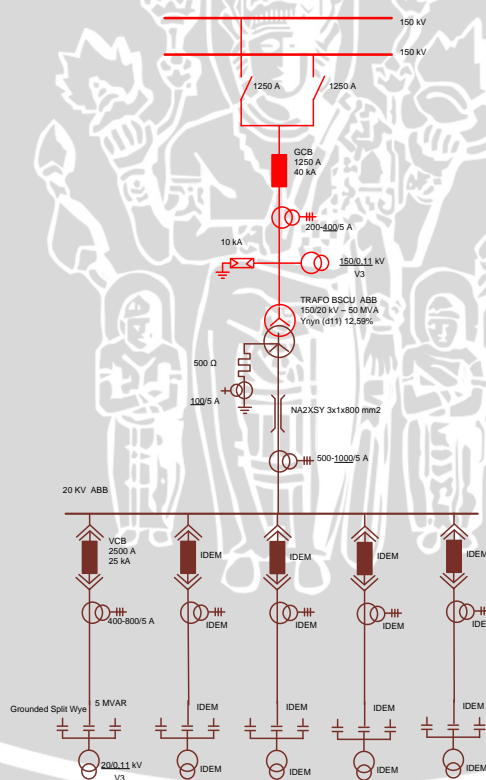


## BAB IV PERHITUNGAN DAN ANALISIS

### 4.1 Data Sistem Tenaga Listrik di GI Manisrejo Madiun

Gardu induk (GI) Manisrejo Madiun sebagai penyedia daya listrik dengan menggunakan transformator daya BSCU 3 fasa, 50 MVA, 150/20 kV, 50 Hz. Faktor daya ( $\cos \phi$ ) yang ditetapkan oleh PLN tidak boleh kurang dari 0,85 oleh karena itu manajemen PLN melakukan koreksi terhadap faktor daya menjadi 0,85.

Perbaikan faktor daya menggunakan kapasitor dengan kapasitas 25 MVAR yang terbagi dalam 5 step kapasitor yang disusun secara paralel dan setiap step 5 MVAR seperti yang diperlihatkan pada Gambar 4.1



Gambar 4.1 Single line diagram kapasitor bank  
Sumber: GI Manisrejo

Dalam pengoperasian kapasitor bank di GI Manisrejo dapat dilakukan dengan alat otomatis (*Automatic Capacitor Step*) atau manual. Peralatan ini

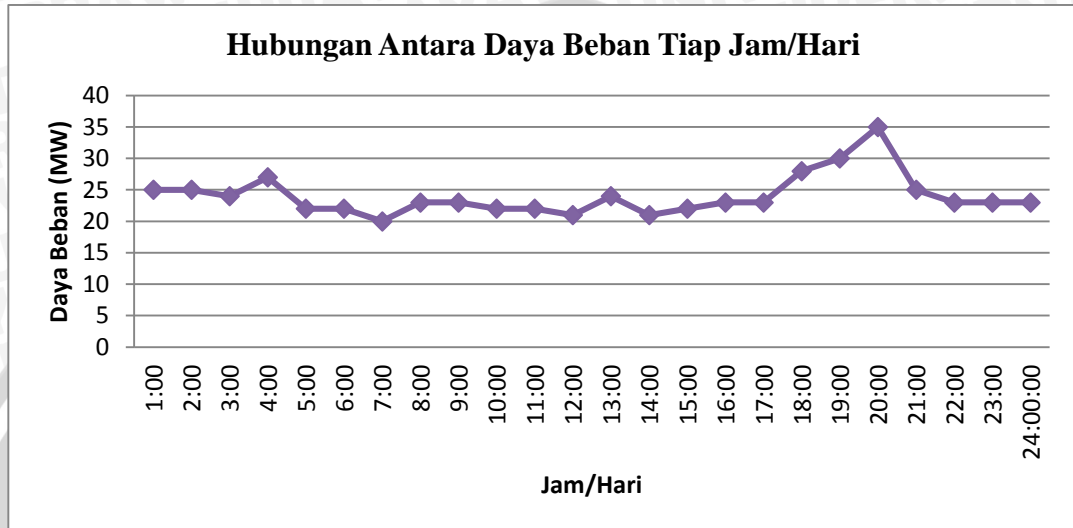
digunakan untuk mengatur berapa step/langkah yang diperlukan dalam memperbaiki  $\cos \phi$ , yang tergantung pada kondisi beban tiap harinya sesuai dengan data beban setiap jam selama beroperasi. Data-data beban yang dimaksud diperlihatkan pada Tabel 4.1

Tabel 4.1 Data Pembebanan Setiap Jam Perhari

No	Pukul (WIB)	Tegangan (kV)	Arus (A)			Beban (MW)	$\cos \phi$
			R	S	T		
1	01:00	144/20,70	750	750	750	25	0,72
2	02:00	144/20,70	750	750	750	25	0,72
3	03:00	145/20,00	750	750	750	24	0,72
4	04:00	140/20,50	770	770	770	27	0,74
5	05:00	144/20,80	710	710	710	22	0,75
6	06:00	144/20,80	740	740	740	22	0,75
7	07:00	147/20,17	730	740	740	20	0,75
8	08:00	146/20,40	750	750	750	23	0,73
9	09:00	144/20,17	750	750	750	23	0,73
10	10:00	144/20,18	720	720	720	22	0,75
11	11:00	144/20,70	720	720	720	22	0,75
12	12:00	145/19,10	720	720	720	21	0,74
13	13:00	143/20,00	760	760	760	24	0,72
14	14:00	144/20,90	740	740	740	21	0,74
15	15:00	144/20,80	750	750	750	22	0,75
16	16:00	147,20,80	750	750	750	23	0,73
17	17:00	146/20,40	720	720	720	23	0,73
18	18:00	145/20,10	770	770	770	28	0,71
19	19:00	144/20,17	780	780	780	30	0,70
20	20:00	145/20,20	780	780	780	35	0,68
21	21:00	148/20,10	730	730	730	25	0,74
22	22:00	147/20,00	700	700	700	23	0,73
23	23:00	147/20,19	710	710	710	23	0,73
24	24:00	148,20,00	710	710	710	23	0,73

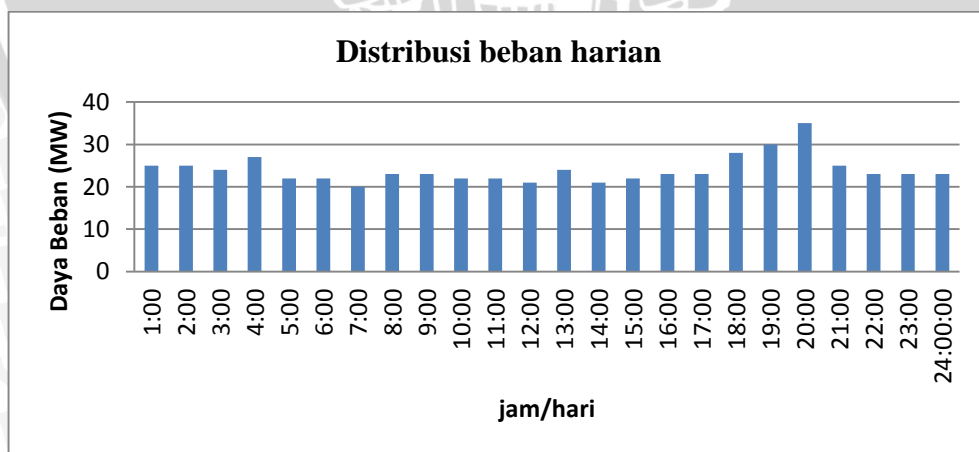
Sumber: GI Manisrejo Madiun

Berdasarkan data di Tabel 4.1 dapat digambarkan karakteristik beban harian Gambar 4.2 dan distribusi beban harian pada Gambar 4.3. Selanjutnya akan dihitung kebutuhan VAR untuk setiap beban supaya mencapai faktor daya yang ditetapkan yaitu 0,85



Gambar 4.2 Karakteristik beban harian

Berdasarkan Gambar 4.2 dapat disimpulkan beban tertinggi terjadi pada pukul 20.00 WIB dengan daya 35 MW. Konsumsi daya terjadi perubahan setiap jam tergantung beban yang terpakai selama jam operasi.



Gambar 4.3 Distribusi beban harian



Berdasarkan data pada Tabel 4.1 dapat dihitung besarnya nilai VAR per jam dan kapasitas kapasitor yang dibutuhkan. Misalnya pada pukul 20.00 WIB dan 07 WIB berdasarkan data dari Tabel 4.1 dapat diketahui:

Jam 20.00 WIB

Beban : 35 MW

$\text{Cos } \phi_1 : 0,68$

$\text{Cos } \phi_2 : 0,85$  (standart PLN)

Jadi besar nilai VAR yang diperlukan pada pukul 20.00 WIB dapat dihitung menggunakan faktor pengali yang ada pada Gambar 2.15 dan persamaan (2.38), (2.39), maka nilai VAR yang diperlukan pada jam 20.00 WIB adalah

$$\begin{aligned} Q &= P (\tan \phi_1 - \tan \phi_2) \\ &= kW \cdot MF \\ &= 35000 \cdot 0,45 \\ &= 15750 \text{ kVAR} \\ &= 15,75 \text{ MVAR} \end{aligned}$$

Karena kapasitas kapasitor setiap stepnya sebesar 5 MVAR, maka nilai yang mendekati 15,75 MVAR adalah diambil 20 MVAR atau dengan memasukan kapasitor sebanyak 4 step secara bertahap.

Jam 07.00 WIB

Beban : 20 MW

$\text{Cos } \phi_1 : 0,75$

$\text{Cos } \phi_2 : 0,85$  (standart PLN)

Jadi besar nilai VAR yang diperlukan pada pukul 07.00 WIB dapat dihitung menggunakan faktor pengali yang ada pada Gambar 2.15 dan persamaan (2.38), (2.39), maka nilai VAR yang diperlukan pada jam 07.00 WIB adalah

$$\begin{aligned} Q &= P (\tan \phi_1 - \tan \phi_2) \\ &= kW \cdot MF \\ &= 20000 \cdot 0,25 \\ &= 5000 \text{ kVAR} \\ &= 5 \text{ MVAR} \end{aligned}$$

Karena kapasitas kapasitor setiap stepnya sebesar 5 MVAR, maka nilai yang mendekati 5 MVAR adalah diambil 5 MVAR atau dengan memasukan kapasitor sebanyak 1 step.

Untuk beban-beban pada waktu lain ditunjukkan seperti pada Tabel 4.1, dapat dihitung nilai VAR yang dibutuhkan dan jumlah step kapasitor yang dimasukkan kesistem yang hasilnya dapat diperlihatkan pada Tabel 4.2

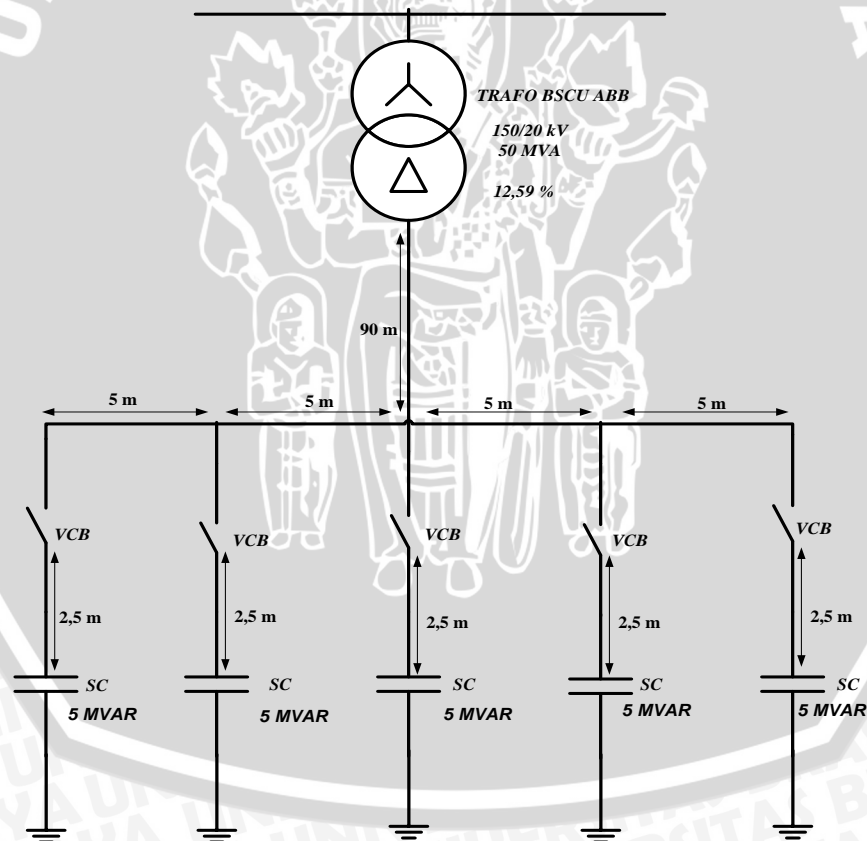
Tabel 4.2 Data Perubahan VAR Setiap Jam dan Jumlah Step Kapasitor Bank

No	Pukul (WIB)	Cos $\phi_1$	Cos $\phi_2$	Beban (MW)	Daya Reaktif (MVAR)	Jumlah Step
1	01:00	0,72	0,85	25	8,25	2
2	02:00	0,72	0,85	25	8,25	2
3	03:00	0,72	0,85	24	7,92	2
4	04:00	0,74	0,85	27	7,56	2
5	05:00	0,75	0,85	22	5,25	2
6	06:00	0,75	0,85	22	5,25	2
7	07:00	0,75	0,85	20	5	1
8	08:00	0,73	0,85	23	6,9	2
9	09:00	0,73	0,85	23	6,9	2
10	10:00	0,75	0,85	22	6,38	2
11	11:00	0,75	0,85	22	5,5	2
12	12:00	0,74	0,85	21	5,88	2
13	13:00	0,72	0,85	24	7,92	2
14	14:00	0,74	0,85	21	5,88	2
15	15:00	0,75	0,85	22	5,55	2
16	16:00	0,73	0,85	23	6,9	2
17	17:00	0,73	0,85	23	6,9	2
18	18:00	0,71	0,85	28	10,64	3
19	19:00	0,70	0,85	30	11,7	3
20	20:00	0,68	0,85	35	15,75	4
21	21:00	0,74	0,85	25	8,25	2
22	22:00	0,73	0,85	23	6,9	2
23	23:00	0,73	0,85	23	6,9	2
24	24:00	0,73	0,85	23	6,9	2

#### 4.2 Perhitungan Nilai Arus *Inrush* Dan Frekuensi Saat *Switching* Kapasitor Bank.

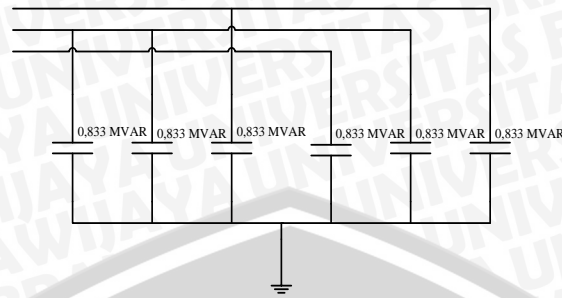
Dalam menentukan besarnya nilai arus *inrush* dan frekuensi saat *switching* kapasitor bank di GI Manisrejo di perlukan data-data di GI tersebut. Adapun data-data yang diperlukan untuk analisis sebagai berikut:

- Tegangan sumber : 20 kV
- Frekuensi sumber ( $f_s$ ) : 50 Hz
- Kapasitas total kapasitor : 25 MVAR
- Jumlah step : 5 step
- Panjang konduktor antara bus dengan sumber ( $\ell_s$ ) : 90 m
- Panjang konduktor antara *switch* pada kapasitor bank 1 dengan *switch* pada kapasitor bank 2 ( $\ell_{s-s}$ ) : 5 m
- Panjang konduktor antara *switch* dengan kapasitor bank ( $\ell_{s-c}$ ) : 2,5 m



Gambar 4.4 Nilai jarak bus dengan sumber, jarak antar *switch* ke kapasitor bank, dan jarak konduktor antar *switch* dengan kapasitor bank.



h. Hubungan kapasitor bank: *Grounded double Wye*Gambar 4.5 *Grounded double Wye***4.2.1 Menghitung nilai induktansi rangkaian**

Perhitungan harga induktansi pada *incoming line* kapasitor bank menggunakan persamaan (2.36), induktansi antara *switch* pada kapasitor bank 1 dengan *switch* pada kapasitor bank 2 ( $\ell_{s-s}$ ), menggunakan persamaan (2.35), (2.36), induktansi antara *switch* dengan kapasitor bank ( $\ell_{s-c}$ ) menggunakan persamaan (2.37) berdasarkan IEEE C37 012-2005.

Menggunakan kabel standart IEC 60502, kabel metal NA2XSY, 3x 1x630 mm<sup>2</sup>, 12/20 kV. Besar induktansi berdasarkan data *sheet* kabel seperti tercatat pada Lampiran 2 adalah 0,483 mH/km = 0,483.10<sup>-3</sup> μH/m, maka didapatkan nilai induktansi pada rangkaian sebagai berikut:

$$\begin{aligned} L_{s-c} &= (\ell_s) \cdot (L_t) \\ &= 90 \cdot 0,483 \cdot 10^{-3} \\ &= 0,043 \mu\text{H} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L_{B1}, L_{B2}, L_{B3}, L_{B4} &= (\ell_{s-s}) \cdot (L_{bus}) \\ &= 5 \cdot 0,75 \\ &= 3,75 \mu\text{H} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L_1, L_2, L_3, L_4, L_5 &= (\ell_{s-c}) \cdot (L_t) + 5 \mu\text{H} \\ &= 2,5 \cdot 0,483 \cdot 10^{-3} + 5 \\ &= 5,001 \mu\text{H} \end{aligned}$$

5 μH adalah nilai toleransi induktansi untuk kapasitor bank yang dipasang dibawah tegangan 52 kV berdasarkan IEEE Std C37.012-2005

dengan :

$L_{s-c}$  : Induktansi sumber ke bus (μH)

$L_B$  : Induktansi bus (μH)

$L_t$  : Induktansi pada kabel ( $\mu\text{H}$ )

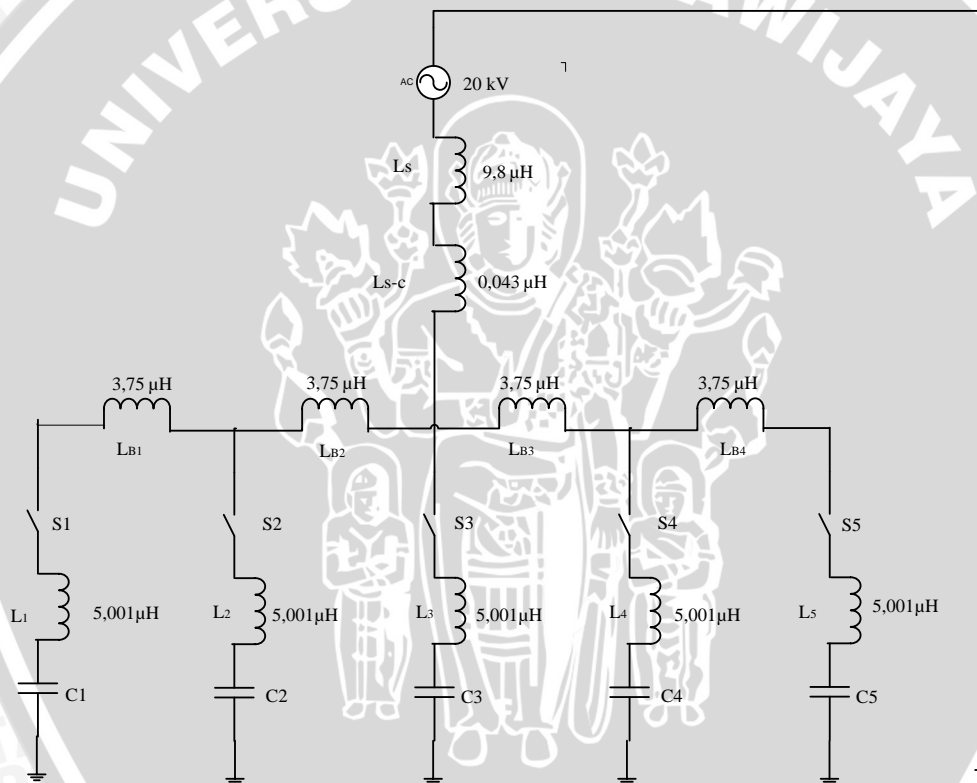
$L_1, L_2, L_3, L_4, L_5$  : Induktansi pada antara *switch* dengan kapasitor bank ( $\mu\text{H}$ )

$\ell_s$  : Jarak antara bus dengan sumber (m)

$\ell_{s-s}$  : Jarak antara *switch* pada kapasitor bank 1 dengan *switch* pada kapasitor bank 2 (m)

$\ell_{s-c}$  = Jarak antara *switch* dengan kapasitor bank (m)

Dari perhitungan diatas, maka dapat ditunjukkan rangkaian pengganti pada Gambar 4.6 yang merupakan konfigurasi dari kapasitor bank sesuai dengan data-data yang ada.



Gambar 4.6 Konfigurasi rangkaian pengganti kapasitor bank

#### 4.2.2 Menghitung nilai arus *inrush* dan frekuensi saat *switching* kapasitor bank

Untuk menentukan nilai arus *inrush* dan frekuensi dari keseluruhan kapasitor bank. Besar nilai total kapsitor bank adalah 25 MVAR dan masing-



masing step adalah 5 MVAR. Dari data-data yang diperoleh dapat dihitung arus dasar kapasitor ( $I_{\text{dasar}}$ ) (kapasitor ideal/murni dimana  $\sin \varphi = 90^\circ$ )

$$\begin{aligned} I_{\text{dasar}} &= \frac{Q_c}{\sqrt{3}V_n \sin \varphi} \\ &= \frac{5 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 17,5 \cdot 10^3 \sin 90^\circ} \\ &= 164,96 \text{ A} \end{aligned}$$

Untuk menentukan nilai arus *inrush* dan frekuensi dari kapasitor bank yang berjumlah 5 step dengan cara sebagai berikut :

1. Kondisi kesatu (*isolated*), hanya kapasitor C1 yang bekerja maka arus *inrush* dihitung sesuai persamaan (2.24) dan melihat Gambar 4.6. Untuk kapasitor bank yang ditanahkan faktor pengali 1,35.

$$\begin{aligned} L_{eq1} &= L_1 + L_{B1} + L_{B2} + L_{S-C} + L_s \\ &= 5,001 + 3,75 + 3,75 + 0,043 + 9,8 \\ &= 22,34 \mu H \end{aligned}$$

$$I_{sc} = \frac{V}{\omega L_{eq1}} = \frac{20 \times 10^3}{2 \pi \times 50 \times 22,34 \times 10^{-6}} = 2.851.131,04 \text{ A}$$

$$\begin{aligned} I_1 &= 1,35 \cdot I_{\text{dasar}} \\ &= 1,35 \times 164,96 \\ &= 222,69 \text{ A} \end{aligned}$$

Besar nilai arus *inrush* dihitung sesuai persamaan (2.24)

$$\begin{aligned} I_{\text{imax}} &= \sqrt{2} \sqrt{I_{sc} \cdot I_1} \\ &= \sqrt{2} \sqrt{2851131,04 \times 222,69} \\ &= 35.634,77 \text{ A} \end{aligned}$$

Sedangkan frekuensi maksimum dihitung sesuai persamaan (2.23)

$$f_i = f_s \sqrt{\frac{I_{sc}}{I_1}}$$

$$f_i = 50 \sqrt{\frac{2851131,04}{222,69}}$$

$$= 632,56 \text{ Hz} = 0,63256 \text{ kHz}$$

Perhitungan tingkat perubahan arus *inrush* terhadap waktu step 1 (*isolated*) menggunakan persamaan (2.34)

$$\frac{di}{dt} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_i \cdot I_{i \max}}{10^6} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 632,56 \cdot 35634,77}{10^6} = 141,55 \frac{A}{\mu s}$$

2. Kondisi kedua (*back to back*) kapasitor C2 bekerja sementara kapasitor C1 masih kondisi bekerja, maka arus *inrush* dihitung sesuai persamaan (2.32)

$$L_{eq2} = \left( \frac{(L_1 + L_{B1})L_2}{(L_1 + L_{B1}) + L_2} \right) + L_{B2} + L_{s-c} + L_s$$

$$L_{eq2} = \left( \frac{(5,001+3,75)5,001}{(5,001+3,75)+5,001} \right) + 3,75 + 0,043 + 9,8 = 16,77 \mu H$$

dengan  $I_1 = I_2 = 222,69 \text{ A}$

$$I_i = 13500 \times \sqrt{\frac{U_r \cdot I_1 \cdot I_2}{f_s \cdot L_{eq} \cdot (I_1 + I_2)}}$$

$$= 13500 \times \sqrt{\frac{20 \cdot 10^3 \cdot 222,69 \cdot 222,69}{50 \cdot 6,975 \cdot (222,69 + 222,69)}}$$

$$= 695.716 \text{ A}$$

Sedangkan frekuensi maksimum dihitung sesuai persamaan 2.33

$$f_i = 9,5 \sqrt{\frac{f_s \cdot U_r \cdot (I_1 + I_2)}{L_{eq} \cdot (I_1 \cdot I_2)}}$$

$$f_i = 9,5 \sqrt{\frac{50 \cdot 20 \cdot 10^3 (222,69 + 222,69)}{16,77 \cdot (222,69 \cdot 222,69)}}$$

$$= 219,8 \text{ kHz}$$

Perhitungan tingkat perubahan arus *inrush* terhadap waktu step 2 persamaan (2.34)

$$\frac{di}{dt} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_i \cdot I_i}{10^6} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 219,8 \cdot 695716}{10^6} = 960,33 \frac{A}{\mu s}$$

Dari perhitungan besarnya arus *inrush* dan frekuensi yang terjadi pada kondisi selanjutnya untuk tiap-tiap step bisa lihat pada Tabel 4.3

Tabel 4.3 Hasil Perhitungan Arush *Inrush* Dan Frekuensi Kapasitor Bank Setiap Step

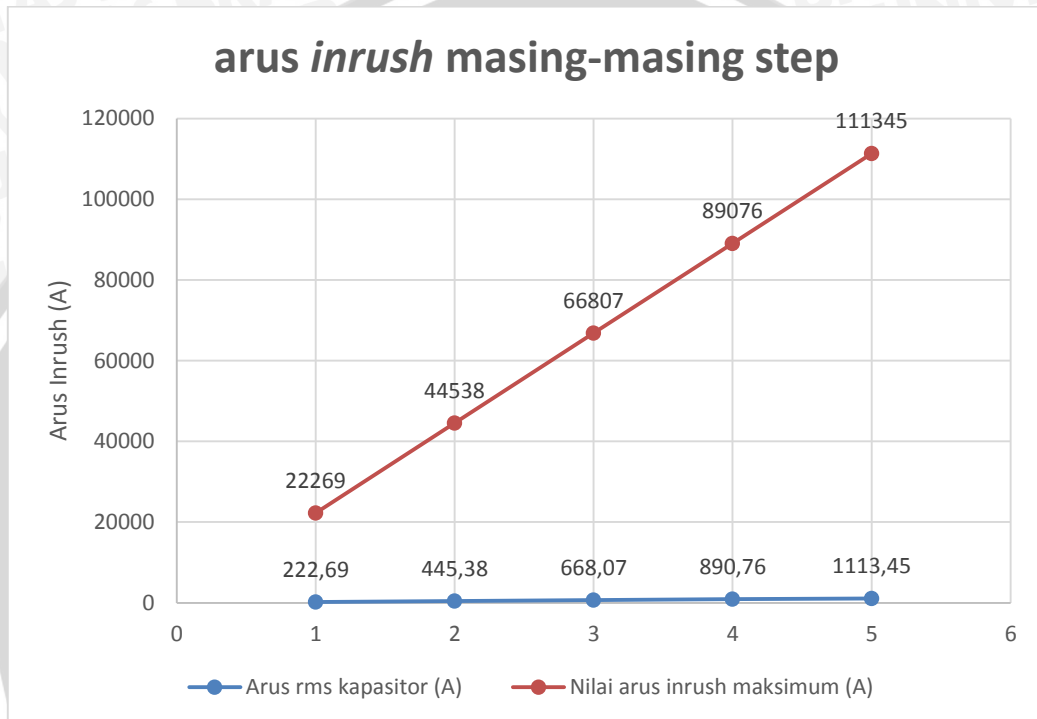
Kondisi	$L_{eq}$ ( $\mu H$ )	$I_{sc}$ (A)	$I_i$ (A)	$f_i$ (kHz)	Perubahan arus ( $A/\mu s$ )
Ke 1	22,32	2.851.131,04	35.634,77	0,63256	141,55
Ke 2	16,77	-	695.716,00	219,8	960,33
Ke 3	12,75	-	9.721.846,50	20,69	1.263,19
Ke 4	12,01	-	129.453.363,10	1,649	1.340,58
Ke 5	11,15	-	$1,244259 \cdot 10^{10}$	0,1258	9.829,94

Sesuai dengan publikasi IEC 70. Arus *inrush* maksimum yang boleh diijinkan bekerja adalah 100 kali arus rms kapasitor tersebut. (AS Pabla.1989:372). Jika nilai arus *inrush* lebih dari 100 kali rms kapasitor maka diperlukan peredam untuk arus *inrush* tersebut. Pada kondisi ke 1 menggunakan arus hubung singkat sumber karena  $L_s$  sumber nilainya sangat besar dibandingkan pada rangkaian ( $L_{s-c}$ ,  $L_{B1}$ , dan  $L_1$ ) sehingga nilai arus *inrush* dan frekuensi *inrush* mendekati arus hubung singkat sumber. Pada kondisi ke 2 sampai ke 5 tidak menggunakan arus hubung singkat karena ada penambahan induktansi rangkaian setiap step. Besar arus *inrush* maksimum yang boleh bekerja pada masing-masing step kapasitor adalah berdasarkan perhitungan bisa dilihat pada Tabel 4.4, sedangkan grafik arus *inrush* untuk tiap step bisa dilihat pada Gambar 4.7



Tabel 4.4 Nilai Arus *Inrush* Maksimum Yang Ijinkan Menurut IEC 70

No Step	Arus rms kapasitor (A)	Nilai arus <i>inrush</i> maksimum (A)
1	222,69	22.269
2	445,38	44.538
3	668,07	66.807
4	890,76	89.076
5	1113,45	111.345

Gambar 4.7 Grafik arus *inrush* masing – masing step

Gambar 4.7 menunjukkan arus *inrush* masing-masing step kapasitor bank yang boleh bekerja sebesar 100 kali arus rms kapasitor bank. Arus *inrush* tertinggi terjadi pada step ke 5 ( kapasitor bank 5) sebesar 111.345 A.

#### 4.2.3 Menghitung nilai tegangan saat *switching* kapasitor bank setiap step

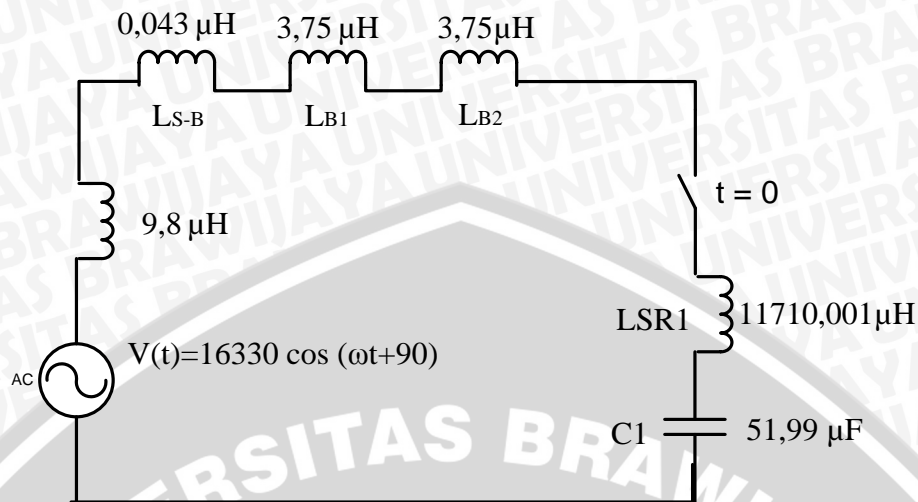
Untuk menentukan tegangan lebih akibat dari *switching* kapasitor bank yang berjumlah 5 step dengan cara sebagai berikut :

- Kondisi kesatu (*isolated*), hanya kapasitor C1 yang bekerja maka lonjakan tegangan dihitung berdasarkan Gambar 4.8.

$$\text{Sumber } v(t) = V_m \cos(\omega t + \theta)$$

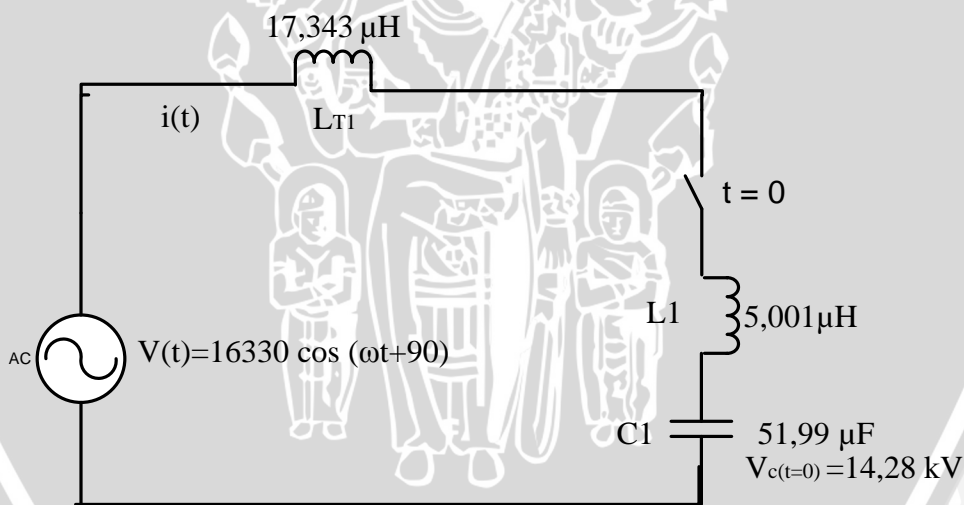
$$V_m = \sqrt{2} \frac{20 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} = 16,33 \cdot 10^3 V = 16,33 kV, \theta = 90^\circ$$

Sumber  $v(t) = 16330 \cos (\omega t + 90^\circ)$



Gambar 4.8 Rangkaian pengganti untuk kapasitor bank 1 yang bekerja Ketika pengisian tegangan pada kapasitor

$$V_{c(t=0)} = \sqrt{2} \frac{17,5 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} = 14,28 \cdot 10^3 V = 14,28 kV$$



Gambar 4.9 Rangkaian pengganti dengan L yang diseri

Nilai Impedansi pada gambar 4.9 adalah

$$Z_L = sL_{T1} = j\omega L_{T1} = j5,446 \cdot 10^{-3} \Omega$$

$$Z_C = \frac{1}{sC_1} = -j \frac{1}{\omega C_1} = -j61,26 \Omega$$

Arus alamiah dapat dihitung dengan cara berikut

Syarat  $v(t) = 0, i \neq 0, Z = 0$

$$v(t) = Z \cdot i$$

$$v(t) = \left( sL_{T1} + \frac{1}{sC} \right) \cdot i$$

$$s^2 LC + 1 = 0$$

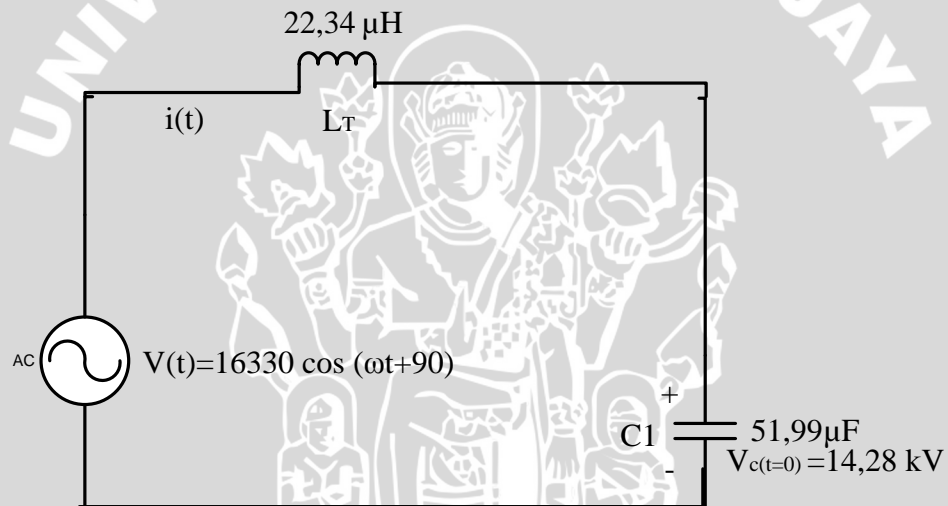
$$s^2 = -\frac{1}{LC}, s = \pm j \sqrt{\frac{1}{LC}}$$

$$s = \pm j 33302,59$$

$$i_n(t) = A e^{at} \cos(\beta t + \theta) = A e^{0t} \cos(33302,59t + \theta)$$

$$i_n(t) = A \cos(33302,59t + \theta) \text{ A}$$

Arus tanggapan paksa sebagai berikut



Gambar 4.10 Rangkaian pengganti untuk step kapasitor bank 1 saat dipasang sumber

$$i_p = \frac{V(t)}{Z}$$

$$Z = sL_{T1} + \frac{1}{sC_1} = j5,446 \cdot 10^{-3} - j61,26 = -j61,25 \Omega = 61,25 \angle -90^\circ \Omega$$

$$i_p = \frac{v(t)}{Z} = \frac{16330 \angle 90^\circ}{-61,25 \angle -90^\circ} = -266,61 \angle 0^\circ \text{ A}$$

$$i_p = -266,61 \cos(314t + 0^\circ) \text{ A}$$

$$i_T = i_n + i_p = A \cos(33302,59t + \theta) - 266,61 \cos(314t + 0^\circ) \text{ A}$$



Pada saat  $t = 0$

$$A \cos(33302,59 \cdot 0 + \theta) - 266,61 \cos(314 \cdot 0 + 0^0) = 0$$

$$A \cos \theta - 266,61 \cos 0^0 = 0$$

$$A \cos \theta = 266,61 \cos 0^0$$

$$A \cos \theta = 266,61$$

$$V_c = \frac{1}{C_1} \int i_t dt$$

$$V_c = \frac{1}{51,99 \cdot 10^{-6}} \int \{A \cos(33302,59 t + \theta) - 266,61 \cos(314 t + 0^0)\} dt$$

$$V_c = \frac{1}{51,99 \cdot 10^{-6}} \int A \cos(33302,59 t + \theta) dt - \int 266,61 \cos(314 t + 0^0) dt$$

$$V_c = \frac{1}{51,99 \cdot 10^{-6}} \left\{ \frac{A}{33302,59} \sin(33302,59 t + \theta) - 0,85 \sin(314 t + 0^0) \right\}$$

$$V_c = \frac{1}{51,99 \cdot 10^{-6}} \left\{ \frac{A}{33302,59} \sin \theta - 0,85 \sin 0^0 \right\}$$

$$V_c = \frac{1}{51,99 \cdot 10^{-6}} \left\{ \frac{A}{33302,59} \sin \theta \right\}$$

$$V_{c(t=0)} = 14280V$$

$$14280 = \frac{1}{51,99 \cdot 10^{-6}} \left\{ \frac{A}{33302,59} \sin \theta \right\}$$

$$0,74 = \frac{A}{33302,59} \sin \theta$$

$$A \sin \theta = 24976,94$$

$$\tan \theta = \frac{A \sin \theta}{A \cos \theta}$$

$$\tan \theta = \frac{24976,94}{266,61} = 93,68$$

$$\theta = \arctan 93,68$$

$$\theta = 89,38^0$$

$$A \sin \theta = 24976,94$$

$$A = 24978,4$$

Jadi persamaan arus  $i_T$  adalah

$$i_T = 24978,4 \cos(33302,59t + 89,38^0) + 266,61 \cos(314t + 0^0)$$

Jadi besar lonjakan tegangan saat *switching* kapasitor bank 1 (C<sub>1</sub>) adalah

$$\begin{aligned}
 v_a &= \frac{1}{C_1} \int i_T dt + L_{T1} \frac{di_T}{dt} \\
 &= \frac{1}{51,99 \cdot 10^{-6}} \int 24978,4 \cos(33302,59t + 89,38^\circ) + \\
 &\quad 266,61 \cos(314t + 0^\circ) dt + \\
 &\quad 22,34 \cdot 10^{-6} \frac{d(24978,4 \cos(33302,59t + 89,38^\circ) + 266,61 \cos(314t + 0^\circ))}{dt} \\
 v_a &= 14321,6 \sin(33302,59t + 89,38^\circ) + 16331,65 \sin(314t + 0^\circ) \\
 &\quad - 14321,6 \sin(33302,59t + 89,38^\circ) \\
 &\quad - 64084,26 \cdot \sin(314t + 0^\circ)
 \end{aligned}$$

Hasil perhitungan tegangan saat *switching* kapascitor bank kondisi selanjutnya untuk tiap-tiap step bisa lihat pada Tabel 4.5

Tabel 4.5 Hasil Perhitungan Tegangan Saat *Switching* Kapascitor Bank Setiap Step

Waktu (μs)	Tegangan saat <i>switching</i> kapascitor bank (kV)				
	Kapascitor bank 1 (C1)	Kapascitor bank 2 (C2)	Kapascitor bank 3 (C3)	Kapascitor bank 4 (C4)	Kapascitor bank 5 (C5)
1	24,54	27,98	29,11	33,21	35,4
2	26,23	29,87	32,34	37,01	39,12
3	28,01	32,01	35,27	40,11	42,88

Pemasukan kapascitor bank ke sistem terjadi kenaikan tegangan yang tergantung oleh waktu penutupan *switch*. Ketika terjadi lonjakan tegangan, jika semakin lama waktu yang diperlukan saat penutupan *switch* berpengaruh terhadap tegangan transien yang dihasilkan.

### 4.3 Menentukan Kapascitas Reaktor Untuk Mereduksi Arus *Inrush* Pada Kapascitor Bank

Kapascitas reaktor seri yang harus digunakan sesuai dengan standart *international* JIS-C-4092 yaitu 6% dari reaktansi kapascitor yang dipasang, maka:

a. Kapasitansi kapasitor

$$C = \frac{Q_c}{\omega \cdot V_n^2}$$

$$C = \frac{5 \cdot 10^6}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 17500^2} = 51,99 \mu F$$

$$X_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 51,99 \mu} = 61,26 \Omega$$

Sehingga:

$$\frac{X_L}{X_c} \times 100\% = 6\%$$

$$\frac{X_L}{61,26} \times 100\% = 6\%$$

$$X_L = 3,6756 \Omega$$

$$X_L = 2\pi f L$$

$$3,6756 = 314 L$$

$$L = 11705 \mu H$$

b. Menentukan kapasitas rating reaktor seri dihitung sesuai persamaan 2.40 dalam kVAR.

$$\begin{aligned} Q_{3\phi} &= 3 \cdot (I_{dasar})^2 \cdot X_L \frac{1}{1000} \\ &= 3 \cdot (164,96)^2 \cdot 3,6756 \cdot \frac{1}{1000} \\ &= 300,06 \text{ kVAR} \end{aligned}$$

Sehingga didapat:

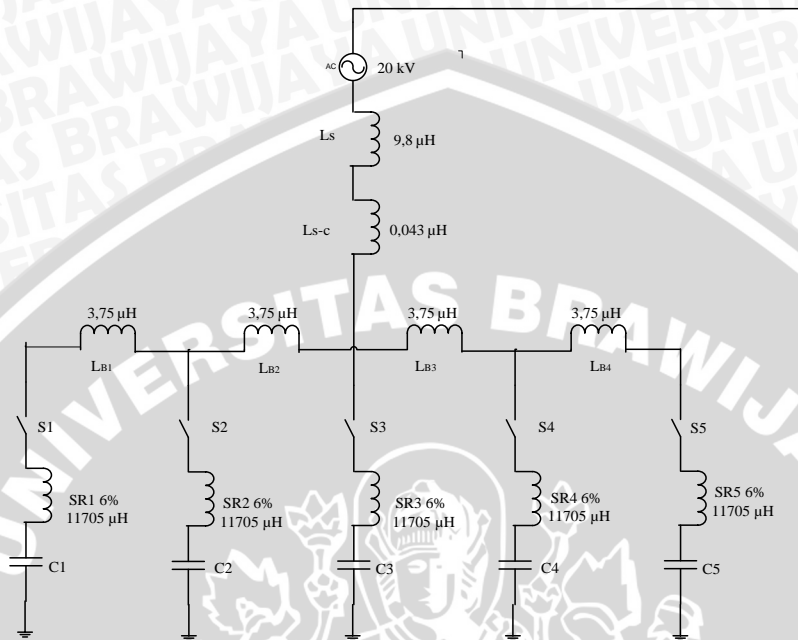
- Nilai induktansi reaktor seri : 11705  $\mu H$
- Kapasitas reaktor seri : 300,06 kVAR

Dengan demikian pada masing-masing rangkaian kapasitor terdapat tambahan reaktor seri sebesar 11705  $\mu H$ , hal ini tentu saja akan menambah nilai induktansi total pada kapasitor tersebut.

Setelah menentukan nilai reaktor seri untuk mereduksi arus *inrush* maka dapat ditunjukkan dalam rangkaian pengganti seperti Gambar 4.11



Gambar 4.11 rangkaian pengganti kapasitor bank setelah penambahan reaktor seri sebesar 6 % dari reaktansi kapasitor bank dan dipasang seri dengan kapasitor bank..



Gambar 4.11 Rangkaian pengganti setelah penambahan reaktor seri

#### 4.3.1 Menghitung nilai arus *inrush* dan frekuensi saat *switching* kapasitor bank setelah penambahan reaktor seri.

Untuk menentukan arus *inrush* dan frekuensi maksimum setelah penambahan reaktor seri sebesar 11705 μH adalah sebagai berikut:

1. Kondisi kesatu (*isolated*), hanya kapasitor C1 yang bekerja maka arus *inrush* dihitung sesuai persamaan (2.24) dan melihat Gambar 4.11.

Untuk kapasitor bank yang ditanahkan faktor pengali 1,35.

$$\begin{aligned} L_{eq1} &= (L_1 + L_{SR1}) + L_{B1} + L_{B2} + L_{S-c} + L_s \\ &= (5,001 + 11705) + 3,75 + 3,75 + 0,043 + 9,8 \\ &= 11727,34 \mu\text{H} \end{aligned}$$

$$I_{sc} = \frac{V}{\omega L_{eq1}} = \frac{20 \times 10^3}{2 \pi \times 50 \times 11727,34 \times 10^{-6}} = 5431,26 \text{ A}$$

$$\begin{aligned} I_1 &= 1,35 \cdot I_{\text{dasar}} \\ &= 1,35 \times 164,96 \\ &= 222,69 \text{ A} \end{aligned}$$

Besar nilai arus *inrush* dihitung sesuai persamaan (2.24)

$$\begin{aligned} I_{\text{imax}} &= \sqrt{2} \sqrt{I_{\text{SC}} \cdot I_1} \\ &= \sqrt{2} \sqrt{5431,26 \times 222,69} \\ &= 1.555,30 \text{ A} \end{aligned}$$

Sedangkan frekuensi maksimum dihitung sesuai persamaan (2.25)

$$\begin{aligned} f_i &= f_s \sqrt{\frac{I_{\text{SC}}}{I_1}} \\ &= 50 \sqrt{\frac{5431,26}{222,69}} \\ &= 132 \text{ Hz} = 0,132 \text{ kHz} \end{aligned}$$

Perhitungan tingkat perubahan arus *inrush* terhadap waktu step 1 (*isolated*) menggunakan persamaan(2.34)

$$\frac{di}{dt} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_i \cdot I_{\text{imax}}}{10^6} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 132 \cdot 1555,30}{10^6} = 1,29 \frac{\text{A}}{\mu\text{s}}$$

2. Kondisi kedua (*back to back*) kapasitor C2 bekerja sementara kapasitor C1 masih kondisi bekerja, maka arus *inrush* dihitung sesuai persamaan 2.32

$$\begin{aligned} L_{\text{eq2}} &= \left( \frac{(L_1 + L_{\text{SR1}} + L_{\text{B1}}) L_{\text{SR2}}}{(L_1 + L_{\text{SR1}} + L_{\text{B1}}) + L_{\text{SR2}}} \right) + L_{\text{B2}} + L_{\text{S-C}} + L_{\text{S}} \\ &= \left( \frac{(5,001 + 11705 + 3,75) 11710,001}{(5,001 + 1705 + 3,75) + 11710,001} \right) + 3,75 + 0,043 \\ &\quad + 9,8 \\ &= 5869,53 \mu\text{H} \end{aligned}$$

Dengan  $I_1 = I_2 = 222,69 \text{ A}$

$$\begin{aligned}
 I_i &= 13500 \times \sqrt{\frac{U_r \cdot I_1 \cdot I_2}{f_s \cdot L_{eq} \cdot (I_1 + I_2)}} \\
 &= 13500 \times \sqrt{\frac{20 \cdot 10^3 \cdot 222,69 \cdot 222,69}{50 \cdot 5869,53 \cdot (222,69 + 222,69)}} \\
 &= 37.187,54 \text{ A}
 \end{aligned}$$

Sedangkan frekuensi maksimum dihitung sesuai persamaan 2.33

$$\begin{aligned}
 f_i &= 9,5 \sqrt{\frac{f_s \cdot U_r \cdot (I_1 + I_2)}{L_{eq} \cdot (I_1 \cdot I_2)}} \\
 &= 9,5 \sqrt{\frac{50 \cdot 20 \cdot 10^3 (222,69 + 222,69)}{5869,53 \cdot (222,69 \cdot 222,69)}} \\
 &= 11,75 \text{ kHz}
 \end{aligned}$$

Perhitungan tingkat perubahan arus *inrush* terhadap waktu step 2 persamaan (2.34)

$$\frac{di}{dt} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_i \cdot I_i}{10^6} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 11,75 \cdot 37187,54}{10^6} = 2.744,07 \frac{\text{A}}{\mu\text{s}}$$

Perhitungan besarnya arus *inrush* dan frekuensi yang terjadi pada kondisi selanjutnya untuk setiap step setelah penambahan reaktor seri bisa dilihat pada Tabel 4.6

Tabel 4.6 Hasil Perhitungan Arus *Inrush* Dan Frekuensi Setelah Penambahan Reaktor Seri

Kondisi	$L_{eq}$ ( $\mu\text{H}$ )	$I_{sc}$ (A)	$I_i$ (A)	$f_i$ (kHz)	Perubahan arus ( $\text{A}/\mu\text{s}$ )
Ke 1	11727,34	5431,26	1.555,30	0,132	1,29
Ke 2	5868,53	-	37.187,54	11,75	2.744,07
Ke 3	3915,44	-	55.477,07	14,18	4.111,07
Ke 4	3015,50	-	71.456,54	17,21	77.22,94
Ke 5	2155,45	-	90.349,75	18,34	10.405,71



Dari Tabel 4.6 arus *inrush* setelah penambahan reaktor seri, nilai arus *inrush* untuk setiap step dibawah 100 kali arus rms kapasitor, nilai arus tersebut dibawah nilai yang diijinkan oleh IEC 70. Selain itu juga terjadi penurunan frekuensi saat *switching* setelah penambahan reaktor seri untuk setiap step.

#### 4.3.2 Menghitung Nilai Tegangan Saat *Switching* Kapasitor Bank Setiap Step Setelah Penambahan Reaktor Seri

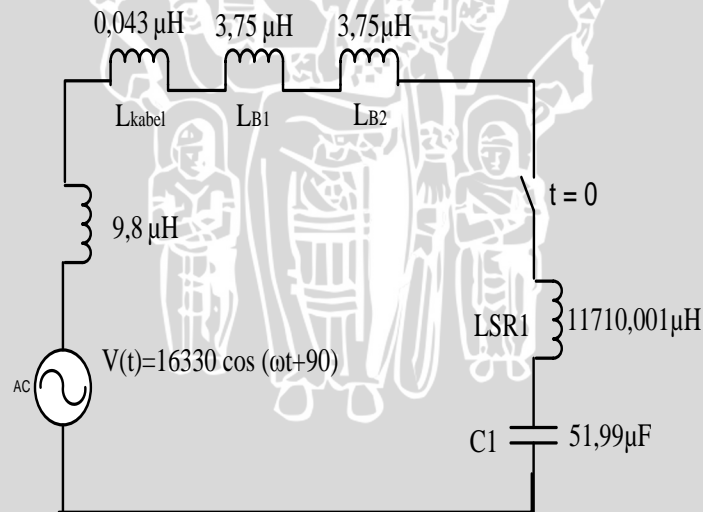
Untuk menentukan tegangan lebih akibat dari *switching* kapasitor bank yang berjumlah 5 step dengan cara sebagai berikut :

- a. Kondisi kesatu (*isolated*), hanya kapasitor C1 yang bekerja maka lonjakan tegangan dihitung berdasarkan Gambar 4.12.

$$\text{Sumber } v(t) = V_m \cos(\omega t + \theta)$$

$$V_m = \sqrt{2} \frac{20 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} = 16,33 \cdot 10^3 V = 16,33 kV, \theta = 90^\circ$$

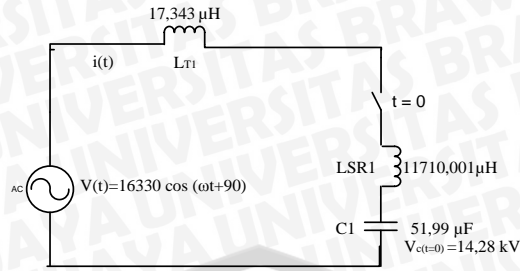
$$\text{Sumber } v(t) = 16330 \cos(\omega t + 90^\circ)$$



Gambar 4.12 Rangkaian pengganti untuk kapasitor bank 1 yang bekerja setelah penambahan reaktor seri.

Ketika pengisian tegangan pada kapasitor

$$V_{c(t=0)} = \sqrt{2} \frac{17,5 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} = 14,28 \cdot 10^3 V = 14,28 kV$$



Gambar 4.13 Rangkaian pengganti dengan L yang diseri setelah penambahan reaktor seri.

Nilai Impedansi pada gambar 4.9 adalah

$$Z_L = sL_{T1} = j\omega L_{T1} = j3,68\Omega$$

$$Z_C = \frac{1}{sC_1} = -j\frac{1}{\omega C_1} = -j61,26\Omega$$

Arus alamiah dapat dihitung dengan cara berikut

Syarat  $v(t) = 0, i \neq 0, Z = 0$

$$V(t) = Z \cdot i$$

$$V(t) = \left( sL_{T1} + \frac{1}{sC} \right) \cdot i$$

$$s^2 LC + 1 = 0$$

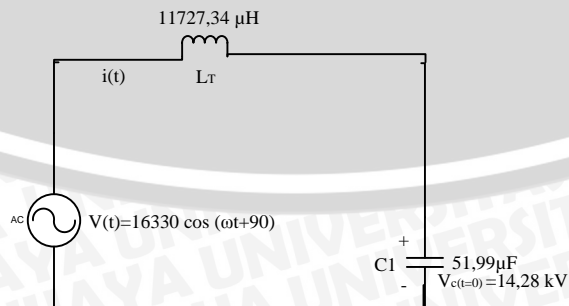
$$s^2 = -\frac{1}{LC}, s = \pm j \sqrt{\frac{1}{LC}}$$

$$s = \pm j1280,68$$

$$i_n(t) = Ae^{at} \cos(\beta t + \theta) = Ae^{0t} \cos(1280,68t + \theta)$$

$$i_n(t) = A \cos(1280,68t + \theta) \text{ A}$$

Arus tanggapan paksa sebagai berikut



Gambar 4.14 Rangkaian pengganti untuk step kapasitor bank 1 saat dipasang sumber setelah penambahan reaktor seri.

$$i_p = \frac{V(t)}{Z}$$

$$Z = sL_{T1} + \frac{1}{sC_1} = j3,68 - j61,26 = -57,58 \Omega = -57,58 \angle -90^\circ \Omega$$

$$i_p = \frac{v(t)}{Z} = \frac{16330 \angle 90^\circ}{-57,58 \angle -90} = -283,60 \angle 0^\circ A$$

$$i_p = -283,60 \cos(314t + 0^\circ) A$$

$$i_T = i_n + i_p = A \cos(33302,59t + \theta) - 283,60 \cos(314t + 0^\circ) A$$

Pada saat  $t = 0$

$$A \cos(33302,59 \cdot 0 + \theta) - 283,60 \cos(314 \cdot 0 + 0^\circ) = 0$$

$$A \cos \theta - 283,60 \cos 0^\circ = 0$$

$$A \cos \theta = 283,60 \cos 0^\circ$$

$$A \cos \theta = 283,60$$

$$V_c = \frac{1}{C_1} \int i_t dt$$

$$V_c = \frac{1}{51,99 \cdot 10^{-6}} \int \{A \cos(33302,59 t + \theta) - 283,60 \cos(314t + 0^\circ)\} dt$$

$$V_c = \frac{1}{51,99 \cdot 10^{-6}} \int A \cos(33302,59t + \theta) dt - \int 283,60 \cos(314t + 0^\circ) dt$$

$$V_c = \frac{1}{51,99 \cdot 10^{-6}} \left\{ \frac{A}{33302,59} \sin(33302,59t + \theta) - 0,90 \sin(314t + 0^\circ) \right\}$$

$$V_c = \frac{1}{51,99 \cdot 10^{-6}} \left\{ \frac{A}{33302,59} \sin \theta - 0,90 \sin 0^\circ \right\}$$

$$V_c = \frac{1}{51,99 \cdot 10^{-6}} \left\{ \frac{A}{33302,59} \sin \theta \right\}$$

$$V_{c(t=0)} = 14280V$$

$$14280 = \frac{1}{51,99 \cdot 10^{-6}} \left\{ \frac{A}{33302,59} \sin \theta \right\}$$

$$0,74 = \frac{A}{33302,59} \sin \theta$$

$$A \sin \theta = 24976,94$$

$$\tan \theta = \frac{A \sin \theta}{A \cos \theta}$$

$$\tan \theta = \frac{24976,94}{283,60} = 88,07$$

$$\theta = \arctan 88,07$$



$$\theta = 89,34^{\circ}$$

$$A \sin \theta = 24976,94$$

$$A = 24978,59$$

Jadi persamaan arus  $i_T$  adalah

$$i_T = 24978,59 \cos(33302,59t + 89,34^{\circ}) + 283,60 \cos(314t + 0^{\circ}) \text{ A}$$

Jadi besar lonjakan tegangan saat *switching* kapasitor bank 1 ( $C_1$ ) adalah

$$\begin{aligned} v_a &= \frac{1}{C_1} \int i_T dt + L_{T1} \frac{di_T}{dt} \\ &= \frac{1}{51,99 \cdot 10^{-6}} \int 24978,59 \cos(33302,59t + 89,34^{\circ}) + 283,60 \cos(314t + 0^{\circ}) \\ &\quad + 22,34 \cdot 10^{-6} \frac{d(24978,59 \cos(33302,59t + 89,34^{\circ}) + 283,60 \cos(314t + 0^{\circ}))}{dt} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} v_a &= 14321,6 \sin(33302,59t + 89,34^{\circ}) + 16331,65 \sin(314t + 0^{\circ}) \\ &\quad - 14321,6 \sin(33302,59t + 89,34^{\circ}) \\ &\quad - 64084,26 \sin(314t + 0^{\circ}) \end{aligned}$$

Hasil perhitungan tegangan saat *switching* kapasitor bank kondisi selanjutnya untuk tiap-tiap step bisa lihat pada Tabel 4.7

Tabel 4.7 Hasil Perhitungan Tegangan Saat *Switching* Kapasitor Bank Setiap Step Setelah Penambahan Reaktor Seri

Waktu ( $\mu\text{s}$ )	Tegangan saat <i>switching</i> kapasitor bank (kV)				
	Kapasitor bank 1(C1)	Kapasitor bank 2(C2)	Kapasitor bank 3(C3)	Kapasitor bank 4(C4)	Kapasitor bank 5(C5)
1	23,41	26,67	27,02	32,18	34,55
2	25,12	27,23	31,32	35,04	36,54
3	26,43	30,16	34,21	37,21	39,21

Setelah penambahan reaktor seri terjadi penurunan tegangan setiap step saat *switching* kapasitor bank yang tergantung waktu. Semakin besar waktu yang dibutuhkan maka nilai tegangan semakin besar.