



## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Deskripsi Sistem Tenaga Listrik<sup>[8]</sup>

Sekalipun tidak terdapat suatu sistem tenaga listrik yang “tipikal”, namun pada umumnya dapat dikembalikan batasan pada suatu sistem yang lengkap mengandung empat unsur. *Pertama*, adanya suatu unsur pembangkit tenaga listrik. Tegangan yang dihasilkan oleh pusat tenaga listrik itu biasanya merupakan tegangan menengah (TM). *Kedua*, suatu sistem transmisi, lengkap dengan gardu induk. Karena jaraknya yang biasanya jauh, maka diperlukan penggunaan tegangan tinggi (TT), atau tegangan ekstra tinggi (TET). *Ketiga*, adanya saluran distribusi, yang biasanya terdiri atas saluran distribusi primer dengan tegangan menengah (TM) dan saluran distribusi sekunder dengan tegangan rendah (TR). *Keempat*, adanya unsur pemakaian atas utilisasi, yang terdiri atas instalasi pemakaian tenaga listrik. Instalasi rumah tangga biasanya memakai tegangan rendah, sedangkan pemakai besar seperti industri mempergunakan tegangan menengah ataupun tegangan tinggi. Gambar 2.1 memperlihatkan skema suatu sistem tenaga listrik. Perlu dikemukakan bahwa suatu sistem dapat terdiri atas beberapa subsistem yang saling berhubungan, atau yang biasa disebut sebagai sistem terinterkoneksi.

Kiranya jelas bahwa arah mengalirnya energi listrik berawal dari Pusat Tenaga Listrik melalui saluran-saluran transmisi dan distribusi dan sampai pada instalasi pemakai yang merupakan unsur utilisasi.

Energi listrik dibangkitkan pada pembangkit tenaga listrik (PTL) yang dapat merupakan suatu pusat listrik tenaga uap (PLTU), pusat tenaga listrik air (PLTA), pusat listrik tenaga gas (PLTG), pusat listrik tenaga diesel (PLTD), ataupun pusat listrik tenaga nuklir (PLTN). Jenis PTL yang dipakai, pada umumnya tergantung dari jenis bahan bakar atau energi primer yang tersedia. Pada sistem besar sering ditemukan beberapa jenis PTL. Perlu dikemukakan bahwa PLTD biasanya dipakai pada sistem yang lebih kecil. PTL biasanya



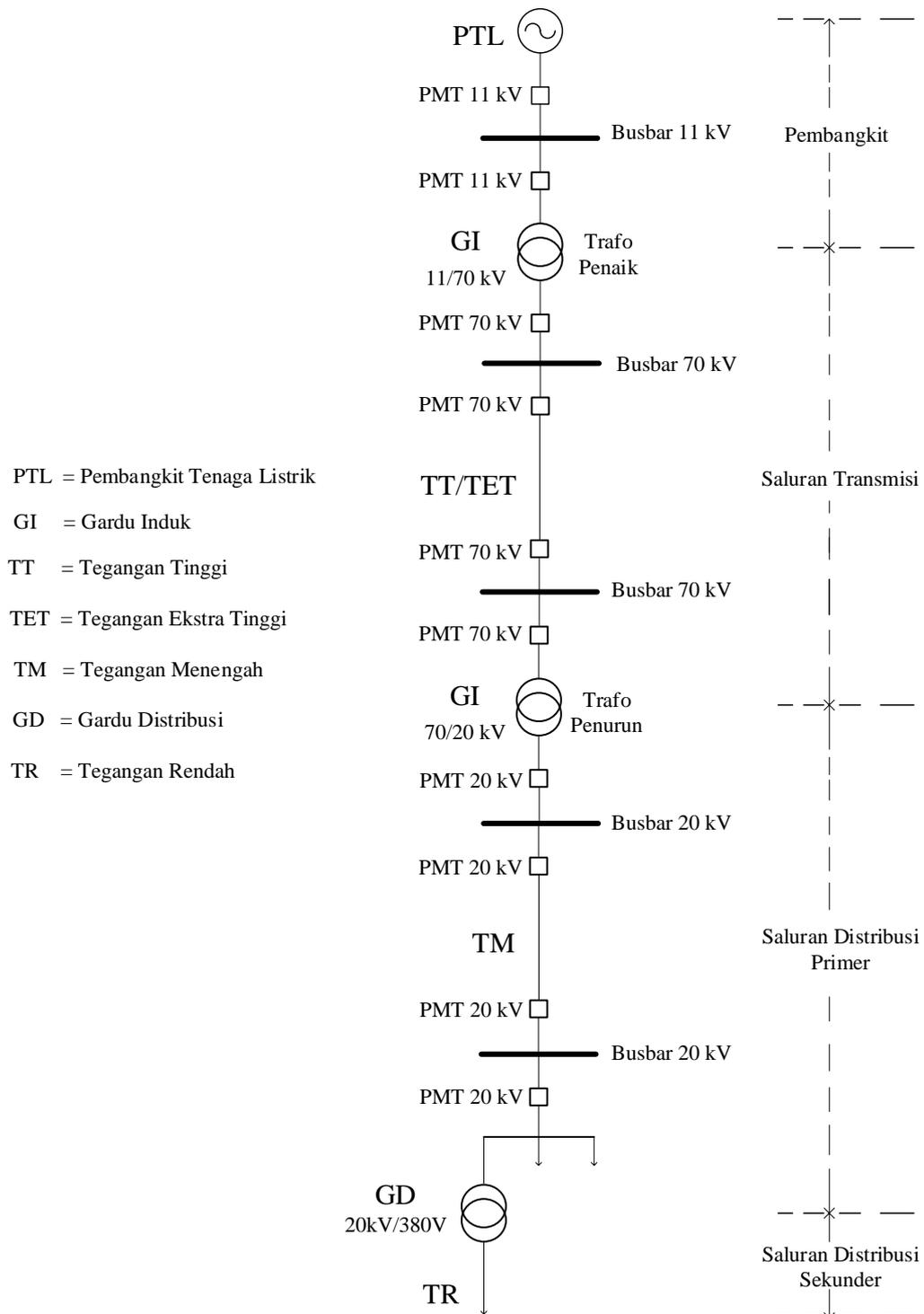
membangkitkan energi listrik pada tegangan menengah (TM), yaitu pada umumnya antara 6 dan 20 kV.

Pada sistem tenaga listrik yang besar, atau bilamana PTL terletak jauh dari pemakai, maka energi listrik itu perlu diangkut melalui saluran transmisi, dan tegangannya harus dinaikkan dari TM menjadi tegangan tinggi (TT). Pada jarak yang sangat jauh malah diperlukantegangan ekstra tinggi (TET). Menaikkan tegangan itu dilakukan di gardu induk (GI) dengan mempergunakan transformator penaik (*step-up transformer*). Tegangan tinggi di Indonesia adalah 70 kV, 150 kV, dan 275 kV. Sedangkan tegangan ekstra tinggi 500 kV.

Mendekati pusat pemakaian tenaga listrik, yang dapat merupakan suatu industri atau suatu kota, tegangan tinggi diturunkan menjadi tegangan menengah (TM). Hal ini juga dilakukan pada suatu GI dengan mempergunakan transformator penurun (*step-down transformer*). Di Indonesia tegangan menengah adalah 20 kV. Saluran 20 kV ini menelusuri jalan-jalan di seluruh kota, dan merupakan sistem distribusi primer. Bilamana transmisi tenaga listrik dilakukan dengan mempergunakan saluran-saluran udara dengan menara-menara transmisi, sistem distribusi primer di kota biasanya terdiri atas kabel-kabel tanah yang tertanam di tepi jalan, sehingga tidak terlihat.

Di tepi jalan, biasanya berdekatan dengan persimpangan, terdapat gardu-gardu distribusi (GD), yang mengubah tegangan menengah menjadi tegangan rendah (TR) melalui transformator distribusi (*distribution transformer*). Melalui tiang-tiang listrik yang terlihat di tepi jalanan, energi listrik tegangan rendah disalurkan kepada para pemakai. Di Indonesia, tegangan rendah adalah 220/380 volt, dan merupakan sistem distribusi sekunder. Pada tiang-tiang TR terpasang pula lampu-lampu penerangan jalan umum.

Energi diterima pemakai dari tiang TR melalui konduktor atau kawat yang dinamakan sambungan rumah (SR) dan berakhir pada alat pengukur listrik yang sekaligus merupakan titik akhir pemilikan PLN.



Gambar 2.1 Sistem Tenaga Listrik



## 2.2 Proteksi Tenaga Listrik<sup>[13]</sup>

Proteksi adalah pengaman listrik pada sistem tenaga listrik yang terpasang pada: sistem distribusi tenaga listrik, trafo tenaga, transmisi tenaga listrik dan generator listrik dipergunakan untuk mengamankan sistem tenaga listrik dari gangguan listrik atau beban lebih, dengan cara memisahkan bagian sistem tenaga listrik yang terganggu dengan sistem tenaga listrik yang tidak terganggu, sehingga sistem kelistrikan yang tidak terganggu dapat terus bekerja (mengalirkan arus ke beban). Jadi, pada hakekatnya pengaman pada sistem tenaga listrik mengamankan seluruh sistem tenaga listrik supaya keandalan tetap terjaga.

Tujuan dari sistem proteksi antara lain:

- Mencegah atau membatasi kerusakan pada jaringan beserta peralatannya dari akibat adanya gangguan listrik.
- Menjaga keselamatan umum dari akibat gangguan listrik.
- Meningkatkan kelangsungan pelayanan tenaga listrik kepada konsumen

Sistem proteksi yang baik harus mampu :

- Melakukan koordinasi dengan sistem pengaman yang lain GI.
- Mengamankan peralatan dari kerusakan yang lebih luas akibat gangguan.
- Membatasi kemungkinan terjadinya kecelakaan.
- Secepatnya membebaskan pemadaman karena gangguan.
- Membatasi daerah pemadaman akibat gangguan.
- Mengurangi frekuensi pemutusan permanen karena gangguan.

### 2.2.1 Persyaratan Sistem Proteksi

Persyaratan terpenting dari sistem proteksi yaitu:

#### a. Kepekaan (*sensitivity*)

Pada prinsipnya relai harus cukup peka sehingga dapat mendeteksi gangguan di kawasan 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 ke tanah dapat menjadi kecil



(lebih kecil dari penghantar udara langsung ke tanah). Untuk relai arus lebih yang bertugas pula sebagai pengaman cadangan jauh untuk seksi berikutnya, relai ini juga harus dapat juga mendeteksi arus gangguan hubung singkat 2 fasa yang terjadi di ujung akhir jaringan dalam kondisi pembangkitan minimum.

b. Selektif

Selektif suatu relai proteksi adalah mendeteksi dengan tepat daerah mana yang mengalami gangguan dan kemudian dapat menentukan dengan cepat mengerjakan pemutus daya untuk memisahkan daerah yang mengalami gangguan tersebut yang dipisahkan dari sistem.

c. Keandalan (*Reliable*)

Relai proteksi setiap saat harus dapat berfungsi dengan baik dan benar pada setiap kondisi gangguan yang terjadi. Keandalan suatu alat pengaman dapat dibagi menjadi dua unsur yaitu:

Kemampuan relai proteksi untuk bekerja dengan baik pada saat bial terjadi gangguan.

d. Kecepatan (*Speed*)

Untuk memeperkecil kerugian/kerusakan akibat gangguan, maka bagian yang terganggu harus dipisahkan secepat mungkin dari bagian sistem lainnya. Waktu total pembebasan sistem dari gangguan adalah waktu sejak munculnya gangguan, sampai bagian yang terganggu benar-benar terpisah dari bagian sistem lainnya.

Kecepatan itu penting untuk:

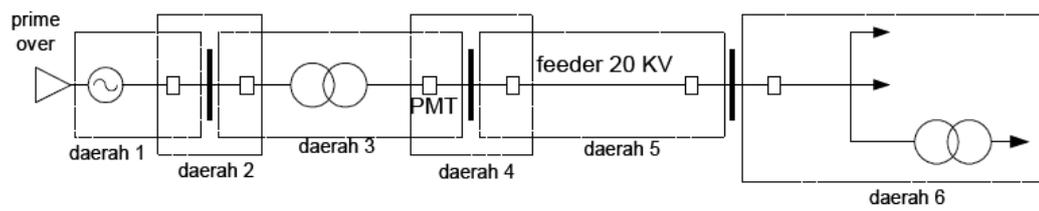
- Menghindari kerusakan secara thermis pada peralatan yang dilalui arus gangguan serta membatasi kerusakan pada alat yang terganggu.
- Mempertahankan kestabilan sistem.
- Membatasi ionisasi (busur api) pada gangguan di saluran udara yang akan berarti memperbesar kemungkinan berhasilnya penutupan balik PMT (*reclosing*) dan mempersingkat *dead time* nya (interval waktu antara buka dan tutup).



- Untuk menciptakan selektifitas yang baik, mungkin saja suatu pengaman terpaksa diberi waktu tunda (td). Namun, waktu tunda tersebut harus sesingkat mungkin (seperlunya saja) dengan memperhitungkan resikonya

### 2.2.2 Zona Proteksi<sup>[7]</sup>

Untuk memperoleh tingkat selektifitas yang tinggi, dimana hanya bagian sistem yang terganggu saja yang diisolasi (mengalami pemutusan), maka pada sistem proteksi dibentuk daerah-daerah proteksi yang dinamakan zona proteksi. Zona-zona proteksi ini biasanya dibatasi dengan PMT (CB) yang dapat memutuskan dan menghubungkan antarzona proteksi yang mengalami gangguan jika menerima instruksi dari relai.



Gambar 2.2 Pembagian Daerah Proteksi pada Sistem Tenaga Listrik

Daerah proteksi pada sistem tenaga listrik dibuat bertingkat mulai dari pembangkitan, gardu induk, saluran distribusi primer sampai ke beban. Garis putus-putus menunjukkan pembagian sistem tenaga listrik ke dalam beberapa daerah proteksi. Masing-masing daerah memiliki satu atau beberapa komponen sistem daya disamping dua buah pemutus rangkaian. Setiap pemutus dimasukkan ke dalam dua daerah proteksi berdekatan. Batas setiap daerah menunjukkan bagian sistem yang bertanggung jawab untuk memisahkan gangguan yang terjadi di daerah tersebut dengan sistem lainnya. Aspek penting lain yang harus diperhatikan dalam pembagian daerah proteksi adalah bahwa daerah yang saling berdekatan harus saling tumpang tindih (*overlap*), hal ini dimaksudkan agar tidak ada sistem yang dibiarkan tanpa perlindungan. Pembagian daerah proteksi ini bertujuan agar daerah yang tidak mengalami gangguan tetap dapat beroperasi dengan baik sehingga dapat mengurangi daerah terjadinya pemadaman.



## 2.3 Peralatan Sistem Proteksi<sup>[7]</sup>

### 2.3.1 Pemutus Tenaga

Pemutus tenaga/PMT (*circuit breaker/CB*) merupakan suatu saklar yang berfungsi untuk memutuskan atau menghubungkan rangkaian sistem tenaga listrik sesuai dengan kapasitas pemutusannya (*breaking capacity*). Operasi pensaklaran pada pemutus tenaga dapat dilakukan secara manual dan otomatis. Secara manual pemutus tenaga dapat menghubungkan dan memutuskan rangkaian sistem tenaga listrik dengan menggunakan tombol tekan atau tuas (*handle*), sedangkan secara otomatis hanya dapat memutuskan rangkaian sistem tenaga listrik sesuai isyarat (sinyal) yang diberikan oleh rele.

Syarat-syarat yang harus dipenuhi oleh pemutus tenaga dalam sistem tenaga listrik adalah sebagai berikut:

- a. Mampu menyalurkan arus maksimum sistem tenaga listrik secara kontinu.
- b. Mampu memutuskan dan menghubungkna jaringan dalam keadaan berbeban maupun dalam keadaan gangguan hubung singkat tanpa menimbulkan kerusakan pada pemutus tenaga itu sendiri.
- c. Dapat memustuskan arus hubung singkat dengan sangat cepat agar arus hubung singkat tidak sampai merusak peralatan sistem, membuat sistem kehilangan kestabilan dan merusak pemutus tenaga itu sendiri.

Oleh karena pemutus tenaga beroperasi pada arus dan tegangan yang cukup tinggi maka pada bagian kontak dilengkapi dengan pemadam busur api (minyak, gas, udara, vakum, dan lain,lain). Pemadaman busur api pada kontak pemutus tenaga menggunakan bahan yang dapat menimbulkan proses deionisasi. Jenis bahan untuk pemadaman inilah yang menggolongkan tipe-tipe peutus tenaga. Tipe-tipe pemutus tenaga yang ada saat ini adalah:

- a. Pemutus tenaga udara tekan (*air blast circuit breaker*)
- b. Pemutus tenaga minyak (*oil circuit breaker*)
- c. Pemutus tenaga vakum (*vacuum circuit breaker*)
- d. Pemutus tenaga sulfur hexaflorida (*SF6 circuit breaker*)



### 2.3.2 Relai Proteksi

Relai proteksi adalah susunan peralatan yang direncanakan untuk dapat merasakan atau mengukur adanya gangguan atau mulai merasakan adanya ketidaknormalan pada peralatan atau bagian sistem tenaga listrik dan segera secara otomatis memberi perintah untuk membuka pemutus tenaga untuk memisahkan peralatan atau bagian dari sistem yang terganggu dan memberi isyarat berupa lampu dan bel. Relai proteksi dapat merasakan atau melihat adanya gangguan pada peralatan yang diamankan dengan mengukur atau membandingkan besaran-besaran yang diterimanya, misalnya arus, tegangan, daya, sudut fase, frekuensi, impedansi, dan sebagainya, dengan besaran yang telah ditentukan, kemudian mengambil keputusan untuk seketika ataupun dengan perlambatan waktu membuka pemutus tenaga.<sup>[10]</sup>

### 2.3.3 Transformator Ukur<sup>[6]</sup>

Transformator ukur merupakan suatu peralatan yang dapat mentransformasikan (merubah) suatu besaran listrik (arus atau tegangan) ke besaran yang sama dengan harga yang berbeda. Transformator ukur memiliki belitan primer dan belitan sekunder, belitan primer dihubungkan ke jaringan sistem tenaga listrik dan belitan sekunder dihubungkan ke peralatan ukur dan peralatan pengaman. Oleh karena pada sistem tenaga listrik memiliki besaran dengan nilai yang cukup besar maka transformator ukur berfungsi untuk menurunkan nilai besaran. Berdasarkan besaran yang ditransformasikan, transformator ukur terdiri dari:

1. Transformator arus (*current transformer / CT*)
2. Transformator tegangan (*potential transformer/ PT*)
3. Gabungan transformator arus dan tegangan (*combined current and potential transformer*)

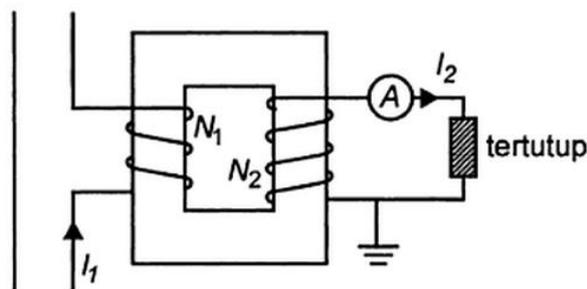
#### 2.3.3.1 Transformator Arus

Transformator arus berfungsi untuk mentransformasikan arus yang besar menjadi arus yang kecil, arus yang kecil ini disebut sebagai arus sekunder dan



dihubungkan ke peralatan ukur atau ke relai pengaman. Penerapan arus sekunder pada transformator arus dengan nilai nominal 1 A atau 5 A. Bagian-bagian transformator arus terdiri dari:

1. Kumparan : berfungsi untuk mentransformasikan besaran arus besar menjadi arus yang kecil.
2. Pendingin : merupakan bahan yang bersifat isolator seperti minyak atau udara, berfungsi untuk mendinginkan kumparan dan sekaligus mengisolasi bagian bertegangan dengan bagian yang tidak bertegangan atau mengisolasi bertegangan yang berlainan fasa.
3. Porselen : sebagai pelindung (*body*) merupakan bagian luar dari transformator yang berfungsi untuk memisahkan bagian yang bertegangan.
4. *Dehydrating breather* : sebagai pernafasan transformator yang berfungsi untuk menyerap udara lembab yang timbul dalam ruang transformator sehingga dapat mencegah rusaknya isolasi transformator.
5. Terminal : berfungsi untuk penyambungan dari sisi primer atau sekunder ke peralatan listrik lain yang membutuhkannya.



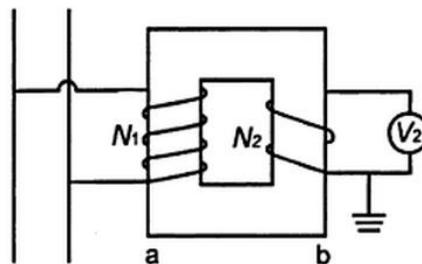
Gambar 2.3 CT (*Current Transformers*)<sup>[16]</sup>

### 2.3.3.2 Transformator Tegangan

Transformator tegangan berfungsi untuk mentransformasikan tegangan yang tinggi menjadi tegangan yang rendah, tegangan yang rendah ini disebut sebagai tegangan sekunder dan dihubungkan ke peralatan ukur atau ke relai pengaman. Penerapan tegangan sekunder pada transformator tegangan dengan nilai nominal  $100/\sqrt{3}$  V atau  $110/\sqrt{3}$  V. Bagian-bagian transformator tegangan terdiri dari:



1. Kumputan : berfungsi untuk mentransformasikan besaran tegangan besar menjadi tegangan yang kecil.
2. Pendingin : merupakan bahan yang bersifat isolator seperti minyak atau udara, berfungsi untuk mendinginkan kumputan dan sekaligus mengisolasi bagian bertegangan dengan bagian yang tidak bertegangan atau mengisolasi bertegangan yang berlainan fasa.
3. Porselen : sebagai pelindung (*body*) merupakan bagian luar dari transformator yang berfungsi untuk memisahkan bagian yang bertegangan.
4. *Dehydrating breather* : sebagai pernafasan transformator yang berfungsi untuk menyerap udara lembab yang timbul dalam ruang transformator sehingga dapat mencegah rusaknya isolasi transformator.
5. Terminal : berfungsi untuk penyambungan dari sisi primer atau sekunder ke peralatan listrik lain yang membutuhkannya.



Gambar 2.4 PT (*Potential Transformers*)<sup>[16]</sup>

## 2.4 Gangguan pada Sistem Distribusi<sup>[7]</sup>

Gangguan yang terjadi pada sistem distribusi biasanya merupakan gangguan-gangguan yang terkait dengan saluran penghantar dan peralatan-peralatan ardu distribusi, kawat pentanahan dan sebagainya. Seperti pada sistem tenaga pada umumnya, maka gangguan yang terjadi pada sistem distribusi dapat dikategorikan sebagai berikut:

### a. Gangguan Hubung Singkat

Gangguan hubung singkat dapat terjadi antarfase (3 fase atau 2 fase) atau 1 fase ke tanah dan sifatnya bisa temporer atau permanen.



- Gangguan permanen : hubung singkat pada kabel, belitan trafo, generator (tembusnya isolasi).
- Gangguan temporer : *flashover* karena sambaran petir, *flashover* dengan pohon, tertiuip angin.

#### b. 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.

#### c. Gangguan Tegangan Lebih

Gangguan tegangan lebih termasuk gangguan yang sering terjadi pada saluran distribusi. Berdasarkan penyebabnya maka gangguan tegangan lebih ini dapat dikelompokkan atas 2 hal:

- Tegangan lebih power frekwensi  
Pada sistem distribusi hal ini biasanya disebabkan oleh kesalahan pada AVR atau pengatur tap pada trafo distribusi.
- Tegangan lebih surja  
Gangguan ini biasanya disebabkan oleh surja hubung singkat atau surja petir.

Dari ketiga jenis gangguan tersebut, gangguan yang lebih sering terjadi dan berdampak sangat besar bagi sistem distribusi adalah gangguan hubung singkat, sehingga istilah gangguan pada sistem distribusi lazim mengacu kepada gangguan hubung singkat dan peralatan proteksi yang dipasang cenderung mengatasi gangguan hubung singkat ini.

### 2.5 Pole Mounted Circuit Breaker (PMCB)

PMCB (*Pole Mounted Circuit Breaker*) adalah sistem proteksi yang terpasang pada tiang jaringan listrik 20 kV untuk semua jenis sistem pentanahan yang efektif, flesibel, murah, sekaligus untuk Alat Pembatas dan Pengukur pelanggan PLN, untuk tegangan menengah. Dengan menggunakan PMCB, lingkupnya lebih kecil dan akan melokalisir pemutusan aliran listrik di satu daerah bila terjadi gangguan, dibandingkan bila pemutusan aliran dari gardu induk.



Pengukuran penggunaan listrik untuk pelanggan juga akan lebih akurat dan dapat mendeteksi kebocoran listrik bila terjadi.<sup>[12]</sup> Gambar 2.5 dan 2.6 berikut memperlihatkan penempatan dan contoh pemasangan PMCB pada jaringan listrik 20 kV.



Gambar 2.5 Penempatan PMCB pada jaringan listrik 20kV<sup>[2]</sup>



Gambar 2.6 Contoh pemasangan PMCB pada tiang penyulang

PMCB sebagai pengaman pada jaringan listrik tegangan menengah memiliki beberapa fungsi, yaitu:

1. Melokalisir gangguan listrik hanya pada daerah yang terganggu saja secara selektif.

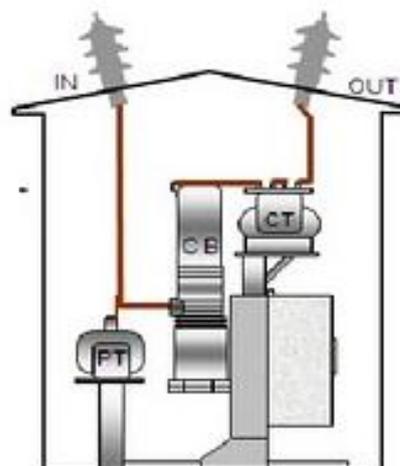


2. Sebagai *recloser* untuk gangguan temporer (sementara).
3. Sebagai alat ukur presisi kWh EXIM (*Export – Import*) perbatasan 2 area kerja.
4. Sebagai alat ukur presisi APP (Alat Pengukur dan Pembatas) Pelanggan.
5. Sebagai sarana *Manual Load Shedding* dengan adanya fasilitas *Master Remote Control*.<sup>[12]</sup>

### 2.5.1 Spesifikasi PMCB

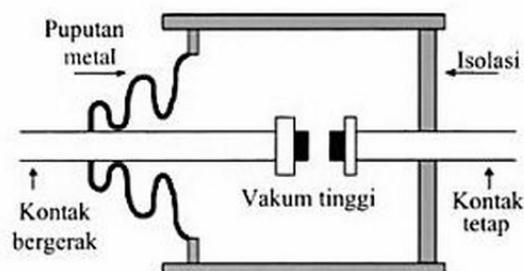
Seperti terlihat pada Gambar 2.7, PMCB terdiri dari 1 *box* besar sebagai tempat sistem pemutus tenaga dan *box* kecil yang merupakan kotak relai dan kontrol.

#### 2.5.1.1 Box Besar



Gambar 2.7 Box Besar<sup>[2]</sup>

#### 1. VCB (*Vacuum Circuit Breaker*)



Gambar 2.8 VCB (*Vacuum Circuit Breaker*)<sup>[18]</sup>



Pada VCB (*Vacuum Circuit Braeaker*) atau yang disebut juga Pemutus Daya Vakum, kontak ditempatkan pada suatu bilik vakum seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.8. Untuk mencegah udara masuk ke dalam bilik, maka bilik harus ditutup rapat dan kontak Bergeraknya diikat ketat dengan perapat logam.

Jika kontak dibuka, maka pada katoda kontak terjadi emisi thermis dan medan tegangan yang tinggi yang memproduksi elektron-elektron bebas. Elektron hasil emisi ini bergerak menuju anoda. Dalam perjalanannya menuju anoda, elektron-elektron bebas ini tidak bertemu dengan molekul udara sehingga tidak terjadi ionisasi tumbukan. Akibatnya, tidak ada penambahan elektron bebas yang mengawali pembentukan busur api. Dengan kata lain, busur api dapat dipadamkan.<sup>[18]</sup>

## 2. CT (*Current Transformers*) Indoor

CT (*Current Transformers*) atau Transformator Arus digunakan untuk mengukur arus beban suatu rangkaian. Dengan menggunakan transformator arus maka arus beban yang besar dapat diukur dengan hanya dengan menggunakan pengukur arus (ammeter) yang kecil.

Trafo arus dalam ruangan (*indoor*) biasanya memiliki ukuran yang lebih kecil daripada trafo arus pemasangan luar ruangan, menggunakan isolator dari bahan resin.<sup>[3]</sup>



Gambar 2.9 CT Indoor<sup>[19]</sup>



### 3. PT (*Potential Transformers*) Indoor

Trafo tegangan dalam ruangan (*indoor*) biasanya memiliki ukuran yang lebih kecil daripada trafo tegangan pemasangan luar ruangan, menggunakan isolator dari bahan resin.<sup>[3]</sup>



Gambar 2.10 PT Indoor<sup>[19]</sup>

### 4. *Bushing* TM 20kV

*Bushing* adalah sebuah konduktor yang berfungsi untuk menghubungkan rangkaian dalam box dengan rangkaian luar yang diberi selubung isolator. Isolator juga berfungsi sebagai penyekat antara konduktor dengan tangki transformator. Bahan *bushing* adalah terbuat dari porselin yang tengahnya berlubang.<sup>[1]</sup>



Gambar 2.11 *Bushing* TM 20kV<sup>[5]</sup>



## 5. Busbar Tembaga

Fungsi busbar (rel) pada panel adalah titik pertemuan atau hubungan peralatan listrik untuk menerima dan menyalurkan tenaga / daya listrik.<sup>[14]</sup>

## 6. *Box* Besar

Box PMCB ini terbuat dari plate besi PMCB ukuran 1000 x 950 x 1300 mm, menggunakan plate besi tebal 2,5 mm<sup>2</sup>.

### 2.5.1.2 *Box* Kecil

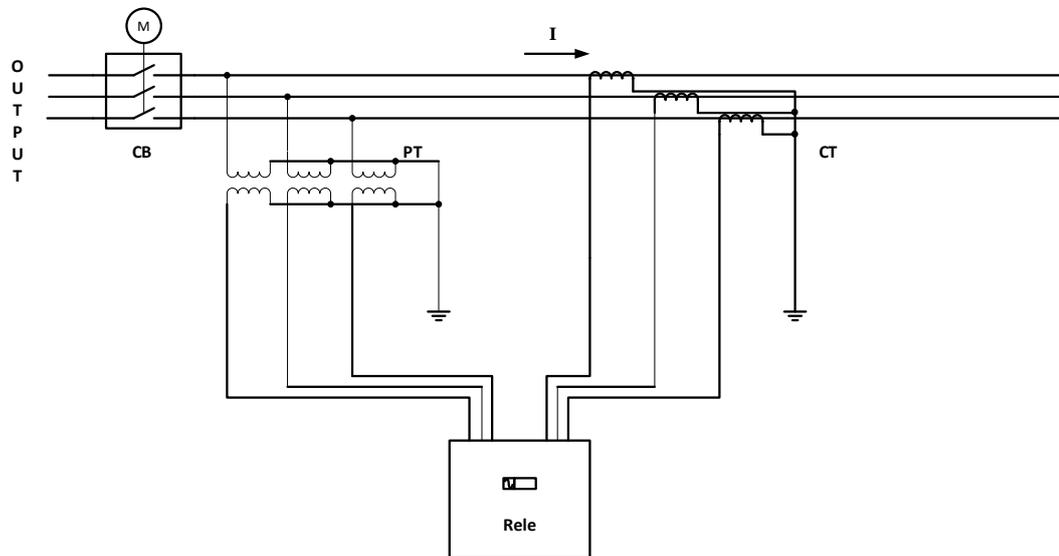


Gambar 2.12 *Box* Kecil<sup>[2]</sup>

Pada *box* kecil berfungsi untuk mengontrol VCB yang ada di *box* besar. Dalam *box* kecil terdapat relai yang berfungsi sebagai pemonitor dan pemberi perintah ke VCB untuk memutuskan jaringan. Selain itu juga terdapat *battery* 24 VDC yang berfungsi sebagai tenaga cadangan untuk menggerakkan motor VCB. Selain *battery*, juga terdapat *battery charger* yang berfungsi untuk mencharg *battery* tersebut.<sup>[2]</sup>



### 2.5.2 Pengawatan Rangkaian PMCB



Gambar 2.13 Pengawatan rangkaian PMCB<sup>[9]</sup>

Dari Gambar 2.13 di atas, pada PMCB terdapat 2 jenis relai, yaitu:

1. OCR (*Over Current Relay/Relai Arus Lebih*)

OCR bekerja apabila terjadi arus yang melebihi settingannya. Relai ini bekerja untuk melindungi peralatan listrik lainnya apabila terjadi arus lebih akibat :

- Adanya penambahan beban atau perkembangan beban
- Adanya gangguan hubung singkat di jaringan maupun instalasi listrik.
- Gangguan hubung singkat terjadi antarfasa yaitu dua fasa maupun tiga fasa.<sup>[17]</sup>

2. DGR (*Directional Ground Relay*)

Relai gangguan tanah berarah dipasang pada penyulang 20 kV sebagai pengaman utama untuk mengamankan gangguan 1 fasa ke tanah. Relai ini bekerja berdasarkan dua besaran, yaitu arus  $I_0$  (dari ZCT yang baru memang baru muncul kalau ada gangguan tanah) dan  $V_0$  (dari PT) Open Delta yang menghasilkan suatu sudut dan arah



tertentu. Bila salah satu komponen tidak terpenuhi maka relai tidak akan bekerja.<sup>[17]</sup>

## 2.6 Konfigurasi Sistem Distribusi<sup>[4]</sup>

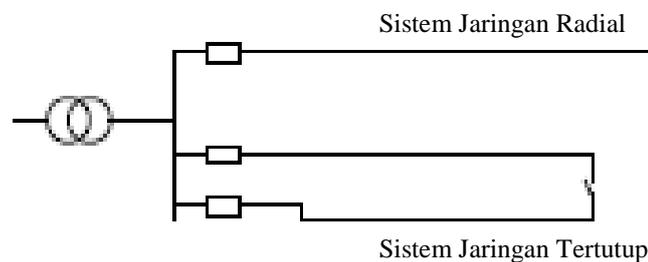
Secara umum konfigurasi suatu jaringan tenaga listrik hanya mempunyai 2 konsep konfigurasi:

### 1. Jaringan Radial

Yaitu jaringan yang hanya mempunyai satu pasokan tenaga listrik jika terjadi gangguan akan terjadi “*black-out*” atau padam pada bagian yang tidak dapat dipasok.

### 2. Jaringan Bentuk Tertutup

Yaitu jaringan yang mempunyai alternatif pasokan tenaga listrik jika terjadi gangguan, sehingga bagian yang mengalami pemadaman (*black-out*) dapat dikurangi atau bahkan dihindari.



Gambar 2.14 Pola Jaringan Distribusi Dasar

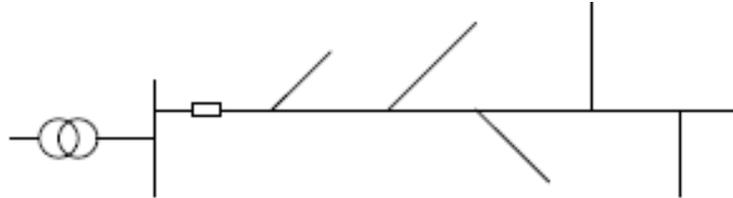
Berdasarkan kedua pola dasar tersebut, dibuat konfigurasi-konfigurasi jaringan sesuai dengan maksud perencanaannya sebagai berikut:

#### a. Konfigurasi Tulang Ikan (*Fish-Bone*)

Konfigurasi *fish-bone* ini adalah tipikal konfigurasi dari saluran udara Tegangan Menengah beroperasi radial. Pengurangan luas pemadaman dilakukan dengan mengisolasi bagian yang terkena gangguan dengan memakai pemisah [*Pole Top Switch (PTS)*, *Air Break Switch (ABSW)*] dengan koordinasi relai atau dengan sistem SCADA. Pemutus balik otomatis PBO (*Automatic Recloser*)



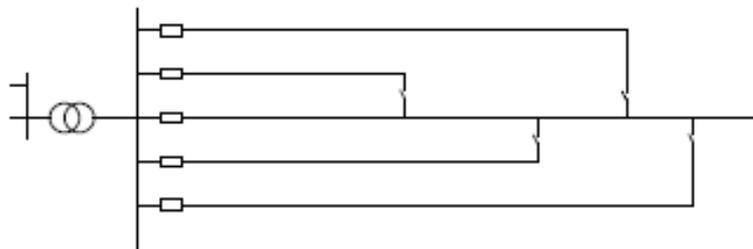
dipasang pada saluran utama dan saklar seksi otomatis SSO (*Automatic Sectionalizer*) pada percabangan.



Gambar 2.15 Konfigurasi Tulang Ikan (*Fishbone*)

b. Konfigurasi Kluster (*Cluster / Leap Frog*)

Konfigurasi saluran udara Tegangan Menengah yang sudah bertipikal sistem tertutup, namun beroperasi radial (*Radial Open Loop*). Saluran bagian tengah merupakan penyulang cadangan dengan luas penampang penghantar besar.

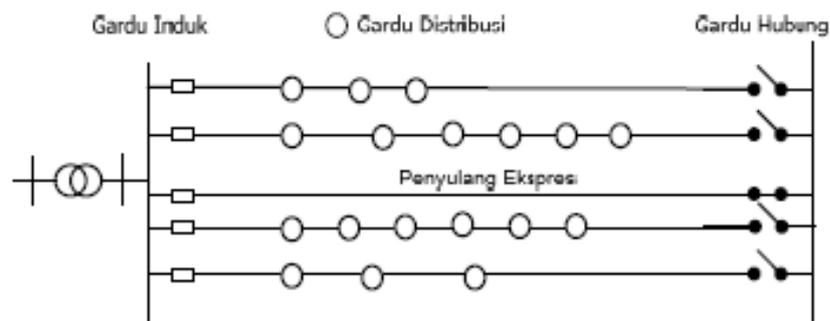


Gambar 2.16 Konfigurasi Kluster (*Cluster / Leap Frog*)

c. Konfigurasi Spindel (*Spindel Configuration*)

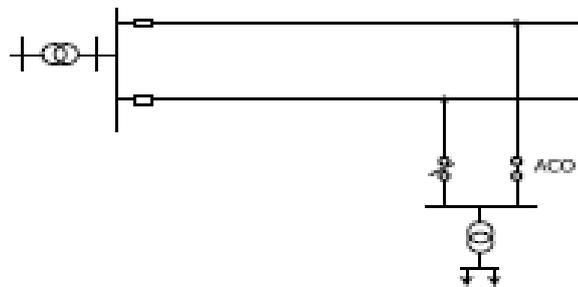
Konfigurasi spindel umumnya dipakai pada saluran kabel bawah tanah. Pada konfigurasi ini dikenal 2 jenis penyulang yaitu penyulang cadangan (*standby* atau *express feeder*) dan penyulang operasi (*working feeder*). Penyulang cadangan tidak dibebani dan berfungsi sebagai *back-up supply* jika terjadi gangguan pada penyulang operasi.

Untuk konfigurasi 2 penyulang, maka faktor pembebanan hanya 50%. Berdasarkan konsep *Spindel* jumlah penyulang pada 1 spindel adalah 6 penyulang operasi dan 1 penyulang cadangan sehingga faktor pembebanan konfigurasi spindel penuh adalah 85 %. Ujung-ujung penyulang berakhir pada gardu yang disebut Gardu Hubung dengan kondisi penyulang operasi “NO” (*Normally Open*), kecuali penyulang cadangan dengan kondisi “NC” (*Normally Close*).

Gambar 2.17 Konfigurasi Spindel (*Spindle Configuration*)

#### d. Konfigurasi *Fork*

Konfigurasi ini memungkinkan 1 (satu) Gardu Distribusi dipasok dari 2 penyulang berbeda dengan selang waktu pemadaman sangat singkat (*Short Break Time*). Jika penyulang operasi mengalami gangguan, dapat dipasok dari penyulang cadangan secara efektif dalam waktu sangat singkat dengan menggunakan fasilitas *Automatic Change Over Switch* (ACOS). Pencabangan dapat dilakukan dengan sadapan Tee-Off (TO) dari Saluran Udara atau dari Saluran Kabel tanah melalui Gardu Distribusi.

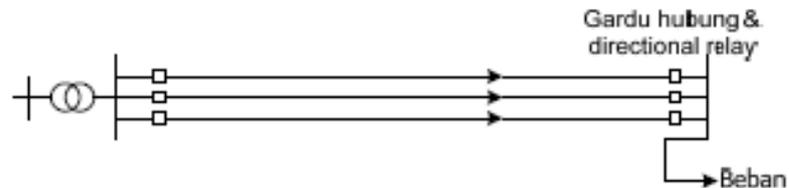
Gambar 2.18 Konfigurasi *Fork*

#### e. Konfigurasi Spotload (*Parallel Spot Configuration*)

Konfigurasi yang terdiri sejumlah penyulang beroperasi paralel dari sumber atau Gardu Induk yang berakhir pada Gardu Distribusi. Konfigurasi ini dipakai jika beban pelanggan melebihi kemampuan hantar arus penghantar. Salah satu penyulang berfungsi sebagai penyulang cadangan, guna mempertahankan



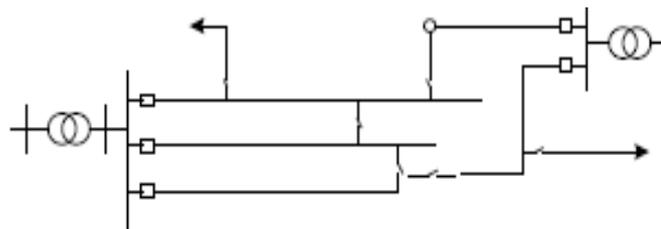
kontinuitas penyaluran. Sistem harus dilengkapi dengan rele arah (*Directional Relay*) pada Gardu Hilir (Gardu Hubung).



Gambar 2.19 Konfigurasi Spotload (*Parallel Spot Confiuration*)

f. Konfigurasi Jala-jala (*Grid, Mesh*)

Konfigurasi jala-jala, memungkinkan pasokan tenaga listrik dari berbagai arah ke titik beban. Rumit dalam proses pengoperasian, umumnya dipakai pada daerah padat beban tinggi dan pelanggan-pelanggan pemakaian khusus.

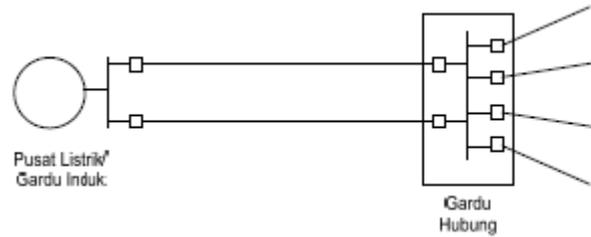


Gambar 2.20 Konfigurasi Jala-jala (*Grid, Mesh*)

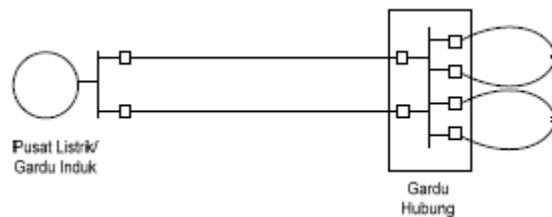
g. Konfigurasi Lain-lain

Selain dari model konfigurasi jaringan yang umum dikenal sebagaimana diatas, terdapat beberapa model struktur jaringan yang dapat dipergunakan sebagai alternatif model-model struktur jaringan.

Struktur Garpu dan Bunga dipakai jika pusat beban berada jauh dari pusat listrik/Gardu Induk. Jaringan Tegangan Menengah (JTM) berfungsi sebagai pemasok, Gardu Hubung sebagai Gardu Pembagi, Pemutus Tenaga sebagai pengaman dengan rele proteksi gangguan fasa-fasa dan fasa-tanah pada JTM yang berawal dari Gardu Hubung.

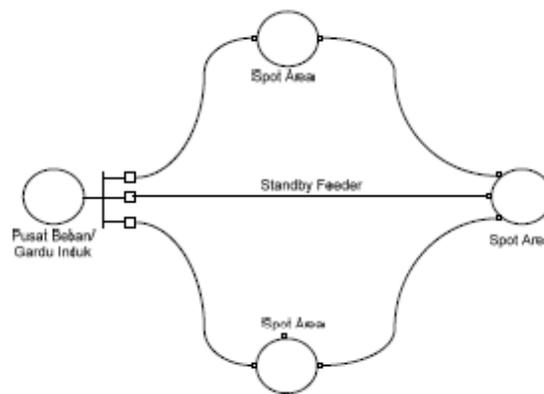


Gambar 2.21 Konfigurasi Struktur Garpu



Gambar 2.22 Konfigurasi Struktur Bunga

Struktur Rantai dipakai pada suatu kawasan yang luas dengan pusat-pusat beban yang berjauhan satu sama lain.



Gambar 2.23 Konfigurasi Struktur Rantai

## 2.7 Keandalan Kontinuitas Penyaluran<sup>[4]</sup>

Keandalan merupakan tingkat keberhasilan kinerja suatu sistem atau bagian dari sistem, untuk dapat memberikan hasil yang lebih baik pada periode waktu dan dalam kondisi operasi tertentu. Untuk dapat menentukan tingkat keandalan dari suatu sistem, harus diadakan pemeriksaan dengan cara melalui perhitungan maupun analisa terhadap tingkat keberhasilan kinerja atau operasi



dari sistem yang ditinjau, pada periode tertentu kemudian membandingkannya dengan standar yang ditetapkan sebelumnya.

Keandalan tenaga listrik adalah menjaga kontinuitas penyaluran tenaga listrik kepada pelanggan terutama pelanggan daya besar yang membutuhkan kontinuitas penyaluran tenaga listrik secara mutlak. Apabila tenaga listrik tersebut putus atau tidak tersalurkan akan mengakibatkan proses produksi dari pelanggan besar tersebut terganggu. Struktur jaringan tegangan menengah memegang peranan penting dalam menentukan keandalan penyaluran tenaga listrik karena jaringan yang baik memungkinkan dapat melakukan *manuver* tegangan dengan mengalokasikan tempat gangguan dan beban dapat dipindahkan melalui jaringan lainnya.

Kontinuitas pelayanan yang merupakan salah satu unsur dari kualitas pelayanan tergantung kepada macam sarana penyalur dan peralatan pengaman. Jaringan distribusi sebagai sarana penyalur tenaga listrik mempunyai tingkat kontinuitas tergantung kepada susunan saluran dan cara pengaturan operasinya.

Tingkat Keandalan kontinuitas penyaluran bagi pemanfaat tenaga listrik adalah berapa lama padam yang terjadi dan berapa banyak waktu yang diperlukan untuk memulihkan penyaluran kembali tenaga listrik. Secara ideal tingkat keandalan kontinuitas penyaluran dibagi atas 5 tingkat :

- Tingkat - 1 : Pemadaman dalam orde beberapa jam. Umumnya terjadi pada sistem saluran udara dengan konfigurasi radial.
- Tingkat - 2 : Pemadaman dalam orde kurang dari 1 jam. Mengisolasi penyebab gangguan dan pemulihan penyaluran kurang dari 1 jam. Umumnya pada sistem dengan pasokan penyulang cadangan atau sistem loop.
- Tingkat - 3 : Pemadaman dalam orde beberapa menit. Umumnya pada sistem yang mempunyai sistem SCADA.
- Tingkat - 4 : Pemadaman dalam orde detik. Umumnya pada sistem dengan fasilitas *automatic switching* pada sistem fork.
- Tingkat - 5 : Sistem tanpa pemadaman. Keadaan dimana selalu ada pasokan tenaga listrik, misalnya pada sistem spotload, transformator yang bekerja parallel.



Keputusan untuk mendesain sistem jaringan berdasarkan tingkat keandalan penyaluran tersebut adalah faktor utama yang mendasari memilih suatu bentuk konfigurasi sistem jaringan distribusi dengan memperhatikan aspek pelayanan teknis, jenis pelanggan dan biaya. Pada prinsipnya dengan tidak memperhatikan bentuk konfigurasi jaringan, desain suatu sistem jaringan adalah sisi hulu mempunyai tingkat kontinuitas yang lebih tinggi dari sisi hilir. Lama waktu pemulihan penyaluran dapat dipersingkat dengan mengurangi akibat dari penyebab gangguan, misalnya pemakaian PBO, SSO, penghantar berisolasi, atau menambahkan sistem SCADA.

Fungsi jaringan distribusi ialah menyalurkan dan mendistribusikan tenaga listrik dari gardu induk distribusi (*distribution substation*) kepada pelanggan listrik dengan mutu pelayanan yang memadai. Salah satu unsur dari mutu pelayanan adalah kontinuitas pelayanan yang tergantung pada topologi dan konstruksi jaringan serta peralatan tegangan menengah. Masalah utama dalam menjalankan fungsi jaringan distribusi tersebut adalah mengatasi gangguan dengan cepat mengingat gangguan yang terbanyak dalam sistem tenaga listrik terdapat dalam jaringan distribusi, khususnya jaringan tegangan menengah 20 KV. Istilah keandalan jaringan distribusi menggambarkan keamanan jaringan distribusi dalam menghindarkan atau meminimalisasi gangguan-gangguan yang menyebabkan pemadaman jaringan distribusi.

Parameter-parameter keandalan yang biasa digunakan untuk mengevaluasi sistem distribusi radial adalah angka-angka kegagalan rata-rata ( $\lambda_s$ ), waktu pemadaman rata-rata ( $r_s$ ) dan waktu pemadaman tahunan ( $U_s$ ).

Dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$\lambda_s = \sum_i \lambda_i \quad (2.1)$$

$$U_s = \sum_i \lambda_i r_i \quad (2.2)$$

$$r_s = \frac{U_s}{\lambda_s} \quad (2.3)$$



Dengan,

$\lambda_i$  : angka kegagalan rata-rata komponen ke – i

$r_i$  : waktu pemadaman rata-rata komponen ke – i

Indeks keandalan untuk mengukur parah atau tidaknya pemadaman yang dimaksud adalah indeks yang berorientasi pelanggan seperti *System Average Interruption Frequency Index* (SAIFI) dan *System Average Interruption Duration Index* (SAIDI). Kedua indeks pemadaman tersebut dihitung dengan tidak mengikutsertakan penjumlahan pemadaman sejenak (*momentary interruption*). Sebagian besar pemadaman sejenak berlangsung hanya dalam beberapa detik atau kurang dari satu detik dan dalam standar ini disebut hilang tegangan sekejap. Pemadaman sekejap ialah pemadaman yang lamanya 5 menit atau kurang.<sup>[11]</sup>

### 2.7.1 *System Average Interruption Frequency Index* (SAIFI)<sup>[11]</sup>

SAIFI adalah indeks keandalan yang merupakan jumlah dari perkalian frekuensi padam dan pelanggan padam dibagi dengan jumlah pelanggan yang dilayani. Dengan indeks ini gambaran mengenai frekuensi kegagalan rata-rata yang terjadi pada bagian-bagian dari sistem bisa dievaluasi sehingga dapat dikelompokkan sesuai dengan tingkat keandalannya. Satuannya adalah pemadaman per pelanggan.

Secara matematis dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\text{SAIFI} = \frac{\text{Jumlah dari Perkalian Frekuensi Padam dan Pelanggan Padam}}{\text{Jumlah Pelanggan}}$$

$$\text{SAIFI} = \frac{\sum \lambda_i N_i}{\sum N_i} \quad (2.4)$$

Dengan :

$\lambda_i$  : angka kegagalan rata-rata/frekuensi padam

$N_i$  : jumlah pelanggan yang dilayani pada titik beban i



### 2.7.2 Sistem Average Interruption Duration Index (SAIDI)<sup>[11]</sup>

SAIDI adalah indeks keandalan yang merupakan jumlah dari perkalian lama padam dan pelanggan padam dibagi dengan jumlah pelanggan yang dilayani. Dengan indeks ini, gambaran mengenai lama pemadaman rata-rata yang diakibatkan oleh gangguan pada bagian-bagian dari sistem dapat dievaluasi. Secara matematis dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\text{SAIDI} = \frac{\text{Jumlah dari Perkalian Jam Padam dan Pelanggan Padam}}{\text{Jumlah Pelanggan}}$$

$$\text{SAIDI} = \frac{\sum U_i N_i}{\sum N_i} \quad (2.5)$$

Dengan:

$U_i$  : waktu padam pelanggan dalam periode tertentu (jam/tahun)

Standar yang dipakai dalam menentukan lama dan kali gangguan SUTM Radial (SPLN 59 : 1985), yaitu:

- a. SAIDI = 21,094 jam/pelanggan/tahun
- b. SAIFI = 3,21 kali/pelanggan/tahun.