

ANALISIS PENGGUNAAN GAS SF₆ PADA PEMUTUS TENAGA (PMT) DI GARDU INDUK CIGERELENG BANDUNG

Yulistiawan , Bachtiar Hasan , Hasbullah
Program Studi Pendidikan Teknik Elektro FPTK UPI
Jl. Dr. Setiabudhi 207 Bandung 40154
e-mail: yulistiawan_upi@yahoo.co.id

Diterima : 28 Juli 2011

Disetujui : 07 Agustus 2012

Dipublikasikan : September 2012

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh tekanan gas SF₆ terhadap busur api yang terjadi akibat arus gangguan ataupun arus normal pada waktu pemutusan tenaga listrik berlangsung. Busur api yang timbul saat terjadi pemutusan PMT bersifat dapat merusak peralatan terutama PMT itu sendiri. Oleh karena itu Gas SF₆ yang dipakai sebagai media isolasi pada PMT bertujuan untuk meredam terjadinya proses busur api. Analisis yang dilakukan adalah untuk mengetahui besarnya arus gangguan yang dapat terjadi pada Gardu Induk Cigereleng Bandung dan perhitungan peredaman busur api terhadap tekanan gas SF₆ pada PMT. Hasil dari analisis yang didapat besarnya arus gangguan pada sisi 20 kV dengan gangguan 3 Fasa, 2 Fasa dan 1 Fasa ke tanah dengan jarak 25% dari panjang penyulang adalah sebesar 13.641,8 Ampere, 3.936,1 Ampere dan 884,9 Ampere. Kemudian menunjukkan bahwa semakin besar tekanan gas SF₆ maka semakin turun laju kecepatan busur api yang terjadi pada waktu pemutusan. Berdasarkan hasil ini menunjukkan pada tekanan 6,2 bar yang tertera pada indikator tekanan gas SF₆ pada PMT mampu menghentikan busur api pada jarak celah kontak sejauh 2,896 cm.

Kata kunci: gardu induk, PMT, Gas SF₆.

ABSTRACT

The research of this thesis aims to analysis the effect of SF₆ pressure by the arcing fault current or disconnection of electricity. Arc at the time of termination can damage equipment. Therefore, SF₆ is used as an insulating medium in the PMT aims to reduce the occurrence of the arc. The analysis conducted was to determine the magnitude of fault current that can occur in Bandung Cigereleng substation and the calculation of damping arc of SF₆ pressure in the PMT. The results obtained from analysis of the magnitude of fault current at 20 kV with impaired hand 3 phase, 2 phase and a phase to ground with 25% of long-distance feeders amounted to 13641.8 Ampere, 3936.1 and 884.9 Ampere. Then show that the greater the SF₆ pressure then progressively down the speed of the arc that occurs at the time of termination. Based on these results demonstrate the pressure of 6.2 bar indicated on the SF₆ pressure indicators on the PMT is able to stop the arcing contact gap at distances as far as 2.896 cm.

Keywords : PMT, SF₆, , sub station

PENDAHULUAN

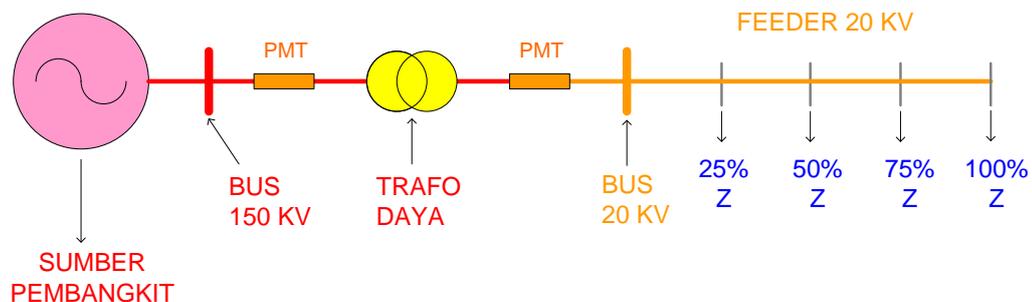
Tenaga listrik merupakan suatu kebutuhan yang diperlukan oleh setiap orang, baik yang tinggal di perkotaan maupun di pedesaan. Dalam penyaluran tenaga listrik diperlukan suatu gardu induk yang berfungsi untuk pengaturan tegangan yang disalurkan dari pembangkit ke pusat beban. Seiring dengan pesatnya perkembangan teknologi dalam bidang kelistrikan, dewasa ini dipasang sebuah alat bernama pemutus tenaga (PMT) di setiap Gardu Induk. PMT adalah sakelar yang dapat digunakan untuk menghubungkan atau memutuskan arus/daya listrik sesuai dengan ratingnya jika terdapat gangguan pada Gardu Induk (GI) atau alat transmisi lainnya secara otomatis.

Klasifikasi PMT berdasarkan media insulator dan material dielektriknya, dibagi menjadi empat jenis yaitu PMT minyak, PMT udara hembus, PMT vakum dan PMT dengan gas SF₆. PMT dengan media isolasi minyak dapat digunakan untuk memutus arus sampai 10 kA pada rangkaian bertegangan sampai 500 kV. PMT dengan media isolasi minyak dibagi menjadi dua jenis, yaitu PMT dengan menggunakan minyak banyak dan PMT dengan menggunakan sedikit minyak.

PMT dengan media isolasi Gas dapat digunakan untuk memutus arus sampai 40 kA pada rangkaian bertegangan sampai 765 kV. Media gas yang digunakan pada tipe ini adalah gas SF₆ (*Sulphur hexafluoride*). Sifat gas SF₆ murni adalah tidak berwarna, tidak berbau, tidak beracun dan tidak mudah terbakar. Pada suhu diatas 150° C, gas SF₆ mempunyai sifat tidak merusak metal, plastik dan bermacam bahan yang umumnya digunakan dalam pemutus tenaga tegangan tinggi. Sifat lain dari gas SF₆ adalah mampu mengembalikan kekuatan dielektrik dengan cepat, tidak terjadi karbon selama terjadi busur api dan tidak menimbulkan bunyi pada saat pemutus tenaga menutup atau membuka.

METODE

Bentuk jaringan perlu diketahui untuk menghitung arus gangguan hubung singkat untuk distribusi yang dipasang dari gardu induk dapat dilihat pada gambar 1 dibawah ini :



Gambar 1 *Single Line* Jaringan Distribusi

Untuk dapat menghitung besarnya arus gangguan yang terjadi pada saluran transmisi perlu diketahui data mengenai trafo tenaga yang terapat di Gardu Induk.

Data teknis trafo tenaga:

- MVA hubung singkat 461,5 MVA
- Trafo tenaga 60 MVA 150/20 KV
- Impedansi trafo 13 %
- Panjang penyulang 10 km
- Penghantar AAAC 240 mm²
- RN = 12 ohm

Ada 3 jenis gangguan yang terjadi pada saluran transmisi, yaitu gangguan hubung singkat 3 fasa, gangguan hubung singkat 2 fasa dan gangguan hubung singkat 1 fasa ke tanah. Rumus dasar yang digunakan untuk menghitung arus gangguan adalah hukum ohm [1]:

$$I = \frac{V}{Z} \quad (1)$$

Keterangan :

- I = Arus gangguan Hubung singkat
- V = Tegangan Sumber
- Z = Impedansi dari sumber ke titik gangguan (impedansi ekivalen)

Dari ketiga jenis gangguan terdapat perbedaan dalam penggunaan impedansi untuk menghitung besarnya arus gangguan tersebut.

- Gangguan 3 fasa : impedansi yang digunakan adalah impedansi urutan positif (ekivalen Z_1) tegangannya adalah E_{fasa}
- Gangguan 2 fasa : impedansi yang digunakan adalah jumlah impedansi urutan positif + urutan negatif (nilai ekivalen $Z_1 + Z_2$) tegangannya adalah $E_{\text{Fasa-Fasa}}$
- Gangguan 1 fasa ke tanah : impedansi yang digunakan adalah impedansi urutan positif + urutan negatif + urutan nol (nilai ekivalen $Z_1 + Z_2 + Z_0$) tegangannya adalah E_{Fasa}

Menghitung Impedansi Sumber

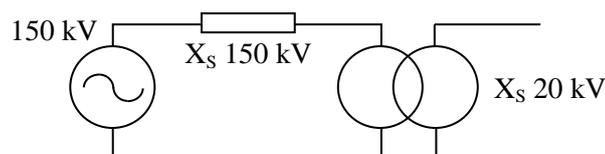
Besarnya nilai impedansi sumber (trafo) dapat diketahui dengan menggunakan rumus [1]:

$$X_s = \frac{kV^2}{MVA_{HS}} \quad (2)$$

Keterangan :

- X_s = impedansi sumber (dalam hal ini pada sisi sumber 150 kV)
- kV = tegangan pada sisi primer
- MVA_{HS} = *short circuit level* trafo tenaga

Impedansi sumber adalah nilai ohm pada sisi 150 kV. Untuk menghitung nilai impedansi sumber pada sisi 20 kV maka harus dikonversi terlebih dahulu ke sisi sekunder.



Gambar 2 Impedansi pada trafo tenaga

Dasar perhitungsn untuk mengetahui nilai impedansi pada sisi 20 kV adalah [1]:

Daya sisi 150 kV = Daya sisi 20 kV

$$\frac{kV_1^2}{Z_1} = \frac{kV_2^2}{Z_2} \quad (3)$$

Keterangan :

- kV_1^2 = tegangan sisi primer (150 kV)
- kV_2^2 = tegangan sisi sekunder (20 kV)
- Z_1 = impedansi sisi primer
- Z_2 = impedansi sisi sekunder

Reaktansi Trafo Tenaga di gardu Induk

Untuk mengetahui besarnya nilai reaktansi suatu trafo tenaga harus diketahui lebih dahulu berapa besarnya kapasitas reaktansi dari trafo tersebut. Misalnya trafo tenaga dengan data :

Daya : 60 MVA ratio tegangan 150/20 kV
 Reaktansi : 13%
 Perhitungan : impedansi dasar pada trafo sisi 20 kV

$$Z_B = \frac{20kV^2}{60MVA}$$

REAKTANSI TRAFO = 13%

$X_T = 13\% \times Z_B$ ohm

Reaktansi yang dihasilkan ini adalah reaktansi trafo tenaga urutan positif (+) dan urutan negatif (-).

Reaktansi Urutan Nol Trafo Tenaga

Untuk mengetahui besar nilai reaktansi trafo urutan nol adalah dengan memperhatikan ada atau tidaknya belitan delta pada trafo tenaga tersebut.

- Kapasitas delta sama dengan kapasitas bintang (Nilai $X_{T0} = X_{T1}$)
- Trafo tenaga di GI dengan hubungan bintang biasanya memiliki belitan deltadengan kapasitas sepertiga x kapasitas primer (Nilai $X_{T0} = 3 \times X_{T1}$)
- Trafo tenaga di GI dengan hubungan bintang yang tidak punya belitan delta didalamnya (Nilai X_{T0} = berkisar antara 9-14 kali X_{T1})

Impedansi Urutan Positif (Z_1), Urutan Negatif (Z_2) dan Urutan Nol (Z_0) pada Penyulang (*Feeder*)

Impedansi urutan positif, urutan negatif dan urutan nol didapatkan berdasarkan dari data teknis pada gardu induk. Berikut ini adalah tabel data teknis berdasarkan masing-masing penghantar yang dipakai pada Gardu Induk.

Tabel 1 Data Teknis penghantar AAC [2]

Penampang Nominal (mm ²)	Jari-jari (mm)	Urut	GMR (mm)	Impedansi urutan positif (ohm/km)	Impedansi Urutan Nol (ohm/km)
16	2,2563	7	1,638	1,8283 + j 0,4035	1,9862 + j 1,6910
25	2,8203	7	2,0475	1,1765 + j 0,3895	1,3245 + j 1,6770
35	3,3371	7	2,4227	0,8403 + j 0,3791	0,9883 + j 1,6666
50	3,9886	7	2,8957	0,5882 + j 0,3677	0,7362 + j 1,6552
70	4,7193	7	3,4262	0,4202 + j 0,3572	0,5682 + j 1,6447
95	5,4979	19	4,1674	0,3096 + j 0,3464	0,4576 + j 1,6229
120	6,1791	19	4,6837	0,2451 + j 0,3375	0,3931 + j 1,6250
150	6,9084	19	5,2365	0,1961 + j 0,3305	0,3441 + j 1,6180
185	7,6722	19	5,8155	0,1590 + j 0,3239	0,3070 + j 1,6114
240	8,7386	19	6,6238	0,1225 + j 0,3175	0,2705 + j 1,6032

Tabel 2 Data Teknis penghantar AAAC [2]

Penampang Nominal (mm ²)	Jari-jari (mm)	Urut	GMR (mm)	Impedansi urutan positif (ohm/km)	Impedansi Urutan Nol (ohm/km)
16	2,2563	7	1,638	2,0161 + j 0,4036	2,1641 + j 1,6911
25	2,8203	7	2,0475	1,2903 + j 0,3896	1,4384 + j 1,6770
35	3,3371	7	2,4227	0,9217 + j 0,3790	1,0697 + j 1,6665
50	3,9886	7	2,8957	0,6452 + j 0,3678	0,7932 + j 1,6553
70	4,7193	7	3,4262	0,4608 + j 0,3572	0,6088 + j 1,6447
95	5,4979	19	4,1674	0,3396 + j 0,3449	0,4876 + j 1,6324
120	6,1791	19	4,6837	0,2688 + j 0,3376	0,4168 + j 1,6251
150	6,9084	19	5,2365	0,2162 + j 0,3305	0,3631 + j 1,6180
185	7,6722	19	5,8155	0,1744 + j 0,3239	0,3224 + j 1,6114
240	8,7386	19	6,6238	0,1344 + j 0,3158	0,2824 + j 1,6033

(PT PLN Persero P3B)

Impedansi Penyulang

Impedansi penyulang dapat diketahui melalui data teknis pada Gardu Induk. Pada studi kasus disini memakai kabel AAAC dengan luas penampang 240 mm², maka berdasarkan tabel 2.3 dapat digunakan data untuk impedansi urutan positifnya (Z_1) adalah 0,1344 + j 0,3158 ohm/km dan impedansi urutan nol (Z_0) adalah 0,2824 + j 1,6033 ohm/km. Untuk mengetahui besar impedansi penyulang pada suatu titik gangguan tertentu dapat disimulasikan pada gangguan 25%, 50%, 75% dan 100% dari panjang penyulang.

Besar nilai impedansi urutan positif dan urutan negatif penyulang untuk setiap titik gangguannya adalah sebagai berikut : Panjang penyulang = 10 km

Impedansi urutan positif (Z_1) = Impedansi Urutan negatif (Z_2)

- Untuk panjang 25% = $0,25 \times S \times (Z_1) = (Z_{1\ 25\%})$ ohm
- Untuk panjang 50% = $0,5 \times S \times (Z_1) = (Z_{1\ 50\%})$ ohm
- Untuk panjang 75% = $0,75 \times S \times (Z_1) = (Z_{1\ 75\%})$ ohm
- Untuk panjang 100% = $1 \times S \times (Z_1) = (Z_{1\ 100\%})$ ohm

Perhitungan Z_1 ekivalen dan Z_2 ekivalen

Dari perhitungan impedansi urutan positif dan urutan negatif diatas, maka dapat dicari pula untuk impedansi urutan positif ekivalen (Z_1 eki) dan impedansi urutan negatif ekivalen (Z_2 eki). Z_1 eki dan Z_2 eki dapat langsung dihitung sesuai dengan lokasi gangguan dengan menjumlahkan $Z_S + Z_T + \% Z_L$.

Hitungan Z_1 eki dan Z_2 eki

$$Z_1 \text{ eki} = Z_2 \text{ eki} = Z_{1S} + Z_{1T} + Z_1 \text{ penyulang}$$

Keterangan :

Z_{1S} = hitungan impedansi sumber

Z_{1T} = hitungan impedansi trafo

Z_1 penyulang = tergantung dari lokasi gangguan

Maka, $Z_1 \text{ eki} = Z_2 \text{ eki} = j 0,86 + j 0,867 + Z_1 \text{ penyulang}$

$$= j 1,727 + Z_1 \text{ penyulang}$$

Untuk panjang 25% maka :

$$j 1,727 + (Z_{1\ 25\%}) \text{ ohm} = (Z_{1\ 25\%}) \text{ ekivalen ohm}$$

Dengan cara yang sama, Z_1 eki dan Z_2 eki dapat mencari untuk 50%, 75% dan 100% dari panjang penyulang.

Impedansi urutan nol (Z_0) dapat diketahui berdasarkan data teknis pada Gardu Induk. Dimana besarnya impedansi urutan nol dapat disimulasikan sebagai berikut :

- Untuk panjang 25% = $0,25 \times S \times (Z_0) = (Z_{0\ 25\%})$ ohm
- Untuk panjang 50% = $0,5 \times S \times (Z_0) = (Z_{0\ 50\%})$ ohm
- Untuk panjang 75% = $0,75 \times S \times (Z_0) = (Z_{0\ 75\%})$ ohm
- Untuk panjang 100% = $1 \times S \times (Z_0) = (Z_{0\ 100\%})$ ohm

Perhitungan Z_0 ekivalen

Hitungan didasarkan pada sistem pentanahan netral sistem pasokan dari Gardu Induk. Pada studi kasus ini sistem pentanahan netral pada trafo adalah sebesar 12 ohm.

Trafo di G.I mempunyai belitan delta

$$X_{0T} = 3 \times X_{1T}$$

$$3 R_N = 3 \times 12 = 36 \text{ ohm}$$

$$Z_0 \text{ penyulang} = \% \text{ panjang} \times Z_0 \text{ total}$$

$$Z_{0 \text{ eki}} = Z_{0T} + 3 R_N + Z_0 \text{ penyulang}$$

Keterangan :

$$Z_{0T} = \text{hitungan } Z_0 \text{ trafo}$$

$$3 R_N = \text{tahanan pentanahan trafo}$$

$$Z_0 \text{ penyulang} = \text{tergantung dari lokasi gangguan}$$

$$\text{Maka, } Z_{0 \text{ eki}} = Z_{0T} + 3 R_N + Z_0 \text{ penyulang}$$

Untuk panjang 25% maka :

$$Z_{0T} + 3 R_N + (Z_{0\ 25\%}) \text{ ohm} = (Z_{0\ 25\%}) \text{ ekivalen ohm}$$

Dengan cara yang sama, Z_0 eki dapat mencari untuk panjang 50%, 75% dan 100% dari panjang penyulang.

Perhitungan Arus Gangguan 3 Fasa

Untuk menghitung besarnya nilai arus gangguan 3 fasa dapat menggunakan persamaan (1) yaitu

$$I = \frac{V}{Z} \text{ dimana :}$$

$$V = \text{tegangan fasa - netral}$$

$$Z = \text{impedansi } Z_1 \text{ ekivalen}$$

- Misal perhitungan arus gangguan 3 fasa di 25% panjang penyulang adalah :

$$I = \frac{20.000\sqrt{3}}{Z_1(\text{dari } 25\% \text{ penyulang})}$$

Perhitungan Arus Gangguan 2 Fasa

Untuk menghitung besarnya nilai arus gangguan 3 fasa dapat menggunakan persamaan (1) yaitu

$$I = \frac{V}{Z} \text{ dimana :}$$

$$V = \text{tegangan Fasa-Fasa}$$

$$Z = \text{impedansi } (Z_1 + Z_2) \text{ ekivalen}$$

- Misal perhitungan arus gangguan 2 fasa di 25% panjang penyulang adalah :

$$I = \frac{20.000}{2 \times Z_1(\text{dari } 25\% \text{ penyulang})}$$

Pehitungan Arus Gangguan 1 Fasa ke Tanah

Untuk menghitung besarnya nilai arus gangguan 3 fasa dapat menggunakan persamaan (1) yaitu

$$I = \frac{V}{Z} \text{ dimana :}$$

V = $3 \times$ tegangan Fasa - Netral
Z = Impedansi ($Z_1 + Z_2 + Z_0$ ekivalen)

- Misal perhitungan arus gangguan 2 fasa di 25% panjang penyulang adalah :

$$I = \frac{3 \times \frac{20.000}{\sqrt{3}}}{2 \times Z_1 + Z_0 (\text{dari 25\% penyulang})}$$

Pengaruh Tekanan terhadap Busur Api

Pengaruh tekanan terhadap gerak busur api telah diuji dalam rating tekanan 100 kPa sampai dengan 510 kPa (F.Y. Chu et. Al dalam Heryanto 2006 : 100). Pengujian ini menunjukkan adanya hubungan terbalik antara kecepatan aksial busur api dengan tekanan gas. Kecepatan arus normalisasi turun dalam rating 0,2 cm/s kPa pada jarak celah elektroda sejauh 6,6 cm. Pada gas SF₆ bertekanan 1 atm kecepatan busur api adalah sebesar 135 cm/s kA. Berikut ini adalah tabel pengujian kecepatan busur api dengan celah konstan terhadap pengaruh tekanan.

Tabel 3 Perbandingan kecepatan busur api terhadap tekanan [3]

	Jarak Sela (cm)	Tekanan (kPa)	Perhitungan (cm/s.kA)	Pengujian (cm/s.kA)
SF ₆	6,6	100	200	136
SF ₆	6,6	250	126	120
SF ₆	6,6	350	107	100
SF ₆	6,6	450	94	85
SF ₆	6,6	510	88	84

Dari tabel di atas menunjukkan bahwa semakin besarnya tekanan gas SF₆ maka kecepatan busur api akan semakin kecil. Berikut adalah tabel konversi untuk satuan tekanan :

Tabel 4 Konversi satuan Tekanan [2]

Item	Pa	Bar	Kg/cm ² at	atm	Lbf/in ² (psi)
1 Pa	1	10 ⁻⁵	10,2.10 ⁻⁶	9,86.10 ⁻³	145,05.10 ⁻⁶
1 bar	10 ⁵	1	1,02	0,987	14,505
1 kg/cm ²	98100	0,981	1	0,968	14,224
1 atm	101,325	1,103	1,033	1	14,7
1 lbf/in ² (psi)	6892,8	0,06895	0,0703	0,06804	1

$$1 \text{ bar} = 100 \text{ kPa} = 0,1 \text{ MPa} = 1,02 \text{ kg/cm}^2 \text{ at}$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Untuk dapat menghitung besarnya arus gangguan yang terjadi pada saluran transmisi perlu diketahui data mengenai trafo tenaga yang terapat di Gardu Induk.

Data teknis trafo tenaga:

- MVA hubung singkat 461,5 MVA
- Trafo tenaga 60 MVA 150/20 KV
- Impedansi trafo 13 %
- Panjang penyulang 10 km
- Penghantar AAAC 240 mm²
- RN = 12 ohm

Hasil Pengukuran Tahanan Isolasi PMT SF₆

Tabel 5 Hasil Uji Tahanan Isolasi PMT SF₆

		Tahanan Isolasi								
		Megger : 5000 Volt			0 - > 100 GΩ					
Titik Ukur	Standart	Fasa R		Standart	Fasa S		Standart	Fasa T		
		Th. Lalu	Hasil Ukur		Th. Lalu	Hasil Ukur		Th. Lalu	Hasil Ukur	
a. Atas – Bawah OFF	PMT	> 100	> 100		> 100	80 G		> 100	>100G	
b. Atas – Tanah OFF	PMT	> 100	> 100		> 100	> 100		> 100	>100G	
c. Bawah – Tanah OFF	PMT	1KV/1MΩ	> 100	1KV/1MΩ	> 100	40 G	1KV/1MΩ	> 100	45G	
d. Fasa – Tanah ON	PMT	-	-		-	-		-	-	

Besar arus bocor yang dialami PMT dengan media gas SF₆ di titik ukur terminal atas-bawah pada fasa R, fasa S dan fasa T adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \text{Fasa R,} \quad I_R &= \frac{5000V}{100G\Omega} \\ I_R &= 5 \times 10^{-8} A \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Fasa S,} \quad I_S &= \frac{5000V}{80G\Omega} \\ I_S &= 6,25 \times 10^{-8} A \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Fasa T,} \quad I_T &= \frac{5000V}{100G\Omega} \\ I_T &= 5 \times 10^{-8} A \end{aligned}$$

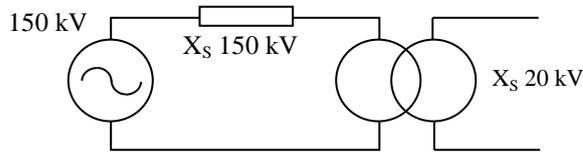
Menghitung Impedansi Sumber

Besarnya nilai impedansi sumber (trafo) dapat diketahui dengan menggunakan rumus :

$$X_s = \frac{kV^2}{MVA_{HS}}$$

$$X_s = \frac{150^2}{461,5} = 48,75 \text{ohm}$$

Hasil perhitungan adalah untuk impedansi sisi 150 kV, kemudian dikonversi ke sisi 20 kV :



$$\frac{kV_1^2}{Z_1} = \frac{kV_2^2}{Z_2}$$

$$Z_2 = \frac{kV_2^2 Z_1}{kV_1^2} = \frac{20^2 48,75}{150^2} = 0,86\Omega$$

Menghitung Reaktansi Trafo Tenaga

Daya : 60 MVA ratio tegangan 150/20 kV
 Reaktansi : 13%
 Perhitungan : impedansi dasar pada trafo sisi 20 kV

$$Z_B = \frac{20kV^2}{60MVA} = 6,67\text{ohm}$$

REAKTANSI TRAFO = 13%

$$X_T = 13\% \times 6,67\text{ ohm}$$

$$= 0,867\text{ ohm}$$

Menghitung Impedansi Penyulang

Menghitung Impedansi Penyulang (Z_1 an Z_2)

Impedansi penyulang berdasarkan data teknis dari Gardu Induk, impedansi yang dipakai adalah sebesar $0,1344 + j0,3158$ dengan panjang penyulang sejauh 10 km.

Simulasi titik gangguan sejauh 25%, 50%, 75% dan 100% panjang penyulang.

- Untuk panjang 25% = $0,25 \times 10\text{ km} \times (0,1344 + j0,3158) = 0,336 + j 0,79\text{ ohm}$
- Untuk panjang 50% = $0,5 \times 10\text{ km} \times (0,1344 + j 0,3158) = 0,67 + j 1,58\text{ ohm}$
- Untuk panjang 75% = $0,75 \times 10\text{ km} \times (0,1344 + j 0,3158) = 1,008 + j 2,37\text{ ohm}$
- Untuk panjang 100% = $1 \times 10\text{ km} \times (0,1344 + j 0,3158) = 1,344 + j 3,158\text{ ohm}$

Impedansi yang dihasilkan adalah impedansi urutan positif (Z_1) = Impedansi Urutan negatif (Z_2)

Perhitungan Z_1 ekivalen dan Z_2 ekivalen

$$Z_1\text{ eki} = Z_2\text{ eki} = Z_{1S} + Z_{1T} + Z_1\text{ penyulang}$$

$$Z_1\text{ eki} = Z_2\text{ eki} = j 0,86 + j 0,867 + Z_1\text{ penyulang}$$

$$Z_1\text{ eki} = Z_2\text{ eki} = j 1,727 + Z_1\text{ penyulang}$$

$$\text{Untuk panjang 25\%} = j 1,727 + (0,336 + j 0,79)\text{ ohm} = (0,336 + j 2,517)\text{ ohm}$$

Dengan cara yang sama, Z_1 eki dan Z_2 eki dapat dilihat pada tabel di bawah.

Tabel 6 Impedansi urutan positif dan negatif (Z_1 ekivalen = Z_2 eki ekivalen)			
Impedansi urutan positif dan negatif (Z_1 ekivalen = Z_2 ekivalen)			
25%	50%	75%	100%
$0,336 + j 2,517$	$0,67 + j 3,307$	$1,008 + j 4,097$	$1,344 + j 4,88$

Menghitung Impedansi Penyulang (Z_0)

Impedansi urutan nol (Z_0) dapat diketahui berdasarkan data teknis pada Gardu Induk adalah $0,2824 + j 1,6033$. Dimana besarnya impedansi urutan nol dapat disimulasikan sebagai berikut :

- Untuk panjang 25% = $0,25 \times 10 \text{ km} \times (0,2824 + j 1,6033) = 0,706 + j 4 \text{ ohm}$
- Untuk panjang 50% = $0,5 \times 10 \text{ km} \times (0,2824 + j 1,6033) = 1,412 + j 8,02 \text{ ohm}$
- Untuk panjang 75% = $0,75 \times 10 \text{ km} \times (0,2824 + j 1,6033) = 2,12 + j 12,2 \text{ ohm}$
- Untuk panjang 100% = $1 \times 10 \text{ km} \times (0,2824 + j 1,6033) = 2,824 + j 16,03 \text{ ohm}$

Perhitungan Z_0 ekivalen

Hitungan didasarkan pada sistem pentanahan netral sistem pasokan dari Gardu Induk. Pada studi kasus ini sistem pentanahan netral pada trafo adalah sebesar 12 ohm.

Trafo di G.I mempunyai belitan delta

$$\begin{aligned} X_{0T} &= 3 \times X_{1T} \\ &= 3 \times j 0,867 \\ &= j 2,601 \text{ ohm} \end{aligned}$$

$$3 R_N = 3 \times 12 = 36 \text{ ohm}$$

$$Z_0 \text{ penyulang} = \% \text{ panjang} \times Z_0 \text{ total}$$

$$Z_0 \text{ ekivalen} = Z_{0T} + 3 R_N + Z_0 \text{ penyulang}$$

Keterangan :

$$Z_{0T} = \text{hitungan } Z_0 \text{ trafo}$$

$$3 R_N = \text{tahanan pentanahan trafo}$$

$$Z_0 \text{ penyulang} = \text{tergantung dari lokasi gangguan}$$

$$\begin{aligned} \text{Maka, } Z_0 \text{ ekivalen} &= Z_{0T} + 3 R_N + Z_0 \text{ penyulang} \\ &= j 2,601 + 36 + Z_0 \text{ penyulang} \end{aligned}$$

Untuk panjang 25% maka :

$$36 + j 2,601 + (0,706 + j 4) \text{ ohm} = (36,706 + j 6,601) \text{ ohm}$$

Dengan cara yang sama, Z_0 eki dapat dilihat pada tabel di bawah.

Tabel 7 Impedansi urutan nol ekivalen

Impedansi urutan nol (Z_0 ekivalen)			
25%	50%	75%	100%
$36,706 + j 6,601$	$37,412 + j 10,621$	$38,12 + j 14,801$	$38,824 + j 18,631$

Perhitungan Arus Gangguan 3 Fasa

Untuk menghitung besarnya nilai arus gangguan 3 fasa dapat menggunakan persamaan (1) yaitu

$$I = \frac{V}{Z} \text{ dimana :}$$

$$V = \text{tegangan fasa - netral}$$

$$Z = \text{impedansi } Z_1 \text{ ekivalen}$$

- Misal perhitungan arus gangguan 3 fasa di 25% panjang penyulang adalah :

$$I = \frac{20.000\sqrt{3}}{Z_1 (\text{dari } 25\% \text{ penyulang})}$$

Gangguan di 25% dari panjang penyulang :

$$I = \frac{20.000\sqrt{3}}{0,336 + j2,517} = \frac{20.000\sqrt{3}}{\sqrt{0,336^2 + j2,517^2}} = 13.641,8 \text{ Ampere}$$

Dengan perhitungan yang sama, maka arus gangguan 3 fasa yang terjadi dapat dilihat pada tabel dibawah ini:

Tabel 8 Arus Gangguan 3 fasa			
Arus Gangguan 3 fasa			
25%	50%	75%	100%
13.641,8 Ampere	10.266,5 Ampere	8210,4 Ampere	6.843,6 Ampere

Perhitungan Arus Gangguan 2 Fasa

Untuk menghitung besarnya nilai arus gangguan 3 fasa dapat menggunakan persamaan (1) yaitu

$$I = \frac{V}{Z} :$$

V = tegangan Fasa-Fasa

Z = impedansi ($Z_1 + Z_2$) ekivalen

- Misal perhitungan arus gangguan 2 fasa di 25% panjang penyulang adalah :

$$I = \frac{20.000}{2 \times Z_1 (\text{dari } 25\% \text{ penyulang})}$$

Gangguan di 25% dari panjang penyulang :

$$I = \frac{20.000}{2 \times (0,336 + j2,517)} = \frac{20.000}{0,672 + j5,034} = \frac{20.000}{\sqrt{0,672^2 + j5,034^2}} = 3.938,1 \text{ Ampere}$$

Dengan perhitungan yang sama, maka arus gangguan 2 fasa yang terjadi di setiap titik gangguan dapat dilihat pada tabel di bawah ini :

Tabel 9 Arus Gangguan 2 fasa			
Arus Gangguan 2 fasa			
25%	50%	75%	100%
3.936,1 Ampere	2.963,7 Ampere	2.372,9 Ampere	1975,6 Ampere

Perhitungan Arus Gangguan 1 Fasa ke Tanah

Untuk menghitung besarnya nilai arus gangguan 3 fasa dapat menggunakan persamaan (1)

$$\text{yaitu } I = \frac{V}{Z} \text{ dimana : } V = 3 \times \text{tegangan Fasa - Netral}$$

Z = Impedansi ($Z_1 + Z_2 + Z_0$ ekivalen)

- Misal perhitungan arus gangguan 2 fasa di 25% panjang penyulang adalah :

$$I = \frac{3 \times \frac{20.000}{\sqrt{3}}}{2 \times Z_1 + Z_0 (\text{dari } 25\% \text{ penyulang})}$$

Gangguan di 25% dari panjang penyulang :

$$I = \frac{3 \times \frac{20.000}{\sqrt{3}}}{2 \times (0,336 + j2,517) + (36,706 + j6,601)} = \frac{3 \times \frac{20.000}{\sqrt{3}}}{37,378 + j11,635} = \frac{3 \times \frac{20.000}{\sqrt{3}}}{\sqrt{37,378^2 + 11,635^2}} = 884,9 \text{ Ampere}$$

Dengan perhitungan yang sama, maka arus gangguan 1 fasa ke tanah yang terjadi di setiap titik gangguan dapat dilihat pada tabel di bawah ini :

Tabel 10 Arus Gangguan 1 fasa ke tanah			
Arus Gangguan 1 fasa ke tanah			
25%	50%	75%	100%
884,9 Ampere	816,8 Ampere	748,9 Ampere	688,8 Ampere

Dari hasil perhitungan arus gangguan yaitu gangguan 3 fasa, gangguan 2 fasa dan gangguan 1 fasa ke tanah, arus gangguan yang memiliki nilai paling besar adalah arus gangguan 3 fasa yaitu sebesar 13.641,8 Ampere. Jadi pada gardu induk dapat digunakan PMT Gas SF₆ dengan *breaking capacity* 25 kA.

Analisis Kecepatan Busur Api pada Gas SF₆

Untuk mengetahui kecepatan busur api pada gas SF₆ bertekanan dapat dilakukan dengan langkah berikut :

Berdasarkan data pada tabel 3.5 kecepatan busur api pada tekanan 510 kPa adalah 84 cm/s kA. Sedangkan penurunan kecepatan busur api adalah 0,2 cm/s kA kPa. Sehingga :

$$P_{PMT} - P_{uji} = 620 - 510 = 110 \text{ kPa}$$

Dengan faktor penurunan kecepatan busur api 0,2 cm/s kA kPa, maka kecepatan berkurang sampai :

$$U = 110 \text{ kPa} \times 0,2 \text{ cm/s kA} = 22 \text{ cm/s kA}$$

Dari hasil penurunan tingkat kecepatan busur api pada tekanan 620 kPa pada PMT SF₆ di Gardu induk Cigereleng adalah sebesar :

$$U_{PMT} = 84 \text{ cm/s kA} - 22 \text{ cm/s kA} \\ = 62 \text{ cm/s kA}$$

Untuk menghentikan laju busur api selain dengan menaikkan tekanan gas SF₆ pada PMT, juga bisa dengan cara memperpanjang jarak antara celah kontak. Untuk mengetahui berapa jauh celah kontak yang dibutuhkan pada PMT bertekanan gas SF₆ agar dapat menghentikan laju busur api adalah sebagai berikut :

- Arus pemutusan PMT $I_{nom PMT} = \frac{MVA_{Grafo}}{\sqrt{3} \times 20000}$

$$I_{nom PMT} = \frac{60.000 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \times 20000} = 1,73 \text{ kA}$$

- Waktu pemutusan PMT (t_{data}) = 27 ms = 0,027 s

$$\text{Maka kecepatan busur api } (U_{arc}) = I_{nom PMT} \times U_{PMT} \\ = 1,73 \times 62 \\ = 107,26 \text{ cm/s}$$

Jarak celah kontak :

$$d = U_{arc} \times t = 107,26 \times 0,027 = 2,896 \text{ cm}$$

Pada jarak yang cukup kecil yaitu sebesar 2,896 cm, PMT dengan gas SF₆ dengan tekanan 6,2 bar (620 kPa) seperti pada PMT di Gardu Induk Cigereleng Bandung sudah mampu memadamkan busur api.

KESIMPULAN

1. Dalam menentukan spesifikasi teknis pemutus tenaga (PMT) harus diperhitungkan besarnya arus hubung singkat yang terjadi. Semakin besar arus hubung singkat, maka semakin besar juga kapasitas pemutus tenaga listrik yang harus mampu melayani gangguan.
2. Nilai minimum untuk sebuah tahanan isolasi adalah sebesar 11,25 GΩ. Nilai tahanan isolasi pemutus tenaga di Gardu Induk Cigereleng dengan media pemutus gas SF₆ berada di atas batas minimum untuk tegangan tinggi sebesar 150 kV. Dengan demikian arus bocor yang terjadi akan semakin kecil.
3. PMT dengan gas SF₆ dapat digunakan pada Gardu Induk Cigereleng yang memiliki arus hubung singkat sebesar 13 kA.
4. Kecepatan busur api dapat berkurang pada tekanan gas SF₆ yang semakin besar. Pada Gardu Induk Cigereleng dengan tekanan gas SF₆ pada PMT sebesar 6,2 bar (620 kPa) mampu menghentikan laju busur api pada jarak pembukaan celah kontak sejauh 2,896 cm.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Hakim, Yanuar. (2002). *Protection of Industrial Power Systems*. [Online]. Tersedia: <http://xa.yimg.com/kq/groups/26952859/494303003/name/ProteksiPenyulangKoordinasiRelaiArusLebihGround.pdf>
- [2] *Pemeliharaan Pemutus Tenaga Listrik*. Buku Pegangan PT. PLN (Persero).
- [3] Heryanto, Irwan. (2006). "Kajian Pengaruh Tekanan Gas SF₆ Terhadap Penentuan Jarak Sela Minimum Kontak Pemutus Tenaga (Pmt)". *Jurnal ELTEK*. 04, 96-104.
- [4] Ariawan, Putu R. (2010). *Bahan Isolasi Gas*. Paper Jurusan Teknik Elektro Universitas Udayana: tidak diterbitkan.
- [5] Eka Setiwan, Gugun. (2005). *Studi Pengaruh Gangguan Hubung Pendek 1 Fasa Ke Tanah Pada Penyulang Terhadap Setting Ground Fault Relay Pada Penyulang North Braga Orang*. Tugas Akhir JPTE FPTK UPI Bandung: tidak diterbitkan.
- [6] Hasan, Bachtiar. (2003). *Teknik Tegangan Tinggi*. Pustaka Ramadhan : Bandung.
- [7] Hasan, Bachtiar. (2006). *Pemutus Tenaga Listrik*. Pustaka Ramadhan : Bandung.
- [8] Jhony. (2011). *Pengaruh Busur Api Listrik Terhadap Kekuatan Dielektrik Gas SF₆*. Tugas Akhir Jurusan Teknik Elektro Universitas Sumatera Utara: Tidak diterbitkan.
- [9] Juningtyastuti dkk. (2005). "Analisis Dampak Terputusnya Kawat Netral Terhadap JTM 20 kV". *Jurnal Transmisi*. 10, (2), 30-36.