

Koordinasi *Setting* Relai Jarak Pada Transmisi 150 kV PLTU 2 SULUT 2 x 25 MW

Nopransi Samuel, Hans Tumaliang, Lily S. Patras, Marthinus Pakiding.
Jurusan Teknik Elektro-FT, UNSRAT, Manado-95115, Email: nopransi@gmail.com.

Abstrak - Saat ini daerah Sulawesi Utara berkembang dengan cepat. Perkembangan ini harus diiringi dengan penambahan daya listrik yang ada pada sistem Minahasa. Oleh karena itu dibangun beberapa pusat pembangkit tenaga listrik salah satunya adalah PLTU 2 SULUT dengan kapasitas 2 x 25 MW. Agar suplai daya dari PLTU 2 SULUT tetap stabil, maka salah satu yang harus diperhatikan adalah proteksi pada saluran transmisi. Saluran transmisi yang terhubung dengan Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) 2 SULUT adalah Gardu Induk (GI) Lopana, kemudian dari Lopana terdapat beberapa cabang yaitu GI Kawangkoan dan *Gas Insulated Substation* (GIS) Teling.

Proteksi utama pada saluran transmisi adalah relai jarak. Agar tidak terjadi tumpang tindih (*Overlapping*) antara zona proteksi maka *setting* relai jarak perlu dikoordinasikan dengan zona proteksi relai jarak yang lain. Zona 1 relai jarak pada PLTU adalah saluran transmisi antara GI PLTU dan GI Lopana, Zona 2 adalah saluran transmisi antara GI Lopana dan GI Kawangkoan, dan Zona 3 adalah GI Kawangkoan dan GI Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) Lahendong I & II. Sedangkan untuk GIS Teling Zona 1 adalah antara GIS Teling dengan GI Lopana, Zona 2 adalah antara GI Lopana dan GI PLTU.

Dari hasil perhitungan *setting* relai jarak pada PLTU adalah sebagai berikut : Zona 1 = $2.984 \angle 79.303^0$ (Ohm), Zona 2 = $4.4220 \angle 79.3^0$ (Ohm), Zona 3 = $8.041 \angle 74.302$ (Ohm). untuk zona 1 dan zona 2 sesuai dengan kondisi lapangan, sedangkan untuk zona 3 tidak sama tapi perbedaannya hasil kecil. Sedangkan untuk GIS Teling diperoleh nilai *setting* sebagai berikut : Zona 1 = $7.209 \angle 74.621$ (Ohm), Zona 2 = $9.562 \angle 75.774^0$ (Ohm) dan Zona 3 = $10.739 \angle 76.162^0$ (Ohm).

Kata kunci : Proteksi , Relai, *Setting*, Transmisi.

I. PENDAHULUAN

Jaringan Transmisi memegang peranan penting dalam proses penyaluran daya listrik dari pusat pembangkit ke pusat beban. Oleh karena itu pengaman pada jaringan transmisi perlu mendapat perhatian yang serius dalam perencanaannya. Sistem transmisi sendiri merupakan sistem dinamis kompleks yang parameter-parameter dan keadaan sistemnya berubah secara terus menerus. Oleh karena itu strategi pengamanan harus disesuaikan dengan perubahan dinamis tersebut dalam hal desain dan *setting* peralatannya.

Sistem proteksi berfungsi untuk mengamankan peralatan listrik terhadap kemungkinan kerusakan akibat gangguan, melokalisasi daerah-daerah sistem yang terganggu sekecil mungkin, dan berusaha secepat mungkin untuk mengatasi daerah yang terganggu tersebut, sehingga stabilitas sistem dapat terpelihara serta untuk mengamankan manusia

terhadap bahaya yang ditimbulkan oleh listrik. Relai sebagai salah satu bagian penting dalam sistem pengamanan jaringan transmisi harus mempunyai kemampuan mendeteksi adanya gangguan pada semua keadaan yang kemudian memisahkan bagian sistem yang terganggu tersebut, sehingga dapat meminimalkan kerusakan pada bagian yang terganggu dan mencegah gangguan meluas ke jaringan lain yang tidak terganggu.

Saat ini daerah Sulawesi Utara berkembang pesat, ditandai dengan banyaknya pembangunan Pusat perbelanjaan, Hotel berbintang, Rumah Sakit, Pusat Industri serta pembangunan Kawasan perumahan, perkembangan ini harus diiringi dengan penambahan daya listrik yang ada di Sulawesi Utara (Sistem Minahasa), maka dibangun beberapa Pusat Pembangkit tenaga listrik diantaranya PLTP Lahendong dan PLTU 2 SULUT.

PLTU 2 SULUT adalah salah satu pusat pembangkit terbesar di Sulawesi Utara, Agar suplai daya dari PLTU 2 SULUT tetap stabil, maka salah satu yang harus diperhatikan adalah Proteksi Saluran Transmisi, berdasarkan pertimbangan inilah maka penulis membahas “Koordinasi *Setting* Relai Jarak pada Transmisi 150 kV PLTU 2 SULUT 2 x 25 MW”.

II. LANDASAN TEORI

A. Saluran Transmisi

Saluran transmisi adalah suatu sistem penyaluran energi listrik berskala besar dari pembangkit ke pusat-pusat beban. Pemakaian saluran transmisi didasarkan atas besarnya daya yang harus disalurkan dari pusat-pusat pembangkit ke pusat beban dengan jarak penyaluran yang cukup jauh antara pusat pembangkit dan pusat beban tersebut. Sistem Transmisi menyalurkan daya dengan tegangan tinggi yang digunakan untuk mengurangi adanya rugi-rugi transmisi akibat jatuh tegangan.

B. Impedansi Saluran

Pada perhitungan *setting* relai jarak, impedansi merupakan parameter pokok yang digunakan dalam perhitungan. Untuk menghitung impedansi (Z) saluran transmisi, terlebih dahulu kita menghitung resistansi saluran (R) dan reaktansi saluran.

C. Sistem Per Unit (p.u)

Sistem per unit (p.u) merupakan suatu cara perhitungan besaran pada sistem tenaga listrik dimana metode ini tidak menggunakan dimensi satuan listrik. metode ini menyatakan daya, arus, tegangan, impedansi dan sebagainya

dalam bentuk per unit (p.u). dengan sistem ini perhitungan besaran listrik menjadi lebih sederhana dan mudah diselesaikan. besaran per unit didefinisikan sebagai :

$$\text{Satuan per unit (pu)} = \frac{\text{Harga sebenarnya}}{\text{Harga dasar}} \quad (1)$$

Kadang-kadang impedansi per unit untuk suatu komponen sistem dinyatakan menurut dasar yang berbeda dengan dasar yang dipilih untuk bagian dari sistem dimana komponen tersebut berada. Karena semua impedansi dalam sistem harus dinyatakan dalam dasar impedansi yang sama, maka dalam perhitungan kita perlu mempunyai cara untuk dapat mengubah impedansi per unit dari suatu dasar ke dasar lain, dapat dituliskan sebagai berikut :

$$Z_{baru} (pu) = Z_{diberikan} (pu) \left(\frac{kV_{diberikan} \text{ dasar}}{kV_{baru} \text{ dasar}} \right)^2 \times \left(\frac{MVA_{baru} \text{ dasar}}{MVA_{diberikan} \text{ dasar}} \right) \quad (2)$$

D. Diagram Segaris

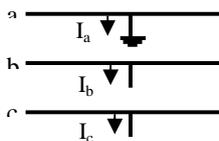
Pada umumnya sistem tenaga listrik digambarkan dalam diagram segaris. diagram segaris merupakan diagram dari suatu sistem tenaga listrik yang disederhanakan. dengan suatu garis tunggal dan lambang standar, diagram segaris menunjukkan saluran transmisi dan peralatan-peralatan yang berhubungan dari suatu sistem tenaga listrik. kegunaan dari sistem segaris adalah untuk memberikan keterangan-keterangan yang penting tentang sistem tenaga listrik dalam bentuk ringkas.

E. Gangguan Hubung Singkat (Short Circuit Fault)

Hubung singkat adalah terjadinya hubungan penghantar bertegangan atau penghantar tidak bertegangan secara langsung melalui media (resistor/beban) yang tidak semestinya sehingga terjadi aliran arus yang tidak normal (sangat besar). Hubung singkat merupakan jenis gangguan yang sering terjadi pada sistem tenaga listrik, terutama pada salura 3 fasa. Arus hubung singkat yang begitu besar sangat membahayakan peralatan, sehingga untuk mengamankan peralatan dari kerusakan akibat arus hubung singkat maka hubungan kelistrikan pada seksi yang terganggu perlu diputuskan dengan peralatan pemutus tenaga atau *Circuit Breaker* (CB). Perhitungan arus hubung singkat sangat penting untuk menentukan kemampuan pemutus tenaga dan untuk koordinasi pemasangan relai proteksi.

1. Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah

Gangguan satu fasa ke tanah merupakan jenis gangguan yang sering terjadi. Contoh gangguan satu fasa ke tanah adalah gangguan akibat adanya pohon yang menimpa salah satu fasa pada saluran transmisi tenaga listrik. Untuk gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah, batang hipotesis pada ketiga saluran dihubungkan seperti ditunjukkan pada gambar 1.



Gambar 1. Diagram Sambungan Batang-Batang Hipotesis untuk Gangguan Satu Fasa ke Tanah

Persamaan 3 digunakan untuk hubung singkat satu fasa ke tanah, dapat dituliskan sebagai berikut :

$$I_{a1} = \frac{V_f}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \quad (3)$$

Dimana :

V_f = Tegangan di titik gangguan sesaat sebelum terjadi gangguan.

Z_1 = Impedansi urutan positif dilihat dari titik gangguan.

Z_2 = Impedansi urutan negatif dilihat dari titik gangguan.

Z_0 = Impedansi urutan nol dilihat dari titik gangguan.

2. Hubung Singkat Dua Fasa

Gangguan dua fasa biasanya disebabkan oleh adanya kawat putus dan mengenai fasa lain. Untuk gangguan dua fasa, batang hipotesa ketiga saluran dalam gangguan tersambung ditunjukkan dalam gambar 2. Persamaan 4 digunakan untuk gangguan hubung singkat dua fasa, dapat dituliskan sebagai berikut :

$$I_{a1} = \frac{V_f}{Z_1 + Z_2} \quad (4)$$

Dimana :

V_f = Tegangan di titik gangguan sesaat sebelum terjadi gangguan.

Z_1 = Impedansi urutan positif dilihat dari titik gangguan.

Z_2 = Impedansi urutan negatif dilihat dari titik gangguan

3. Hubung Singkat 2 Fasa ke Tanah

Untuk gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah, batang disambungkan seperti ditunjukkan gambar 3. Persamaan 5 digunakan untuk gangguan hubung singkat dua fasa, dapat dituliskan sebagai berikut :

$$I_{a1} = \frac{V_f}{Z_1 + Z_2 \times Z_0 / (Z_2 + Z_0)} \quad (5)$$

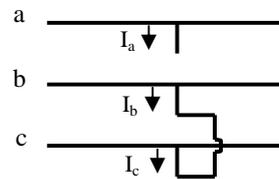
Dimana :

V_f = Tegangan di titik gangguan sesaat sebelum terjadi gangguan.

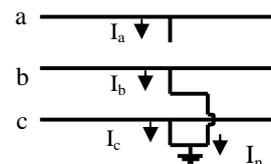
Z_1 = Impedansi urutan positif dilihat dari titik gangguan.

Z_2 = Impedansi urutan negatif dilihat dari titik gangguan.

Z_0 = Impedansi urutan nol dilihat dari titik gangguan.



Gambar 2. Diagram sambungan batang-batang hipotesis Untuk gangguan dua fasa



Gambar 3. Diagram Sambungan Batang-batang Hipotesis Untuk Gangguan Dua Fasa ke Tanah

F. Sistem Proteksi

Sistem proteksi tenaga listrik merupakan sistem pengamanan pada peralatan-peralatan yang terpasang pada sistem tenaga listrik, seperti generator, bus bar, transformator, saluran udara tegangan tinggi, saluran kabel bawah tanah, dan lain sebagainya terhadap kondisi abnormal operasi sistem tenaga listrik tersebut.

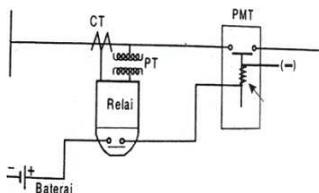
Fungsi sistem proteksi tenaga listrik adalah :

1. Mencegah kerusakan peralatan-peralatan kerusakan peralatan-peralatan pada sistem tenaga listrik akibat terjadinya gangguan atau kondisi operasi sistem yang tidak normal;
2. Mengurangi kerusakan peralatan-peralatan pada sistem tenaga listrik akibat terjadinya gangguan atau kondisi operasi sistem yang tidak normal;
3. Mempersempit daerah yang tidak terganggu sehingga gangguan tidak melebar pada sistem yang lebih luas;
4. Memberikan pelayanan tenaga listrik dengan keandalan dan mutu tinggi kepada konsumen;
5. Mengamankan manusia dari bahaya yang di timbulkan oleh tenaga listrik.

Pada sistem tenaga listrik, relai memegang peranan yang sangat vital. Proteksi berkualitas yang baik memerlukan relai proteksi yang baik juga. Untuk itu ada beberapa persyaratan yang harus dipenuhi oleh relai proteksi, antara lain :

1. Keterandalan (*Reliability*)
Pada kondisi normal atau tidak ada gangguan, mungkin selama berbulan-bulan atau lebih relai tidak bekerja. Seandainya suatu saat terjadi gangguan maka relai tidak boleh gagal bekerja dalam mengatasi gangguan tersebut.
2. Selektivitas (*Selectivity*)
Selektivitas berarti relai harus mempunyai daya beda (*discrimination*) terhadap bagian yang terganggu,
3. Sensitivitas (*Sensitivity*)
Relai harus mempunyai kepekaan yang tinggi terhadap besaran minimal (kritis) sebagaimana direncanakan.
4. Kecepatan Kerja
Relai proteksi harus dapat bekerja dengan cepat. Jika ada gangguan, misalnya isolasi bocor akibat adanya gangguan tegangan lebih terlalu lama sehingga peralatan listrik yang diamankan mengalami kerusakan.
5. Ekonomis.
Salah satu hal penting yang harus diperhatikan sebagai persyaratan relai proteksi adalah masalah harga atau biaya. Relai tidak akan diaplikasikan dalam sistem tenaga listrik, jika harganya sangat mahal.

Komponen sistem proteksi terdiri dari Transformator Arus (*Current Transformer*), Transformator Tenaga (*Potential Transformer*), Relai, Pemutus Tenaga (*Circuit Breaker*) dan Baterai. (lihat gambar 4).



Gambar 4. Komponen Sistem Proteksi

G. Relai Jarak

Prinsip kerja relai jarak berdasarkan pada impedansi saluran transmisi, yang besarnya sebanding dengan panjang dari saluran transmisi tersebut. Prinsip pengukuran jaraknya, dengan membandingkan arus gangguan yang dirasakan oleh relai terhadap tegangan di titik atau lokasi dimana relai terpasang. Dengan membandingkan kedua besaran itu, impedansi saluran transmisi dari lokasi relai sampai titik atau lokasi gangguan dapat diukur. Perhitungan impedansi dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 6, dapat dituliskan sebagai berikut:

$$Z_f = V_f / I_f \quad (6)$$

Dimana :

Z_f = Impedansi (ohm),

I_f = Arus Gangguan (Ampere),

V_f = Tegangan (Volt).

Dalam membuat setting, pertama-tama ditetapkan dahulu nilai impedansi di sistem tenaga (primer). Impedansi sekunder dihitung dengan persamaan 7 dapat :

$$Z_s = Z_p \frac{CTratio}{PTratio} \quad (7)$$

Dimana :

Z_s = Impedansi sekunder

Z_p = Impedansi primer

$CTratio$ = Rasio Transformator arus

$PTratio$ = Rasio Transformator tegangan

Pengaturan zona kerja relai jarak adalah sebagai berikut :

1. Zona 1

Dengan mempertimbangkan adanya kesalahan dari data saluran, transformator arus, transformator tegangan dan peralatan penunjang lainnya sebesar 10 % - 20%, maka zona 1 diatur 80 % dari panjang saluran yang diamankannya. Persamaan 8 digunakan untuk menghitung zona 1, dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\text{Zona 1} = 0.8 \times Z_{AB} \quad (8)$$

Dimana :

Z_{AB} = Impedansi saluran transmisi yang diamankan (ohm)

Waktu kerja relai seketika, ($t_1 = 0$) tidak dilakukan penyetelan waktu.

2. Zona 2

Zona 2 berfungsi sebagai pengaman cadangan seksi berikutnya, zona 2 memiliki waktu tunda (waktu kerja) = 0.4 - 0.8 detik). Persamaan 9,10 dan 11 digunakan untuk menghitung zona 2, dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\text{Zona 2min} = 1.2 \times Z_{AB} \quad (9)$$

$$\text{Zona 2maks} = 0.8(Z_{AB} + 0.8 \times Z_{BC}) \quad (10)$$

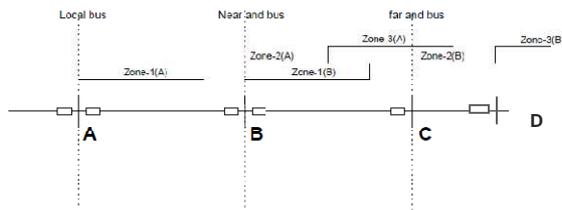
$$\text{Zona 2tr} = 0.8(Z_{AB} + 0.5 \times Z_{tr}) \quad (11)$$

Dimana :

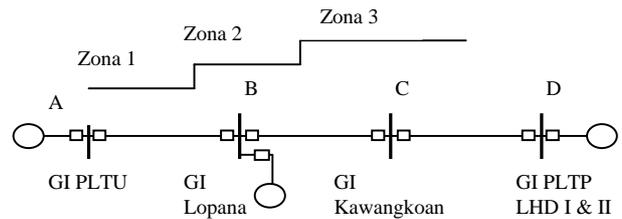
Z_{AB} = Impedansi saluran transmisi yang diamankan (ohm)

Z_{BC} = Impedansi saluran transmisi berikut yang terpendek (ohm)

Z_{tr} = Impedansi transformator (ohm).



Gambar 5. Zona Proteksi Relai Jarak



Gambar 6. Zona Proteksi Relai Jarak PLTU 2 SULUT

3. Zona 3

Zona 3 merupakan pengamanan cadangan jauh untuk saluran transmisi seksi berikutnya yang terpanjang. Waktu kerja dari zona 3 adalah 1.2-1.6 detik. Persamaan 12,13 dan 14 digunakan untuk menghitung zona 3, dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\text{Zona 3min} = 1.2 (Z_{AB} + Z_{CD}) \quad (12)$$

$$\text{Zona 3maks} = 0.8 (Z_{AB} + 1.2 \times Z_{BC}) \quad (13)$$

$$\text{Zona 2tr} = 0.8(Z_{AB} + 0.8xZ_{tr}) \quad (14)$$

Dimana :

Z_{AB} = Impedansi saluran transmisi yang diamankan (ohm)

Z_{BC} = Impedansi saluran transmisi berikut yang terpendek (ohm).

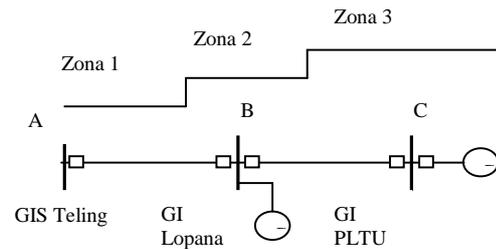
Z_{CD} = Impedansi saluran transmisi berikutnya yang terpanjang (ohm).

III. SISTEM PROTEKSI RELAI JARAK PADA PLTU 2 SULUT DAN GIS TELING

A. Gambaran Umum

Pembangkit listrik PLTU 2 SULUT terdiri dari dua unit pembangkit masing-masing berkapasitas 25 MW yang berada di kabupaten Minahasa Selatan. Seluruh daya yang dibangkitkan disalurkan melalui saluran transmisi tegangan tinggi 150 kV ke sistem Minahasa. Pada sistem proteksi GI PLTU 2 SULUT, relai jarak digunakan sebagai proteksi utama saluran transmisi dan sekaligus sebagai pengamanan cadangan untuk saluran transmisi berikutnya. Zona proteksi relai jarak pada PLTU 2 SULUT meliputi GI Lopana – GI Kawangkoan – GI PLTP Lahendong I dan 2. Zona 1 antara GI PLTU dengan GI Lopana, Zona 2 dipilih antara GI Lopana dan GI Kawangkoan karena merupakan saluran transmisi terpendek yang terhubung pada GI Lopana, dipilih saluran transmisi terpendek agar mendapatkan selektivitas yang baik, dan Zona 3 antara GI Kawangkoan dan GI lahendong karena satu-satunya saluran transmisi yang terhubung dengan GI Kawangkoan setelah GI Lopana.

GIS Teling merupakan salah satu gardu induk yang memiliki trafo daya dengan kapasitas daya yang besar yaitu 30 MVA, yang melayani daerah di sekitar kota Manado, namun belum beroperasi. GIS Teling hanya terhubung dengan GI Lopana. Sistem proteksi utama dari saluran transmisi GIS Teling adalah Relai jarak, dengan proteksi zona 1 antara GIS Teling dengan GI Lopana. Untuk proteksi zona 2 adalah menuju saluran transmisi GI PLTU, karena GI PLTU merupakan saluran transmisi terpendek yang ada pada GI Lopana sehingga dapat didapatkan selektivitas



Gambar 7. Zona Proteksi Relai Jarak GIS Teling

B. Prosedur Penelitian

- Mengumpulkan data-data, data-data yang diperlukan dalam analisa adalah sebagai berikut :
 - Single Line Sistem Minahasa terbaru
 - Data Impedansi transient (X_d'), tegangan dan kapasitas Generator;
 - Data Impedansi, Rasio tegangan dan Kapasitas Transformator ;
 - Data Impedansi dan panjang saluran transmisi;
 - Data Rasio CT dan PT
- Menganalisa arus hubung singkat

Tahap perhitungan arus hubung singkat adalah sebagai berikut :

 - Menentukan Zdasar, kV dasar dan MVA dasar.
 - Menghitung impedansi total saluran transmisi
 - Merubah besaran listrik kedalam bentuk per unit (p u)
 - Merubah diagram segaris menjadi diagram impedansi.
 - Menyederhanakan diagram impedansi untuk mendapatkan Z ekuivalen.
 - Menghitung arus hubung singkat.
- Menghitung nilai setting relai jarak

Tahap perhitungan nilai setting relai jarak adalah sebagai berikut :

 - Menghitung Rasio antara CT dan PT
 - Menghitung impedansi total saluran transmisi
 - Menghitung Impedansi Primer saluran transmisi
 - Menghitung nilai setting relai jarak
- Menentukan koordinasi relai jarak
- Melakukan penulisan berdasarkan penelitian yang telah dilakukan.

C. Data Teknis

Data dari saluran udara tegangan tinggi (SUTT), ditunjukkan pada tabel I.

TABEL I. DATA IMPEDANSI SUTT 150 kV

SUTT 150 kV	Panjang (km)	Impedansi Urutan Positif (Z) per km	Impedansi Urutan nol (Z ₀) per km
PLTU – GI Lopana	18.87	0.0442 + j 1.544	1.238 + j 9.793
GI Lopana – GI Kawangkoan	22.165	0.118 + j 0.492	0.491 + j 1.675
GI Kawangkoan - PLTP LHDG 1	9.95	0.118 + j 0.420	0.545 + j 1.639
GI Lopana – GIS Teling	38	0.118 + j 0.492	0.316 + j 1.675

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Menghitung Arus Hubung Singkat

Penyelesaian untuk perhitungan arus hubung singkat adalah sebagai berikut :

1. Gangguan Hubung Singkat 1 Fasa ke Tanah

Diketahui :

$$Z_1 = 0.021 + j 0.1380 \text{ (p.u.) ;}$$

$$Z_2 = 0.021 + j 0.1380 \text{ (p.u.) ;}$$

$$Z_0 = 0.0133 + j 0.1574 \text{ (p.u.) ;}$$

$$V_f = 1.0 \angle 0^\circ ;$$

$$I_{a1} = I_{a2} = I_{a0}$$

Penyelesaian menggunakan persamaan 3 diperoleh :

$$I_{a1} = \frac{1.0 \angle 0^\circ}{0.021 + j 0.1380 + 0.021 + j 0.1380 + 0.0133 + j 0.1574}$$

$$I_{a1} = \frac{1.0 \angle 0^\circ}{0.0553 + j 0.414} = \frac{1.0 \angle 0^\circ}{0.4177 \angle 82.3918^\circ}$$

$$I_{a1} = 2.3942 \angle -82.3918^\circ \text{ (p.u.)}$$

Dari hasil perhitungan diperoleh

$$I_{a1} = I_{a2} = I_{a0} = 2.3942 \angle -82.3918^\circ \text{ (p.u.)}$$

2. Gangguan Hubung Singkat 2 Fasa

Diketahui :

$$Z_1 = 0.021 + j 0.1380 \text{ (p.u.) ;}$$

$$Z_2 = 0.021 + j 0.1380 \text{ (p.u.) ;}$$

$$V_f = 1.0 \angle 0^\circ ;$$

$$I_{a1} = -I_{a2} ; I_{a0} = 0$$

Penyelesaian menggunakan persamaan 4 diperoleh :

$$I_{a1} = \frac{1.0 \angle 0^\circ}{0.021 + j 0.1380 + 0.021 + j 0.1380}$$

$$I_{a1} = \frac{1.0 \angle 0^\circ}{0.042 + j 0.276} = \frac{1.0 \angle 0^\circ}{0.2792 \angle 81.3475^\circ}$$

$$I_{a1} = 3.582 \angle -81.3475^\circ \text{ (p.u.)}$$

Dari hasil perhitungan diperoleh $I_{a1} = 3.582 \angle -81.3475^\circ \text{ (p.u.)}$,

$$I_{a2} = -3.582 \angle 81.3475^\circ \text{ (p.u.)}$$

3. Gangguan Hubung singkat 2 Fasa ke Tanah

$$Z_1 = 0.021 + j 0.1380 \text{ (p.u.) ;}$$

$$Z_2 = 0.021 + j 0.1380 \text{ (p.u.) ;}$$

$$Z_0 = 0.0133 + j 0.1574 \text{ (p.u.) ;}$$

$$V_f = 1.0 \angle 0^\circ ;$$

$$I_{a2} = -\left[\frac{Z_0}{Z_0 + Z_2} \right] I_{a1} ; I_{a0} = -\left[\frac{Z_2}{Z_0 + Z_2} \right] I_{a1}$$

Penyelesaian menggunakan persamaan 5.

$$I_{a1} = \frac{1.0 \angle 0^\circ}{(0.021 + j 0.1380 + (0.021 + j 0.1380 \times 0.0133 + j 0.1574)) (0.021 + j 0.1380 + 0.0133 + j 0.1574)}$$

$$I_{a1} = 2.3996 \angle -83.4412^\circ \text{ (p.u.)}$$

$$I_{a2} = -2.473 \angle -75.7436^\circ \text{ (p.u.)}$$

$$I_{a0} = -1.204 \angle 94.99^\circ \text{ (p.u.)}$$

B. Perhitungan Nilai Setting Relai Jarak Pada PLTU 2 SULUT

Perhitungan zona proteksi relai jarak adalah sebagai berikut :

1. Zona 1

Diketahui :

$$Z_{AB} = 0.684 + j 3.621 \text{ (Ohm)}$$

Penyelesaikan untuk zona 1 menggunakan persamaan 8 diperoleh :

$$\text{Zona 1} = 0.8 \times (0.684 + j 3.621) \text{ (Ohm)}$$

$$= 0.547 + j 2.897 = 2.984 \angle 79.303^\circ \text{ (Ohm)}$$

2. Zona 2

Diketahui :

$$Z_{AB} = 0.684 + j 3.621 \text{ (Ohm)}$$

$$Z_{BC} = 1.394 + j 5.068 \text{ (Ohm)}$$

$$Z_{tr} = 0 + j 71.116 \text{ (Ohm)}$$

Penyelesaikan untuk zona 2 menggunakan persamaan 9,10 dan 11 diperoleh :

$$\text{Zona 2min} = 1.2 \times (0.684 + j 3.621) \text{ (Ohm)}$$

$$= 0.8208 + j 4.3452 = 4.4220 \angle 79.3^\circ \text{ (Ohm)}$$

$$\text{Zona 2maks} = 0.8 (0.684 + j 3.621 + (0.8 \times (1.394 + j 5.068))) \text{ (Ohm)}$$

$$= 1.439 + j 6.140 = 6.307 \angle 76.807^\circ \text{ (Ohm)}$$

$$\text{Zona 2tr} = 0.8 (0.684 + j 3.621 + 0.5 \times (0 + j 71.116)) \text{ (Ohm)}$$

$$= 0.547 + j 31.343 = 31.348 \angle 89^\circ \text{ (Ohm)}$$

3. Zona 3

Diketahui :

$$Z_{AB} = 0.684 + j 3.621 \text{ (Ohm)}$$

$$Z_{BC} = 1.394 + j 5.068 \text{ (Ohm)}$$

$$Z_{CD} = 0.626 + 2.227 \text{ (Ohm)}$$

$$Z_{tr} = 0 + j 71.116 \text{ (Ohm)}$$

Penyelesaikan untuk zona 3 menggunakan persamaan 12,13 dan 14 diperoleh :

$$\text{Zona 3min} = 1.2 \times (0.684 + j 3.621 + 0.626 + 2.227) \text{ (Ohm)}$$

$$= 1.572 + j 7.018 = 6.1915 \angle 77.374^\circ \text{ (Ohm)}$$

$$\text{Zona 3maks} = 0.8 (0.684 + j 3.621 + 1.2 (1.394 + j 5.068)) \text{ (Ohm)}$$

$$= 1.885 + j 7.762 = 7.988 \angle 76.347^0 \text{ (Ohm)}$$

$$\begin{aligned} \text{Zona 3tr} &= 0.8 (0.684 + j 3.621 + 0.8 \times (0 + j 71.116)) \\ &\text{(Ohm)} \\ &= 0.5472 + j 48.411 = 48.141 \angle 89.352^0 \text{ (Ohm)} \end{aligned}$$

C. Perhitungan Nilai Setting Relai Jarak Pada Gis Teling

Perhitungan zona proteksi relai jarak adalah sebagai berikut :

1. Zona 1

Diketahui :

$$Z_{AB} = 2.390 + j 8.689 \text{ (Ohm)}$$

Penyelesaikan untuk zona 1 menggunakan persamaan 8 diperoleh :

$$\begin{aligned} \text{Zona 1} &= 0.8 \times (2.390 + j 8.689) \text{ (Ohm)} \\ &= 1.912 + j 6.951 = 7.209 \angle 74.621 \text{ (Ohm)} \end{aligned}$$

2. Zona 2

Diketahui :

$$Z_{AB} = 2.390 + j 8.689 \text{ (Ohm)}$$

$$Z_{BC} = 0.684 + j 3.621 \text{ (Ohm)}$$

$$Z_{tr} = 0 + j 71.116 \text{ (Ohm)}$$

Penyelesaikan untuk zona 2 menggunakan persamaan 9,10 dan 11 diperoleh :

$$\begin{aligned} \text{Zona 2min} &= 1.2 \times (2.390 + j 8.689) \text{ (Ohm)} \\ &= 2.868 + j 10.427 = 10.814 \angle 74.621^0 \text{ (Ohm)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Zona 2maks} &= 0.8 (2.390 + j 8.689 + (0.8 \times (0.684 + j 3.621))) \\ &\text{(Ohm)} \end{aligned}$$

$$= 2.349 + j 9.268 = 9.562 \angle 75.774^0 \text{ (Ohm)}$$

$$\begin{aligned} \text{Zona 2tr} &= 0.8 (2.390 + j 8.689 + 0.5 \times (0 + j 71.116)) \\ &\text{(Ohm)} \end{aligned}$$

$$= 1.9120 + j 35.398 = 35.449 \angle 86.908^0 \text{ (Ohm)}$$

3. Zona 3

Diketahui :

$$Z_{AB} = 2.390 + j 8.689 \text{ (Ohm)}$$

$$Z_{BC} = 0.684 + j 3.621 \text{ (Ohm)}$$

$$Z_{CD} = 0 + j 0 \text{ (Ohm)}$$

$$Z_{tr} = 0 + j 71.116 \text{ (Ohm)}$$

Penyelesaikan untuk zona 3 menggunakan persamaan 12,13 dan 14 diperoleh :

$$\begin{aligned} \text{Zona 3min} &= 1.2 \times (2.390 + j 8.689 + 0 + j 0) \text{ (Ohm)} \\ &= 2.868 + j 10.427 = 10.814 \angle 74.621 \text{ (Ohm)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Zona 3maks} &= 0.8 (2.390 + j 8.689 + 1.2 (0.684 + j 3.621)) \\ &\text{(Ohm)} \end{aligned}$$

$$= 2.569 + j 10.427 = 10.739 \angle 76.162^0 \text{ (Ohm)}$$

$$\begin{aligned} \text{Zona 3tr} &= 0.8 (2.390 + j 8.689 + 0.8 \times (0 + j 71.955)) \\ &\text{(Ohm)} \end{aligned}$$

$$= 1.920 + j 53.002 = 53.037 \angle 87.930 \text{ (Ohm)}$$

D. Koordinasi Setting Relai Jarak

Untuk koordinasi relai jarak yang perlu diperhatikan adalah zona proteksi relai jarak dan pengaturan waktu trip bila terjadi gangguan.

1. Koordinasi Setting Zona 1

Dengan mempertimbangkan kesalahan pengukuran

pada transformator arus dan tegangan maka koordinasi *setting* zona 1 adalah sebagai berikut :

- Relai Jarak PLTU 2 SULUT
Zona 1 = $0.547 + j 2.897 = 2.984 \angle 79.303^0$ (Ohm)
Waktu kerja Relai (T Zona 1) = 0 (detik) atau seketika.
- Relai Jarak GIS Teling
Zona 1 = $1.912 + j 6.951 = 7.209 \angle 74.621$ (Ohm)
Waktu kerja Relai (T Zona 1) = 0 (detik) atau seketika.

2. Koordinasi Setting Zona 2

Koordinasi *setting* zona 2 adalah sebagai berikut :

- Relai Jarak PLTU
Zona 2 = $0.8208 + j 4.3452 = 4.4220 \angle 79.3^0$ (Ohm)
Waktu kerja relai (T Zona 2) = 0.4 – 0.8 (detik)
- Relai Jarak GIS Teling
Zona 2 = $2.349 + j 9.268 = 9.562 \angle 75.774^0$ (Ohm)
Waktu kerja relai (T Zona 2) = 0.4 – 0.8 (detik)

3. Koordinasi Setting Zona 3

Koordinasi *setting* zona 3 adalah sebagai berikut :

- Relai Jarak PLTU
Zona 3 = $2.176 + j 7.741 = 8.041 \angle 74.302$ (Ohm)
Waktu kerja relai (T Zona 3) = 1.2 – 1.6 (detik)
- Relai Jarak GIS Teling
Zona 3 = $2.569 + j 10.427 = 10.739 \angle 76.162^0$ (Ohm)
Waktu kerja relai (T Zona 3) = 1.2 – 1.6 (detik)

V. KESIMPULAN

Dari hasil penelitian dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. *Setting* relai jarak GI PLTU 2 SULUT zona 1 dan zona 2 hasil perhitungan sudah sama dengan kondisi lapangan namun zona 3 berbeda tapi perbedaannya tidak terlalu jauh.
2. Jika terjadi Gangguan antara GI PLTU dan GI Lopana maka relai yang merasakannya yaitu zona 1 relai jarak PLTU sebagai pengaman utama dan zona 2 relai jarak GIS Teling sebagai pengaman cadangan
3. Hasil perhitungan untuk arus hubung singkat pada sistem yang di hitung adalah sebagai berikut :
 - Untuk Gangguan 1 Fasa ke tanah
 $I_{a1} = I_{a2} = I_{a0} = 2.3942 \angle -82.3918^0$ (p.u).
 - Untuk Gangguan 2 Fasa
 $I_{a1} = 3.582 \angle -81.3475$ (p.u).
 $I_{a2} = -3.582 \angle 81.3475$ (p.u).
 $I_{a0} = 0$
 - Untuk Gangguan 2 Fasa ke tanah
 $I_{a1} = 2.3996 \angle -83.4412^0$ (p.u).
 $I_{a2} = -2.473 \angle -75.744^0$ (p.u).
 $I_{a0} = -1.204 \angle 94.99^0$ (p.u).

DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. W. Stevenson, "Analisis Sistem Tenaga Listrik", Edisi keempat, Erlangga, Jakarta, 1990.

- [2] T. S. Hatauruk, "*Transmisi Daya Listrik*", Penerbit Erlangga, Jakarta, 1993.
- [3] G. Turan, "*Electric Power Transmission system Engineering*", California State University, Sacramento, California, 1987.
- [4] C. Wai-Kai, "*The Electric Engineering Handbook*", Elsevier Academic Press, California, 2004.
- [5] E. Supriyadi, "*Sistem Pengaman Tenaga Listrik*", Adicita Karya Nusantara, Yogyakarta, 1999.
- [6] J. L. Blackburn, "*Protective Relaying Principles and Application*". Taylor & Francis Group, New York, 2006.
- [7] -----, "*Network Protection and automation Guide*", Alstom, 2002.
- [8] -----, "*Pelatihan O&M Relai Proteksi Jaringan*", PT. PLN (Persero) P3B, 2006.
- [9] M. Russell., "*The Art and Science of Protective Relaying*", Wiley, Machingan, 1956.