

ANALISIS GANGGUAN HUBUNG SINGKAT PADA JARINGAN PEMAKAIAN SENDIRI PLTU BOLOK PT. SMSE (IPP) UNIT 3 DAN 4 MENGGUNAKAN SOFTWARE ETAP 12.6.0

Agusthinus S. Sampeallo¹, Nursalim², Patrisius J. Fischer³

^{1,2,3} Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Sains Dan Teknik, Universitas Nusa Cendana
Jl. Adisucipto Penfui-Kupang-NTT Telp (0380) 881557
Email : agustinus_sampeallo@yahoo.com
Email : nursalim@staf.undana.ac.id
Email : acikfischer@gmail.com

ABSTRACT

The Bolok Steam Power Plant (PLTU) has its own 6.3 kV use network to serve loads such as the Feed Water Pump and the Feed Circulating Pump. This self-use network is expected to be able to supply unit loads to PLTU Bolok without any disturbance. A disturbance such as a short circuit in the power system can cause problems such as damage to electrical equipment and the emergence of power outages. Therefore, this research aims to study the analysis of short circuit currents that will occur and reduce the effects. The method used is a short circuit fault current simulation with the help of ETAP 12.6.0 software. Based on the results of the research, it is known that the type of short circuit two-phase to the ground is the biggest type of fault, which is 10,615 kA on the bus generator. Then, for the smallest type of short circuit fault, the one-phase kind of responsibility to the ground is 3,967 kA on the OutGoing II bus. In addition, it shows that changes influence changes in the value of short circuit fault current in the number of operating loads. The more loads that work, the smaller the positive, and negative sequence impedance values and the greater the short circuit current value. While zero sequence impedance does not affect the number of operating loads, the reverse is also true.

Keywords: Short Circuit, Self-use network, Steam Power Plant, ETAP 12.6.0

ABSTRAK

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Bolok memiliki jaringan pemakaian sendiri 6.3 kV untuk melayani beban seperti pompa Feed Water Pump dan Feed circulating Pump. Jaringan pemakaian sendiri ini diharapkan dapat menyuplai beban-beban unit pada PLTU Bolok tanpa adanya gangguan. Adanya gangguan seperti hubung singkat dalam sistem tenaga listrik dapat menimbulkan masalah seperti rusaknya peralatan listrik dan timbulnya pemadaman listrik. Karenanya masalah yang timbul seperti ini dibutuhkan suatu studi analisis untuk mengetahui arus hubung singkat yang akan terjadi sekaligus mereduksi akibat yang ditimbulkan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui arus gangguan hubung singkat terbesar dengan bantuan software ETAP 12.6.0. Hasil simulasi hubung singkat dengan ETAP 12.6.0 akan dibandingkan dengan perhitungan secara manual berdasarkan nilai impedansi urutan positif, negatif dan nol dari titik lokasi gangguan. Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, diketahui bahwa jenis gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah merupakan jenis gangguan terbesar yaitu sebesar 10.615 kA pada bus generator. Sedangkan untuk jenis gangguan hubung singkat yang terkecil yaitu jenis gangguan satu fasa ke tanah yaitu sebesar 3.967 kA pada bus OutGoing II. Dari hasil simulasi yang dilakukan, juga dapat diketahui bahwa perubahan nilai arus gangguan hubung singkat dipengaruhi perubahan jumlah beban yang beroperasi. Semakin banyak beban yang beroperasi nilai impedansi urutan positif dan negatif semakin kecil dan nilai arus hubung singkat akan semakin besar, sedangkan impedansi urutan nol tidak berpengaruh terhadap jumlah beban yang beroperasi, begitupun dengan keadaan sebaliknya.

Kata kunci: Hubung Singkat, Jaringan Pemakaian Sendiri, PLTU, ETAP 12.6.0

1. PENDAHULUAN

Suatu sistem tenaga listrik sering dihadapkan dengan masalah gangguan yang dapat menyebabkan pasokan energi listrik terganggu. Gangguan hubung singkat merupakan salah satu jenis gangguan yang dapat menyebabkan penyaluran energi listrik terhambat. Gangguan hubung singkat biasanya disebabkan karena kerusakan bahan isolasi pada penghantar. Gangguan hubung singkat secara mekanik dapat menyebabkan

kerusakan pada sistem maupun pada peralatan elektronik, dan secara ekonomi dapat menyebabkan kegiatan produksi dan distribusi menurun atau terhenti [1]. Gangguan hubung singkat pada sistem tenaga listrik akan menyebabkan aliran arus menuju titik gangguan akan semakin besar. Besarnya arus listrik yang mengalir pada penghantar dapat merusak peralatan listrik jika tidak dilengkapi dengan sistem pengamanan yang baik dan benar, sehingga jenis gangguan ini

diperlukan suatu perencanaan yang khusus untuk dapat mengurangi risiko gangguan tersebut. Salah satu cara mengatasinya adalah dengan melakukan studi analisis arus gangguan hubung singkat [2-4]. Dengan demikian dapat diketahui nilai arus gangguan hubung singkat maksimum yang terjadi dalam sistem jaringan yang digunakan. Nilai arus hubung singkat ini dapat ditentukan untuk penentuan nilai *breaking capacity* pada *Circuit Breaker* (CB).

Pada sistem pembangkit tenaga listrik khususnya, Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Bolok mempunyai jaringan pemakaian sendiri untuk menyuplai beban-beban unit seperti *Feed Water Pump*, *Circulating Water Pump*, *Condenser Vacuum Pump* dan sebagainya. Peralatan ini sebagai pendukung dalam menjalankan pembangkitan daya listrik. Peralatan ini diharapkan dapat beroperasi tanpa adanya gangguan terutama gangguan pada jaringan kelistrikan unit. Dimana bila peralatan pendukung dari PLTU tidak beroperasi maka proses pembangkitan energi listrik akan menjadi terhambat, karena itu analisis arus gangguan hubung singkat yang terjadi akan sangat penting demi menjaga mutu dan keandalan sistem tenaga listrik.

Pada penelitian ini digunakan perangkat lunak *Electrical Transient Analysis Program* atau ETAP 12.6 sebagai alat bantu untuk simulasi besar arus gangguan hubung singkat dan perhitungan manual untuk membandingkan besar arus gangguan dengan hasil simulasi ETAP. Simulasi ini digunakan untuk memperoleh impedansi urutan nol, impedansi urutan positif, dan impedansi urutan negatif yang akan digunakan untuk menghitung arus gangguan hubung singkat secara manual

1.1 Klasifikasi Gangguan Dalam Sistem tenaga Listrik

A. Klasifikasi Gangguan Berdasarkan Lamanya Gangguan

1. Gangguan Permanen

Gangguan yang bersifat permanen dapat disebabkan oleh kerusakan peralatan, sehingga gangguan ini baru hilang setelah kerusakan ini diperbaiki atau karena ada sesuatu yang mengganggu secara permanen.

2. Gangguan Temporer

Merupakan gangguan yang terjadi dalam waktu yang singkat saja dimana kemudian sistem kembali dalam keadaan normal.

B. Klasifikasi Gangguan Berdasarkan Kesimetrisannya

Gangguan ini dapat dibedakan menjadi dua yaitu: gangguan bersifat simetri atau seimbang yang merupakan gangguan yang terjadi pada ketiga *phase* nya dan gangguan tidak simetris atau tidak seimbang berupa gangguan antar *phase*, dua *phase* ke tanah, dan satu *phase* ke tanah.

1.2 Gangguan Hubung singkat Pada Sistem Tenaga Listrik

Gangguan hubung singkat merupakan suatu kondisi pada sistem tenaga dimana penghantar yang berarus terhubung dengan penghantar lain atau dengan tanah. Gangguan hubung singkat dapat menimbulkan arus yang jauh lebih besar dari arus kondisi dimana sistem tenaga listrik dalam keadaan normal. Bila gangguan hubung singkat dibiarkan berlangsung dengan lama pada suatu sistem daya listrik, maka akan berpengaruh yang tidak diinginkan yang dapat terjadi: [2]

1. Berkurangnya batas-batas kestabilan untuk sistem daya suatu sistem tenaga listrik
2. Rusaknya perlengkapan yang berada dekat dengan gangguan yang disebabkan oleh arus tak seimbang, atau tegangan rendah yang ditimbulkan oleh hubung singkat
3. Ledakan-ledakan yang mungkin akan terjadi pada peralatan yang mengandung minyak isolasi sewaktu terjadi hubung singkat, dan yang mungkin menimbulkan kebakaran sehingga dapat membahayakan orang yang menanganinya dan merusak peralatan-peralatan yang lain.
4. Terpecahnya keseluruhan daerah pelayanan sistem daya tenaga listrik karena suatu rentetan tindakan pengamanan yang diambil oleh sistem pengamanan yang berbeda-beda, kejadian ini dikenal sebagai *cascading*.

Beberapa metode yang dapat digunakan untuk studi hubung singkat antara lain, metode matriks impedansi bus, metode matriks admitansi bus (kedua metode ini menggunakan teori komponen simetris) dan metode koordinat *phase*. Untuk gangguan tiga *phase* seimbang cenderung disederhanakan dengan pendekatan per *phase*. Diagram satu garis sederhana untuk menyelesaikan masalah gangguan tiga *phase* seimbang dengan metode komponen simetris adalah untuk memecahkan penyelesaian rangkaian tidak seimbang ke dalam sebuah rangkaian yang seimbang.

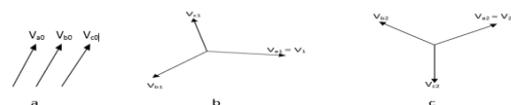
Prinsip dasar komponen simetris adalah, suatu kumpulan tiga hubungan vektor yang tidak seimbang, yang dapat diuraikan menjadi tiga set vektor yang seimbang. Ketiga set vektor yang seimbang itu biasa disebut dengan komponen urutan positif, komponen urutan negatif, dan komponen urutan nol [2,5].

Penggunaan komponen simetris pada sistem tiga *phase* memerlukan suatu satuan fasor atau operator yang akan memutar rotasi fasor dengan fasor lainnya yang berbeda *phase* 120°. Bila dipakai fasor operator satuan adalah *a*, maka:

$$a = -0.5 + j0.8666 \text{ dan } a^2 = -0.5 - j0.866$$

Fasor tiga *phase* tidak seimbang dari sistem tiga *phase* dapat dipecahkan ke dalam fasor tiga *phase* seimbang sebagai berikut: [2,5].

1. Komponen urutan positif, terdiri dari seperangkat komponen tiga *phase* seimbang dan mempunyai urutan *phase* yang sama dengan fasor-fasor aslinya.
2. Komponen urutan negatif, terdiri dari tiga fasor yang sama besarnya, terpisah satu dengan yang lainnya dalam *phase* sebesar 120°, dan mempunyai urutan *phase* yang berlawanan dengan fasor aslinya.
3. Komponen urutan nol, terdiri dari tiga *phasor* dengan magnitude yang sama besar dan pergeseran *phase* nya adalah nol



Gambar 1.1 Rangkaian (a) komponen urutan nol, (b) komponen urutan positif dan (c) komponen urutan negative.

Dalam menyelesaikan permasalahan gangguan hubung singkat dengan menggunakan aturan komponen simetris bahwa ketiga *phase* dari sistem dinyatakan sebagai a,b,c. Dengan cara demikian sehingga urutan *phase* tegangan dan arus dalam sistem adalah abc. Jadi, untuk urutan *phase* dari komponen urutan positif dari fasor tak seimbang adalah abc, sedangkan urutan *phase* dari komponen urutan negatif adalah acb. Jika fasor aslinya adalah tegangan, maka tegangan tersebut dapat dinyatakan dengan Va, Vb, dan Vc. Ketiga himpunan komponen simetris dinyatakan dengan subskrip tambahan 1 untuk komponen urutan positif, 2 untuk komponen urutan negatif, dan 0 untuk komponen urutan nol. Komponen urutan positif dari Va, Vb, dan Vc adalah Va1, Vb1, dan Vc1. Demikian pula, komponen urutan negatif adalah Va2, Vb2, dan Vc2, sedangkan komponen urutan nol adalah Va0, Vb0, dan Vc0 [6]. Gambar 2.2 menunjukkan tiga himpunan komponen simetris.

Komponen simetris arus tak seimbang:

$$I_{a0} = 1/3 (I_a + I_b + I_c)$$

$$I_{a1} = 1/3 (I_a + aI_b + a^2I_c)$$

$$I_{a2} = 1/3 (I_a + a^2I_b + aI_c)$$

Komponen simetris tegangan tak seimbang adalah:

$$V_{a0} = 1/3 (V_a + V_b + V_c)$$

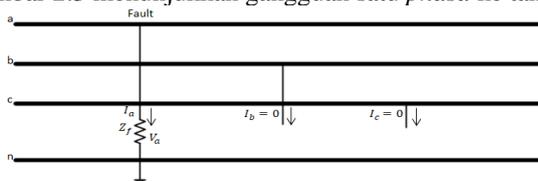
$$V_{a1} = 1/3 (V_a + aV_b + a^2V_c)$$

$$V_{a2} = 1/3 (V_a + a^2V_b + aV_c)$$

Gangguan yang sering terjadi pada sistem tenaga listrik merupakan gangguan tidak simetris sehingga memerlukan metode komponen simetris untuk menganalisa tegangan dan arus pada saat terjadinya gangguan. Gangguan yang terjadi dapat dianalisis dengan menghubungkan singkatkan semua sumber tegangan yang ada pada sistem dan mengganti titik (node) gangguan dengan sebuah sumber tegangan yang besarnya sama dengan tegangan sesaat sebelum terjadinya gangguan di titik gangguan tersebut. Dengan menggunakan metode ini sistem 3 *phase* tidak seimbang dapat direpresentasikan dengan menggunakan teori komponen simetris yaitu berdasarkan komponen urutan positif, komponen urutan negatif dan komponen urutan nol. Analisis gangguan hubung singkat diperlukan untuk mempelajari sistem tenaga listrik baik untuk keperluan perencanaan maupun setelah operasi.

1.2.1 Gangguan Hubung singkat Satu Phase ke Tanah

Gangguan satu *phase* ke tanah akan menyebabkan kenaikan arus pada *phase* terganggu dan tegangan menjadi nol, sedangkan arus pada *phase* lain menjadi nol yang diikuti dengan kenaikan tegangan pada *phase* yang lain. Untuk gangguan ini dianggap *phase a* mengalami gangguan. Gambar 2.3 menunjukkan gangguan satu *phase* ke tanah



Gambar 1.2 Gangguan hubung singkat 1 *phase* ke tanah

Gangguan satu *phase* ke tanah pada *phase a* pada Gambar 1.2 menyatakan bahwa:

$$I_b = I_c = 0$$

$$V_a = Z_f I_a$$

Persamaan dan diubah ke dalam urutan $I_{012} = A^{-1} I_{abc}$ sehingga diperoleh:

$$[I_0 I_1 I_2] = \frac{1}{3} [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ a \ a^2 \ 1 \ a^2 \ a] = \frac{1}{3} [I_a \ I_a \ I_a]$$

Sehingga diperoleh:

$$I_{a0} = I_{a1} = I_{a2} = \frac{1}{3} I_a$$

Sehingga diperoleh:

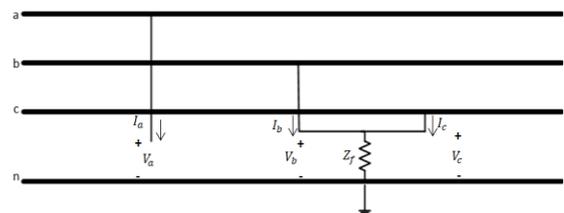
$$I_0 = I_1 = I_2 = I_f = \frac{V_f}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + (3Z_f)}$$

Untuk gangguan hubung singkat satu *phase* ke tanah yang tidak melalui suatu impedansi Z_f , dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$I_{a0} = I_{a1} = I_{a2} = \frac{V_f}{Z_0 + Z_1 + Z_2}$$

1.2.2 Gangguan Hubung Singkat Dua Phase ke Tanah

Pada umumnya, gangguan hubung singkat dua *phase* ke tanah pada sistem distribusi terjadi saat dua penghantar mengalami gangguan dan terhubung ke tanah atau dua penghantar terhubung ke netral dari sistem pentanahan tiga *phase*.



Gambar 1.3 Gangguan Dua *Phase* ke Tanah

Pada gambar 1.3, menunjukkan bahwa gangguan yang terjadi pada sistem tenaga tiga *phase* antara *phase b* dan *c* ke tanah melalui suatu impedansi gangguan Z_f , menyatakan bahwa:

$$I_a = 0$$

$$V_c = V_b$$

$$V_b = Z_f(I_b + I_c)$$

Sehingga untuk perhitungan gangguan dua *phase* ke tanah dapat dirumuskan dengan:

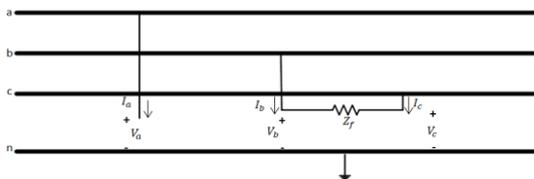
$$I_1 = I_f = \frac{V_f}{Z_1 + [Z_2 / (Z_0 + 3Z_f)]}$$

$$= \frac{(V_f)}{Z_1 + \left[\frac{Z_2(Z_0 + 3Z_f)}{Z_2 + Z_0 + 3Z_f} \right]}$$

1.2.3 Gangguan Hubung Singkat Dua Phase

Gangguan dua *phase* adalah gangguan yang terjadi dari penyebab putusnya kawat *phase* tengah pada transmisi atau distribusi dengan konfigurasi tersusun vertikal. Kemungkinan lain adalah dari penyebab kerusakan isolator di transmisi atau distribusi sekaligus dua *phase*. Atau bisa juga akibat back flashover antara tiang dan dua kawat *phase* sekaligus sewaktu tiang transmisi atau distribusi yang mempunyai tahanan kaki tiang yang tinggi tersambar petir, dan lain-lain.

Perhitungan arus gangguan untuk suatu hubung singkat *phase* ke *phase* pada sistem tenaga sama halnya dengan hubung singkat tiga *phase* dan hubung singkat satu *phase* ke tanah, dimana digunakan asumsi-asumsi untuk penyederhanaan perhitungan [5].



Gambar 1.4 Gangguan Hubung Singkat 2 Phase pada Sistem Tenaga

Pada gambar 1.4 menunjukkan gangguan antar *phase* pada suatu sistem tenaga tiga *phase*, dimana gangguannya terjadi melalui suatu impedansi gangguan Z_f . Jika gangguannya tidak melalui suatu impedansi gangguan Z_f , maka persamaan arus gangguan sama seperti persamaan berikut:

$$I = \frac{E_a}{Z_1 + Z_2}$$

Gangguan *phase* ke *phase* dari *phase* b ke c pada gambar 2.5 menyatakan:

$$\begin{aligned} I_a &= 0 \\ I_c &= -I_b \\ V_b - V_c &= Z_f I_b \end{aligned}$$

Arus *phase* dalam domain urutan $I_{012} = A^{-1} I_{abc}$ yaitu:

$$[I_0 \ I_1 \ I_2] = \frac{1}{3} [1 \ 1 \ 1 \ a \ a^2 \ a] [0 \ (a - a^2)I_b \ (a - a)I_b]$$

Sehingga diperoleh I_0, I_1, I_2 yang dapat ditulis sebagai berikut:

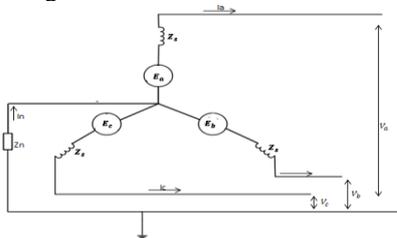
$$I_0 = 0 \text{ dan } I_1 = -I_2$$

Sehingga arus gangguan:

$$I_1 = -I_2 = I_f = \frac{V_{ff}}{Z_1 + Z_2 + Z_f}$$

1.2.4 Gangguan Hubung Singkat Tiga Phase

Gangguan hubung singkat tiga *phase* termasuk dalam klasifikasi gangguan simetris, dimana arus maupun tegangan setiap *phase* nya tetap seimbang setelah gangguan terjadi. Sehingga pada sistem seperti ini dapat dianalisis hanya dengan menggunakan urutan positif saja. Tipe gangguan ini sangat jarang terjadi, tetapi merupakan tipe gangguan yang paling parah karena pada setiap saluran arus gangguan sama besarnya. Gambar 1.5, menunjukkan generator sinkron tiga *phase* dengan netral ditanahkan melalui impedansi Z_n Generator mensuplai beban tiga *phase* seimbang.



Gambar 1.5 Gangguan Hubung Singkat 3 Phase

Mesin sinkron membangkitkan tegangan internal tiga *phase* dan direpresentasikan sebagai kelompok fasor urutan positif berikut:

$$E_{abc} = [1 \ a^2 \ a] E_a$$

Dimana: $a = 1 < 120^\circ = e^{j 120^\circ}$; $a^2 = 1 < 240^\circ = e^{j 240^\circ}$

Mesin mensuplai beban seimbang tiga *phase*. Penerapan hukum Kirchoff untuk tegangan pada setiap *phase* menghasilkan: $V_a = E_a - Z_s I_a - Z_n I_n$

$$V_b = E_b - Z_s I_b - Z_n I_n$$

$$V_c = E_c - Z_s I_c - Z_n I_n$$

Sehingga

$$[V_a \ V_b \ V_c] = [E_a \ E_b \ E_c] - [Z_s + Z_n \ Z_n \ Z_n \ Z_n \ Z_s + Z_n \ Z_n \ Z_n \ Z_n \ Z_s + Z_n] [I_a \ I_b \ I_c]$$

$$V_{a0} = 0 - Z_0 I_{a0}$$

$$V_{a1} = E_a - Z_1 I_{a1}$$

$$V_{a2} = 0 - Z_2 I_{a2}$$

Maka arus pada saluran :

$$I_a = \frac{E_a}{Z_n}$$

1.3 Pemutus Daya

Kemampuan arus suatu pemutus daya dinyatakan dalam dua besaran, yaitu kemampuan pemutusan arus (*interrupting duty*) dan kemampuan arus sesaat (*momentary duty*) [7].

- Kemampuan pemutusan arus, yaitu harga efektif arus hubung singkat simetri tertinggi yang dapat diputuskan pemutus daya tanpa menimbulkan kerusakan pada kontak pemutus daya.
- Kemampuan arus sesaat, yaitu harga efektif arus hubung singkat simetri tertinggi yang dapat dipikul pemutus daya tanpa menimbulkan kerusakan pada pemutus daya.

Kedua kemampuan arus di atas ditetapkan dengan menghitung terlebih dulu harga efektif arus hubung singkat simetri (I''_s) dan asimetri (I''_{hs}), dimana dalam perhitungan kedua arus ini reaktansi mesin-mesin dinyatakan seperti pada tabel 2.1 berikut.

Tabel 2.1 Reaktansi mesin listrik untuk perhitungan arus hubung singkat

Jenis Mesin Listrik	Reaktansi (%)		
	X''_d	X'_d	X_d
Turbogenerator	9 - 22	14 - 35	140-300
Generator <i>salient pole</i> dengan kumparan peredam	12 - 30	20 - 45	80 - 180
Generator <i>salient pole</i> tanpa kumparan peredam	20 - 40	20 - 40	80 - 180
Motor sinkron berkecepatan tinggi	15	25	80
Motor sinkron berkecepatan rendah	35	50	100
Motor kompensasi	25	40	160

Secara umum, kemampuan arus sesaat dapat dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut:

$$I_m = 1.6 \times I''_{hs}$$

Sedangkan untuk tegangan dibawah 0.5 kV, adalah:

$$I_m = 1.5 \times I''_{hs}$$

Kapasitas daya sesaat pemutus daya adalah:

$$S_m = \sqrt{3} V_{pf} \times I_m$$

Dimana:

V_{pf} = Tegangan *phase* ke *phase* sistem sebelum terhubung singkat

2. METODE PENELITIAN

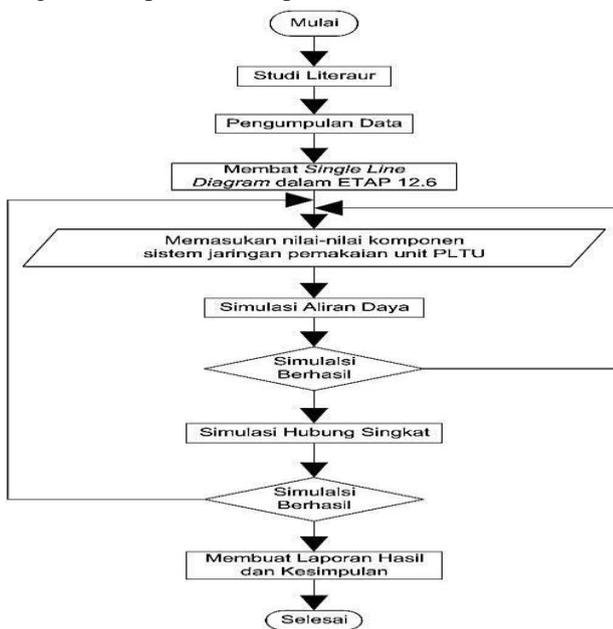
Metode yang akan digunakan dalam penelitian ini:

- Tahap Studi Literatur

Melakukan kajian secara teori yang berkaitan dengan penelitian ini, berupa buku, jurnal, dan karya ilmiah yang berkaitan dengan topik masalah yang akan dibahas khususnya analisis besar arus gangguan hubung singkat pada sistem tenaga listrik

- b. Tahap Studi Lapangan/survei
Tahap survei lapangan dimaksud untuk pengenalan sistem jaringan yang digunakan serta pengambilan data yang akan digunakan dalam penyusunan penelitian ini.
- c. Tahap Pengolahan Data
Data yang diperoleh akan disimulasikan dengan bantuan aplikasi ETAP 12.6.0 untuk membantu dalam analisis besar arus gangguan yang terjadi ketika mengalami gangguan hubung singkat. Analisis yang diperoleh akan ditampilkan melalui lembar report manager dari aplikasi ETAP 12.6.0 kemudian diambil suatu kesimpulan hasil dari report manager untuk kasus gangguan hubung singkat.

Diagram alur penelitian dapat dilihat 2.1



Gambar 2.1 Diagram alur penelitian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

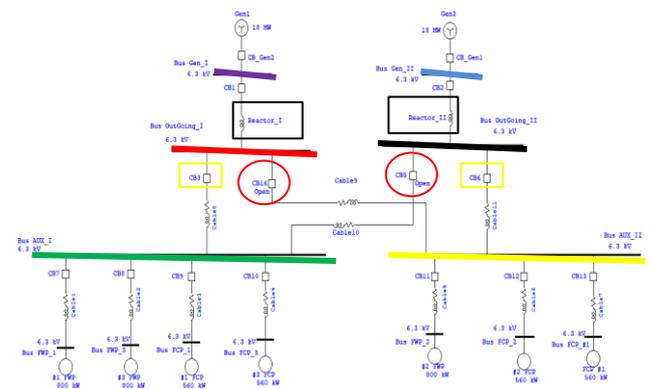
Pada analisis penelitian skripsi ini, akan disimulasikan besar arus gangguan hubung singkat tiga *phasa*, dua *phasa*, dua *phasa* ke tanah, dan satu *phase* ke tanah dengan bantuan *software* ETAP 12.6.0, serta akan dibandingkan dengan perhitungan secara manual berdasarkan nilai impedansi urutan positif, negatif, dan nol pada lokasi titik gangguan yang sama hasil dari simulasi *software* ETAP 12.6.0. Simulasi besar arus gangguan hubung singkat ini merupakan pada sistem jaringan pemakaian sendiri (6.3 kV) untuk pemakaian pompa pada sistem PLTU Bolok (IPP) 2x18 MW, PT SMSE.

Dalam simulasi besar arus gangguan hubung singkat dengan bantuan *software* ETAP 12.6.0 digunakan standar ANSI/IEC dan frekuensi yang digunakan adalah 50 Hz. Simulasi hubung singkat ini akan dilakukan dengan tiga kondisi yaitu saat sistem jaringan distribusi pemakaian sendiri PLTU Bolok dilayani oleh dua pembangkit (generator I dan II melayani masing-masing beban pada bus

AUX I dan II), saat sistem dilayani oleh satu generator (asumsi generator II tidak beroperasi), dan saat sistem dilayani oleh generator II (generator I tidak beroperasi). Tujuan dilakukan simulasi hubung singkat dengan tiga kondisi yaitu untuk memperoleh nilai hubung singkat tertinggi yang akan terjadi pada sistem jaringan distribusi 6.3 kV untuk pemakaian pompa pada PLTU Bolok unit pembangkit 3 dan 4. Sehingga nilai hubung singkat yang diperoleh dari hasil simulasi dengan ETAP 12.6.0 dapat digunakan untuk penentuan nilai *breaking capacity* suatu pengamanan berupa *Circuit breaker* (CB).

3.1 Sistem Jaringan Distribusi 6.3 kV Pada PLTU Bolok PT. SMSE

Pada sistem jaringan distribusi pada PLTU Bolok unit pembangkit 3 dan 4 menggunakan sistem jaringan dengan tegangan operasi sistem yaitu 6.3 kV untuk keperluan mesin pompa seperti *Feed Water Pump* (FWP) dan *Feed Circulating Pump* (FCP). Sistem jaringan distribusi 6.3 kV yang digunakan dalam gambar 3.1 merupakan sistem *interlock*. Sistem *interlock* yang digunakan pada sistem jaringan listrik itu hanya membolehkan satu pembangkit yang melayani satu busbar beban. Hal ini dapat dilihat dalam gambar 3.1 yaitu kondisi dimana masing-masing generator melayani beban pada masing-masing bus bar beban. Dimana beban pada busbar AUX I (busbar warna hijau) dilayani oleh generator I sedangkan untuk beban pada busbar AUX II (busbar warna kuning) dilayani oleh generator II. Keadaan ini bisa dilihat pada gambar 3.1 dengan kondisi CB (lingkaran warna merah) dalam keadaan terbuka. Pada sistem *interlock* pada gambar 3.1 bila generator I mengalami gangguan maka semua beban akan dilayani oleh generator II dengan CB pada bus *Outgoing I* (warna merah) harus dalam keadaan terbuka sedangkan CB pada busbar *Outgoing II* (warna hitam) dalam keadaan tertutup, begitupun dengan keadaan sebaliknya.



Gambar 3.1 Jaringan distribusi 6.3 kV PLTU Bolok unit 3 dan 4

Dalam gambar 3.1 merupakan sistem jaringan pemakaian sendiri (6.3 kV) PLTU Bolok, Kupang, NTT. Dimana dalam gambar 3.1 CB ditandai lingkaran warna merah dalam keadaan terbuka. Dalam simulasi ini masing generator melayani beban pada bus AUX I (*warna hijau*) dan AUX II (*warna kuning*) melalui CB yang ditandai kotak warna kuning.

3.2 Klasifikasi Jaringan PS PLTU Bolok

Pada sistem PLTU Bolok terdapat 2 buah generator dengan daya yang dihasilkan masing-masing generator sebesar 18 MW dan tegangan yang dibangkitkan sebesar 6.3 kV, lalu masuk ke *step up transformer* 6.3/70 kV untuk melayani beban sistem Timor (Kupang-Atambua). Pada pusat PLTU sendiri terdapat jaringan distribusi 6.3 kV untuk melayani beban pemakaian sendiri. Beban yang digunakan umumnya merupakan beban motor atau beban dinamis Tabel 3.1 merupakan data spesifikasi peralatan pada jaringan distribusi PS PLTU Bolok.

Tabel 3.1Spesifikasi peralatan

Data Generator			
Data generator	Type QW-12-2	Hambatan Impedansi	
Rate Power	18 MW	Sub transient X''_d	26.4 %
Rate Voltage	6300 V	Inverse X_s	22.2 %
Rate Current	2062	Zero X_0	11.1 %
Power Factor	0.80		
Frequency	50 Hz		
Rate Speed	3000 r/min		
Connection	Wye		
Data Current Limiting Reactor			
Rate Voltage	6 kV	Positive	0.3 %
Rate Ampere	800 A	Zero	0.3 %
		X/R	30 %
		Tolerance	4 %
Data Beban (Induction Motor)			
Motor Feed Circulating Pump (FCP)		Motor Feed Water Pump (FWP)	
Rate Power	560 kW	Rate Power	800 Kw
Rate Voltage	6.3 kV	Rate Voltage	6.3 kV
Cos Phi	0.90 %	Cos Phi	0.90 %
Speed	3000 rpm	Speed	3000 rpm

Dalam tabel 3.1 terdapat spesifikasi *current limiting reactor* yang berfungsi untuk menurunkan arus gangguan hubung singkat.

3.3 Simulasi Aliran Daya dengan ETAP 12.6

Simulasi aliran daya yang dilakukan bertujuan untuk mengetahui besarnya daya yang mengalir dalam sistem jaringan PS (6.3 kV) pada PLTU Bolok. Tabel 3.2 merupakan hasil aliran daya yang mengalir dalam sistem jaringan PS PLTU Bolok.

Tabel 3.2Hasil simulasi aliran daya ETAP 12.6

No	Dari Bus	Ke Bus	Aliran Daya			% Faktor Daya
			MW	mVAR	Amp	
1	Bus AUX_I	Bus FWP_1	0.839	0.347	84.1	92.4
		Bus FWP_3	0.839	0.347	84.1	92.4
		Bus FCP_1	0.589	0.247	59.1	92.2
		Bus FCP_3	0.589	0.247	59.1	92.2
		Bus Outgoing_I	-2.856	-1.188	286.5	92.3
2	Bus AUX_II	Bus FWP_2	0.839	0.347	84.1	92.4
		Bus FCP_2	0.589	0.247	59.1	92.2
		Bus FCP_#1	0.589	0.247	59.1	92.2
		Bus Outgoing_II	-2.017	-0.840	201.7	92.3
3	Bus Gen_I	Bus Outgoing_I	2.859	1.265	286.5	91.5
4	Bus Gen_II	Bus Outgoing_II	2.018	0.879	201.7	91.7
5	Bus Outgoing_I	Bus AUX_I	2.856	1.188	286.5	92.3
		Bus Gen_I	-2.856	-1.188	286.5	92.3
6	Bus Outgoing_II	Bus AUX_II	2.017	0.840	201.7	92.3
		Bus Gen_II	-2.017	-0.840	201.7	92.3

Dalam tabel 3.2, untuk nomor 1 dan 2 merupakan aliran daya dari Bus AUX_I dan Bus AUX_II menuju masing-masing beban (dari Bus AUX_I menuju ke Bus FWP_1, Bus FWP_3, Bus FCP_1, bus FCP_3 dan bus Outgoing_1) dan (dari Bus AUX_II menuju ke bus FWP_2, bus FCP_2 serta menuju bus Outgoing_II). Untuk nomor 3 dan 4 dalam tabel 4.2, dapat diketahui aliran dari masing-masing Bus

Gen I dan Bus Gen II menuju ke Bus Outgoing I dan menuju ke bus *Outgoing* II. Sedangkan untuk nomor 5 dan 6 merupakan aliran daya dari bus Outgoing I menuju ke Bus AUX_I dan menuju ke Bus Gen I, serta aliran daya dari bus Outgoing II menuju ke Bus AUX_II dan menuju ke Bus Gen II.

3.4 Analisis Hubung Singkat

Dalam analisis hubung singkat ini akan dibantu dengan bantuan *software* ETAP 12.6.0, serta akan dihitung secara manual untuk melihat selisih nilai antara hasil simulasi ETAP dengan perhitungan secara manual. Simulasi hubung singkat yang akan dilakukan saat kondisi semua generator beroperasi (simulasi pada tiga bus yaitu Bus generator I, Bus *Outgoing* II dan Bus AUX_I) maupun saat salah satu generator tidak beroperasi. pada tiga bus yang berbeda yaitu: bus generator I, Bus *Outgoing* II dan Bus *Auxiliary* I. Nilai hasil simulasi yang diperoleh memiliki nilai yang berbeda tergantung dari banyaknya beban yang beroperasi.

3.4.1 Simulasi Hubung Singkat Saat Salah Satu Generator Tidak Beroperasi (Generator I Beroperasi)

Simulasi hubung singkat ini, dilakukan pada empat bus berbeda, yaitu: Bus Generator I, Bus *Outgoing* I, Bus *Auxiliary* I, dan Bus *Auxiliary* II. Tujuan dilakukan simulasi hubung singkat ini yaitu untuk melihat arus gangguan terbesar pada sistem jaringan pemakaian sendiri (6.3 kV) PLTU Bolok. Diperoleh nilai arus gangguan hubung singkat seperti yang terlihat dalam tabel 3.3 berikut.

Tabel 3.3 Nilai arus hubung singkat hasil simulasi pada bus generator I saat generator I beroperasi

ID Bus	kV	Jenis Gangguan	Ia (kA)	Ib (kA)	Ic (kA)
Bus Generator I	6.3	3 Phase Fault	10.273	-	-
		L-G Fault	4.640	0	0
		L-L Fault	0	9.488	9.488
		L-L-G Fault	0	10.615	8.351
Bus OutGoing I		3 Phase Fault	7.943	-	-
		L-G Fault	4.217	0	0
		L-L Fault	0	7.099	7.099
		L-L-G Fault	0	8.186	6.024
Bus AUX I		3 Phase Fault	7.930	-	-
		L-G Fault	4.206	0	0
		L-L Fault	0	7.086	7.086
		L-L-G Fault	0	8.170	6.015
Bus AUX II		3 Phase Fault	7.915	-	-
		L-G Fault	4.197	0	0
		L-L Fault	0	7.073	7.073
		L-L-G Fault	0	8.153	6.004

Dalam tabel 3.3 merupakan nilai arus gangguan hubung singkat hasil simulasi ETAP 12.6.0 saat semua beban beroperasi. Jenis gangguan 2 *phasa* ke tanah merupakan gangguan yang menjadi pemberi arus gangguan terbesar yaitu: 10.615 kA, terjadi pada bus generator I. Nilai arus hubung singkat yang diperoleh merupakan saat kondisi jaringan pemakaian sendiri pada PLTU Bolok dilayani oleh generator I. Perubahan nilai arus gangguan hubung singkat bergantung pada total beban yang beroperasi dalam sistem jaringan yang digunakan. Hal ini dapat dilihat dalam tabel 3.4 berikut:

Tabel 3.4 perubahan nilai arus gangguan hubung singkat dua *phasa* ke tanah pada bus generator I

ID Bus	kV	Kondisi Operasi beban	Jenis Gangguan	Ia (kA)	Ib (kA)	Ic (kA)
Bus Generator I	6.3	7 beban beroperasi	3 Phase Fault	10.273	-	-
			L-G Fault	4.640	0	0
			L-L Fault	0	9.488	9.488
			L-L-G Fault	0	10.615	8.351
		6 beban beroperasi	3 Phase Fault	10.024	-	-
			L-G Fault	4.625	0	0
			L-L Fault	0	9.272	9.272
			L-L-G Fault	0	10.396	8.138
		5 beban beroperasi	3 Phase Fault	9.763	-	-
			L-G Fault	4.609	0	0
			L-L Fault	0	9.045	9.045
			L-L-G Fault	0	10.165	7.914
	4 beban beroperasi	3 Phase Fault	9.489	-	-	
		L-G Fault	4.590	0	0	
		L-L Fault	0	8.806	8.806	
		L-L-G Fault	0	9.922	7.679	
	3 beban beroperasi	3 Phase Fault	9.200	-	-	
		L-G Fault	4.569	0	0	
		L-L Fault	0	8.555	8.555	
		L-L-G Fault	0	9.666	7.432	
	2 beban beroperasi	3 Phase Fault	8.760	-	-	
L-G Fault		4.534	0	0		
L-L Fault		0	8.171	8.171		
L-L-G Fault		0	9.275	7.056		
1 beban beroperasi	3 Phase Fault	8.284	-	-		
	L-G Fault	4.492	0	0		
	L-L Fault	0	7.756	7.756		
	L-L-G Fault	0	8.850	6.649		

Dalam tabel 3.4 menampilkan perubahan nilai arus gangguan hubung singkat jumlah beban yang beroperasi. Dimana semakin sedikit beban yang beroperasi nilai arus gangguan hubung singkat semakin kecil. Perubahan beban yang beroperasi saat simulasi hubung singkat pada bus generator I berpengaruh terhadap nilai impedansi urutan Z_1 dan Z_2 . Hal ini dapat dilihat dalam tabel 3.5.

Tabel 3.5 Nilai impedansi urutan pada bus generator I berdasarkan beban yang beroperasi.

BUS	Load Operate	kV	Z_1 (Ohm)		Z_2 (Ohm)		Z_0 (Ohm)	
			R	jX	R	jX	R	jX
Bus Gen_1	7	6.3	0.03206	0.35262	0.02979	0.30847	2.12797	0.19580
	6		0.03326	0.36132	0.03078	0.31511	2.12797	0.19580
	5		0.03459	0.37093	0.03187	0.32239	2.12797	0.19580
	4		0.03609	0.38162	0.03309	0.33043	2.12797	0.19580
	3		0.03779	0.39355	0.03446	0.33933	2.12797	0.19580
	2		0.04085	0.41321	0.03687	0.35384	2.12797	0.19580
	1		0.04466	0.43682	0.03983	0.37100	2.12797	0.19580

Dalam tabel 3.5 dapat dilihat bahwa nilai impedansi urutan Z_1 dan Z_2 berubah ketika beban yang beroperasi berkurang. Dimana saat beban yang beroperasi semakin sedikit, nilai impedansi urutan Z_1 dan Z_2 semakin besar. Perubahan nilai impedansi urutan ini berpengaruh terhadap besar arus gangguan hubung singkat. Disimpulkan bahwa semakin banyak beban yang beroperasi nilai arus gangguan hubung singkat akan semakin besar dan nilai impedansi urutan Z_1 dan Z_2 akan semakin kecil, begitupun sebaliknya. Dalam tabel 3.4 dan tabel 3.5 merupakan nilai arus gangguan hubung singkat dan nilai impedansi urutan positif (Z_1) dan

urutan negatif (Z_2) dan urutan nol (Z_0) saat sistem melayani tujuh, enam, lima, empat, tiga, dua, serta satu beban yang beroperasi.

3.4.2 Simulasi Hubung Singkat Saat Kedua Generator Beroperasi

Dalam simulasi ini dilakukan pada tiga busbar berbeda yaitu pada Bus Generator I, Bus *Outgoing* II, serta pada Bus Auxiliary I. Tujuan dilakukan simulasi ini yaitu untuk mengetahui jenis gangguan dan besar arus gangguan hubung singkat saat kondisi semua generator beroperasi.

a. Analisis Hubung Singkat pada Bus Generator I

Dalam simulasi hubung singkat ini dilakukan saat kondisi sistem melayani empat, tiga, dua dan satu beban yang beroperasi pada Bus Auxiliary I. Tujuan dilakukan simulasi ini yaitu untuk melihat bagaimana perubahan nilai arus gangguan hubung singkat terhadap jumlah beban yang beroperasi. Nilai hasil simulasi yang telah dilakukan dapat dilihat dalam tabel 3.7 berikut

Tabel 3.7 Nilai arus hubung singkat berdasarkan pola beban yang beroperasi

ID Bus	kV	Beban Yang Beroperasi	Jenis Gangguan	Ia (kA)	Ib (kA)	Ic (kA)
Bus Gen_1	6.3	Empat Beban	3 Phase Fault	9.367	-	-
			L-G Fault	4.581	0	0
			L-L Fault	0	8.700	8.700
			L-L-G Fault	0	9.814	7.575
		Tiga Beban	3 Phase Fault	9.072	-	-
			L-G Fault	4.559	0	0
			L-L Fault	0	8.443	8.443
			L-L-G Fault	0	9.552	7.322
		Dua Beban	3 Phase Fault	8.760	-	-
			L-G Fault	4.534	0	0
			L-L Fault	0	8.171	8.171
			L-L-G Fault	0	9.274	7.056
		Satu Beban	3 Phase Fault	8.284	-	-
			L-G Fault	4.492	0	0
			L-L Fault	0	7.756	7.756
			L-L-G Fault	0	8.850	6.649

Dalam tabel 3.7 dapat dilihat bahwa nilai arus gangguan hubung singkat akan semakin kecil seiring beban yang beroperasi berkurang. Perubahan arus gangguan hubung singkat ini berpengaruh nilai impedansi urutan positif, negatif, dan impedansi urutan nol pada titik lokasi gangguan yang sama yaitu bus generator I. Dimana perubahan nilai impedansi dapat dilihat dalam tabel 3.8 berikut

Tabel 3.8 Nilai impedansi urutan berdasarkan jumlah beban yang beroperasi pada bus generator I

BUS	Load Operate	kV	Z_1 (Ohm)		Z_2 (Ohm)		Z_0 (Ohm)	
			R	jX	R	jX	R	jX
Bus Gen_1	4	6.3	0.03695	0.38654	0.03378	0.33411	2.12797	0.19580
	3		0.03877	0.39908	0.03523	0.34343	2.12797	0.19580
	2		0.04086	0.41322	0.03688	0.35384	2.12797	0.19580
	1		0.04466	0.43682	0.03983	0.37100	2.12797	0.19580

Dalam tabel 3.8 dapat diketahui bahwa, semakin banyak beban yang beroperasi nilai impedansi urutan positif (Z_1) dan impedansi urutan negatif (Z_2) akan semakin kecil dan nilai arus gangguan hubung singkat akan semakin besar, begitupun dengan keadaan sebaliknya. Sedangkan nilai

impedansi urutan nol (Z_1) tidak berpengaruh terhadap jumlah beban yang beroperasi.

b. Analisis Hubung Singkat pada Bus Outgoing II

Simulasi hubung singkat pada bus *Outgoing II* ini dilakukan saat semua beban pada Bus *Auxiliary II* dalam keadaan beroperasi. Nilai arus gangguan hubung singkat pada bus *Outgoing II* dapat dilihat dalam tabel 3.9 berikut:

Tabel 3.9 Nilai arus hubung singkat pada bus *Outgoing II*

ID Bus	kV	Jenis Gangguan	Ia (kA)	Ib (kA)	Ic (kA)
Bus Outgoing II	6.3	3 Phase Fault	6.108	-	-
		L-G Fault	3.967	0	0
		L-L Fault	0	5.508	5.508
		L-L-G Fault	0	6.560	4.473

Dalam 3.9 dilihat nilai arus hubung singkat dua *phasa* ke tanah memiliki nilai arus gangguan hubung singkat terbesar yaitu 6.560 kA dari jenis gangguan yang lainnya. Nilai arus gangguan hubung singkat pada bus ini lebih kecil pada bus generator. Hal ini dipengaruhi karena pada sistem jaringan pemakaian sendiri untuk pemakaian pompa pada PLTU Bolok menggunakan reaktor untuk memperkecil nilai arus gangguan hubung singkat.

c. Analisis Hubung Singkat pada Bus Auxiliary I

Nilai arus gangguan hubung singkat pada bus *Auxiliary I* ini dapat dilihat dalam tabel 3.10 berikut

Tabel 3.10 Arus hubung singkat hasil simulasi ETAP

ID Bus	kV	Jenis Gangguan	Ia (kA)	Ib (kA)	Ic (kA)
Bus AUX_I	6.3	3 Phase Fault	6.639	-	-
		L-G Fault	4.045	0	0
		L-L Fault	0	5.968	5.968
		L-L-G Fault	0	7.029	4.922

Dalam tabel 3.10 diketahui nilai arus gangguan hubung singkat dua *phasa* ke tanah menjadi yang terbesar yaitu 7.029 kA. Nilai arus gangguan hubung singkat pada bus *Outgoing II* lebih kecil dari pada bus *Auxiliary I*. Hal ini disebabkan karena jumlah beban pada bus *Auxiliary I* lebih banyak dari pada total beban pada bus *Auxiliary II*. Hal ini sudah dijelaskan pada simulasi hubung singkat pada bus generator I.

3.5 Perhitungan Manual Arus Gangguan Hubung Singkat

Secara umum, arus gangguan hubung singkat didapat dari hasil bagi antara besar tegangan dan besarnya impedansi saluran. Hasil dari perhitungan secara manual ini akan dibandingkan dengan hasil nilai simulasi arus gangguan hubung singkat dengan aplikasi ETAP 12.6.0. Dalam perhitungan ini diperlukan data masukan berupa tegangan sistem dan impedansi saluran. Impedansi saluran diperoleh dari hasil simulasi hubung singkat dengan *software* ETAP 12.6.0. Pada simulasi tersebut didapatkan nilai dari impedansi urutan positif (Z_1), impedansi urutan negatif (Z_2), dan impedansi urutan nol (Z_0). Dalam perhitungan arus hubung singkat secara manual ini, akan digunakan sampel pada Bus Gen1 saat semua beban pada bus AUX_I (bus beban) beroperasi. Tabel 3.11 merupakan nilai impedansi urutan pada bus Generator I.

Tabel 3.11 Nilai impedansi urutan

BUS	kV	Z_1 (Ohm)		Z_2 (Ohm)		Z_0 (Ohm)	
		R	jX	R	jX	R	jX
Bus Gen_1	6.3	0.03695	0.38654	0.03378	0.33411	2.12797	0.19580

Berdasarkan nilai impedansi urutan positif, negatif, dan urutan nol yang ditunjukkan pada tabel 3.11, maka dapat dihitung secara manual untuk menentukan arus gangguan hubung singkat simetris maupun asimetris pada bus Generator I dengan tegangan sistem 6.3 kV adalah sebagai berikut:

a.) Perhitungan Arus Gangguan Hubung Singkat Tiga Phase

Untuk perhitungan arus gangguan hubung singkat tiga *phase*, hanya dihitung komponen urutan positif saja. Karena jenis gangguan ini termasuk dalam klasifikasi gangguan simetris. Dimana besar arus hubung singkat tiap *phase* untuk jenis gangguan tiga yaitu sama besarnya.

$$I_a = \frac{V_{L-N}}{Z_1}$$

$$V_{L-N} = \frac{6.3 \text{ kV}}{\sqrt{3}} = 3.6373 \text{ kV}$$

$$I_a = \frac{3.6373 \text{ kV}}{0.03695 + j0.38654}$$

$$I_a = \frac{3.6373 < 0^\circ}{0.3883 < 84.5395^\circ}$$

$$I_a = 9.3672 < -84.5395^\circ \text{ kA}$$

b.) Perhitungan Hubung Singkat satu Phase ke Tanah

Dalam perhitungan ini dianggap salah satu *phase* nya (*phase a*) yang mengalami gangguan. Untuk perhitungan ini masih sama dengan perhitungan hubung singkat tiga *phase* dimana komponen tidak simetri di ubah kedalam komponen simetri untuk mempermudah dalam perhitungan.

$$I_{a1} = \frac{V_{L-N}}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \text{ atau } I_{a1} = \frac{V_{L-N}}{Z_{tot}}$$

Dimana untuk nilai:

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

$$I_a = 3I_{a1} \text{ dan,}$$

$$I_b = I_c = 0$$

$$Z_{tot} = Z_1 + Z_2 + Z_0$$

$$Z_{tot} = \{(0.03695 + j0.38654) + (0.03378 + j0.33441) + (2.12797 + 0.19580)\} \text{ Ohm}$$

$$Z_{tot} = 2.1987 + j0.91645 \text{ Ohm}$$

Sehingga:

$$I_{a1} = \frac{3.6373 \text{ kV}}{(2.1987 + j0.9164) \text{ Ohm}}$$

$$I_{a1} = \frac{3.6373 < 0^\circ}{2.38205 < 22.62078^\circ}$$

$$I_{a1} = 1.52696 < -22.62708^\circ \text{ kA}$$

Jadi:

$$I_a = 3(1.52696 < -22.62708^0) \text{ kA}$$

$$I_a = 4.58088 < -22.62708^0 \text{ kA}$$

c.) Perhitungan Hubung Singkat Dua Phase

Gangguan dua *phasa* ini bisa diakibatkan karena putusnya kawat penghantar listrik dengan konfigurasi tersusun secara vertikal. Atau bisa juga disebabkan karena kerusakan dua buah isolator secara bersamaan pada sistem distribusi maupun sistem transmisi tenaga listrik.

$$I_{a1} = \frac{V_{L-N}}{Z_1 + Z_2}$$

Dimana dalam perhitungan ini,

$$I_{a0} = 0 \text{ dan } I_{a2} = -I_{a1}$$

$$I_a = 0 \text{ dan } I_c = -I_b$$

Untuk: $Z_1 + Z_2 = [(0.03695 + j0.38654) + (0.03378 + j0.33411)] \text{ Ohm}$

$$Z_1 + Z_2 = 0.07073 + j0.72065 \text{ Ohm}$$

Sehingga:

$$I_{a1} = \frac{3.6373 < 0^0}{0.72411 < 84.39451^0} I_{a1} = 5.02313 < -84.39451^0 \text{ kA}$$

Untuk $I_{a2} = -I_{a1}$

$$I_{a2} = 5.02313 < 95.60549^0 \text{ kA}$$

Sehingga untuk $I_b = I_{a0} + a^2 I_{a1} + a I_{a2}$

$$I_b = \{[0] + [(1 < 240^0)(5.02313 < -84.39451^0)] + [(1 < 120^0)(5.02313 < 95.60549^0)]\}$$

$$I_b = \{[5.02313 < 155.60549^0] + [5.02313 < -144.39451^0]\}$$

$$I_b = 8.70032 < -174.39451^0 \text{ kA}$$

d.) Perhitungan Hubung Singkat Dua phasa Ke Tanah

Gangguan dua *phasa* ke tanah umumnya terjadi karena dua kawat penghantar tenaga listrik yang mengalami hubung singkat dan terhubung ke tanah.

$$I_{a1} = \frac{V_{L-N}}{Z_1 + [Z_0 // Z_2]}$$

Untuk $Z_0 // Z_2$:

$$Z_0 // Z_2 = \frac{0.7176192945 < 89.48389068^0}{2.225748654 < 13.77308269^0}$$

$$Z_0 // Z_2 = 0.3224170408 < 75.71080799^0$$

$$Z_0 // Z_2 = 0.07957775463 + j0.3124422013 \text{ Ohm}$$

Sehingga untuk I_{a1} :

$$I_{a1} = \frac{V_{L-N}}{Z_1 [Z_0 // Z_2]}$$

$$3.6373 \text{ kV}$$

$$I_{a1} = \frac{3.6373 < 0^0}{0.1162577546 + j0.6988422013}$$

$$I_{a1} = \frac{3.6373 < 0^0}{0.7084907479 < 80.53336588}$$

$$I_{a1} = 5.133870853 < -80.53336585 \text{ kA}$$

$$I_{a1} = 0.81943842699 - j5.063955483 \text{ kA}$$

Untuk I_{a2} :

$$I_{a2} = \frac{(I_{a1} \times Z_1) - V_{L-N}}{Z_2}$$

$$I_{a2} = [(5.133870853$$

$$< [-80.53336585] \wedge 0) \times (0.03695 + j0.38654)] - [3.6373$$

$$< 0 \wedge 0)] / (0.033778 + j0.33411)$$

$$I_{a2} = [(5.133870853$$

$$< [-80.53336585] \wedge 0) \times (0.3883020398$$

$$< [84.539539] \wedge 0)] - [3.6373$$

$$< 0 \wedge 0)] / (0.335813312 < [84.2267127] \wedge 0)$$

$$I_{a2} = ((1.993492524$$

$$< [4.00622715] \wedge 0) - (3.6373 [$$

$$< 0] \wedge 0)) / (0.335813312$$

$$< [84.2267127] \wedge 0)$$

$$I_{a2} = \frac{1.654550952 < 175.171299^0}{0.335813312 < 84.2267127^0}$$

$$I_{a2} = 4.926996318 < 90.94458626^0 \text{ kA}$$

Untuk I_{a0} :

$$I_{a0} = \frac{(I_{a1} \times Z_1) - V_{L-N}}{Z_0}$$

$$I_{a0} = \frac{1.654550952 < 175.171299^0}{2.136959045 < 5.257129409^0}$$

$$I_{a0} = 0.7742548723 < 169.9141696^0 \text{ kA}$$

$$I_{a0} = -0.7622899394 + 0.1355900274 \text{ Ohm}$$

Sehingga untuk perhitungan pada I_b dan I_c yaitu:

$$I_b = I_{a0} + a^2 I_{a1} + a I_{a2}$$

$$I_b = \{[0.7742548723 < 169.9141696^0]$$

$$+ [5.133870853 < 159.4666342^0]$$

$$+ [4.926996318 < -149.0554137^0]\}$$

$$I_b = 9.813895692 < -176.5112803^0 \text{ kA}$$

Untuk I_c :

$$I_c = I_{a0} + a I_{a1} + a^2 I_{a2}$$

$$I_c = \{[0.7742548723 < 169.9141696^0]$$

$$+ [5.133870853 < 39.46663415^0]$$

$$+ [4.926996318 < -29.0554138^0]\}$$

$$I_c = 7.575066084 < 7.731694059^0 \text{ kA}$$

3.6 Perhitungan Breaking Capacity pada CB

Dari hasil simulasi yang telah dilakukan pada ketiga bus yang dipilih yaitu bus generator I, Bus Outgoing II, dan bus Auxiliary I diketahui besar atau nilai arus gangguan hubung singkat maksimum yang terjadi dalam sistem distribusi 6.3 kV. Dimana arus gangguan hubung singkat terbesar merupakan jenis gangguan asimetri berupa gangguan dua *phasa* ke tanah. Berdasarkan besar nilai arus maksimum gangguan pada sistem, maka dapat dihitung kemampuan arus sesaat (*momentary duty*) sebagai arus yang harus

dipikul komponen proteksi berupa CB. Arus maksimum gangguan hubung singkat dua *phasa* ke tanah dikalikan nilai 1.6 untuk memperoleh kemampuan *breaking capacity* pada peralatan proteksi berupa CB. Tabel 4.8 merupakan nilai arus hubung singkat simetri terbesar (gangguan dua *phasa* ke tanah) yang harus di beban CB saat terjadi hubung singkat.

Tabel 4.8 Nilai *breaking capacity* suatu CB berdasarkan arus hubung singkat yang terbesar

Kondisi Sistem Jaringan PS	Bus	Nilai Hubung Singkat Tertinggi (2 <i>phasa</i> ke tanah)	Breaking Capacity CB (I_m CB)
Semua Generator Beroperasi	Bus Gen I	9.814 kA	15.7024 kA
	Bus <i>OutGoing</i> II	6.560 kA	10.496 kA
	Bus AUX_I	7.029 kA	11.2464 kA
Generator I Beroperasi	Bus Gen I	10.615 kA	16.984 kA
	Bus <i>OutGoing</i> I	8.186 kA	13.0976 kA
	Bus AUX I	8.170 kA	13.072 kA
	Bus AUX II	8.153 kA	13.0448 kA
Generator II Beroperasi	Bus Gen II	10.615 kA	16.984 kA
	Bus <i>OutGoing</i> II	8.185 kA	13.096 kA
	Bus AUX I	8.158 kA	13.0528 kA
	Bus AUX II	8.166 kA	13.0656 kA

Dalam tabel 4.8 nilai *breaking capacity* untuk suatu CB diperoleh dari persamaan $I_m CB = 1.6 \times I_{sc}$. Dimana I_{sc} merupakan nilai arus gangguan hubung singkat simetri dua *phase* ke tanah.

3.7 Perbandingan Hasil Nilai Arus Gangguan Hubung Singkat Berdasarkan Simulasi dan Perhitungan Secara Manual

Dari hasil simulasi untuk arus gangguan hubung singkat dan perhitungan secara manual yang telah dilakukan didapatkan bahwa untuk setiap busbar memiliki nilai arus gangguan hubung singkat yang sama baik saat simulasi dengan ETAP maupun perhitungan secara manual. Hal ini dapat dilihat dalam tabel 3.12 berikut.

Tabel 3.12 Perbandingan nilai arus hubung singkat antara hasil simulasi dan perhitungan manual

Jenis Gangguan	Simulasi (kA)			Perhitungan Manual (kA)			Selisih (kA)		
	I_a	I_b	I_c	I_a	I_b	I_c	I_a	I_b	I_c
3 <i>Phase</i>	9.367	-	-	9.36724	-	-	0.00024	-	-
2 <i>Phase</i>	0	8.700	8.700	0	8.70032	8.70032	0	0.00032	0.00032
2 <i>Phase</i> ke Tanah	0	9.814	7.575	0	9.81389	7.57507	0	0.00011	0.00007
1 <i>Phase</i> ke Tanah	4.581	0	0	4.58088	0	0	0.00012	0	0

Dalam Tabel 3.12 perbandingan antara arus hubung singkat hasil simulasi ETAP dan perhitungan manual pada bus generator I. Dilihat bahwa nilai hasil kedua arus hubung singkat sama, namun terdapat selisih nilai pembulatan angka dibelakang koma.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian analisis gangguan hubung singkat pada sistem jaringan pemakaian sendiri PLTU Bolok Unit pembangkit 3 & 4, PT. SMS Energy dengan bantuan *software* ETAP 12.6, dapat diambil beberapa kesimpulan bahwa:

1. Jenis gangguan hubung singkat dua *phasa* ke tanah merupakan jenis gangguan yang menjadi pemberi kontribusi arus gangguan yang terbesar, yaitu pada bus generator I sebesar 10.615 kA
2. Besar kecil nilai arus gangguan hubung singkat bergantung pada beban yang beroperasi. Dimana dari hasil simulasi yang dilakukan saat semua beban beroperasi nilai arus gangguan hubung singkat lebih besar dibandingkan saat enam beban, lima, empat, tiga dua, dan satu beban yang beroperasi
3. Perubahan beban yang beroperasi saat simulasi arus gangguan hubung singkat pada bus GenI menyebabkan nilai Z_1 dan Z_2 berubah sedangkan untuk nilai Z_0 tidak berpengaruh terhadap jumlah beban yang beroperasi. Dimana saat semua beban beroperasi nilai impedansi $Z_1 = 0.03695 + j0.38654 \text{ ohm}$, dan $Z_2 = 0.03378 + j0.33411 \text{ ohm}$, serta $Z_0 = 2.12797 + j0.19580 \text{ ohm}$. Sedangkan saat satu beban yang beroperasi nilai impedansi $Z_1 = 0.04466 + j0.43682 \text{ ohm}$, dan nilai $Z_2 = 0.03983 + j0.37100 \text{ ohm}$, serta nilai $Z_0 = 2.12797 + j0.19580 \text{ ohm}$
4. Berdasarkan analisis gangguan hubung singkat yang dilakukan pada jaringan pemakaian sendiri PLTU Bolok PT. ESMS Unit 3 dan 4, didapatkan nilai *breaking capacity* untuk CB pada masing – masing bus yang diberi gangguan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ana Dwi Ernia, "Analisa Gangguan Hubung Singkat Pada Sistem Tenaga Listrik Di Pertamina EP-Central Processing Plant Area Gundih Menggunakan Software ETAP 12.6," 2017.
- [2] Amira and Asnal Effendi, "Studi Analisa Gangguan Hubung Singkat 1 Fasa Ke Ta Pada SUTT 150 kV Untuk Setting Relay OCR," *Teknik Elektro ITP*, vol. 3, no. 2, pp. 96-97, 2014.
- [3] Aulia Rahim, "Studi Hubung Singkat Untuk Gangguan Simetris Dan Tidak Simetris Pada Sistem Tenaga Listrik PT. PLN P3B Sumatera," Padang, Sumatera Barat, 2011.
- [4] Dasman, "Studi Gangguan Hubung Singkat 1 Fasa Ke Tanah Pada SUTT 150 kV," *Teknik Elektro ITP*, vol. 5, no. 2, p. 115, 2016.
- [5] Wellem Fridz Galla, "Bahan Ajar Mandiri Analisis Sistem Tenaga II," Kupang, 2010.
- [6] Marwan, Ruslan L, and Nur Malasari Samsul, "Analisis Gangguan Tidak Seimbang Pada Line Transmisi GI Sungguminasa GI Tallasa," *INTEK*, vol. 3, no. 2, pp. 102-104, 2016.
- [7] Bonggas L Tobing, *Peralatan Tegangan Tinggi*. Jakarta: Erlangga, 2012.