

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Pengaman^{[2]*}

Sistem pengaman adalah beberapa komponen yang saling berhubungan dan bekerja bersama-sama untuk satu tujuan dalam mengatasi permasalahan yang terjadi disebabkan oleh gangguan-gangguan yang terjadi dalam sistem operasi komponen peralatan. Sistem pengaman yang baik harus mampu :

- (a) Melakukan koordinasi dengan system TT (GI/transmisi/pembangkit).
- (b) Mengamankan peralatan dari kerusakan dan gangguan.
- (c) Membatasi kemungkinan terjadinya kecelakaan.
- (d) Secepatnya dapat membebaskan pemadaman karena gangguan.
- (e) Membatasi daerah yang mengalami pemadaman.
- (f) Mengurangi frekuensi pemutusan tetap (permanen) karena gangguan.

Di samping itu, setiap sistem atau alat pengaman harus mempunyai kepekaan, kecermatan dan kecepatan bereaksi yang baik. Fungsi dari sistem pengaman sebagai berikut :

- Mendeteksi adanya gangguan.
- Mencegah kerusakan (peralatan dan jaringan).
- Pengamanan terhadap manusia.
- Meminimumkan daerah padam bila terjadi gangguan pada sistem.

Adapun persyaratan untuk peralatan pengaman dalam sistem pangaman sebagai berikut⁶ :

a. Kepekaan (Sensitivity)

Pada prinsipnya relai harus cukup peka sehingga dapat mendeteksi gangguan dikawasan pengamanannya meskipun dalam kondisi yang memberikan rangsangan yang minimum.

* Diurutkan berdasarkan daftar pustaka

b. Keandalan (Reliability)

Ada 3 aspek dalam keandalan (reliability) yaitu :

1. Dependability

Yaitu tingkat kepastian bekerjanya. Pada prinsipnya pengaman harus dapat diandalkan bekerjanya (dapat mendeteksi dan melepaskan bagian yang terganggu), tidak boleh gagal bekerja. Dengan kata lain dependability-nya harus tinggi.

2. Security

Yaitu tingkat kepastian untuk tidak salah kerja. Salah kerja adalah kerja yang semestinya tidak harus kerja, misalnya karena lokasi gangguan di luar kawasan pengamanannya atau sama sekali tidak ada gangguan. Salah kerja mengakibatkan pemadaman yang sebenarnya tidak perlu terjadi. Jadi pada prinsipnya pengaman tidak boleh salah kerja, dengan kata lain security-nya harus tinggi.

3. Availability

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

c. Selektifitas (Selectivity)

Pengaman harus dapat memisahkan bagian sistem yang terganggu sekecil mungkin yaitu hanya seksi yang terganggu saja yang menjadi kawasan pengamanan utamanya. Pengamanan sedemikian disebut pengamanan yang selektif. Jadi relai harus dapat membedakan apakah gangguan terletak di kawasan pengamanan utamanya di mana ia harus bekerja cepat atau terletak di seksi berikutnya di mana ia harus berkerja dengan waktu tunda atau harus tidak bekerja sama sekali.

d. Kecepatan (Speed)

Untuk memperkecil kerugian/kerusakan akibat gangguan, maka bagian yang terganggu harus dipisahkan secepat mungkin dari bagian sistem lainnya. Untuk menciptakan selektifitas yang baik, mungkin saja suatu pengaman terpaksa

diberi waktu tunda (time delay) namun waktu tunda itu harus secepatnya mungkin (seperlunya saja).

2.1.1 Klasifikasi Sistem Pengaman¹

Alat-alat pengaman yang kebanyakan berupa relai mempunyai 2 (dua) fungsi, yaitu:

- a. Melindungi peralatan terhadap gangguan yang terjadi dalam sistem, agar jangan sampai mengalami kerusakan.
- b. Melokalisir akibat gangguan, jangan sampai meluas dalam sistem.

Untuk memenuhi fungsinya tersebut dalam butir a, alat pengaman harus bekerja cepat agar pengaruh gangguan yang merupakan hubung singkat dapat segera dihilangkan sehingga pemanasan yang berlebihan yang timbul sebagai akibat arus hubung singkat dapat segera dihentikan. Untuk memenuhi fungsinya tersebut dalam butir b, alat-alat pengaman yang terdekat dengan tempat gangguan saja yang bekerja. Secara teknis dikatakan bahwa alat-alat pengaman harus bersifat selektif. Ditinjau dari letaknya dalam sistem ada 4 (empat) kategori pengaman yaitu⁶ :

- a. Pengaman Generator
- b. Pengaman Saruran Transmisi
- c. Pengaman Transformator dalam Gardu Induk
- d. Pengaman Sistem Distribusi

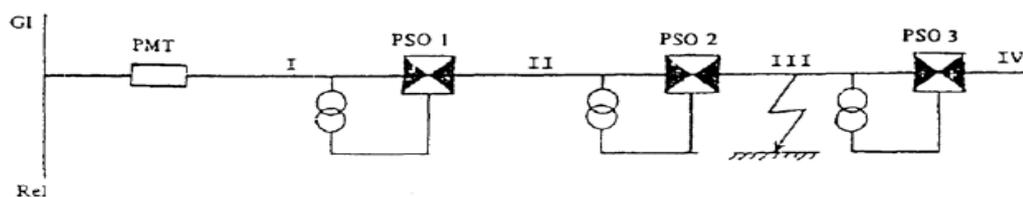
Dalam sistem PLN saat ini sebagian besar masih banyak dipakai relai-relai elektromekanik, walaupun juga telah dimulai pemakaian relai elektronik. Relai elektromekanik terdiri dari rangkaian listrik yang menggerakkan suatu mekanisme yang pada akhirnya harus men-trip PMT dengan jalan menutup kontak pemberi arus trip coil (kumparan trip) dan PMT. Sedangkan relai elektronik kerjanya lebih cepat daripada relai elektromekanik sehingga ditinjau dari segi pengamanan peralatan adalah lebih baik.

Pengaman Sistem Distribusi⁵

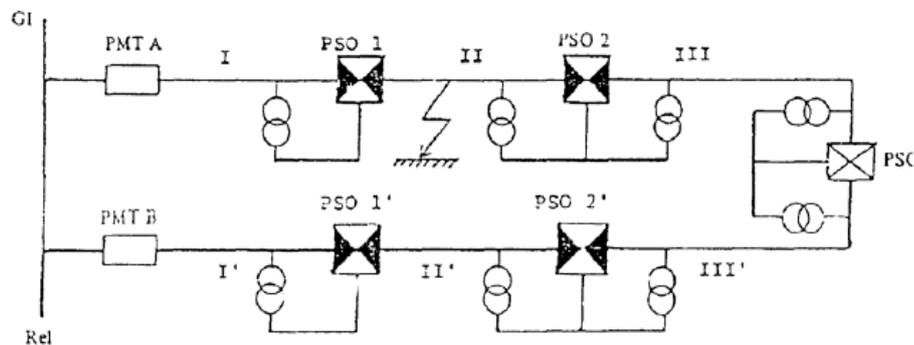
Sehubungan dengan pentanahan jaringan distribusi, maka umumnya feeder distribusi yang keluar dari gardu induk dilengkapi dengan :

- a. Relai Arus Lebih (OCR)
- b. Relai Gangguan Tanah (GFR)

Apabila diujung feeder distribusi yang keluar dari gardu induk ada sumber daya maka relai arus lebih dan relai gangguan tanah tersebut diatas harus bersifat power directional. Apabila feeder distribusi adalah SUTM dan bersifat radial, tidak ada sumber daya diujungnya, maka dipasang pula relai untuk auto reclosing (penutup balik). Karena jumlah gangguan per km per tahun pada SUTM adalah cukup tinggi maka untuk dapat melokalisir gangguan secepat mungkin sering kali SUTM dibagi atas beberapa seksi yang mempunyai pengaman sendiri dengan harapan apabila ada gangguan pada salah satu seksi, gangguan tidak akan merambat kepada seksi yang ada didepannya. Selektifitas antara seksi dapat dilakukan dengan menggunakan relai arus lebih untuk setiap seksi serta menggunakan time grading. Namun seperti telah diuraikan, kesulitan menggunakan relai arus lebih dengan time grading adalah timbulnya akumulasi waktu. Akumulasi waktu ini dapat dikurangi apabila dipakai relai arus lebih dengan karakteristik invers, namun kesulitan ini tidak teratasi apabila besarnya arus gangguan pada setiap seksi tidak cukup berbeda untuk menyelenggarakan time grading. Untuk mengatasi persoalan ini dipakai pemisah seksi otomatis dan juga sekering-sekering (pelebur-pelebur) pada seksi-seksi SUTM seperti ditunjukkan pada gambar 2.1 dan gambar 2.2. Sekering biasanya dipasang pada cabang dan SUTM dari pada Transformator Distribusi seperti terlihat pada gambar 2.3.

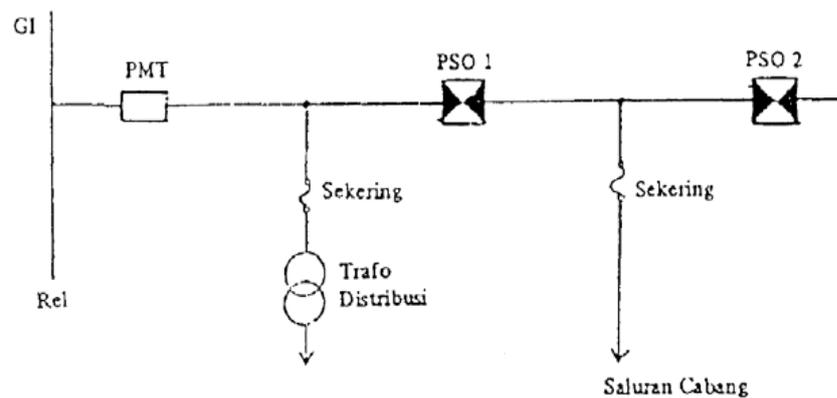


Gambar 2.1 SUTM radial dengan tiga pemisah seksi otomatis (PSO)



Gambar 2.2 SUTM dalam ring dengan lima pemisah seksi otomatis (PSO)

Pemisah Seksi Otomatis (PSO) dapat disetel normally open atau normally closed. PSO bekerja membuka atau menutup berdasarkan tegangan yang diterimanya, jadi pendindraannya (sensing) adalah atas dasar tegangan dan dapat disetel time delaynya (waktu tunda). Apabila disetel normally closed, PSO akan menutup apabila menerima tegangan setelah melalui time delay-nya. Sebaliknya apabila disetel normally open, PSO akan menutup setelah tegangan hilang untuk waktu yang melampaui time delay-nya.



Gambar 2.3 Penggunaan Sekering dalam Jaringan Tegangan Menengah

2.1.2 Jenis Pengaman yang Digunakan Pada Jaringan Tegangan Menengah⁵

a. Pengaman Lebur

Pengaman lebur (FCO) merupakan pengaman bagian dari saluran dan peralatan dari gangguan hubung singkat antara fasa, dapat pula sebagai pengaman

hubung singkat fasa ke tanah bagi system yang ditanahkan langsung.

Berdasarkan bentuk fisik pelebur dibedakan menjadi :

- Tertutup (enclosed)
- Terbuka (open)
- Elemen terbuka (open link)

Berdasarkan cara kerjanya dibedakan menjadi :

- Tipe expulsion
- Tipe limiting

Karakteristik fuse cut out mempunyai sepasang garis lengkung yang disebut karakteristik arus waktu lengkung yang berada di bawah disebut waktu lebur minimum (minimum melting time), lengkung diatas disebut waktu bebas maksimum (maximum clearing time). Ada dua tipe fuse cut out yaitu tipe cepat (K) dan tipe lambat (T). perbedaan kedua tipe ini terletak pada speed ratio-nya.

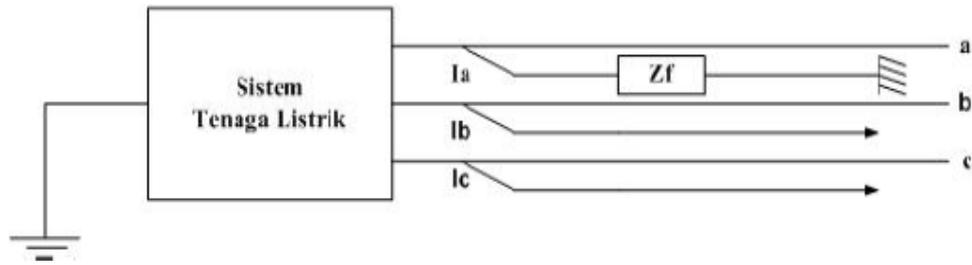
b. Relai Arus Lebih

Relai arus lebih merupakan pengaman utama sistem distribusi tegangan menengah terhadap gangguan hubung singkat antara fasa. Relai arus lebih adalah suatu relai yang berkerja berdasarkan adanya kenaikan arus yang melebihi nilai setting-nya pengaman tertentu dalam waktu tertentu. Berdasarkan karakteristik waktu relai arus lebih dibagi menjadi 3 yaitu⁵ :

- a) Tanpa penundaan waktu (instaneous)
- b) Dengan penundaan waktu
- c) Dengan penundaan waktu tertentu (definite time OCR)
- d) Dengan penundaan waktu berbanding terbalik (inverse time OCR)
- e) Kombinasi 1 dan 2

c. Relai Arus Gangguan Tanah

Relai arus gangguan tanah (ground fault relay) merupakan pengaman utama terhadap gangguan hubung singkat fasa ke tanah untuk sistem yang ditanahkan langsung atau melalui tahanan rendah.



Gambar 2.4 Gangguan Hubung Singkat 1 Fasa ke Tanah⁴

d. Relai Arus Gangguan Tanah Berarah

Relai arus gangguan tanah berarah (directional ground fault relay) adalah pengaman utama terhadap gangguan hubung singkat fasa ke tanah untuk sistem yang ditanahkan melalui tahanan tinggi.

e. Relai Penutup Balik

Relai penutup balik (reclosing relay) adalah pengaman pelengkap untuk membebaskan gangguan yang bersifat temporer untuk keandalan sistem.

f. Penutup Balik Otomatis

Penutup balik otomatis (PBO, automatic circuit recloser) digunakan sebagai pelengkap untuk pengaman terhadap gangguan temporer dan membatasi luas daerah yang padam akibat gangguan PBO menurut peredam busur apinya dibedakan menjadi 3 jenis, yaitu :

- a) Media minyak
- b) Vacuum
- c) SF6

PBO menurut peralatan pengendaliannya (control) dibedakan menjadi 2 jenis yaitu:

- a) PBO Hidraulik (control hidraulik)
- b) PBO teknologi Elektrik

g. Saklar Seksi Otomatis

Saklar seksi otomatis (SSO, Sectionalizer) adalah alat pemutus untuk mengurangi luar daerah yang padam karena gangguan. Ada dua jenis SSO yaitu dengan

pengindera arus yang disebut Automatic Sectionalizer dan pengindera tegangan yang disebut Automatic Vacuum Switch (AVS). Agar SSO berfungsi dengan baik, harus dikoordinasikan dengan PBO (recloser) yang ada di sisi hulu. Apabila SSO tidak di koordinasikan dengan PBO, SSO hanya akan berfungsi sebagai saklar biasa.

2.1.3 Sistem Pengaman Terhadap Arus Lebih Jaringan Tegangan Menengah²

Arus lebih adalah arus yang timbul karena terjadinya gangguan/hubungan singkat pada sistem/peralatan yang diamankan. Beban lebih adalah beban/arus yang melebihi nilai normalnya, yang untuk waktu tertentu dapat ditolerir adanya untuk kepentingan perusahaan, yang besar dan waktunya dibatasi oleh kemampuan alat/sistem JTM untuk menahannya. Arus lebih timbul disebabkan oleh hubungan singkat ini dapat terjadi karena terjadinya gangguan.

Pada SKTM, gangguan yang berasal dari dalam dapat disebabkan pemasangan yang kurang baik, penuaan, dan beban lebih. Sedangkan gangguan dari luar berupa berupa misalnya gangguan-gangguan mekanis karena perkerjaan galian saluran lain, kendaraan-kendaraan yang melewati di atasnya, dan deformasi tanah. Gangguan pada SKTM umumnya bersifat permanen. Pada SUTM, sebagian besar gangguan disebabkan pengaruh dari luar yaitu angin dan pohon, kegagalan pengaman tegangan lebih/petir, kegagalan atau kerusakan peralatan dan saluran (misalnya peralatan yang dipasang kurang baik, kawat putus pada konektor/lepas, dan sebagainya), manusia, hujan dan cuaca, binatang atau benda-benda asing (misalnya benang layang-layang dari bahan non isolasi, ular dan sebagainya), kegagalan atau kerusakan peralatan dan saluran (misalnya peralatan yang dipasang kurang baik, kawat putus pada konektor/lepas, dan sebagainya), manusia hujan dan cuaca, binatang atau benda-benda asing (misalnya benang layang-layang dari bahan non isolasi, ular dan sebagainya). Gangguan pada SUTM dapat dibagi dua, yaitu :

1. Gangguan sementara yang dapat hilang dengan sendirinya atau dengan memutuskan sementara bagian yang terganggu dari sumber tegangannya.

Gangguan sementara jika tidak dapat hilang dengan segera, baik hilang dengan sendirinya maupun karena bekerjanya alat pengaman (PBO) dapat berubah menjadi gangguan permanen (tetap) dan menyebabkan pemutusan tetap.

2. Gangguan permanen (tetap) di mana untuk membebaskannya diperlukan tindakan perbaikan dan atau menyingkirkan penyebab gangguan tersebut.

2.2 Sistem Pentanahan⁵

Gangguan fasa ke tanah sangat tergantung dari jenis pentanahan dan sistemnya, gangguan satu fasa umumnya bukan merupakan hubungan singkat secara metalik tetapi melalui tahanan gangguan, sehingga arus gangguan yang sudah dibatasi dengan adanya tahanan gangguan menjadi semakin kecil. Dengan demikian relai gangguan antara fasa tersebut diatas tidak berfungsi. Oleh karena itu dipasang relai gangguan tanah secara khusus dan disesuaikan dengan sistem pentanahannya sistem pentanahan dapat dikelompokkan dalam beberapa kelompok yaitu :

1. Sistem pentanahan mengambang.
2. Sistem pentanahan dengan tahanan tinggi.
3. Sistem pentanahan dengan tahanan rendah.
4. Sistem pentanahan langsung.
5. Sistem pentanahan titik netral tranformator.
6. Sistem pentanahan titik netral transmisi.
7. Sistem pentanahan switchyard.
8. Sistem pentanahan arrester.

2.3 Pentanahan Tegangan Menengah⁵

Menurut fungsi pentanahan, sistem pentanahan dapat dibedakan menjadi dua, yaitu :

- a. Pentanahan sistem (pentanahan netral)
- b. Pentanahan umum (pentanahan peralatan)

Pentanahan sistem berfungsi untuk :

- (1) Peralatan/saluran dari bahaya kerusakan yang diakibatkan gangguan fasa ke tanah.
- (2) Peralatan/saluran dari bahaya kerusakan yang diakibatkan tegangan lebih.
- (3) Makhluk hidup terhadap tegangan langkah (step voltage), serta untuk kebutuhan proteksi jaringan.

Sedangkan pentanahan umum berfungsi untuk melindungi :

- (1) Makhluk hidup terhadap tegangan sentuh, dan
- (2) Peralatan dari tegangan lebih.

Dengan pentanahan tersebut diperoleh arus gangguan tanah yang besarnya bergantung pada impedansi pentanahan sedemikian rupa sehingga alat-alat pengaman dapat bekerja selektif tetapi tidak merusak peralatan di titik gangguan.

Bagian yang diketanahkan adalah titik netral sisi TM trafo utama/gardu induk (pentanahan bertanahan) dan kawat netral sepanjang jaringan TM (pentanahan langsung). Ada tiga macam pentanahan pada JTM, yaitu:

- 1) Pentanahan netral dengan tahanan tinggi.

Pentanahan dengan tahanan tinggi dimaksudkan untuk memperoleh hasil optimum dengan mengutamakan keselamatan umum sehingga lebih layak memasuki daerah perkotaan dengan SUTM.

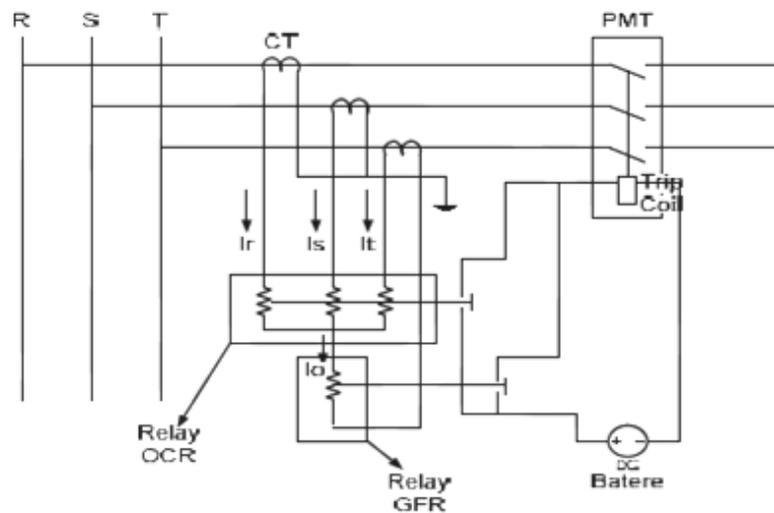
- 2) Pentanahan netral dengan tahanan rendah.

Pentanahan dengan tahanan rendah dimaksudkan untuk memperoleh hasil optimum dari kombinasi antara factor ekonomi, keselamatan umum dan yang layak untuk mempergunakan SUTM bagi daerah luar kota maupun SKTM bagi daerah kawat. Sistem pentanahan ini dapat mencegah terjadinya busur listrik yang menimbulkan tegangan lebih peralihan yang besar.

- 3) Pentanahan netral dengan pentanahan langsung.

Pentanahan secara langsung (tanpa tahanan) dimaksudkan untuk memperoleh hasil optimum dengan mengutamakan ekonomi sehingga dengan SUTM

- Trafo Arus yang terlalu jenuh.



Gambar 2.6 Rangkaian Pengawatan Relai Gangguan Tanah (GFR)

Penyetelan ground fault relay (GFR) biasanya dikoordinasikan dengan relai arus lebih (OCR). Koordinasi dilakukan dengan penyetelan arus tiap feeder dan incoming berdasarkan arus bebannya masing-masing dan penyetelan waktu kerja relai, dimana dengan relai inverse harus dengan menghitung arus gangguan di feeder. Arus gangguan dihitung dengan mengetahui⁴ :

- Short circuit di bus HV
- Impedansi, ratio trafo P.S
- Impedansi feeder

Didalam penyetelan relai gangguan tanah (GFR) perlu dilakukan beberapa perhitungan. Untuk mendapatkan setelan relai gangguan tanah (GFR) sesuai dengan yang diinginkan dan sesuai persyaratan peralatan pengaman dalam sistem pengaman.

Beberapa perhitungan yang akan dilakukan sebagai berikut :

1. Perhitungan impedansi sumber
2. Perhitungan reaktansi trafo tenaga
3. Perhitungan impedansi feeder 20 kv (penyulang)

4. Perhitungan impedansi ekivalen
5. Perhitungan arus gangguan satu fasa ke tanah
6. Perhitungan setting relai gangguan tanah (GFR) out going 20 kV

2.4.1 Perhitungan Impedansi Sumber⁵

Perhitungan impedansi sumber merupakan perhitungan impedansi dasar, ada 2 jenis perhitungan impedansi sumber yaitu :

- a. Perhitungan Impedansi Sumber untuk Sisi Primer (urutan nol).
- b. Perhitungan Impedansi Sumber untuk Sisi Sekunder (urutan positif dan negatif).

- Perhitungan impedansi sumber urutan nol dihitung dengan rumus :

$$Z_{S0} = \frac{KV_1^2}{MVA} \dots\dots\dots (2.1)$$

- Perhitungan impedansi sumber urutan positif dan negatif dihitung dengan rumus :

Daya di sisi primer = Daya di sisi sekunder

$$Z_{S1} = Z_{S2}$$

$$\frac{KV_1^2}{Z_{S0}} = \frac{KV_2^2}{Z_{S1}} \dots\dots\dots (2.2)$$

Dimana :

Z_{S0} = Impedansi sumber urutan nol (Ohm)

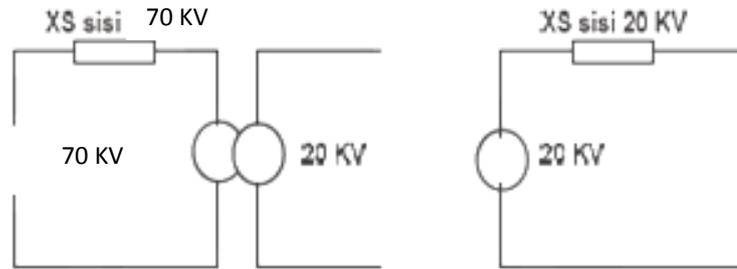
Z_{S1} = Impedansi sumber urutan positif (Ohm)

KV_1 = Tegangan sisi primer (kV)

KV_2 = Tegangan sisi sekunder (kV)

MVA = Daya (MVA)

Untuk perhitungan impedansi sumber untuk urutan nol tegangan sisi primer yang diambil adalah 70 kV dan pada urutan positif tegangan sisi sekunder yang diambil adalah 20 kV. Daya diambil berdasarkan short circuit pada level 70 kV Gardu Induk Boom Baru.



Gambar 2.7 Konversi Z_s dari 70 kV ke 20 kV

2.4.2 Perhitungan Reaktansi Trafo Tenaga (Daya)⁵

Perhitungan reaktansi trafo tenaga ada 2 jenis yaitu :

1. Perhitungan reaktansi trafo urutan positif dan negatif.

$$X_{T1} = X_{T2}$$

$$Z_B = \frac{KV^2}{MVA} \dots\dots\dots (2.3)$$

$$X_{T1} = 12,3\% \times Z_B \dots\dots\dots (2.4)$$

Pada perhitungan X_{T1} persentase perhitungan sesuai dengan persentase impedansi pada trafo 2, berdasarkan data Gardu Induk Boom Baru impedansi trafo 2 adalah sebesar 12,3 %.

2. Perhitungan reaktansi trafo urutan nol

Dalam perhitungan reaktansi trafo urutan nol trafo, kita harus memperhatikan ada tidaknya belitan. Dimana dengan memperhatikan belitan delta pada trafo maka dapat beberapa ketentuan dalam melakukan perhitungan reaktansi trafo urutan nol, yakni dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 2.1 Karakteristik Urutan Nol (Zero Sequence) dari Variasi Elemen pada Sistem Tenaga Listrik⁵

Elemen	Z_0
Trafo Tenaga: (dilihat dari sisi sekunder)	
• Tanpa pembumian	∞
• Yyn atau Zyn	10 s/d 15 X_1

<ul style="list-style-type: none"> • Ydyn • Dyn atau Ynyn • Dzn atau Yzn 	<p>3 X₁</p> <p>X₁</p> <p>0,1 s/d 0,2 X₁</p>
<p>Generator:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sinkron • Asinkron 	<p>0,5 Z₁</p> <p>0</p>
Jaringan	3 Z ₁

Dimana : X₁ = reaktansi urutan positif, Z₁ = impedansi urutan positif

Dengan memerhatikan ketentuan diatas, kita ketahui berdasarkan data gardu induk Boom Baru bahwa trafo tenaga dengan belitan YNyn, maka reaktansi trafo urutan nol gardu induk Boom Baru baru adalah sama dengan reaktansi urutan positif.

Dimana :

Z_B = Impedansi dasar trafo sebenarnya (100%) untuk sisi 20 kV (Ohm)

X_{T1} = Reaktansi trafo untuk urutan positif/urutan negatif (Ohm)

X_{TO} = Reaktansi trafo untuk urutan nol (Ohm)

2.4.3 Perhitungan Impedansi Feeder 20 kV (Penyulang)²

Impedansi feeder dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut :

$$Z_F = L \times Z/km \quad \dots\dots\dots (2.5)$$

Impedansi feeder (penyulang) diperoleh dari data jaringan yang dipergunakan dilapangan (ohm/km) kalau diketahui panjang jaringan maka impedansi ini dikalikan dengan panjang jaringan dan akan diperoleh Ohm. Karena pada pemilihan lokasi (%) berkisar antara 25 % s/d 100 % dari panjang jaringan, maka untuk memperoleh impedansi urutan positif dan urutan nol dihitung dengan cara sebagai berikut :

Ada 2 jenis perhitungan impedansi feeder 20 kV (penyulang) yaitu :

a. Perhitungan impedansi feeder urutan positif dan negatif.

$$Z_{F1} = lokasi (\%) \times L \times Z_1/ km \quad \dots\dots\dots (2.6)$$

b. Perhitungan impedansi feeder urutan nol.

$$Z_{F0} = \text{lokasi (\%)} \times L \times Z_0/\text{km} \quad \dots\dots\dots (2.7)$$

Dimana :

Z_{F1} = Impedansi feeder urutan positif (Ohm)

Z_{F0} = Impedansi feeder urutan nol (Ohm)

Lokasi = Titik penentuan berdasarkan panjang jaringan (%)

L = Panjang jaringan (km)

Z_1/km = Impedansi jaringan urutan positif (Ohm/km)

Z_0/km = Impedansi jaringan urutan negatif (Ohm/km)

2.4.4 Perhitungan Impedansi Ekivalen²

Impedansi feeder dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut :

$$Z_{eki} = Z_S + Z_T + Z_F \quad \dots\dots\dots (2.8)$$

Ada 2 jenis perhitungan impedansi ekivalen yaitu :

a. Perhitungan Impedansi Ekivalen Urutan Positif dan Urutan Negatif

Impendansi ekivalen urutan positif dan negatif diperoleh dari penjumlahan impendansi sumber urutan positif/negatif, impedansi trafo urutan positif/negatif dan impedansi feeder urutan positif/negatif. Maka untuk memperoleh impendansi ekivalen urutan positif/negatif, dihitung dengan menggunakan rumus :

Dasar hitungan :

$$Z_1 \text{ eki} = Z_2 \text{ eki}$$

$$Z_{T1} = j X_{T1}$$

$$Z_1 \text{ eki} = Z_{S1} + Z_{T1} + Z_1 \text{ feeder} \quad \dots\dots\dots (2.9)$$

b. Perhitungan Impedansi Ekivalen Urutan Nol

Impendansi ekivalen urutan nol diperoleh dari penjumlahan antara impendansi trafo urutan nol, nilai 3 Rx (tahanan netral) dan impedansi feeder urutan nol. Berdasarkan sistem pentanahan netral sistem pasokan gardu induk Boom Baru pentanahan tahanan 40 Ohm.

- Z_0 eki, dihitung : - mulai dari trafo yang ditanahkan
 - tanahan netral nilai $3 R_N$
 - impedansi feeder

Trafo di gardu induk Boom Baru memiliki belitan Yy , maka

$$X_{T0} = 10 \times X_{T1}$$

$$Z_{T0} = jX_{T0}$$

$$3 R_N = 3 \times 40$$

$$Z_0 \text{ feeder} = \text{Lokasi} \times \text{panjang } Z_0 \text{ total}$$

Perhitungan Z_0 ekuivalen

$$Z_0 \text{ eki} = Z_{T0} + 3 R_N + Z_0 \text{ feeder} \dots\dots\dots (2.10)$$

Dimana :

$$Z_1 \text{ eki} = \text{Impedansi ekuivalen urutan positif (Ohm)}$$

$$Z_0 \text{ eki} = \text{Impedansi ekuivalen urutan nol (Ohm)}$$

$$Z_{S1} = \text{Impedansi sumber urutan positif (Ohm)}$$

$$Z_{T1} = \text{Impedansi trafo urutan positif (Ohm)}$$

$$Z_{T0} = \text{Impedansi trafo urutan nol (Ohm)}$$

$$Z_1 \text{ feeder} = \text{Impedansi feeder urutan positif (Ohm)}$$

$$Z_0 \text{ feeder} = \text{Impedansi feeder urutan nol (Ohm)}$$

2.4.5 Perhitungan Arus Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah⁵

Perhitungan arus hubung singkat satu fasa ke tanah digunakan untuk keperluan menanggulangi penyetelan relai gangguan fasa ketanah. Rumus yang dipakai dalam perhitungan arus gangguan hubung singkat gangguan fasa ke tanah, pada jaringan tegangan menengah secara umum adalah sebagai berikut.

- Hubung singkat 1 fasa ke tanah

Impedansi Z_1 , Z_2 dan Z_0 yang dihitung adalah nilai ekuivalen mulai dari trafo di gardu induk sampai ketitik gangguan.

Perhitungan arus gangguan 1 fasa :

$$I_{1\phi} = \frac{3 \times E}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + Z_F} \dots\dots\dots (2.11)$$

Dimana :

$I_{1\phi}$ = Besar arus gangguan 1 fasa (dalam Ampere)

E = Besar tegangan fasa terhadap netral (dalam Volt)

Z_0 = Impedansi ekivalen urutan nol

Z_1 = Impedansi ekivalen urutan positif

Z_2 = Impedansi ekivalen urutan negatif

Z_F = Impedansi gangguan

2.4.6 Perhitungan Setting Relai⁵

Perhitungan setting relai, merupakan inti dari penyetelan relai gangguan tanah (GFR). Karena dari hasil perhitungan akan kita peroleh besar setelan arus relai baik pada sisi primer atau sekundernya dan juga akan diperoleh setelan waktunya. Perhitungan out going 20 kV dilakukan mulai dari relai paling hilir di feeder (penyulang) 20 kV. Untuk setting GFR diambil dari arus gangguan hubung singkat 1 fasa ke tanah yang terkecil pada 100% panjang jaringan (agar diperoleh kesesuaian antara Kuat Hantaran Arus (KHA) penghantar dan arus gangguan yang mengalirinya sehingga pengamanan lebih terjamin). Untuk mengantisipasi tahanan yang tinggi yang diakibatkan penghantar fasa bersentuhan dengan benda lain yang menimbulkan tahanan tinggi, yang akan menyebabkan arus gangguan hubung singkat menjadi kecil, maka arus setting primer dikalikan dengan konstanta 0,06 s/d 0,1 maka persamaan setelan arus pada sisi primer diperoleh berdasarkan hasil perhitungan 10% (0,1) dari arus gangguan satu fasa ke tanah (terkecil) dan setelan arus pada sisi sekundernya diperoleh berdasarkan hasil perhitungan setelan arus pada sisi primer yang berbanding terbalik pada terhadap ratio CT. Akan tetapi untuk setelan waktunya (tms) dihitung dengan menggunakan perhitungan menggunakan besar arus setelan pada sisi primernya dan waktu kerja berdasarkan setting dari relai pada feeder atau penyulang yang sudah ditentukan waktunya. Setting relai outgoing 20 kV dihitung berdasarkan

arus gangguan satu fasa ke tanah terkecil.

- Setelan arus (Primer) = 10% x I_{1 fasa (terkecil)} (2.12)

- Setelan arus (Sekunder) = Setelan arus (Primer) x $\frac{1}{Ratio CT}$ (2.13)

Penyetelan waktu dari relai gangguan tanah sama saja dengan relai arus lebih (OCR):

$$t = \frac{0,14}{I^{0,02} - 1} tms \quad \dots\dots\dots (2.14)$$

$$I = \frac{I_f}{I_s} \quad \dots\dots\dots (2.15)$$

Dimana :

- t = Waktu penyetelan (s)
- tms = Penyetelan waktu atau Time Multiple Setting
- I_f = Arus gangguan terkecil (A)
- I_s = Arus Penyetelan

- Setelan waktu Relai Gangguan Fasa Tanah (GFR) pada outgoing 20 kV

$$t = \frac{0,14 \times tms}{\left[\left(\frac{I_f}{I_s}\right)^{0,02} - 1\right]} \quad \dots\dots\dots (2.16)$$

$$tms = \frac{t \times \left[\left(\frac{I_f}{I_s}\right)^{0,02} - 1\right]}{0,14} \quad \dots\dots\dots (2.17)$$

Dimana :

- t = Waktu penyetelan (s)
- tms = Penyetelan waktu atau Time Multiple Setting
- I_f = Arus gangguan terkecil (A)
- I_s = Arus Penyetelan