

ANALISIS PENGGUNAAN REAKTOR PEMBATAS ARUS SEBAGAI PEMBATAS ARUS HUBUNG SINGKAT DI PT. PULP AND PAPER

Khairus Shalih*, Dian Yayan Sukma**, Edy Ervianto**

*Alumni Teknik Elektro Universitas Riau **Jurusan Teknik Elektro Universitas Riau
Kampus Binawidya Km 12,5 Simpang Baru Panam, Pekanbaru, 28293, Indonesia
Jurusan Teknik Elektro Universitas Riau
Email: khairulshalih@gmail.com

ABSTRACT

To keep stability in power supply distribution, PT. Pulp and Paper used loop distribution system in their main substation. This thing caused possibility of short-circuit current may exceed circuit breaker's capability. So we need to limiting that short-circuit current not exceed capability of existing circuit breaker. Short-circuit calculation will be done in main substation bus. With keeping possibility of short-circuit current in secure level, so possibility of short-circuit current that will happened in load bus will not exceed circuit breaker's capability. From the calculation of 3 phase short-circuit current IEC 60909 standard using ETAP Power Station 11, noted that 3 phase short-circuit making current at AC 4, AC 11, and AC 15 substation still exceed circuit breaker's capability. With added current limiting reactors at outgoing TC 40, TC 11, and TC 15 transformer with value of the reaktans eachone 0.37779 ohm, 0.13203 ohm, and 0.21701 ohm, the short-circuit making current at AC 4 substation decrease from 73.014 kA to 62.734 kA, at AC 11 substation decrease from 67.407 kA to 62.421 kA, and at AC 15 substation decrease from 70.930 kA to 62.731 kA. Where the lowest voltage at load bus is 19.263 volt.

Keywords: short-circuit, current limiting reactor, ETAP 11

1. PENDAHULUAN

Bertambahnya pembangkit-pembangkit tenaga listrik yang baru sebagai respon meningkatnya permintaan akan energi listrik menjadi penyebab naiknya level arus gangguan hubung singkat pada jaringan sistem tenaga. Besarnya arus hubung singkat yang ada berbeda antara satu titik dengan titik lainnya. Sehingga perlu dilakukan perhitungan pada setiap bagian dalam jaringan sehingga dapat ditentukan klasifikasi peralatan-peralatan proteksi yang akan digunakan.

Gangguan hubung singkat yang sering terjadi dalam urutan jumlah kejadian pada sistem tenaga listrik adalah gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah, fasa ke fasa, dua fasa ke tanah dan tiga fasa. Gangguan tiga fasa jarang terjadi di dalam sistem tenaga, tetapi memiliki nilai arus gangguan yang terbesar. Sehingga dalam menentukan kapasitas

pemutusan suatu pemutus tenaga ditentukan berdasarkan nilai arus gangguan hubung singkat tiga fasa.

Sebagai salah satu industri yang terus berkembang, kebutuhan akan energi listrik di PT. Pulp and Paper terus meningkat dari waktu ke waktu. Hal ini menyebabkan perusahaan yang telah berdiri sejak tahun 1993 ini terus menambah kapasitas daya yang dihasilkan pembangkit atau menambah pembangkit baru untuk mencukupi kebutuhan mereka akan energi listrik. Dengan meningkatnya energi listrik yang dihasilkan, menyebabkan besar arus hubung singkat pada sistem akan terus meningkat pula.

Kemampuan pemutus arus gangguan (*breaking capacity*) dari peralatan seperti pemutus tenaga (*circuit breaker*) tidak dapat diperbaharui. Dengan kata lain, untuk meningkatkan kemampuan pemutusan dari

suatu pemutus tenaga (PMT) hanya dapat dilakukan dengan mengganti pemutus tenaga tersebut. Jika hal ini dilakukan, maka akan membutuhkan investasi yang sangat besar karena diikuti dengan penggantian *switchgear* dan peralatan lainnya. Dalam sisi teknik, penggantian *switchgear* tidak dapat mengurangi besarnya arus gangguan hubung singkat yang terjadi.

Alternatif lain yang dapat dilakukan untuk mengatasi besarnya arus hubung singkat yang terjadi adalah dengan menggunakan peralatan pembatas arus yang berfungsi untuk membatasi besar arus gangguan hubung singkat tersebut. Salah satunya reaktor pembatas arus. Disamping kemampuannya dalam membatasi arus hubung singkat, reaktor pembatas arus mempunyai dampak negatif seperti jatuh tegangan. Sehingga perlu dilakukan evaluasi terhadap reaktor pembatas arus yang digunakan.

2. LANDASAN TEORI

2.1 Current Limiting Reactor

Arus hubung singkat mempunyai kemungkinan yang cukup besar untuk dapat menyebabkan kerusakan pada saluran dan peralatan lain yang terhubung dalam jaringan sistem tenaga. Kapasitas pemutusan dari suatu pemutus tenaga (PMT) harus mampu memutuskan arus hubung singkat yang terjadi. Menurut Dann dan Rudd (1915) arus yang dapat mengalir ketika hubung singkat terjadi tergantung pada besarnya impedansi saluran. Untuk menjaga arus hubung singkat dalam batas aman, dapat dilakukan dengan menaikkan nilai reaktansi antara sumber tenaga dan lokasi gangguan. Salah satu metode yang digunakan untuk menaikkan nilai reaktansi dari jaringan tenaga listrik adalah dengan menggunakan peralatan *current limiting reactors (CLR)*.

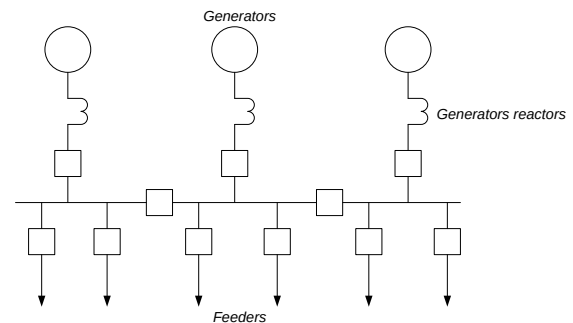
Current limiting reactors digunakan untuk mengurangi arus yang dapat mengalir ketika terjadi hubung singkat, dengan tujuan untuk menurunkan tingkat stress pada konduktor, pemutus tenaga, dan peralatan lain yang dialiri arus gangguan. Hal ini memungkinkan untuk dapat menggunakan pemutus tenaga dengan kapasitas pemutusan yang rendah (Skrotzki, 1954: 435).

2.1.1 Penempatan Reaktor

Berdasarkan penempatannya di dalam sistem, reaktor dapat diklasifikasikan menjadi

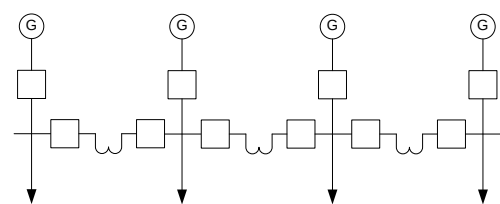
tiga, yaitu: reaktor pembatas arus generator, reaktor pembatas arus busbar dan reaktor pembatas arus feeder (Dann dan Rudd, 1915).

- Reaktor pembatas arus generator, biasanya digunakan pada generator yang memiliki nilai reaktansi dan terhubung langsung dengan busbar. Hal ini bertujuan untuk memproteksi busbar dari arus gangguan yang mengalir dari generator. Pemasangan reaktor pembatas arus generator dapat dilihat pada gambar 2.1.

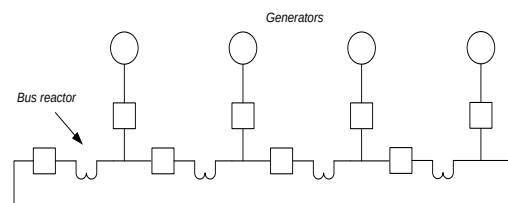


Gambar 2.1 Reaktor Generator
(Skrotzki, 1954: 435)

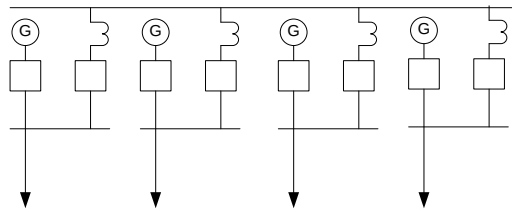
- Reaktor pembatas arus busbar digunakan apabila beberapa feeder dan sumber tenaga yang penting terkonsentrasi hanya pada satu bus, sehingga perlu untuk memisahkan bus agar gangguan tidak akan mengakibatkan pemadaman yang luas pada sistem tenaga (Irfan, 2007). Ada tiga cara penempatan reaktor pembatas arus busbar yang banyak digunakan, yaitu: (a) sistem *straight bus*, (b) sistem *ring bus*, dan (c) sistem *star bus*.



Gambar 2.2 Sistem Straight bus
(Irfan, 2007)

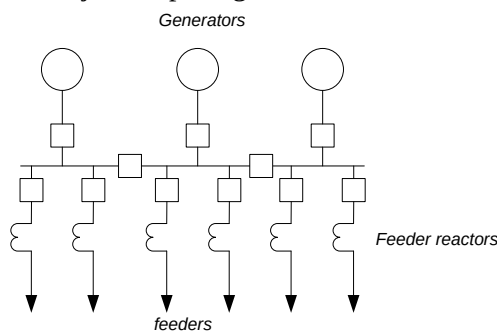


Gambar 2.3 Sistem ring bus
(Skrotzki, 1954: 436)



Gambar 2.4 Gambar 2.5 Sistem star bus
(Irfan, 2007)

- c. Reaktor pembatas arus *feeder* (penyulang) yang ditempatkan pada *outgoing feeder* bertujuan untuk membatasi besarnya arus hubung singkat yang terjadi. Hal ini memungkinkan untuk menggunakan PMT dengan kapasitas pemutusan yang rendah. Reaktor dapat dihubungkan secara seri dengan penyulang-penyulang seperti ditunjukkan pada gambar 2.5.



Gambar 2.5 Reaktor penyulang
(Skrotzki, 1954: 435)

2.1.2 Reaktansi Reaktor

Untuk menentukan nilai reaktansi reaktor yang digunakan, maka dapat digunakan persamaan (1) berikut ini :

$$X_R = \frac{V_s}{\sqrt{3}} \times \left[\frac{1}{I_{sCa}} - \frac{1}{I_{sCb}} \right] \quad (1)$$

Dikarenakan perhitungan arus hubung singkat menggunakan standar IEC 60909 dimana terdapat factor tegangan, maka persamaan (1) menjadi:

$$X_R = \frac{cV_s}{\sqrt{3}} \times \left[\frac{1}{I_{sCa}} - \frac{1}{I_{sCb}} \right] \quad (2)$$

Dimana:

X_R = Reaktansi reaktor

V_s = Tegangan nominal line to line (Volt)

c = Faktor tegangan

I_{sCa} = Arus hubung singkat setelah melewati reaktor/Target (Ampere)

I_{sCb} = Arus hubung singkat sebelum melewati reaktor/Awal (Ampere)

2.2 Etap Powerstation 11

ETAP PowerStation 11.0.0 merupakan program yang digunakan untuk menganalisa jaringan listrik. Program ini diciptakan dengan tiga konsep utama yaitu:

1. Operasi nyata virtual (*Virtual Reality Operation*).

Pengoperasian program ini menyerupai operasi sistem listrik yang sesungguhnya di lapangan.

2. Data gabungan total (*Total Integration of Data*)

ETAP PowerStation versi 11.0.0 menggabungkan sifat kelistrikan, logika, mesin, dan fisik dari sistem dalam database yang sama. Hal ini mencegah data ganda dimasukkan ke dalam satu komponen.

3. Kesederhanaan input data (*Simplicity in Data Entry*)

ETAP PoweStation 11.0.0 menggunakan data lengkap dari peralatan listrik yang hanya membutuhkan satu jenis pemasukan data saja. *Data Editor* dirancang untuk mempercepat pemasukan data dengan menggunakan data minimum saja. Hal ini dilakukan dengan cara menyusun *property editor* untuk memasukkan data yang dibutuhkan saja pada analisa dan desain yang berbeda.

Salah satu fasilitas yang terdapat pada ETAP PowerStation 11.0.0 adalah kemampuannya untuk menjalankan analisa aliran daya baik dengan menggunakan metode *Accelerated Gauss Siedel*, *Newton Raphson*, maupun *Fast de Coupled* secara lebih cepat dan tepat daripada metode manual.

2.3 Analisis Aliran Daya

Studi aliran daya adalah studi yang dilakukan untuk mendapatkan informasi mengenai magnitudo dan sudut fasa tegangan pada terminal atau bus (simpul) tertentu dalam sistem tenaga listrik. Dari dua besaran ini kemudian dapat diperoleh besaran-besaran lain seperti aliran daya aktif dan daya reaktif serta arus yang mengalir pada semua peralatan yang terhubung antara bus dengan bus. Representasi fasa tunggal selalu dilakukan karena sistem dianggap seimbang.

Untuk mendapatkan penyelesaian aliran daya pada setiap bus (simpul) perlu diketahui dua buah parameter, tergantung pada parameter-parameter yang diketahui, maka

setiap bus (simpul) di sistem dibagi dalam 3 macam, yaitu (Cekdin, 2007: 1):

1. *Slack bus* atau *swing bus* atau bus referensi

Slack bus berfungsi untuk menyuplai kekurangan daya real P dan daya reaktif Q pada sistem. Parameter yang diketahui adalah harga skalar tegangan $|V|$ dan sudut fasanya θ .

2. *Voltage controlled bus* atau bus generator

Parameter yang diketahui adalah daya real P dan harga skalar tegangan $|V|$, sedangkan parameter yang tidak diketahui θ daya reaktif Q .

3. *Load bus* atau bus beban

Parameter yang diketahui adalah daya real P dan daya reaktif Q .

2.3.1 Persamaan Aliran Daya

Persamaan aliran daya adalah persamaan yang diformulasikan dari model jaringan sistem tenaga listrik yang menggunakan hukum *kirchhoff*. Aplikasi Hukum Kirchhoff pada bus i diberikan dalam (Cekdin, 2007: 4) :

$$I_i = y_{i0}V_i + y_{i1}(V_i - V_1) + y_{i2}(V_i - V_2) + \dots + y_{in}(V_i - V_n) \\ = (y_{i0} + y_{i1} + y_{i2} + \dots + y_{in})V_i - y_{i1}V_1 - y_{i2}V_2 - \dots - y_{in}V_n \quad (3)$$

Atau,

$$I_i = V_i \sum_{j=0}^n y_{ij} - \sum_{j=1}^n y_{ij}V_j \quad j \neq i \quad (4)$$

2.3.2 Metode Newton Raphson

Dasar dari metode Newton Raphson dalam penyelesaian aliran daya adalah deret Taylor untuk suatu fungsi dengan dua variable lebih. Metode Newton Raphson menyelesaikan masalah aliran daya dengan menggunakan suatu set persamaan non linier untuk menghitung besarnya tegangan dan sudut fasa tegangan tiap bus (Cekdin, 2007: 8).

Dalam metode ini persamaan aliran daya dirumuskan dalam bentuk polar. Arus yang memasuki bus i dapat dicari dengan persamaan (4). Persamaan tersebut dapat ditulis ulang menjadi:

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij}V_{ij} \quad (5)$$

Persamaan di atas bila ditulis dalam bentuk polar adalah:

$$I_i = \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \quad (6)$$

Daya kompleks pada bus i adalah:

$$P_i - jQ_i = V_i^* I_i \quad (7)$$

Substitusi Persamaan (6) untuk I_i ke dalam Persamaan (7) menghasilkan:

$$P_i - jQ_i = |V_i| \angle -\delta_i \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \quad (8)$$

Pisahkan bagian real dan imajiner:

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (9)$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (10)$$

Persamaan (9) dan (10) membentuk persamaan aljabar non linier dengan variabel sendiri. Besar setiap variabel dinyatakan dalam satuan per unit dan untuk sudut fasa dinyatakan dalam satuan radian.

Matriks Jacobian memberikan perbandingan linier antara perubahan pada sudut tegangan $\Delta\delta_i^{(k)}$ dan besarnya tegangan $\Delta|V_i^{(k)}|$ dengan sedikit perubahan pada daya aktif ($\Delta P_i^{(k)}$) dan daya reaktif ($\Delta Q_i^{(k)}$). Dalam bentuk singkat dapat ditulis seperti berikut:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta|V| \end{bmatrix} \quad (11)$$

Harga dari $\Delta P_i^{(k)}$ dan $\Delta Q_i^{(k)}$ berbeda antara yang terjadwal dengan nilai perhitungan, dan ini disebut sisa daya yang diberikan dengan:

$$\Delta P_i^{(k)} = P_i^{sch} - P_i^k \quad (12)$$

$$\Delta Q_i^{(k)} = Q_i^{sch} - Q_i^k \quad (13)$$

Perhitungan baru untuk sudut fasa dan tegangan bus adalah:

$$\delta_i^{(k+1)} = \delta_i^{(k)} + \Delta\delta_i^{(k)} \quad (14)$$

$$|V_i^{(k+1)}| = |V_i^{(k)}| + \Delta|V_i^{(k)}| \quad (15)$$

2.4 Perhitungan Arus Hubung Singkat Standar IEC 60909

1. Arus Hubung Singkat 3 Fasa Simetris Awal (I_k'')

Arus hubung singkat 3 fasa simetris awal (I_k'') adalah nilai efektif pada komponen simetris AC dari calon arus hubung singkat 3

fasa yang berlaku pada saat gangguan hubung singkat. untuk menghitung I_k'' , dapat digunakan rumus:

$$I_k'' = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_k} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}\sqrt{R_k^2 + X_k^2}} \quad (16)$$

Dimana:

U_n = Tegangan nominal

c = Faktor Tegangan (dapat dilihat pada tabel 2.1)

R_e = Resistansi ekuivalen semua R yang dilalui arus hubung singkat

X_e = Reaktansi ekuivalen semua X yang dilalui arus hubung singkat

Tabel 2.1 Faktor tegangan

Nominal Voltage U_n	Voltage factor c for the calculation of	
	maximum S-C Current	minimum S-C Current
Low Voltage 100 V to 1000 V	1.05	0.95
Medium Voltage >1kV to 35 kV	1.1	1
High Voltage > 35 kV		

2. Arus Puncak Hubung Singkat (I_p)

Arus puncak hubung singkat (I_p) adalah arus hubung singkat subtransien tertinggi pada setengah periode pertama. Untuk menghitung arus I_p dapat digunakan persamaan:

$$I_p = k_s \times \sqrt{2} I_k'' \quad (17)$$

$$k_s = 1.02 \times 0.98 e^{-3\frac{R_e}{X_e}} \quad (18)$$

3. METODE PENELITIAN

3.1 Studi Literatur

Studi literatur bertujuan untuk mendapatkan teori atau landasan yang relevan terhadap objek yang akan diteliti dalam tugas akhir ini. Sumber yang digunakan dalam studi literatur diperoleh dari *e-book*, buku teks, simposium, skripsi, dan jurnal-jurnal ilmiah.

3.2 Survei Lapangan

Survei lapangan bertujuan untuk meninjau dan mengumpulkan variabel-variabel objek yang akan diteliti, yaitu penggunaan reaktor pembatas arus untuk membatasi arus hubung singkat di PT. Pulp and Paper serta

mengumpulkan data-data yang diperlukan dalam penelitian tugas akhir ini.

3.3 Objek Penelitian

Objek yang dijadikan sebagai bahan penelitian untuk tugas akhir ini adalah reaktor pembatas arus (CLR) yang digunakan pada sistem tenaga listrik di PT. Pulp and Paper. Penggunaan reaktor ini bertujuan untuk membatasi arus gangguan hubung singkat yang dapat mengalir sehingga tidak melebihi kapasitas hubung singkat dari pemutus tenaga (PMT) yang ada.

Di PT. Pulp and Paper terdapat berbagai macam peralatan yang digunakan untuk menjalankan fungsi pabrik antara lain trafo, motor-motor untuk menggerakkan konveyor, motor-motor untuk menggerakkan pompa dan kipas, beban penerangan, panel-panel, berbagai alat instrumentasi dan juga penghantar.

3.3.1 Data Penelitian

Data-data yang diperoleh dari hasil observasi dan penelitian di lapangan adalah sebagai berikut:

- Data Generator
- Data Transformator
- Data Saluran
- Data Pemutus Tenaga
- Data Beban Penuh

3.4 Konfigurasi Studi Kasus

3.4.1 Sistem Tenaga Listrik Tanpa CLR

Studi kasus ini menggambarkan sistem tenaga listrik existing tanpa penambahan reaktor pembatas arus. Simulasi ini dilakukan dengan tujuan untuk mengevaluasi kemampuan PMT terhadap kemungkinan terjadinya gangguan hubung singkat. Sehingga dapat ditentukan PMT mana saja yang telah terlewat kapasitas hubung singkatnya. Besar arus hubung singkat yang mungkin terjadi akan digunakan untuk menentukan rating minimal reaktor pembatas arus yang harus digunakan.

3.4.2 Sistem Tenaga Listrik Existing

Studi kasus ini menggambarkan sistem tenaga listrik existing, dimana telah terpasang 7 buah reaktor pembatas arus. Simulasi ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui pembatasan arus hubung singkat yang dapat dicapai dengan penggunaan reaktor pembatas arus existing. Evaluasi terhadap kapasitas PMT kembali dilakukan untuk mengetahui PMT

mana saja yang masih terlampaui kapasitas hubung singkat. Selain itu, juga dilakukan perhitungan terhadap jatuh tegangan yang ditimbulkan akibat pemasangan reaktor pembatas arus. Hal ini bertujuan untuk menjaga drop tegangan pada sistem tidak lebih dari 5 % sesuai dengan standar SPLN 72:1987.

3.4.3 Sistem Tenaga Listrik CLR Rekomendasi

Studi kasus ini menggambarkan hasil evaluasi penggunaan reaktor pembatas arus pada kondisi sistem tenaga listrik existing. Dimana dilakukan penambahan reaktor pembatas arus pada setiap bus yang masih terlewat kapasitas hubung singkat PMT sehingga parameter arus gangguan hubung singkat lebih dari kapasitas hubung singkat PMT serta drop tegangan pada beban tidak lebih dari 5%.

3.5 Program yang Digunakan

Sistem tenaga listrik industri saat ini telah demikian kompleks sehingga perhitungan ataupun analisis hubung singkat yang dilakukan secara manual akan membutuhkan waktu dan energi yang sangat besar dan berbagai keterbatasan pun memaksa diterapkannya asumsi-asumsi. Untuk itu, perhitungan aliran daya dan arus hubung singkat disimulasikan dengan menggunakan bantuan program ETAP *Powerstation 11*. Pengoperasian program ini hampir sama dengan sistem tenaga listrik secara nyata. Data lengkap dari setiap peralatan listrik dibutuhkan pada proses pemasukan data.

Program ETAP *Powerstation 11* terdapat fasilitas untuk membuat *single line diagram* yang sesuai dengan objek penelitian dari menu-menu program yang ada pada program ETAP *Powerstation 11*, sehingga memberikan kemudahan bagi pengguna untuk menjalankan program tersebut.

Single line diagram atau diagram segaris sistem tenaga listrik merupakan data awal sebagai masukan pada ETAP *Powerstation 11*. Selain itu, juga diperlukan data-data masukan berupa karakteristik komponen tenaga listrik seperti generator, trafo, pemutus tenaga, beban, dan jenis penghantar.

3.5.1 Data Masukan Program

Data-data yang diperlukan untuk perhitungan aliran daya dan hubung singkat menggunakan software ETAP antara lain:

1. Data Bus, terdiri dari

- ID bus
- Nominal kV

2. Data Kabel, terdiri dari

- Panjang kabel
- Nilai atau besaran dari R dan X

3. Data Generator, terdiri dari

- ID generator
- Mode Operasi
- Nominal kV
- Rating MW/MVA
- Reaktansi sub-transient, transient, dan steady-state

4. Data Transformator, terdiri dari

- ID transformator
- Nominal kV primer dan sekunder
- Rating KVA/MVA
- % Z
- Hubungan belitan

5. Data Beban, terdiri dari

- ID beban
- Rating KVA/MVA
- Nominal kV
- Faktor daya

Untuk data atau parameter yang diperlukan tetapi tidak tercantum pada peralatan, maka digunakan data atau parameter yang terdapat dalam *library* ETAP *Powerstation 11*, kemudian disesuaikan dengan data peralatan sebenarnya.

3.5.2 Simulasi Aliran Daya pada ETAP *Powerstation 11*

Simulasi aliran daya dilakukan untuk menentukan arus nominal pada keadaan normal yang melewati PMT, dimana arus ini besarnya berbeda-beda untuk setiap PMT. Simulasi aliran daya menggunakan ETAP *Powerstation 11* dapat dilakukan dengan 3 metode, yaitu : Newton-Raphson, Fast de Couple, dan Accelerated Gauss-Seidel. Di dalam penelitian ini penulis menggunakan metode Newton-Raphson. Dimana sebelum dilakukan simulasi perhitungan aliran daya, terlebih dahulu dimasukkan data iterasi maksimum dan ketelitian.

3.5.3 Perhitungan Arus Hubung Singkat pada ETAP *Powerstation 11*

Perhitungan arus hubung singkat menggunakan ETAP *Powerstation 11* dapat dilakukan dengan 2 standar, yaitu: ANSI/IEEE dan IEC. Di dalam penelitian ini penulis menggunakan standar IEC 60909 dalam perhitungan arus hubung singkat. Dimana sebelum dilakukan simulasi perhitungan arus

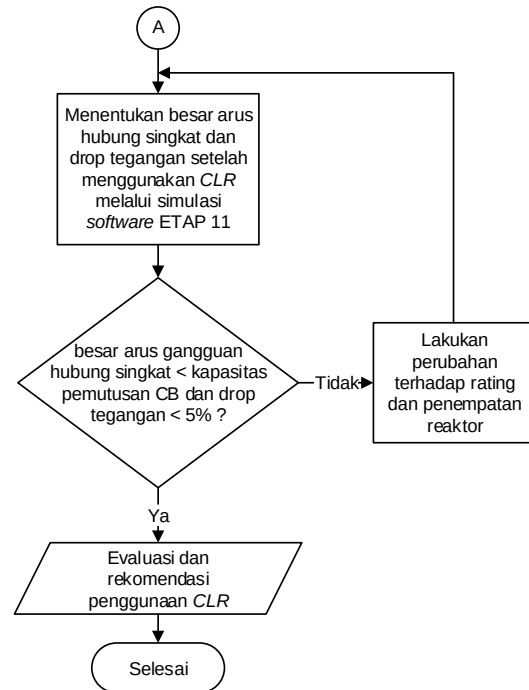
hubung singkat, terlebih dahulu dipilih faktor tegangan dan metode perhitungan.

Hasil dari perhitungan hubung singkat ini digunakan untuk mengevaluasi kemampuan PMT saat terjadi gangguan hubung singkat. Evaluasi PMT dapat dilihat dari nilai arus puncak hubung singkat (*peak short circuit current*).

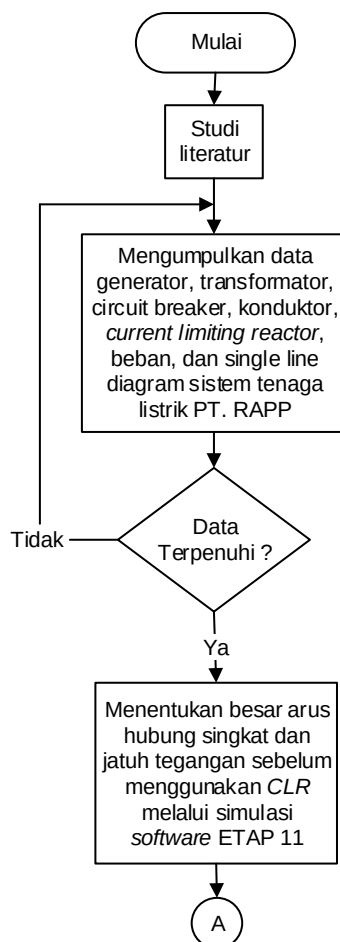
Perhitungan arus hubung singkat dilakukan pada setiap substation. Hal ini dikarenakan besar arus hubung singkat yang terjadi di pangkal setiap saluran/feeder sama dengan besar arus hubung singkat yang terjadi pada bus substation. Selain itu, kontribusi arus hubung singkat terbesar berasal dari sisi sumber atau pembangkit. Sehingga besar arus hubung singkat pada setiap bus beban lebih kecil dari besar arus hubung singkat pada bus substation.

3.6 Prosedur Penelitian

Secara umum prosedur penelitian dijalankan sesuai dengan tahapan-tahapan pada diagram alir (*flowchart*) penelitian Gambar 3.1.

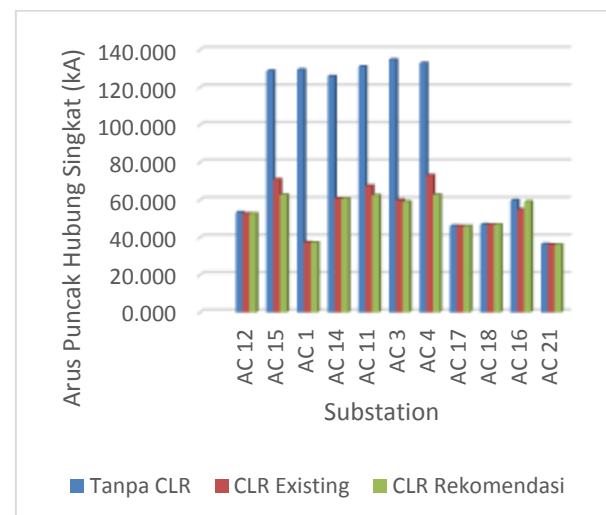


Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian



4. ANALISIS DAN HASIL

Dari hasil perhitungan arus hubung singkat standar IEC 60909 dengan bantuan *software* ETAP 11 seperti terlampir pada gambar 4.1 dapat dilihat arus puncak hubung singkat pada pangkal saluran/feeder yang melewati PMT pada masing-masing substation system tenaga listrik PT. Pulp and Paper.



Gambar 4.1 Arus Puncak Hubung Singkat Pada Masing-masing Substation Perstudi-kasus

Dari gambar 4.1 di atas dapat dilihat bahwa setelah menggunakan CLR rekomendasi arus

hubung singkat pada pangkal saluran yang melewati PMT setiap substation menurun.

Pada substation AC 12, arus puncak hubung singkat pada pangkal saluran yang melewati PMT menurun dari 53.291 kA menjadi 52.633 kA.

Pada substation AC 15, arus puncak hubung singkat pada pangkal saluran yang melewati PMT menurun dari 128.730 kA menjadi 62.731 kA.

Pada substation AC 1, arus puncak hubung singkat pada pangkal saluran yang melewati PMT menurun dari 129.395 kA menjadi 37.266 kA.

Pada substation AC 14, arus puncak hubung singkat pada pangkal saluran yang melewati PMT menurun dari 125.883 kA menjadi 60.639 kA.

Pada substation AC 11, arus puncak hubung singkat pada pangkal saluran yang melewati PMT menurun dari 131.064 kA menjadi 62.421 kA.

Pada substation AC 3, arus puncak hubung singkat pada pangkal saluran yang melewati PMT menurun dari 134.765 kA menjadi 59.026 kA.

Pada substation AC 4, arus puncak hubung singkat pada pangkal saluran yang melewati PMT menurun dari 132.941 kA menjadi 62.734 kA.

Pada substation AC 17, arus puncak hubung singkat pada pangkal saluran yang melewati PMT menurun dari 46.198 kA menjadi 45.976 kA.

Pada substation AC 18, arus puncak hubung singkat pada pangkal saluran yang melewati PMT menurun dari 46.917 kA menjadi 46.680 kA.

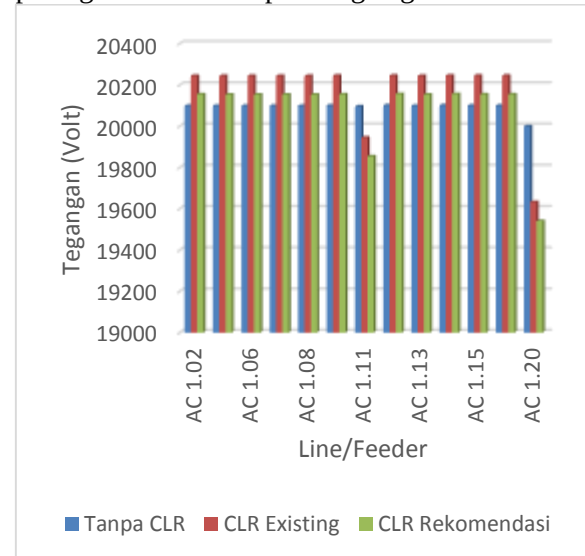
Pada substation AC 16, arus puncak hubung singkat pada pangkal saluran yang melewati PMT menurun dari 59.739 kA menjadi 59.044 kA.

Pada substation AC 21, arus puncak hubung singkat pada pangkal saluran yang melewati PMT menurun dari 36.362 kA menjadi 36.077 kA.

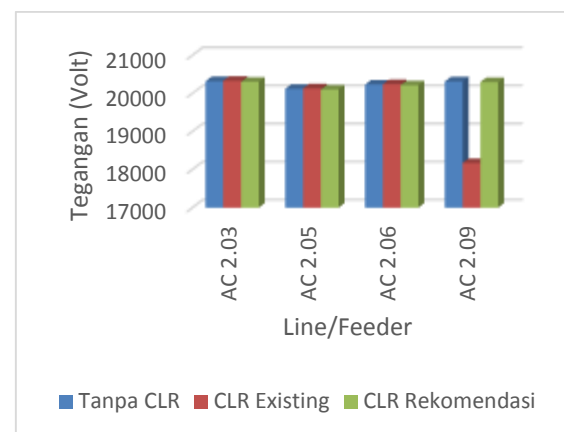
Dari pembahasan di atas maka di dapat penurunan rata-rata arus hubung singkat pada pangkal saluran setelah menggunakan CLR rekomendasi dari 93.208 kA menjadi 53.202 kA atau 42.92 %

Hasil perhitungan aliran daya menggunakan metode newton raphson melalui simulasi software ETAP 11, didapatkan tegangan pada masing-masing feeder sistem

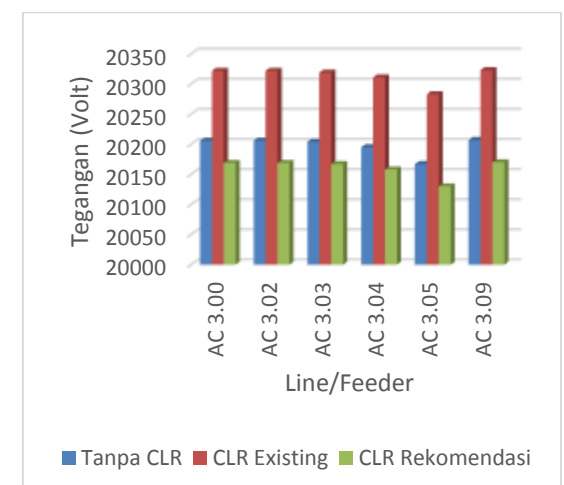
tenaga listrik PT. Pulp and Paper dapat dilihat pada gambar 4.2 sampai dengan gambar 4.13.



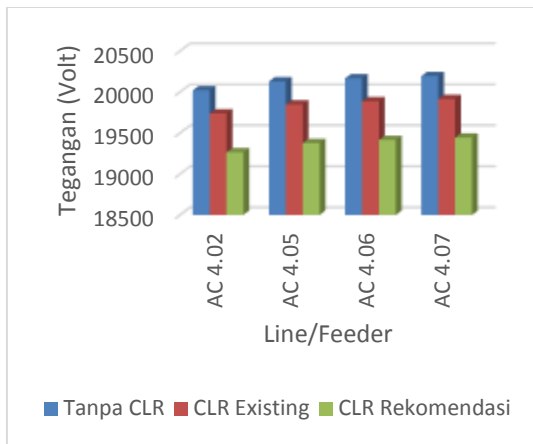
Gambar 4.2 Tegangan pada masing-masing feeder pada substation AC 1 per-studi kasus



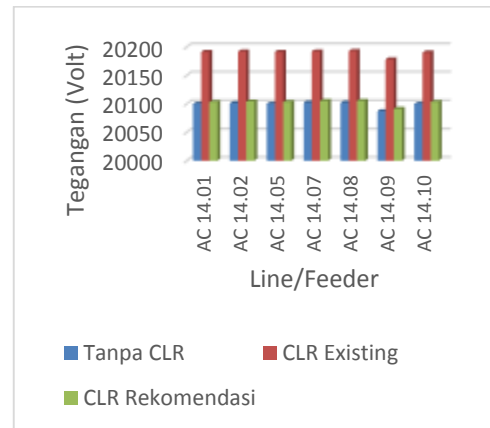
Gambar 4.3 Tegangan pada masing-masing feeder pada substation AC 2 per-studi kasus



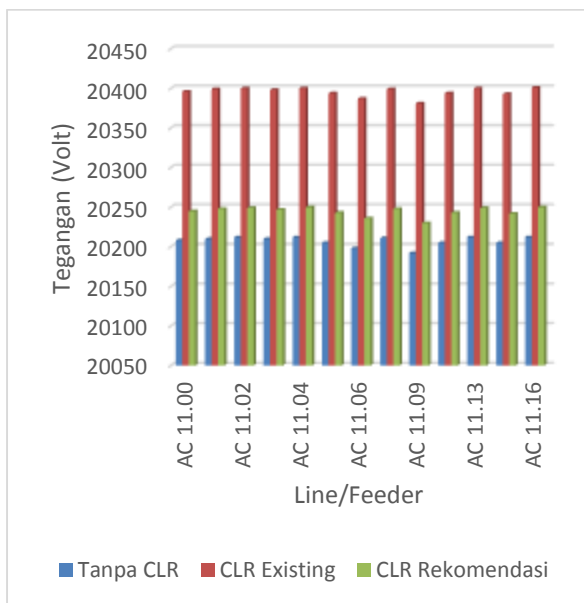
Gambar 4.4 Tegangan pada masing-masing feeder pada substation AC 3 per-studi kasus



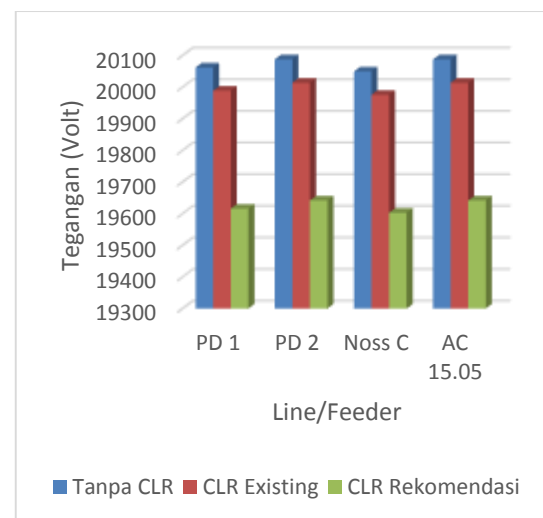
Gambar 4.5 Tegangan pada masing-masing feeder pada substation AC 4 per-studi kasus



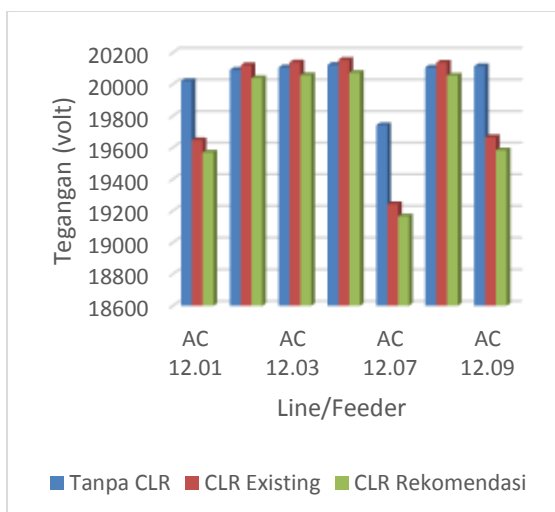
Gambar 4.8 Tegangan pada masing-masing feeder pada substation AC 14 perstudi kasus



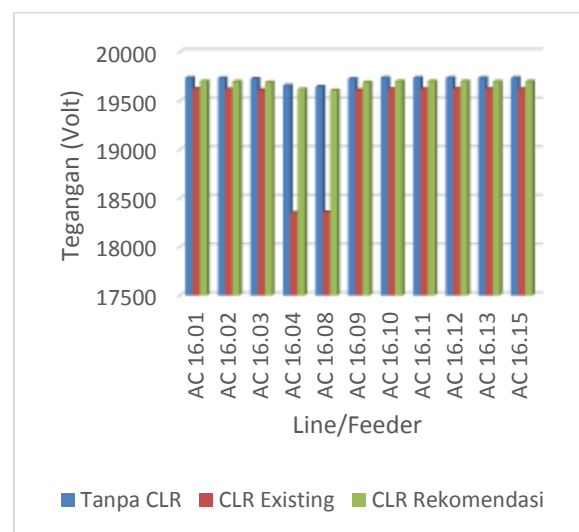
Gambar 4.6 Tegangan pada masing-masing feeder pada substation AC 11 per-studi kasus



Gambar 4.9 Tegangan pada masing-masing feeder pada substation AC 15 per-studi kasus



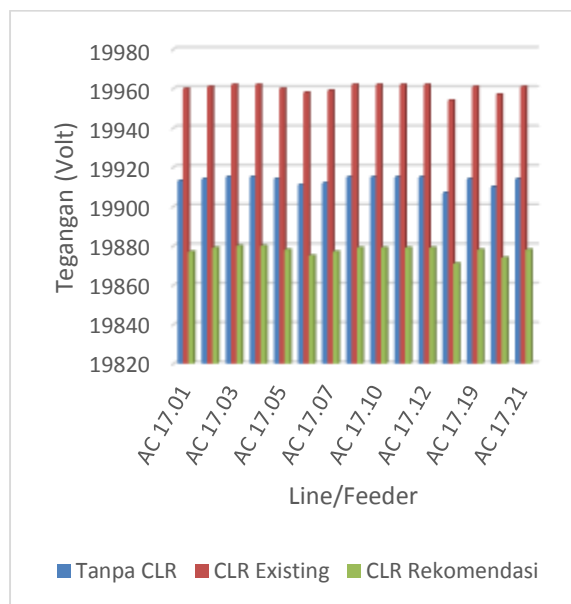
Gambar 4.7 Tegangan pada masing-masing feeder pada substation AC 12 per-studi kasus



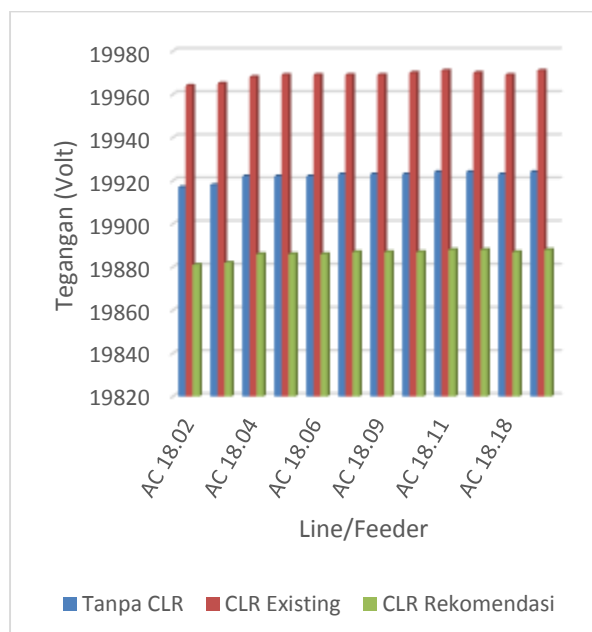
Gambar 4.10 Tegangan pada masing-masing feeder pada substation AC 16 per-studi kasus

Dari gambar 4.10 dapat dilihat bahwa pada system tenaga listrik menggunakan CLR *Existing* tegangan pada feeder AC 16.04 dan AC 16.08 masing-masing 18347 volt dan 18355 volt. Sehingga penggunaan reactor LC 16.04 dan LC 16.08 pada kedua feeder tersebut tidak direkomendasikan.

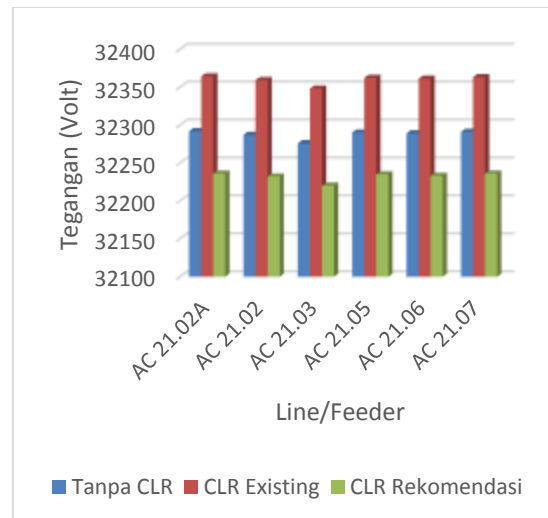
Selain itu, dari gambar 4.1 dapat dilihat bahwa arus puncak hubung yang melewati PMT pada substation AC 16 masih berada di bawah kapasitas arus puncak hubung singkat pemutus tenaga.



Gambar 4.11 Tegangan pada masing-masing feeder pada substation AC 17 per-studi kasus



Gambar 4.12 Tegangan pada masing-masing feeder pada substation AC 18 per-studi kasus



Gambar 4.13 Tegangan pada masing-masing feeder pada substation AC 21 per-studi kasus

Dari gambar 4.3 dapat dilihat bahwa tegangan pada feeder AC 2.09 ketika beban penuh adalah 18175 volt dan sudah melewati batas jatuh tegangan maksimum. Sehingga penggunaan reactor LC 471 pada feeder AC 2.09 tidak direkomendasikan.

Dari gambar 4.2 sampai dengan gambar 4.13 diketahui bahwa tegangan beban terendah system tenaga listrik tanpa CLR adalah 19643 volt. Sedangkan pada system tenaga listrik menggunakan CLR rekomendasi tegangan beban terendah adalah 19263 volt

1. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

1. Dengan menggunakan reaktor pembatas arus penggantian PMT pada 6 substation di PT. Pulp and Paper yang sudah terlewati kapasitas arus puncaknya dapat dihindari.
2. Penggunaan reaktor LC 471 pada feeder AC 2.09, reaktor LC 16.04 pada feeder AC 16.04, dan LC 16.08 pada feeder AC 16.08 tidak direkomendasikan karena jatuh tegangan pada saat beban penuh melebihi batas jatuh tegangan maksimum 5%.
3. Dengan tambahan reaktor pembatas arus pada keluaran trafo TC 40, TC 11, dan TC 15, arus puncak hubung singkat 3 fasa pada pangkal saluran yang melewati PMT pada substation AC 4 turun dari 73.014 kA menjadi 62.734 kA, pada substation AC 11 turun dari 67.407 kA menjadi 62.421, dan pada

substation AC 15 turun dari 70.930 kA menjadi 62.731 kA. Dimana tegangan terendah pada bus beban adalah 19263 Volt atau 96.32 % dari tegangan nominal.

5.2 Saran

Adapun saran yang ingin disampaikan oleh peneliti adalah untuk penelitian selanjutnya dapat menggunakan teknik pembatasan arus gangguan lainnya seperti *superconducting fault current limiter* dan *solid state fault current limiter* serta mempelajari cara kerjanya masing-masing.

DAFTAR PUSTAKA

- Cekdin, Cekmas. 2007. *Sistem Tenaga Listrik*. Penerbit Andi. Yogyakarta
- Dann, W.M. dan H.H. Rudd. 1915. The Use of Current-Limiting Reactors. *Symposium Meeting of the Society of Mechanical, Electrical and Steam Engineers, Boody House, Toledo, Ohio*. June 17-18
- Irfan, Darul. 2007. Analisis Penggunaan Reaktor Seri Sebagai Pembatas Arus Hubung Singkat di Busbar 150 kV GI Plumpang. *Tesis*. S2 Teknik Elektro UGM. Yogyakarta
- Skrotzki, Bernhardt G.A. 1954. *Electric Transmission and Distribution*. Robert E. Krieger Publishing Company, Inc. Florida