

**ANALISIS PENGGUNAAN REAKTOR UNTUK MEREDUKSI
ARUS TRANSIEN PADA KAPASITOR BANK
DI PT. AUTOKORINDO PRATAMA
GRESIK, JAWA TIMUR**

repository.ub.ac.id

SKRIPSI

**Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik**



Disusun oleh :

ARIF EFFENDY

NIM. 0210632018 - 63

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

MALANG

2007

UNIVERSITAS
BRAWIJAYA



LEMBAR PENGESAHAN

SKRIPSI

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh :

ARIF EFFENDY

NIM. 0210632018 - 63

Mengetahui dan menyetujui
Dosen Pembimbing :

Ir. Drs. Moch. Dhofir, MT
NIP.131 879 031

Ir. Soemarwanto
NIP.130 873 485



LEMBAR PENGESAHAN

Disusun oleh :

ARIF EFFENDY
NIM. 0210632018 - 63

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus
pada tanggal 8 Agustus 2006

DOSEN PENGUJI

Ir. Teguh Utomo, MT
NIP.131 960 444

Ir. Chairuzzaini
NIP.130 682 589

Ir. H. Choiri
NIP.130 703 042

Ir. Hari Santoso, MS
NIP.131 470 477

Mengetahui,
Ketua Jurusan Teknik Elektro

Ir. Heru Nurwasito, M.Kom
NIP. 131 879 033



KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, Segala puji bagi Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulisan skripsi ini yang berjudul “**Analisis Penggunaan Reaktor untuk Mereduksi Arus Transien pada Kapasitor Bank di PT. Autokorindo Pratama Gresik**” dapat diselesaikan dengan baik dan lancar sebagai salah satu syarat untuk mendapat gelar Sarjana Teknik dari Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.

Skripsi ini dapat diselesaikan atas bantuan dari beberapa pihak, oleh karena itu pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih yang tulus kepada :

1. Bapak Ir. Heru Nurwasito, M.Kom selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro dan Bapak Rudi Yuwono, ST, M.Sc selaku Sekretaris Jurusan Teknik Elektro.
2. Bapak Ir. Drs. Moch. Dhofir, MT, selaku dosen pembimbing dalam skripsi ini, yang telah banyak membantu memberikan dukungan berupa petunjuk, saran dan waktu atas penulisan skripsi ini.
3. Bapak Ir. Soemarwanto, selaku dosen pembimbing dalam skripsi ini, yang telah banyak membantu memberikan dukungan berupa petunjuk, saran dan waktu atas penulisan skripsi ini.
4. Seluruh dosen pengajar yang telah memberikan bimbingan selama masa perkuliahan serta seluruh staf karyawan di lingkungan Fakultas Teknik, khususnya Jurusan Teknik Elektro.
5. Keluarga di Gresik atas dukungan dan doa yang sangat berarti bagi penulis.
6. Bapak Heru selaku karyawan PT. Autokorindo Pratama yang telah membantu proses pengambilan data dalam skripsi ini.

Dalam penulisan skripsi ini penulis menyadari masih diperlukan saran dan kritik demi kesempurnaannya. Demikian skripsi ini disusun, semoga dapat bermanfaat.

Malang, Februari 2007

Penyusun

DAFTAR ISI

	Halaman
LEMBAR PENGESAHAN	ii
KATA PENGANTAR	iv
DAFTAR ISI	v
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR TABEL	viii
ABSTRAK	ix
BAB I. PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	1
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan	2
1.5 Sistematika Pembahasan	2
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Penggunaan Reaktor pada Kapasitor Bank	3
2.1.1 Prinsip dasar Reaktor	4
2.1.2 Prinsip dasar Kapasitor	5
2.2.3 Dasar perhitungan Resonansi	8
2.2.3 Rangkaian LC Seri	9
2.2 Kapasitor Bank sebagai Sumber Daya Reaktif	11
2.2.1 Rating Standart Kapasitor	12
2.2.2 Konfigurasi pemasangan Kapasitor	13
2.2.3 Penempatan Kapasitor	14
2.3 Arus Transien	16
2.3.1 Arus transien pada kapasitor Tunggal terisolasi	16
2.3.2 Arus transien pada kapasitor paralel	19
2.4 Sistem pengaman pada bank kapasitor	23
2.4.1 <i>Fuse</i> untuk kapasitor	24
2.4.2 <i>Circuit breaker</i>	27

BAB III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Studi Literatur.....29
 3.2. Tempat dan Waktu Penelitian.....29
 3.3. Analisis29
 3.4. Diagram Alir Penyelesaian Masalah.....31

BAB IV. PERHITUNGAN BESARNYA REAKTOR UNTUK MEREDUKSI ARUS TRANSIEN PADA BANK KAPASITOR

4.1. Data – data Sistem Tenaga Listrik.....32
 4.2. Perhitungan besarnya kapasitas reaktor untuk mereduksi arus transien pada kapasitor bank.....35
 4.2.1. Menentukan Nilai induktansi.....36
 4.2.2. Menentukan nilai arus inrush dan frekuensi.....37
 4.3. Menentukan Kapasitas Pengaman Pemutus Rangkaian.44

BAB V. PENUTUP

5.1. Kesimpulan46
 5.2. Saran47

DAFTAR PUSTAKA.....48

LAMPIRAN



DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1. Pemasangan reaktor pada kapasitor bank	3
Gambar 2.2. Hubungan fluksi dinyatakan dalam weber-gulungan.....	4
Gambar 2.3. Efek induktansi terhadap arus.....	4
Gambar 2.4. Rangkaian yang melukiskan pengisian dan pengosongan kapasitor ...	5
Gambar 2.5. Kurva pengisian dan pengosongan kapasitor	5
Gambar 2.6. Rangkaian RLC paralel	8
Gambar 2.7. Rangkaian LC seri.....	9
Gambar 2.8. Kurva fungsi arus terhadap waktu akibat pengaruh perubahan induktor.....	11
Gambar 2.9. Hubungan bank kapasitor.....	14
Gambar 2.10. Lokasi penempatan kapasitor.....	15
Gambar 2.11. Pemasangan kapasitor tunggal/single.....	16
Gambar 2.12. Rangkaian sederhana pada kapasitor tunggal	17
Gambar 2.13. Arus <i>inrush</i> dan tegangan pada saat pengisian kapasitor tunggal.....	17
Gambar 2.14. Rangkaian kapasitor paralel	19
Gambar 2.15. Arus <i>inrush</i> pada saat pengisian kapasitor paralel.....	20
Gambar 2.16. Induktansi pada rangkaian bank kapasitor.....	22
Gambar 2.17. Rangkaian pengaman pada bank kapasitor.....	24
Gambar 2.18. Fuse pada kapasitor	25
Gambar 2.19. Kurva hubungan waktu perusakan tangki kapasitor terhadap arus gangguan	26
Gambar 2.20. <i>Circuit breaker</i> pada kapasitor.....	27
Gambar 3.1. Diagram Alir Analisis.....	31
Gambar 4.1. Single line Diagram bank kapasitor.....	32
Gambar 4.2. Karakteristik beban harian.....	34
Gambar 4.3. Distribusi beban harian.....	34
Gambar 4.4. Konfigurasi bank kapasitor.....	37
Gambar 4.5. Grafik arus <i>inrush</i> masing – masing step.....	40
Gambar 4.6. Grafik arus <i>inrush</i> untuk masing – masing step setelah menambahkan reaktor seri.....	44
Gambar 4.7. Diagram segaris kapasitor dengan pengaman pemutus rangkaian.....	45

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1. Konstanta beberapa jenis bahan dielektrik	7
Tabel 2.2. Rating Standart kapasitor type <i>indoor</i> dan <i>outdoor</i>	12
Tabel 2.3. Kapasitor seri dan paralel	13
Tabel 2.4. Nilai rata – rata dari induktansi diantara bank kapasitor	22
Tabel 4.1. Data pembebanan setiap jam perhari	33
Tabel 4.2. Data perubahan kVAR tiap jam dan jumlah step kapasitor bank.....	35
Tabel 4.3. Hasil perhitungan arus <i>inrush</i> dan frekuensi masing – masing step.....	39
Tabel 4.4. Nilai arus <i>inrush</i> maksimum yang boleh bekerja	40
Tabel 4.5. Hasil perhitungan arus <i>inrush</i> dan frekuensi setiap step setelah menambahkan reaktor seri.....	43



ABSTRAK

Arif Effendy, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Februari 2007, **Analisis Penggunaan Reaktor untuk Mereduksi Arus Transien pada Kapasitor Bank Di PT. Autokorindo Pratama.Gresik**

Dosen Pembimbing : Ir. Drs. Moch. Dhofir, MT dan Ir. Soemarwanto

Sebagai pabrik, PT. Autokorindo Pratama memiliki banyak beban berupa motor-motor penggerak yang merupakan beban induktif. Beban induktif di pabrik ini harus memiliki faktor daya tidak kurang dari 0,85 yang telah ditetapkan oleh PLN. Untuk memenuhi persyaratan faktor daya tersebut, maka diperlukan sebuah kompensator daya reaktif yaitu berupa bank kapasitor. Pihak manajemen memutuskan bahwa faktor daya yang diinginkan sebesar 0,9 tertinggal. Namun bila dua atau lebih susunan kapasitor (capasitor bank) yang diparalel pada suatu bus, back to back switching dari kapasitor dapat menghasilkan harga puncak arus transien yang cukup tinggi, dan arus ini dapat membahayakan peralatan listrik serta dapat memperpendek umur kapasitor.

Setelah dilakukan analisa menggunakan ANSI/IEEE C37.012-1979 bahwa besarnya arus transien pada susunan kapasitor bank di PT. Autokorindo Pratama.Gresik mencapai 200 kali arus rms kapasitor yang terpasang sehingga menyebabkan kerusakan pada kapasitor. Nilai arus inrush tersebut berada diatas nilai yang diijinkan oleh publikasi IEC 70 sebesar 100 kali arus rms kapasitor (A.S. Pabla, 1989:372). Oleh karena itu dalam skripsi ini kami mengagagas penggunaan reaktor dengan tingkat nilai induktansi yang sesuai dan dipasang secara seri untuk meredam arus inrush maksimum yang dihasilkan, analisis dilakukan dengan menggunakan model rangkaian.

UNIVERSITAS BRAWIJAYA





BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

PT. Autokorindo Pratama di Gresik merupakan pabrik yang memproduksi lingkaran roda / Velg untuk kendaraan bermotor yang membutuhkan banyak motor induksi yang digunakan dalam proses produksinya, sehingga menyebabkan beban listrik bersifat induktif dan memiliki faktor daya yang lebih rendah dari batas yang diijinkan PLN. Cara memperbaiki faktor daya tersebut adalah dengan jalan memasang kapasitor baik secara tersendiri yaitu dipasang secara langsung pada masing – masing beban maupun secara kelompok yaitu dipasang pada suatu kelompok beban tertentu pada sistem tenaga listrik.

Pada saat kapasitor dihubungkan ke sumber tegangan masalah yang sering timbul pada bank kapasitor di PT. Autokorindo Pratama adalah sering terjadi kerusakan pada kapasitor itu sendiri. Patut diduga penyebab kerusakan ini adalah timbulnya arus pengisian transien pada saat *switching* kapasitor dilakukan. Arus inilah yang dinamakan *inrush current* atau arus *inrush* bisa juga disebut arus lonjakan dengan besar dan frekuensi yang bergantung pada nilai kapasitansi, induktansi dan besar tegangan pada rangkaian. Besarnya arus *inrush* ini dapat direduksi atau diredam dengan menggunakan reaktor dengan nilai induktansi yang sesuai, yang dipasang secara seri dengan kapasitor.

Mengingat arus *inrush* ini dan sensitifnya kapasitor terhadap gangguan maupun kondisi operasi yang tidak normal, maka dipandang perlu untuk melakukan analisis tentang besarnya arus *inrush* yang terjadi karena pemasukan bank kapasitor dan perhitungan besarnya reaktor yang digunakan dalam meredam arus *inrush* hingga tingkat yang diijinkan.

1.2. Rumusan Masalah

Dari latar belakang di atas permasalahan yang akan dibahas dalam skripsi ini adalah:

1. Berapa besar arus *inrush* yang terjadi karena pemasukan bank kapasitor sesuai keadaan beban harian.
2. Berapa nilai induktansi yang diperlukan untuk meredam arus *inrush* hingga yang diijinkan.
3. Berapa besar rating *circuit breaker* yang diperlukan berdasarkan level arus *inrush*.

1.3. Batasan Masalah

Agar pembahasan ini lebih terarah sesuai dengan tujuan yang diharapkan, maka permasalahan yang akan dibahas pada skripsi ini meliputi :

1. Penentuan berapa besar arus *inrush* dan frekuensinya pada setiap pemasukan kapasitor di PT. Autokorindo Pratama
2. Penentuan kapasitas reaktor didasarkan pada peredaman adanya arus *inrush*
3. Penentuan nilai kVAR untuk mendapatkan faktor daya 0,9 tertinggal sesuai dengan karakteristik beban harian.
4. Rating *circuit breaker* yang diperlukan didasarkan pada level arus *inrush*

1.4. Tujuan

Skripsi ini bertujuan untuk menganalisis seberapa besar arus *inrush* yang terjadi karena pemasukan bank kapasitor sesuai keadaan beban harian dan berapa nilai induktansi yang diperlukan untuk meredam arus *inrush* di PT. Autokorindo Pratama, Gresik.

1.5. Sistematika Pembahasan

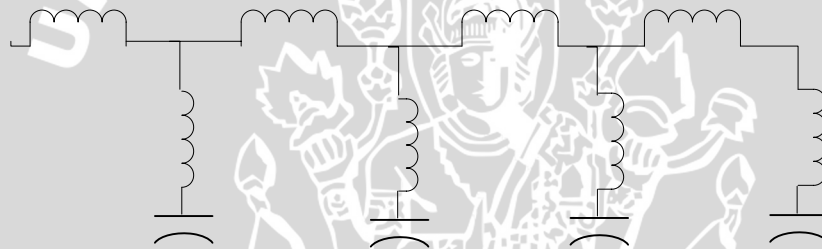
Dalam menyelesaikan skripsi ini, sistematika pembahasannya disusun sebagai berikut:

- | | |
|---------|--|
| BAB I | Berisi latar belakang, rumusan masalah, tujuan dan sistematika pembahasan. |
| BAB II | Menjelaskan teori tentang kapasitor, arus <i>inrush</i> dan pengaruhnya serta pengaman pada bank kapasitor. |
| BAB III | Menjelaskan metode penelitian yang digunakan untuk menganalisis arus <i>inrush</i> pada bank kapasitor. |
| BAB IV | Analisis tentang seberapa besar nilai arus <i>inrush</i> beserta nilai kapasitor pada bank kapasitor dan bagaimana meredamnya. |
| BAB V | Berisi kesimpulan dan saran dari hasil analisis dalam skripsi ini. |

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Penggunaan Reaktor Pada Kapasitor Bank

Reaktor yang disebut juga sebagai induktor merupakan alat kompensasi yang digunakan untuk memperbaiki kinerja dari sistem atau jaringan listrik. Penggunaan reaktor biasanya sering dipakai pada saluran transmisi diantaranya untuk pengaturan tegangan. Kompensasi dengan pemasangan reaktor juga dapat digunakan pada kapasitor bank untuk mereduksi arus transien yang terjadi ketika *switching* kapasitor bank dilakukan. Cara yang dapat dilakukan untuk mereduksi arus *transient* pada kapasitor bank adalah dengan memasang induktor yang diseri dengan kapasitor bank. Di bawah ini adalah prinsip dasar pemasangan reaktor pada kapasitor bank yang ditunjukkan seperti pada Gambar 2.1 berikut.



Gambar 2.1 Pemasangan reaktor pada kapasitor bank

Sumber : IEEE, 1979 : 721

Dengan parameter-parameter sebagai berikut :

- L_S = induktansi sumber (μH)
- L_{B1}, L_{B2} = induktansi pemisah bus (μH)
- SR_1, SR_2, SR_3 = induktansi reaktor seri yang besarnya sama (μH)
- C_1, C_2, C_3 = kapasitansi shunt (kVAR)

Sebuah reaktor seri kadang-kadang dinamakan peredam lilitan dimana lilitan disini adalah induktansi. Besarnya kapasitas rating suatu reaktor seri dapat diperoleh melalui persamaan berikut: (A.A. Johnson, 1950 : 234)

$$Q_{\phi} = 3 (I_{\text{dasar}})^2 \cdot X_L \cdot 1/1000 \quad L_S \quad L_{B1}$$

Keterangan :

- Q : Kapasitas reaktor (kVAR)
- f : frekuensi sumber (Hz)

SR₁

L : induktansi (H)

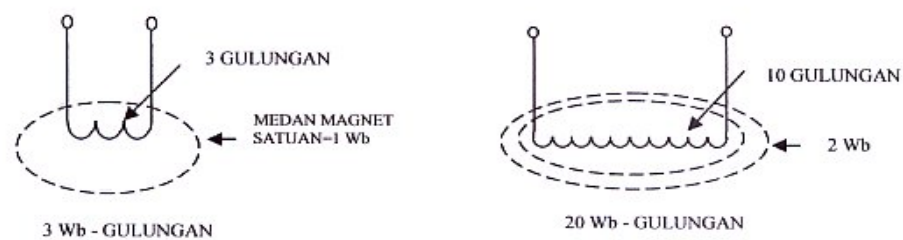
I_{dasar} : arus dasar (A)

X_L : reaktansi (Ω)

Sesuai dengan publikasi IEC 70, 1987. Arus sesaat (*inrush*) maksimum yang boleh diijinkan bekerja adalah 100 kali arus rms kapasitor tersebut. Kapasitas reaktor seri yang harus digunakan sesuai dengan standart internasional JIS-C-4092 yaitu 6 % dari kapasitas dasar kapasitor yang dipasang. (2.2)

2.1.1. Prinsip Dasar Reaktor

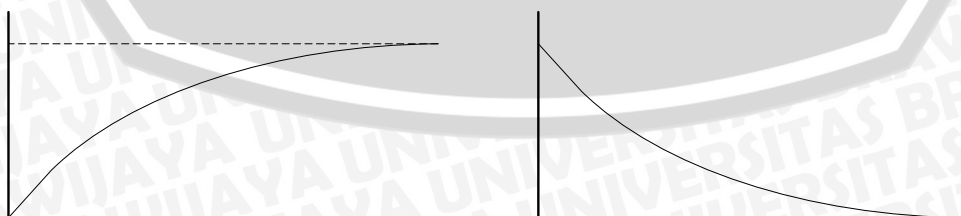
Sebuah Reaktor atau yang sering kita kenal sebagai induktor apabila diberi sumber arus maka sesuai dengan Hukum Lenz memberikan arah gaya gerak listrik induksi sedemikian sehingga melawan perubahan arus yang menghasilkan ggl tersebut. Telah diketahui bahwa elektron yang bergerak atau arus listrik yang mengalir akan menghasilkan medan magnet. Namun kebalikannya untuk menghasilkan arus listrik (arus induksi) perlu dilakukan perubahan medan magnet. Gambar 2.2 di bawah ini menunjukkan hubungan fluksi dinyatakan dalam weber-gulungan.



Gambar 2.2 Hubungan fluksi dinyatakan dalam weber-gulungan

Sumber : Michael Neidle, 1991: 20

Gambar 2.3 di bawah ini merupakan gambar kurva waktu yang diperlukan oleh arus untuk mencapai nilai akhirnya dengan mempertahankan laju perubahan arus mula-mula.

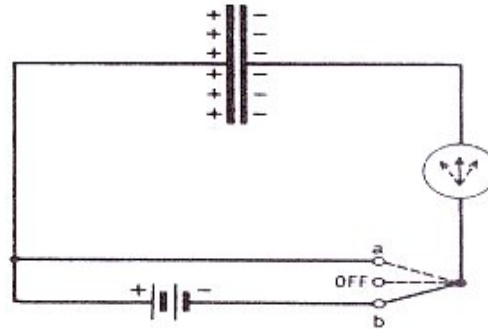


**Gambar 2.3 Efek induktansi terhadap arus
(a) pada saat dihubungkan (on) (b) pada saat diputuskan**

Sumber : Michael Neidle, 1991: 21

2.1.2. Prinsip Dasar Kapasitor

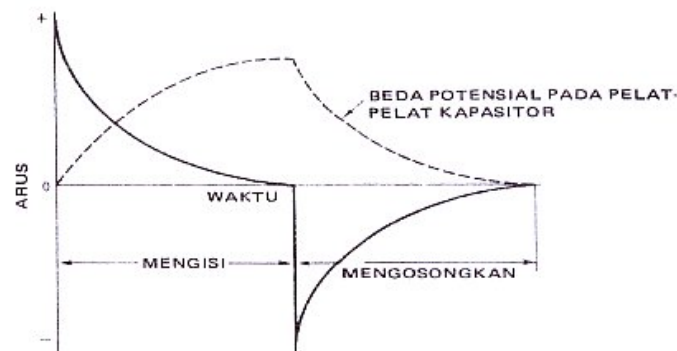
Kapasitor merupakan komponen rangkaian listrik yang dapat menyimpan energi listrik berupa medan listrik. Permukaan konduktor dapat berbentuk pelat lebaran ataupun pelat silinder. Kapasitor pelat sejajar diperlihatkan pada Gambar 2.4 berikut.



Gambar 2.4 Rangkaian yang melukiskan pengisian dan pengosongan kapasitor
Sumber : Michael Neidle, 1991: 38

Ketika saklar dua arah melakukan kontak dengan *b* dari posisi tidak tersambung (off), suatu arus sesaat lewat yang ditunjukkan oleh jarum mikroamperemeter yang bergerak dalam satu arah. Terdapat beda potensial dengan polaritas seperti yang diperlihatkan antara pelat - pelat kapasitor. Jika saklar dipindahkan ke posisi off, pelat tidak kehilangan muatannya yang menandakan muatan ini telah tersimpan. Pengosongan berlangsung sebab beda potensial menyebabkan arus lewat dari satu pelat ke pelat yang lain. Perhatikan bahwa tidak ada arus yang tembus di antara kedua pelat. Gerakan arus lebih banyak berujud osilasi (gerakan mondar mandir) dan bukan berupa suatu aliran kontinu.

Dengan menggambarkan arus pengisian dan arus pengosongan terhadap waktu (Gambar 2.5) kita dapat memahami lebih jelas apa yang terjadi.



Gambar 2.5 Kurva pengisian dan pengosongan kapasitor

Sumber : Michael Neidle, 1991: 39

Bersama sebuah tahanan di dalam rangkaian dan baterai yang tersambung ke kapasitor, arus mula - mula yang diperlihatkan oleh mikroamperemeter naik dengan segera menuju nilai maksimumnya E/R , dimana E adalah gaya gerak listrik baterai dan R adalah tahanan rangkaian. Karena kapasitor menjadi bermuatan, pada pelat timbul perbedaan potensial. Arah beda potensial ini adalah sedemikian sehingga melawan ggl baterai. Karena kenaikan yang berlawanan ini, arus turun dan menjadi nol bila beda potensial kapasitor sama dengan tegangan baterai. Maka kapasitor disebut termuati. Hubungan antara arus dan tegangan sekarang dapat dilihat sebagai "current lead". Bila arus berada pada nilai maksimumnya dan positif, beda potensial adalah nol. Jika arus berkurang menjadi nol, beda potensial mencapai nilai maksimumnya. Pada pengosongan, arus naik dengan cepat ke nilai yang sama seperti pada pengisian, tetapi mengalir dalam arah yang berlawanan. Dan turun ke nol jika beda potensial turun menjadi nol.

Kapasitor banyak digunakan dalam industri. Misalnya untuk memperbaiki faktor daya dari suatu sistem, sehingga bisa mengurangi biaya, menaikkan level tegangan serta mengurangi rugi-rugi dari sistem. Kapasitor yang paling banyak digunakan dalam sistem tenaga adalah kapasitor elektrostatik dengan kertas *kraf* sebagai bahan dielektrik utamanya, biasanya kertas tersebut diperkuat dengan minyak atau zat organik lain untuk mempertinggi kapasitasnya. Beban kapasitor dalam sistem tenaga listrik arus bolak-balik akan menyebabkan arus mendahului (leading) karena itu, kapasitor digunakan sebagai kompensator arus induktif yang tertinggal. Dua metode yang sering digunakan untuk memperbaiki faktor daya adalah dengan menggunakan :

1. Kapasitor *shunt* / paralel
2. Kondensor sinkron

Energi elektrostatik yang bisa disimpan oleh kapasitor ditentukan melalui persamaan sebagai berikut : (Longland T, 1970: 159)

$$C = K \cdot C_0 \cdot A/d \quad (\text{Farad}) \quad (2.3)$$

Keterangan :

- K : Koefisien dielektrik
- C_0 : Konstanta ($8,85 \times 10^{-12} \text{ C/Nm}^2$)
- A : Luas penampang lempeng (m^2)
- d : Jarak kedua pelat (m)

Nilai koefisien dielektrik dari beberapa jenis bahan diperlihatkan pada tabel 2.1

Tabel 2.1
Konstanta Beberapa Jenis Bahan Dielektrik

No	JENIS BAHAN	KOEFISIEN DIELEKTRIK
1	Udara	1,0
2	Barium titanite	3000,0
3	Selulose	6,5
4	Gelas	7,0
5	Oli	2,13
6	Mika	5,6
7	Polypropene	2,2
8	Polyester	2,9

Sumber : IEEE, 1979 : C37.011

Sedangkan nilai kVAR nya perkapasitor adalah : (Longland T, 1970 :160)

$$Q = \frac{V^2 \cdot 2\pi \cdot f \cdot C \cdot 10^{-6}}{1000} \quad (2.4)$$

Persamaan diatas digunakan untuk menghitung kVAR kapasitor yang dipasang pada jaringan yang sesuai dengan rating kapasitor. Untuk kapasitor yang dipasang pada rating tegangan yang berbeda, maka kVAR yang dibangkitkan adalah : (Longland T, 1970 :160)

$$kVAR = \left(\frac{V_o}{V_r}\right)^2 \times kVARr \quad (2.5)$$

Keterangan :

- kVAR : kVAR pada saat operasi
- kVARr : kVAR pada rating kapasitor
- V_o : tegangan operasi (Volt)
- V_r : tegangan rating (Volt)

Sedangkan apabila kapasitor dipasang pada frekuensi yang lain maka :

$$kVAR = \left(\frac{f_o}{f_r}\right) \times kVAR \quad (2.6)$$

Keterangan :

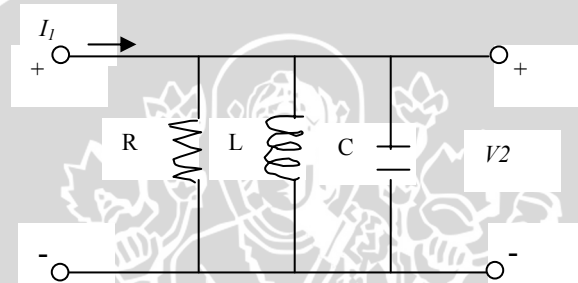
- f_o : frekuensi operasi (Hz)
- f_r : frekuensi rating (Hz)

Sedangkan rumus untuk perbaikan faktor daya dengan daya aktif P (watt) pada faktor daya ϕ_1 dan faktor daya yang diinginkan ϕ_2 dinyatakan

$$Q = Px (\tan \phi_1 - \tan \phi_2) \quad (2.7)$$

2.1.3 Dasar Perhitungan Resonansi

Suatu resonansi didefinisikan bahwa suatu jala-jala dengan rangsangan sinusoida mengalami resonansi bila amplituda fungsi jala-jala itu mencapai suatu nilai maksimum atau minimum yang pasti. Frekuensi yang menimbulkan resonansi dinamakan frekuensi resonansi. Sebagai dasar perhitungan rangkaian RLC paralel seperti pada gambar 2.6 dibawah ini berada dalam keadaan resonansi apabila frekuensi jala-jalannya adalah $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$.



Gambar 2.6 Rangkaian RLC paralel

Sumber : Budiono Mismail, 1995: 91

Dari gambar 2.6 dapat kita lakukan analisis perhitungan untuk menentukan tanggapan frekuensi. Impedansi pemindah untuk frekuensi jala-jala ini adalah :

$$V_{out} = V_{in}$$

$$H(s) = \frac{V_2}{I_1} = Z(s)$$

$$Y(s) = \frac{1}{R} + \frac{1}{sL} + sC$$

$$= \frac{R + sL + s^2 RLC}{sRL}$$

$$H(s) = Z(s) = \frac{sRL}{R + sL + s^2 RLC} \quad (2.8)$$

dengan membagi baik pembilang maupun penyebut dari penurunan Z(s) diatas dengan besaran RLC maka diperoleh penurunan dari Z(s) sebagai berikut :

$$H(s) = Z(s) = \frac{\frac{s}{C}}{\frac{1}{LC} + \frac{s}{RC} + s^2}$$

Dengan mengambil $s = j\omega$ diperoleh besaran sebagai berikut :

$$H(j\omega) = Z(j\omega) = \frac{j\omega/C}{1/LC + j\omega/RC - \omega^2}$$

dengan membagi pembilang dan penyebut dengan $j\omega/C$ akan diperoleh sebagai berikut:

$$H(j\omega) = Z(j\omega) = \frac{1}{1/j\omega L + 1/R + j\omega C} = \frac{1}{1/R + j(\omega C - 1/\omega L)}$$

Sehingga besar tanggapan amplitudanya adalah sebagai berikut :

$$|H(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + \left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)^2}} \quad (2.9)$$

karena R, L, dan C adalah berupa konstanta, maka suatu resonansi akan tercapai pada suatu nilai maksimum atau minimum yang pasti. Maksimum besar tanggapan frekuensi untuk rangkaian ini tercapai pada frekuensi $\omega = \omega_0$ dan yang menjadikan penyebut persamaan (2.9) minimum adalah sebagai berikut :

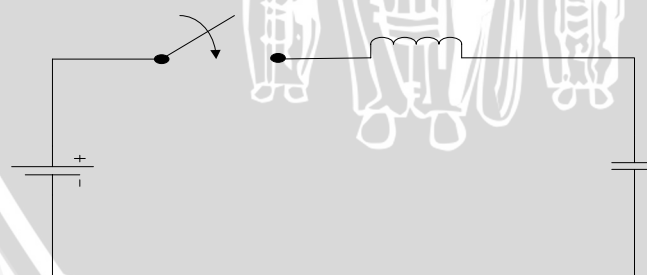
$$\omega_0 C - \frac{1}{\omega_0 L} = 0$$

atau

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.10)$$

2.1.4 Rangkaian LC Seri

Gambar 2.7 di bawah ini merupakan gambar dari rangkaian LC seri yang dihubungkan dengan sumber dc.



Gambar 2.7 Rangkaian LC seri

Sumber : Penulis

Saat saklar ditutup ($t=0$) maka arus akan mengalir dalam rangkaian LC. Dengan menuliskan fungsi sumber tegangan dalam rangkaian, maka sesuai dengan hukum tegangan Kirchoff sepanjang rangkaian dapat ditulis sebagai berikut :

$$V = L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt \quad (2.11)$$

dengan menggunakan transformasi Laplace maka dari persamaan (2.11) akan diperoleh

$$\begin{aligned} \mathcal{L} V &= \mathcal{L} \left[L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt \right] \\ \frac{V}{S} &= L (SI(s) - i(0)) + \frac{1}{C} \left(\frac{I(s)}{S} + \frac{q(0^-)}{S} \right) \end{aligned} \quad (2.12)$$

Tampak pada persamaan di atas bahwa keadaan awalnya secara otomatis tercantum di dalam transformasi tersebut, dari persamaan (2.12) muatan awal kapasitor (saat $t=0^-$) diberikan oleh $q(0^-) = 0$, dan kondisi pada induktor saat tidak dialiri arus sebelum saklar ditutup, $i(0) = 0$, sehingga diperoleh suatu persamaan di bawah ini.

$$\frac{V}{S} = LSI(s) + \frac{1}{SC} I(s) \quad (2.13)$$

Persamaan (2.13) apabila disederhanakan maka akan menjadi sebagai berikut

$$\frac{V}{S} = I(s) \left[SL + \frac{1}{SC} \right]$$

$$\frac{V}{S} = I(s) \left[\frac{S^2 LC + 1}{SC} \right]$$

Maka arus dalam kawasan frekuensinya ($I(s)$) adalah

$$I(s) = V \left[\frac{C}{S^2 LC + 1} \right] \quad (2.14)$$

Bila diketahui $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ maka akan diperoleh persamaan-persamaan sebagai berikut

$$I(s) = V \left[\frac{C}{S^2 \frac{1}{\omega^2} + 1} \times \frac{\omega^2}{\omega^2} \right]$$

$$= V \left[\frac{C \omega^2}{S^2 + \omega^2} \right]$$

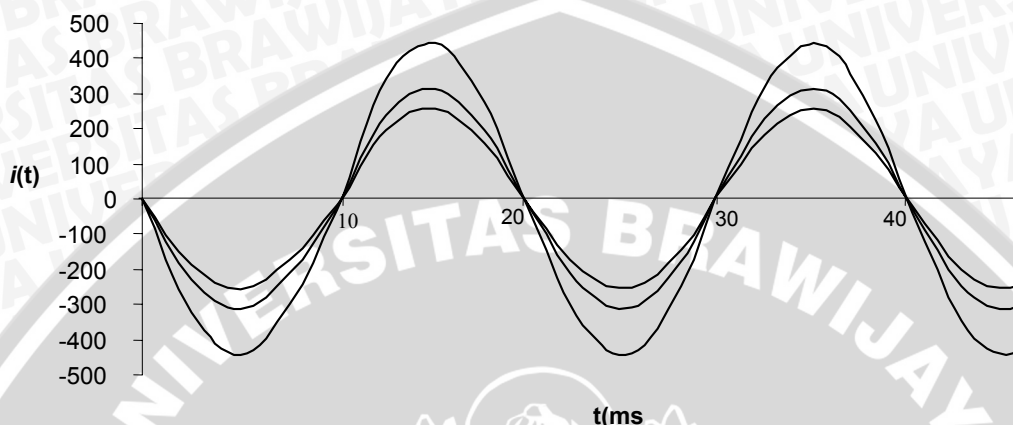
$$I(s) = V C \omega \left[\frac{\omega}{S^2 + \omega^2} \right] \quad (2.15)$$

Merupakan fungsi frekuensi, dan untuk merubah menjadi persamaan arus dalam fungsi waktu dapat diperoleh dengan mengambil kebalikan dari transformasi Laplace dari persamaan (2.15) sehingga menjadi sebagai berikut

$$I(t) = \frac{V C}{\sqrt{LC}} \sin \omega t \quad (2.16)$$

Penambahan nilai induktansi pada rangkaian LC seri akan mempengaruhi besar kecilnya arus yang melalui rangkaian saat dihubungkan ke sumber tegangan. Semakin besar nilai induktansi yang dipasang maka akan semakin mengurangi arus yang mengalir, untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 2.8 di bawah ini

Pengaruh perubahan L terhadap $i(t)$



Gambar 2.8 Kurva fungsi arus terhadap waktu akibat pengaruh perubahan induktor

Sumber : Penulis

2.2. Kapasitor Bank Sebagai Sumber Daya Reaktif

Beban resistif dan induktif merupakan jenis beban yang banyak dipakai oleh konsumen pemakai energi listrik, terutama untuk pemakaian yang terbesar. Sifat dari beban induktif adalah memakai arus induktif yang terbelakang dari tegangan (lagging) dan menyerap daya reaktif dalam operasinya.

Pemakaian daya reaktif oleh beban akan mempengaruhi faktor daya sistem tenaga listrik, semakin besar daya reaktif yang diserap beban maka akan memperkecil faktor daya sistem tenaga listrik. Karena di Indonesia PLN membebankan biaya kelebihan pemakaian KVARh pada pelanggan, jika faktor daya rata - rata bulannya ($\cos \phi$) kurang dari 0,85.

Sumber daya aktif dan reaktif adalah generator, sedang kemampuan generator untuk membangkitkan daya reaktif adalah terbatas. Guna mengatasi daya reaktif induktif yang besar pada beban dan menjaga agar faktor daya sistem tetap tinggi, maka perlu penambahan daya reaktif kapasitif dari luar. Dengan alasan praktis dan ekonomis kapasitor dewasa ini banyak digunakan sebagai sumber daya reaktif tambahan.

Perbaikan faktor daya pada sistem tenaga listrik akan dapat mengurangi kerugian yang diakibatkan oleh rendahnya faktor daya.

Guna mendapatkan hasil yang sesuai dengan harapan, maka pemasangan kapasitor pada sistem tenaga listrik perlu adanya pengaturan, pengaturan disini diperlukan guna mengatur pemakaian daya reaktif dari bank kapasitor ke beban.

2.2.1 Rating Standart Kapasitor

Dalam memenuhi kebutuhan daya reaktif yang besar dipakai *capacitor bank* yaitu beberapa unit kapasitor yang disusun seri atau paralel dengan kapasitas yang dibutuhkan. Hubungan *capacitor bank* perlu dilakukan karena kapasitor yang tersedia dalam per unitnya terbatas juga rating tegangan kapasitor yang tersedia dalam per unitnya perlu disesuaikan dengan kerja sistem tenaga listrik. Tabel 2.2 menunjukkan *rating standart* dari kapasitor untuk pasangan dalam (*in door* atau dalam *cubicle*) dan pasangan luar (*out door*).

Tabel 2.2
Rating Standart Kapasitor Type Indoor dan Outdoor

Indoor Type			Outdoor Type		
Volts	kVAR	Phase	Volts	kVAR	Phase
230	5-7 ½	1 & 3	230	1,2 ½, 5, 7 ½	1 & 3
460	10 & 15	1 & 3	460	5, 10 & 15	1 & 3
575	10 & 15	1 & 3	575	5, 10 & 15	1 & 3
2400	15 & 25	1 & 3	2400	10, 15 & 25	1 & 3
4160	15 & 25	1 & 3	4160	10, 15 & 25	1 & 3
4800	15 & 25	1 & 3	4800	15 & 25	1 & 3
7200	15 & 25	1	7200	15 & 25	1
7960	15 & 25	1	7960	15 & 25	1
12470	15	1	12470	15	1
13800	15	1	13800	15	1

Sumber : Johnson, A.A. 1950 : 236

Pada kenyataannya, kebutuhan daya reaktif (kVAR) yang besar diperoleh dari beberapa kapasitor dengan kapasitas kecil yang disusun. Setiap kapasitor dilengkapi saklar masuk yang berfungsi memasukkan kapasitor pada jaringan listrik apabila diperlukan.

Kapasitor pada umumnya dirancang pada tegangan sampai dengan 5% diatas tegangan rating. Variasi tegangan sampai dengan 115% diperlukan untuk kapasitor

dengan rating tegangan 230, 460, 575 volt atau variasi sampai 110% pada tegangan yang lebih tinggi. Namun demikian untuk jangka waktu yang sangat pendek misalnya pada saat rating motor induksi kapasitornya dapat menahan tegangan sampai 15% dari tegangan ratingnya (A.A. Johnson, 1950 : 236).

2.2.2. Konfigurasi Pemasangan Kapasitor

Ada dua macam cara pemasangan kapasitor statis pada sistem tenaga yaitu secara seri dan paralel. Kedua pemasangan ini mempunyai perbedaan yang khusus untuk tujuan pemakaiannya.

Faktor-faktor yang mempengaruhi pemilihan antara kapasitor paralel dan seri diperlihatkan dalam Tabel 2.3. Karena banyaknya keterbatasan untuk menggunakan kapasitor seri, banyak dipakai kapasitor paralel dalam distribusi.

Tabel 2.3
Kapasitor Seri dan Paralel

No	Tujuan	Pilihan kapasitor	
		Seri	Paralel
1	Memperbaiki faktor daya (fd).	Kedua	Pertama
2	Memperbaiki tingkat tegangan pada sistem saluran udara dengan fd normal dan rendah.	Pertama	Kedua
3	Memperbaiki tingkat tegangan pada sistem saluran udara dengan fd yang tinggi.	-	Pertama
4	Memperbaiki tingkat tegangan pada sistem saluran bawah tanah dengan fd normal dan rendah.	Pertama	-
5	Memperbaiki tingkat tegangan pada sistem saluran bawah tanah dengan fd yang tinggi.	-	-
6	Mengurangi kerugian saluran.	Kedua	Pertama
7	Mengurangi fluktuasi tegangan.	Pertama	-

Catatan : (-) tidak dipakai

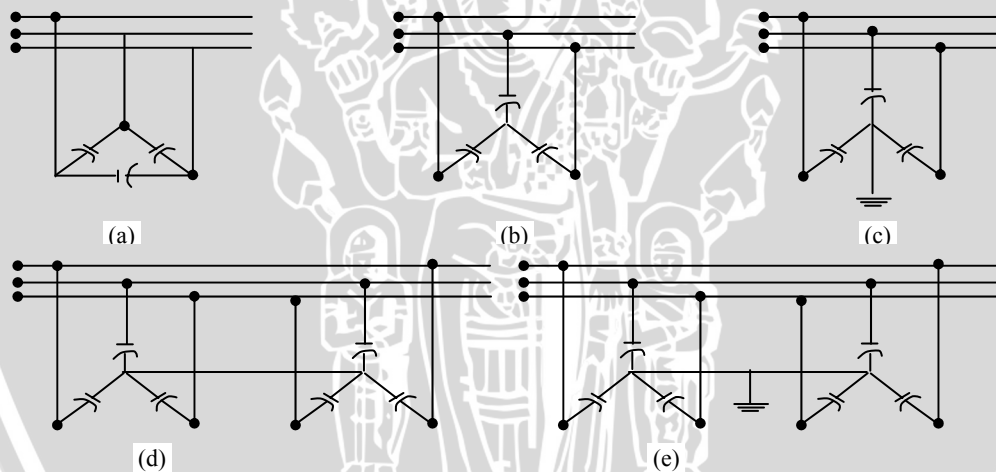
Sumber : AS. Pabla, 1989 :366

Kapasitor seri dan kapasitor paralel pada sistem tenaga menimbulkan daya reaktif untuk memperbaiki faktor daya dan tegangan, karenanya dapat menambah kapasitas sistem dan mengurangi kerugian. Dalam kapasitor seri daya reaktif sebanding dengan kuadrat arus beban, sedangkan pada kapasitor paralel sebanding dengan kuadrat tegangan. Secara umum, biaya pemasangan kapasitor seri lebih tinggi daripada biaya pemasangan kapasitor paralel. Hal ini disebabkan karena peralatan perlindungan untuk

kapasitor seri lebih kompleks juga biasanya kapasitor didesain untuk daya yang lebih besar dari pada kapasitor paralel, (AS. Pabla, 1989:365).

Pemasangan kapasitor paralel sangat penting untuk melayani kebutuhan daya reaktif dari sebuah sistem daya. Dengan pemasangan kapasitor disisi beban, sebagian besar arus reaktif dipenuhi dari kapasitor dan saluran hanya menyalurkan daya aktif saja. Keadaan ini akan sangat menguntungkan dan dapat mengurangi beban saluran dan menurunkan susut jaringan.

Kapasitor - kapasitor dalam sistem disusun dalam bentuk rangkaian penyimpanan dan dapat dihubungkan dalam sembarang bentuk seperti bintang ditanahkan, bintang yang tidak ditanahkan, delta dan sebagainya seperti pada Gambar 2.9. Rangkaian penyimpanan yang dihubungkan secara delta dipakai dengan hanya satu bagian seri tiap fasa dan dipakai sampai 6,6 kV, untuk tegangan lebih dipakai sambungan bintang. Untuk rangkaian penyimpan sambungan bintang pada umumnya netral kapasitor hanya ditanahkan bila sistem atau transformator substasiun ditanahkan secara efektif.



Gambar 2.9. Hubungan Capacitor Bank

(a) Delta (b) Ungrounded Y (c) Grounded Y (d) Ungrounded double Y (e) Grounded double Y Sumber : IEEE, 1980 : C37.99

2.2.3. Penempatan Kapasitor

Penempatan kapasitor biasanya dikenal dengan metode :

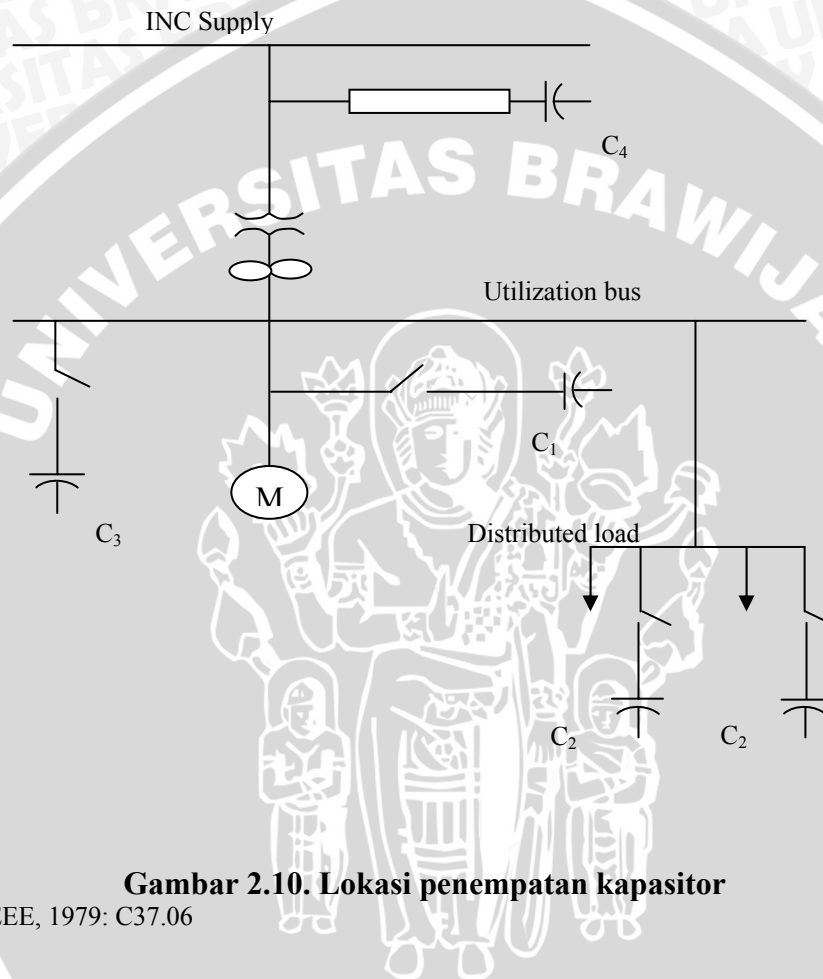
1. Individual methode

Pada *individual methode*, perbaikan faktor daya dilakukan dengan menempatkan kapasitor secara terpecah dan pemasangannya dilakukan pada

masing-masing beban. Pemakaian *individual method* seperti pada Gambar 2.10 di C_1 .

2. Group method

Pada *group method*, perbaikan faktor daya dari sistem tenaga listrik menggunakan sejumlah kapasitor yang dibentuk dalam *capacitor bank*. Pemakaian *group method* dipasang pada feeder pada gambar 2.10 di C_4 atau pada gardu induk.



Gambar 2.10. Lokasi penempatan kapasitor

(Sumber : IEEE, 1979: C37.06)

Banyak faktor yang dijadikan pertimbangan dalam penempatan kapasitor dalam jaringan tenaga listrik, diantaranya panjang saluran, variasi beban, jenis motor, distribusi beban dan penempatan untuk beban industri.

Namun pada umumnya penempatan kapasitor dapat dilakukan dengan keperluan seperti berikut ini : (Johnson, A. A. 1950 : 237).

- Perbaikan kelompok-kelompok pada sisi primer transformator
- Perbaikan kelompok-kelompok pada sisi sekunder transformator
- Perbaikan kelompok-kelompok diluar *plant*, misalkan sebuah bangunan
- Perbaikan lokal pada *feeder* yang kecil.

- e) Perbaiki lokal pada cabang jaringan motor
- f) Perbaiki langsung pada sekelompok motor dengan *switching* bersama-sama.

Kapasitor sebaiknya dipasang sedekat mungkin dengan beban atau diakhir *feeder*, dengan alasan :

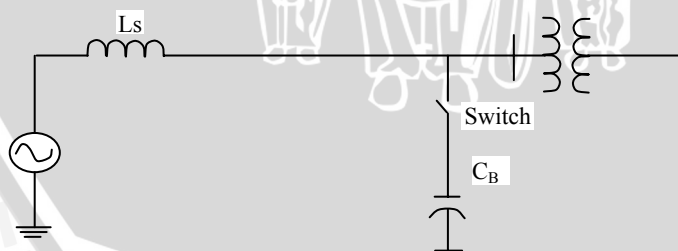
- a) Dapat mengurangi rugi-rugi saluran ke beban.
- b) Meningkatkan tegangan di dekat beban, sehingga dapat memperbaiki kerja motor.
- c) Dapat dilakukan perubahan kVAR kapasitor bila terjadi perubahan, yaitu bila kapasitor dipasang langsung pada beban.

2.3. Arus Transien

Ketika sebuah bank kapasitor dihubungkan pada sebuah sumber tegangan, maka akan ada arus transien yang mengalir ke kapasitor tersebut. Arus inilah yang dinamakan arus *inrush* atau bisa juga disebut arus lonjakan. Besar dan frekuensi dari arus *inrush* ini tergantung dari nilai kapasitansi, induktansi suatu rangkaian, muatan akhir pada bank kapasitor dan tahanan yang terdapat pada rangkaian.

Besar dan frekuensi arus *inrush* juga dipengaruhi oleh konfigurasi *capacitor bank*, yaitu tunggal (*isoaled bank*) atau paralel. Arus yang tinggi terjadi beberapa saat kapasitor dihubungkan ke sistem, dan arus ini dapat membahayakan peralatan listrik, oleh karena itu besarnya perlu dikendalikan.

2.3.1. Arus Transien pada kapasitor Tunggal terisolasi

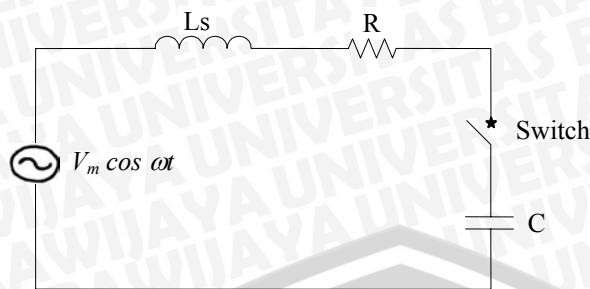


Gambar 2.11. Pemasangan kapasitor tunggal / *single*

Sumber : IEEE, 1992 : 1036

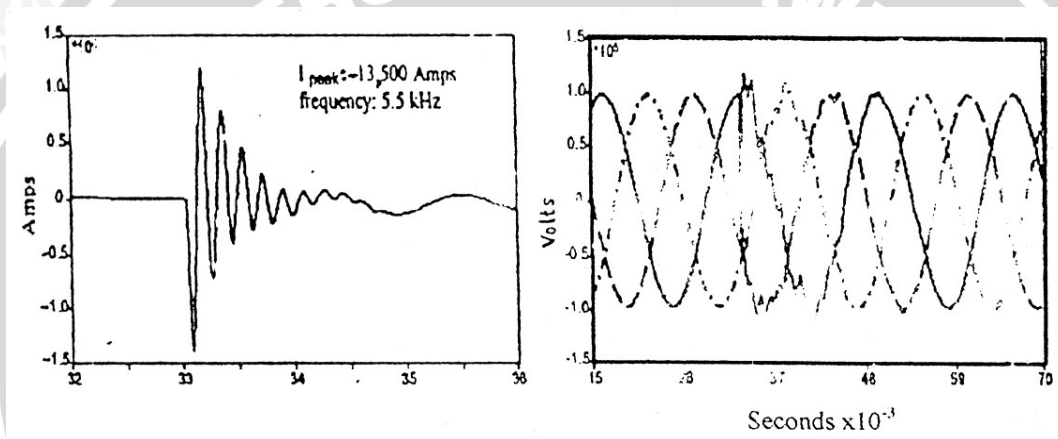
Dari Gambar 2.11 apabila saklar ditutup, maka arus *inrush* akan mengalir dan mengalami perubahan tegangan pada kapasitor.

Dari Gambar 2.11 dapat disederhanakan menjadi Gambar 2.12 sebagai berikut.



Gambar 2.12 Rangkaian sederhana pada kapasitor tunggal

Sedangkan gelombang dari arus *inrush* dan tegangan kapasitornya ditunjukkan pada Gambar 2.13 berikut.



Gambar 2.13 Arus inrush dan tegangan pada saat pengisian kapasitor tunggal

Sumber : L.M Vazquez., L.F. Rosario, IPST, 2003

Nilai dari arus *inrush* pada Gambar 2.12 dapat diturunkan menggunakan Hukum Kirchoff diasumsikan R diabaikan sebagai berikut :

$$V_m \cos(\omega t + \theta) = V_c + L \frac{di}{dt} \quad (2.17)$$

Sedangkan

$$V_c = V_c(0) + \frac{1}{C} \int i \cdot dt \quad (2.18)$$

Persamaan (2.18) disubstitusikan kedalam persamaan (2.17) dan diasumsikan dalam periode bahwa sumber tegangan konstanta pada nilai puncak, kemudian ditransformasikan maka: (Greenwood, Allan, hal : 83)

$$L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i \cdot dt = V_m - V_c(0) \quad (2.19)$$

$$Lsi(s) - LI(0) + \frac{i(s)}{sC} = \frac{V_m - V_c(0)}{s} \quad (2.20)$$

dimana $i(0) = 0$ dan bila diketahui $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ maka persamaan (2.20) dapat ditulis:

$$\frac{LCs^2i(s) + i(s)}{sC} = \frac{V_m - V_c(0)}{s} \quad (2.21)$$

$$\frac{i(s)LC\left(s^2 + \frac{1}{LC}\right)}{sC} = \frac{V_m - V_c(0)}{s}$$

$$\frac{i(s)L(s^2 + \omega_0^2)}{sC} = \frac{V_m - V_c(0)}{s}$$

$$i(s) = \frac{V_m - V_c(0)}{L} \left(\frac{1}{s^2 + \omega_0^2} \right)$$

$$i(s) = \frac{V_m - V_c(0)}{L} \cdot \frac{1}{\omega_0} \left(\frac{\omega_0}{s^2 + \omega_0^2} \right) \quad (2.22)$$

Pada persamaan 2.22 di inverskan menjadi : (Greenwood, Allan, hal : 83)

$$i(t) = \frac{V_m - V_c(0)}{L} \cdot \sqrt{LC} \cdot \sin \omega_0 t$$

$$i(t) = (V_m - V_c(0)) \cdot \sqrt{\frac{C}{L}} \cdot \sin \omega_0 t \quad (2.23)$$

Arus mengalir secara sinusoida pada frekuensi alamiah pada rangkaian LC, Pada Gambar 2.12 jika saklar ditutup, maka akan terjadi pengisian pada kapasitor dimana kondisi $V_c(0) = 0$, sehingga persamaan (2.23) menjadi :

$$i(t) = V_m \sqrt{\frac{C}{L}} \sin \omega_0 t \quad (2.24)$$

Dari persamaan (2.24) maka nilai arus maksimumnya dengan tegangan puncak ($\sqrt{2}V_{L-N}$) maka :

$$I_{\max pk} = \frac{\sqrt{2}V_{LL}}{\sqrt{3}} \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (A) \quad (2.25)$$

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{10^6}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (\text{Hz}) \quad (2.26)$$

Dimana $I_{\max pk}$ = crest value / nilai arus *inrush* maksimum

f = Frekuensi arus *inrush*

Apabila sumber tegangan konstanta $V_m \cdot \cos. \omega t$, maka persamaan arus *inrush*-nya

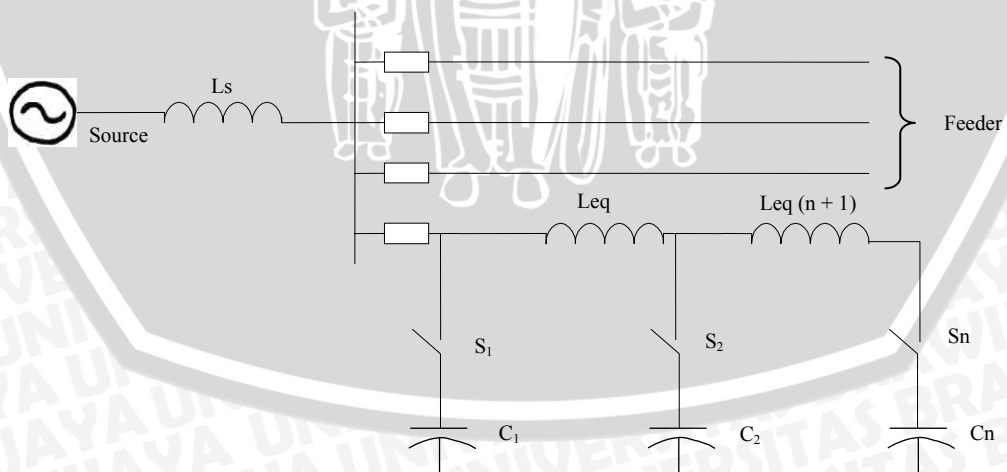
$$i(s) = \frac{(V_m - V_c(0))s^2 - V_c(0)\omega^2}{L\left(s^2 + \frac{1}{LC}\right)(s^2 + \omega^2)} \quad (2.27)$$

$$i(s) = \frac{(V_m - V_c(0))s^2 - V_c(0)\omega^2}{L\left(s^2 + \frac{R}{L}s + \frac{1}{LC}\right)(s^2 + \omega^2)} \text{ dengan adanya R} \quad (2.28)$$

2.3.2. Arus Transien pada kapasitor paralel

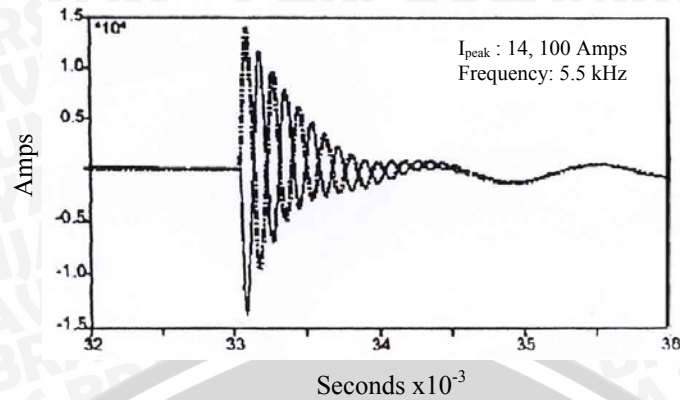
Arus transien yang mengalir pada kapasitor atau yang disebut dengan arus *inrush* akan semakin bertambah dengan bertambahnya kapasitor yang dimasukkan kedalam sistem. Hal ini disebabkan pada saat pengisian sebuah kapasitor sedang berlangsung terjadi pengalihan energi ke kapasitor yang lain untuk melakukan pengisian juga. Besarnya arus *inrush* dari kapasitor paralel tergantung pada nilai kVAR masing-masing kapasitor dan nilai reaktansi induktif antara unit-unit kapasitor serta tegangan sesaat pada saat *switching*.

Besarnya nilai arus *inrush* untuk kapasitor paralel relatif tinggi dibanding dengan arus *inrush* kapasitor tunggal. Model pemasangan bank kapasitor diperlihatkan pada Gambar 2.14 dan Gambar 2.15 merupakan gelombang pada saat pengisian dua kapasitor yang paralel.



Gambar 2.14 Rangkaian kapasitor paralel

Sumber : Greenwood, Allan, 1971 : 43



Gambar 2.15 Arus Inrush pada saat pengisian kapasitor paralel

Sumber : L.M. Vazquez, L.F. Rosario, IPST, 2003

Dari Gambar 2.14 kapasitor-kapasitor dimasukkan sesuai kebutuhan. Bila sistem tersebut memerlukan kapasitor C_1 masuk, maka S_1 ditutup dan arus akan mengalir ke kapasitor C_1 . bila masih kurang selanjutnya kapasitor C_2 dimasukkan dengan menutup S_2 demikian seterusnya pada kapasitor-kapasitor yang lain yang terhubung paralel dapat dimasukkan satu persatu sesuai kebutuhan. Apabila cabang kapasitor C_1 telah dimasukkan maka arus hubung singkat yang terjadi dapat ditentukan, dengan menggunakan persamaan 2.25 dan 2.26 maka :

$$I_{SC} = \frac{V_{L-L}}{\sqrt{3} \cdot \omega \cdot L_{eq1}} \quad (\text{A}) \quad (2.29)$$

$$I_{\max.pk} = 1,41 \cdot \sqrt{I_{sc} \cdot I_1} \quad (\text{A}) \quad (2.30)$$

$$f = f_s \sqrt{\frac{I_{SC}}{I_1}} \quad (\text{Hz}) \quad (2.31)$$

Dimana :

I_1 : Arus rms bank kapasitor pada saat S_1 bekerja (A)

I_{SC} : Arus *short circuit* rms (A)

Suatu sistem tenaga listrik membutuhkan dua atau lebih bank kapasitor seperti pada Gambar 2.14, maka untuk dua kapasitor dimana C_1 melakukan pengisian dan C_2

juga melakukan pengisian, didapatkan persamaan $\frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$ dan nilai L_{eq} merupakan nilai

dari induktansi antara S_1 dengan bank kapasitor 1, induktansi di bus dan induktansi antara S_2 dengan bank kapasitor 2 seperti pada persamaan 2.32 dan 2.33. Persamaan tersebut bisa juga untuk bank kapasitor yang lebih dari dua dengan berdasarkan persamaan 2.25 dan 2.26 (ANSI/IEEE C37.012-1979).

$$I_{\max.pk} = 1747 \sqrt{\frac{V_{L-L} x (I_1)(I_2 + \dots + I_n)}{L_{eq.n} (I_1 + I_2 \dots I_n)}} \quad (\text{A}) \quad (2.32)$$

$$f = 9,5 \sqrt{\frac{(fs) \cdot V_{L-L} (I_1 + I_2 \dots I_n)}{L_{eq.n} (I_1)(I_2 + \dots + I_n)}} \quad (\text{kHz}) \quad (2.33)$$

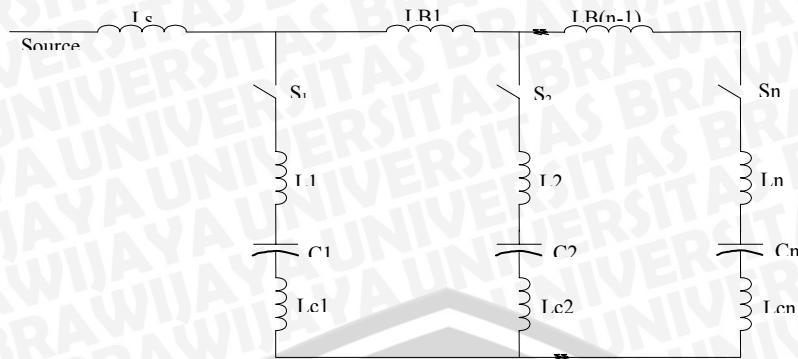
Dimana :

- f_s : frekuensi sistem (Hz)
- f : frekuensi arus *inrush* (kHz)
- $I_{\max.pk}$: Nilai arus *inrush* maksimum (A)
- $L_{eq.n}$: Total ekuivalen induktansi per fasa antara bank kapasitor (μH)
- I_1 : Arus rms bank kapasitor pada saat S_1 bekerja (A)
- $I_2 \dots I_n$: Arus rms bank kapasitor pada saat $S_2 \dots S_n$ bekerja (A)
- V_{L-L} : Tegangan dalam *line to line* (V)

Arus rms bank kapasitor maksimum yang mengalir pada kapasitor merupakan arus nominal yang dipengaruhi oleh 3 faktor : (IEEE Std 1036-1992).

1. Faktor tegangan : Untuk menghitung kapasitansi dari bank kapasitor pada tegangan yang digunakan, dapat diperoleh dengan mengalikan daya reaktif yang tercantum dalam *name plate* kapasitor dengan rasio tegangan maksimal yang digunakan pada tegangan kapasitor yang terdapat pada *name plate* kapasitor. Faktor ini besarnya 1,1 ketika sebuah kapasitor dioperasikan terus-menerus sampai diatas 10% dari tegangan rata-rata kapasitor.
2. Toleransi pada kapasitor adalah 0 sampai 15% atau rata - rata lebih dari 0 sampai 5 % Faktor pengali antara 1,05 sampai 1,15 digunakan untuk menyesuaikan arus nominal dengan batas toleransi dalam kapasitansi yang diijinkan.
3. Komponen harmonisa : bank kapasitor yang mempunyai impedansi yang kecil menyebabkan akan mengalirnya arus harmonisa pada rangkaian. Faktor pengali 1,1 umumnya digunakan untuk pertanahan netral bank kapasitor dan 1,05 untuk netral kapasitor yang tidak diketanahkan.

Apabila informasi tentang faktor pengali untuk faktor-faktor diatas tidak ada, biasanya menggunakan faktor pengali 1,2 dikalikan arus nominal kapasitor pada tegangan rata-rata untuk tidak netral kapasitor yang diketanahkan dan 1,35 dikalikan arus nominal untuk netral kapasitor yang diketanahkan. Pada Gambar 2.16 merupakan rangkaian dimana bagian-bagian induktansi pada bank kapasitor.



Gambar 2.16 Induktansi pada rangkaian bank kapasitor

Sumber : IEEE Std 1036-1992

Dimana :

- S_1 = *Switching* yang menghubungkan kapasitor 1
- S_2 = *Switching* menghubungkan kapasitor 2 pada bus
- L_{c1}, L_{c2} = Induktansi kapasitor (μH)
- L_s = Induktansi sumber (μH)
- L_1, L_2 = Induktansi antara *Switching* dan kapasitor (μH)
- L_{bus} = Induktansi dari bus diantara *Switching* (μH)

Pada Tabel 2.4 merupakan nilai-nilai rata-rata induktansi diantara bank kapasitor.

Tabel 2.4
Nilai rata-rata dari induktansi diantara bank kapasitor

Tegangan maksimum (kV)	Induktansi per Fasa pada Bus (($\mu\text{H}/\text{ft}$))
15,5 dan dibawahnya	0,214
38	0.238
48,3	0.256
72,5	0.256
121	0.261
145	0.261
169	0.268
242	0.285

* Nilai dari induktansi per fasa diantara capacitor bank. Tidak termasuk induktansi dari kapasitor, nilai $5 \mu\text{H}$ untuk bank dibawah 46 kV dan $10 \mu\text{H}$ untuk bank diatas 46 kV untuk besaran induktansi dari bank kapasitor.

Sumber : ANSI/IEEE C37.012-1979

Induktansi pada rangkaian digunakan untuk membatasi arus transien. Dalam beberapa kasus induktansi total antara bank kapasitor tidak melebihi satu persen dari induktansi sumber dan hasilnya arus transien dari sumber dapat diabaikan.

Dari tabel 2.4 maka dapat ditentukan nilai induktansi pada sumber, induktansi pada bus dan induktansi diantara kapasitor dinyatakan: (ANSI/IEEE C37.012-1979)

$$L_s = (r_s) \cdot (L_t) \quad (2.34)$$

$$L_{bus} = (I_{s-s}) \cdot (L_t) \quad (2.35)$$

$$L_1 = (I_{s-c}) \cdot (L_t) + 5 \mu H \quad (2.36)$$

Dimana :

- L_s : Induktansi pada sumber (μH)
- L_{bus} : Induktnasi Bus (μH)
- L_t : Nilai induktansi pada Tabel (μH)
- L_1 : Induktansi antara *switch* ke kapasitor (μH)
- (I_s) : Panjang konduktor antara Bus dengan sumber (m)
- (I_{s-s}) : Panjang konduktor antara *switch* pada kapasitor 1 dengan *switch* pada kapasitor 2 (m)
- (I_{s-c}) : Panjang konduktor antara *switch* ke kapasitor (m)

2.4. Sistem pengaman pada bank kapasitor

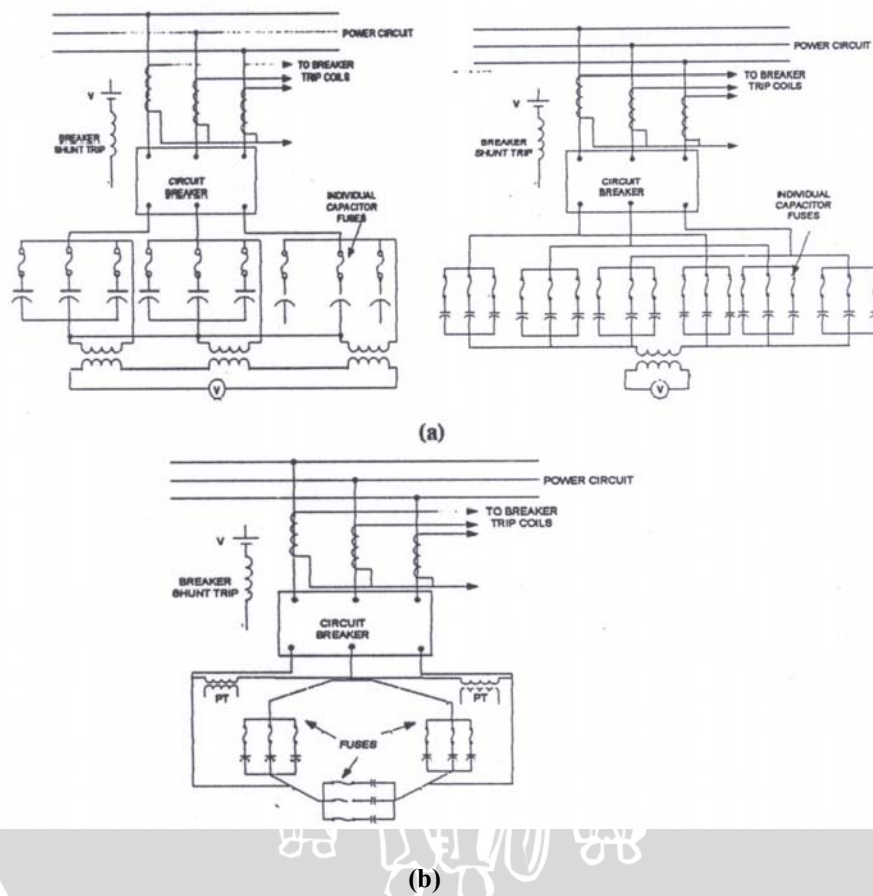
Macam-macam pengaman *capacitor bank* dalam ukuran yang besar adalah : (Johnson, A.A. 1950 : 243)

1. *Fuse* untuk kapasitor.
2. *Relay* arus lebih atau *coil trip* untuk mentriapkan CB jika ada gangguan.
3. Trafo tegangan (PT) yang dihubungkan melalui tiap fasa atau tiap seri group perfasa pada bank kapasitor bentuk bintang yang tidak diketanahkan sehingga bisa mentriapkan *circuit breaker* pada atau tegangan yang tidak seimbang.
4. Trafo tegangan (PT) antara netal dan *ground* dari *capacitor bank* bentuk bintang yang tidak diketanahkan dihubungkan ke sistem *ground* untuk mengoperasikan *relay* dan mentriapkan *breaker*.

Bank kapasitor yang besar dapat dihubungkan dalam hubungan bintang yang tidak diketanahkan, bintang yang ditanahkan atau delta. Kapasitor satu fasa selalu dioperasikan dengan sebuah fuse, baik di instalasi pada *out door* atau *in door* untuk berbagai tipe hubungan kapasitor. Untuk hubungan yang tidak ditanahkan dari kapasitor tunggal yang diparalel melalui tegangan *fasa to netral*.

Gambar 2.17 (a) merupakan rangkaian proteksi kapasitor yang dihubungkan bintang tidak ditanahkan untuk semua kelas tegangan. Sebuah trafo arus atau trafo tegangan dihubungkan antara titik netral dari 2 bagian yang sama dari kapasitor untuk memproteksi ketidaksetimbangan kVAR seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.17(a)

Sedangkan untuk kapasitor yang terhubung delta (Δ) gambar rangkaianannya seperti gambar 2.17 (b). Biasanya dalam rating tegangan 2400 volt atau kurang dan untuk trip unit kapasitor.



Gambar 2.17 Rangkaian pengaman pada bank kapasitor

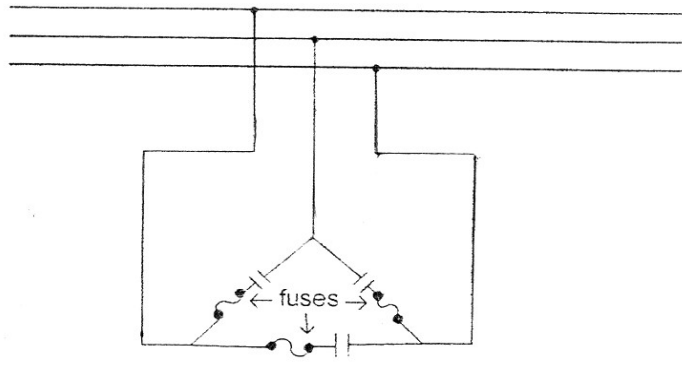
- Rangkaian pengaman kapasitor bintang tidak ditanahkan**
- Rangkaian pengaman kapasitor delta**

Sumber : Johnson A.A, 1950 : 246

2.4.1 Fuse untuk kapasitor

Setiap unit kapasitor mempunyai daerah yang luas untuk isolasi, ketika beberapa kapasitor dibuat dalam sebuah rangkaian instalasi maka kemungkinan kegagalan isolasinya makin besar. Sebuah kapasitor yang besar umumnya mampu menghasilkan arus fault yang besar. Kemampuan short circuit kapasitor untuk mengalirkan arus

dibatasi oleh kemampuan membawa arus dari aluminium foil tipis pada permukaan elektroda. Penggunaan fuse pada kapasitor ditunjukkan pada gambar 2.18 berikut ini :



Gambar 2.18 Fuse pada kapasitor

Sumber : Johnson A.A, 1950 : 246

Untuk menentukan rating fuse pada kapasitor mengacu pada standart IEEE Std 1063. 1993 :

$$I_r = 1,65 \times I_d \quad (2.37)$$

Dimana :

I_r = rating fuse

I_d = arus dasar kapasitor

Jika arus fault dalam kapasitor melebihi beberapa ratus ampere maka tekanan akan naik secara perlahan dan akan berlangsung sampai beberapa cycle sebelum akhirnya akan merusak. Ketika arus melebihi 3000 ampere maka kerusakan mekanik yang terjadi akan besar.

Jika loncatan bunga api pada kapasitor dibiarkan sampai mengakibatkan kerusakan, maka unit – unit dan bagian – bagian lain dari kapasitor juga akan rusak. Oleh karena itu dibutuhkan suatu pengaman yang memadai untuk mengamankan kapasitor dari arus short circuit.

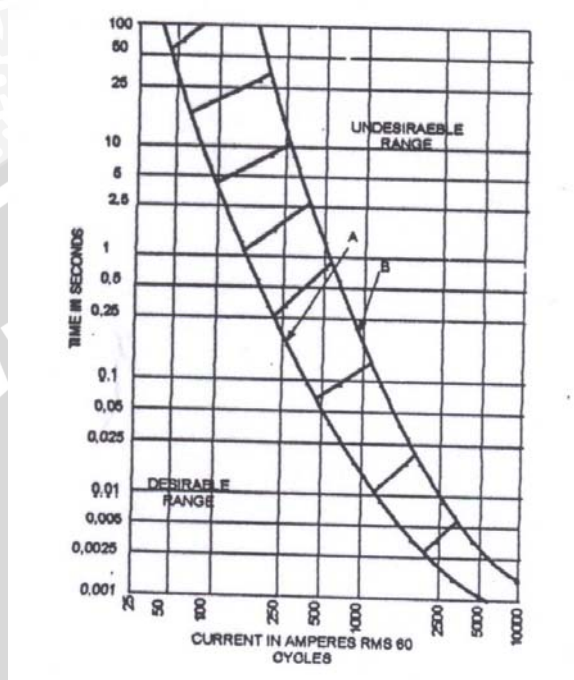
Penggunaan fuse pada kapacitor bank, baik yang dipasang dalam group fuse maupun fuse tunggal pada dasarnya mengamankan kapasitor diantaranya adalah:

(Johson A.A, 1950 : 246)

1. Untuk memproteksi rangkaian dan kapasitor agar bisa memperpanjang umur peralatan.
2. Untuk memproteksi kapasitor yang lain dari gangguan arus *transient*

3. Untuk memproteksi unit-unit kapasitor bank lainnya dari kerusakan mekanik akibat arus lebih.
4. Untuk meminimkan bahaya bagi operator dan anggota *maintenance*.

Berikut ini gambar 2.19 menunjukkan range arus gangguan kapasitor pada daerah yang aman dan tidak aman.



Gambar 2.19 Kurva hubungan waktu perusakan tangki kapasitor terhadap arus gangguan

Sumber : Johnson A.A, 1950 : 247

Dimana :

Curva A : Arus gangguan dihilangkan dalam waktu disebelah kiri dari kurva, tangki kapasitor tidak akan mengalami perpecahan / kerusakan.

Curva B : Arus gangguan selama waktu di sebelah kanan dari kurva, tangki kapasitor mengalami kerusakan dengan cukup tenaga untuk merusak unit-unit yang lain.

Area AB : Daerah aman untuk pemilihan pengaman pada kondisi aman

Ketika beberapa unit kapasitor dibuat dalam sebuah rangkaian instalasi maka kemungkinan kegagalan isolasinya makin besar. Sebuah kapasitor yang besar umumnya mampu menghasilkan arus gangguan besar.

Jika arus gangguan dalam sebuah kapasitor melebihi beberapa ratus ampere area AB, maka tekanan akan naik pada tangki secara perlahan dan akan berlangsung sampai beberapa *cycle* sebelum akhirnya merusak dan timbul bunga api.

Jika loncatan bunga api pada kapasitor dibiarkan sampai mengakibatkan kerusakan, maka unit-unit dan bagian-bagian lain dari kapasitor juga akan rusak secara mekanik akibat adanya bunga api. Oleh karena itu dibutuhkan suatu pengamanan yang memadai untuk mengamankan kapasitor terhadap arus gangguan seperti *short circuit*.

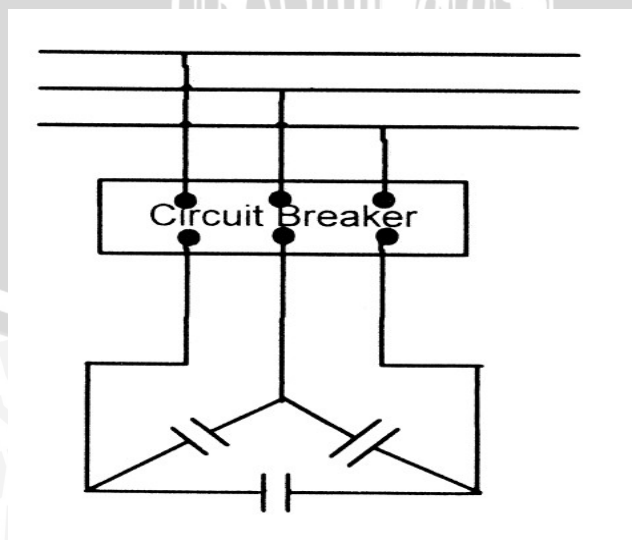
Instalasi bank kapasitor dengan ukuran yang besar biasanya diamankan oleh pengaman *fuse group* atau *circuit breaker*. Dimana arus gangguan yang terjadi besar, kegagalan dari satu unit akan merusak unit-unit kapasitor yang lain.

2.4.2. *Circuit Breaker*

Switching kapasitor menyebabkan terjadinya erosi pada kontak dengan cepat. Pada saat kontak lepas mereka meninggalkan energi buang yang cukup tinggi. Faktor-faktor ini menurunkan kemampuan pemutus.

Bila *circuit breaker* memakai minyak mempunyai kontak tambahan, ini perlu diperhatikan. Beberapa industri pembuat *circuit breaker* menggunakan tahanan diantara kontak-kontak utama. Dalam memilih *circuit breaker* harus dilakukan secara berhati-hati jangan sampai menyebabkan tegangan lebih pada saat menyambung kembali. Sangat penting untuk mendesain *circuit breaker* yang mampu untuk menahan arus *inrush* dan frekuensi. *Circuit breaker* diperlukan sebagai alat pengaman kapasitor dan besar kapasitas minimal harus sama dengan arus hubung singkat maksimum yang mungkin terjadi pada sekitar pangkal kapasitor.

Penggunaan *circuit breaker* pada kapasitor ditunjukkan pada gambar 2.20 berikut ini:



Gambar 2.20 *Circuit breaker* pada kapasitor

Sumber : Johnson A.A, 1950 : 246

Untuk menentukan rating *circuit breaker* pada kapasitor mengacu pada standart IEEE Std 1063. 1993 :

$$I_r = 1,35 \times I_d \quad (2.38)$$

Dimana :

I_r = rating circuit breaker

I_d = arus dasar kapasitor

Faktor-faktor yang mengatur desain *circuit breaker* adalah : (AS Pabla. 1989 : 372)

1. Kecepatan pelepasan kontak
2. Kecepatan hilangnya partikel yang terisolasi antar kontak
3. Tegangan sisi tertinggi yang dapat ditahan kontak
4. Tegangan induksi yang tinggi dibolehkan ditahan sistem bila dipakai untuk mengatur transformator.

Circuit breaker dengan pengamanan beban lebih dan rating pengamanan rangkaian yang memadai, tidak dapat mengamankan kapasitor dari gangguan *short circuit*. Harus ada tambahan *individual fuse capacitor* atau *relay* yang berfungsi untuk mengtripkan *breaker* tidak cukup untuk mengamankan sebuah kapasitor unit dengan gangguan yang tinggi.

Sebuah *circuit breaker* harus mempertimbangkan terutama peralatan *switching* dan peralatan pengaman rangkaian dan bukan sebagai pengaman dan dari arus gangguan yang besar di dalam sebuah unit kapasitor. Namun *circuit breaker* juga sebagai *back-up* pengaman dari unit kapasitor atau pengaman kegagalan lainnya.

Pemasangan *circuit breaker* (CB) disesuaikan dengan arus kapasitor, dan harus mempertimbangkan 3 faktor : variasi tegangan, toleransi kapasitor dan komponen harmonisa.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Studi literatur

Penelitian ini dititik beratkan pada pengaruh penggunaan reaktor untuk mereduksi arus transien pada kapasitor bank, dimana arus transien yang bisa juga disebut *inrush current* apabila tidak dikontrol akan mengakibatkan kerusakan pada peralatan atau sistem yang ada, dengan melakukan analisis untuk menentukan besarnya reaktor yang digunakan untuk meredam besarnya arus *inrush* yang terjadi.

Literatur – literatur yang diperlukan untuk mendukung penelitian ini diantaranya sistem pengaman pada bank kapasitor seperti *fuse*, *circuit breaker*, transformator arus (CT), transformator tegangan (PT) dan literatur – literatur pendukung lainnya.

3.2. Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilakukan di industri yang menggunakan bank kapasitor sebagai perbaikan faktor daya yaitu di PT. AUTOKORINDO PRATAMA di Gresik Jawa Timur. Waktu penelitian bulan Juni 2006.

3.3. Analisis

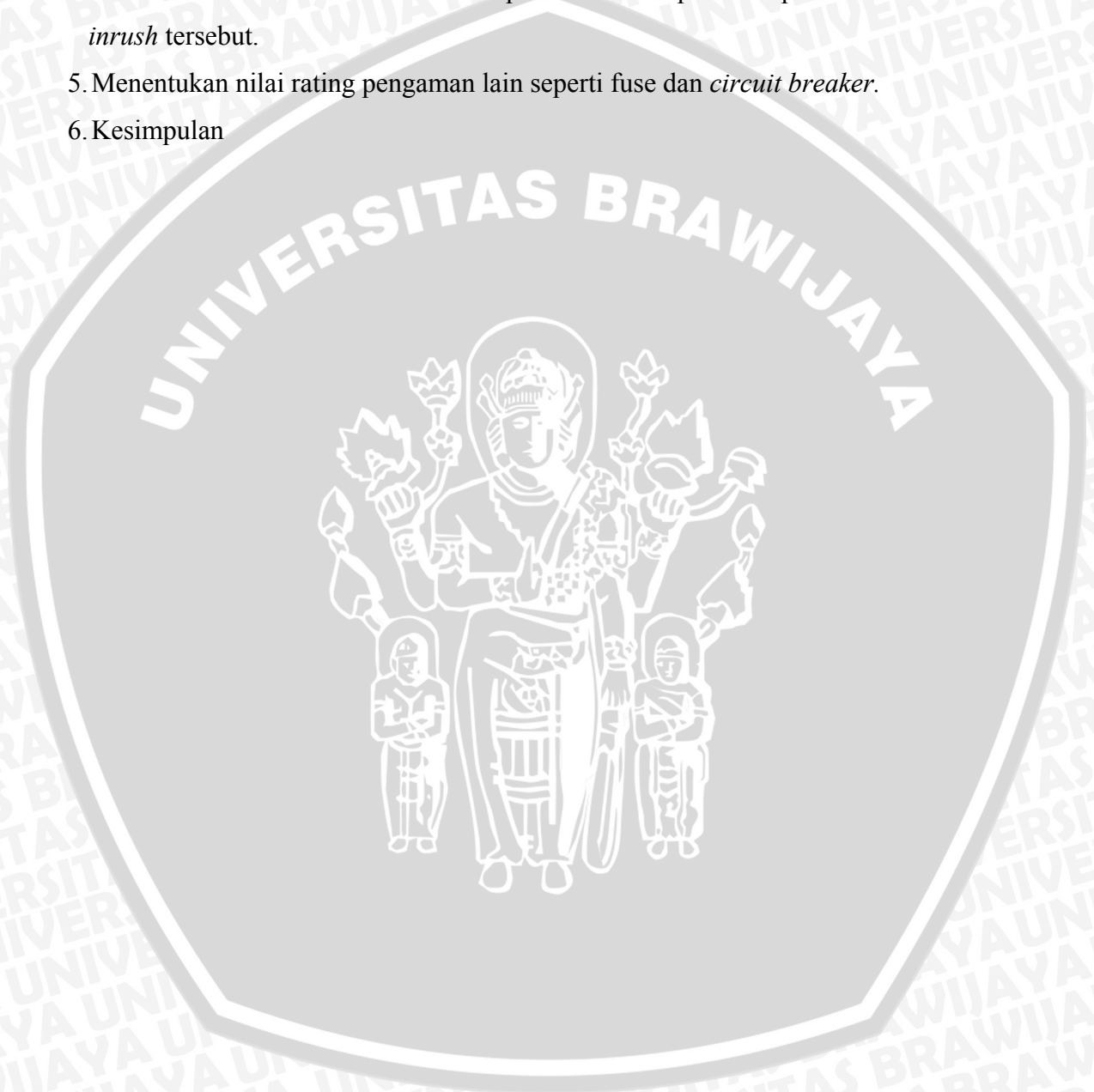
Besarnya kapasitas reaktor untuk mereduksi arus *inrush* pada bank kapasitor sebagai variabel yang akan dianalisa. Pengambilan data dilakukan pada rangkaian bank kapasitor yang ada pada industri, Adapun data yang diperlukan dalam analisa berupa :

1. Tegangan sumber, frekuensi sumber dan kapasitas total dari bank kapasitor.
2. Induktansi sumber, induktansi bus, induktansi antara *switch* ke kapasitor, panjang konduktor antara bus dengan sumber, panjang bus, panjang konduktor antar *switch* dengan bank kapasitor.

Langkah-langkah dalam menganalisis besarnya kapasitas reaktor untuk mereduksi arus *inrush* adalah sebagai berikut :

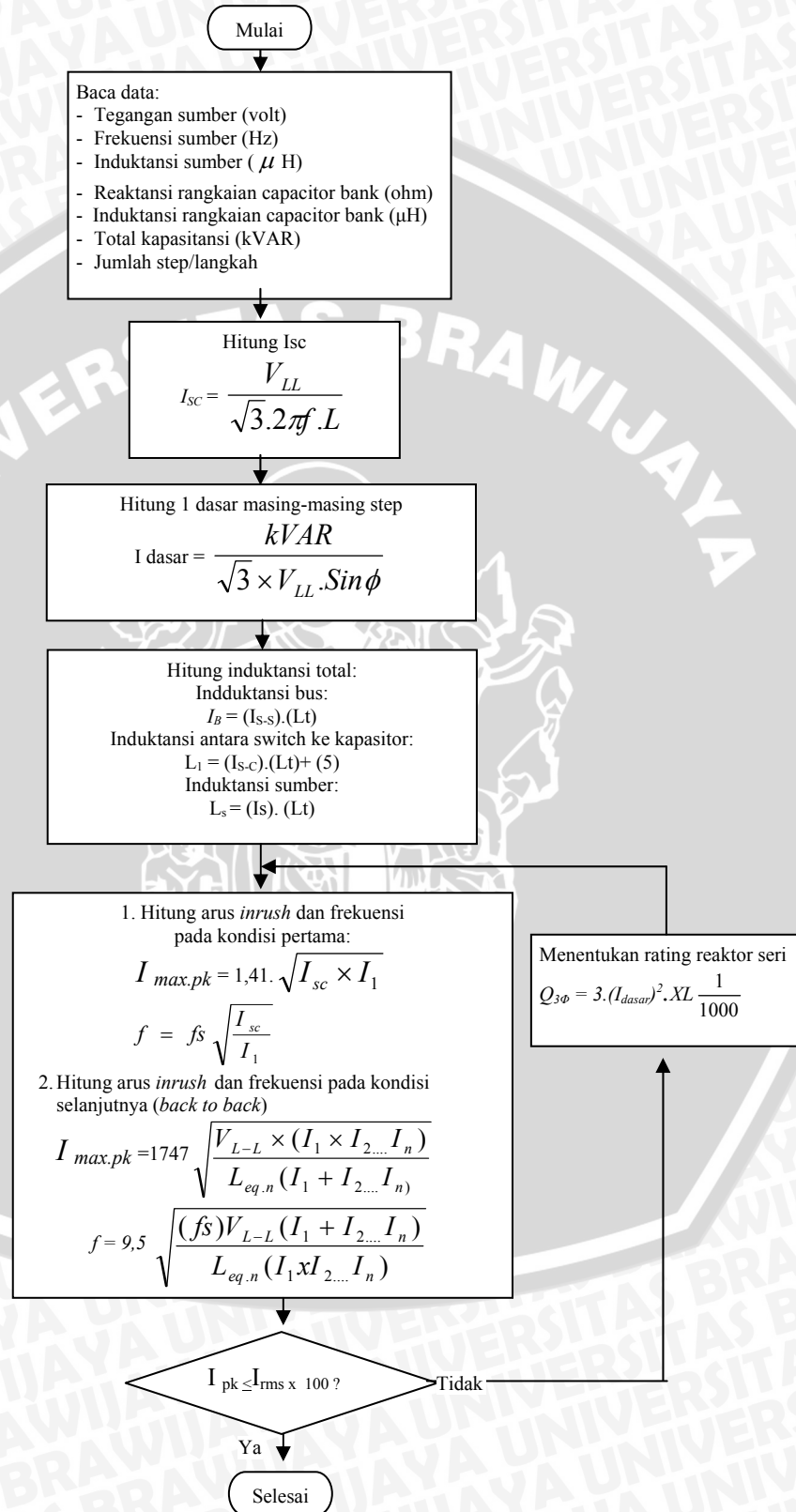
1. Menentukan arus *short circuit* dan arus dasar masing-masing step dari total step kapasitor.
2. Menentukan nilai induktansi total dengan mengambil data induktansi pada tabel, induktansi sumber, bus dan antara kapasitor juga panjang konduktor masing - masing induktansi tiap bagian.

3. Menentukan nilai arus *inrush* dan frekuensinya, dari perhitungan sebelumnya seperti nilai arus *short circuit*, arus dasar dan faktor pengali.
4. Menentukan rating reaktor seri, perlu atau tidaknya dengan melihat nilai arus *inrush*-nya, dimana jika arus *inrush* maksimum sama dengan 100 kali arus rms kapasitor maka arus tersebut boleh bekerja pada kapasitor dan jika nilai arus *inrush* lebih dari 100 kali arus rms kapasitor maka diperlukan peredam untuk arus *inrush* tersebut.
5. Menentukan nilai rating pengaman lain seperti fuse dan *circuit breaker*.
6. Kesimpulan



3.4. Diagram Alir Penyelesaian Masalah

Untuk mempermudah dalam menganalisis diperlukan diagram alir dalam menyelesaikan masalah, adapun diagram alirnya seperti diperlihatkan pada gambar 3.1 berikut ini :



Gambar 3.1 Diagram Alir Analisis

Sumber : Penulis

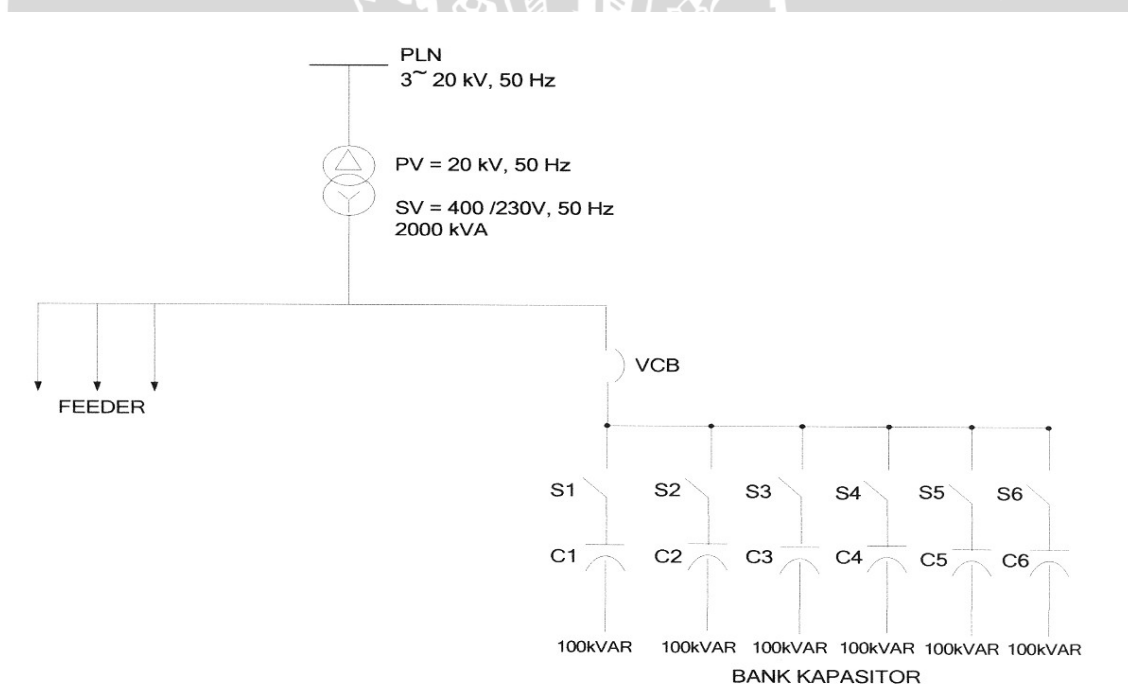
BAB IV

PERHITUNGAN BESARNYA REAKTOR UNTUK MEREDUKSI ARUS TRANSIEN PADA BANK KAPASITOR

4.1 Data – data Sistem Tenaga Listrik

Pada PT. AUTOKORINDO PRATAMA Gresik untuk melakukan produksinya didukung oleh sistem tenaga listrik yang berasal dari PLN dengan menggunakan transformator distribusi 3 fasa, 2000 kVA, 20 kV/400 V, 50 Hz dengan faktor daya 0,72. Persyaratan faktor daya untuk sebuah industri yang ditetapkan PLN tidak boleh kurang dari 0,85, oleh karena itu manajemen perusahaan melakukan koreksi terhadap faktor daya menjadi 0,9.

Perbaikan faktor daya dengan menggunakan kapasitor dengan kapasitas 600 kVAR yang terbagi dalam 6 step kapasitor yang disusun paralel dan tiap step 100 kVAR seperti dilihatkan pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Single Line Diagram bank kapasitor

Sumber : PT. Autokorindo Pratama, Gresik

Dalam mengoperasikan bank kapasitor perusahaan ini menggunakan alat yang disebut dengan *Automatic Capacitor Step*. Peralatan ini digunakan untuk mengatur berapa step/langkah yang diperlukan dalam memperbaiki $\cos \phi$, yang tergantung pada

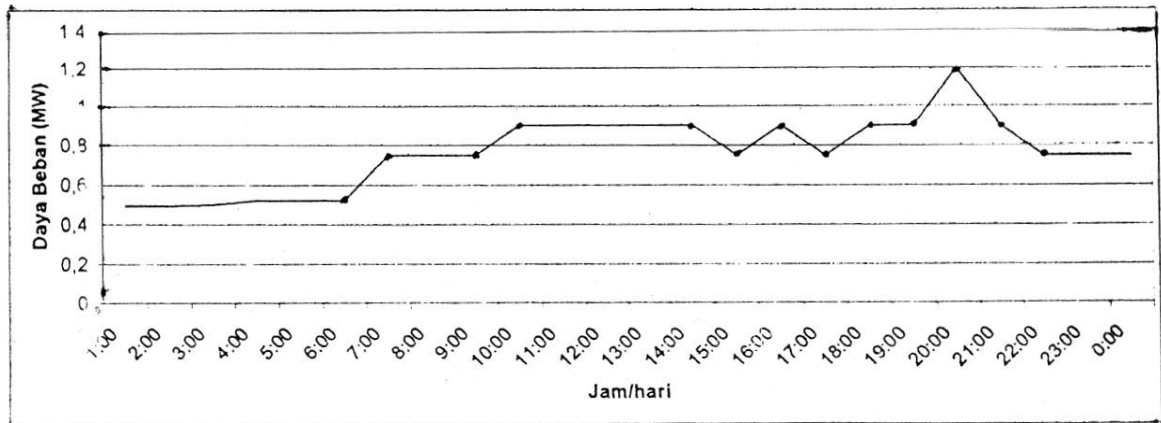
kondisi beban setiap harinya sesuai dengan data beban tiap jam selama produksi. Data – data beban yang dimaksud diperlihatkan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1
Data pembebanan setiap jam perhari

No	Pukul	Tegangan (volt)	Arus (ampere)			Beban (kW)	Cos ϕ
			R	S	T		
1	01:00	220/380	1125	1125	1125	495	0.720
2	02:00	220/380	1125	1125	1125	495	0.720
3	03:00	220/380	1125	1125	1125	495	0.720
4	04:00	220/380	1175	1175	1175	520	0.722
5	05:00	220/380	1175	1175	1175	520	0.722
6	06:00	220/380	1175	1175	1175	520	0.722
7	07:00	220/380	1450	1450	1450	750	0.726
8	08:00	220/380	1450	1450	1450	750	0.726
9	09:00	220/380	1725	1725	1725	900	0.730
10	10:00	220/380	1725	1725	1725	900	0.730
11	11:00	220/380	1725	1725	1725	900	0.730
12	12:00	220/380	1725	1725	1725	900	0.730
13	13:00	220/380	1725	1725	1725	900	0.730
14	14:00	220/380	1725	1725	1725	900	0.730
15	15:00	220/380	1450	1450	1450	750	0.726
16	16:00	220/380	1725	1725	1725	900	0.730
17	17:00	220/380	1450	1450	1450	750	0.726
18	18:00	220/380	1725	1725	1725	900	0.730
19	19:00	220/380	1725	1725	1725	900	0.730
20	20:00	220/380	1925	1925	1925	1200	0.732
21	21:00	220/380	1725	1725	1725	900	0.730
22	22:00	220/380	1450	1450	1450	750	0.726
23	23:00	220/380	1450	1450	1450	750	0.726
24	0:00	220/380	1450	1450	1450	750	0.726

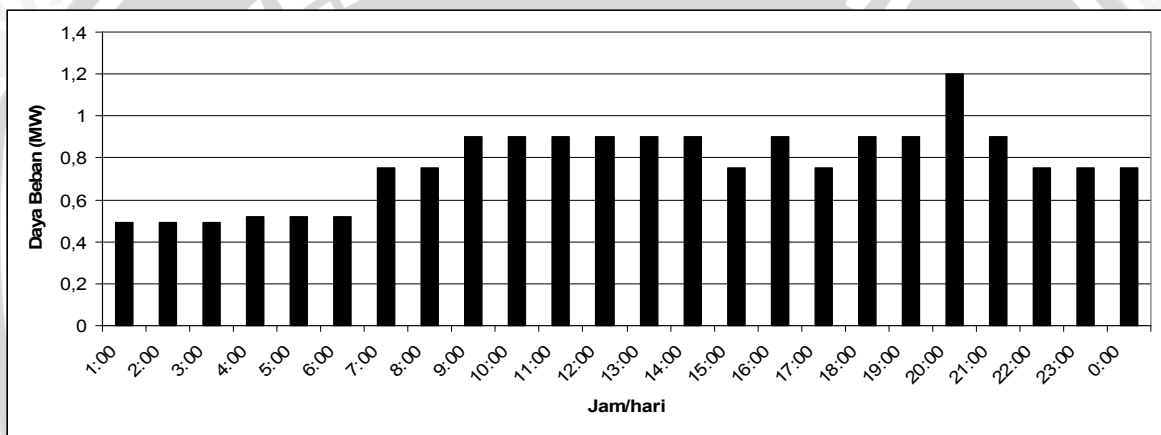
Sumber : PT. Autokorindo Pratama, Gresik

Berdasarkan data di tabel 4.1 dapat digambarkan karakteristik beban harian pada gambar 4.2 dan distribusi beban harian pada gambar 4.3 dapat disimpulkan bahwa beban tertinggi terjadi pada pukul 20:00 dengan daya 1200 kW. Selanjutnya akan dihitung kebutuhan kVAR untuk setiap keadaan beban untuk mencapai faktor daya yang tetap sebesar 0,9.



Gambar 4.2. Karakteristik beban harian

Sumber : Hasil Analisis



Gambar 4.3. Distribusi beban harian

Sumber : Hasil Analisis

Berdasarkan data pada tabel 4.1 dapat dihitung besarnya kVAR per jam besarnya kapasitas kapasitor yang diperlukan. Misalkan pada pukul 01:00, data dari tabel 4.1 diketahui :

Beban : 495 kW

Cos ϕ_1 : 0,72

Cos ϕ_2 : 0,9

Nilai kVAR yang diperlukan pada pukul 01:00 dapat dihitung menggunakan persamaan 2.7 yaitu :

$$\begin{aligned}
 Q &= P (\tan \phi_1 - \tan \phi_2) \\
 &= 495 (\tan 43,94 - \tan 25,84) \\
 &= 495 (0,96 - 0,48) \\
 &= 237,6 \text{ kVAR}
 \end{aligned}$$

Karena kapasitas kapasitor setiap stepnya sebesar 100 kVAR, maka nilai yang mendekati 237,6 kVAR adalah diambil 300 kVAR atau dengan memasukkan kapasitor sebanyak 3 step. Untuk beban – beban pada waktu yang lain seperti paa tabel 4.1, juga dapat dihitung mulai nilai kVAR yang diperlukan dan hasilnya diperlihatkan pada tabel 4.2.

Tabel 4.2
Data perubahan kVAR tiap jam dan jumlah step kapasitor bank

Jam	Cos ϕ_1	Cos ϕ_2	Beban (kW)	kVAR	Jumlah Step
01:00	0,72	0,9	495	300	3
02:00	0,72	0,9	495	300	3
03:00	0,72	0,9	495	300	3
04:00	0,722	0,9	520	300	3
05:00	0,722	0,9	520	300	3
06:00	0,722	0,9	520	300	3
07:00	0,726	0,9	750	400	4
08:00	0,726	0,9	750	400	4
09:00	0,73	0,9	900	500	5
10:00	0,73	0,9	900	500	5
11:00	0,73	0,9	900	500	5
12:00	0,73	0,9	900	500	5
13:00	0,73	0,9	900	500	5
14:00	0,73	0,9	900	500	5
15:00	0,726	0,9	750	400	4
16:00	0,73	0,9	900	500	5
17:00	0,726	0,9	750	400	4
18:00	0,73	0,9	900	500	5
19:00	0,73	0,9	900	500	5
20:00	0,732	0,9	1200	600	6
21:00	0,73	0,9	900	500	5
22:00	0,726	0,9	750	400	4
23:00	0,726	0,9	750	400	4
00:00	0,726	0,9	750	400	4

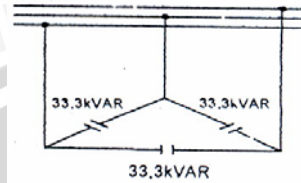
Sumber : Hasil Analisis

4.2 Perhitungan besarnya kapasitas reaktor untuk mereduksi arus transien pada kapasitor bank

Dalam menentukan besarnya rating reaktor untuk mereduksi arus transien pada kapasitor bank di PT. Autokorindo Pratama diperlukan data – data yang berada di perusahaan tersebut, adapun data yang digunakan dalam analisis sebagai berikut :

- Tegangan sumber : 380 Volt
- Frekuensi sumber (fs) : 50 Hz
- Kapasitas total kapasitor : 600 kVAR
- Jumlah tingkat step/langkah : 6 step

- Panjang konduktor antara Bus dengan sumber (Is) : 5,5 m
- Panjang konduktor antara *switch* pada bank kapasitor 1 dengan *switch* pada bank kapasitor 2 (Is-s) : 0,4 m
- Panjang konduktor antara *switch* dengan bank kapasitor (Is-c) : 0,45 m
- Hubungan kapasitor : Delta



Sesuai dengan publikasi IEC 70, 1987. Arus transien yang bisa juga disebut arus *inrush* maksimum yang boleh diijinkan bekerja adalah 100 kali arus rms kapasitor tersebut. Jika nilai arus *inrush* lebih dari 100 kali arus rms kapasitor maka diperlukan peredam untuk arus *inrush* tersebut. Kapasitas reaktor seri yang harus digunakan sesuai dengan standart internasional JIS-C-4092 yaitu 6 % dari kapasitas dasar kapasitor yang dipasang.

4.2.1 Menentukan Nilai Induktansi

Perhitungan harga induktansi pada *incoming line* pada persamaan 2.34, induktansi bus pada persamaan 2.35, dan antar kapasitor pada persamaan 2.36 dengan melihat Tabel 2.4. berdasarkan ANSI/IEEE C37.012.1979 sebagai berikut :

$$1 \text{ m} = 1 / 0,305 \text{ ft} = 3,279 \text{ ft}$$

$$\begin{aligned} L_s &= (I_s) \cdot (L_t) \\ &= (5,5 \cdot 3,279) \cdot (0,214) \\ &= 3,859 \mu H \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L_B &= (I_s-s) \cdot (L_t) \\ &= (0,4 \cdot 3,279) \cdot (0,214) \\ &= 0,281 \mu H \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L_1, L_2, L_3, \dots, L_6 &= (I_s-c) \cdot (L_t) + (5 \mu H) \\ &= ((0,45 \cdot 3,279) \cdot (0,214)) + 5 \\ &= 5,316 \mu H \end{aligned}$$

Keterangan :

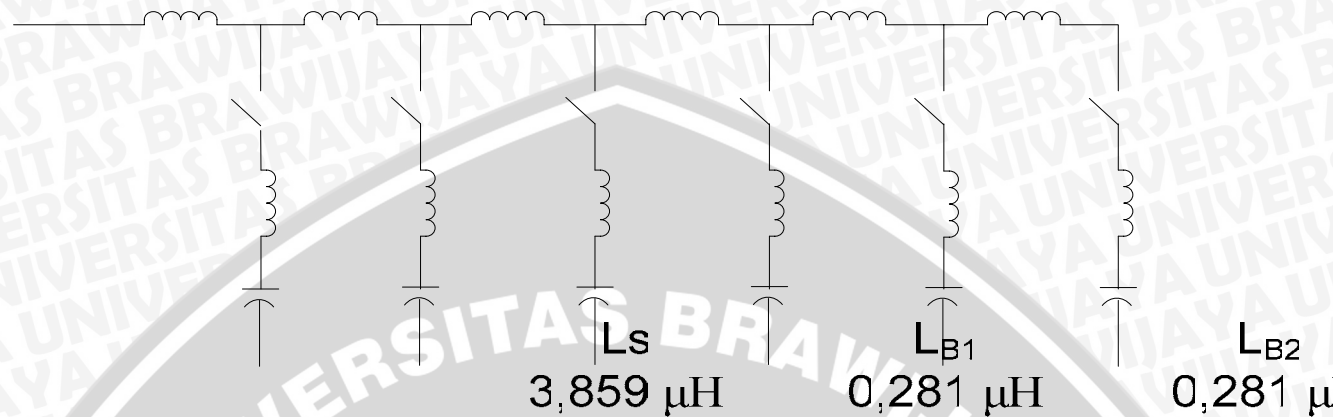
L_s : Induktansi pada sumber

L_B : Induktansi Bus

L_t : Nilai induktansi pada Tabel

$L_1, L_2, L_3, \dots, L_6$: Induktansi antara *switch* ke kapasitor

Dari perhitungan diatas, maka dapat ditunjukkan pada Gambar 4.4 yang merupakan konfigurasi dari bank kapasitor sesuai dengan data – data yang ada.



Gambar 4.4 konfigurasi bank kapasitor

Sumber : Hasil analisis

4.2.2 Menentukan Nilai arus *Inrush* dan Frekuensinya

Dari tabel 4.2 bahwa beban puncak terjadi pada jam 20:00 dan menggunakan seluruh kapasitor. Besarnya nilai total kapasitor bank adalah 600 kVAR dan masing – masing step adalah 100 kVAR, maka I_{dasar} dari kapasitor :

$$\begin{aligned} I_{dasar} &= \frac{Q_c}{\sqrt{3} \cdot V \sin \phi} \\ &= \frac{100000}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,435} \\ &= 349,7 \text{ A} \end{aligned}$$

Untuk menentukan nilai arus *inrush* dan frekuensinya dari keseluruhan *capacitor bank* yang berjumlah 6 step dengan langkah – langkah sebagai berikut

1. Kondisi kesatu (isolated), hanya kapasitor C1 yang bekerja maka arus *inrush* maksimum dihitung sesuai persamaan 2.35 dan melihat gambar 4.4 dengan data arus rms yang dipengaruhi oleh tiga faktor yaitu faktor tegangan, faktor toleransi, dan faktor harmonisa, tegangan (V) dan induktansi diantara kapasitor (L_{eq1}) :

$$L_{eq1} = L1 + Ls = 5,316 + 3,859 = 9,175 \mu\text{H}$$

$$I_{SC} = \frac{V_{LL}}{\sqrt{3} \cdot 2\pi \cdot f \cdot L_{eq1}}$$

$$= \frac{380}{\sqrt{3.2\pi.50.9,175}}$$

$$= 7,615 \times 10^4 \text{ A}$$

$$I_1 = 1,1 \times 1,05 \times 1,05 \times I_{\text{dasar}}$$

$$= 1,1 \times 1,05 \times 1,05 \times 349,7$$

$$= 424,1 \text{ A}$$

Besarnya arus *inrush* maksimum dihitung sesuai persamaan 2.30

$$I_{\text{mak pk}} = 1.41 \sqrt{I_{\text{SC}} \times I_1}$$

$$= 1,41 \sqrt{7,615 \cdot 10^4 \times 424,1}$$

$$= 8,013 \times 10^3 \text{ A}$$

Sedangkan frekuensi maksimum dihitung sesuai persamaan 2.31:

$$f_{\text{mak}} = f_s \sqrt{\frac{I_{\text{SC}}}{I_1}}$$

$$= 50 \sqrt{\frac{7,615 \cdot 10^4}{424,1}}$$

$$= 669,99 \text{ Hz}$$

Perhitungan tingkat perubahan arus *inrush* terhadap waktu untuk step 1 (isolasi)

$$\frac{di}{dt} = \frac{2\pi f_{\text{mak}} \times I_{\text{mak.pk}}}{10^6} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 669,99 \times 8,013 \cdot 10^3}{10^6} = 33,715 \text{ A}/\mu\text{s}$$

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

$$L_{\text{eq2}} = \left(\frac{(L_{B1} + L_2)L_1}{(L_{B1} + L_2) + L_1} \right) + L_S$$

$$= \left(\frac{(0,281 + 5,316)5,316}{(0,281 + 5,316) + 5,316} \right) + 3,859 = 6,585 \mu\text{H}$$

Dengan $I_1 = I_2 = 424,1 \text{ A}$

$$I_{\text{mak pk}} = 1747 \sqrt{\frac{V_{L-L}(I_1 \times I_2)}{L_{\text{eq2}}(I_1 + I_2)}}$$

$$I_{\text{mak pk}} = 1747 \sqrt{\frac{380 \times (424,1 \times 424,1)}{6,585(424,1 + 424,1)}}$$

$$= 1,932 \times 10^5 \text{ A}$$

Sedangkan frekuensi maksimum dihitung sesuai persamaan 2.33 :

$$f_{mak} = 9,5 \sqrt{\frac{(fs)V_{L-L}(I_1 + I_2)}{L_{eq2}(I_1 x I_2)}}$$

$$f_{mak} = 9,5 \sqrt{\frac{(50).380.(424,1 + 424,1)}{6,585.(424,1x424,1)}} \\ = 35,04 \text{ kHz}$$

Perhitungan tingkat perubahan arus *inrush* terhadap waktu untuk step 2 :

$$di/dt = \frac{2\pi f_{mak} x I_{mak.pk}}{10^6} = \frac{2.\pi x 35,04 x 1,932.10^5}{10^6} = 4,25.10^4 \text{ A}/\mu\text{s}$$

Dan perhitungan besarnya arus *inrush* dan frekuensi yang terjadi pada kondisi selanjutnya untuk tiap – tiap step bisa dilihat pada tabel 4.3

Tabel 4.3.
Hasil perhitungan Arus *Inrush* dan frekuensi masing – masing step

Kondisi Step	L_{eq} (μH)	I_{max} (A)	f_{max} (kHz)	Perubahan Arus ($\frac{A}{\mu s}$)
1	9,175	$8,013 \times 10^3$	0,669	33,715
2	6,585	$1,932 \times 10^5$	35,04	$4,25 \times 10^4$
3	5,765	$2,385 \times 10^5$	32,435	$4,858 \times 10^4$
4	5,409	$2,611 \times 10^5$	31,570	$5,176 \times 10^4$
5	5,221	$2,745 \times 10^5$	31,11	$5,363 \times 10^4$
6	5,114	$2,831 \times 10^5$	30,802	$5,476 \times 10^4$

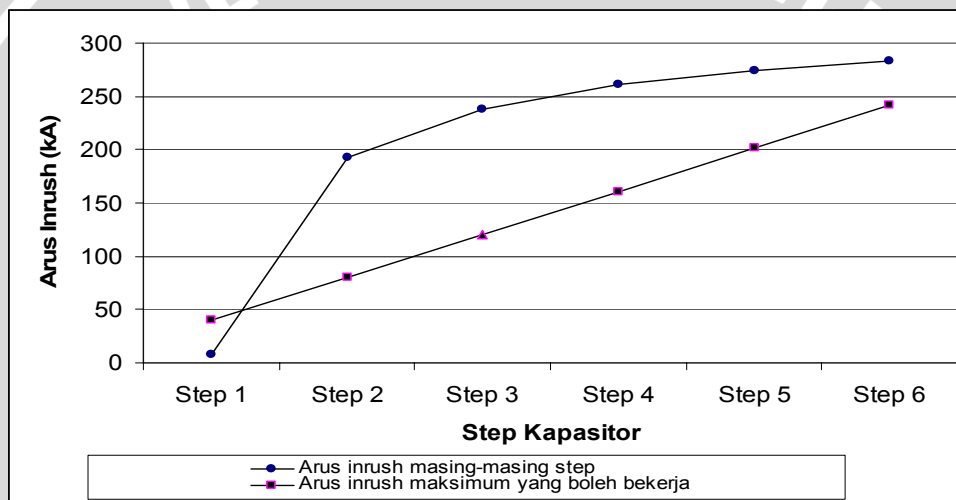
Sumber : Hasil analisis

Sesuai dengan publikasi IEC 70, 1987. Arus transien yang bisa juga disebut 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 arus rms kapasitor maka diperlukan peredam untuk arus *inrush* tersebut. Besarnya arus *inrush* maksimum yang boleh bekerja pada kapasitor masing – masing step berdasarkan perhitungan bisa dilihat pada Tabel 4.4. Sedangkan grafik arus *inrush* untuk tiap – tiap step bisa dilihat pada Gambar 4.5.

Tabel 4.4
Nilai arus *inrush* Maksimum yang boleh bekerja

No Step	Arus rms kapasitor (A)	Nilai arus <i>Inrush</i> Maksimum (A)
1	424,1	42410
2	848,2	84820
3	1272,3	127230
4	1696,4	169640
5	2120,5	212050
6	2544,6	254460

Sumber : Hasil analisis



Gambar 4.5 Grafik arus *inrush* masing - masing step

Sumber : Hasil analisis

Karena kapasitas reaktor seri yang harus digunakan sesuai dengan standart internasional JIS-C-4092 yaitu 6 % dari kapasitas dasar kapasitor yang dipasang, maka :

1. Menentukan I_{dasar} dari kapasitor :

Besarnya nilai total kapasitor bank adalah 600 kVAR dan masing – masing step adalah 100 kVAR, maka I_{dasar} dari kapasitor :

$$\begin{aligned}
 I_{\text{dasar}} &= \frac{Q_c}{\sqrt{3} \cdot V \sin \phi} \\
 &= \frac{100000}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,435} \\
 &= 349,27 \text{ A}
 \end{aligned}$$

2. Menentukan Impedansi dasar :

$$\begin{aligned} Z_{\text{dasar}} &= \frac{V_{\text{dasar}}}{I_{\text{dasar}}} \\ &= \frac{380/\sqrt{3}}{349,27} = 0,628\Omega \end{aligned}$$

3. Menentukan reaktansi induktif reaktor seri:

$$\begin{aligned} X_L &= 6\% \times Z_{\text{dasar}} \\ &= 0,06 \times 0,628 \\ &= 0,038 \Omega \end{aligned}$$

4. Menentukan nilai induktansi reaktor seri :

$$\begin{aligned} L &= \frac{X_L}{2\pi \cdot f} \\ &= \frac{0,038}{2\pi \cdot 50} = 1,210 \times 10^{-4} H = 121 \mu H \end{aligned}$$

5. Menentukan kapasitas reaktor seri dihitung sesuai dengan persamaan 2.1 dalam kVAR

$$\begin{aligned} Q_{3\phi} &= 3 \cdot (I_{\text{dasar}})^2 \cdot X_L \cdot \frac{1}{1000} \\ &= 3 \cdot (349,27)^2 \cdot 0,038 \cdot \frac{1}{1000} \\ &= 13,9 \text{ kVAR} \end{aligned}$$

Sehingga didapat :

- Nilai induktansi reaktor seri : 121 μ H
- Kapasitas reaktor seri dalam kVAR : 13,9 kVAR

Dengan demikian pada masing – masing rangkaian kapasitor kecuali pada step pertama terdapat tambahan reaktor seri sebesar 121 μ H dan hal ini tentu saja akan menambah nilai induktansi total pada kapasitor tersebut.

Untuk menentukan arus *inrush* maksimum dan frekuensi maksimum setelah adanya penambahan reaktor seri di rangkaian kapasitor bank sebesar 121 μ H adalah sebagai berikut :

1. Kondisi kesatu (isolated), dimana hanya kapasitor C1 yang bekerja maka arus *inrush* maksimum dengan data yang sama dengan kondisi pertama sebelum adanya penambahan reaktor seri adalah :

$$Leq1 = L1 + Ls = 5,316 + 3,859 = 9,175 \mu H$$

$$\begin{aligned}
 I_{SC} &= \frac{V_{LL}}{\sqrt{3} \cdot 2\pi \cdot f \cdot L_{eq1}} \\
 &= \frac{380}{\sqrt{3} \cdot 2\pi \cdot 50 \cdot 9,175} \\
 &= 7,615 \times 10^4 \text{ A}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 I_I &= 1,1 \times 1,05 \times 1,05 \times I_{dasar} \\
 &= 1,1 \times 1,05 \times 1,05 \times 349,7 \\
 &= 424,1 \text{ A}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 I_{mak\ pk} &= 1,41 \sqrt{I_{SC} \times I_I} \\
 &= 1,41 \sqrt{7,615 \cdot 10^4 \times 424,1} \\
 &= 8,013 \times 10^3 \text{ A}
 \end{aligned}$$

Sedangkan frekuensi maksimum dihitung sesuai persamaan 2.31:

$$\begin{aligned}
 f_{mak} &= f_s \sqrt{\frac{I_{SC}}{I_I}} \\
 &= 50 \sqrt{\frac{7,615 \cdot 10^4}{424,1}} \\
 &= 669,99 \text{ Hz}
 \end{aligned}$$

Perhitungan tingkat perubahan arus *inrush* terhadap waktu untuk step 1 (isolasi)

$$\frac{di}{dt} = \frac{2\pi f_{mak} \times I_{mak.\ pk}}{10^6} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 669,99 \times 8,013 \cdot 10^3}{10^6} = 33,715 \text{ A}/\mu\text{s}$$

2. Kondisi kedua (*back to back*), kapasitor C2 bekerja sementara C1 juga bekerja arus *inrush* maksimum dihitung sesuai persamaan 2.32 dengan data yang sama dengan kondisi pertama sebelum adanya penambahan reaktor seri :

$$\begin{aligned}
 L_{eq2} &= \left(\frac{(L_{B1} + L_2 + L_{rs}) \cdot (L_1 + L_{rs})}{(L_{B1} + L_2 + L_{rs}) + L_1 + L_{rs}} \right) + L_S \\
 &= \left(\frac{(0,281 + 5,316 + 121) \cdot (5,316 + 121)}{(0,281 + 5,316 + 121) + 5,316 + 121} \right) + 3,859 \\
 &= 67,087 \mu\text{H}
 \end{aligned}$$

Dengan $I_I = I_2 = 424,1 \text{ A}$

$$I_{mak\ pk} = 1747 \sqrt{\frac{V_{L-L} \times (I_1 \times I_2)}{L_{eq2} (I_1 + I_2)}}$$

$$I_{mak\ pk} = 1747 \sqrt{\frac{380x(424,1x424,1)}{67,087(424,1+424,1)}} \\ = 6,05x10^4 A$$

Sedangkan frekuensi maksimum dihitung sesuai persamaan 2.33 :

$$f_{mak} = 9,5 \sqrt{\frac{(fs)V_{L-L}(I_1 + I_2)}{L_{eq2}(I_1xI_2)}} \\ f_{mak} = 9,5 \sqrt{\frac{(50).380.(424,1+424,1)}{67,087.(424,1x424,1)}} \\ = 10,979\ kHz$$

Perhitungan tingkat perubahan arus *inrush* terhadap waktu untuk step 2 :

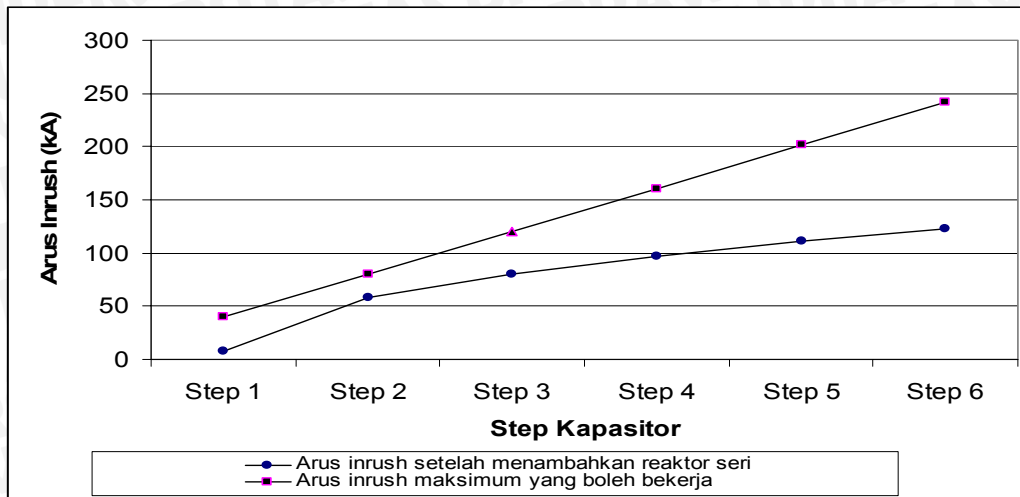
$$\frac{di}{dt} = \frac{2\pi f_{mak} x I_{mak.\ pk}}{10^6} = \frac{2.\pi x 10,979.10^3 x 6,05.10^4}{10^6} = 4,17.10^3\ A/\mu s$$

Dan perhitungan besarnya arus *inrush* dan frekuensi yang terjadi pada kondisi selanjutnya untuk tiap – tiap step setelah menambahkan reaktor seri bisa dilihat pada tabel 4.5. Sedangkan grafik arus *inrush* untuk tiap – tiap step setelah menambahkan reaktor seri bisa dilihat pada Gambar 4.6.

Tabel 4.5
Hasil perhitungan Arus *Inrush* dan Frekuensi setiap Step setelah menambahkan reaktor seri

Kondisi Step	L_{eq} (μH)	I_{max} (A)	f_{max} (kHz)	Perubahan Arus ($\frac{A}{\mu s}$)
1	9,175	$8,013x10^3$	0,669	33,175
2	67,087	$6,05x10^4$	10,979	$4,17x10^3$
3	46,026	$8,441x10^4$	11,479	$6,085x10^3$
4	35,490	$10,195x10^4$	12,325	$7,891x10^3$
5	29,167	$11,615x10^4$	13,163	$9,601x10^3$
6	24,949	$12,817x10^4$	13,945	$11,224x10^3$

Sumber : Hasil analisis



Gambar 4.6 Grafik arus *inrush* untuk masing - masing step setelah menambahkan reaktor seri

Sumber : Hasil analisis

4.3. Menentukan Kapasitas Pengaman Pemutus Rangkaian

Diketahui :

- Tegangan antar saluran : 380 V
- Kapasitas total kapasitor : 600 kVAR

Penyelesaian :

$$I_{d.total} = \frac{Qc}{\sqrt{3} \cdot V \sin \phi}$$

$$I_{d.total} = \frac{600000}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,435} = 2095,6 \text{ A}$$

Untuk menentukan rating pengaman pemutus rangkaian tiap unit 100 kVAR dan rating fuse HRC tiap kapasitor sebesar 33,3 kVAR mengacu pada standart IEEE Std 1063. 1993:

- a. Rating fuse HRC tipe standart dihitung sesuai persamaan 2.37 :

$$I = 1,65 \times I_{dasar}$$

$$= 1,65 \times 116,31 \text{ A}$$

$$= 191,91 \text{ A} \text{ dipilih } 200 \text{ A}$$

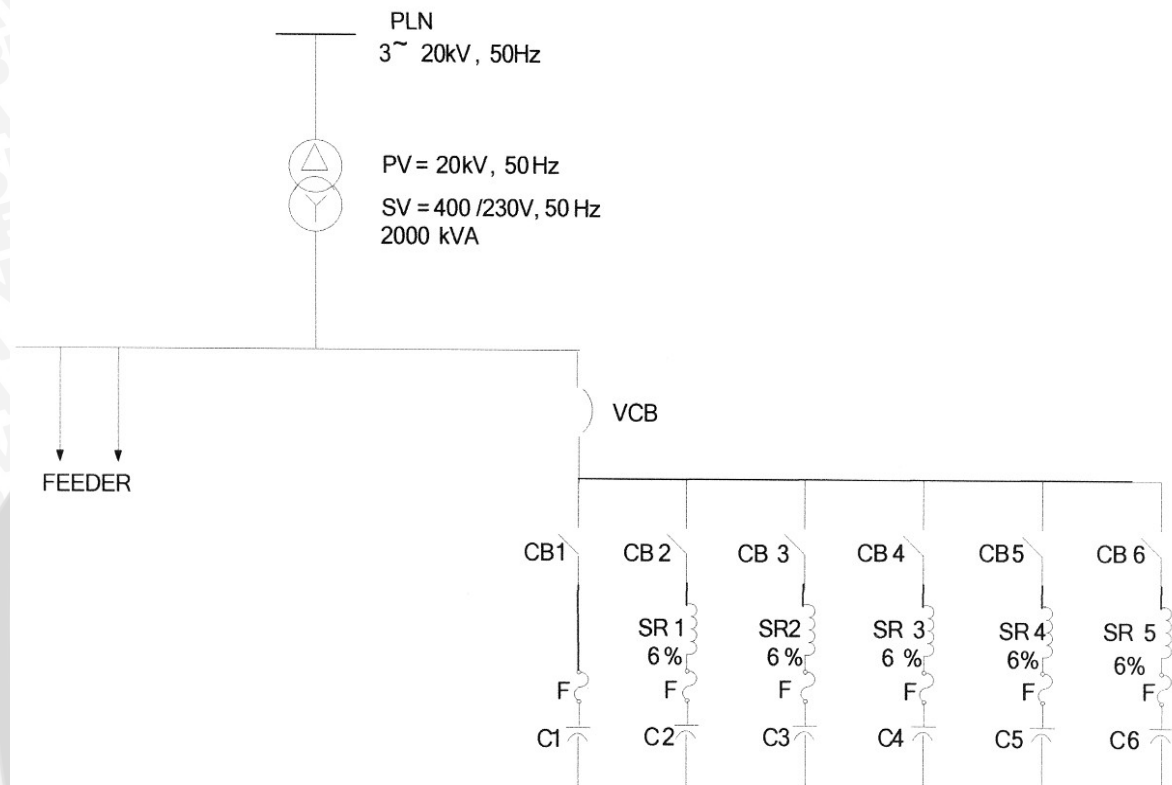
- b. Rating CB dihitung sesuai persamaan 2.38 :

$$I = 1,35 \times I_{dasar}$$

$$= 1,35 \times 349,7 \text{ A}$$

$$= 472,09 \text{ A} \text{ dipilih } 500 \text{ A}$$

Setelah menentukan besarnya reaktor seri untuk mereduksi arus *inrush* dan pengaman pemutus rangkaian, maka dapat ditunjukkan dalam diagram segaris pada Gambar 4.7 seperti dibawah ini.



Gambar 4.7. Diagram segaris kapasitor dengan reaktor seri dan pengaman pemutus rangkaian

Sumber : Hasil analisis

Di semua analisis penggunaan reaktor untuk mereduksi arus transien pada kapasitor bank dapat diambil beberapa hal penting yaitu :

- Instalasi kapasitor bank tanpa reaktor seri, arus *inrush* yang mengalir pada waktu kapasitor dihubungkan ke sumber tegangan besarnya bisa mencapai 200 kali arus rms kapasitor.
- Dengan penambahan reaktor seri atau peredam lilitan sebesar 6 % dari kapasitas dasar kapasitor yang dipasang ternyata mampu meredam atau memperkecil arus sesaat hingga nilainya berada jauh dibawah nilai yang diijinkan oleh publikasi IEC 70,1987.

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari hasil perhitungan dan analisis yang dilakukan dapat disimpulkan bahwa pengaruh penggunaan reaktor seri untuk mereduksi arus transien pada instalasi *capacitor bank* sebagai berikut :

1. Nilai arus transien atau yang bisa juga disebut *inrush current* dan frekuensi yang terjadi ketika kapasitor dihubungkan ke sistem tenaga listrik untuk memperbaiki faktor daya pada beban puncak pada pukul 20:00 sebesar 600 kVAR dimana nilainya setiap step sebelum adanya penambahan reaktor seri adalah step pertama sebesar $8,013 \times 10^3$ A dengan frekuensi 669 Hz, step kedua sebesar $1,932 \times 10^5$ A dengan frekuensi 35,04 kHz, step ketiga sebesar $2,385 \times 10^5$ A dengan frekuensi 32,435 kHz, step keempat sebesar $2,611 \times 10^5$ A dengan frekuensi 31,57 kHz, step kelima sebesar $2,745 \times 10^5$ A dengan frekuensi 31,11 kHz, step keenam sebesar $2,831 \times 10^5$ A dengan frekuensi 30,802 kHz. Nilai arus *inrush* yang dihasilkan ini, kecuali pada step pertama nilainya melebihi batas ketentuan yang diijinkan oleh publikasi IEC 70 sebesar 100 kali arus rms (AS. Pabla 1989: 372)
2. Dengan adanya arus *inrush* yang besar , maka dapat menyebabkan kapasitor menjadi rusak sehingga besarnya arus *inrush* perlu direduksi atau diredam dengan menggunakan reaktor seri dengan nilai induktansi sebesar 605 μ H dengan kapasitas 69,5 kVAR yang mampu membatasi arus *inrush* maksimum. Setelah adanya reaktor seri arus *inrush* pada step kedua sebesar $6,05 \times 10^4$ A dengan frekuensi 10,979 kHz, step ketiga sebesar $8,441 \times 10^4$ A dengan frekuensi 11,479 kHz, step keempat sebesar $10,195 \times 10^4$ A dengan frekuensi 12,325 kHz, step kelima sebesar $11,615 \times 10^4$ A dengan frekuensi 13,163 kHz, step keenam sebesar $12,817 \times 10^4$ A dengan frekuensi 13,945 kHz. Sehingga nilainya berada dibawah nilai yang diijinkan oleh publikasi IEC 70.
3. a. Untuk memperbaiki faktor daya dari 0,72 menjadi 0,9 diperlukan kompensasi menggunakan bank kapasitor dengan kapasitas total sebesar 600 kVAR. Nilai kVAR dari kapasitor yang dimasukkan ke jaringan dilakukan setahap demi setahap (*back to back*) sesuai kebutuhan beban harian.

- b. Kapasitas kapasitor yang diperlukan untuk menaikkan faktor daya sebesar 0,9 adalah 300 kVAR pada pukul 01:00 sampai pukul 06:00; 400 kVAR pada pukul 07:00, 08:00, 15:00, 17:00 dan pukul 22:00 sampai pukul 24:00; 500 kVAR pada pukul 09:00 sampai pukul 14:00, pukul 16:00, 18:00, 19:00, dan pukul 21:00; 600 kVAR pada pukul 20:00.
4. Besarnya rating pengaman pemutus rangkaian tiap unit kapasitor 100 kVAR sebesar 500 A dan rating fuse HRC tiap unit kapasitor 33,3 kVAR sebesar 200 A.

5.2. Saran

Berdasarkan kesimpulan di atas, maka disarankan :

1. Instalasi bank kapasitor pada PT. Autokorindo Pratama di Gresik, Jawa Timur nilai arus *inrush* yang dihasilkan kecuali pada step pertama nilainya melebihi batas ketentuan yang diijinkan oleh publikasi IEC 70 sebesar 100 kali arus rms sehingga menyebabkan kerusakan pada kapasitor. Oleh karena itu perlu adanya penggunaan reaktor seri pada step kedua hingga step keenam untuk mereduksi atau meredam arus *inrush* maksimum yaitu dengan menggunakan reaktor seri dengan nilai induktansi sebesar 121 μH dengan kapasitas 13,9 kVAR.





DAFTAR PUSTAKA

Larry M. Smith, 1995, “ A Practical Approach in Substation Capacitor Bank Applications to Calculating, Limiting and Reducing the effects of transient Current”, IEEE, vol.31, No 4 juli / August 1995.

Guide for protection of shunt Capacitor Banks, ANSI / IEEE, C 37, 99 – 1980.

Saksomo Setiyo, Ir. , Diktat Kuliah Proteksi Sistem Tenaga, Jurusan Elektro, FT. Unibraw.

ANSI / IEEE C37.012 - 1979, IEEE “*Application Guide for Capacitance Current Switching for AC High – Voltage Circuit Breaker Rated on Symmetrical Current Basis*” September 1977.

<http://www.gilbertelectrical.com/library/technical.discussion.htm>

Arismunandar & S. Kuwahara, DR.”*Teknik Tenaga Listrik Jilid II*”

Budiono Mismail, “*Rangkaian Listrik Jilid II*”, 1995.

AS Pabla, “*Electric Power Distribution Sistem*”, 1989.

Data – data teknik PT. Autokorindo Pratama – Gresik.

Widianto A “*Studi Sistem Pengaman Pada Capacitor Bank*” Tugas Akhir, 1998

Michael Neidle “*Teknologi Instalasi Listrik*” Edisi Ketiga 1991

William D. Stevenson, JR “ *Analisa Sistem Tenaga* ” Diterjemahkan Budiono Mismail, 1982.

IEEE Std 1036.1992 IEEE “*Guide for Application of Shunt Power Capacitor*” Februari. 19, 1993.





LAMPIRAN

**Data Pembebanan PT. Autokorindo Pratama
Per-Mei**

No	Pukul	Tegangan (volt)	Arus (ampere)			Beban (kW)	Cos ϕ
			R	S	T		
1	01:00	220/380	1125	1125	1125	495	0.720
2	02:00	220/380	1125	1125	1125	495	0.720
3	03:00	220/380	1125	1125	1125	495	0.720
4	04:00	220/380	1175	1175	1175	520	0.722
5	05:00	220/380	1175	1175	1175	520	0.722
6	06:00	220/380	1175	1175	1175	520	0.722
7	07:00	220/380	1450	1450	1450	750	0.726
8	08:00	220/380	1450	1450	1450	750	0.726
9	09:00	220/380	1725	1725	1725	900	0.730
10	10:00	220/380	1725	1725	1725	900	0.730
11	11:00	220/380	1725	1725	1725	900	0.730
12	12:00	220/380	1725	1725	1725	900	0.730
13	13:00	220/380	1725	1725	1725	900	0.730
14	14:00	220/380	1725	1725	1725	900	0.730
15	15:00	220/380	1450	1450	1450	750	0.726
16	16:00	220/380	1725	1725	1725	900	0.730
17	17:00	220/380	1450	1450	1450	750	0.726
18	18:00	220/380	1725	1725	1725	900	0.730
19	19:00	220/380	1725	1725	1725	900	0.730
20	20:00	220/380	1925	1925	1925	1200	0.732
21	21:00	220/380	1725	1725	1725	900	0.730
22	22:00	220/380	1450	1450	1450	750	0.726
23	23:00	220/380	1450	1450	1450	750	0.726
24	0:00	220/380	1450	1450	1450	750	0.726