

PENGGUNAAN REAKTOR SERI UNTUK MENGURANGI ARUS HUBUNG SINGKAT

Wahyudin SN; Retno Aita Diantari; Guntur Febby Ramadhan

Teknik Elektro, STT-PLN
¹wahyudin.sn@sttpln.ac.id
²retno_aita@yahoo.co.id
³guntur_fr@gmail.com

Abstract : *Three-phase short circuit current at the busbars of 20 kV power transformers 150/20 kV substation is the largest fault current value to be able to cut off the circuit breaker. Breaking current circuit breaker owned by either side of the 150 kV and 20 kV should be able to break the short circuit current is within a certain time. The normal operation of power transformers 150/20 kV substation in a parallel on the side of 150 kV, 20 kV, while the side of each transformer supplying a load busbar respectively. Whereas in certain circumstances the transformer works parallel with the other transformer to supply the load together, short circuit current on the busbar 20 kV become magnified. To reduce that short circuit current on the busbar, then at 20 kV busbar coupling mounted reactor series. This paper will discuss how much value of the reactance of the reactor 20 kV busbar coupling in order to obtain short-circuit current value desired by considering the voltage droop allowed on the busbar.*

Keywords : *Short circuit current, reactor series, circuit breaker, breaking current.*

Abstrak : *Arus hubung singkat tiga fasa di busbar 20 kV transformator tenaga 150/20 kV gardu induk merupakan nilai arus gangguan terbesar yang harus mampu diputus oleh circuit breaker. Breaking current yang dimiliki oleh circuit breaker baik disisi 150 kV maupun 20 kV harus mampu memutuskan arus hubung singkat tersebut dalam waktu yang tertentu. Operasi normal transformator tenaga 150/20 kV pada suatu gardu induk parallel pada sisi 150 kV, sedangkan sisi 20 kV masing-masing trafo mensuplai busbar beban masing-masing. Sedangkan dalam keadaan tertentu transformator bekerja parallel dengan transformator yang lain untuk mensuplai beban bersama, arus hubung singkat pada busbar 20 kV menjadi bertambah besar. Untuk mengurangi agar arus hubung singkat pada busbar tersebut, maka pada kopel busbar 20 kV dipasang reaktor seri. Dalam penelitian ini akan dibahas berapa nilai reaktansi reaktor kopel busbar 20 kV agar diperoleh nilai arus hubung singkat yang diinginkan dengan mempertimbangkan droop tegangan yang diizinkan pada busbar.*

Kata Kunci : *Arus hubung singkat, reaktor seri, circuit breaker, breaking current.*

1. PENDAHULUAN

Pada saat ini dan masa-masa yang akan datang, kebutuhan listrik untuk industri maupun perusahaan akan semakin meningkat. Disamping itu dengan penggunaan peralatan yang canggih diperlukan listrik yang mempunyai keandalan yang tinggi. Kita ketahui semua bahwa dalam sistem tenaga listrik tidak mungkin menyediakan tenaga listrik yang secara mutlak tanpa gangguan. Karena

setiap kesalahan dalam suatu rangkaian yang menyebabkan terganggunya aliran arus yang normal disebut gangguan. Oleh karena itu arus gangguan yang mengalir di suatu sistem tenaga berbeda dengan arus yang mengalir beberapa siklus kemudian yaitu sesaat sebelum pemutus bereaksi untuk memutuskan hubungan saluran pada kedua belah titik gangguan. Pemilihan yang tepat dari pemutus rangkaian ini bergantung pada dua hal, yaitu besarnya arus pada saat terjadi

gangguan dan besarnya arus yang harus diputuskan.

Arus hubung singkat tiga fasa merupakan arus gangguan terbesar yang harus diputus oleh circuit breaker, untuk itu diperlukan circuit breaker yang mempunyai kapasitas untuk memutus arus tersebut. Semakin besar arus gangguannya semakin besar juga breaking capacity yang dimiliki oleh circuit breaker, Untuk itu arus hubung singkat perlu dibatasi menggunakan reaktor seri. Pada skripsi ini akan dibahas berapa nilai reaktansi yang harus dipasang untuk membatasi besarnya arus gangguan hubung singkat tiga fasa dengan memperhatikan pengaruhnya terhadap susut tegangan di busbar.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menghitung arus hubung singkat di busbar 20 kV bila trafo 2 dan trafo 3 bekerja parallel dan menghitung pengurangan arus hubung singkat bila pada kopel busbar 20 kV dipasang reaktor dengan memperhatikan susut tegangan pada bus bar 20 kV.

2. LANDASAN TEORI

2.1. Gangguan Pada Sistem Tenaga Listrik

Analisa hubung singkat yang mungkin terjadi pada setiap titik di dalam sistem yang dipelajari terutama adalah besarnya kontribusi arus gangguan hubung singkat pada transmisi, distribusi, trafo, maupun dari sumber pembangkit, disamping itu juga perlu diketahui pula besar tegangan setiap node. Besarnya arus dan tegangan hasil analisa inilah yang diperlukan oleh para ahli proteksi untuk penyetelan proteksi, sehingga ketika gangguan hubung singkat itu benar-benar terjadi di dalam sistem, maka peralatan proteksi dapat bekerja mengamankan bagian sistem yang terganggu sesuai dengan apa yang diharapkan.

Macam-macam gangguan :

- i. Gangguan hubung singkat yang bersifat temporer (sementara), gangguan ini dapat hilang dengan sendirinya atau dengan memutuskan sesaat bagian yang terganggu dari

sumber tegangannya dengan penutup balik (PBO), gangguan ini jika tidak menimbulkan kerusakan pada peralatan SUTM. Gangguan ini jika tidak dapat hilang dengan segera, baik hilang dengan sendirinya atau dengan PBO, dapat berubah menjadi gangguan yang sifatnya permanent.

- ii. Gangguan yang bersifat permanent, dimana untuk membebaskannya di perlukan tindakan perbaikan atau dengan menyingkirkan gangguan tersebut, sehingga gangguan ini menyebabkan pemutus tetap.

Penyebab gangguan pada system distribusi dapat berasal dari dalam sistemnya sendiri dan gangguan dari luar, penyebab dari dalam antara lain :

1. Tegangan lebih dan arus tak normal
2. Pemasangan tidak baik
3. Penuaan
4. Beban lebih
5. Kegagalan kerja peralatan pengaman

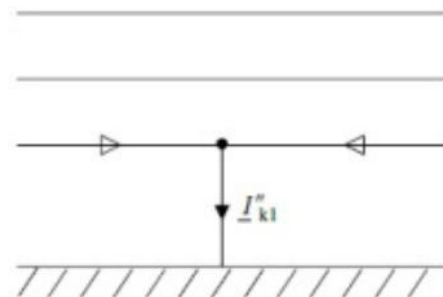
Sedangkan penyebab dari luar antara lain:

1. Angin yang menyebabkan dahan / ranting pohon mengenai saluran
2. Surja Petir
3. Kegagalan atau kerusakan peralatan pada saluran
4. Hujan Dan cuaca
5. Binatang, atau
6. Benda-benda yang lainnya

2.1.1. Hubung Singkat

Tipe hubung singkat dalam suatu sistem tenaga listrik dapat dikelompokan sebagai berikut :

1. Hubung singkat satu fasa ke tanah

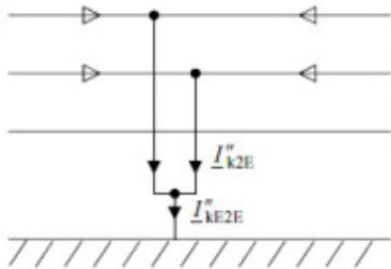


Gambar 2.1. Gambaran umum gangguan 1 fasa ke tanah

Adapun penyebab hubungan singkat ini antara lain :

- Pecahnya satu isolator, hal ini disebabkan oleh benturan mekanis (terkena lemparan batu) atau oleh karena gelombang surja tegangan tinggi (sambaran petir).
- Fasanya tersentuh dahan pohon (dalam hal ini tahanan gangguan bisa besar, tergantung dari kontak dahan pohon dengan fasa dan juga tingkat kebasahan pohon).
- Terbelitnya tali layang-layang.

2. Hubung singkat dua fasa ke tanah

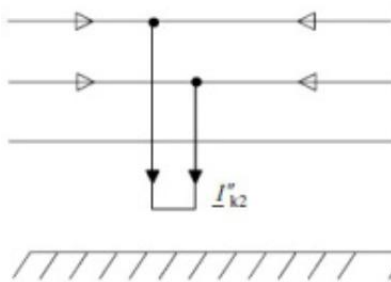


Gambar 2.2. Gambaran umum gangguan 2 fasa – tanah

Penyebab hubungan singkat ini antara lain :

- Kedua fasanya tersentuh pohon.
- Tali layang-layang.

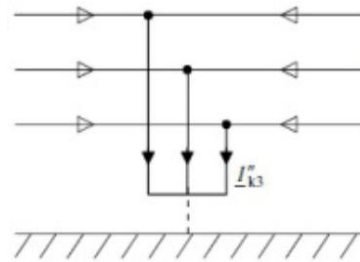
3. Hubung singkat 2 fasa



Gambar 2.3. Gambaran umum gangguan 2 fasa

Gangguan fasa-fasa yang terjadi pada sistem tenaga listrik, biasanya diakibatkan oleh dahan pohon yang mengenai kedua fasanya atau benang layang-layang yang terbuat dari kawat

4. Hubung singkat 3 fasa

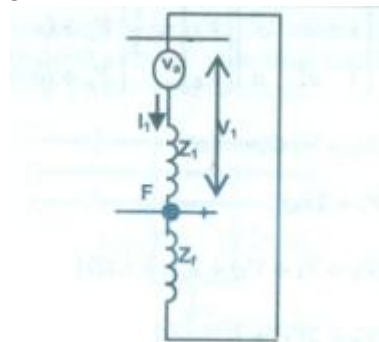


Gambar 2.4. Gambaran umum gangguan 3 fasa.

Gangguan 3 fasa dapat terjadi pada jaringan tenaga listrik, karena terhubungnya ketiga fasanya oleh pohon atau kawat dari benang layang-layang.

2.2. Gangguan 3 Fasa

Pada umumnya gangguan 3 fasa merupakan gangguan seimbang, tetapi dapat dianalisa menggunakan komponen simetris.



Gambar 2.5. Rangkaian ekivalen gangguan 3 fasa.

Arus urutan positif, negatif dan nol dapat digambarkan :

$$I_{a0} = 0 \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

$$I_{a2} = 0 \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

$$I_{a1} = \frac{1.0 \angle 0^\circ}{Z_1 + Z_f} \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (2.12)–(2.14) ke dalam persamaan berikut:

$$\begin{pmatrix} I_{af} \\ I_{bf} \\ I_{cf} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ I_{af} \\ 0 \end{pmatrix} \dots\dots\dots (2.4)$$

Dari persamaan diatas

$$I_{af} = I_{a1} = \frac{1.0 \angle 0^\circ}{Z_1 + Z_f} \quad \dots\dots\dots (2.5)$$

$$I_{bf} = a^2 I_{a1} = \frac{1.0 \angle 240^\circ}{Z_1 + Z_f} \quad \dots\dots\dots (2.6)$$

$$I_{cf} = a I_{a1} = \frac{1.0 \angle 120^\circ}{Z_1 + Z_f} \dots\dots\dots (2.7)$$

Ketika jaringan dihubungkan singkat dengan impedansi gangguannya maka :

$$V_{a0} = 0 \dots\dots\dots (2.8)$$

$$V_{a1} = Z_1 I_{a1} \dots\dots\dots (2.9)$$

$$V_{a2} = 0 \dots\dots\dots (2.10)$$

2.3. Sistem Per-Unit (pu)

Besaran tegangan V, arus I, daya kVA, impedansi Z selalu dinyatakan dalam % atau pu (per-unit) dari basis atau dasar yang dipilih. Dalam sistem per-unit terdapat empat besaran dasar yaitu besaran dasar dalam kilovolt ampere (kVA) atau megavolt ampere (MVA), besaran dasar tegangan dalam kilovolt (kV) atau dalam volt, besaran impedansi dalam ohm (Ω) dan besaran arus dalam ampere (A). Hubungan antara besaran dasar, besaran per-unit dan besaran sebenarnya adalah :

$$\text{Besaran (pu)} = \frac{\text{Besaran yang ada}}{\text{Besaran dasar}}$$

Besaran sebenarnya = Besaran per-unit x Besaran dasar

Pada umumnya besaran daya dipilih pertama, lalu salah satu tegangan dipilih sebagai tegangan dasar, tegangan sistem lainnya dapat ditentukan dari rating primer dan sekunder trafo. Tegangan dasar biasanya menggunakan fasa-fasa dalam kilovolt. Rumus untuk menghitung besaran dasar adalah :

$$I_b = \frac{kVA_b}{\sqrt{3} \cdot KV_b} \dots\dots\dots (2.11)$$

$$Z_b = \frac{kV_b}{I_b \cdot 10^3} = \frac{(kV_b)}{\frac{kVA_b}{\sqrt{3} \cdot kV_b} \cdot 10^3} = \frac{(kV_b)^2}{kVA_b \cdot 10^3} = \frac{(kV_b)^2}{MVA_b} \dots\dots\dots (2.12)$$

Dimana :

- I_b = besaran dasar arus (A)
- kV_b = besaran dasar tegangan (kV)
- kVA_b = besaran dasar daya (kVA)
- MVA_b = besaran dasar daya (MVA)
- Z_b = besaran dasar impedansi (Ω/fasa)

Pada dasarnya besaran dasar impedansi dinyatakan dalam ohm mili ohm atau dalam persen pada satuan peralatan. Impedansi kabel biasanya dinyatakan dalam ohm dan impedansi trafo dalam

persen dengan rating kVA/MVA. Besaran impedansi dapat dirubah ke dalam besaran per-unit dengan rumus :

$$Z_{pu} = \frac{Z_e}{Z_b} \dots\dots\dots (2.13)$$

$$Z\% = Z_{pu} \times 100 \longrightarrow$$

$$Z_{pu} = \frac{Z\%}{100} \dots\dots\dots (2.14)$$

$$Z_{pu} = \frac{Z_{pu} \cdot KV_{Ab}}{KV_{Ae}} \left(\frac{KV_e}{KV_b} \right)^2 \dots\dots\dots (2.15)$$

Dimana :

Z_{pu} = impedansi per-unit

Z_e = impedansi sebenarnya dalam ohm

2.4. Perhitungan Arus Hubung Singkat

2.4.1. MVA Hubung Singkat

MVA hubung singkat dikenal juga dengan nama kapasitas hubung singkat, yang digunakan untuk menentukan ukuran rating *circuit breaker* (CB). Kapasitas *circuit breaker* (CB) biasanya ditentukan dengan menggunakan reaktansi sub transien untuk generator.

Kapasitas hubung singkat:

$$MVA_{hs} = \sqrt{3} \cdot V_{L-L} \cdot I_{hs} \cdot 10^{-6} \text{ MVA} \dots\dots (2.16)$$

Dimana :

V_{L-L} = Tegangan line (volt)

I_{hs} = Arus hubung singkat

Jika tegangan sebelum gangguan dianggap $1.0 \angle 0^\circ$ pu, maka :

$$MVA_{hs} = \frac{MVA_b}{Z_{kk}} \dots\dots\dots (2.17)$$

Dimana :

Z_{kk} = Impedansi pada bus k di titik gangguan

MVA_b = MVA dasar

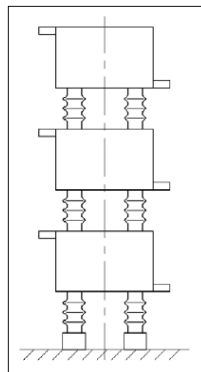
2.4.2. Impedansi Sumber

Dalam suatu sistem interkoneksi atau sistem yang besar untuk menentukan impedansi sumber dalam perhitungan arus hubung singkat pada suatu gardu induk diperoleh dari program etap 12.6. Bila diketahui daya hubung singkat pada gardu induk, impedansi sumber dapat dihitung sebagai berikut :

$$Z_{1,s} = \frac{V_{fasa}}{I_{hs3\phi}} = \frac{V_{jala}}{\sqrt{3} \cdot I_{hs3\phi}} = \frac{V_{jala}^2}{MVA_{hs}} \dots\dots\dots (2.18)$$

2.5. Reaktor Pembatas Arus

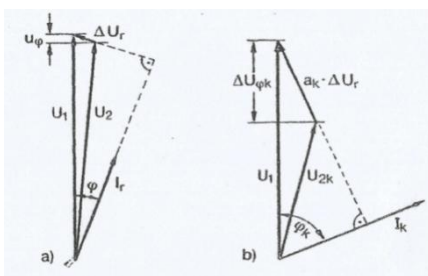
Reaktor pembatas arus (reaktor seri) adalah suatu reaktansi yang digunakan untuk membatasi arus gangguan hubung singkat dengan menambahkan impedans induktif. Namun pada keadaan normal, adanya reaktansi induktif tersebut menyebabkan susut tegangan pada sistem.



Gambar 2.6. Reaktor Seri Tiga Fasa Tipe Air Core

2.6. Susut Tegangan

Nilai resistansi dari reaktor pembatas arus dapat diabaikan karena besarnya nilai resistansinya hanya sekitar 3% dari nilai reaktansinya X_L . Besarnya susut tegangan (ΔV_r) yang diakibatkan oleh reaktor pembatas arus dipengaruhi oleh tegangan hubung singkat dari reaktor (U_k) dan faktor daya.



Gambar 2.7. Diagram vektor dari reaktor. a) keadaan normal, b) keadaan hubung singkat.

$$\Delta V_r = I_r \cdot X_L \dots\dots\dots(2.19)$$

$$\Delta v = \sqrt{3} \times \Delta V_r \times \sin \varphi \dots\dots\dots(2.20)$$

Dimana:

ΔV_r : Susut tegangan (V)

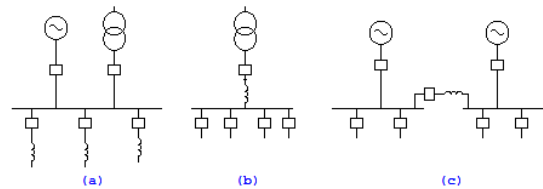
Δv : Susut tegangan tiga fasa (V)

I_r : Arus nominal yang melewati reaktor (A)

X_L : Reaktansi induktif reaktor

2.7. Penempatan Reaktor

Gambar dibawah menunjukkan penempatan reaktor dalam sistem. Gambar pertama menunjukkan penempatan reaktor pada penyulang, penempatan ini paling umum digunakan tetapi membutuhkan biaya besar. Rangkaian yang ditampilkan di gambar b, adalah penempatan reaktor di *incoming* penyulang, sering dipilih untuk alasan ruang penempatnya. Untuk tingkat perlindungan yang sama, biaya pembelian dan operasi yang lebih tinggi dari pada dengan reaktor di penyulang.



Gambar 2.8. Penempatan reaktor seri.

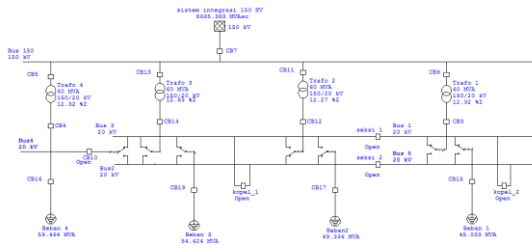
Pada sistem dengan daya hubung singkat yang tinggi, biasanya cocok digunakan reaktor pada kopel busbar seperti pada gambar c, cara ini lebih ekonomis dan memiliki susut tegangan yang kecil.

3. METODE PENELITIAN

3.1. Umum

GI Duri Kosambi terhubung (inter koneksi) dengan beberapa GI yang ada disekitar wilayah Jakarta Barat. Fungsi dari GI Duri Kosambi ialah sebagai penerima dan penyalur daya kepada GI yang terhubung.

GI Duri Kosambi sendiri mempunyai empat transformator. Masing-masing transformator adalah sebagai transformator daya (*step down*) 150/20 kV 60 MVA. Pada sisi 150 kV transformator daya dihubungkan secara paralel dengan transformator yang lainnya sedangkan pada sisi 20 kV menyuplai bebannya secara tersendiri untuk masing – masing transformator seperti pada gambar 3.2 dibawah ini yang disimulasikan dengan program etap 12.6



Gambar 3.1. Single line busbar 20 kV menggunakan etap 12.6

3.2. Transformator Daya 150/20 kV 60 MVA

Dibawah ini adalah data teknis transformator 4 dan transformator 3 yang pada sisi 20 kV dapat di kopel, namun dalam keadaan normal tidak dikopel.

TRAFO 3

Merk : Hyundai
 Type : TL - 258
 No. Seri : T92003
 Rated Power : 60 MVA
 Type Cooling : ONAN / ONAF
 Impedansi : 12,63%
 Standar : IEC 60076
 Frekuensi : 50 Hz
 Vektor Group : YNynO
 Tahun : 1992

TRAFO 2

Merk : Pasti
 Type : -
 No. Seri : 9340637
 Rated Power : 60 MVA
 Type Cooling : ONAN / ONAF
 Impedansi : 12,27%
 Standar : IEC 60076
 Frekuensi : 50 Hz
 Vektor Group : YNynO (d II)
 Tahun : 1993

3.3. Pemutus Tenaga (PMT)

Ada dua pemutus tenaga yang terpasang di transformator daya, yaitu pada sisi 150 kV dan pada sisi 20 kV.

Pada sisi 150 kV
 Merk : G. Alsthom
 No. Seri : A-16-727-1
 I Nominal : 4000 A
 Break. Current : 40 kA
 Teg. Nominal : 170 kV
 Teg. Oprasional : 150 kV
 Media Pemutus : Gas SF6
 Standar : IEC 56

BIL : 750 kV
 Siklus : o-oc-oc
 Tahun : 1992

Pada sisi 20 KV

Merk : LG VACUUM CB
 Type : GVB - Y
 No. Seri : 9509030013015
 I Nominal : 2000 A
 Break. Current : 25 kA
 Teg. Oprasional : 20 kV
 Media Pemutus : Vacuum
 Standar : IEC PUB-56
 Frekuensi : 50 Hz
 Siklus : O - 0,3s - CO - 3M - CO
 Durasi hubung singkat : 25 kA / 3s
 Waktu buka : 0,04s

3.4. Operasional Gardu Induk Duri Kosambi

- Dari diagram satu garis gambar 3.1 operasional setiap transformator mensuplai beban 20 kV melalui busbar 20 kV sendiri, Dalam keadaan pemeliharaan atau gangguan beban transformator dapat disuplai oleh transformator yang lainnya melalui kopel bus bar 20 kV
- Dalam kondisi tertentu transformator bekerja parallel pada sisi 20 kV untuk mensuplai beban bersama, kapasitas pemutus masing-masing *circuit breaker* dalam operasi tersebut harus mampu memutus gangguan hubung singkat pada busbar 20 kV

3.5. Hubungan Singkat Busbar 20 kV

- Operasi transformator mensuplai beban sendiri

Berdasarkan spesifikasi *breaking current circuit breaker* transformator adalah 25 kA pada sisi 20 kV dan 25 kA pada sisi 150 kA. Hubungan singkat pada busbar 20 kV

Pada perhitungan arus gangguan 3 fasa menggunakan sistem satuan per unit (pu), untuk itu ditentukan tegangan dasar (kV_b) adalah 20 kV dan daya dasar (MVA_b) adalah 100 MVA. Sedangkan impedansi dasar (Z_b) dapat dihitung sebagai berikut.

$$Z_b = \frac{kV^2}{MVA_b} = \frac{20 kV^2}{100 MVA} = 4\Omega$$

Untuk menentukan impedansi sumber bila diketahui kapasitas hubung singkat-

nya, dapat digunakan persamaan 3.6, dimana diketahui dari data P3B Jawa Bali besarnya arus hubung singkat 3 fasa di busbar 150 kV GI Duri Kosambi sebesar 33,35319 kA.

$$\begin{aligned} MVA_{HS} &= \sqrt{3} \times V_{jala} \times I_{HS3\phi} \\ &= \sqrt{3} \times 150 \text{ kV} \times \\ &\quad 33,35319 \text{ kA} \\ &= 8665,412951 \text{ MVA} \end{aligned}$$

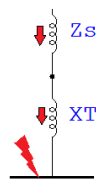
Sehingga didapat impedansi sumber jika dilihat pada sisi 20 kV sebagai berikut :

$$\begin{aligned} Z_S &= \frac{V_{jala}^2}{MVA_{HS}} \\ &= \frac{20 \text{ kV}^2}{8665,412951 \text{ MVA}} = 0,04616 \Omega \\ Z_{S(pu)} &= \frac{Z_S}{Z_b} = \frac{0,04616 \Omega}{4 \Omega} = 0,011540 \text{ pu} \end{aligned}$$

Impedansi trafo 3 dalam satuan per unit dapat dihitung sebagai berikut : $X_T =$

$$j0,1263 \times \left(\frac{20 \text{ kV}}{20 \text{ kV}}\right)^2 \times \frac{100 \text{ MVA}}{60 \text{ MVA}} = j0,2105 \text{ pu}$$

Sehingga Z_{ek} dapat dihitung sebagai berikut :



$$Z_{ek} = Z_{S(pu)} + X_T$$

$$\begin{aligned} &= 0,011540 \text{ pu} + j0,2105 \text{ pu} \\ &= 0,22204 \text{ pu} \end{aligned}$$

Arus hubung singkat 3 fasa pada busbar 20 kV trafo 4

$$\begin{aligned} I_{HS3\phi} &= \frac{1}{Z_{ek}} \\ &= \frac{1}{0,22204 \text{ pu}} \\ &= 4,503693028 \text{ pu} \end{aligned}$$

Bila dalam ampere

$$\begin{aligned} I_{HS3\phi} &= 4,503693028 \text{ pu} \times \frac{100 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \times 20 \text{ kV}} = \\ &13001,04183 \text{ A} \approx 13,00 \text{ kA} \end{aligned}$$

Arus hubung singkat tiga fasa yang melalui circuit breaker 20 kV adalah 13,00 kA, sedangkan yang melewati circuit breaker sisi 150 kV adalah sebagai berikut

$$\begin{aligned} I_{HS3\phi \text{ sisi } 150 \text{ kV}} &= 13,00 \text{ kA} \times \frac{20}{150} \\ &= 1,73 \text{ kA} \end{aligned}$$

2. Operasi trafo 2 dan trafo 3 parallel

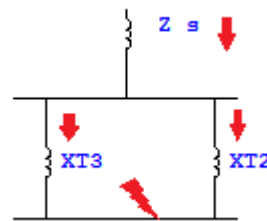
Berdasarkan spesifikasi breaking current circuit breaker transformator adalah 25 kA pada sisi 20 kV dan 25 kA pada sisi 150 kA. Hubungan singkat pada busbar 20 kV dengan kondisi transformator menyuplai beban bersama Impedansi trafo 3 dan trafo 2 dalam satuan per unit dapat dihitung sebagai berikut :

$$\begin{aligned} X_{T3} &= j0,1263 \times \left(\frac{20 \text{ kV}}{20 \text{ kV}}\right)^2 \\ &\quad \times \frac{100 \text{ MVA}}{60 \text{ MVA}} = j0,2105 \text{ pu} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_{T2} &= j0,1227 \times \left(\frac{20 \text{ kV}}{20 \text{ kV}}\right)^2 \\ &\quad \times \frac{100 \text{ MVA}}{60 \text{ MVA}} = j0,2045 \text{ pu} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_{T \text{ parallel}} &= \frac{j0,2105 \times j0,2045}{j0,2105 + j0,2045} \\ &= 0,10372834 \text{ pu} \end{aligned}$$

Sehingga Z_{ek} dapat dihitung sebagai berikut :



$$\begin{aligned} Z_{ek} &= Z_{S(pu)} + X_{T \text{ parallel}} \\ &= 0,011540 \text{ pu} + \\ &\quad j0,10372834 \text{ pu} \\ &= 0,1152683 \text{ pu} \end{aligned}$$

Arus hubung singkat 3 fasa pada busbar 20 kV

$$\begin{aligned} I_{HS3\phi} &= \frac{1}{Z_{ek}} \\ &= \frac{1}{0,1152683 \text{ pu}} \\ &= 8,675411 \text{ pu} \end{aligned}$$

Bila dalam ampere

$$\begin{aligned} I_{HS3\phi} &= 8,675411 \text{ pu} \times \\ &\frac{100 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \times 20 \text{ kV}} = 25043,754 \text{ A} \approx 25,04 \text{ kA} \end{aligned}$$

Arus hubung singkat tiga fasa yang melalui circuit breaker 20 kV adalah 25,04 kA, sedangkan yang melewati circuit breaker sisi 150 kV adalah sebagai berikut

$$\begin{aligned} I_{HS3\phi \text{ sisi } 150 \text{ kV}} &= 25,04 \text{ kA} \times \frac{20}{150} \\ &= 3,34 \text{ kA} \end{aligned}$$

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

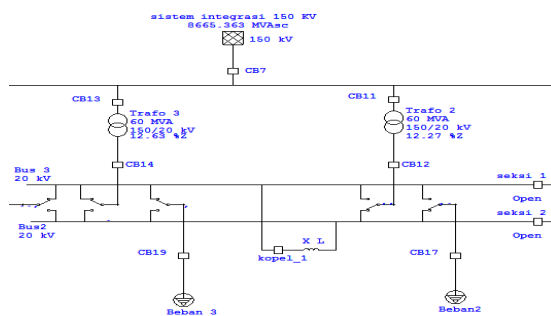
4.1. Pemilihan Reaktansi (XL) Reaktor Seri Untuk Membatasi Arus Gangguan Hubung Singkat 3 Fasa

Sebelum memilih besarnya reaktansi reaktor seri, harus ditentukan dulu besarnya arus hubung singkat yang ingin dibatasi, disini ditentukan pembatasan sebesar 75 % dari arus hubung singkat 3 fasa busbar 20 kV jika trafo 3 dan trafo 2 di parallel yang telah dihitung pada bab 3.

$$75\% \text{ dari } I_{HS3\phi} = \frac{75}{100} \times 25,04 \text{ kA} = 18,78 \text{ kA}$$

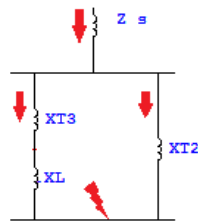
4.2. Perhitungan Reaktansi Reaktor

Perhitungan reaktansi reaktor (XL) untuk membatasi arus hubung singkat 20 KV bila trafo 2 dan 3 bekerja parallel. Penempatan reaktor seri pada kopel busbar akan membatasi arus gangguan pada sisi busbar yang dikopel yaitu busbar 3 dan 2.



Gambar 4.1. Gambar penempatan reaktor seri di kopel 1 menggunakan etap 12.6

Perhitungan pemilihan reaktansi dengan pembatasan arus hubung singkat 3 fasa sebesar 75% menjadi 18,78 kA pada busbar 2.



$$I_{HS3\phi} (pu) = 18,78 \text{ kA} \times \frac{\sqrt{3} \times 20 \text{ kV}}{100 \text{ MVA}} = 6,50558 \text{ pu}$$

$$I_{HS3\phi} (pu) = \frac{1}{Z_s + \frac{(XT3+XL) \times XT2}{(XT3+XL)+XT2}}$$

$$6,50558 \text{ pu} = \frac{1}{0,011540 \text{ pu} + \frac{(0,2105 \text{ pu} + XL) \times 0,2045 \text{ pu}}{(0,2105 \text{ pu} + XL) + 0,2045 \text{ pu}}}$$

$$\frac{(0,2105 \text{ pu} + XL) \times 0,2045 \text{ pu}}{(0,2105 \text{ pu} + XL) + 0,2045 \text{ pu}} = \frac{1}{6,50558 \text{ pu}} - 0,011540 \text{ pu}$$

$$\frac{(0,04304725 + 0,2045 \text{ XL})}{0,415 + XL} = 0,14217419$$

$$0,04304725 + 0,2045 \text{ XL} = 0,05900229 + 0,14217419 \text{ XL}$$

$$0,06232581 \text{ XL} = 0,01595504$$

$$\text{XL} = 0,2559941 \text{ pu}$$

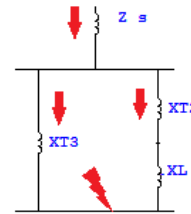
Dalam ohm menjadi :

$$\text{XL} = \text{XL}_{pu} \times Z_b$$

$$\text{XL} = 0,2559941 \text{ pu} \times 4 \Omega = 1,02397 \Omega$$

Perhitungan gangguan hubung singkat tiga fasa pada busbar 3 dengan memasang reaktor yang mempunyai reaktansi sebesar 1,02397 Ω di kopel busbar.

Impedansi trafo 3 dan trafo 2 dalam satuan per unit dapat dihitung sebagai berikut :



$$X_{T3} = j0,1263 \times \left(\frac{20 \text{ kV}}{20 \text{ kV}}\right)^2 \times \frac{100 \text{ MVA}}{60 \text{ MVA}} = j0,2105 \text{ pu}$$

$$X_{T2} = j0,1227 \times \left(\frac{20 \text{ kV}}{20 \text{ kV}}\right)^2 \times \frac{100 \text{ MVA}}{60 \text{ MVA}} = j0,2045 \text{ pu}$$

$$\text{XL} = 0,2559941 \text{ pu}$$

$$X_{T \text{ parallel}} = \frac{j0,2105 \times (j0,2045 + 0,2559941)}{j2105 + (j0,2045 + 0,2559941)}$$

$$= Z_{ek}$$

$$= Z_s(pu) + X_{T \text{ parallel}}$$

$$= 0,011540 \text{ pu} + 0,1444466211 \text{ pu} = 0,1559866211 \text{ pu}$$

Arus hubung singkat 3 fasa pada busbar 20 kV

$$I_{HS3\phi} (pu) = \frac{1}{Z_{ek}}$$

$$= \frac{1}{0,1559866211 \text{ pu}} = 6,410806215 \text{ pu}$$

3. Dari perhitungan program etap dan manual, arus hubungan singkat pada busbar 20 kV kondisi kerja parallel hasilnya berbeda sedikit
4. Perhitungan susut tegangan pada busbar 20 kV kondisi trafo kereja parallel setelah dipasang reaktor seri adalah sebesar 0,22%, nilai tersebut masih dalam batas yang diizinkan.

6. REFERENSI

- [1] Marsudi, Djiteng Ir. 2011. Pembangkitan Energi Listrik, Edisi Kedua. Jakarta: Penerbit Erlangga.
- [2] Basri, Hasan Ir. 1994. Sistem Distribusi Daya Listrik. Jakarta : Institut Sains dan Teknologi.
- [3] Sarimun, Wahyudi Ir. 2012. Proteksi Sistem Distribusi Tenaga Listrik. Bekasi : Garamond.
- [4] Stevenson Jr, William D. 1984. Analisa Sistem Tenaga Listrik Edisi Keempat. Jakarta : Erlangga.
- [5] Boehle, Bernhard DKK. 1988. Switchgear Manual 8th Edition. Germany : Asea Brown Boveri.