 = (R + jX) \times \text{panjang penyulang}$$

$$Z_2 = (R + jX) \times \text{panjang penyulang} \dots\dots\dots 2.15$$

$$Z_0 = (R_0 + jX_0) \times \text{panjang penyulang}$$

Dimana:



$Z_1 = Z_2$	: Impedansi urutan positif dan Negatif (ohm)
$Z_0$	: Impedansi urutan nol (ohm)
$(R + jX)$	: Impedansi positif/negatif per Km (ohm/Km)

#### 2.8.4 Menentukan Impedansi Ekivalen *Feeder*

Untuk mengetahui impedansi total dari jaringan distribusi perlu menghitung impedansi urutan positif, negatif, dan nol pada sumber, trafo, dan penyulang. Berikut adalah penjelasan dari perhitungan impedansi ekivalen jaringan distribusi.

Perhitungan yang akan dilakukan di sini adalah perhitungan besarnya nilai impedansi ekivalen urutan positif. Karena dari sejak sumber ke titik gangguan impedansi yang terbentuk adalah tersambung seri maka perhitungan impedansi ekivalen urutan positif ( $Z_1$ ) dapat langsung dengan cara menjumlahkan impedansi tersebut. Sehingga untuk impedansi ekivalen penyulang dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

$$\begin{aligned} Z_{1eq} &= Z_S + Z_{T1} + Z_{Fed1} \\ Z_{2eq} &= Z_S + Z_{T2} + Z_{Fed2} \dots\dots\dots 2.16 \\ Z_{eq0} &= Z_{t0} + 3R_N + Z_{Fed0} \end{aligned}$$

Dimana:

$Z_{0eq}$	: Impedansi ekivalen urutan nol (Ohm)
$Z_{1eq} = Z_{2eq}$	: Impedansi ekivalen urutan positif dan negative (Ohm)
$Z_S$	: Impedansi Sumber
$Z_T$	: Impedansi Trafo
$Z_{Fed}$	: Impedansi Penyulang
$R_N$	: Rahanan tanah trafo tenaga (Ohm)

#### 2.9 Perhitungan *Setting Rele Arus Lebih*

Pada tahap berikutnya, hasil perhitungan arus gangguan hubung singkat, dipergunakan untuk menentukan nilai setelan arus lebih, terutama nilai setelan TMS ( *Time Multiple Setting* ), dari rele arus lebih dengan karakteristik *invers*. Disamping itu setelah nilai setelan pele diperoleh, nilai – nilai arus gangguan hubung singkat pada setiap lokasi gangguan yang diasumsikan dipakai untuk



memeriksa rele arus lebih. Berikut ini adalah kaidah setelan arus dan waktu pada penyulang. Tabel dibawah ini adalah kaidah setting rele arus lebih

**Tabel 2.2 Kaidah Setting Rele Arus Lebih**

Uraian	Penyulang	Incoming Trafo
Jenis Karakteristik	SI (OCR)	SI (OCR)
Setelan Arus	$(1,0-1,2) \times I_{nCT}$	$(1,0-1,2) \times I_{nTrf}$
Waktu Kerja	(0,2-0,4) detik	(0,7-1) detik

### 2.9.1 Arus Setting

Sesuai British standar untuk rele *inverse* biasa diset sebesar  $1,05 - 1,3 \times I_{beban}$ . Rumus yang digunakan untuk menghitung setelan arus pada sisi primer yaitu :

$$I_{set(\text{primer})} = 1,05 \times I_{beban} \dots\dots\dots 2.17$$

Setelah mendapatkan nilai setelan arus sisi primer, untuk mendapatkan nilai setelah sekunder yang disetkan pada rele arus lebih, maka harus dihitung dengan menggunakan data rasio trafo arus yang terpasang di penyulang tersebut, yaitu sebagai berikut :

$$I_{set(\text{sekunder})} = I_{set(\text{primer})} \frac{1}{\text{Ratio CT}} \dots\dots\dots 2.18$$

Dimana:

$I_{set(\text{primer})}$  = Arus yang disetting di primer

$I_{set(\text{sekunder})}$  = Arus yang disetting di sekunder

Rasio CT = Setting Trafo yang dipasang di penyulang

### 2.9.2 Waktu Setting

Hubungan untuk arus dan waktu untuk beberapa karakteristik ditunjukkan dalam persamaan berikut.

$$t = \frac{K \times t_{ms}}{\left(\frac{I_{fault}}{I_{set}}\right)^\alpha - 1} \dots\dots\dots 2.19$$

Dimana :

t : Waktu dalam detik

$I_{fault}$  : Arus gangguan

$I_{set}$  : Arus Setting

## 2.10 Program Simulasi ETAP 12.6<sup>9</sup>

ETAP (*Electric Transient Analysis Program*) merupakan suatu *software* (perangkat lunak) yang digunakan suatu sistem tenaga listrik. Perangkat ini dapat bekerja dalam keadaan *offline* yaitu untuk simulasi tenaga listrik, dan juga dalam keadaan *online* untuk pengelolaan data *real time*.



**Gambar 2.10 Program Simulator ETAP 12.6**

Analisa tenaga listrik yang dapat dilakukan dengan menggunakan ETAP antara lain :

- Analisa Aliran Daya (*Load Flow Analysis*)
- Analisa Hubung Singkat (*Short Circuit Analysis*)
- *Motor Starting*
- *Arc Flash Analysis*
- *Harmonics Power System*
- Analisa Kestabilan Transien (*Transient Stability Analysis*)
- *Protective Device Coordination*

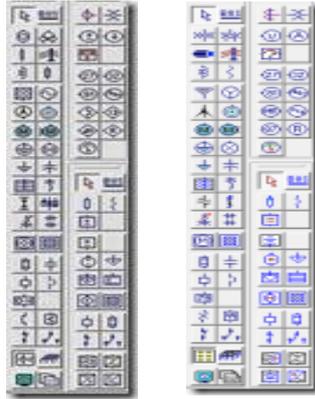
Beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam bekerja menggunakan ETAP yaitu:

1. *One Line Diagram*, merupakan notasi yang disederhanakan untuk sebuah sistem tenaga listrik tiga fasa. Sebagai ganti dari representasi saluran tiga fasa yang terpisah, digunakanlah sebuah konduktor. Hal ini memudahkan dalam pembacaan diagram maupun dalam analisa rangkaian.
2. *Library*, merupakan informasi mengenai semua peralatan yang akan dipakai dalam sistem kelistrikan. Data elektris maupun mekanis dari peralatan yang lengkap dapat mempermudah dan memperbaiki hasil simulasi ataupun analisa.

---

<sup>9</sup> <http://hanoool.blogspot.com/2013/09/pengenalan-etap.html> , diakses pada 20 Mei 2019

- Standar yang dipakai, biasanya mengacu pada standar IEC dan ANSI. Perbedaan antara standar IEC dan ANSI terletak pada standar frekuensi yang digunakan yang mengakibatkan perbedaan spesifikasi peralatan yang digunakan. Jika pada standar IEC nilai frekuensi yang digunakan adalah 50 Hz, sedangkan pada standar ANSI nilai frekuensi yang digunakan adalah 60 HZ



**Gambar 2.11 Perbedaan standart ANSI dan IEC**

### 2.10.1 Analisa Aliran Daya

Analisa aliran daya merupakan suatu analisa aliran daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) dari suatu sistem pembangkit (sisi pengirim) melalui suatu saluran transmisi hingga sampai ke beban (sisi penerima). Idealnya, daya yang dikirim akan sama dengan daya yang diterimadi beban adalah sama. Namun pada kenyataannya, daya yang dikirim di sisi pengirim tidak sama dengan daya yang diterima di sisi beban. Hal ini disebabkan beberapa hal

1. Impedansi di saluran transmisi.

Impedansi di saluran transmisi dapat terjadi karena berbagai hal dan sudah mencakup resultan antara hambatan resistif, induktif dan kapasitif. Hal ini yang menyebabkan rugi-rugi daya karena terkonversi atau terbuang menjadi energi lain dalam transfer energi.

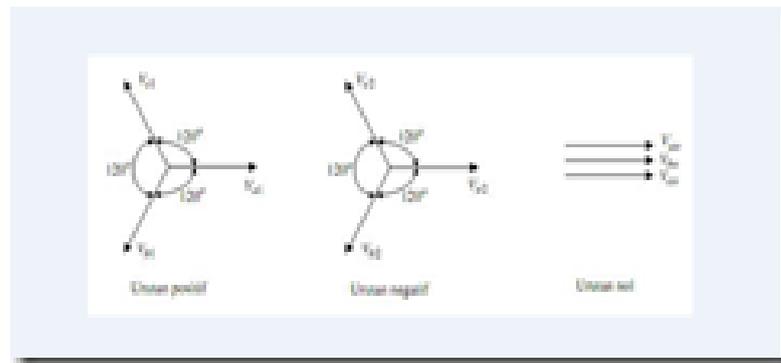
2. Tipe beban yang tersambung jalur.

Ada 3 tipe beban, yaitu resistif, induktif, dan kapasitif. Resultan antara besaran hambatan kapasitif dan induktif akan mempengaruhi PF sehingga mempengaruhi perbandingan antara besarnya daya yang *ditransfer* dengan yang diterima.

### 2.10.2 Analisa Hubung Singkat<sup>2</sup>

Hubung Singkat (*Short Circuit*) adalah suatu peristiwa terjadinya hubungan bertegangan atau penghantar tidak bertegangan secara langsung tidak melalui media (resistor/beban) yang semestinya sehingga terjadi aliran arus yang tidak normal (sangat besar) yang biasa disebut arus hubung singkat. Adanya hubung singkat menimbulkan arus lebih yang pada umumnya jauh lebih besar daripada arus pengenal peralatan dan terjadi penurunan tegangan pada sistem tenaga listrik, sehingga bila gangguan tidak segera dihilangkan dapat merusak peralatan dalam sistem tersebut. Besarnya arus hubung singkat yang terjadi sangat dipengaruhi oleh jumlah pembangkit yang masuk pada sistem, letak gangguan dan jenis gangguan.

Ada 2 jenis gangguan hubung singkat berdasarkan jenis arus gangguannya, yaitu gangguan simetris dan gangguan asimetris. Gangguan simetris adalah gangguan yang arus gangguannya seimbang, dan sebaliknya gangguan asimetris adalah gangguan yang arus gangguannya tidak seimbang. Perhitungan tegangan dan arus pada titik hubung singkat dapat dilakukan apabila sistem sederhana atau seimbang. Apabila sistem tidak seimbang maka digunakan metode komponen simetri untuk menganalisanya. Tiga komponen simetris antara lain:



**Gambar 2.12 Tiga Komponen Simetris**

#### 1. Komponen Urutan Positif (*Positive Sequence Component*)

Merupakan komponen yang terdiri dari tiga fasor yang sama besarnya, terpisah satu dengan yang lain dalam fasa  $120^0$  dan mempunyai urutan fasa yang sama dengan fasor aslinya.

<sup>2</sup> Ginanto, Novika. 2012. *Electric Transient Analysis (ETAP) Short Circuit Analysis*. <http://novikaginanto.wordpress.com/2012/03/24.etap-electric-transient-analysis-program/> Diakses pada 23 Mei 2019



2. Komponen Urutan Negatif (*Negative Sequence Component*)

Merupakan komponen yang terdiri dari tiga fasor yang sama besarnya, terpisah satu dengan yang lain dalam fasa  $120^\circ$  dan mempunyai urutan fasa yang berbeda dengan fasor aslinya.

3. Komponen Urutan Nol (*Zero Sequence Component*)

Merupakan komponen yang terdiri dari tiga fasor yang sama besarnya dan tidak ada pergeseran fasa antara fasor yang satu dengan yang lain.