

**ANALISIS KOMPENSASI VAR SISTEM DISTRIBUSI  
TIGA FASA EMPAT KAWAT DENGAN METODE  
KOMPENSASI DUA FASA**

**SKRIPSI**

Oleh:

**AGUS HOTLAN NAPITU**

**04 03 03 008 X**



**DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA  
GANJIL 2007/2008**

**ANALISIS KOMPENSASI VAR SISTEM DISTRIBUSI  
TIGA FASA EMPAT KAWAT DENGAN METODE  
KOMPENSASI DUA FASA**

**SKRIPSI**

Oleh:

**AGUS HOTLAN NAPITU**

**04 03 03 008 X**



**SKRIPSI INI DIAJUKAN UNTUK MELENGKAPI SEBAGIAN  
PERSYARATAN MENJADI SARJANA TEKNIK**

**DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA  
GANJIL 2007/2008**

## **PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI**

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi dengan judul:

### **ANALISIS KOMPENSASI VAR SISTEM DISTRIBUSI TIGA FASA EMPAT KAWAT DENGAN METODE KOMPENSASI DUA FASA**

Yang dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Departemen Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia, sejauh yang saya ketahui bukan merupakan tiruan atau duplikasi dari seminar yang sudah dipublikasikan dan atau pernah dipakai untuk mendapatkan gelar kesarjanaan di lingkungan Universitas Indonesia maupun di perguruan tinggi atau instansi manapun, kecuali bagian yang sumber informasinya dicantumkan sebagaimana mestinya.

Depok, Desember 2007

**(Agus Hotlan Napitu)**

**NPM 04 03 03 008 X**

## **PENGESAHAN**

Skripsi dengan judul:

### **ANALISIS KOMPENSASI VAR SISTEM DISTRIBUSI TIGA FASA EMPAT KAWAT DENGAN METODE KOMPENSASI DUA FASA**

Dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi Sarjana Teknik pada program studi Teknik Elektro Departemen Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia dan disetujui untuk diajukan dalam sidang ujian skripsi. Skripsi ini telah diujikan pada sidang ujian skripsi pada tanggal 4 Januari 2008 dan dinyatakan memenuhi syarat/sah sebagai skripsi pada Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Depok, 7 Januari 2008

Dosen Pembimbing,

**Ir. Agus R Utomo,MT**

NIP 131 595 840

## **UCAPAN TERIMAKASIH**

Puji syukur kehadiran Tuhan Yang Maha Esa yang telah melimpahkan segala rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik. Penyelesaian seminar ini dapat terlaksana atas bantuan berbagai pihak. Untuk ini penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

### **Ir. Agus R. Utomo, MT**

selaku pembimbing yang selalu membantu dan membimbing serta meluangkan tenaga, waktu maupun pikiran selama penulis mengerjakan skripsi ini dengan segala upaya yang sangat penulis hargai.

Depok, Desember 2007

Agus Hotlan Napitu

Agus Hotlan Napitu  
NPM 04 03 03 008 X  
Departemen Teknik Elektro

Dosen Pembimbing  
Ir. Agus R. Utomo, MT

**ANALISIS KOMPENSASI VAR  
SISTEM DISTRIBUSI TIGA FASA EMPAT KAWAT  
DENGAN METODE KOMPENSASI DUA FASA**

**ABSTRAK**

Pada umumnya kompensasi beban pada sistem jaringan tiga fasa, empat kawat dilakukan pada seluruh kawat fasanya. Metode kompensasi lain yang dikemukakan oleh Singh [1] adalah dengan cara mengkompensasi dua kawat fasa saja sedangkan satu kawat fasa lainnya dibiarkan tanpa dikompensasi, dengan tujuan utama untuk menghilangkan arus netral. Akan tetapi metode ini tidak menargetkan faktor daya sesudah kompensasi.

Setelah kompensasi, arus netral tetap mengalir namun nilainya sangat kecil,  $I_n = 0,026 \% \leq 20 \%$ . Sedangkan kenaikan faktor dayanya kecil, dari 0,76 tertinggal menjadi 0,81 tertinggal.

Kompensasi yang optimum adalah kompensasi pada kawat - kawat fasa yang nilai arus fasanya menyimpang jauh dari nilai beban rata – rata. Namun demikian metode kompensasi ini tidak dapat digunakan untuk meningkatkan faktor daya sesuai dengan keinginan/target.

**Kata Kunci: Arus netral, Tiga fasa empat kawat, Kompensasi**

Agus Hotlan Napitu  
NPM 04 03 03 008 X  
Electrical Departemen Engineering

Counsellor  
Ir. Agus R. Utomo, MT

**VAR COMPENSATION ANALYSIS  
IN THREE-PHASE FOUR-WIRE DISTRIBUTION SYSTEM  
WITH TWO PHASE COMPENSATION METHOD**

**ABSTRACT**

Usually, load compensation in three-phase four-wire system is done on all of the phase wire. Another compensation method announced by Singh [1] is just by compensating the two wire, while the other phase wire is left without compensation., whose the main goal is to eliminate the neutral current. However, this method does not target the power factor after compensation.

After compensation, the neutral current is still flowing, but it's value is very small,  $I_n = 0.026 \% \leq 20 \%$ . But, the power factor increment is small, from 0.76 lagging to 0.81 lagging.

The optimum compensation is phase wires compensation whose the phase current value deviates far from the average current load's value. However this compensation method can not be used to increase the power factor according to the target.

**Keywords: Neutral Current, Three-phase four-wire, Compensation**

## DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI.....	iii
PENGESAHAN .....	iv
UCAPAN TERIMAKASIH.....	v
ABSTRAK .....	vi
ABSTRACT .....	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR.....	x
DAFTAR TABEL .....	xi
DAFTAR LAMPIRAN.....	xii
BAB I.....	1
PENDAHULUAN .....	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Batasan Masalah .....	2
1.3. Tujuan Penulisan.....	2
1.4. Sistematika Penulisan.....	2
BAB II.....	3
SISTEM TEGANGAN DAN ARUS SINUSOID TIGA FASA.....	3
2.1. Konsep Dasar Sistem Tiga Fasa .....	3
2.2. Komponen Beban Sistem Tiga Fasa .....	4
2.3. Koneksi Sistem Tiga Fasa .....	8
2.3.1 Hubungan bintang (Y).....	8
2.3.2. Hubungan Delta .....	11
2.4. Daya dan Faktor Daya Sistem Tiga Fasa .....	11
2.4.1 Daya Aktif, Daya Reaktif dan Daya Kompleks.....	11
2.4.2 Faktor Daya.....	13
2.5. Kompensasi Faktor Daya .....	14
2. 5. 1 Jenis – Jenis Kompensasi Daya Reaktif .....	14

2. 5. 1. 1. Reaktor Shunt .....	15
2. 5. 1. 2. Kapasitor Shunt .....	16
2. 5. 1. 3. Kapasitor Seri .....	16
2. 5. 1. 4. Kondenser Sinkron .....	17
2. 5. 1. 5. Kompensator VAR statis .....	17
BAB III .....	19
METODE ELIMINASI ARUS NETRAL .....	19
3.1. Ketidakseimbangan Sistem Tiga Fasa Empat Kawat .....	19
3.2. Komponen Simetris.....	20
3.3. Metode Kompensasi Dua Fasa .....	24
3.3.1 Kombinasi Pertama .....	24
3.3 Kombinasi Kedua.....	26
3.4 Kombinasi Ketiga.....	29
BAB IV .....	32
ANALISIS ELIMINASI ARUS NETRAL DENGAN METODE KOMPENSASI DUA FASA .....	32
4.1. Analisis Metode .....	32
4.2. Analisis Hasil Perhitungan .....	32
4.2.1. Kombinasi Pertama (yang dikompensasi fasa b dan c).....	33
4.2.2. Kombinasi Kedua (yang dikompensasi fasa a dan b).....	35
4.2.3. Kombinasi Ketiga (yang dikompensasi fasa a dan c).....	37
BAB V .....	41
KESIMPULAN .....	41
DAFTAR ACUAN.....	42
DAFTAR PUSTAKA.....	43
LAMPIRAN.....	44

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Bentuk gelombang pada sistem tiga fasa.....	4
Gambar 2.2 Vektor Elemen Impedansi.....	6
Gambar 2.3 Vektor Impedansi Beban .....	7
Gambar 2.4 Sistem Hubung Bintang .....	9
Gambar 2.5 Diagram Fasor Sistem Tiga Fasa.....	9
Gambar 2. 6 Diagram fasor antara tegangan fasa dan tegangan saluran .....	10
Gambar 2.7 Sistem Hubung Delta.....	11
Gambar 2.9 Segitiga Daya .....	12
Gambar 2.10 Diagram Faktor Daya .....	14
Gambar 2.11 Transmisi Tegangan Ekstra Tinggi terhubung ke sistem yang lemah .....	15
Gambar 2.12 Reaktor shunt yang terpasang pada Tranmisi Tegangan Ekstra Tinggi.....	16
Gambar 3.1 Sistem tiga fasa, empat kawat .....	19
Gambar 3.2 Komponen Tegangan dari sistem tidak seimbang.....	21
Gambar 3.3 Tegangan sistem sebagai penjumlahan dari komponen simetris .....	21
Gambar 3.4 Kompensasi arus netral pada fasa b dan c .....	24
Gambar 3.5 Diagram Fasor untuk kombinasi pertama.....	25
Gambar 3.6 Kompensasi arus netral pada fasa a dan b .....	27
Gambar 3.7 Diagram Fasor untuk kombinasi kedua .....	28
Gambar 3.8 Kompensasi arus netral pada fasa a dan c.....	29
Gambar 3.9 Diagram Fasor untuk kombinasi ketiga.....	30
Gambar 4.1 Bentuk Gelombang Arus sebelum Dikompensasi.....	33
Gambar 4.2 Bentuk Gelombang Arus Dengan Kombinasi Pertama .....	34
Gambar 4.3 Bentuk Gelombang Arus Dengan Kombinasi Kedua.....	36
Gambar 4.4 Bentuk Gelombang Arus Dengan Kombinasi Ketiga.....	38

## DAFTAR TABEL

Tabel IV.1. Hasil Perhitungan kompensasi dengan kombinasi pertama .....	34
Tabel IV.2. Hasil Perhitungan kompensasi dengan kombinasi kedua.....	35
Tabel IV.3. Hasil Perhitungan kompensasi dengan kombinasi ketiga .....	37
Tabel IV.4. Hasil Perhitungan kompensasi beban 2.....	39
Tabel IV.5. Hasil Perhitungan kompensasi beban 3.....	40
Tabel V.1. Kompensasi optimum.....	41

## DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN 1 .....	45
------------------	----



# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1. Latar Belakang**

Umumnya sistem tenaga listrik dibangun dengan sistem tiga fasa. Hal tersebut didasarkan pada alasan-alasan ekonomi dan kestabilan aliran daya pada beban. Alasan ekonomi dikarenakan dengan sistem tiga fasa, penggunaan penghantar untuk transmisi menjadi lebih sedikit. Sedangkan alasan kestabilan dikarenakan pada sistem tiga fasa daya mengalir sebagai layaknya tiga buah sistem fasa tunggal, sehingga untuk peralatan dengan catu tiga fasa, daya sistem akan lebih stabil bila dibandingkan dengan peralatan dengan sistem satu fasa

Secara ideal, pada sistem tiga fasa, empat kawat yang seimbang tidak akan mengalir arus netral. Akan tetapi pada kenyataannya keseimbangan total sulit dicapai, sehingga arus netral tetap akan mengalir. Arus netral yang diizinkan pada sistem yang baik tidak melebihi 20 % dari arus normal yang mengalir pada fasanya [1].

Jika pada sistem tiga fasa, empat kawat mengalir arus netral yang melebihi 20 % dari arus normal, maka arus netral tersebut harus segera dihilangkan/dikurangi. Untuk itu, Singh [1] mengemukakan metode menghilangkan arus netral dengan cara kompensasi pada dua kawat fasa sedangkan satu kawat fasa lainnya dibiarkan tanpa dikompensasi.

Namun demikian, metode penghilangan arus netral ini tidak memperhatikan faktor daya sistem sehingga memungkinkan faktor daya sistem setelah dikompensasi bernilai rendah. Oleh karena itu, perlu ditinjau besaran faktor daya setelah kompensasi sehingga dapat dilihat kompensasi yang optimum dari kombinasi fasa yang ada.

## **1.2. Batasan Masalah**

Batasan masalah dalam skripsi ini adalah :

- Beban tiga fasa empat kawat.
- Kompensasi hanya pada dua fasa.
- Tegangan sumber diasumsikan seimbang.
- Analisis hanya secara teknis, tidak mengamati secara ekonomis.
- Analisis menggunakan beban industri yaitu pada salah satu industri semen di Jawa Tengah.
- Kompensasi yang optimum berdasarkan faktor daya yang paling baik.

## **1.3. Tujuan Penulisan**

Tujuan penulisan skripsi ini adalah :

- Menerapkan metode kompensasi dua fasa pada beban tiga fasa empat kawat.
- Menganalisis eliminasi arus netral
- Menganalisis besaran - besaran faktor daya yang terjadi akibat kompensasi
- Menganalisis/memperoleh kompensasi yang optimum.

## **1.4. Sistematika Penulisan**

Sistematika penulisan skripsi ini terdiri dari 5 bab. Bab I berisi pendahuluan yang menjelaskan tentang latar belakang penulisan, tujuan penulisan, batasan masalah, serta sistematika penulisan. Bab II menjelaskan dasar teori mengenai sistem tegangan dan arus sinusoid tiga fasa secara umum. Bab III menjelaskan mengenai metode eliminasi arus netral . Pada bab IV akan dijelaskan hasil komputasi dan analisis dan bab V berisi kesimpulan.

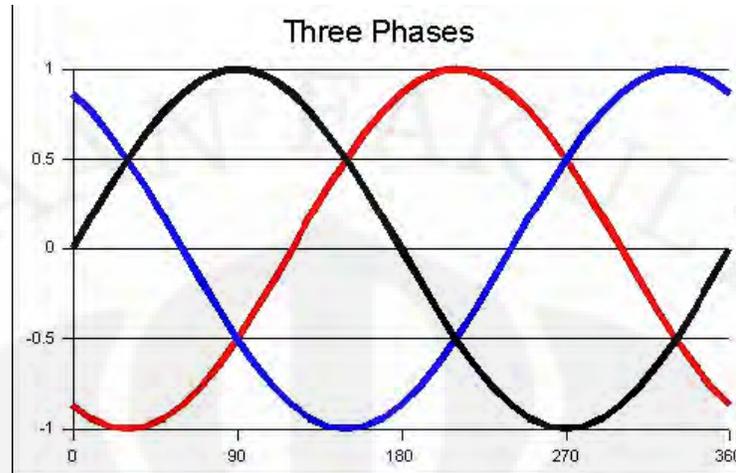
## **BAB II**

# **SISTEM TEGANGAN DAN ARUS SINUSOID TIGA FASA**

### **2.1. Konsep Dasar Sistem Tiga Fasa**

Umumnya sistem tenaga listrik dibangun dengan sistem tiga fasa. Hal tersebut didasarkan pada alasan-alasan ekonomi dan kestabilan aliran daya pada beban. Alasan ekonomi dikarenakan dengan sistem tiga fasa, penggunaan penghantar untuk transmisi menjadi lebih sedikit. Sedangkan alasan kestabilan dikarenakan pada sistem tiga fasa daya mengalir sebagai layaknya tiga buah sistem fasa tunggal, sehingga untuk peralatan dengan catu tiga fasa, daya sistem akan lebih stabil bila dibandingkan dengan peralatan dengan sistem satu fasa. Sistem tiga fasa atau sistem fasa banyak lainnya, secara umum akan memunculkan sistem yang lebih kompleks, akan tetapi secara prinsip untuk analisa sistem tetap mudah dilaksanakan.

Pembangkitan gaya gerak listrik (ggl) tiga fasa adalah dengan pemberian energi pada sistem oleh tiga ggl bolak-balik dengan frekuensi yang sama namun berbeda fasa  $120^\circ$ . Tiga ggl gelombang sinus ini ditunjukkan dalam gambar 2.1



Gambar 2.1 Bentuk gelombang pada sistem tiga fasa [2]

Ketiga ggl ini dibangkitkan dalam tiga pasang kumparan jangkar yang terpisah dalam generator arus bolak-balik. Tiga pasang kumparan ini dipasang terpisah  $120^\circ$  pada jangkar generator. Ujung-ujung kumparan semuanya dikeluarkan dari generator untuk membentuk tiga rangkaian fasa tunggal yang terpisah. Tetapi kumparan-kumparan biasanya saling dihubungkan baik di dalam maupun di luar guna membentuk sistem tiga fasa, tiga kawat atau sistem tiga fasa, empat kawat.

## 2.2 Komponen Beban Sistem Tiga Fasa

Beban pada sistem tenaga listrik terdiri dari beberapa komponen elemen pasif, yaitu tahanan, induktor, dan kapasitor. Adapun yang dimaksud dengan impedansi beban adalah komponen penyusun beban yang dapat terdiri dari satu elemen pasif atau beberapa elemen pasif. Berdasarkan sifat penyusun komponen impedansi beban, maka komponen – komponen tersebut dapat dikategorikan menjadi [3] :

- a. Resistif : - Tahanan ( $R$ ), satuan Ohm
- b. Reaktif : - Induktor ( $L$ ), satuan Henry  
- Kapasitor ( $C$ ), satuan Farad

Kedua komponen reaktif tersebut dapat dinyatakan dalam satuan Ohm.

Hal tersebut dirumuskan pada persamaan berikut ini [2] :

$$\text{Impedansi Induktor } Z_L = j\omega L = j2\pi fL \text{ Ohm} \quad (2.1)$$

$$\text{Impedansi Kapasitor } Z_C = \frac{1}{j\omega C} = \frac{1}{j2\pi fC} \text{ Ohm} \quad (2.2)$$

Keterangan :

$Z_L$  : Impedansi Induktor

$Z_C$  : Impedansi Kapasitor

$j$  : Satuan imajiner

$\omega$  : Kecepatan angular

$f$  : Frekuensi sistem

$L$  : Nilai induktor dalam Henry

$C$  : Nilai Kapasitor dalam Farad

Adapun nilai dari operator  $j$  [3] :

$$j = \sqrt{-1} ; j^2 = -1$$

Karena itu :

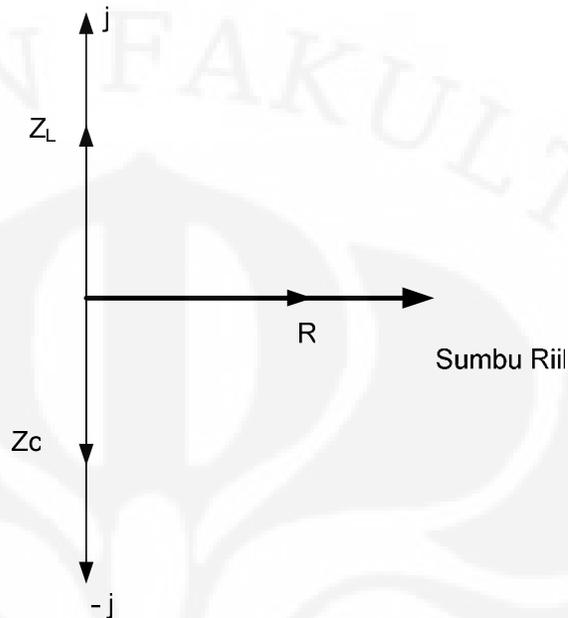
$$\frac{1}{j} = \frac{1}{j} \times \frac{j}{j} = \frac{j}{-1} = -j$$

Maka persamaan (2.2) dapat dinyatakan dengan persamaan berikut ini [3] :

$$Z_C = \frac{-j}{2\pi fC} \text{ Ohm} \quad (2.3)$$

Mengacu pada persamaan (2.1) dan persamaan (2.3), besarnya impedansi induktor dan impedansi kapasitor dipengaruhi oleh frekuensi sistem tenaga listrik. Dengan asumsi frekuensi sistem tenaga listrik tetap, ketiga macam impedansi tersebut dapat digambarkan secara vektoris dalam bentuk diagram Argand [4] atau bilangan kompleks sebagai berikut :

Sumbu Imajiner



Gambar 2.2 Vektor Elemen Impedansi

Keterangan:

- Tahanan R, terletak pada sumbu Riil
- Impedansi  $Z_L$ , terletak pada sumbu imajiner  $j$
- Impedansi  $Z_C$ , terletak pada sumbu imajiner  $-j$
- Kedua impedansi imajiner berbeda fasa sebesar  $90^\circ$  dengan sumbu riil

Impedansi beban, secara vektoris dinyatakan dalam jumlah vektor R dan  $Z_L$  dan  $Z_C$ , yaitu [3] :

$$Z = R + j\omega L - \frac{j}{\omega C} \quad (2.4)$$
$$Z = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)$$

Adapun yang dimaksud dengan reaktansi induktif dan reaktansi kapasitif adalah besar dari impedansi induktif dan impedansi kapasitif, dinyatakan dengan simbol  $X_L$ ,  $X_C$ . Maka persamaan (2.4) dapat dirumuskan menjadi [2] :

$$Z = R + j(X_L - X_C) \quad (2.5)$$

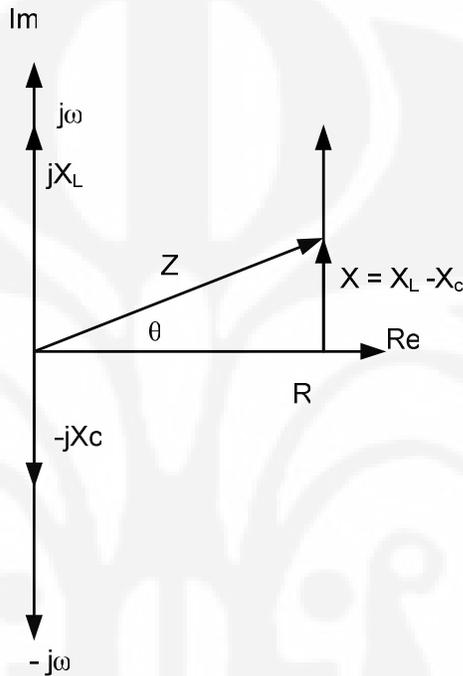
Untuk lebih memudahkan, maka :

$$X = X_L - X_C$$

Sehingga persamaan (2.5) menjadi :

$$Z = R + jX \quad (2.6)$$

Persamaan (2.6), secara vektoris dapat digambarkan pada diagram berikut ini [3] :



Gambar 2.3 Vektor Impedansi Beban

Keterangan:

- $Z$  : Impedansi beban
- $R$  : Tahanan dalam Ohm
- $X_L$  : Reaktansi induktif dalam Ohm
- $X_C$  : Reaktansi kapasitif dalam Ohm
- $\theta$  : Sudut antara tahanan dan impedansi beban

Secara vektoris, vektor  $R$ ,  $Z$ , dan  $X$  membentuk segitiga siku-siku, maka berdasarkan dalil Pythagoras, besar impedansi beban dapat dirumuskan :

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (2.7)$$

Berdasarkan komponen penyusun impedansi beban, terdapat tiga sifat impedansi beban, yaitu [3] :

- a. Jika  $X$  bernilai positif, artinya  $X_L > X_C$ , maka impedansi beban bersifat induktif
- b. Jika  $X$  bernilai negatif, artinya  $X_L < X_C$ , maka impedansi beban bersifat kapasitif
- c. Jika  $X$  bernilai nol, artinya  $X_L = X_C$ , maka impedansi beban bersifat resistif

Kondisi ini bisa berlaku ketika resistansi, induktansi, dan kapasitansi terdapat dalam rangkaian. Kebalikan dari impedansi disebut admitansi dan dinotasikan sebagai berikut [4]:

$$Y = \frac{1}{Z}$$

Admitansi sejalan dengan konduktansi (kebalikan resistansi) pada rangkaian resistif. Dengan demikian, karena impedansi  $Z$  adalah bilangan kompleks, sehingga begitu juga admitansi  $Y$  yang dinotasikan sebagai berikut:

$$Y = G + jB$$

Keterangan:

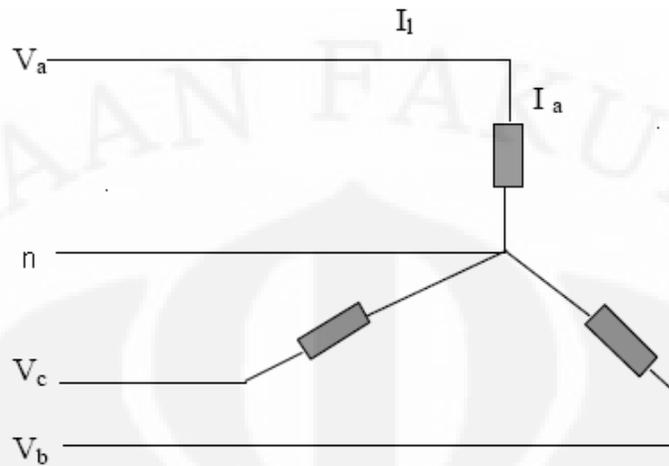
- $Y$  : Admitansi beban
- $G$  : Konduktansi ,  $G = \text{Re}(Y)$
- $B$  : Susceptansi,  $B = \text{Im}(Y)$

### 2.3. Koneksi Sistem Tiga Fasa

Ada dua cara hubungan sistem tiga fasa, yaitu hubungan bintang (Y) dan hubungan delta.

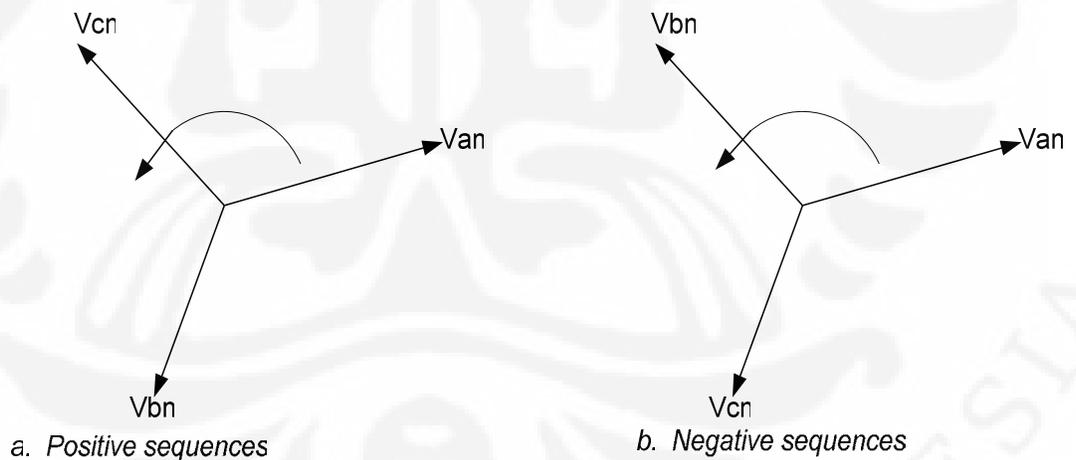
#### 2.3.1 Hubungan bintang (Y)

Sistem Y merupakan sistem sambungan pada sistem tiga fasa yang menggunakan empat kawat, yaitu fasa A, B, C dan N. Sistem sambungan tersebut akan menyerupai huruf Y, yang memiliki empat titik sambungan yaitu pada ujung-ujung huruf dan pada titik pertemuan antara tiga garis pembentuk huruf. Sistem hubungan atau sambungan Y, sering juga disebut sebagai hubungan bintang . Sistem Y dapat digambarkan dengan skema berikut :



Gambar 2.4 Sistem Hubung Bintang [5]

Tiap fasa dalam sistem tiga fasa ini biasanya disebut fasa A, B dan C. Fasa-fasa ini mempunyai besaran yang sama namun terpisah sejauh  $120^\circ$  satu sama lain. Ada dua kemungkinan urutan fasa dalam sistem tiga fasa ini yaitu urutan positif atau urutan negatif seperti terlihat pada diagram fasor berikut ini :



Gambar 2.5 Diagram Fasor Sistem Tiga Fasa [4]

Dalam keadaan seimbang, untuk sumber dan beban yang terhubung bintang atau Y, hubungan antara besaran listriknya adalah sebagai berikut [6] :

$$|V_{AN}| = |V_{BN}| = |V_{CN}| = |V_p| \quad (2.8)$$

$$V_{AN} + V_{BN} + V_{CN} \quad (2.9)$$

$$V_l = \sqrt{3} V_p \quad (2.10)$$

$$I_p = I_l \quad (2.11)$$

$$Z_p = V_p / I_p = V_l / \sqrt{3} I_l \quad (2.12)$$

$$I_n = I_a + I_b + I_c = 0 \quad (2.13)$$

$$V_{an} = V_p \angle 0^\circ$$

$$V_{bn} = V_p \angle 240^\circ \quad (2.14)$$

$$V_{cn} = V_p \angle 120^\circ$$

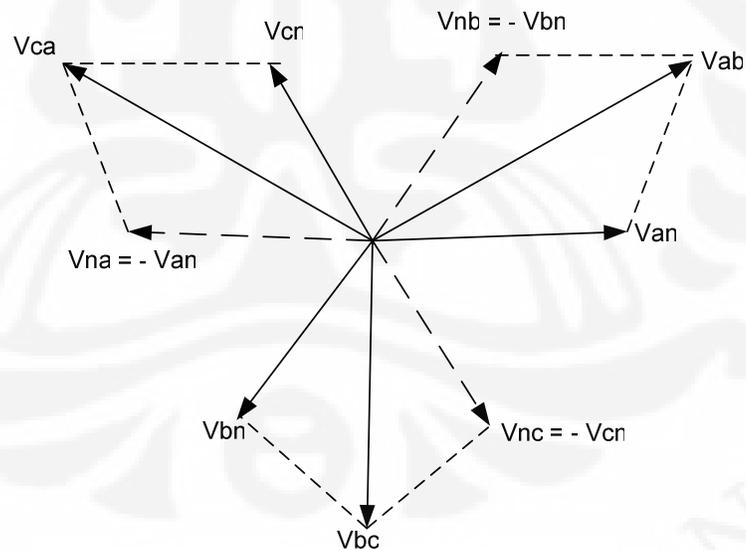
atau

$$V_{an} = V_p \angle 0^\circ$$

$$V_{bn} = V_p \angle 120^\circ \quad (2.15)$$

$$V_{cn} = V_p \angle 240^\circ$$

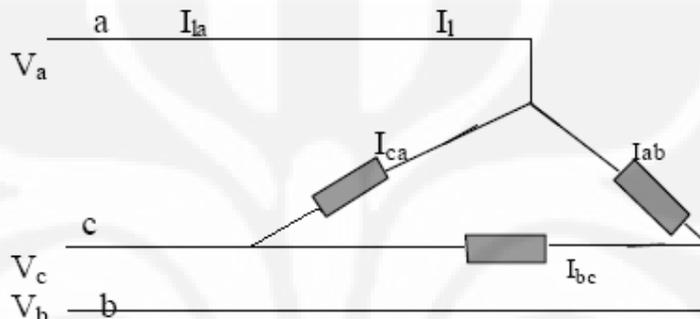
Hal ini juga dapat dilihat pada diagram fasor antara tegangan fasa dan tegangan saluran berikut ini :



Gambar 2. 6 Diagram fasor antara tegangan fasa dan tegangan saluran [7]

### 2.3.2. Hubungan Delta

Pada sistem delta, bila tiga buah beban dengan impedansi yang sama disambungkan pada sumber tiga fasa, maka arus di dalam ketiga impedansi akan sama besar tetapi terpisah dengan sudut sebesar  $120^\circ$ , dan dikenal dengan arus fasa atau arus beban.



Gambar 2.7 Sistem Hubung Delta [5]

Untuk keadaan yang demikian, maka dalam rangkaian akan berlaku [6]:

$$\begin{aligned} V_p &= V_l \\ I_l &= \sqrt{3}I_p \\ Z_p &= V_p / I_p = \sqrt{3}V_l / I_l \end{aligned} \quad (2.16)$$

### 2.4. Daya dan Faktor Daya Sistem Tiga Fasa

Total daya yang diserap oleh beban tiga fasa dapat diperoleh dengan menjumlahkan daya pada ketiga fasanya. Pada suatu rangkaian yang seimbang, ini sama saja dengan tiga kali daya pada satu fasa, karena daya setiap fasa adalah sama.

#### 2.4.1 Daya Aktif, Daya Reaktif dan Daya Kompleks

Pada sistem arus bolak-balik dikenal istilah daya aktif, daya reaktif dan daya kompleks. Daya aktif adalah daya yang digunakan untuk menghasilkan energi (panas, putaran, dan sebagainya), sedangkan daya reaktif adalah daya yang

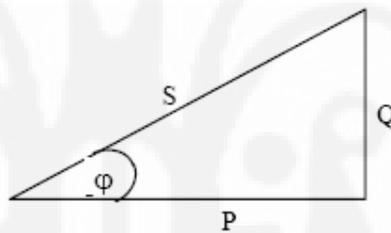
digunakan untuk menghasilkan fluks, yang memungkinkan terjadinya transfer energi seperti yang terjadi pada trafo dan motor-motor induksi.

Daya reaktif mempunyai fasa yang berbeda  $\pm 90^0$  terhadap daya aktif, dimana jika fasanya mendahului, disebut daya kapasitif dan sebaliknya jika fasanya tertinggal disebut daya induktif. Jadi daya induktif fasanya berlawanan (berbeda  $180^0$ ) terhadap daya kapasitif.

Daya kompleks merupakan penjumlahan vektor dari daya aktif dan daya reaktif. Dengan demikian, jika beban bersifat induktif, maka daya kompleks akan lebih besar daripada daya aktif. Secara matematis hubungan antara daya aktif, daya reaktif dan daya kompleks adalah :

$$S = P + jQ \quad (2.17)$$

Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar segitiga daya berikut ini :



Gambar 2.9 Segitiga Daya [8]

dengan :

S = Daya Kompleks

P = Daya aktif

Q = Daya reaktif

Jadi daya aktif adalah daya yang betul-betul nyata/ada yang besarnya sepenuhnya dapat dimanfaatkan yang diperoleh karena sudah melalui tahapan murni resistansi  $R_L$ .

$$P = V.I \cos \theta \text{ Watt} \quad (2.18)$$

Sedangkan daya yang diperoleh dari harga/besaran reaktansi disebut daya reaktif dengan notasi Q.

$$Q = V.I \sin \theta \text{ Var} \quad (2.19)$$

Sehingga penggabungan antara daya nyata dengan daya reaktif akan menjadi daya kompleks.

$$S = V.I \text{ Volt-Ampere} \quad (2.20)$$

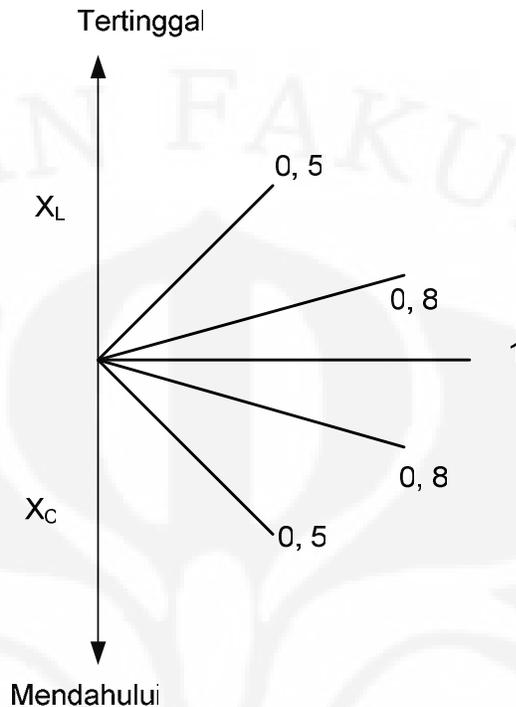
#### 2.4.2 Faktor Daya

Faktor daya yang biasa disebut dengan pf adalah istilah yang digunakan untuk menyatakan perbandingan antara daya aktif (P) dengan daya kompleks (S) pada sistem arus bolak-balik [9]. Dari gambar 2.9 diatas maka dapat dilihat bahwa :

$$\begin{aligned} \text{faktor daya (pf)} &= \frac{\text{DayaAktif}}{\text{DayaKompleks}} = \frac{P}{S} \\ &= \cos \theta \end{aligned} \quad (2.21)$$

Faktor daya selalu lebih kecil dari satu dan tidak mempunyai satuan. Jika seluruh beban daya yang dipasang oleh perusahaan listrik memiliki faktor daya mendekati satu, daya maksimum yang ditransfer hampir sama dengan kapasitas sistem pendistribusian. Sedangkan, dengan beban yang terinduksi dan jika faktor daya berkisar dari 0,2 hingga 0,3, kapasitas jaringan distribusi listrik menjadi sangat buruk. Jadi, suatu instalasi listrik akan semakin optimum, baik dari segi teknis maupun ekonomis jika faktor dayanya mendekati 1 (satu).

Untuk membedakan faktor daya ( $\cos \theta$ ) pada beban Z yang bersifat induktif atau kapasitif dipergunakan pengertian *lagging power factor* (faktor daya tertinggal) atau *leading power factor* (faktor daya mendahului) berdasarkan fasor arus yang terbelakang atau mendahului fasor tegangan. Untuk impedansi yang bersifat induktif, fasor arus terbelakang dari fasor tegangan maka dikatakan mempunyai faktor daya tertinggal, sedangkan untuk impedansi yang bersifat kapasitif, fasor arus mendahului fasor tegangan, maka dikatakan mempunyai faktor daya mendahului.



Gambar 2.10 Diagram Faktor Daya

## 2.5. Kompensasi Faktor Daya

Faktor daya yang rendah dihasilkan oleh peralatan seperti motor induksi, terutama pada beban -beban rendah dan unti-unit ballast lampu. Alat-alat las busur listrik juga mempunyai faktor daya yang rendah. Medan magnet dari peralatan-peralatan seperti ini memerlukan arus yang tidak melakukan kerja yang bermanfaat dan tidak mengakibatkan panas atau daya mekanis, tetapi hanya digunakan untuk membangkitkan medan. Faktor daya yang rendah menyebabkan tegangan dan arus tidak sefasa sehingga perkaliannya tidak menghasilkan daya dalam Watt tetapi dalam Volt-Ampere. Faktor daya yang rendah dapat diperbaiki dengan mengkompensasi daya reaktifnya.

### 2.5.1 Jenis – Jenis Kompensasi Daya Reaktif

Dalam sistem tenaga listrik, salah satu masalah yang terjadi adalah kebutuhan daya reaktif yang bervariasi akibat beban yang ada dalam sistem tersebut. Pada keadaan tertentu sistem membutuhkan penambahan daya reaktif atau penyerapan daya reaktif.

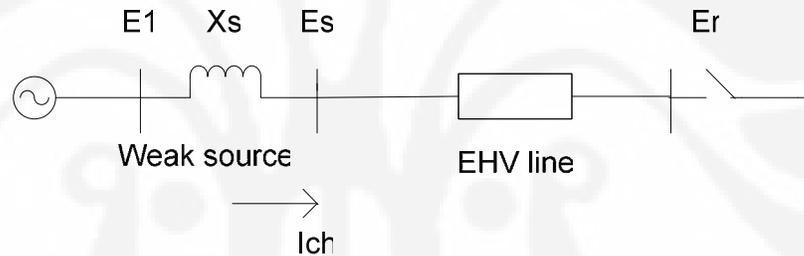
Masalah tersebut dapat diatasi dengan menggunakan berbagai jenis kompensasi daya reaktif sesuai dengan kebutuhan sistem tersebut.

#### 2. 5. 1. 1. Reaktor Shunt [10]

Reaktor shunt digunakan untuk mengkompensasi efek dari *line capacitance*, khususnya untuk membatasi kenaikan tegangan pada rangkaian yang terbuka atau pada kondisi beban yang ringan.

Reaktor shunt biasanya dibutuhkan pada saluran tranmisi tegangan extra tinggi yang lebih panjang dari 200 km. Saluran tranmisi yang lebih pendek juga membutuhkan reaktor shunt jika salurannya disuplai dari sistem yang lemah ( sistem dengan kapasitas daya kecil ).

Ketika saluran pada jarak tertentu terbuka, maka arus kapasitif mengalir melalui  $X_s$  akan menyebabkan kenaikan tegangan pada di sisi pengirim  $E_s$ .



Gambar 2.11 Transmisi Tegangan Ekstra Tinggi terhubung ke sistem yang lemah

Pada penerapannya reaktor shunt, ada yang menggunakan *circuit breaker* agar dapat dilakukan proses *switching*, yaitu ketika sistem ternyata dalam kondisi beban puncak maka reaktor shunt dapat dilepas dari sistem. Sistem tranmisi yang yang pendek tapi disuplai dari sistem yang kuat, kemungkinan tidak perlu menggunakan reaktor shunt yang terkoneksi secara permanen. Dalam kasus tertentu, reaktor shunt yang digunakan menggunakan *circuit breaker* agar dapat melakukan proses *switching*. Berikut ini adalah contoh penggunaan reaktor shunt yang dipasang pada jaring saluran tranmisi tegangan ekstra tinggi.



XR2 – reaktor shunt yang terkoneksi permanen

XR1, XR3 – reaktor shunt yang memiliki switching

Gambar 2.12 Reaktor shunt yang terpasang pada Tranmisi Tegangan Ekstra Tinggi

#### 2. 5. 1. 2. Kapasitor Shunt [10]

Kapasitor shunt digunakan untuk menyuplai daya reaktif meningkatkan tegangan pada suatu daerah lokal. Kapasitor shunt ini digunakan pada banyak bagian sistem dan dengan berbagai jenis ukurannya.

Pada sistem distribusi kapasitor shunt banyak digunakan sebagai pengkoreksi faktor daya dan pengatur tegangan pada *feeder*. Tujuan dari pengkoreksian faktor daya di sana adalah untuk menyediakan daya reaktif dekat pada daerah dimana daya reaktif itu dibutuhkan.

Pada saluran tranmisi, kapasitor shunt digunakan untuk mengkompensasi rugi – rugi  $XI^2$  pada sistem tranmisi dan untk memastikan stabilnya tegangan pada kondisi beban puncak.

#### 2. 5. 1. 3. Kapasitor Seri [10]

Kapasitor yang dikoneksikan secara seri pada saluran tranmisi adalah untuk menkompensasi reaktansi induktif pada saluran. Hal ini mengurangi reaktansi transfer diantara jaring saluran tersebut, sehingga akan meningkatkan daya maksimum yang dapat ditranmisikan dan juga mengurangi rugi – rugi daya reaktif efektif ( $XI^2$ ).

Meskipun kapasitor seri dipasang biasanya bukan sebagai pengatur tegangan, kapasitor seri memiliki kontribusi terhadap peningkatan pengaturan tegangan dan keseimbangan daya reaktif pada sistem tenaga listrik.

#### 2. 5. 1. 4. Kondenser Sinkron [10]

Kondenser Sinkron merupakan mesin sinkron yang dapat diatur tegangan eksistasinya. Tegangan eksitasi dari kondenser sinkron tersebut dapat dibuat untuk menghasilkan atau pun menyerap daya reaktif dari sistem. Dengan menggunakan *voltage regulator*, kondenser sinkron dapat mengatur secara otomatis keluaran daya reaktifnya untuk menjaga tegangan terminal yang konstan.

Kondenser sinkron telah digunakan sejak tahun 1930 untuk pengaturan tegangan dan daya reaktif pada level sistem tranmisi dan sub-tranmisi. Kondenser sinkron biasanya dikoneksikan ke gulungan tertier dari transformator. Kondenser sinkron ini termasuk dalam kategori kompensator shunt yang aktif. Karena metode kompensasi daya reaktif ini mahal baik dari instalasi maupun perawatannya maka metode ini banyak digantikan oleh kompensator VAR statis pada masa sekarang.

#### 2. 5. 1. 5. Kompensator VAR statis [11]

Kompensator VAR statis adalah suatu komponen kompensasi daya reaktif yang terpasang paralel untuk menghasilkan atau menyerap daya reaktif. Kata "statis" untuk menunjukkan bahwa tidak seperti kondenser sinkron yang bergerak, kompensator VAR statis tidak memiliki komponen utama yang bergerak. Kompensator VAR statis dapat menghasilkan dan menyerap daya reaktif menggunakan komponen elektronika daya, pada umumnya yang digunakan adalah thyristor. Komponen elektronika daya ini, dengan pengendalian di dalamnya dapat menghasilkan keluaran daya reaktif sesuai dengan input yang diberikan. Dengan menggunakan pengaturan yang baik, keluaran daya reaktif dapat diatur secara kontinu dari maksimum kapasitif ke maksimum induktif.

Dengan tercapainya pengaturan daya reaktif dalam sistem, maka tegangan sistem juga dapat diatur. Sehingga kestabilan tegangan dalam hal ketersediaan daya reaktif juga dapat tercapai.

Tidak seperti metode kompensasi daya reaktif lainnya yang menggunakan cara - cara terpisah untuk menghasilkan atau pun menyerap daya reaktif, kompensator VAR statis dapat mencakup fungsi – fungsi tersebut sekaligus. Dalam kategori kompensasi daya reaktif yang aktif, kompensator VAR statis juga

lebih baik dibandingkan dengan kondenser sinkron karena biaya yang mahal pada instalasi dan perawatan kondenser sinkron dan juga karena respon waktu kompensator VAR statis yang lebih cepat dibandingkan kondenser sinkron. Karena alasan – alasan tersebut di atas maka kompensator VAR statis banyak digunakan pada masa sekarang ini.

## BAB III

### METODE ELIMINASI ARUS NETRAL

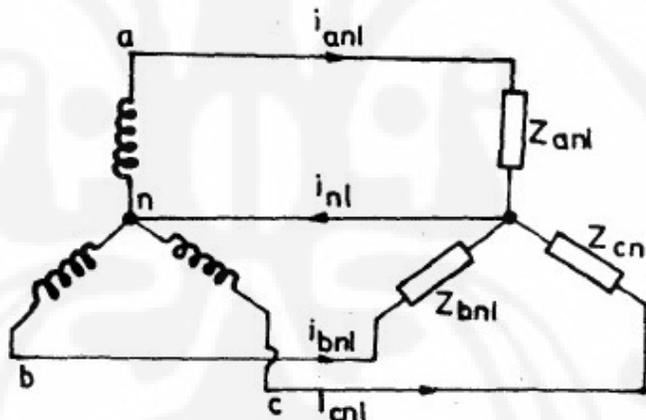
#### 3.1. Ketidakseimbangan Sistem Tiga Fasa Empat Kawat

Pada sistem tiga fasa, beban bisa terhubung secara bintang atau delta. Pada sistem terhubung delta tidak mempunyai arus netral sedangkan pada sistem terhubung bintang bisa mengalir arus netral.

Apabila seimbang maka jumlah arus yang mengalir pada semua fasa beban terhubung bintang sama dengan nol atau dalam bentuk matematis :

$$I_a + I_b + I_c = 0 \quad (3.1)$$

Akan tetapi, jika  $I_a + I_b + I_c$  tidak sama dengan nol maka akan ada arus netral yang mengalir.



Gambar 3.1 Sistem tiga fasa, empat kawat [1]

Pada sistem tiga fasa, empat kawat, masing-masing fasa akan mengalirkan arus yang tak seimbang menuju netral (pada sistem empat kawat). Pada sistem tiga fasa, empat kawat, akan berlaku :

$$\begin{aligned} I_a &= V_{an}/Z_a \\ I_b &= V_{bn}/Z_b \\ I_c &= V_{cn}/Z_c \end{aligned} \quad (3.2)$$

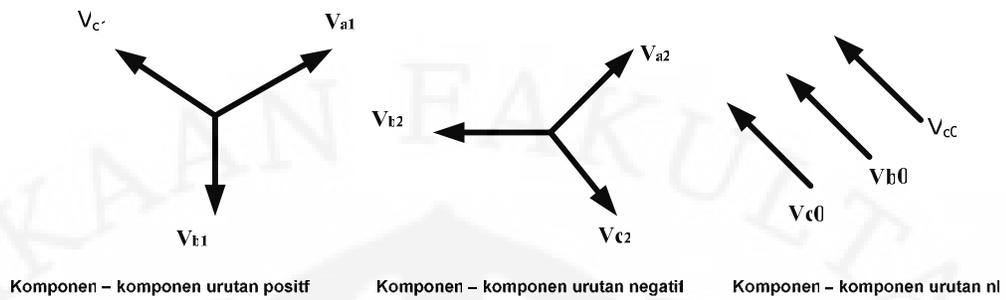
Pada beban tak seimbang terhubung bintang, akan mengalir arus netral pada kawat netralnya. Besarnya arus netral yang mengalir dapat dihitung dengan menggunakan metode komponen simetris.

### 3.2. Komponen Simetris [12]

Sistem tiga fasa yang tidak seimbang dapat diuraikan menjadi tiga buah komponen simetris, yaitu :

- Komponen urutan positif (*positive sequence*), yang terdiri dari tiga fasor yang sama besarnya, terpisah satu dengan yang lain dalam fasa sebesar  $120^0$ , dan mempunyai urutan fasa yang sama dengan fasor aslinya.
- Komponen urutan negative (*negative sequence*), yang terdiri dari tiga fasor yang sama besarnya, terpisah satu dengan yang lain dalam fasa sebesar  $120^0$ , dan mempunyai urutan fasa yang berlawanan dengan fasor aslinya
- Komponen urutan nol (*zero sequence*), yang terdiri dari tiga fasor yang sama besarnya dan dengan pergeseran fasa nol antara fasor yang satu dengan yang lain.

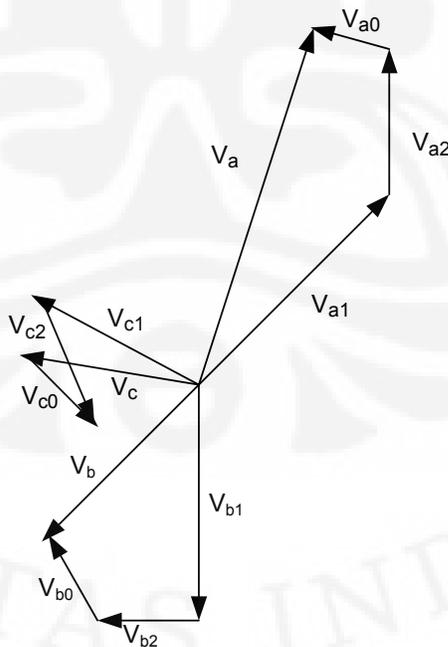
Notasi yang digunakan untuk komponen urutan tersebut biasanya diberikan subskrip 1, 2, dan 0 pada komponen arus dan tegangannya. Jadi, komponen urutan positif dari tegangan  $V_a$ ,  $V_b$ , dan  $V_c$  adalah  $V_{a1}$ ,  $V_{b1}$ , dan  $V_{c1}$ , komponen urutan negatifnya  $V_{a2}$ ,  $V_{b2}$ ,  $V_{c2}$ , dan komponen urutan nolnya  $V_{a0}$ ,  $V_{b0}$ , dan  $V_{c0}$ . Komponen simetris tegangan dapat dilihat seperti pada gambar (3.2) berikut :



Gambar 3.2 Komponen Tegangan dari sistem tidak seimbang

Persamaan tegangan sistemnya dapat dituliskan dalam penjumlahan masing-masing komponen simetrisnya, yaitu :

$$\begin{aligned}
 V_a &= V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \\
 V_b &= V_{b1} + V_{b2} + V_{b0} \\
 V_c &= V_{c1} + V_{c2} + V_{c0}
 \end{aligned}
 \tag{3.3}$$



Gambar 3.3 Tegangan sistem sebagai penjumlahan dari komponen simetris

Dari gambar 3.3 didapatkan hubungan antara komponen-komponen simetrisnya, yaitu :

$$\begin{aligned} V_{b1} &= a^2 V_{a1} & V_{c1} &= a V_{a1} \\ V_{b2} &= a V_{a2} & V_{c2} &= a^2 V_{a2} \\ V_{b0} &= V_{a0} & V_{c0} &= V_{a0} \end{aligned} \quad (3.4)$$

dengan :

$$\begin{aligned} a &= 1 \angle 120^\circ = -0.5 + j0.866 \\ a^2 &= 1 \angle 240^\circ = -0.5 - j0.866 \end{aligned}$$

Berdasarkan persamaan (3.4) diatas, maka persamaan (3.3) dapat diubah menjadi :

$$\begin{aligned} V_a &= V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \\ V_b &= a^2 V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \\ V_c &= a V_{a1} + a^2 V_{a2} + V_{a0} \end{aligned} \quad (3.5)$$

Atau dalam bentuk matriks, yaitu :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Dengan memisalkan :

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}$$

maka diperoleh invers matriks A:

$$A^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}$$

Sehingga dengan mengalikan kedua sisi persamaan (3.6) dengan invers matriks A ( $A^{-1}$ ) diperoleh :

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Dari persamaan diatas hubungan antara komponen-komponen simetrisnya dan tegangan sistemnya dapat dituliskan sebagai berikut :

$$V_{a0} = \frac{1}{3}(V_a + V_b + V_c) \quad (3.8)$$

$$V_{a0} = \frac{1}{3}(V_a + aV_b + a^2V_c) \quad (3.9)$$

$$V_{a0} = \frac{1}{3}(V_a + a^2V_b + aV_c) \quad (3.10)$$

Komponen urutan nol tidak terdapat dalam sistem tenaga listrik apabila jumlah tegangan sistem tersebut sama dengan nol atau sistemnya seimbang. Dengan kata lain, sistem tiga fasa yang tidak seimbang pada kawat netralnya dapat mengandung komponen urutan nol. Persamaan-persamaan tegangan tersebut berlaku juga pada persamaan arusnya, yang dirangkumkan sebagai berikut :

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} + I_{a0} \quad (3.11)$$

$$I_b = a^2I_{a1} + I_{a2} + I_{a0}$$

$$I_c = aI_{a1} + a^2I_{a2} + I_{a0}$$

$$I_{a0} = \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c) \quad (3.12)$$

$$I_{a0} = \frac{1}{3}(I_a + aI_b + a^2I_c) \quad (3.13)$$

$$I_{a0} = \frac{1}{3}(I_a + a^2I_b + aI_c) \quad (3.14)$$

Arus netral yang mengalir adalah jumlah arus yang mengalir pada tiap fasanya. Jadi, berdasarkan persamaan diatas, maka persamaan arus netralnya dapat dituliskan menjadi :

$$I_n = I_a + I_b + I_c = 3 I_{a0} \quad (3.15)$$

### 3.3. Metode Kompensasi Dua Fasa

Sistem terdiri dari suatu sumber tiga fasa seimbang yang menyuplai beban tidak seimbang dengan hubungan bintang (Y). Tegangan suplai yang digunakan adalah :  $V_{an} = |V| \angle 0^\circ$ ;  $V_{bn} = |V| \angle 120^\circ$ ;  $V_{cn} = |V| \angle 240^\circ$ .

Misalkan  $P_a, P_b, P_c$  adalah 3 beban dengan faktor daya tertinggal  $\cos \Phi_a, \cos \Phi_b, \cos \Phi_c$  berturut-turut disuplai dari sumber seimbang. Arus yang mengalir ke netral  $I_n$  adalah jumlah dari  $I_{anl}, I_{bnl},$  dan  $I_{cnl}$  (arus beban).  $I_n$  dapat dinetralkan dengan memberikan suatu arus  $I_{nc}$  yang besarnya sama dan fasanya berbeda  $180^\circ$  dari  $I_n$ .  $I_{nc}$  merupakan arus kompensasi netral dan  $\theta$  adalah sudut dari kompensasi arus netral ( $I_{nc}$ ).

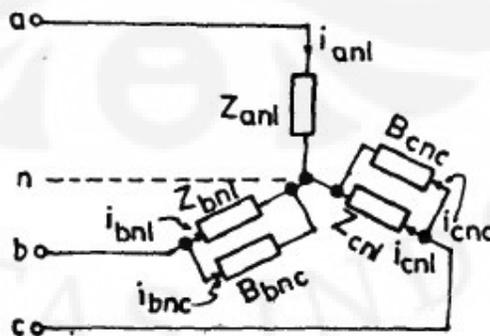
$$I_{nc} = |I_n| \angle \theta \quad (3.16)$$

Selanjutnya, arus netral ini akan dihilangkan dengan cara mengkompensasi dua fasa saja dari beban sedangkan satu fasa lainnya dibiarkan tanpa dikompensasi. Jadi, besarnya arus  $I_{nc}$  akan dikompensasi pada dua fasa saja.

Karena ada tiga kawat fasa sedangkan yang dikompensasi adalah dua kawat fasa saja, maka akan terdapat tiga kombinasi, yaitu dengan menempatkan kompensator pada fasa b dan c, fasa a dan b, serta fasa a dan c.

#### 3.3.1 Kombinasi Pertama

Kombinasi ini dilakukan dengan memberikan kompensator pada fasa b dan c, pada beban tiga fasa, empat kawat seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.4.



Gambar 3.4 Kompensasi arus netral pada fasa b dan c



Dengan menyamakan jumlah komponen  $I_{bnc}$  dan  $I_{cnc}$  dengan komponen  $I_{nc}$  berdasarkan gambar 3.5 akan diperoleh :

$$|I_{nc}| \cos (\theta) = |I_{bnc}| \cos (120^{\circ} + \beta) + |I_{cnc}| \cos (240^{\circ} + \gamma) \quad (3.17)$$

$$|I_{nc}| \sin (\theta) = |I_{bnc}| \sin (120^{\circ} + \beta) + |I_{cnc}| \sin (240^{\circ} + \gamma) \quad (3.18)$$

dengan  $|I_{cnc}| = |I_n|$

Dengan menyelesaikan persamaan diatas untuk  $|I_{bnc}|$  dan  $|I_{cnc}|$  :

$$|I_{bnc}| = |I_{nc}| \sin (240^{\circ} + \gamma - \theta) / \sin (120^{\circ} + \gamma - \beta) \quad (3.19)$$

$$|I_{cnc}| = |I_{nc}| \sin (120^{\circ} + \beta - \theta) / \sin (\beta - \gamma - 120^{\circ}) \quad (3.20)$$

$$I_{bnc} = |I_{bnc}| \angle (120^{\circ} + \beta) \quad (3.21)$$

$$Z_{bnc} = V / I_{bnc} \quad (3.22)$$

$$I_{cnc} = |I_{cnc}| \angle (240^{\circ} + \gamma) \quad (3.23)$$

$$Z_{cnc} = V / I_{cnc} \quad (3.24)$$

Sehingga besarnya suseptansi adalah :

$$B_{bnc} = |I_{bnc}| \sin (\beta) / |V| \quad (3.25)$$

$$B_{cnc} = |I_{cnc}| \sin (\gamma) / |V| \quad (3.26)$$

Dengan meletakkan suseptansi ini pada fasa b dan c, maka besarnya arus netral yang mengalir pada sistem tiga fasa empat kawat adalah nol :

$$I_{anl} + I_{bnl} + I_{cnl} + I_{bnc} + I_{cnc} \cong 0,0.$$

Dan, hambatan beban setelah dikompensasi akan sama dengan :

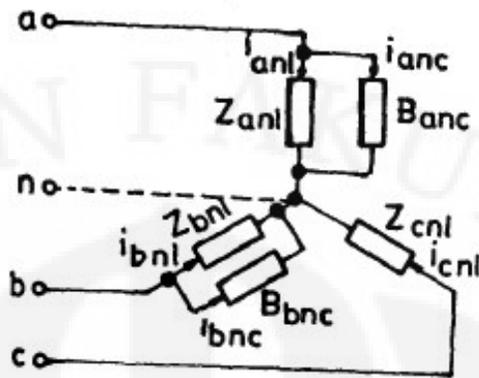
$$Z_{an} = Z_{anl} \quad (3.27)$$

$$Z_{bn} = Z_{bnl} Z_{bnc} / (Z_{bnl} + Z_{bnc}) \quad (3.28)$$

$$Z_{cn} = Z_{cnl} Z_{cnc} / (Z_{cnl} + Z_{cnc}) \quad (3.29)$$

### 3.3 Kombinasi Kedua

Kombinasi ini dilakukan dengan memberikan kompensator pada fasa a dan b, pada beban tiga fasa, empat kawat seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.6.



Gambar 3.6 Kompensasi arus netral pada fasa a dan b

Elemen reaktif yang dipilih untuk fasa b dan c ditentukan dengan sudut  $\alpha$  dan  $\beta$ . Sudut  $\alpha$  dan  $\beta$  merupakan sudut dari elemen kompensator  $Z_{anc}$  dan  $Z_{bnc}$ . Sama halnya dengan kombinasi pertama, dua impedansi ini berfungsi sebagai elemen reaktif (bersifat kapasitif atau induktif) sehingga sudut  $\alpha$  dan  $\beta$  akan  $\pm 90^\circ$ . Jika sudutnya  $-90^\circ$  maka elemen yang dipilih adalah suatu inductor sedangkan jika  $+90^\circ$  maka yang dipilih adalah kapasitor. Cara pemilihan kompensator ditentukan berdasarkan ketentuan berikut :

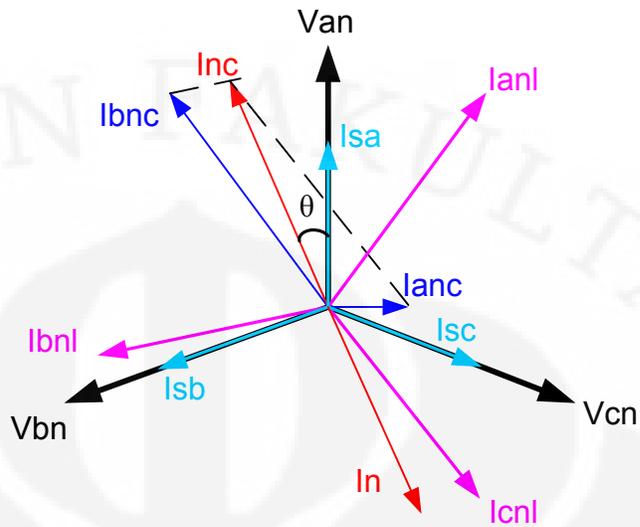
Untuk  $30^\circ < \theta < 90^\circ$  ;  $\alpha = +90^\circ$  ;  $\beta = -90^\circ$

Untuk  $90^\circ < \theta < 210^\circ$  ;  $\alpha = +90^\circ$  ;  $\beta = +90^\circ$

Untuk  $210^\circ < \theta < 270^\circ$  ;  $\alpha = -90^\circ$  ;  $\beta = +90^\circ$

Untuk  $270^\circ < \theta < 360^\circ$  dan  $0^\circ < \theta < 30^\circ$  ;  $\alpha = -90^\circ$  ;  $\beta = -90^\circ$

Besarnya arus netral yang dibagi pada kedua fasa a dan b sama dengan  $I_{anc}$  dan  $I_{bnc}$ . Dimana  $I_{anc}$  adalah arus yang mengalir pada reaktansi yang ditempatkan pada fasa a dan  $I_{bnc}$  adalah arus yang mengalir pada reaktansi yang ditempatkan pada fasa b. Penguraian  $I_{anc}$  dan  $I_{bnc}$  sepanjang fasa dan sumbu kuadratur dari tegangan fasa  $V_{an}$  dapat dilihat pada gambar berikut :



Gambar 3.7 Diagram Fasor untuk kombinasi kedua

Dengan menyamakan jumlah komponen  $I_{anc}$  dan  $I_{bnc}$  dengan komponen  $I_{nc}$  berdasarkan gambar 3.7 akan diperoleh :

$$|I_{nc}| \cos(\theta) = |I_{anc}| \cos(\alpha) + |I_{bnc}| \cos(120^\circ + \beta) \quad (3.30)$$

$$|I_{nc}| \sin(\theta) = |I_{anc}| \sin(\alpha) + |I_{bnc}| \sin(120^\circ + \beta) \quad (3.31)$$

dengan  $I_{cnc} = |I_n|$

Dengan menyelesaikan persamaan diatas untuk  $|I_{bnc}|$  dan  $|I_{cnc}|$  :

$$|I_{anc}| = |I_{nc}| \sin(120^\circ + \beta - \theta) / \sin(120^\circ + \beta - \alpha) \quad (3.32)$$

$$|I_{bnc}| = |I_{nc}| \sin(\alpha - \theta) / \sin(\alpha - \beta - 120^\circ) \quad (3.33)$$

$$I_{anc} = |I_{anc}| \angle(\alpha) \quad (3.34)$$

$$Z_{anc} = V / I_{anc} \quad (3.35)$$

$$I_{bnc} = |I_{bnc}| \angle(120^\circ + \beta) \quad (3.36)$$

$$Z_{bnc} = V / I_{bnc} \quad (3.37)$$

Sehingga besarnya suseptansi adalah :

$$B_{anc} = |I_{anc}| \sin(\alpha) / |V| \quad (3.38)$$

$$B_{bnc} = |I_{bnc}| \sin(\beta) / |V| \quad (3.39)$$

Dengan meletakkan suseptansi ini pada fasa a dan b, maka besarnya arus netral yang mengalir pada sistem tiga fasa empat kawat adalah nol :

$$I_{anl} + I_{bnl} + I_{cnl} + I_{anc} + I_{bnc} \cong 0,0.$$

Dan, hambatan beban setelah dikompensasi akan sama dengan :

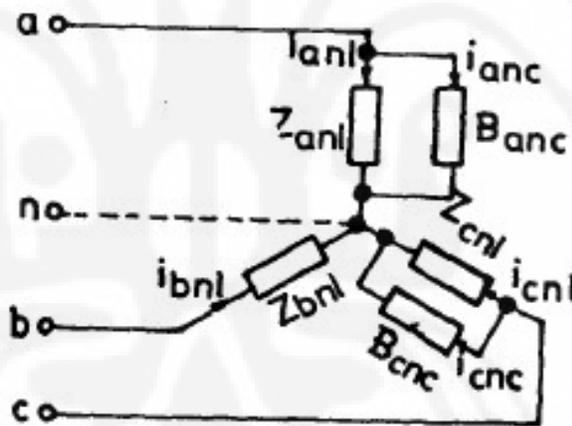
$$Z_{an} = Z_{anl} Z_{anc} / (Z_{anl} + Z_{anc}) \quad (3.40)$$

$$Z_{bn} = Z_{bnl} Z_{bnc} / (Z_{bnl} + Z_{bnc}) \quad (3.41)$$

$$Z_{cn} = Z_{cnl} \quad (3.42)$$

### 3.4 Kombinasi Ketiga

Kombinasi ini dilakukan dengan memberikan kompensator pada fasa a dan c, pada beban tiga fasa, empat kawat seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.8.



Gambar 3.8 Kompensasi arus netral pada fasa a dan c

Elemen reaktif yang dipilih untuk fasa a dan c ditentukan dengan sudut  $\alpha$  dan  $\gamma$ . Sudut  $\alpha$  dan  $\gamma$  merupakan sudut dari elemen kompensator  $Z_{anc}$  dan  $Z_{cnc}$ . Sama halnya dengan dua kombinasi sebelumnya, dua impedansi ini berfungsi sebagai elemen reaktif (bersifat kapasitif atau induktif) sehingga sudut  $\alpha$  dan  $\gamma$  akan  $\pm 90^\circ$ . Jika sudutnya  $-90^\circ$  maka elemen yang dipilih adalah suatu inductor sedangkan jika  $+90^\circ$  maka yang dipilih adalah kapasitor. Cara pemilihan kompensator ditentukan berdasarkan ketentuan berikut :

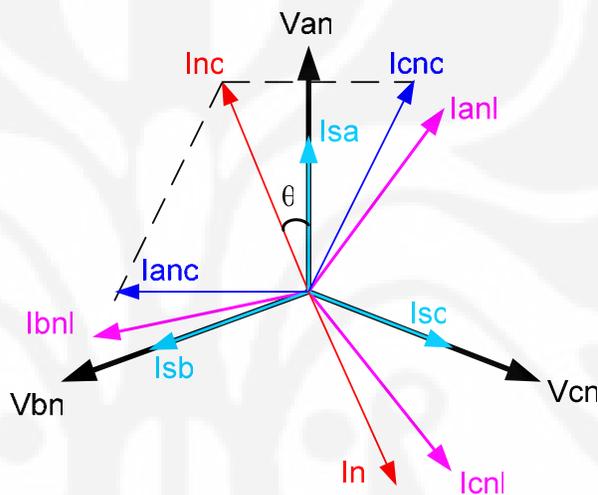
Untuk  $330^\circ < \theta < 360^\circ$  dan  $0^\circ < \theta < 90^\circ$ ;  $\alpha = +90^\circ$ ;  $\gamma = +90^\circ$

Untuk  $90^\circ < \theta < 150^\circ$ ;  $\alpha = +90^\circ$ ;  $\gamma = -90^\circ$

Untuk  $150^\circ < \theta < 270^\circ$ ;  $\alpha = -90^\circ$ ;  $\gamma = -90^\circ$

Untuk  $270^\circ < \theta < 330^\circ$ ;  $\alpha = -90^\circ$ ;  $\gamma = +90^\circ$

Besarnya arus netral yang dibagi pada kedua fasa a dan b sama dengan  $I_{anc}$  dan  $I_{enc}$ . Penguraian  $I_{anc}$  dan  $I_{enc}$  sepanjang fasa dan sumbu kuadratur dari tegangan fasa  $V_{an}$  dapat dilihat pada gambar berikut :



Gambar 3.9 Diagram Fasor untuk kombinasi ketiga

Dengan menyamakan jumlah komponen  $I_{anc}$  dan  $I_{enc}$  dengan komponen  $I_{nc}$  berdasarkan gambar 3.9 akan diperoleh :

$$|I_{nc}| \cos(\theta) = |I_{anc}| \cos(\alpha) + |I_{enc}| \cos(240^\circ + \gamma) \quad (3.43)$$

$$|I_{nc}| \sin(\theta) = |I_{anc}| \sin(\alpha) + |I_{enc}| \sin(240^\circ + \gamma) \quad (3.44)$$

dengan  $|I_{nc}| = |I_n|$

Dengan menyelesaikan persamaan diatas untuk  $|I_{anc}|$  dan  $|I_{enc}|$  :

$$|I_{anc}| = |I_{nc}| \sin(240^\circ + \gamma - \theta) / \sin(240^\circ + \gamma - \alpha) \quad (3.45)$$

$$|I_{enc}| = |I_{nc}| \sin(\alpha - \theta) / \sin(\alpha - \beta - 240^\circ) \quad (3.46)$$

$$I_{anc} = |I_{anc}| \angle(\alpha) \quad (3.47)$$

$$Z_{anc} = V / I_{anc} \quad (3.48)$$

$$I_{enc} = |I_{enc}| \angle(240^\circ + \gamma) \quad (3.49)$$

$$Z_{cnc} = V / I_{cnc} \quad (3.50)$$

Sehingga besarnya susceptansi adalah :

$$B_{anc} = |I_{anc}| \sin(\alpha) / |V| \quad (3.51)$$

$$B_{cnc} = |I_{cnc}| \sin(\gamma) / |V| \quad (3.52)$$

Dengan meletakkan susceptansi ini pada fasa a dan c, maka besarnya arus netral yang mengalir pada sistem tiga fasa empat kawat adalah nol :

$$I_{anl} + I_{bnl} + I_{cnl} + I_{anc} + I_{cnc} \cong 0,0.$$

Dan, hambatan beban setelah dikompensasi akan sama dengan :

$$Z_{an} = Z_{anl} Z_{anc} / (Z_{anl} + Z_{anc}) \quad (3.53)$$

$$Z_{bn} = Z_{bnl} \quad (3.54)$$

$$Z_{cn} = Z_{cnl} Z_{cnc} / (Z_{cnl} + Z_{cnc}) \quad (3.55)$$

## **BAB IV**

### **ANALISIS ELIMINASI ARUS NETRAL DENGAN METODE KOMPENSASI DUA FASA**

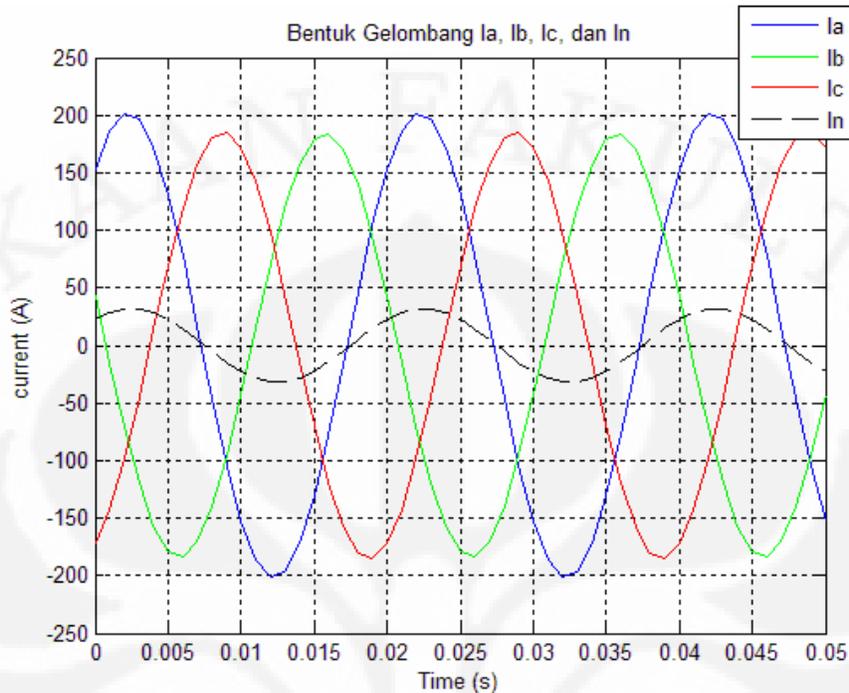
#### **4.1. Analisis Metode**

Pada bagian ini akan dianalisis eliminasi arus netral dengan menggunakan metode kompensasi dua fasa. Dalam melakukan perhitungan diperlukan data operasional beban yang dianalisis. Data yang diperlukan adalah data arus beban tiap fasa dan faktor dayanya. Beban yang digunakan adalah beban jaringan kecil yaitu salah satu industri semen di Jawa Tengah. Analisis bersifat komputasi yaitu perhitungan dengan menggunakan perangkat lunak program aplikasi Excel dan MATLAB.

Mengingat bahwa eliminasi arus netral pada metode ini dilakukan dengan mengkompensasi dua kawat fasa saja, padahal terdapat tiga kawat fasa pada sistem maka akan terdapat kombinasi-kombinasi dari fasa yaitu fasa b dan fasa c, fasa a dan fasa b, serta fasa a dan fasa c. Dari hasil perhitungan kombinasi-kombinasi ini akan dapat dilihat kombinasi yang optimum secara teknis (faktor daya yang paling baik).

#### **4.2. Analisis Hasil Perhitungan**

Data beban yang akan dianalisis adalah beban dengan nilai  $I_a = 201,8 \angle -40,27^\circ$ ,  $I_b = 183,8 \angle 76,64^\circ$ ,  $I_c = 185,9 \angle 202,09^\circ$ , dan  $I_n = 32,38 \angle 138,34^\circ$  dan faktor daya sebelum dikompensasi, masing-masing  $p_{fa} = 0,763$ ,  $p_{fb} = 0,723$ ,  $p_{fc} = 0,789$  dan  $pf_{total} = 0,76$ . Bentuk gelombang arus fasa dan arus netral dapat digambarkan sebagai berikut :



Gambar 4.1 Bentuk Gelombang Arus sebelum Dikompensasi

Dari gambar diatas terlihat adanya arus netral dengan amplitudo 32, 38 A. Selanjutnya, arus netral yang mengalir ini akan dieliminasi dengan menggunakan metode kompensasi dua fasa.

Setelah dilakukan perhitungan dengan kombinasi-kombinasi yang ada maka diperoleh hasil seperti yang akan dijelaskan berikut ini.

#### 4.2.1. Kombinasi Pertama (yang dikompensasi fasa b dan c)

Dengan menggunakan kombinasi pertama, hasil yang diperoleh dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

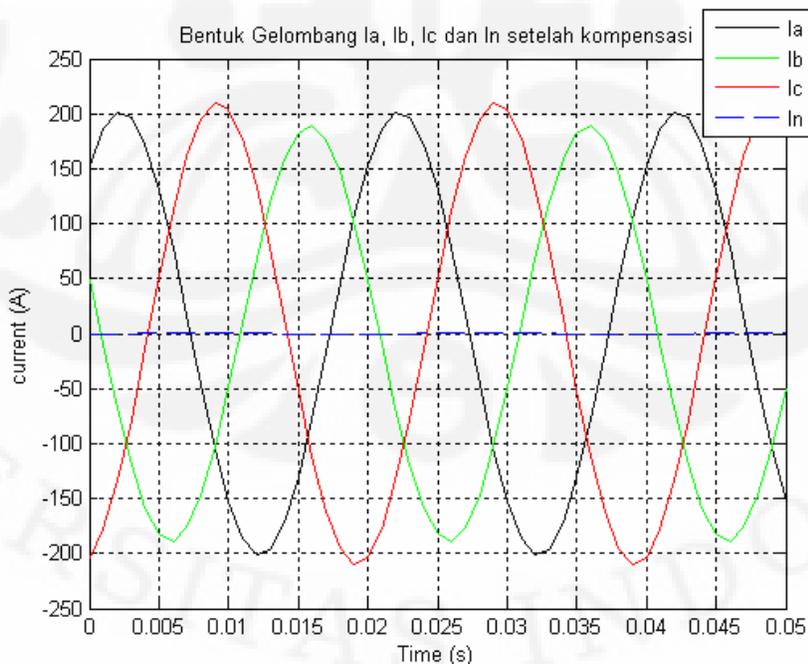
Sebelum Kompensasi	Compensator	Setelah dikompensasi
$I_a = 201,8 \angle -40,27^\circ$	$L_{bnc} = 92,628 \text{ mH}$	$I_a = 201,8 \angle -40,27^\circ$
$I_b = 183,8 \angle 76,64^\circ$	1.663,23 VAR	$I_b = 189,0 \angle 74,97^\circ$
$I_c = 185,9 \angle 202,09^\circ$		$I_c = 209,72 \angle 194,42^\circ$
$I_n = 32,38 \angle -41,66^\circ$	$L_{cnc} = 19,628 \text{ mH}$	$I_n = 0,18 = 0,09\%$
$Pf_1 = 0,763$	7.806,45 VAR	$Pf_1 = 0,763$

Pf 2= 0,727		Pf2 = 0,706
Pf3 = 0,789		Pf3 = 0,7
S1 = 33.874,45+28.697,15i		S1 = 33.874,45+28.697,15i
S2 = 29.384+27.748,2i		S2 = 29.384 + 29.476 i
S3 = 32.285,7+25.140 i		S3 = 32.285,7 + 32.938 i
St = 95.544,15+81.585,35 i		St = 95.544,15+91.111,15i
Pf total = 0,76		Pf total = 0,724

Tabel IV.1. Hasil Perhitungan kompensasi dengan kombinasi pertama

Dengan kombinasi pertama, fasa yang dikompensasi adalah fasa b dan fasa c. Jenis kompensator yang dibutuhkan untuk mengkompensasi arus netral dengan kombinasi ini adalah induktor, baik untuk fasa b maupun fasa c. Besarnya nilai  $L_{bnc}$  dan  $L_{cnc}$ , masing-masing sebesar 92,628 mH dan 19,628 mH atau 1.663,23 VAR dan 7.806,45 VAR.

Dengan menempatkan kompensator ini pada fasa b dan fasa c, maka akan diperoleh arus netral yang nilainya sangat kecil atau mendekati nol. Dalam hal ini besarnya nilai arus netral setelah dikompensasi adalah 0, 1 A. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat bentuk gelombang arus setelah dikompensasi berikut ini.



Gambar 4.2 Bentuk Gelombang Arus Dengan Kombinasi Pertama

Dari gambar 4.2 diatas dapat dilihat bahwa nilai arus netral setelah dikompensasi (garis biru putus-putus) sangat kecil dan arus masing-masing fasa relatif seimbang dibandingkan dengan arus sebelum kompensasi..

Sedangkan nilai faktor daya yang dihasilkan setelah kompensasi adalah 0,71 tertinggal. Nilai faktor daya ini lebih rendah dibandingkan dengan nilai faktor daya sebelum kompensasi sebesar 0, 76 tertinggal. Hal ini disebabkan oleh adanya pengaruh komponen induktor pada fasa b dan fasa c. Dengan adanya komponen induktor (yang menyerap daya reaktif) maka faktor daya akan lebih rendah daripada faktor daya sebelum kompensasi.

#### 4.2.2. Kombinasi Kedua (yang dikompensasi fasa a dan b)

Dengan menggunakan kombinasi kedua, hasil yang diperoleh dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

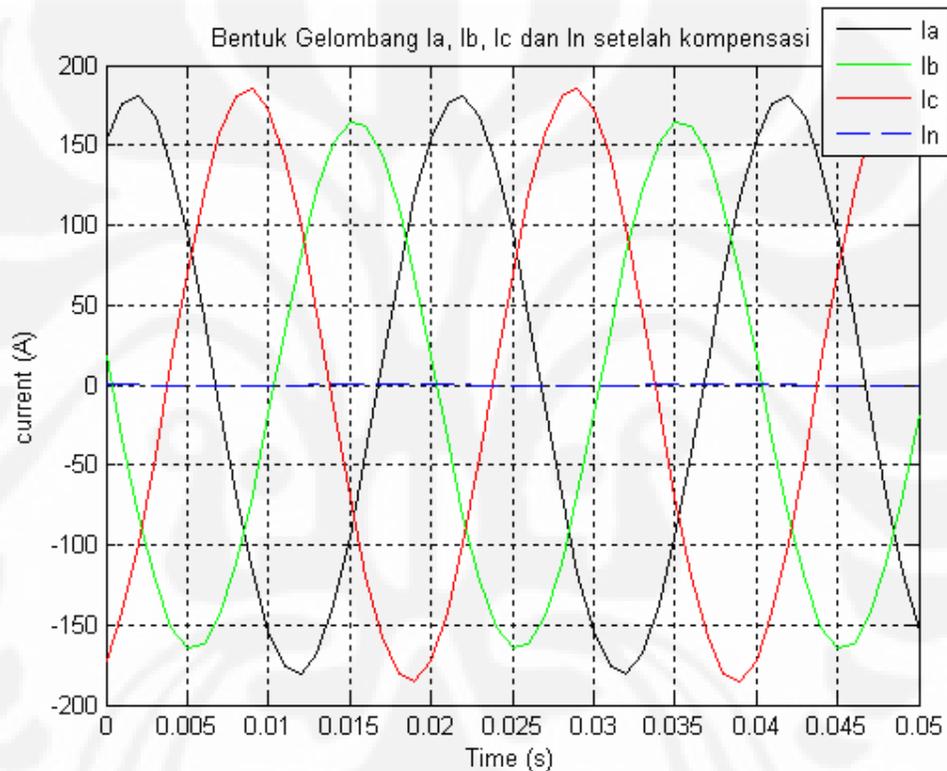
Sebelum kompensasi	Compensator	Setelah dikompensasi
$I_a = 201,8 \angle -40,27^\circ$		$I_a = 180,92 \angle -31,66^\circ$
$I_b = 183,8 \angle 76,64^\circ$		$I_b = 165,91 \angle 83,67^\circ$
$I_c = 185,9 \angle 202,09^\circ$		$I_c = 185,9 \angle 202,09^\circ$
$I_n = 32,38 \angle -41, 66^\circ$		$I_n = 0,0456 = 0,026\%$
$Pf_1 = 0,763$		$Pf_1 = 0,851$
$Pf_2 = 0,727$	$C_{anc} = 513,4 \mu F$	$Pf_2 = 0,806$
$Pf_3 = 0,789$	$7.806,45 \text{ VAR}$	$Pf_3 = 0,789$
$S_1 = 33.874,45 + 28.697,15 i$		$S_1 = 33.871,84 + 20.902,85 i$
$S_2 = 29.384 + 27.748,2 i$	$C_{bnc} = 404,152 \mu F$	$S_2 = 29.384 + 21.579,2 i$
$S_3 = 32.285,7 + 25.140 i$	$6.145,25 \text{ VAR}$	$S_3 = 32.285,7 + 25.140 i$
$S_t = 95.544,15 + 81.585,35 i$		$S_t = 95.544,15 + 67.622,05 i$
$Pf_{total} = 0,76$		$Pf_{total} = 0,81$

Tabel IV.2. Hasil Perhitungan kompensasi dengan kombinasi kedua

Dengan kombinasi kedua , fasa yang dikompensasi adalah fasa a dan fasa b. Jadi, arus netral akan dikompensasi dengan komponen  $Z_{anc}$  dan  $Z_{bnc}$ . Jenis kompensator yang dibutuhkan untuk mengkompensasi arus netral dengan

kombinasi ini adalah kapasitor, baik untuk fasa a maupun fasa b. Besarnya nilai  $C_{anc}$  dan  $C_{bnc}$ , masing-masing sebesar  $513,4 \mu\text{F}$  dan  $404,152 \mu\text{F}$  atau  $7.806,45 \text{ VAR}$  dan  $6.145,25 \text{ VAR}$ .

Dengan menempatkan kompensator ini pada fasa a dan fasa b, maka akan diperoleh arus netral yang nilainya sangat kecil atau mendekati nol. Dalam hal ini besarnya nilai arus netral setelah dikompensasi adalah  $0,0456 \text{ A}$ . Untuk lebih jelasnya dapat dilihat bentuk gelombang arus setelah dikompensasi berikut ini.



Gambar 4.3 Bentuk Gelombang Arus Dengan Kombinasi Kedua

Dari gambar 4.3 diatas dapat dilihat bahwa nilai arus netral setelah dikompensasi (garis biru putus-putus) sangat kecil dan arus masing-masing fasa relatif seimbang dibandingkan dengan arus sebelum kompensasi.

Nilai faktor daya yang dihasilkan setelah kompensasi adalah  $0,81$  tertinggal. Nilai faktor daya ini lebih baik dibandingkan dengan nilai faktor daya sebelum kompensasi sebesar  $0,76$  tertinggal. Hal ini disebabkan oleh adanya

pengaruh komponen kapasitor yang menyuplai daya reaktif pada fasa a dan fasa b. Dengan adanya komponen penyuplai daya reaktif, maka faktor daya akan lebih baik daripada faktor daya sebelum kompensasi.

#### 4.2.3. Kombinasi Ketiga (yang dikompensasi fasa a dan c)

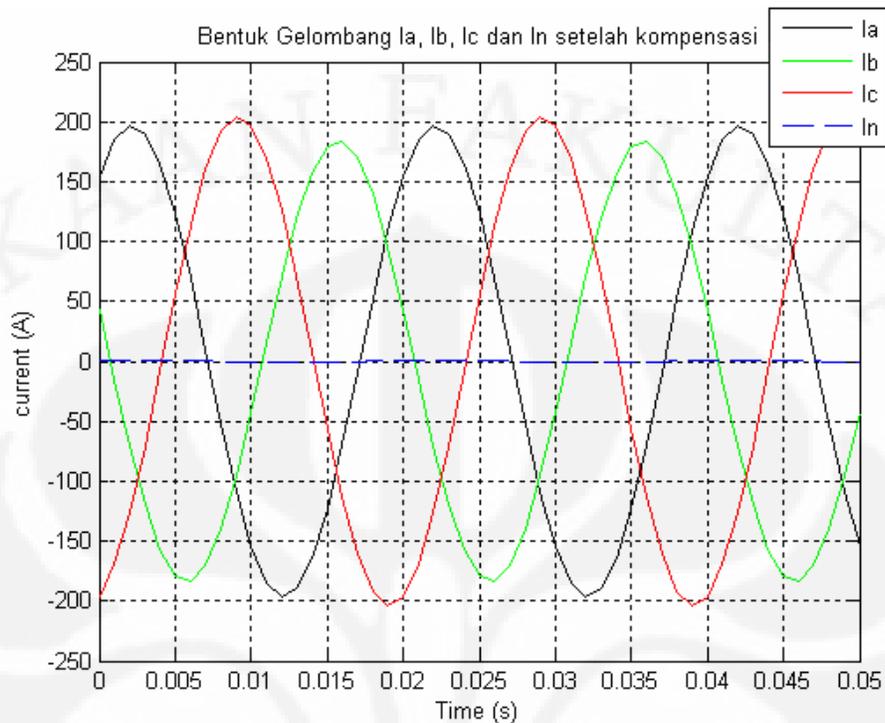
Dengan menggunakan kombinasi ketiga, hasil yang diperoleh dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

Sebelum kompensasi	Compensator	Setelah dikompensasi
$I_a = 201,8 \angle -40,27^\circ$		$I_a = 197,133 \angle -38,59^\circ$
$I_b = 183,8 \angle 76,64^\circ$		$I_b = 183,8 \angle 76,64^\circ$
$I_c = 185,9 \angle 202,09^\circ$		$I_c = 204,27 \angle 195,9^\circ$
$I_n = 32,38 \angle -41,66^\circ$		$I_n = 0,13 = 0,06\%$
$Pf_1 = 0,763$		$Pf_1 = 0,782$
$Pf_2 = 0,727$	$C_{anc} = 109,385 \mu F$	$Pf_2 = 0,727$
$Pf_3 = 0,789$	$7.806,45 \text{ VAR}$	$Pf_3 = 0,718$
$S_1 = 33.874,45 + 28.697,15i$		$S_1 = 33.874,45 + 26.998,6i$
$S_2 = 29.384 + 27.748,2i$	$L_{cnc} = 25,07 \text{ mH}$	$S_2 = 29.384 + 27.748,2i$
$S_3 = 32.285,7 + 25.140i$	$6.145,25 \text{ VAR}$	$S_3 = 32.285,7 + 31.298,4i$
$S_t = 95.544,15 + 81.585,35i$		$S_{tot} = 95.544,15 + 86.045,2i$
$Pf_{total} = 0,76$		$Pf_{total} = 0,743$

Tabel IV.3. Hasil Perhitungan kompensasi dengan kombinasi ketiga

Dengan kombinasi ketiga, fasa yang dikompensasi adalah fasa a dan fasa c. Jenis kompensator yang dibutuhkan untuk mengeliminasi arus netral dengan kombinasi ini adalah kapasitor untuk fasa a dan induktor untuk fasa c. Besarnya nilai  $C_{anc}$  dan  $L_{cnc}$ , masing-masing sebesar  $109,385 \mu F$  dan  $25,07 \text{ mH}$  atau  $7.806,45 \text{ VAR}$  dan  $6.145,25 \text{ VAR}$ .

Dengan menempatkan kompensator ini pada fasa a dan fasa c, maka akan diperoleh arus netral yang nilainya sangat kecil atau mendekati nol. Dalam hal ini besarnya nilai arus netral setelah dikompensasi adalah  $0,1 \text{ A}$ . Untuk lebih jelasnya dapat dilihat bentuk gelombang arus setelah dikompensasi berikut ini.



Gambar 4.4 Bentuk Gelombang Arus Dengan Kombinasi Ketiga

Dari gambar 4.4 diatas dapat dilihat bahwa nilai arus netral setelah dikompensasi (garis biru putus-putus) sangat kecil dan arus masing-masing fasa relatif seimbang dibandingkan dengan arus sebelum kompensasi..

Sedangkan nilai faktor daya yang dihasilkan setelah kompensasi adalah 0,74 tertinggal. Nilai faktor daya ini lebih rendah dibandingkan dengan nilai faktor daya sebelum dikompensasi sebesar 0,76 tertinggal. Hal ini disebabkan oleh adanya pengaruh komponen induktor pada fasa c. Dengan adanya komponen induktor yang menyerap daya reaktif 6.145,25 VAR pada fasa c, pengaruhnya akan lebih besar dibandingkan pengaruh kapasitor pada fasa a. Hal inilah yang menyebabkan faktor daya lebih rendah daripada faktor daya sebelum kompensasi.

Dari semua kombinasi yang telah diuraikan diatas terlihat bahwa arus netral setelah kompensasi, nilainya sangat kecil (mendekati nol). Dari hasil diatas juga dapat dilihat bahwa metode kompensasi yang optimum adalah kombinasi kedua yaitu kompensasi pada fasa a dan fasa b dengan faktor daya setelah

dikompensasi sebesar 0, 81. Fasa a dan fasa b ini adalah fasa yang memiliki nilai arus yang menyimpang jauh dari nilai arus rata-rata.

Demikian juga dengan data beban yang lain terlihat bahwa kompensasi yang optimum adalah pada fasa yang memiliki nilai arus yang menyimpang jauh dari nilai arus rata-rata seperti ditunjukkan pada tabel berikut ini.

• **Awal (Sebelum dikompensasi) :**

$$\begin{aligned} I_a &= 150 \angle -31,79^0 & P_f &= 0,85 \\ I_b &= 151 \angle 88,21^0 & P_f &= 0,85 \\ I_c &= 120 \angle 180^0 & P_f &= 0,5 \\ I_n &= 70,95 \angle 80,14^0 & P_f \text{ total} &= 0,77 \end{aligned}$$

Kombinasi 1	Kombinasi 2	Kombinasi 3
$I_a = 150 \angle -31,79^0$	$I_a = 190,80 \angle -48,07^0$	$I_a = 201,46 \angle -50,73^0$
$I_b = 126,78 \angle 119,28^0$	$I_b = 142,21 \angle 93,02^0$	$I_b = 149 \angle 88,21^0$
$I_c = 72,7 \angle 205,73^0$	$I_c = 120 \angle 180^0$	$I_c = 132,37 \angle 176,96^0$
$I_n = 0,006 = 0,001\%$	$I_n = 0,06 = 0,04\%$	$I_n = 0,02 = 0,012\%$
$P_{f1} = 0,85$	$P_{f1} = 0,668$	$P_{f1} = 0,633$
$P_{f2} = 0,999$	$P_{f2} = 0,891$	$P_{f2} = 0,85$
$P_{f3} = 0,825$	$P_{f3} = 0,5$	$P_{f3} = 0,453$
$P_f \text{ Total} = 0,86$	$P_f \text{ Total} = 0,71$	$P_f \text{ Total} = 0,67$
$C_{bnc} = 1,113 \text{ mF}$	$L_{anc} = 11,134 \text{ mH}$	$L_{anc} = 9,1 \text{ mH}$
$C_{cnc} = 909,976 \mu\text{F}$	$C_{bnc} = 202,98 \mu\text{F}$	$L_{cnc} = 49,92 \text{ mH}$

Tabel IV.4. Hasil Perhitungan kompensasi beban 2

• **Awal (Sebelum dikompensasi) :**

$$\begin{aligned} I_a &= 170 \angle -36,87^0 & P_f &= 0,8 \\ I_b &= 120 \angle 78,59^0 & P_f &= 0,75 \\ I_c &= 140 \angle 186,87^0 & P_f &= 0,6 \\ I_n &= 20,77 \angle -2,95 & P_f \text{ Total} &= 0,726 \end{aligned}$$

Kombinasi 1	Kombinasi 2	Kombinasi 3
$I_a = 170 \angle -36,87^{\circ}$ $I_b = 113,11 \angle 82,74^{\circ}$ $I_c = 150,68 \angle -176,11^{\circ}$ $I_n = 0,04 = 0,028\%$	$I_a = 162,48 \angle -33,19^{\circ}$ $I_b = 105,71 \angle 88,37^{\circ}$ $I_c = 140 \angle 186,87^{\circ}$ $I_n = 0,03 = 0,02\%$	$I_a = 176,70 \angle -39,47^{\circ}$ $I_b = 120 \angle 78,59^{\circ}$ $I_c = 159,88 \angle 181,71^{\circ}$ $I_n = 0,63 = 0,4\%$
Pf1 = 0,8 Pf2 = 0,796 Pf3 = 0,558 Pf Total = 0,724	Pf1 = 0,837 Pf2 = 0,851 Pf3 = 0,6 Pf Total = 0,77	Pf1 = 0,769 Pf2 = 0,75 Pf3 = 0,527 Pf Total = 0,687
Cbnc = 157,813 $\mu$ F	Canc = 188,74 $\mu$ F	Lanc = 64,2 mH
Lcnc = 53,683 mH	Cbnc = 346,516 $\mu$ F	Lcnc = 29,24 mH

Tabel IV.5. Hasil Perhitungan kompensasi beban 3

Namun demikian, nilai faktor daya yang diperoleh setelah kompensasi, peningkatannya tidak signifikan. Metode kompensasi dua fasa ini tidak dapat menghasilkan faktor daya sesuai dengan yang diinginkan. Hal ini disebabkan karena pada metode kompensasi ini, fasa yang tidak dikompensasi tidak terpengaruh.

## BAB V

### KESIMPULAN

1. Metode kompensasi dua fasa dapat mengurangi arus netral hingga nilainya mendekati nol ( $I_n \leq 20\%$  dari arus normal)

Hasil analisis dan perhitungan :

Sebelum kompensasi	Setelah dikompensasi
$I_a = 201,8 \angle -40,27^\circ$	$I_a = 180,92 \angle -31,66^\circ$
$I_b = 183,8 \angle 76,64^\circ$	$I_b = 165,91 \angle 83,67^\circ$
$I_c = 185,9 \angle 202,09^\circ$	$I_c = 185,9 \angle 202,09^\circ$
$I_n = 32,38 \angle 138,34^\circ$	$I_n = 0,0456 = 0,026\%$
$Pf_1 = 0,763$	$Pf_1 = 0,851$
$Pf_2 = 0,727$	$Pf_2 = 0,806$
$Pf_3 = 0,789$	$Pf_3 = 0,789$
$Pf_{total} = 0,76$	$Pf_{total} = 0,81$

Tabel V.1. Kompensasi optimum

2. Kompensasi yang optimum adalah kompensasi pada dua fasa yang menyimpang jauh dari nilai beban rata-rata.
3. Faktor daya yang terjadi setelah kompensasi meningkat tidak signifikan, dari 0,76 menjadi 0,81.
4. Metode Kompensasi Dua Fasa ini tidak dapat mengkompensasi faktor daya sesuai dengan yang diinginkan atau ditargetkan.

## DAFTAR ACUAN

- [1] Singh, Bhim; Saxena, Anuradha, Kothari, D.P. “Power Factor Correction and Load Balancing in Three Phase Distribution System”. Transactions on IEEE Power Apparatus and Systems, 1998.
- [2] Wikipedia contributors. “Three -phase, Variable set up and basic definitions”, In: The Free Encyclopedia. 2005.  
<http://en.wikipedia.org/wiki/Three-phase>, 05.12.2007
- [3] Pramoedyasworo, Andy. “Optimalisasi Daya Reaktif Untuk Memperbaiki Profil Tegangan dan Mengurangi Rugi-Rugi Daya Sistem”, Tugas Akhir, Jurusan Elektro FTUI, Jakarta.
- [4] Johnson, D.E; Johnson, J.R; Hilburn, J.L; Scott, P.D. “Electric Circuit Analysis ”, Third Edition, Prentice Hall. 1997.
- [5] UNEP, “Pedoman Efisiensi Energi untuk Industri di Asia” – [www.energyefficiencyasia.org](http://www.energyefficiencyasia.org) ,05.12.2007
- [6] UNEJ, “RLII-2\_fase\_banyak”, elearning.unej  
<http://elearning.unej.ac.id>, 30.11.2007.
- [7] Utomo, Agus.R. “ Sistem Fasa Banyak”, Diktat Kuliah Jurusan Elektro FTUI, Depok, 2005.
- [8] Indrakoesoema, Koes. “ Kajian Faktor Daya Lampu TL Pada Penerangan di RSG-GAS”, Volume III, No.1 April 2006.
- [9] Lister, Eugene. “ Mesin dan Rangkaian Listrik”, Edisi Keenam, Penerbit Erlangga, Jakarta, 1998.
- [10] Kundur, P.S., ”*Power System Stability and Control*”, McGraw-Hill, United State of America, 1994.
- [11] Mulyana, Budi, “*Aplikasi SVC dalam Perbaikan Profil Tegangan*”, Skripsi Departemen Elektro FTUI, 1999.
- [12] Stevenson, William D., “ Analisis Sistem Tenaga Listrik”, Edisi Keempat, Penerbit Erlangga, Jakarta.

## DAFTAR PUSTAKA

- Johnson, D.E; Johnson, J.R; Hilburn, J.L; Scott, P.D. “Electric Circuit Analysis ”, Third Edition, Prentice Hall. 1997.
- Weedy, B.M; Cory, B.J. “Electric Power System”, Fourth Edition, John Wiley & Sons. 1998.
- Kundur, P.S., ”*Power System Stability and Control*”, McGraw-Hill, United State of America, 1994.
- Singh, Bhim; Saxena, Anuradha, Kothari, D.P. “Power Factor Correction and Load Balancing in Three Phase Distribution System”. Transactions on IEEE Power Apparatus and Systems, 1998..
- Stevenson, William D., “ Analisis Sistem Tenaga Listrik”, Edisi Keempat, Penerbit Erlangga, Jakarta.
- Lister, Eugene. “ Mesin dan Rangkaian Listrik”, Edisi Keenam, Penerbit Erlangga, Jakarta, 1998.



**LAMPIRAN**

## LAMPIRAN 1

### PENGOLAHAN DATA

$$I_a = 201,8 \angle -40,27^\circ$$

$$I_b = 183,8 \angle 76,64^\circ$$

$$I_c = 185,9 \angle 202,09^\circ$$

$$P_{f1} = 0,763$$

$$P_{f2} = 0,727$$

$$P_{f3} = 0,789$$

$$P_{f \text{ total}} = 0,76$$

$$I_n = I_a + I_b + I_c = 32,38 \angle -41,66^\circ$$

$$\text{Sehingga } I_{nc} = 32,38 \angle 138,34^\circ$$

$$\theta = 138,34^\circ$$

#### 1. Kombinasi Pertama

$$\beta = -90^\circ \text{ Induktor}$$

$$\gamma = -90^\circ \text{ Induktor}$$

Mencari  $I_{bnc}$  :

$$|I_{bnc}| = |I_{nc}| \sin(240 + \gamma - \theta) / \sin(120 + \gamma - \beta)$$

$$|I_{bnc}| = 32,38 \sin(240 - 90 - 138,34) / \sin(120 - 90 + 90)$$

$$|I_{bnc}| = 32,38 \sin(11,66) / \sin(120)$$

$$|I_{bnc}| = 7,56$$

$$I_{bnc} = |I_{bnc}| \angle (120^\circ + \beta)$$

$$I_{bnc} = 7,56 \angle 30^\circ$$

Mencari  $I_{cnc}$  :

$$|I_{cnc}| = |I_{nc}| \sin(120^\circ + \beta - \theta) / \sin(\beta - \gamma - 120^\circ)$$

$$|I_{cnc}| = 32,38 \sin(120^\circ - 90 - 138,34) / \sin(-90 + 90 - 120^\circ)$$

$$|I_{cnc}| = 32,38 \sin(-108,34) / \sin(-120^\circ)$$

$$|I_{cnc}| = 35,49$$

$$I_{cnc} = |I_{cnc}| \angle (240^\circ + \gamma)$$

$$I_{cnc} = 35,49 \angle 150^\circ$$

$$Z_{bnc} = V / I_{bnc}$$

$$Z_{bnc} = 29,1 \angle 90^0$$

$$Z_{cnc} = V / I_{cnc}$$

$$Z_{cnc} = 6,2 \angle 90^0$$

Hambatan beban setelah dikompensasi akan sama dengan :

$$Z_{an} = Z_{anl}$$

$$Z_{an} = 1,09 \angle 40,27^0$$

$$Z_{bn} = Z_{bnl} Z_{bnc} / (Z_{bnl} + Z_{bnc})$$

$$Z_{bn} = 1,164 \angle 45,03^0$$

$$Z_{cn} = Z_{cnl} Z_{cnc} / (Z_{cnl} + Z_{cnc})$$

$$Z_{cn} = 1,049 \angle 45,58^0$$

$$I_a = 201,8 \angle -40,27$$

$$I_b = 189,0 \angle 74,97$$

$$I_c = 209,72 \angle 194,42$$

$$I_n = 0,18$$

$$P_{f1} = 0,763$$

$$P_{f2} = 0,706$$

$$P_{f3} = 0,7$$

$$P_{f \text{ total}} = 0,724$$

Sebelum Kompensasi	Compensator	Setelah dikompensasi
$I_a = 201,8 \angle -40,27$	$L_{bnc} = 92,628 \text{ mH}$	$I_a = 201,8 \angle -40,27$
$I_b = 183,8 \angle 76,64$	1.663,23 VAR	$I_b = 189,0 \angle 74,97$
$I_c = 185,9 \angle 202,09$		$I_c = 209,72 \angle 194,42$
$I_n = 32,38 \angle -41,66$	$L_{cnc} = 19,628 \text{ mH}$	$I_n = 0,18 = 0,09\%$
$P_{f1} = 0,763$	7.806,45 VAR	$P_{f1} = 0,763$
$P_{f2} = 0,727$		$P_{f2} = 0,706$
$P_{f3} = 0,789$		$P_{f3} = 0,7$
$S1 = 33.874,45 + 28.697,15 \text{ i}$		$S1 = 33.874,45 + 28.697,15 \text{ i}$
$S2 = 29.384 + 27.748,2 \text{ i}$		$S2 = 29.384 + 29.476 \text{ i}$

$S3 = 32.285,7 + 25.140 i$ $St = 95.544,15 + 81.585,35 i$ $Pf \text{ total} = 0,76$	$S3 = 32.285,7 + 32.938 i$ $St = 95.544,15 + 91.111,15 i$ $Pf \text{ total} = 0,724$
---	--

## 2. Kombinasi Kedua

$$\alpha = +90^{\circ} \text{ Kapasitor}$$

$$\beta = +90^{\circ} \text{ Kapasitor}$$

Mencari Ianc :

$$|Ianc| = |Inc| \sin(120^{\circ} + \beta - \theta) / \sin(120^{\circ} + \beta - \alpha)$$

$$|Ianc| = 32,38 \sin(120^{\circ} + 90 - 138,34) / \sin(120^{\circ} + 90 - 90)$$

$$|Ianc| = 32,38 \sin(71,66) / \sin(120)$$

$$|Ianc| = 35,49$$

$$Ianc = |Ianc| \angle (\alpha)$$

$$Ianc = 35,49 \angle 90^{\circ}$$

Mencari Ibnc :

$$|Ibnc| = |Inc| \sin(\alpha - \theta) / \sin(\alpha - \beta - 120^{\circ})$$

$$|Ibnc| = 32,38 \sin(90 - 138,34) / \sin(90 - 90 - 120^{\circ})$$

$$|Ibnc| = 32,38 \sin(-48,38) / \sin(-120^{\circ})$$

$$|Ibnc| = 27,934$$

$$Ibnc = |Ibnc| \angle (120^{\circ} + \beta)$$

$$Ibnc = 27,934 \angle 210^{\circ}$$

$$Zanc = V / Ianc$$

$$Zanc = 6,2 \angle -90^{\circ}$$

$$Zbnc = V / Ibnc$$

$$Zbnc = 7,876 \angle -90$$

Hambatan beban setelah dikompensasi akan sama dengan :

$$Zan = Zanl Zanc / (Zanl + Zanc)$$

$$Zan = 1,216 \angle 31,66$$

$$Z_{bn} = Z_{bnl} Z_{bnc} / (Z_{bnl} + Z_{bnc})$$

$$Z_{bn} = 1,326 \angle 36,33$$

$$Z_{cn} = Z_{cnl}$$

$$Z_{cn} = 1,183 \angle 37,91$$

Sehingga :

$$I_a = 180,92 \angle -31,66$$

$$I_b = 165,913 \angle 83,67$$

$$I_c = 185,9 \angle 202,09$$

$$I_n = 0,0456$$

$$Pf_1 = 0,851$$

$$Pf_2 = 0,806$$

$$Pf_3 = 0,789$$

$$Pf \text{ total} = 0,81$$

Sebelum kompensasi	Compensator	Setelah dikompensasi
$I_a = 201,8 \angle -40,27$		$I_a = 180,92 \angle -31,66$
$I_b = 183,8 \angle 76,64$		$I_b = 165,91 \angle 83,67$
$I_c = 185,9 \angle 202,09$		$I_c = 185,9 \angle 202,09$
$I_n = 32,38 \angle -41,66$		$I_n = 0,0456 = 0,026\%$
$Pf_1 = 0,763$		$Pf_1 = 0,851$
$Pf_2 = 0,727$	$C_{anc} = 513,4 \mu F$	$Pf_2 = 0,806$
$Pf_3 = 0,789$	$7.806,45 \text{ VAR}$	$Pf_3 = 0,789$
$S_1 = 33.874,45 + 28.697,15 i$		$S_1 = 33.871,84 + 20.902,85 i$
$S_2 = 29.384 + 27.748,2 i$	$C_{bnc} = 404,152 \mu F$	$S_2 = 29.384 + 21.579,2 i$
$S_3 = 32.285,7 + 25.140 i$	$6.145,25 \text{ VAR}$	$S_3 = 32.285,7 + 25.140 i$
$S_t = 95.544,15 + 81.585,35 i$		$S_t = 95.544,15 + 67.622,05 i$
$Pf \text{ total} = 0,76$		$Pf \text{ total} = 0,81$

### 3. Kombinasi Ketiga

$\alpha = +90^\circ$  Kapasitor

$\gamma = -90^\circ$  Induktor

Mencari Ianc :

$$|Ianc| = |Inc| \sin(240^\circ + \gamma - \theta) / \sin(240^\circ + \gamma - \alpha)$$

$$|Ianc| = 32,38 \sin(240^\circ - 90 - 138,34) / \sin(240^\circ - 90 - 90)$$

$$|Ianc| = 32,38 \sin(11,66) / \sin(60)$$

$$|Ianc| = 7,56$$

$$Ianc = |Ianc| \angle (\alpha)$$

$$Ianc = 7,56 \angle 90$$

Mencari Incnc :

$$|Incnc| = |Inc| \sin(\alpha - \theta) / \sin(\alpha - \beta - 240^\circ)$$

$$|Incnc| = 32,38 \sin(90 - 138,34) / \sin(90 + 90 - 240^\circ)$$

$$|Incnc| = 32,38 \sin(-48,34) / \sin(-60)$$

$$|Incnc| = 27,934$$

$$Incnc = |Incnc| \angle (240^\circ + \gamma)$$

$$Incnc = 27,934 \angle 150$$

$$Zanc = V / Ianc$$

$$Zanc = 29,1 \angle -90$$

$$Zcnc = V / Incnc$$

$$Zcnc = 7,876 \angle 90$$

Hambatan beban setelah dikompensasi akan sama dengan :

$$Zan = Zanl Zanc / (Zanl + Zanc)$$

$$Zan = 1,116 \angle 38,59$$

$$Zbn = Zbnl$$

$$Zbn = 1,197 \angle 43,36$$

$$Zcn = Zcnl Zcnc / (Zbnl + Zcnc)$$

$$Zcn = 1,077 \angle 44,1$$

Sehingga :

$$I_a = 197,133 \angle -38,59$$

$$I_b = 183,8 \angle 76,64$$

$$I_c = 204,27 \angle 195,9$$

$$I_n = 0,13$$

$$Pf_1 = 0,782$$

$$Pf_2 = 0,727$$

$$Pf_3 = 0,718$$

$$Pf_{total} = 0,743$$

Sebelum kompensasi	Compensator	Setelah dikompensasi
$I_a = 201.8 \angle -40,27$		$I_a = 197,133 \angle -38,59$
$I_b = 183,8 \angle 76,64$		$I_b = 183,8 \angle 76,64$
$I_c = 185,9 \angle 202,09$		$I_c = 204,27 \angle 195,9$
$I_n = 32,38 \angle -41,66$		$I_n = 0,13 = 0,06\%$
$Pf_1 = 0,763$		$Pf_1 = 0,782$
$Pf_2 = 0,727$	$C_{anc} = 109,385 \mu F$	$Pf_2 = 0,727$
$Pf_3 = 0,789$	$7.806,45 \text{ VAR}$	$Pf_3 = 0,718$
$S_1 = 33.874,45 + 28.697,15 i$		$S_1 = 33.874,45 + 26.998,6 i$
$S_2 = 29.384 + 27.748,2 i$	$L_{cnc} = 25,07 \text{ mH}$	$S_2 = 29.384 + 27.748,2 i$
$S_3 = 32.285,7 + 25.140 i$	$6.145,25 \text{ VAR}$	$S_3 = 32.285,7 + 31.298,4 i$
$S_t = 95.544,15 + 81.585,35 i$		$S_{tot} = 95.544,15 + 86.045,2 i$
$Pf_{total} = 0,76$		$Pf_{total} = 0,743$

Dengan cara yang sama dengan diatas diperoleh untuk data beban yang lain seperti yang terdapat pada tabel berikut ini :

• **Awal (Sebelum dikompensasi) :**

$$I_a = 150 \angle -31,79$$

$$Pf = 0,85$$

$$I_b = 151 \angle 88,21$$

$$Pf = 0,85$$

$$I_c = 120 \angle 180$$

$$Pf = 0,5$$

$$I_n = 70,95 \angle 80,14$$

$$Pf_{total} = 0,77$$

**Setelah dikompensasi**

Kombinasi 1	Kombinasi 2	Kombinasi 3
Ia = 150 $\angle$ -31,79 Ib = 126,78 $\angle$ 119,28 Ic = 72,7 $\angle$ 205,73 In = 0,006 = 0,001%	Ia = 190,80 $\angle$ -48,07 Ib = 142,21 $\angle$ 93,02 Ic = 120 $\angle$ 180 In = 0,06 = 0,04%	Ia = 201,46 $\angle$ -50,73 Ib = 149 $\angle$ 88,21 Ic = 132,37 $\angle$ 176,96 In = 0,02 = 0,012%
Pf1 = 0,85 Pf2 = 0,999 Pf3 = 0,825 Pf Total = 0,86	Pf1 = 0,668 Pf2 = 0,891 Pf3 = 0,5 Pf Total = 0,71	Pf1 = 0,633 Pf2 = 0,85 Pf3 = 0,453 Pf Total = 0,67
Cbnc = 1,113 mF	Lanc = 11,134 mH	Lanc = 9,1 mH
Ccnc = 909,976 $\mu$ F	Cbnc = 202,98 $\mu$ F	Lcnc = 49,92 mH

• **Awal (Sebelum dikompensasi) :**

Ia = 170 $\angle$ -36,87	Pf = 0,8
Ib = 120 $\angle$ 78,59	Pf = 0,75
Ic = 140 $\angle$ 186,87	Pf = 0,6
In = 20,77 $\angle$ -2,95	Pf Total = 0,726

**Setelah dikompensasi**

Kombinasi 1	Kombinasi 2	Kombinasi 3
Ia = 170 $\angle$ -36,87 Ib = 113,11 $\angle$ 82,74 Ic = 150,68 $\angle$ -176,11 In = 0,04 = 0,028%	Ia = 162,48 $\angle$ -33,19 Ib = 105,71 $\angle$ 88,37 Ic = 140 $\angle$ 186,87 In = 0,03 = 0,02%	Ia = 176,70 $\angle$ -39,47 Ib = 120 $\angle$ 78,59 Ic = 159,88 $\angle$ 181,71 In = 0,63 = 0,4%
Pf1 = 0,8 Pf2 = 0,796 Pf3 = 0,558 Pf Total = 0,724	Pf1 = 0,837 Pf2 = 0,851 Pf3 = 0,6 Pf Total = 0,77	Pf1 = 0,769 Pf2 = 0,75 Pf3 = 0,527 Pf Total = 0,687
Cbnc = 157,813 $\mu$ F	Canc = 188,74 $\mu$ F	Lanc = 64,2 mH
Lcnc = 53,683 mH	Cbnc = 346,516 $\mu$ F	Lcnc = 29,24 mH