

Penentuan Kapasitas CB Dengan Analisa Hubung Singkat Pada Jaringan 70 kV Sistem Minahasa

Filia Majesty Posundu, Lily S. Patras, ST., MT., Ir. Fielman Lisi, MT., dan Maickel Tuegeh, ST., MT.
Jurusan Teknik Elektro-FT, UNSRAT, Manado-95115, Email: filiamajesty@gmail.com

Abstrak - Saluran transmisi adalah suatu sistem penyaluran energi listrik berskala besar dari pembangkit ke pusat-pusat beban. Sistem proteksi tenaga listrik merupakan sistem pengamanan pada peralatan-peralatan yang terpasang pada sistem tenaga listrik, seperti generator, busbar, transformator, saluran udara tegangan tinggi, saluran kabel bawah tanah, dan lain sebagainya terhadap kondisi abnormal operasi sistem tenaga listrik tersebut.

Setiap sistem proteksi minimum terdiri dari transformator instrumen, relay dan pemutus tenaga (*Circuit Breaker*). *Circuit Breaker* (CB) atau Pemutus Tenaga (PMT) merupakan peralatan saklar (*switching*) mekanis, yang mampu menutup, mengalirkan dan memutus arus beban dalam kondisi normal serta mampu menutup, mengalirkan (dalam periode waktu tertentu) dan memutus arus beban dalam spesifik kondisi abnormal / gangguan seperti kondisi hubung singkat (*short circuit*). Fungsi utamanya adalah sebagai alat pembuka atau penutup suatu rangkaian listrik dalam kondisi berbeban, serta mampu membuka atau menutup saat terjadi arus gangguan (hubung singkat) pada jaringan atau peralatan lain.

Penentuan kapasitas CB (*Circuit Breaker*) dapat ditentukan berdasarkan nilai maksimum dari arus hubung singkat. Pada jaringan transmisi 70 kV Sistem Minahasa, analisa gangguan yang dihitung yaitu pada gangguan hubung singkat tiga fasa.

kata kunci : *Circuit Breaker*, Gangguan Hubung Singkat, Saluran Transmisi, Sistem Proteksi,

I. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Penyaluran tenaga listrik merupakan suatu topik yang menarik banyak minat untuk dipelajari dalam bidang ketenagalistrikan. Ini terkait dengan semakin kompleksnya permasalahan yang muncul dalam proses penyaluran tenaga listrik tersebut. Baik karena proses penyalurannya maupun karena karakteristik beban yang disuplai. Sehingga menyebabkan ketersediaan energi listrik menjadi salah satu aspek yang paling penting dalam perkembangan suatu daerah. Karena berbagai persoalan teknis, tenaga listrik hanya dibangkitkan pada tempat-tempat tertentu, sedangkan pemakai daya listrik atau pelanggan yang menggunakan listrik tersebar di berbagai tempat, maka penyaluran tenaga listrik dari tempat dibangkitkan sampai ke tempat pelanggan memerlukan berbagai penanganan teknis. Oleh karena itu, jaringan transmisi memegang peranan penting dalam proses penyaluran daya listrik dari pusat pembangkit ke pusat beban.

Namun dengan tersedianya listrik, maka harus diperhatikan juga tingkat keamanan dari jaringan listrik yang ada. Terlebih lagi pada bagian transmisinya. Sistem proteksi memegang peranan penting dalam kelangsungan dan keamanan terhadap penyaluran daya listrik.

Pengamanan pada jaringan transmisi perlu mendapat perhatian yang serius dalam setiap perencanaannya. Di mana sistem transmisi memiliki parameter-parameter dan keadaan sistem yang berubah secara terus menerus, sehingga strategi pengamanannya harus disesuaikan dengan perubahan dinamis dalam hal desain dan pengaturan peralatannya. Sistem proteksi berfungsi untuk mengamankan peralatan listrik dari kemungkinan kerusakan yang diakibatkan oleh gangguan, misalnya gangguan dari alam atau akibat rusaknya peralatan secara tiba-tiba, melokalisir daerah-daerah sistem yang mengalami gangguan sekecil mungkin, dan mengusahakan secepat mungkin untuk mengatasi gangguan yang terjadi di daerah tersebut, sehingga stabilitas sistemnya dapat terpelihara, dan juga untuk mengamankan manusia dari bahaya yang ditimbulkan oleh listrik. CB (*Circuit Breaker*) atau biasa juga disebut PMT (pemutus tenaga) merupakan salah satu bagian penting dalam sistem pengamanan jaringan transmisi yang digunakan untuk memutuskan arus beban apabila sedang terjadi gangguan seperti kondisi hubung singkat, untuk mencegah meluasnya gangguan ke jaringan yang lain.

B. Perumusan Masalah

Bagaimana menentukan kapasitas CB (*Circuit Breaker*) yang akan dipasang dengan menggunakan studi analisa gangguan pada jaringan 70 kV.

C. Pembatasan Masalah

Adapun batasan masalah yang ditetapkan, yaitu analisa perhitungan yang dilakukan hanya pada jaringan 70 kV Sistem Minahasa.

D. Tujuan Penulisan

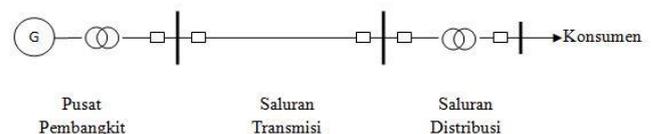
Dari masalah yang sudah diteliti, tujuan utama dari penulisan tugas akhir ini adalah :

1. Menganalisa gangguan yang terjadi pada jaringan 70 kV
2. Menentukan kapasitas CB (*Circuit Breaker*) yang digunakan di Sistem Minahasa jaringan 70 kV

II. LANDASAN TEORI

A. Saluran Transmisi

Saluran transmisi adalah suatu sistem penyaluran energi listrik berskala besar dari pembangkit ke pusat-pusat beban. Sistem transmisi menyalurkan daya dengan tegangan tinggi yang digunakan untuk mengurangi adanya rugi-rugi transmisi akibat jatuh tegangan.



Gambar 1. Sistem Penyaluran Energi Listrik

Berdasarkan pemasangan, saluran transmisi dibagi menjadi dua, yaitu:

1. Saluran udara (*overhead line*), yang menyalurkan tenaga listrik melalui kawat-kawat yang digantungkan pada tiang-tiang transmisi dengan perantara isolator.
2. Saluran bawah tanah (*underground*), yang menyalurkan tenaga listrik melalui kabel bawah tanah.

Menurut jenis arusnya dikenal sistem arus bolak-balik (AC atau *alternating current*) dan sistem arus searah (DC atau *direct current*). Di dalam sistem AC kenaikan dan penurunan tegangan mudah dilakukan, yaitu dengan menggunakan transformator. Itulah sebabnya saluran transmisi di dunia sebagian besar adalah saluran AC.

Berdasarkan Level tegangan saluran transmisi dapat dibagi sebagai berikut:

1. Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) 200 kV – 500 kV
2. Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) 30 kV – 150 kV
3. Saluran Kabel Tegangan Tinggi (SKTT) 30 kV – 150 kV

B. Impedansi Saluran

Pada penentuan kapasitas CB, 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 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 (pu). 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 diperlukan cara untuk dapat mengubah impedansi per unit dari suatu dasar ke dasar lain, yaitu sebagai berikut :

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

D. Gangguan Hubung Singkat (*Short Circuit Fault*)

Hubung singkat adalah terjadinya hubungan penghantar bertegangan atau penghantar tidak bertegangan secara langsung melalui media (resistor/beban) yang semestinya sehingga terjadi aliran arus yang tidak normal (sangat besar). Hubung singkat merupakan jenis gangguan yang sering terjadi pada sistem tenaga listrik, terutama pada saluran 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 bagian 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.

E. Sistem Proteksi

Sistem proteksi tenaga listrik merupakan sistem pengamanan pada peralatan-peralatan yang terpasang pada sistem tenaga listrik, seperti generator, busbar, 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 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 ditimbulkan oleh tenaga listrik.

Keandalan dan kemampuan suatu sistem tenaga listrik dalam melayani konsumen sangat tergantung pada sistem proteksi yang digunakan. Oleh sebab itu dalam perancangan suatu sistem tenaga listrik, perlu dipertimbangkan kondisi-kondisi gangguan yang mungkin terjadi pada sistem, melalui analisa gangguan.

Dari hasil analisa gangguan, dapat ditentukan sistem proteksi yang akan digunakan, seperti: spesifikasi *switchgear*, rating CB (*circuit breaker*), serta penetapan besaran-besaran yang menentukan bekerjanya suatu relay (*setting rele*) untuk keperluan proteksi.

Pengetahuan mengenai arus-arus yang timbul dari berbagai tipe gangguan pada suatu lokasi merupakan hal yang sangat esensial bagi pengoperasian sistem proteksi secara efektif. Jika terjadi gangguan pada sistem, para operator yang merasakan adanya gangguan tersebut diharapkan segera dapat mengoperasikan CB (*circuit breaker*) yang tepat untuk mengeluarkan sistem yang terganggu atau memisahkan pembangkit dari jaringan yang terganggu. Sangat sulit bagi seorang operator untuk mengawasi gangguan-gangguan yang mungkin terjadi dan menentukan CB mana yang dioperasikan untuk mengisolir gangguan tersebut secara manual.

Banyak hal yang harus dipertimbangkan dalam mempertahankan arus kerja maksimum yang aman. Jika arus kerja bertambah melampaui batas aman yang ditentukan dan tidak ada proteksi atau jika proteksi tidak memadai atau tidak efektif, maka keadaan tidak normal dan akan mengakibatkan kerusakan isolasi.

Proteksi harus sanggup menghentikan arus gangguan sebelum arus tersebut naik mencapai harga yang berbahaya.

Proteksi dapat dilakukan dengan Pemutus tenaga atau CB (*Circuit Breaker*).

Proteksi juga harus sanggup menghilangkan gangguan tanpa merusak peralatan proteksi itu sendiri. Untuk ini pemilihan peralatan proteksi harus sesuai dengan kapasitas arus hubung singkat "*breaking capacity*".

Di samping itu, sistem proteksi yang diperlukan harus memenuhi persyaratan sebagai berikut:

1. Pemutus tenaga atau CB (*circuit breaker*) harus sanggup dilalui arus nominal secara terus menerus tanpa pemanasan yang berlebihan (*overheating*).
2. *Overload* yang kecil pada selang waktu yang pendek seharusnya tidak menyebabkan peralatan bekerja.
3. Sistem Proteksi harus bekerja walaupun pada *overload* yang kecil tetapi cukup lama, sehingga dapat menyebabkan *overheating* pada rangkaian penghantar.
4. Sistem Proteksi harus membuka rangkaian sebelum kerusakan yang disebabkan oleh arus gangguan yang dapat terjadi.
5. Proteksi harus dapat melakukan "pemisahan" (*discriminative*) hanya pada rangkaian yang terganggu yang dipisahkan dari rangkaian yang lain yang tetap beroperasi.

Mengingat arus gangguan yang cukup besar, maka perlu secepat mungkin dilakukan proteksi. Hal ini perlu suatu peralatan yang digunakan untuk mendeteksi keadaan-keadaan yang tidak normal tersebut dan selanjutnya menginstruksikan CB (*circuit breaker*) yang tepat untuk bekerja memutuskan rangkaian atau sistem yang terganggu.

III. METODOLOGI PENELITIAN

A. Umum

Pada Sistem Minahasa, terdiri dari berbagai jenis jaringan transmisi, mulai dari yang 20 kV sampai yang 150 kV. Namun, untuk di Sistem Minahasa sendiri jaringan transmisi yang terbanyak dan merupakan salah satu bagian yang penting adalah jaringan 70 kV. Daya yang dibangkitkan disalurkan melalui saluran transmisi yang ada, salah satunya di 70 kV. Agar kontinuitas daya yang terkirim ke konsumen tetap terjaga, maka salah satu hal yang harus diperhatikan adalah proteksi pada saluran transmisi tersebut. Karena tidak menutup kemungkinan pada proses penyaluran daya dapat terjadi gangguan-gangguan yang tidak terduga.

1. Gangguan-gangguan yang terjadi pada jaringan secara tiba-tiba dapat mengakibatkan rusaknya peralatan-peralatan yang ada dalam sistem tersebut dan memperluas kemungkinan area gangguan. Karena itu, dibutuhkan alat yang dapat memproteksi peralatan-peralatan tersebut dan meminimalisasi gangguan yang terjadi. CB (*Circuit Breaker*) adalah salah satu peralatan pada sistem proteksi tersebut. Berfungsi sebagai pemutus apabila pada salah satu bagian saluran transmisi sedang mengalami gangguan, sehingga bisa meminimalisasi kerusakan pada peralatan-peralatan yang ada dan bisa mempersempit area gangguan.

B. Data Teknis

Data teknis generator yang digunakan untuk menghitung arus hubung singkat pada jaringan 70 kV meliputi PLTA Tanggari 1 dan PLTA Tanggari 2, terdapat pada Tabel I.

Data teknis transformator yang digunakan meliputi seluruh Gardu Induk dan pembangkit pada jaringan 70 kV, yaitu GI Ranomut, GI Sawangan, GI Tomohon, GI Tasik Ria, GI Teling, GI Tonsea Lama, GI Bitung, GI Likupang, PLTA Tanggari 1, dan PLTA Tanggari 2, terdapat pada Tabel II.

Tabel I. DATA TEKNIS GENERATOR

| No. | Pembangkit | Unit | Daya Terpasang (MVA) | Tegangan (kV) | X source (%) |
|-----|-----------------|------|----------------------|---------------|--------------|
| 1. | PLTA Tanggari 1 | 1 | 11.25 | 6.3 | 0.24 |
| | | 2 | 11.25 | 6.3 | 0.24 |
| 2. | PLTA Tanggari 2 | 1 | 11.875 | 6.6 | 0.26 |
| | | 2 | 11.875 | 6.6 | 0.26 |

Tabel II. DATA TEKNIS TRANSFORMATOR

| No. | Lokasi | Unit | Daya (MVA) | Tegangan (kV) | X (%) |
|-----|-----------------|------|------------|---------------|--------|
| 1 | GI Ranomut | 1 | 20 | 66/20 | 12.74 |
| | | 2 | 20 | 66/21 | 12.17 |
| 2 | GI Sawangan | 1 | 10 | 66/21 | 7.89 |
| | | 2 | 4 | 66/20 | 7.48 |
| 3 | GI Tomohon | 1 | 10 | 66/21 | 7.39 |
| | | 2 | 10 | 70/20 | 9.41 |
| | | 3 | 60 | 66/150 | 12.393 |
| 4 | GI Tasik Ria | 1 | 20 | 20/66 | 12.17 |
| 5 | GI Teling | 1 | 10 | 66/21 | 12.2 |
| | | 2 | 10 | 66/21 | 7.36 |
| | | 3 | 20 | 66/20 | 11.77 |
| 6 | GI Tonsea Lama | 1 | 12 | 30/66 | 8.6 |
| | | 2 | 10 | 21/66 | 7.31 |
| | | 3 | 6 | 30/65.8 | 6.4 |
| 7 | GI Bitung | 1 | 16 | 11/70 | 11.92 |
| | | 2 | 22 | 6/66 | 11.92 |
| | | 3 | 15 | 6/66 | 11.92 |
| | | 4 | 15 | 70/20 | 11.92 |
| 8 | GI Likupang | 1 | 20 | 70/20 | 12.441 |
| 9 | PLTA Tanggari 1 | 1 | 11.25 | 6.3/70.5 | 9.3 |
| | | 2 | 11.25 | 6.3/70.5 | 9.3 |
| 10 | PLTA Tanggari 2 | 1 | 11.8 | 6.6/70 | 8.73 |
| | | 2 | 11.8 | 6.6/70 | 8.73 |
| 11 | PLTD Bitung | 1 | 20 | 66/20 | 11.92 |

Tabel III. DATA IMPEDANSI SALURAN TRANSMISI 70 KV

| No. | Transmisi 70 kV | Panjang (km) | Impedansi (Z) per km |
|-----|---------------------------------|--------------|----------------------|
| 1. | GI Tomohon – GI Tasik Ria | 26.04 | 0.236 + j 0.428 |
| 2. | GI Tonsealama – GI Tomohon | 10.039 | 0.196 + j 0.411 |
| 3. | GI Tonsealama – GI Sawangan | 7.832 | 0.196 + j 0.411 |
| 4. | PLTA Tonsealama – GI Tonsealama | 0.4 | 0.196 + j 0.411 |
| 5. | GI Tomohon – GI Teling | 17 | 0.196 + j 0.411 |
| 6. | GI Ranomut – GI Teling | 3.245 | 0.196 + j 0.411 |
| 7. | GI Sawangan – GI Ranomut | 19.65 | 0.196 + j 0.411 |
| 8. | PLTA Tanggari 1 – GI Sawangan | 5.896 | 0.196 + j 0.411 |
| 9. | PLTA Tanggari 2 – GI Sawangan | 3.8 | 0.236 + j 0.428 |
| 10. | GI Bitung – GI Sawangan | 28.853 | 0.157 + j 0.419 |
| 11. | GI Bitung – GI Likupang | 34 | 0.118 + j 0.388 |

Data impedansi saluran transmisi didapat dari PT. PLN (Persero) AP2B (Area Pusat Pengaturan Beban). Data yang digunakan dalam penentuan kapasitas CB untuk jaringan transmisi 70 kV, terdapat pada Tabel III.

C. Urutan Analisa Data

Setelah semua data-data yang diperlukan telah didapatkan, maka dapat dilanjutkan dengan menganalisa data-data tersebut.

1. Yang pertama dilakukan adalah melakukan analisa pada generator dan transformator, yaitu menghitung nilai reaktansi dari masing-masing generator dan transformator. Dari nilai reaktansi sumber yang diketahui sebelumnya, akan didapatkan nilai reaktansi yang baru dalam bentuk volt yang kemudian diubah ke bentuk *pu*. Dari nilai tegangan dan reaktansi yang didapatkan, maka dapat dihitung arus pada masing-masing generator dan transformator.
2. Selain nilai reaktansi pada generator dan transformator, selanjutnya dilakukan penghitungan nilai impedansi pada saluran transmisi pada masing-masing. Dengan cara yang hampir sama dengan saat menghitung reaktansi dari generator dan transformator. Namun, pada saluran transmisi untuk mendapatkan nilai tegangan dan arus, yang dihitung terlebih dahulu adalah nilai impedansi. Bedanya dengan nilai arus pada generator dan transformator, nilai arus pada saluran transmisi diubah lagi ke dalam bentuk polar.
3. Setelah semua nilai arus sudah dihitung, maka dapat ditentukan kapasitas CB (*circuit breaker*), dengan nilai arus dasar (I_b) yang dihitung terlebih dahulu, kemudian akan dikalikan dengan nilai arus pada masing-masing generator, transformator, dan saluran transmisi.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Parameter Sistem

Dalam menghitung arus hubung singkat untuk menentukan kapasitas CB pada jaringan transmisi 70 kV yang meliputi GI Tomohon, GI Teling, GI Tasik Ria, GI Ranomut, GI Sawangan, GI Tonsea Lama, GI Bitung, GI Likupang, diperlukan beberapa parameter dari sistem yang ditinjau. Parameter yang dimaksud adalah impedansi generator, impedansi transformator, dan impedansi saluran. Data keseluruhannya dari generator dapat dilihat pada tabel I, data transformator pada tabel II, dan data saluran pada tabel III.

B. Pengolahan Data

Dalam perhitungan reaktansi pada masing-masing generator dan transformator digunakan persamaan 2. Perhitungan reaktansi ini sebagai langkah awal dalam perhitungan untuk mendapatkan nilai reaktansi yang baru.

Tabel IV. DATA HASIL PERHITUNGAN REAKTANSI GENERATOR

| No. | Gene-rator | Unit | Kapasitas (MVA) | Tegangan (kV) | X_{sumber} (pu) | X_{baru} (pu) |
|-----|-----------------|------|-----------------|---------------|-------------------|-----------------|
| 1. | PLTA Tanggari 1 | 1 | 11.25 | 6.3 | 0.24 | 2.133 |
| | | 2 | 11.25 | 6.3 | 0.24 | 2.133 |
| 2. | PLTA Tanggari 2 | 1 | 11.875 | 6.6 | 0.26 | 2.189 |
| | | 2 | 11.875 | 6.6 | 0.26 | 2.189 |

1. Perhitungan Reaktansi

Berdasarkan data pada tabel I, PLTA Tanggari 1 dan 2 masing-masing memiliki dua unit generator. Pada PLTA Tanggari, tiap unit membangkitkan tegangan sebesar 6.3 kV, daya sebesar 11.25 MVA. Pada PLTA Tanggari 2, tiap unit membangkitkan tegangan sebesar 6.6 kV, daya sebesar 11.875 MVA. kVA dasar yaitu 100 MVA.

Reaktansi generator, data berdasarkan Tabel I:

- PLTA Tanggari 1 unit I dan II
 $X = 0.24 \text{ pu} ; 11.25 \text{ MVA} ; 6.3 \text{ kV}$
 $X_{baru} = 0.24 \left(\frac{6.3}{6.3}\right)^2 x \left(\frac{100}{11.25}\right) = 2.133 \text{ pu}$
- PLTA Tanggari 2 unit I dan II
 $X = 0.26 \text{ pu} ; 11.875 \text{ MVA} ; 6.6 \text{ kV}$
 $X_{baru} = 0.26 \left(\frac{6.6}{6.6}\right)^2 x \left(\frac{100}{11.875}\right) = 2.189 \text{ pu}$

Keseluruhan hasil perhitungan reaktansi pada generator terdapat pada Tabel IV.

Reaktansi transformator, data berdasarkan tabel II

- PLTA Tanggari 1 unit I dan II
 $X = 0.093 \text{ pu} ; 11.25 \text{ MVA} ; 6.3/70.5 \text{ kV}$
 $X_{baru} = 0.093 \left(\frac{6.3}{6.3}\right)^2 x \left(\frac{100}{11.25}\right) = 0.827 \text{ pu}$
- PLTA Tanggari 2 unit I dan II
 $X = 0.0873 \text{ pu} ; 11.8 \text{ MVA} ; 6.6/70 \text{ kV}$
 $X_{baru} = 0.0873 \left(\frac{6.6}{6.6}\right)^2 x \left(\frac{100}{11.8}\right) = 0.739 \text{ pu}$

Keseluruhan hasil perhitungan reaktansi pada transformator terdapat pada Tabel V.

Tabel V. DATA HASIL PERHITUNGAN REAKTANSI TRANSFORMATOR

| No. | Lokasi | Unit | Kapasitas (MVA) | Tegangan (kV) | $X_{sum-ber}$ (pu) | X_{baru} (pu) |
|-----|-----------------|------|-----------------|---------------|--------------------|-----------------|
| 1. | PLTA Tanggari 1 | 1 | 11.25 | 6.3/70.5 | 0.093 | 0.827 |
| | | 2 | 11.25 | 6.3/70.5 | 0.093 | 0.827 |
| 2. | PLTA Tanggari2 | 1 | 11.8 | 6.6/70 | 0.0873 | 0.739 |
| | | 2 | 11.8 | 6.6/70 | 0.0873 | 0.739 |
| 3. | GI Ranomut | 1 | 20 | 66/20 | 0.1274 | 0.637 |
| | | 2 | 20 | 66/21 | 0.1217 | 0.609 |
| 4. | GI Sawangan | 1 | 10 | 66/21 | 0.0748 | 0.748 |
| | | 2 | 4 | 66/20 | 0.0789 | 1.973 |
| 5. | GI Tomohon | 1 | 10 | 66/21 | 0.0739 | 0.739 |
| | | 2 | 10 | 70/20 | 0.0941 | 0.941 |
| | | 3 | 60 | 66/150 | 0.1239 | 0.207 |
| 6. | GI Tasik Ria | 1 | 20 | 20/66 | 0.1217 | 0.609 |
| 7. | GI Teling | 1 | 10 | 66/21 | 0.0748 | 0.748 |
| | | 2 | 10 | 66/21 | 0.0736 | 0.736 |
| | | 3 | 20 | 66/20 | 0.1177 | 0.589 |
| 8. | GI Tonsea Lama | 1 | 12 | 66/30 | 0.086 | 0.716 |
| | | 2 | 10 | 66/21 | 0.0731 | 0.731 |
| | | 3 | 6 | 65.8/30 | 0.064 | 1.067 |
| 9. | GI Bitung | 1 | 16 | 11/70 | 0.103 | 0.644 |
| | | 2 | 22 | 6/66 | 0.09 | 0.409 |
| | | 3 | 15 | 6/66 | 0.09 | 0.6 |
| | | 4 | 15 | 6/66 | 0.12 | 0.8 |
| 10. | PLTD Bitung | 1 | 20 | 66/20 | 0.1192 | 0.596 |

| | | | | | | |
|-----|-------------|---|----|-------|--------|-------|
| 11. | GI Likupang | 1 | 20 | 70/20 | 0.1244 | 0.622 |
|-----|-------------|---|----|-------|--------|-------|

Dengan menggunakan persamaan yang sama pada PLTA Tanggari 1 dan 2, maka nilai reaktansi dari generator dan transformator untuk unit pembangkit dan gardu induk – gardu induk yang lain juga dapat diperoleh seperti pada tabel IV.

Untuk menentukan kapasitas CB (*circuit breaker*), maka perlu diketahui arus yang mengalir pada masing-masing transformator di jaringan transmisi. Pada transformator karena tegangan masih dalam bentuk volt, maka akan diubah ke bentuk *pu*. Setelah tegangan sudah diubah ke bentuk *pu*, maka arus pada transformator dapat dihitung dalam bentuk *pu* juga. Dengan menggunakan rumus (1):

$$\checkmark V_{pu} = \frac{V_{sebenarnya}}{V_{dasar}} = \frac{20}{70} = 0.286 \text{ pu}$$

$$I_{T1} = \frac{0.286}{0.609} = 0.469 \text{ pu}$$

C. Impedansi saluran transmisi

Data saluran transmisi GI Tomohon – GI Tasik Ria berdasarkan tabel 3.3

- Panjang saluran transmisi $L = 26.04 \text{ km}$
- Impedansi penghantar $Z = 0.236 + j 0.428 \text{ ohm/km}$

Untuk menghitung total impedansi saluran transmisi GI Tomohon – GI Tasik Ria dengan mengalikan impedansi penghantar dengan panjang saluran transmisi.

$$Z_T = Z \text{ (ohm/km)} \times L \text{ (km)}$$

$$= 0.236 + j 0.428 \text{ (ohm/km)} \times 26.04 \text{ (km)}$$

$$= 6.145 + j 11.145 \text{ ohm}$$

Menghitung Z_{pu} digunakan persamaan 2.10

$$Z_{pu} = \left(\frac{6.145 + j 11.145}{49 + j 0} \right) = 0.125 + j 0.227 \text{ pu}$$

Dengan menggunakan persamaan yang sama maka impedansi saluran transmisi yang lain dapat diperoleh, seperti pada Tabel VI.

A. Menghitung Arus Pada Saluran Transmisi

Sama halnya dalam menghitung nilai arus pada transformator, untuk menentukan kapasitas circuit breaker, maka perlu diketahui arus yang mengalir di masing-masing saluran transmisi. Pada masing-masing saluran karena tegangan masih dalam bentuk volt, maka akan diubah ke bentuk *pu*. Setelah tegangan sudah diubah ke bentuk *pu*, maka arus pada saluran bisa dihitung.

Tabel VI. DATA HASIL PERHITUNGAN IMPEDANSI SALURAN

| No. | Transmisi 70 kV | Panjang (km) | Z_{total} (ohm) | Z_{baru} (pu) |
|-----|-------------------------------|--------------|--------------------|-------------------|
| 1. | GI Tasik Ria – GI Tomohon | 26.04 | $6.145 + j 11.145$ | $0.125 + j 0.227$ |
| 2. | GI Tomohon – GI Teling | 17 | $3.332 + j 6.987$ | $0.068 + j 0.143$ |
| 3. | GI Teling – GI Ranomut | 3.245 | $0.636 + j 1.334$ | $0.013 + j 0.027$ |
| 4. | GI Ranomut – GI Sawangan | 19.65 | $3.851 + j 8.076$ | $0.079 + j 0.165$ |
| 5. | GI Tomohon – GI Tonsea Lama | 10.039 | $1.968 + j 4.126$ | $0.04 + j 0.084$ |
| 6. | GI Sawangan – GI Tonsea Lama | 7.832 | $1.535 + j 3.219$ | $0.031 + j 0.066$ |
| 7. | GI Sawangan – PLTA Tanggari 1 | 5.896 | $1.156 + j 2.423$ | $0.024 + j 0.049$ |
| 8. | GI Sawangan – PLTA Tanggari 2 | 3.8 | $0.897 + j 1.626$ | $0.018 + j 0.033$ |
| 9. | GI Sawangan – GI Bitung | 28.853 | $4.529 + j 12.089$ | $0.092 + j 0.247$ |

| | | | | |
|-----|-------------------------|----|--------------------|-------------------|
| 10. | GI Bitung – GI Likupang | 34 | $4.012 + j 13.192$ | $0.082 + j 0.269$ |
|-----|-------------------------|----|--------------------|-------------------|

- GI Tasik Ria – GI Tomohon

$$V_{TR-TM} = \frac{66}{70} = 0.943 \text{ pu}$$

$$I_{TR-TM} = \frac{0.943}{0.125 + j 0.227} = 7.544 + j 4.154 \text{ pu}$$

B. Kapasitas CB (Circuit Breaker)

Kapasitas CB dapat ditentukan berdasarkan nilai arus dasar (I_B) dan arus yang sudah dihitung pada masing-masing transformator dan saluran transmisi. Nilai I_B yang digunakan berdasarkan persamaan yang ada, dengan nilai tegangan 70 kV dan daya dasar (S_B) 100 MVA, yaitu :

$$I_B = \frac{S_B}{\sqrt{3} \cdot V_B} = \frac{100 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 70 \cdot 10^3} = \frac{100000}{121.244} = 824.78 \text{ A}$$

Dari nilai I_B yang ada akan dikalikan dengan nilai arus pada masing-masing transformator dan saluran transmisi, akan didapat nilai batas arus untuk menentukan kapasitas CB yang akan digunakan.

C. Penentuan Kapasitas CB pada Transformator

Pada masing-masing transformator dapat ditentukan kapasitas CB yang akan dipasang setelah semua nilai arus dari masing-masing transformator dan nilai arus dasar diketahui.

$$\checkmark I''_{T1} = I_{T1} \times I_B = 0.469 \times 824.78 = 386.822 \text{ A}$$

$$\checkmark I_{CB} = I''_{T1} \times \xi = 386.822 \times 1.6 = 618.92 \text{ A}$$

Dengan menggunakan persamaan yang sama, maka nilai I'' dan I_{CB} pada transformator yang lain dapat diketahui, terdapat pada Tabel VII.

D. Penentuan Kapasitas CB pada Saluran

Sama halnya dengan penentuan kapasitas CB pada transformator, cara untuk menentukan kapasitas CB pada saluran transmisi juga menggunakan persamaan yang sama. Tapi arus yang akan digunakan untuk menghitung I'' menggunakan arus saluran yang sudah diubah dalam bentuk polar.

$$\checkmark I''_{TR-TM} = 8.612 \angle 0.504 \times 824.78 = 7103.005 \angle 0.504$$

$$\checkmark I_{CB} = 7103.005 \angle 0.504 \times 1.6 = 11364.81 \angle 0.504$$

Tabel VII. NILAI ARUS UNTUK MENENTUKAN KAPASITAS CB PADA TRANSFORMATOR

| No. | Transformator | I'' (A) | I_{CB} (kA) |
|-----|---------------|-----------|---------------|
| 1 | T1 | 386.822 | 0.61892 |
| 2 | T2 | 334.861 | 0.53578 |
| 3 | T3 | 250.733 | 0.40117 |
| 4 | T4 | 3757.698 | 6.01232 |
| 5 | T5 | 330.737 | 0.52918 |
| 6 | T6 | 336.51 | 0.53842 |
| 7 | T7 | 400.843 | 0.64135 |
| 8 | T8 | 370.326 | 0.59252 |
| 9 | T9 | 406.617 | 0.65059 |
| 10 | T10 | 285.374 | 0.45659 |
| 11 | T11 | 299.395 | 0.47903 |
| 12 | T12 | 89.901 | 0.14384 |
| 13 | T13 | 89.901 | 0.14384 |
| 14 | T14 | 104.747 | 0.16759 |
| 15 | T15 | 104.747 | 0.16759 |
| 16 | T16 | 494.043 | 0.79047 |
| 17 | T17 | 338.159 | 0.54105 |
| 18 | T18 | 331.562 | 0.53049 |
| 19 | T19 | 201.246 | 0.32199 |
| 20 | T20 | 173.204 | 0.27713 |
| 21 | T21 | 117.944 | 0.18871 |
| 22 | T22 | 89.076 | 0.14252 |
| 23 | T23 | 1304.802 | 2.08768 |

| | | | |
|----|-----|---------|---------|
| 24 | T24 | 378.574 | 0.60572 |
|----|-----|---------|---------|

Tabel VIII. NILAI ARUS UNTUK MENENTUKAN KAPASITAS CB PADA SALURAN TRANSMISI

| No. | Saluran transmisi | I ["] (A) | I _{CB} (kA) |
|-----|------------------------------|--------------------|----------------------|
| 1. | GI Tasik Ria – GI Tomohon | 7103.005∠0.504 | 11.36481∠0.504 |
| 2. | GI Tomohon – GI Teling | 12665.322∠0.443 | 20.26453∠0.443 |
| 3. | GI Teling – GI Ranomut | 66401.388∠0.448 | 106.24222∠0.448 |
| 4. | GI Ranomut – GI Sawangan | 10915.963∠0.447 | 17.46554∠0.447 |
| 5. | GI Tomohon – GI Tonsea Lama | 21535.831∠0.444 | 34.45733∠0.444 |
| 6. | GI Sawangan – GI Tonsea Lama | 27718.381∠0.439 | 44.34941∠0.439 |
| 7. | GI Sawangan – Tanggari 1 | 36085.775∠0.455 | 57.73724∠0.455 |
| 8. | GI Sawangan – Tanggari 2 | 49219.571∠0.499 | 78.75131∠0.499 |
| 9. | GI Sawangan – GI Bitung | 9021.444∠0.356 | 14.43431∠0.356 |
| 10. | GI Bitung – GI Likupang | 9916.329∠0.296 | 15.86613∠0.296 |

Dengan menggunakan persamaan yang sama, maka I["] dan I_{CB} pada saluran transmisi dapat diperoleh seperti pada Tabel VIII.

V. KESIMPULAN

Dari hasil analisa dan pembahasan dapat diperoleh kesimpulan sebagai berikut :

1. CB (*circuit breaker*) berperan penting sebagai salah satu alat yang dapat memproteksi suatu sistem jaringan transmisi, dalam hal ini yaitu pada jaringan 70 kV.
2. Untuk menentukan kapasitas CB (*circuit breaker*) pada jaringan 70 kV, perlu dihitung terlebih dahulu semua nilai reaktansi generator dan transformator, impedansi dari masing-masing saluran. Dengan demikian, nilai-nilai dari semua arus untuk menentukan kapasitas CB dapat diketahui.
 - Untuk I_{CB} pada masing-masing transformator, yaitu: T1= 0.61892 kA; T2= 0.53578 kA; T3= 0.40117 kA; T4= 6.01232 kA; T5= 0.52918 kA; T6= 0.53842 kA; T7= 0.64135 kA; T8= 0.59252 kA; T9= 0.65059 kA; T10= 0.45659 kA; T11= 0.47903 kA; T12= 0.14384 kA; T13= 0.14384 kA; T14= 0.16759 kA; T15= 0.16759 kA; T16= 0.79047 kA; T17= 0.54105 kA; T18= 0.53049 kA; T19= 0.32199 kA; T20= 0.27713 kA; T21= 0.18871 kA; T22= 0.14252 kA; T23= 2.08768 kA; T24= 0.60572 kA
 - Untuk I_{CB} pada masing-masing saluran
 - GI Tasik Ria – GI Tomohon = 11.36481∠0.504 kA
 - GI Tomohon – GI Teling = 20.26453∠0.443 kA
 - GI Teling – GI Ranomut = 106.24222∠0.448 kA
 - GI Ranomut – GI Sawangan = 17.46554∠0.447 kA
 - GI Tomohon – GI Tonsea Lama = 34.45733∠0.444 kA
 - GI Sawangan – GI Tonsea Lama = 44.34941∠0.439 kA
 - GI Sawangan – Tanggari 1 = 57.73724∠0.455 kA

- GI Sawangan – Tanggari 2 = 78.75131∠0.499 kA
- GI Sawangan – GI Bitung = 14.43431∠0.356 kA
- GI Bitung – GI Likupang = 15.86613∠0.296 kA

3. Dari hasil hitungan kapasitas arus pada CB di transformator dan saluran, maka kapasitas CB yang akan digunakan sudah dapat ditentukan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Hadi, "Power System Analysis", WCB McGraw-Hill, Singapore, 1999.
- [2] A. Arismunandar & S. Kuwahara, "Buku Pegangan Teknik Tenaga Listrik, Jilid II Saluran Transmisi", PT Pradnya Paramita, Jakarta.
- [3] A. Arismunandar & S. Kuwahara, "Buku Pegangan Teknik Tenaga Listrik, Jilid II Saluran Transmisi", PT Pradnya Paramita, Jakarta.
- [4] G. Turan, "Modern Power System Analysis", McGraw-Hill, United States of America, 1986.
- [5] G. Turan, "Electric of Power Transmission System Engineering", McGraw-Hill, United States of America, 1998.
- [6] W. D. Stevenson. Jr., "Analisis Sistem Tenaga", Edisi ke empat, Alih Bahasa oleh Ir. Kamal idris, Penerbit Erlangga, Jakarta, 1993.
- [7] T. S. Hutahuruk, "Transmisi Daya Listrik", Erlangga, Jakarta, 1993.
- [8] Tim Penyusun, "Buku Petunjuk Pemutus Tenaga (PMT)", PT. PLN (Persero) Wilayah Sulutenggo, Manado.
- [9] Persyaratan Umum Instalasi Listrik (PUIL), Standar Nasional Indonesia (SNI), 2000.