

# DISTRIBUSI TENAGA LISTRIK

MILIK PERPUSTAKAAN IKIP PADANG	
DITERIMA TGL. :	03 OCT 1997
SUMBER / HARGA :	4 /
KOLEKSI :	K
NO. INVENTARIS :	1699/K/97 - 01 (3)
NO. PENYUSUN :	621.2191 ASL

Oleh :

Drs. ASLIMERI

FAKULTAS PENDIDIKAN TEKNOLOGI DAN KEJURUAN  
INSTITUT KEGURUAN DAN ILMU PENDIDIKAN  
PADANG  
1996

MILIK UPT PERPUSTAKAAN  
IKIP PADANG

## KATA PENGANTAR

Akhir-akhir ini sudah banyak usaha penulisan dan pengadaan buku teknik dalam bahasa Indonesia. Namun untuk teknik elektro, hal ini masih saja dirasakan keterbatasan-keterbatasan terutama dalam mengungkapkan topik atau materi yang betul-betul sesuai atau mengarah kepada pembahasan distribusi tenaga listrik.

Hal inilah yang mendorong penulis untuk menyusun buku ini agar dapat membantu siapa saja yang berminat untuk memperdalam tentang distribusi tenaga listrik.

Dalam buku ini dibahas sistim distribusi, kapasitas daya, penempatan dan penentuan kapasitas kapasitor dan pemasangan kapasitor shunt pada jaringan distribusi.

Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan-kekurangan baik dalam materi maupun sistematika penulisan untuk itu saran-saran dan kritik yang membangun guna memperbaiki buku ini akan diterima dengan senang hati.

Pada kesempatan ini penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada semua pihak yang telah ikut membantu dalam menyusun buku ini.

Harapan penulis semoga buku ini ada manfaatnya bagi semua pihak terutama yang terlibat dalam bidang teknik elektro.

Penulis

## DAFTAR ISI

Halaman Judul .....	i
Kata Pengantar .....	ii
Daftar Isi .....	iii
<b>BAB I    PENDAHULUAN</b>	
A. Sistim Distribusi .....	1
1. Pusat Tenaga Listrik .....	3
2. Jaringan Transmisi .....	3
3. Jaringan Subtransmisi .....	3
4. Gardu Induk Distribusi .....	3
5. Jaringan Distribusi Primer .....	4
6. Gardu Distribusi .....	4
7. Jaringan Distribusi Sekunder .....	4
B. Persyaratan Umum Sistim Distribusi .....	4
C. Bagian-Bagian Dari Jaringan Distribusi ...	5
1. Gardu Induk Distribusi .....	5
2. Penyulang .....	9
3. Gardu Distribusi .....	9
4. Gardu Hubung .....	10
D. Jaringan Distribusi Primer .....	10
1. Macam Jaringan Distribusi Primer .....	10
2. Bentuk Jaringan Distribusi Primer .....	13
E. Beban Listrik .....	18
1. Daya Reaktif .....	19
2. Pengaruh Daya Reaktif Berlebih .....	21
<b>BAB II    KAPASITOR DAYA .....</b>	<b>22</b>
A. Prinsip Dasar Kapasitor .....	22
1. Kapasitas Dasar Kapasitor .....	24
2. Kapasitor Seri Dan Paralel .....	26
B. Lokasi Pemasangan Kapasitor .....	27

1. Pemasangan Langsung Pada Beban .....	27
2. Pemasangan Pada Pusat Kendali Beban ...	28
3. Pemasangan Pada Gerbang Masuk Pelajanan .....	29
4. Penempatan Kapasitor Berdasarkan Tegangan Kerja Sistim .....	30
C. Hubungan Kapasitor .....	31
D. Sistim Protensi Kapasitor Besar .....	31
1. Pengaman Lebur Unit .....	33
2. Pengaman Lebur Kelompok .....	34
3. Pemutus Tenaga .....	35
4. Sistim DSH .....	35

### BAB III PENEMPATAN DAN PENENTUAN KAPASITAS

KAPASITOR .....	37
A. Pengaruh Kapasitor Pada Sistim Tenaga ....	38
1. Perbaikan Faktor Daya .....	39
2. Menurunkan Kapasitas Pembebanan Sistim .....	43
3. Mengurangi Rugi-rugi Saluran .....	46
4. Meningkatkan Tingkat Tegangan .....	49
5. Menghemat Pemakaian Energi .....	51
B. Kurva Beban .....	52
1. Kurva Beban Harian .....	52
2. Kurva Lama Beban .....	53
C. Kapasitas Kapasitor .....	54
1. Kapasitor Tetap .....	55
2. Kapasitor Saklar .....	56
3. Biaya Instalasi Kapasitor .....	56
D. Perumusan Penempatan Kapasitor .....	57
1. Fungsi Obyektif Peletakan Kapasitor ...	57
2. Tahapan-Tahapan Penentuan Letak Kapasitor .....	58

BAB IV	PEMASANGAN KAPASITOR SHUNT PADA JARINGAN	
	DISTRIBUSI .....	61
	A. Pengurangan Rugi-rugi Daya Puncak .....	63
	B. Pengurangan Rugi-rugi Energi .....	70
	C. Jatuh Tegangan Jaringan .....	74
	D. Perbaikan Faktor Kerja Penyulang .....	80
	E. Penambahan Kapasitas Penyaluran Daya .....	81
	F. Optimisasi Pemasangan Kapasitor Shunt Pada Jaringan Distribusi Primer .....	82
	1. Fungsi Obyektif Penghematan Biaya .....	83
	2. Lokasi Optimum Dan Ukuran Optimum Kapasitor Shunt .....	84
	3. Pertumbuhan Beban Penyulang .....	86
DAFTAR PUSTAKA .....		87

## BAB I

### PENDAHULUAN

#### A. SISTIM DISTRIBUSI

Sistem distribusi pada umumnya terdiri dari beberapa bagian diantaranya :

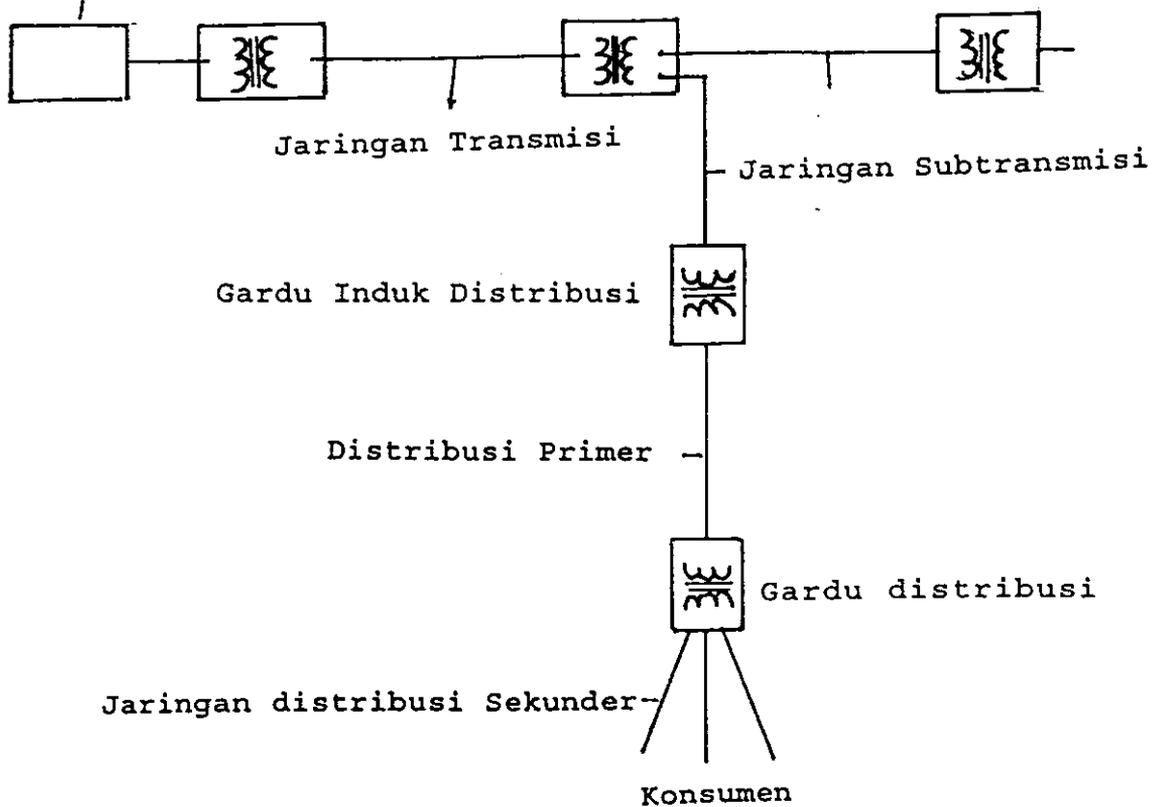
1. Gardu Induk Distribusi
2. Jaringan Distribusi Primer
3. Gardu Distribusi
4. Jaringan Distribusi Sekunder

Yang dimaksud dengan distribusi tenaga listrik adalah penyaluran tenaga listrik dari sumber daya besar (bulk power source) hingga sampai kepada para pemakai pada tingkat tegangan yang diperlukan. Sumber daya besar ini dapat terletak jauh dari daerah yang dilayani oleh sistem distribusi atau dapat juga terletak di dekatnya. Sumber daya besar tersebut dapat berupa suatu stasiun pembangkit atau berupa gardu induk yang disuplai oleh jaringan transmisi..

Sistim distribusi bila ditinjau dari segi tegangan dapat dikelompokkan menjadi dua macam tegangan, yaitu distribusi tegangan rendah dan distribusi tegangan menengah. Adapun distribusi tegangan rendah yang semula 127/220 V, saat ini dikembangkan menjadi tegangan 220/380 V.

Distribusi tegangan menengah di PLN semula mempunyai sistem radial dengan saluran udara pada umumnya dan tegangan berkisar antara 4 kV sampai 15 kV, hal ini disebabkan daerah jangkauannya pendek dan kerapatan yang rendah. Tetapi untuk saat ini telah dikembangkan saluran distribusi tegangan menengah 20 kV, sebagai tegangan standar disamping tegangan menengah 6 kV yang masih digunakan tetapi tidak dikembangkan lagi. Gambar 1.1 secara umum memperlihatkan diagram satu garis dari sistem tenaga listrik.

Pusat Tenaga Listrik



Gambar 1.1 Diagram Satu Garis Sistem Tenaga Listrik

Dari gambar (1.1) dapat dijelaskan secara singkat bagian-bagian dari sistem tenaga listrik.

#### 1. Pusat Tenaga Listrik

Pusat tenaga listrik merupakan bagian dari sistem tenaga listrik yang membangkitkan tenaga listrik dan disalurkan melalui jaringan transmisi. Tegangan generator misalnya pada pusat listrik tenaga air pada umumnya rendah, antara 6 kV sampai 24 kV, maka tegangan tersebut dinaikkan dengan pertolongan transformator daya ke tingkat tegangan yang lebih tinggi antara 70 kV sampai 500 kV.

#### 2. Jaringan Transmisi

Jaringan transmisi merupakan jaringan yang menyalurkan tenaga listrik dari pusat pembangkit ke beberapa gardu induk. Pada umumnya tegangan yang disalurkan 70 kV, 150 kV sampai 500 kV.

#### 3. Jaringan Subtransmisi

Jaringan subtransmisi merupakan jaringan yang menghubungkan tenaga listrik dari sumber daya besar ke satu atau lebih gardu induk distribusi. Jaringan ini dapat berupa kabel tanah, kabel udara maupun hantaran udara kawat terbuka biasanya bertegangan 70 kV.

#### 4. Gardu Induk Distribusi

Gardu induk distribusi berfungsi untuk menerima daya listrik dari jaringan subtransmisi atau jaringan transmisi dan menurunkan tegangan tersebut dengan transfor-

mator daya menjadi tegangan distribusi primer, dahulu bertegangan 6 kV sekarang ditingkatkan menjadi tegangan 20 kV.

#### 5. Jaringan Distribusi Primer

Jaringan distribusi primer berfungsi untuk menyalurkan daya listrik dari gardu induk ke gardu distribusi dengan tegangan 6 kV atau 20 kV.

#### 6. Gardu distribusi ...

Gardu distribusi berfungsi menurunkan tegangan dari tegangan distribusi primer menjadi tegangan distribusi sekunder (tenaga pemakaian), yaitu yang dahulu bertegangan 127 V/220 V sekarang dikembangkan menjadi tegangan 220 V/380 V.

#### 7. Jaringan Distribusi Sekunder

Berfungsi untuk menyalurkan daya listrik dari gardu distribusi kepada konsumen dengan tegangan 127 V/220 V atau 220 V/380 V.

### B. PERSYARATAN UMUM SISTEM DISTRIBUSI

Masalah umum sistem distribusi adalah bagaimana menyalurkan daya listrik ke konsumen dengan cara sebaik-baiknya dalam hal ini kualitas maupun keandalan untuk suatu saat tertentu dan untuk waktu yang akan datang. Oleh karena itu suatu sistem distribusi harus memenuhi persyaratan sebagai berikut :

1. Jatuh tegangan setelah melalui penghantar tidak boleh lebih besar atau melampaui batas-batas tertentu biasanya berkisar antara -10% sampai +5% dan perubahan frekwensi pada jaringan diusahakan tidak terlalu besar.
2. Gangguan terhadap pelanggan tidak boleh sering terjadi (keandalan baik).
3. Gangguan terhadap pelayanan tidak boleh terlalu lama dan harus dibatasi pada daerah yang sekecil mungkin (sektoral).
4. Mudah menyesuaikan terhadap perubahan atau kenaikan beban untuk masa yang akan datang.
5. Memiliki sistem biaya yang murah dalam hal pemasangan, pemeliharaan dan perubahan pada sistem akibat perubahan beban.
6. Memiliki sistem pemeliharaan yang mudah.
7. Memiliki sistem pengamanan yang andal.

### C. BAGIAN-BAGIAN DARI JARINGAN DISTRIBUSI

Bagian-bagian dari sistem jaringan distribusi primer meliputi : gardu induk, feeder utama, feeder cabang, gardu distribusi dan gardu hubung. Bagian-bagian ini akan diuraikan secara umum sebagai berikut :

#### 1. Gardu Induk Distribusi

Gardu induk distribusi merupakan sekumpulan dari peralatan listrik yang berfungsi sebagai pengubah, pembagi maupun pengontrol tenaga listrik. Biasanya

gardu induk distribusi terdiri dari trafo daya, rel pembagi, alat-alat pengaman dan alat-alat pengukuran. Peralatan tersebut disusun menurut ketentuan teknik dengan mempertimbangkan pada segi keindahan serta biaya pembangunan, sehingga dengan demikian terdapat beberapa macam gardu induk. Berdasarkan cara pemasangannya gardu induk dapat dibagi menjadi beberapa macam yaitu :

a. Gardu induk jenis pasangan luar (outdoor)

Gardu induk pasangan luar adalah gardu induk dimana semua peralatan utama seperti transformator, rel daya dan lain-lainnya dipasang ditempat udara terbuka, sedangkan peralatan kontrolnya berada didalam ruangan.

b. Gardu induk jenis pasangan dalam (indoor)

Gardu induk pasangan dalam adalah gardu induk dimana semua peralatan ditempatkan dalam suatu bangunan atau ruangan tertutup.

c. Gardu induk isolasi gas, dimana semua bagian yang bertegangan diisolasi dengan gas seperti rel daya dan peralatan-peralatan baginya.

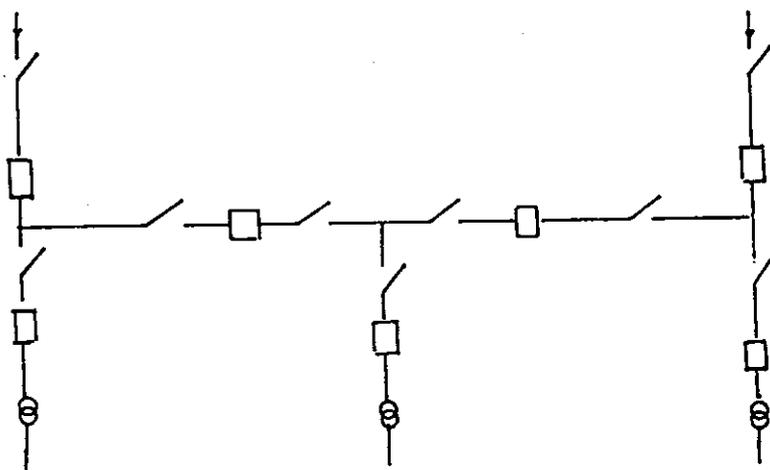
d. Gardu induk jenis mobil, jenis gardu ini biasa digunakan dalam keadaan ada gangguan disuatu gardu induk. Peralatan utama dari gardu ini seperti trafo daya dan peralatan kontrolnya berada didalam kereta hela (truck).

Pemilihan dari macam pasangan ini tergantung pada

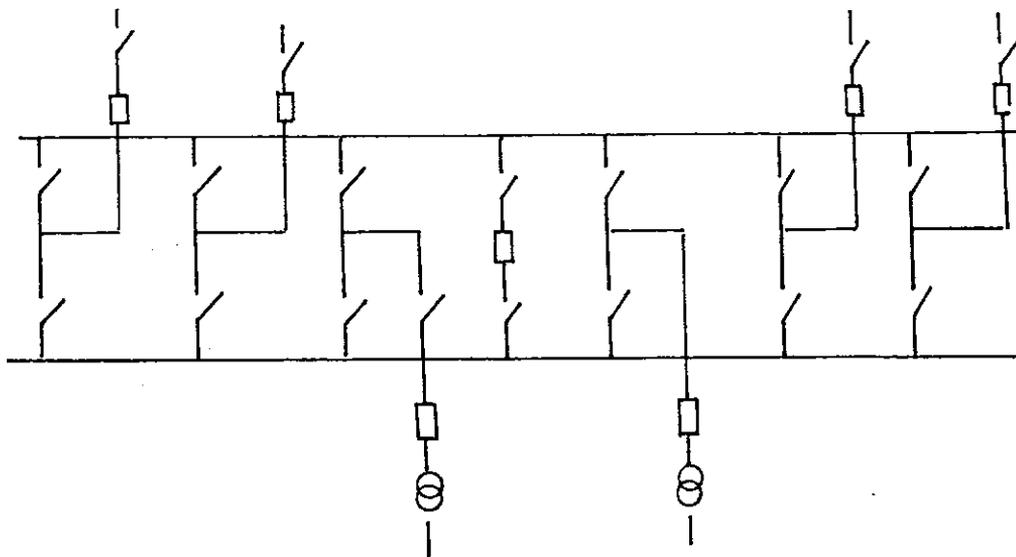
beberapa faktor diantaranya : keadaan atmosfer, keindahan keamanan pembiayaan, kemudahan mendapatkan lokasi dan kemudahan dalam pemeliharaan. Sedangkan jika dilihat dari susunan rel dayanya terdiri dari:

- a. Rel daya tunggal
- b. Rel daya ganda
- c. Rel daya gelang

Dari ketiga macam susunan rel daya tersebut, maka rel daya ganda yang banyak digunakan. Rel daya ganda ini umumnya memiliki peralatan dan konstruksi yang lebih banyak dan mempunyai keandalan yang lebih baik, akan tetapi memerlukan luas area yang lebih banyak serta biaya yang lebih mahal. Gambar 1.2 (a) memperlihatkan rel daya tunggal, sedangkan gambar 1.2 (b) dan 1.2 (c), menunjukkan rel daya ganda dan rel daya gelang.

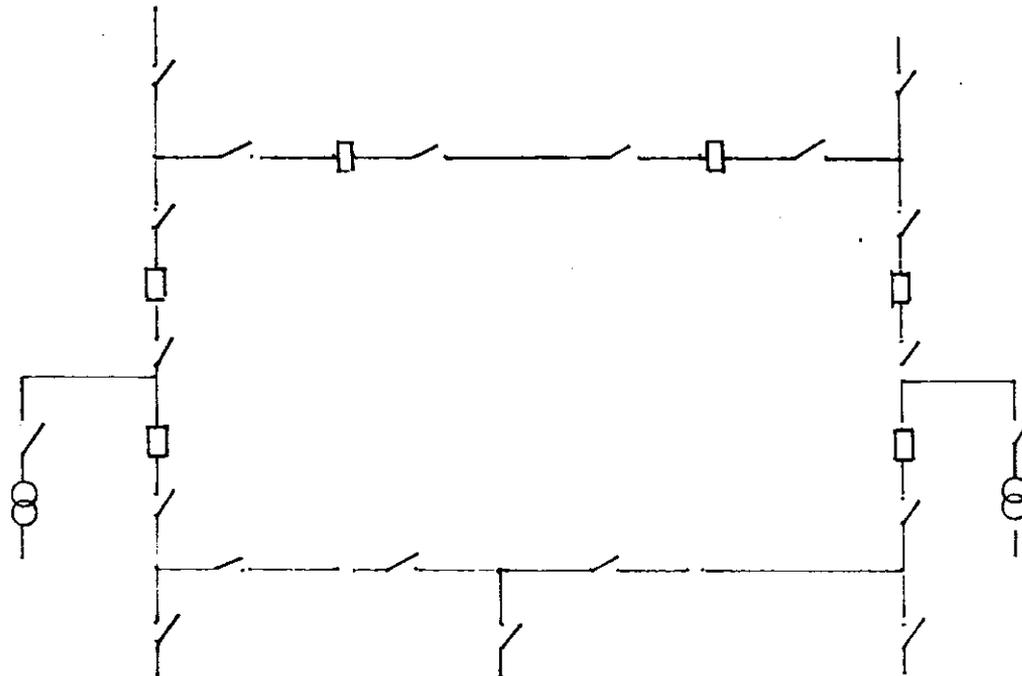


Gambar 1.2 (a) Rel daya tunggal  
(Turan Gonen 1986, Hal 183)



Gambar 1.2 (b) Rel daya ganda

(Turhan Gonen 1986, Hal 184)



Gambar 1.2 (c) Rel daya gelang

(Turhan Gonen 1986, Hal 185)

## 2. Feeder / Penyulang

Feeder dalam jaringan distribusi merupakan saluran yang menghubungkan gardu induk dengan gardu distribusi sehingga feeder ini berfungsi untuk menyalurkan daya listrik dari gardu induk ke gardu distribusi tersebut.

## 3. Gardu distribusi

Gardu distribusi adalah kumpulan peralatan listrik yang berfungsi untuk menurunkan tegangan listrik dari tegangan distribusi primer 20 kV menjadi tegangan distribusi sekunder 220/380 V dan untuk mendistribusikan daya listrik kepada konsumen. Berdasarkan pemasangannya gardu distribusi dapat dibagi menjadi gardu distribusi pasangan dalam dan gardu pasangan luar sedangkan dari jenis beban yang dilayani gardu distribusi terdiri dari : gardu distribusi khusus, dan gardu distribusi kombinasi. Jika dilihat dari segi pasangan transformator, maka gardu distribusi dibagi menjadi tiga macam, yaitu :

a. Gardu tiang, yaitu gardu yang transformator dan peralatannya dipasang diatas tiang. Gardu ini cukup baik untuk transformator kecil biasanya untuk saluran pedesaan.

Gardu tiang ini terdiri dari 2 macam yaitu gardu portal dan gardu cantol.

b. Gardu kios besi, yaitu dimana transformator dan peralatannya dipasang didalam kios besi.

c. Gardu tembok, yaitu dimana transformator dan peralatannya dipasang didalam suatu bangunan atau tembok tertutup. Gardu jenis ini banyak digunakan dikota-kota besar.

#### 4. Gardu hubung

Gardu hubung dalam sistem jaringan distribusi primer berfungsi untuk menyalurkan dan membagi tenaga listrik ke gardu distribusi yang tersebar diseluruh daerah beban yang dilayani dan gardu hubung ini tidak ada trafo dayanya.

Berdasarkan cara pemasangannya gardu hubung dapat dibagi menjadi dua bagian yaitu : gardu hubung pasangan dalam dan gardu hubung pasangan luar.

### D. JARINGAN DISTRIBUSI

#### 1. Macam jaringan distribusi primer

Jaringan distribusi primer dapat berupa jaringan dengan hantaran udara maupun hantaran bawah tanah. Jaringan hantaran udara dapat berupa kawat terbuka atau kawat berisolasi (kabel), sedangkan hantaran bawah tanah menggunakan kabel bawah tanah sehingga disebut underground cable.

Penggunaan kedua macam hantaran ini masing-masing mempunyai keuntungan dan kerugian tersendiri yang dapat diuraikan sebagai berikut :

a. Jaringan hantaran udara.

Keuntungan-keuntungannya :

- Sangat baik untuk daerah yang memiliki kerapatan beban ( $kV/km^2$ ) rendah, seperti didesa-desa atau pinggiran kota, karena biaya investasinya relatif lebih murah dibandingkan hantaran bawah tanah.
- Mudah dilakukan percabangan untuk perluasan.
- Mudah dalam pemeliharaan.
- Mudah dalam pemeriksaan jika terjadi kesalahan atau gangguan pada jaringan.
- Pemanfaatan tiang secara ganda dapat dilakukan, biasanya untuk pasangan trafo distribusi dan jaringan sekunder dibawahnya.
- Memiliki biaya pembangunan secara keseluruhan yang relatif lebih murah untuk daerah yang luas serta tempat yang jauh.

Kerugian-kerugiannya :

- Untuk daerah dengan kerapatan yang tinggi seperti daerah pusat kota dimana terdapat gedung-gedung tinggi, maka pemakaian jaringan hantaran udara hampir tidak mungkin.
- Ditinjau dari segi estetika, penggunaan jaringan hantaran udara kurang menunjang faktor keindahan.
- Gangguan sesaat sering terjadi, karena sambaran petir, gangguan pohon, hewan maupun manusia.

- Keamanan terhadap lingkungan yang rawan yaitu, lokasi peralatan jaringan yang dapat membahayakan makhluk hidup.

Macam hantaran udara yang dipakai PLN saat ini untuk menghantar jaringan tegangan rendah menggunakan aluminium twisted kabel (penghantar berisolasi dipilin) sedangkan untuk penghantar tegangan menengah menggunakan AAAC (All Aluminium Alloy Conductor)

b. Jaringan kabel bawah tanah (underground cable)

Keuntungan-keuntungannya :

- Sangat baik digunakan untuk daerah yang memiliki kerapatan beban yang tinggi, baik ditinjau dari segi keamanan maupun keindahan.
- Dapat terhindar dari gangguan pohon, sambaran petir, maupun gangguan oleh manusia.

Kerugian-kerugiannya :

- Gangguan pada jaringan bersifat permanen biasanya sering terjadi pada sambungan.
- Sulit dilakukan perluasan, karena letak kabel yang berada dibawah tanah, jalan-jalan atau bangunan.
- Harga kabel lebih mahal dibandingkan dengan kawat udara.

Pada jaringan kabel bawah tanah untuk sekarang ini banyak digunakan kabel AL XPLE (Cros-linked Polyethylene)

Agar perencanaan suatu jaringan memberikan suatu hasil yang optimal, maka pertimbangan-pertimbangan tadi

perlu diperhatikan. Akan tetapi jika pemasangan jaringan hantaran udara mungkin dilakukan, biasanya dapat memberikan hasil yang optimal terutama dari segi biaya.

## 2. Bentuk jaringan distribusi primer

Jaringan distribusi mempunyai tingkat keandalan yang tergantung kepada bentuk jaringan yang digunakan dan cara pengaturan operasi serta pemeliharannya, yang pada hakekatnya direncanakan dan dipilih untuk memenuhi sifat beban dan kebutuhan.

Berdasarkan bentuk jaringannya maka jaringan distribusi primer dibagi dalam beberapa macam bentuk yaitu :

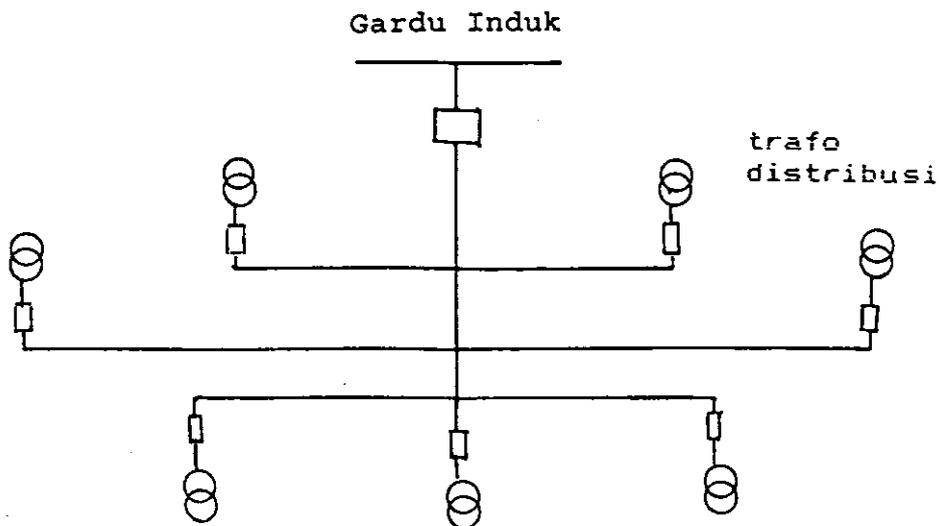
- a. Jaringan distribusi primer - radial
- b. Jaringan distribusi primer - loop
- c. Jaringan distribusi primer - grid
- d. Jaringan distribusi primer - spindel

### a. Jaringan distribusi primer radial

Jaringan distribusi primer radial merupakan sistem jaringan distribusi primer yang menyalurkan daya listrik dari satu buah sumber yaitu gardu induk ke gardu distribusi dengan menggunakan satu buah saluran atau penyaluran berasal dari satu arah saja.

Bentuk sederhana dari jaringan distribusi primer radial adalah seperti yang diperlihatkan pada gambar (1.3) dibawah ini. Jaringan primer seperti ini sangat

sederhana dalam rangkaian dan sistem pengamanannya, serta murah dalam hal biaya pembangunannya, akan tetapi tidak mampu memberikan keandalan pelayanan yang tinggi karena bila terjadi gangguan pada saluran atau feeder utama yang dekat dengan gardu induk, maka akan terjadi pemadaman atau pemutusan seluruh daerah pelayanan sampai gangguan dapat diatasi.



Gambar 1.3 Jaringan distribusi primer radial

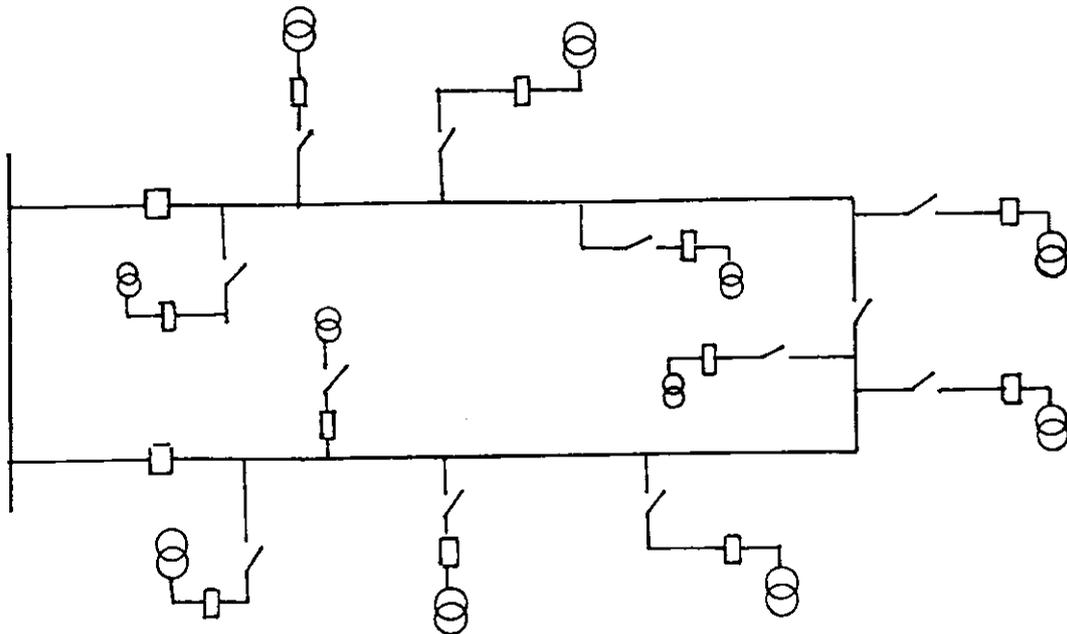
(Fink 1978. Hal 86)

b. Jaringan distribusi primer loop

Jaringan distribusi primer loop pada hakekatnya merupakan jaringan radial dengan cabang-cabangnya yang dapat dipasok dari satu tempat tetapi dari dua penyulang. Jaringan loop ini dimulai dari gardu hubung membuat loop sepanjang daerah yang dilayani dan kembali lagi ke gardu hubung. Bentuk sederhana dari jaringan distribusi primer

loop adalah seperti yang diperlihatkan pada gambar 1.4.

Jaringan primer loop mempunyai biaya investasi yang lebih mahal dari sistim radial akan tetapi mempunyai suatu pelayanan yang lebih baik, yaitu apabila terjadi gangguan pada saluran, maka beban yang terdapat pada saluran tersebut dapat dilayani dari arah lain pada saluran tersebut.



Gambar 1.4 Jaringan distribusi primer loop

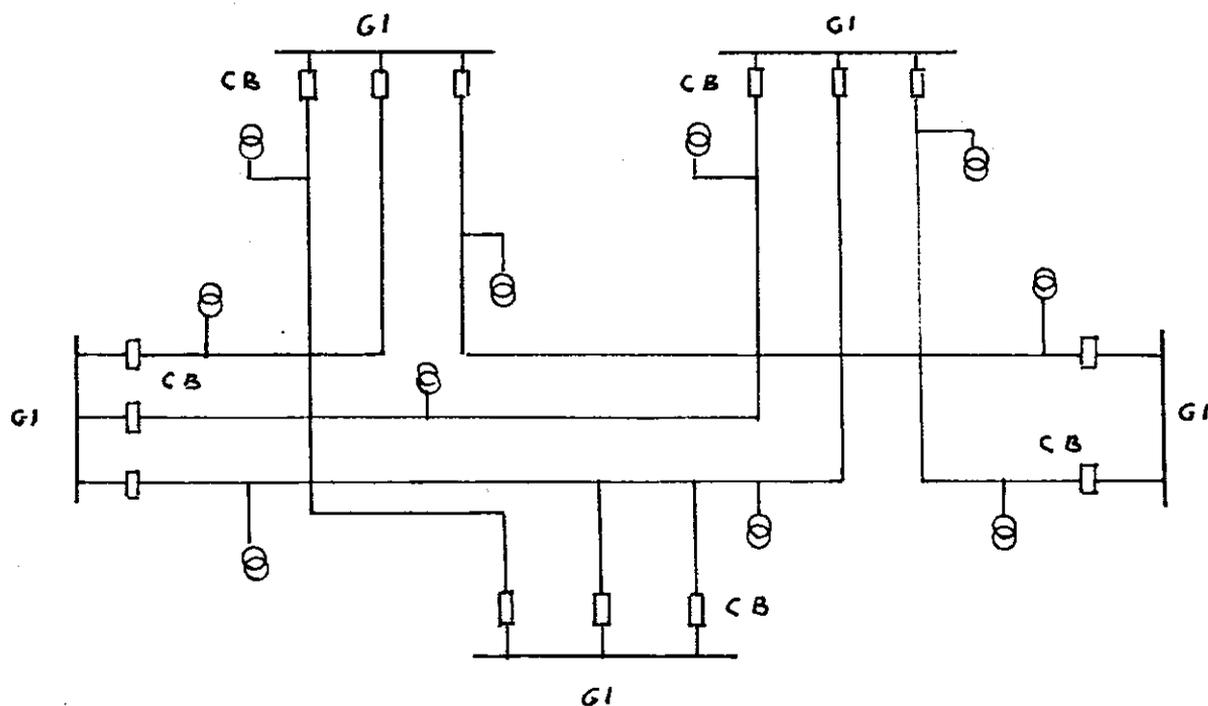
(Thompson 1980. Hal 24)

#### c. Jaringan distribusi primer grid

Jaringan distribusi primer grid ini mempunyai tingkat kontinuitas pelayanan yang lebih baik dari pada sistem loop atau radial dan sistem ini lebih fleksibel bila terjadi perluasan beban. Bentuk sederhana dari jaringan distribusi primer grid adalah seperti yang diperlihatkan

pada gambar 1.5.

Jaringan ini merupakan gabungan dari beberapa jaringan radial, didalamnya dapat terdiri dari beberapa sumber. Sistem ini dapat terbentuk jika beberapa sumber saling berinterkoneksi sehingga setiap beban mempunyai kemungkinan menerima daya dari berbagai arah.



Gambar 1.5 Jaringan distribusi primer grid

(Thompson 1980. Hal 25)

#### d. Jaringan distribusi primer spindel

Jaringan distribusi primer spindel ini merupakan perluasan dari jaringan distribusi radial, yaitu dengan

1899/K/97 - d<sup>0</sup>(2)

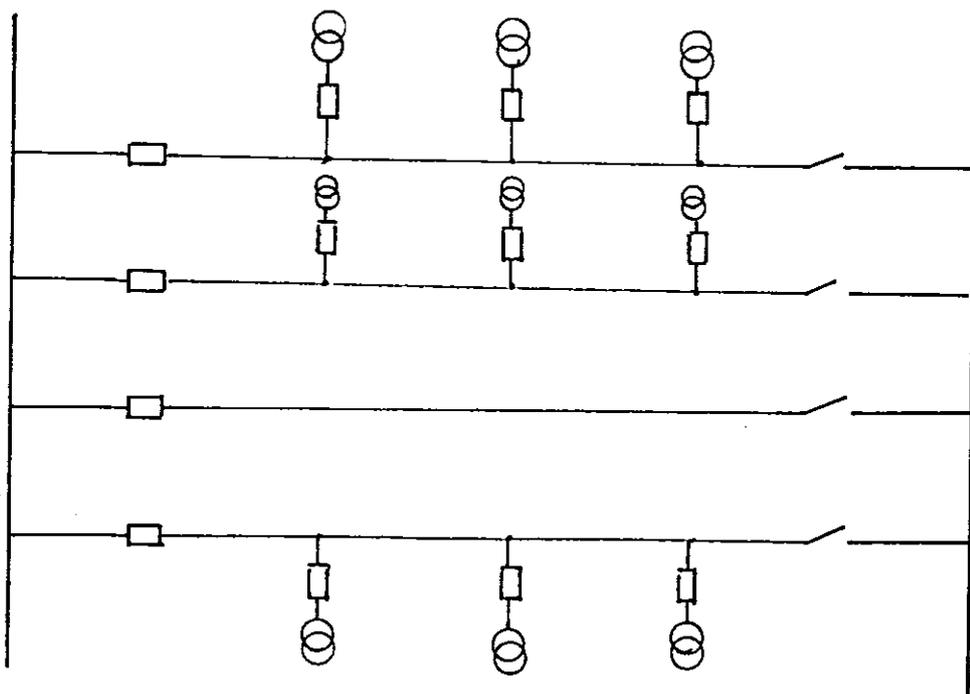
KI  
621.3191  
ASL  
10  
17

menambah lebih banyak jaringan primernya yang kesemuanya bertemu dalam satu titik yang disebut sebagai gardu hubung atau gardu refleksi. Ciri utama dari jaringan sistem ini mempunyai saluran ekspres. Adapun operasi sistem spindel ini adalah sebagai berikut :

- 1) Dalam keadaan normal semua saluran di gardu hubung terbuka sehingga semua saluran beroperasi secara radial, kecuali saluran ekspres.
- 2) Dalam keadaan normal saluran ekspres tidak dibebani dan dihubungkan dengan rel di gardu hubung dan digunakan sebagai pemasok cadangan dari gardu hubung.
- 3) Apabila salah satu seksi dari saluran mengalami gangguan maka saklar beban di kedua ujung seksi yang terganggu dibuka kemudian seksi-seksi sisi gardu induk mendapat suplai dari gardu induk sedangkan seksi-seksi sisi gardu hubung mendapat suplai dari gardu hubung melalui saluran ekspres.

Bentuk sederhana dari jaringan primer spindel ini adalah seperti yang diperlihatkan pada gambar 1.6

MILIK UPT PERPUSTAKAAN  
IKIP PADANG



Gambar 1.6 Jaringan distribusi primer spindel

(Thompson 1980, Hal 24)

#### E. BEBAN LISTRIK

Beban listrik, pada umumnya merupakan beban yang bersifat induktif. Daya yang dibutuhkan oleh beban induktif tersebut terdiri dari dua komponen, yaitu komponen daya/arus aktif dan komponen daya/arus reaktif. Jika beban reaktif bertambah besar, maka daya arus yang harus dikirim melalui jaringan, untuk memenuhi kebutuhan daya/arus beban, juga akan bertambah besar. Membesar rugi-rugi jaringan, yaitu 'rugi-rugi daya puncak' dan 'rugi-rugi energi'. Disamping itu akan terjadi jatuh tegangan pada

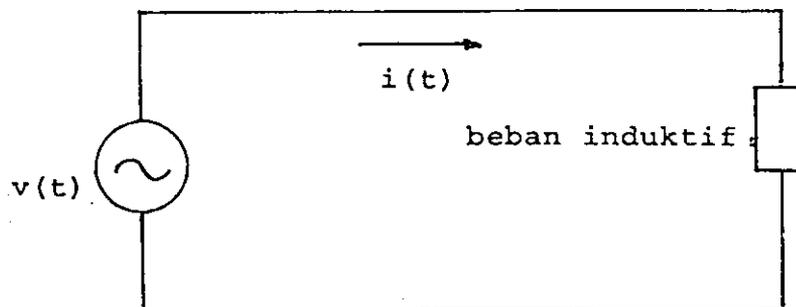
sisi beban yang relatif besar.

Untuk mengurangi rugi-rugi daya puncak dan rugi-rugi energi serta untuk memperkecil jatuh tegangan di sisi beban, maka salah satu caranya adalah dengan memasang kapasitor shunt pada jaringan.

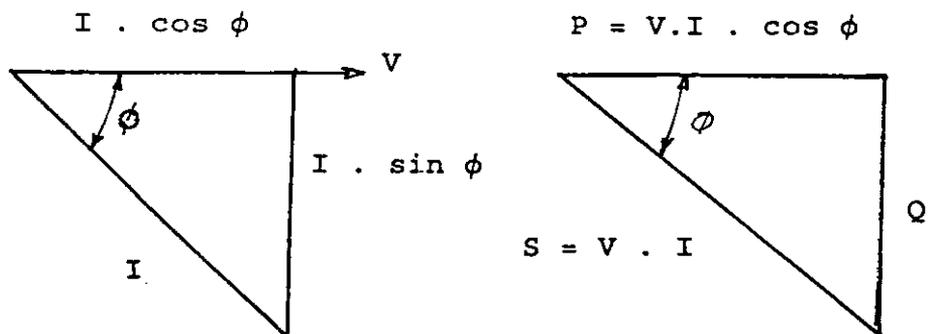
### 1. Daya Reaktif

Daya reaktif ada dua macam, daya reaktif induktif dan daya reaktif kapasitif. Kedua daya reaktif ini tidak menghasilkan kerja. Daya reaktif induktif didalam beban disimpan sebagai energi elektromagnetis, sedangkan daya reaktif kapasitif didalam beban disimpan sebagai energi elektrostatik.

Pada umumnya beban bersifat induktif, dimana beban ini membutuhkan daya aktif, selain itu juga membutuhkan daya reaktif induktif. Beban yang bersifat induktif ini mempunyai fasor arus yang terbelakang terhadap fasor tegangan.



Gambar 1.7 Hubungan sumber dengan beban induktif



Gambar 1.8 Diagram phasor tegangan dan arus beban induktif

(Turhan Gonen 1986. Hal 368)

Dengan :

$$v(t) = V_m \sin wt$$

$$i(t) = I_m \sin(wt - \phi)$$

Daya semu :

$$S = V \cdot I \quad \dots (1.1)$$

Daya aktif:

$$P = V \cdot I \cdot \cos \phi \quad \dots (1.2)$$

Daya Reaktif.

$$Q = V \cdot I \cdot \sin \phi \quad \dots (1.3)$$

Dimana :

$V_m$  = harga tegangan puncak

$I_m$  = harga arus puncak

$V$  = harga tegangan efektif

$I$  = harga arus efektif

$\phi$  = beda sudut fasa antara  $v(t)$  dan  $i(t)$

Jika fasor tegangan diambil sebagai referensi,  $V \angle 0^\circ$  maka dari persamaan (1.2) dan (1.3), terlihat bahwa fasor daya aktif akan berhimpit dengan fasor tegangan, sedangkan fasor daya reaktif akan tertinggal dari fasor tegangan sebesar  $90^\circ$ .

## 2. Pengaruh dari daya reaktif berlebih

Daya reaktif berlebih yang dimaksud disini adalah membesarnya arus reaktif yang mengalir pada jaringan, sehingga arus reaktif tersebut menyebabkan meningkatnya rugi-rugi daya puncak, rugi-rugi energi, membesarnya jatuh tegangan, dan membutuknya faktor daya serta menurunkan kapasitas penyaluran daya. Oleh sebab itu arus reaktif yang mengalir dalam jaringan sebaiknya diusahakan sekecil mungkin, dengan tujuan untuk mengurangi akibat yang ditimbulkan arus reaktif yang berlebihan tersebut.



## BAB II

### KAPASITOR DAYA

Fungsi yang mendasar dari pemakaian kapasitor, baik dipasang secara seri maupun paralel pada sistem tenaga elektrik adalah untuk mengontrol aliran daya reaktif(Q) dan tingkat tegangan pada titik dimana kapasitor dipasang, sehingga diperoleh manfaat yang optimum.

Kapasitor paralel melakukannya dengan merubah faktor-daya beban, yaitu dengan mensuplai kebutuhan daya reaktif beban. kapasitor seri melakukannya dengan langsung mengkompensasi reaktansi induktif pada saluran.

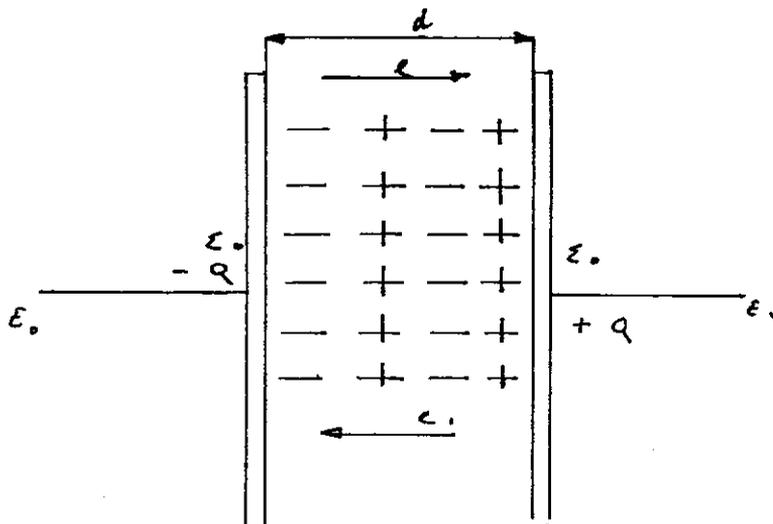
Pada sistem distribusi dari konsumen-konsumen besar, kapasitor pada umumnya dipasang paralel dengan sistem yang bertujuan untuk memperbaiki faktor daya jaringan. Meskipun demikian ada kondisi-kondisi beban tertentu yang memerlukan pemasangan kapasitor secara seri.

#### A. PRINSIP DASAR KAPASITOR.

Kapasitor dapat didefinisikan sebagai komponen elektrik yang mampu untuk menyimpan energi elektrostatik dan melepaskannya dengan kondisi yang dapat dikendalikan. Kapasitor pada umumnya terdiri dari dua plat konduktor yang dipisahkan bahan elektrik. Bahan-bahan dielektrik yang banyak digunakan antara lain: Kertas, polyester,

mika, keramik, acetat, dan polypropylene film. bahan konduktor adalah aluminium foil.

Kemampuan kapasitor menyimpan energi akibat dari penyusunan kembali (polarisasi) muatan positif dan muatan negatif dalam bahan dielektrik ketika diberi beda tegangan antara ujung-ujung elektrodanya. Karena terjadi polarisasi dalam bahan dielektrik maka timbul gaya elektromotif lawan ( $e_i$ ) yang sama dengan gaya elektromotif yang diberikan pada elektrodanya ( $e$ ). Gejala ini dapat dilihat seperti pada gambar 2.1. berikut:



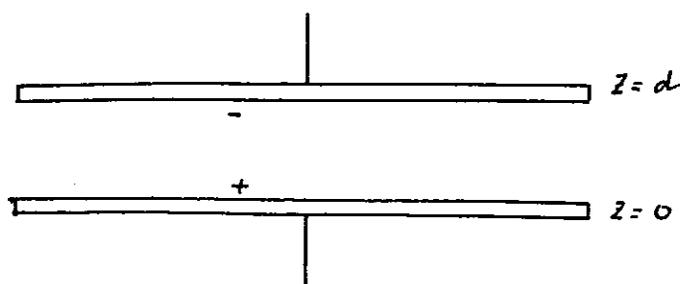
Gambar 2.1 Bahan dielektrik dalam medan serba sama

(Sudibyono 1990, Hal 60)

Kemampuan kapasitor menyimpan energi merupakan fungsi utama dalam aplikasinya.

## 1. Kapasitansi dan energi kapasitor

Kapasitansi (C) didefinisikan sebagai perbandingan dari besar muatan total dalam konduktor terhadap beda potensial antara konduktor tersebut. Misal kapasitor yang terdiri dari dua plat sejajar seperti pada gambar 2.2.



Gambar 2.2. kapasitor keping sejajar

(Sudibyono 1993, Hal 61)

$$C = \frac{Q}{V_0} = \frac{p_s \cdot S}{\left[ \frac{p_s}{\epsilon} \right] \cdot d}$$

atau

$$C = \frac{\epsilon \cdot S}{d} \quad (2-1)$$

Dimana :

C = kapasitas dalam farad (F)

S = luas permukaan plat(m)

d = jarak antara plat konduktor (m)

$p_s$  = rapat muatan pada plat konduktor (Q/m)

$V_0$  = beda tegangan antara plat konduktor (V)

$\epsilon$  = konstanta dielektrik bahan

Dari persamaan 2-1 terlihat bahwa kapasitansi tidak bergantung dari harga potensial (V) dan muatan total (Q), karena rasionya tetap. Jika kerapatan muatannya bertambah dengan faktor N, maka kerapatan fluks listriknya juga bertambah dengan faktor N, demikian juga beda potensialnya. Jadi kapasitansi hanya merupakan fungsi dari dimensi fisis sistem susunan plat konduktor dan permivitas dari bahan dielektrik yang digunakan. Energi total yang tersimpan dalam kapasitor dapat dinyatakan sebagai berikut :

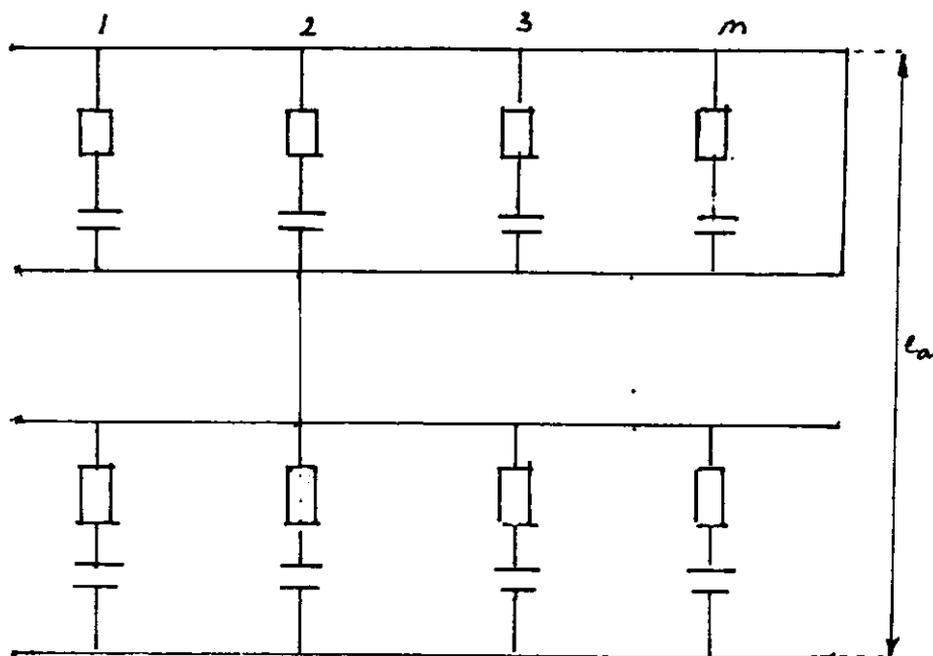
$$W_E = 1/2 CV^2 = 1/2 QV \quad (2-2) \quad \dots\dots\dots 2-2$$

dari persamaan tersebut terlihat bahwa kemampuan penyimpanan energi berbanding kuadrat dari tegangan kerjanya dan berbanding lurus terhadap kapasitansinya.

## 2. Kapasitor seri dan paralel

Untuk memenuhi kapasitansi yang diperlukan dapat dilakukan dengan menyusun beberapa kapasitor secara paralel dimana kapasitansi total sama dengan jumlah kapasitansi yang diparalel. Hal ini mudah dimengerti

karena dengan menghubungkan kapasitor secara paralel akan memperbesar luas plat sehingga kapasitansinya semakin besar (berbanding lurus terhadap luas penampang). Sedangkan untuk memperoleh tegangan kerja kapasitor yang lebih tinggi dapat dilakukan dengan menyusun beberapa kapasitor secara seri. Jadi dengan mengkombinasikan hubungan kapasitor secara paralel dan seri dapat diperoleh kapasitas kVAR yang lebih besar dan tegangan kapasitor kerja yang lebih tinggi.



Gambar 2.3 Hubungan Kapasitor Seri-Paralel

(Turan Gonen 1986. hal 392)

## B. LOKASI PEMASANGAN KAPASITOR

Pemilihan dan penempatan kapasitor pada area konsumen-Konsumen besar dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain panjang dan jenis saluran, variasi pola pembebanan, jenis dan distribusi beban dan faktor dayanya.

Pada umumnya pemasangan kapasitor pada jaringan distribusi konsumen dapat dilakukan pada :

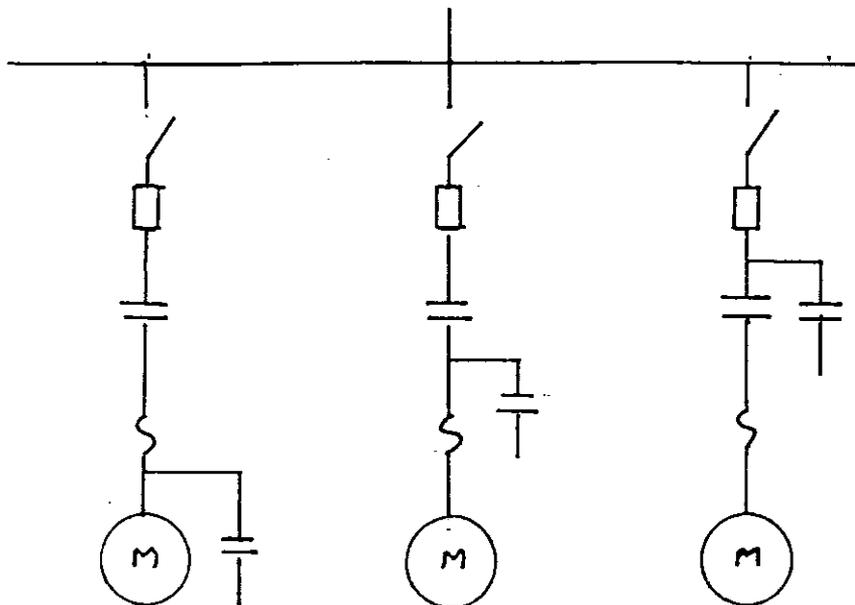
1. Langsung pada beban (kompensasi sendiri)
2. Pusat kendali beban (kompensasi kelompok)
3. Gerbang masuk pelayanan (kompensasi terpusat)

### 1. Pemasangan langsung pada beban

Pada beban-beban besar dan transformator yang dioperasikan hampir terus menerus, pemasangan kapasitor langsung pada beban bisa lebih ekonomis. Pertimbangan-pertimbangan lain yaitu :

- a. Diperoleh pengurangan rugi-rugi dan kapasitas pembebanan peralatan yang terhubung pada saluran antara beban (titik pemasangan) kapasitor sampai pada sumber pembangkit daya yang maksimum.
- b. Kenaikan tegangan pada beban dapat memberikan performansi yang lebih baik pada kerja motor dan peralatan-peralatan yang peka terhadap penurunan tegangan.
- c. Kapasitor dapat dihubungkan langsung dengan beban, jadi kapasitor dioperasikan dan dimatikan bersama beban.

Kerugian yang timbul dengan pemasangan kapasitor langsung pada beban yaitu : memerlukan biaya instalasi yang lebih besar, kompensasi kapasitor tidak berguna bila motor tidak beroperasi, bahaya kompensasi lebih pada saat pemutusan beban. Lokasi pemasangan langsung pada beban seperti pada gbr. 2.4.



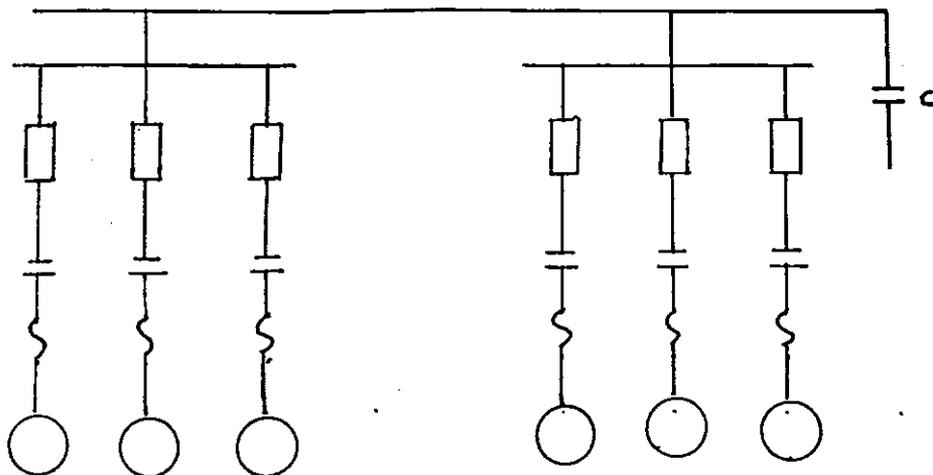
Gambar 2.4 pemasangan kapasitor langsung pada beban

(Seelye, 1982, Hal 87)

## 2. Pemasangan pada pusat kendali beban

Untuk sekumpulan beban yang kecil dan beroperasi secara simultan, kapasitor dapat ditempatkan pada pusat kendali beban (pada bus subdistribusinya) untuk kompensasi kebutuhan daya reaktif beban-beban yang terhubung pada bus tersebut.

Pemasangannya seperti pada gambar 2.5.



Gambar 2.5 Pemasangan kapasitor kompensasi bersama

(Seelye, 1982, hal 88)

Keuntungan-keuntungan yang diperoleh : Pemasangan lebih sederhana, biaya instalasi lebih murah. Kerugian pembebanan saluran dan peralatan yang terhubung antara bus lokasi pemasangan kapasitor dan beban tetap besar.

### 3. Pemasangan pada gerbang masuk pelayanan

Pemasangan kapasitor yang ditempatkan pada gardu distribusi sebelum energi elektrik didistribusikan ke masing-masing gardu subdistribusi, mempunyai keuntungan yaitu : biaya instalasi dan kVAR kapasitor paling rendah, dan pemasangan sangat sederhana.

Kerugiannya yaitu pembebanan peralatan-peralatan yang terhubung pada saluran antara bus lokasi pemasangan kapasitor sampai beban tetap besar. Jadi tidak diperoleh pengurangan pembebanan saluran dan peralatan pada jaringan distribusi di area yang dimiliki konsumen tersebut.

#### 4. Penempatan kapasitor berdasarkan tegangan kerja sistem

Dilihat dari tegangan kerjanya, kapasitor pada sistem jaringan distribusi pada instalasi pelanggan dikelompokkan menjadi dua, yaitu kapasitor primer (tegangan menengah) dan kapasitor sekunder (tegangan rendah). Dari kedua jenis tersebut kapasitor primer lebih banyak digunakan.

Rating kapasitor sekunder (tegangan rendah) berkisar antara 120 sampai 600 volt dengan kapasitas kVAR kapasitor 2.5 kVAR sampai 50 kVAR. Sedangkan rating tegangan kapasitor primer antara 4.16 kV sampai 34.kV dengan kapasitas 50 kVAR sampai 400 kVAR.

Kapasitor primer lebih banyak digunakan karena biaya per kVAR lebih murah dibanding kapasitor sekunder. Perbedaan biaya per kVAR tersebut disebabkan perbedaan yang utama pada bahan dielektriknya. Untuk kapasitor primer biasanya menggunakan bahan dielektrik film dan untuk kapasitor sekunder menggunakan dielektrik kertas kraf.

Pertimbangan penggunaan kapasitor tegangan rendah (kapasitor sekunder) antara lain: untuk mengurangi kapasitas pembebanan pada transformator dan mengurangi rugi-rugi jaringan di sisi sekunder.

### C. HUBUNGAN KAPASITOR

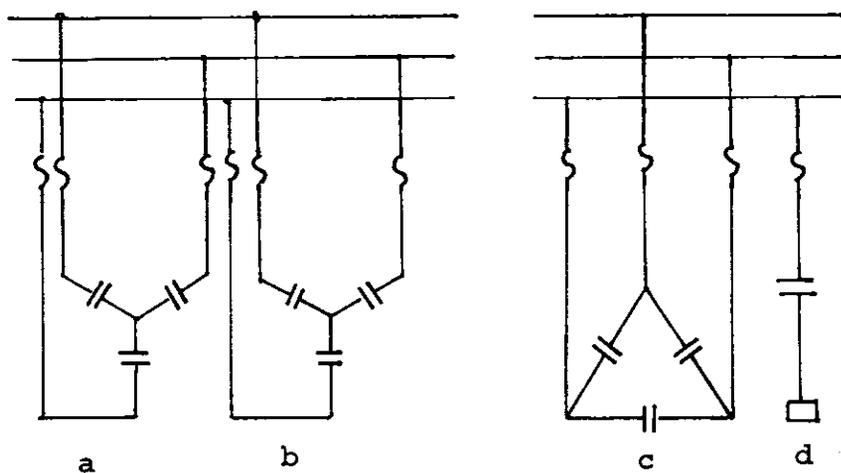
Sistem hubungan pada instalasi kapasitor ada 4 macam hubungan yaitu: hubungan bintang (Y) netral diketanahkan, hubungan Y netral tidak diketanahkan, hubungan delta, dan satu phasa netral diketanahkan. Gambar 2.6 memperlihatkan keempat hubungan tersebut.

Hubungan bintang biasanya digunakan untuk saluran primer, sedangkan hubungan delta dan satu phasa untuk saluran sekunder. Kebanyakan kapasitor daya pada saluran tegangan tinggi dihubungkan secara bintang netral diketanahkan. Dengan hubungan tersebut tingkat keselamatan lebih tinggi, operasi pengaman lebur lebih cepat bila terjadi gangguan pada kapasitor

### D. SISTIM PROTEKSI KAPASITOR BESAR:

Salah satu sifat dari kapasitor daya yaitu bila mengalami kerusakan (kegagalan) dielektrik tidak dapat diperbaiki dan harus diganti. Jadi pemasangan kapasitor pada sistem tenaga memerlukan sistem proteksi yang memadai untuk menekan sekecil mungkin kemungkinan terjadi kerusakan pada kapasitor.

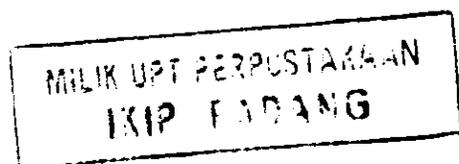
Penggunaan kapasitor paralel yang dihubungkan langsung pada jaringan tegangan menengah terdiri dari unit-unit paralel dalam kelompok tegangan rendah yang dihubungkan seri seperti yang telah diuraikan di atas. Keuntungan dengan menghubungkan paralel unit-unit kapasitor dalam satu kelompok, bila terjadi gangguan (kerusakan) pada salah satu unit kapasitor, maka arus gangguan akan melalui unit kapasitor yang terganggu tersebut sehingga unit-unit lain yang baik dari kelompok tersebut terhindar dari kerusakan.



- a : Hubungan bintang (Y) netral diketanahkan  
 b : Hubungan bintang (Y) netral tidak diketanahkan  
 c : Hubungan delta  
 d : Satu fase netral diketanahkan

Gambar 2.6 Hubungan kapasitor daya

(Turhan Gonen 1986 394)



Pada umumnya pemasangan kapasitor pada jaringan tegangan menengah dilengkapi dengan pengamanan lebur (fuse), baik pengamanan lebur unit (internal fuse) maupun pengamanan lebur kelompok (eksternal fuse).

Pemakaian pengamanan lebur ditinjau dari fungsi pengamanannya adalah sebagai berikut:

1. Melindungi unit-unit kapasitor yang masih baik dari kemungkinan kerusakan akibat gangguan pada salah satu unit.
2. Menghindarkan jaringan dari kemungkinan gagal penyaluran adanya gangguan hubungan singkat pada instalasi kapasitor sehingga tidak mengganggu kelangsungan pelayanan.

Bila ditinjau dari segi proteksi, jumlah unit-unit yang dihubungkan secara paralel dalam satu kelompok dan jumlah kelompok-kelompok kapasitor yang dihubungkan seri akan berpengaruh pada performance kerja pengamanan lebur. Jumlah unit yang diparalel terlalu sedikit atau jumlah kelompok yang diseri terlalu banyak dapat mengakibatkan pengamanan lebur bekerja lambat, sehingga ada kemungkinan kerusakan meluas ke unit-unit lain.

#### 1. Pengaman Lebur Unit (Internal Fuse)

Tujuan dari pemakaian pengamanan lebur unit pada pemasangan kapasitor adalah:

- a. Untuk memutuskan arus gangguan unit kapasitor dari rangkaian pada kapasitorbank sebelum menjalar ke unit-unit lain dan mencegah meledaknya unit kapasitor yang disebabkan timbulnya tekanan gas akibat terjadinya "internal arcing". Jadi berfungsi untuk melindungi kapasitor dari kerusakan mekanis.
- b. Agar unit-unit kapasitor yang tidak terganggu tetap bekerja karena pengurangan kapasitas output kecil sehingga dapat diabaikan.
- c. Untuk yang rusak lebih cepat diketahui dan di ganti untuk menghindari kerugian yang lebih besar akibat terganggunya operasi.

## 2. Pengaman Lebur Kelompok (External fuse)

Penggunaan pengaman lebur kelompok kurang dapat diandalkan. Hal ini disebabkan bila terjadi gangguan pada satu unit kapasitor dan pengaman lebur bekerja maka seluruh unit akan lepas dari sistem. Disamping itu karena kapasitas pemutusannya lebih besar dari kapasitas pengaman lebur unit, maka bila ada gangguan hubung singkat untuk peleburannya lebih lama sehingga memungkinkan kerusakan menyebar pada unit-unit yang lain.

### 3. Pemutus Tenaga

Pemutus tenaga biasanya tidak digunakan untuk melindungi kapasitor terhadap bahaya-bahaya yang mungkin timbul pada kasus gangguan hubung singkat, kecuali pemutus tenaga dilengkapi dengan pengaman lebur unit atau rele yang mengakibatkan pemutus tenaga bila timbul arus/tegangan tidak seimbang.

Pemutus tenaga dapat dipertimbangkan sebagai alat proteksi saluran dan tidak sebagai alat proteksi terhadap arus gangguan yang besar pada unit kapasitor tunggal. Jadi pemutus tenaga diperhitungkan sebagai proteksi cadangan bila terjadi kegagalan operasi pengaman lebur.

### 4. Sistem DSH

Hal penting yang perlu diperhatikan adalah timbulnya gas pada saat terjadi kenaikan suhu akibat gangguan internal. Gas yang timbul akan menaikkan tekanan internal yang dapat meledakkan kapasitor tersebut. Pengamanan tradisional kurang efektif untuk menanggulangi hal tersebut. Menghilangkan timbulnya gas harus melibatkan cara untuk menghilangkan arus gangguan dari gulungan media dielektrik yang rusak. Pengaman eksternal dengan sekering atau pemutus tenaga kurang efektif dan hanya efektif pada kasus ekstrim seperti terjadinya hubungan singkat akibat kerusakan media elektrik, untuk itu harus ada pengaman internal pada tiap elemen kapasitor.

Saat arus gangguan lebih rendah dari arus pengenal elemen, pengaman konvensional tidak dapat mendeteksinya. Akibatnya, gas akan terus terjadi pada gulungan media dielektrik. Masalah tersebut dapat diatasi dengan sistem DSH. Cara kerja Sistem DSH sebagai berikut :

- a. *arus gangguan besar* Untuk gangguan jenis ini digunakan sekering yang akan mengukur arus gangguan dan membandingkannya dengan nilai maksimum yang diperbolehkan untuk medium dielektrik. Bila nilai tersebut tercapai, sekering akan putus sehingga aliran suplai ke gulungan media dielektrik tabung terputus.
- b. *arus gangguan rendah* Untuk itu dalam tabung kapasitor dilengkapi dengan pengaman tekanan internal dengan nilai maksimum tekanan yang diperbolehkan. Bila timbul gas dan kemudian tekanan di dalam tabung melebihi tekanan yang diperbolehkan, pengaman tekanan bekerja yang akan menghubungkan singkat elektroda-elektroda tabung kapasitor dan akhirnya akan memutuskan sekering HRC. Hal ini menjaga agar gas tidak terus timbul yang dapat menyebabkan ledakan.

BAB III  
PENEMPATAN DAN PENENTUAN  
KAPASITAS KAPASITOR

Kapasitor dapat dihubungkan secara paralel dengan setiap beban induktif yang mempunyai faktor daya rendah untuk mensuplai arus magnetasi yang diperlukan beban tersebut. Kapasitor paralel sebagai sumber daya reaktif merupakan komponen yang penting untuk meningkatkan efisiensi dalam sistem distribusi tenaga elektrik.

Permasalahan utama dalam pemilihan letak dan penentuan kapasitas kapasitor terdiri dari :

1. Memilih lokasi pemasangan kapasitor
2. Menentukan tipe dan kapasitas kapasitor
3. Pengaturan seting untuk pemakaian kapasitor saklar

Pemilihan lokasi pemasangan dan kapasitas kapasitor tergantung pada tujuan dari pemasangan kapasitor tersebut. Untuk mendapatkan keuntungan-keuntungan yang maksimal maka kapasitor harus dipasang pada beban baru, akan tetapi hal tersebut tidak selalu praktis dan ekonomis. Beberapa hal yang berpengaruh dalam penentuan lokasi dan kapasitas kapasitor adalah : panjang saluran, kurva pembebanan (perubahan faktor daya fungsi waktu), sifat operasi beban, dan hasil evaluasi keuntungan ekonomisnya.

Ukuran dan penempatan yang tepat dapat menghasilkan penghematan yang cukup besar.

#### A. PENGARUH KAPASITOR PADA SISTIM TENAGA

Fungsi kapasitor paralel adalah menghasilkan daya reaktif kapasitif untuk mensuplai kebutuhan daya reaktif induktif beban pada lokasi pemasangan kapasitor. Kapasitor paralel akan berpengaruh pada semua saluran dan peralatan yang ada antara sumber tenaga elektrik hingga lokasi pemasangan kapasitor akibat dari penurunan konsumsi daya reaktif.

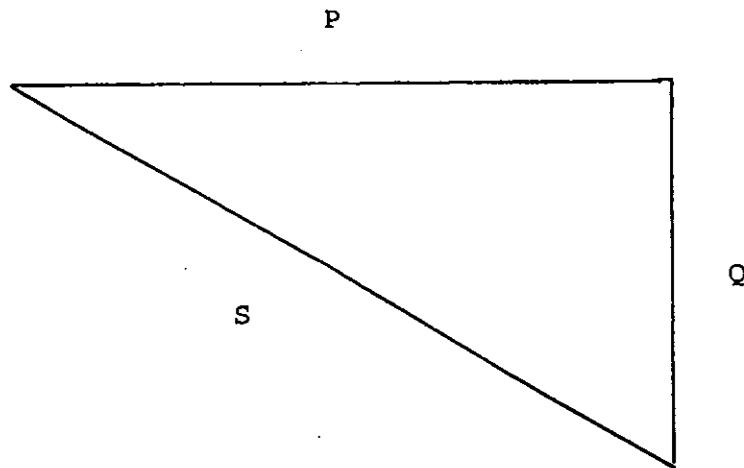
Keuntungan-keuntungannya yang diperoleh akibat dari penurunan konsumsi daya reaktif (kVAR) antara lain :

1. Perbaiki faktor daya jaringan
2. Menurunkan kapasitas pembebanan sistem
3. Mengurangi rugi-rugi
4. Menaikkan tingkat tegangan
5. Penghematan biaya pemakaian energi elektrik

Pada bagian ini akan diuraikan tentang keuntungan-keuntungan yang diperoleh dari pemasangan kapasitor dan membahas perumusan penentuan lokasi dan kapasitor dengan memperhitungkan keuntungan-keuntungan tersebut.

### 1. Perbaikan Faktor Daya ( $\cos \theta$ )

Faktor daya ( $\cos \theta$ ) dapat dinyatakan sebagai perbandingan daya aktif (kW) terhadap daya total (kVA) saluran. Gambar 3-1 menunjukkan hubungan segitiga daya antara kW, kVAR, dan kVA.

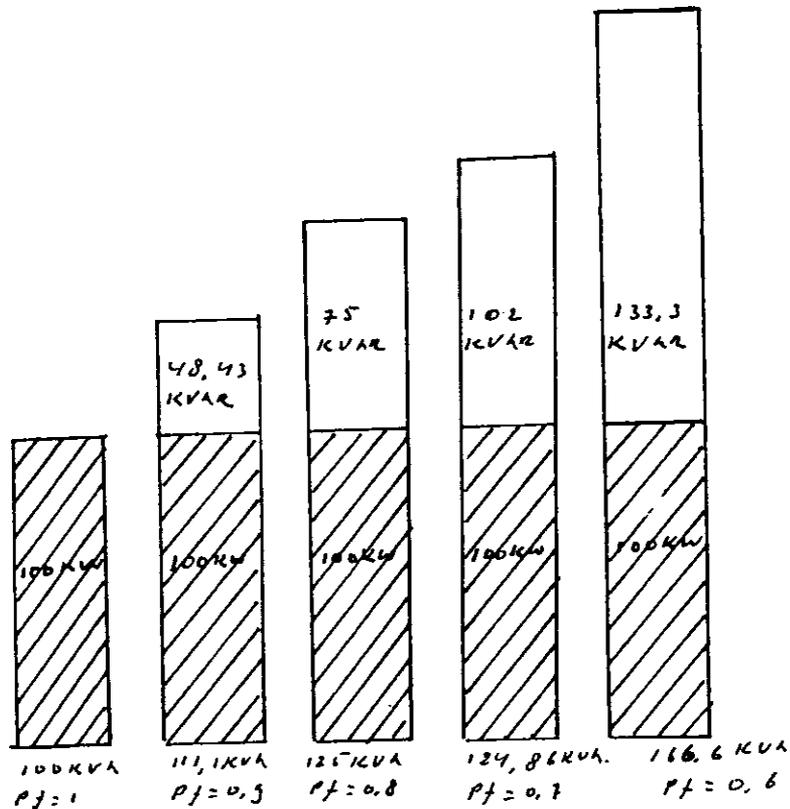


Gambar 3-1 Segitiga daya untuk beban tertentu

(Turan Gonen 1986 Hal 386)

Dengan penambahan kapasitor, komponen daya reaktif ( $Q$ ) dari daya semu ( $S$ ) beban dapat dikurangi atau dihilangkan.

Gambar 3-2a menggambarkan bagaimana komponen daya reaktif dan daya semu bertambah akibat penurunan faktor daya pada harga daya aktif konstan.

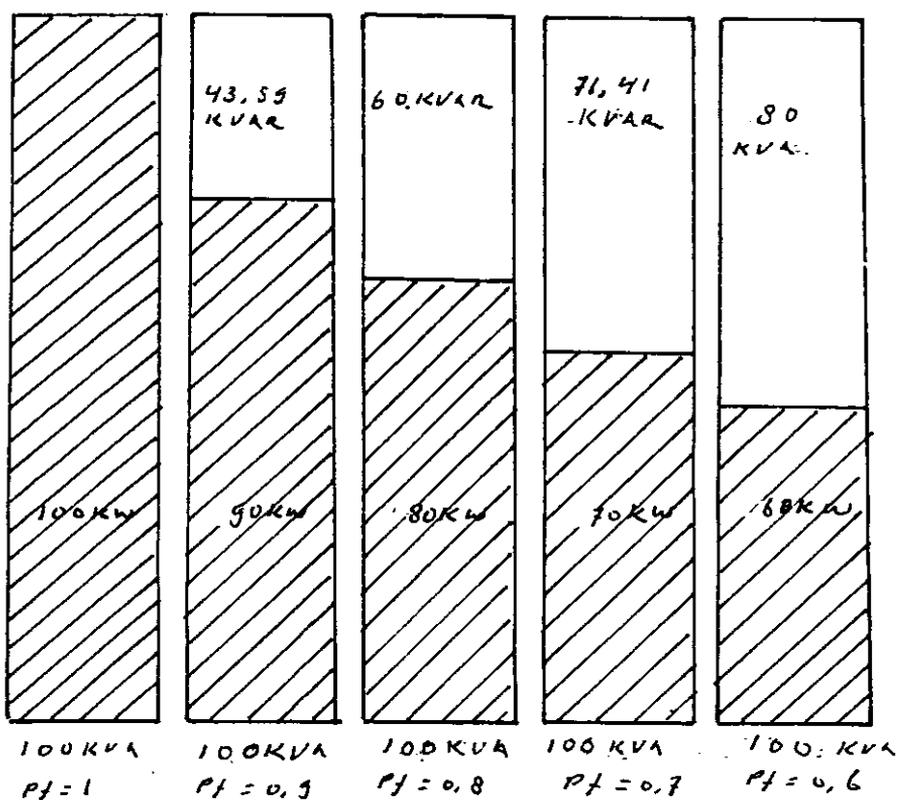


Gambar 3-2a Ilustrasi perubahan Q dan S sebagai fungsi  $\cos \theta$  pada P konstan

(Turan Gonen 1986 Hal 386)

Seperti ditunjukkan pada gambar 3-2a, perubahan  $\cos \theta = 1$   $\cos \theta = 0.8$  mengakibatkan kenaikan 25% daya total saluran. Pada  $\cos \theta = 0.8$  diperlukan kapasitor 75 kVAR untuk menghilangkan kebutuhan daya reaktif induktif.

MILIK UPT PERPUSTAKAAN  
IKIP FABANG

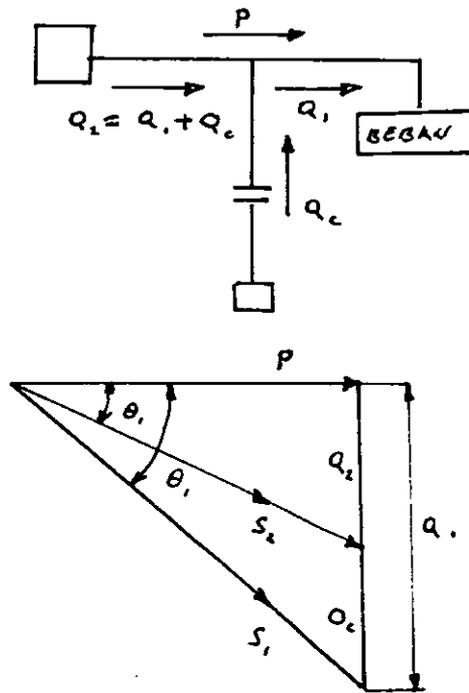


Gambar 3-2b Ilustrasi perubahan P dan Q sebagai fungsi  $\cos \theta$  pada S konstan

(Turan Gonen 1986 Hal 386)

Gambar 3-2b menggambarkan penurunan daya aktif yang dapat dimanfaatkan pada daya total yang konstan akibat penurunan faktor daya pada kVA konstan. Terlihat bahwa dengan sumber kVA yang konstan faktor daya yang rendah mengakibatkan penurunan efisiensi pemanfaatan daya aktif.

Gambar 3-3 menunjukkan pengaruh pemasangan kapasitor terhadap perbaikan faktor daya saluran.



Gambar 3-3 Ilustrasi perbaikan faktor daya

(Turhan Gonen 1986 Hal 387)

Seperti terlihat dalam gambar 3-3, kapasitor mengalirkan daya reaktif ( $Q_c$ ) untuk mensuplai kebutuhan daya reaktif beban. Asumsi bahwa beban disuplai dengan daya aktif ( $P$ ), daya reaktif induktif ( $Q_c$ ), dan daya total ( $S_1$ ), maka faktor dayanya adalah :

$$\cos \theta_1 = \frac{P}{S_1} = \frac{P}{\sqrt{(P^2 + Q_1^2)}} \dots\dots\dots 3.1$$

Jika kapasitor  $Q_c$  (kVAR) dipasang pada beban, faktor daya dapat diperbaiki dari  $\cos \theta_1$  menjadi  $\cos \theta_2$ , yaitu :

$$Q_c = P \cdot (\operatorname{tg}\theta_1 - \operatorname{tg}\theta_2) \dots\dots\dots 3.2$$

dimana :

$P$  = daya aktif (kW)

$Q_1, Q_2$  = daya reaktif (kVAR)

$S_1, S_2$  = daya total (kVA)

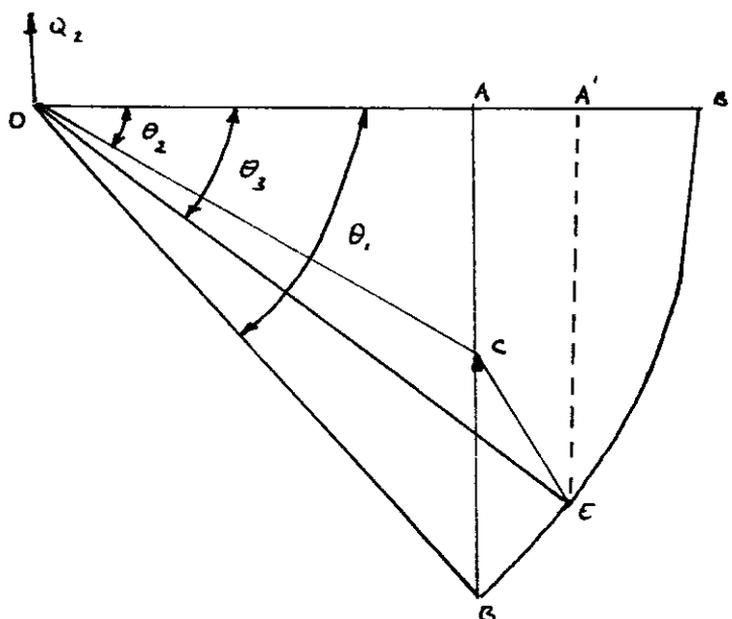
$Q_c$  = daya reaktif kapasitif (kVAR)

Dari gambar 3-3 terlihat bahwa dengan memasang kapasitor ( $Q_c$ ) terjadi penurunan  $Q_1$  dan  $S_1$  menjadi  $Q_2$  dan  $S_2$  yang berarti penurunan arus reaktif menyebabkan penurunan total sehingga mengakibatkan penurunan bagi rugi-rugi daya saluran. Jadi perbaikan faktor daya akan menghasilkan penghematan-penghematan melalui pengurangan kapasitas sistem dan penurunan rugi-rugi daya dalam semua saluran dan peralatan antara titik pemasangan kapasitor dan sumber pembangkit meliputi : saluran distribusi, transformator, dan saluran transmisi.

## 2. Menurunkan Kapasitas Pembebanan Sistem

Pada pembahasan sebelumnya telah diuraikan bahwa perbaikan faktor daya dapat menurunkan kapasitas pembebanan sistem. Pemasangan kapasitor sebagai sumber daya reaktif pada jaringan menyebabkan pengurangan arus

total dari sumber daya. Penurunan arus total berarti penurunan pembebanan pada transmitor, peralatan, dan saluran yang menghubungkan sumber pembangkit ke lokasi pemasangan kapasitor, jadi kapasitor dapat digunakan untuk mengurangi pembebanan dari peralatan yang ada, jika peralatan belum terbebani penuh maka pemasangan kapasitor memungkinkan untuk menambah beban pada jaringan sehingga besar kVA tetap semula (sebelum dikompensasi). Besar beban yang dapat ditambahkan hingga pembebanan mencapai kapasitas semula disebut "Released Thermal Capacity". Perhitungan jumlah pengurangan kapasitas pembebanan yang diperoleh dari perbaikan faktor daya dapat dijelaskan secara grafis seperti pada gambar 3-4.



Gambar 3-4 Diagram beban untuk perbaikan faktor daya.

(Seelye 1982 Hal 120)

Keterangan :

- OB = KVA beban  
 OA = kW beban  
 BC = Jumlah kapasitas kapasitor  
 CE = Released Thermal Capacity ( $T_c$ )  
 Cos  $\theta_1$  = Faktor daya sebelum dipasang kapasitor  
 Cos  $\theta_2$  = Faktor daya setelah dipasang kapasitor  
 Cos  $\theta_3$  = Faktor daya setelah penambahan beban dengan faktor daya Cos  $\theta$ .

Total kVA tidak boleh melebihi beban semula (OB =kVA) beban sebelum pemasangan kapasitor). Jadi lengkung BB' merupakan batas kVA beban maksimum. Jika dipasang kapasitor sebesar OF = BC (kVAR) maka besar Released Thermal capacity dapat ditentukan dengan cara-cara berikut :

a. *Secara Grafis*

Diukur sesuai dengan perbandingan skala besar kapasitor yang dipasang, OF = BC kVAR, sehingga konsumsi kVAR sistem menjadi AC = AB-BC dan pembebanan sistem = OC yang juga dapat dihitung besar sudutnya ( $\theta_2$ ). Dari titik C ditarik garis sejajar OB yang memotong lengkung BB' di titik E. Maka Released thermal capacity,  $T_c = CE$  dan  $OC + CE = OE = OB$

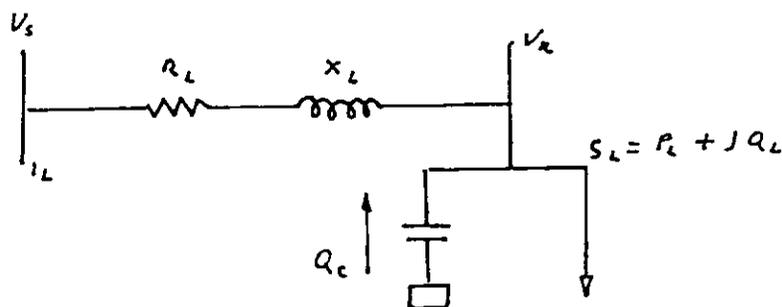
b. Secara Matematis

Besar  $T_C$  dapat dihitung dengan persamaan matematis sebagai berikut :

$$T_C = \text{kVA} \cdot \left[ \frac{Q_C \cdot \sin \theta_1}{\text{kVA}} - 1 \sqrt{1 - (\cos^2 \theta \cdot Q_C^2) / \text{kVA}^2} \right]. \quad 3.3$$

3. Mengurangi Rugi-rugi Saluran

Rugi-rugi daya saluran,  $P_R$  (kW) adalah daya yang didedipasikan saluran dalam bentuk panas. Besar daya ini sebanding dengan hasil kali kwadrat arus saluran ( $I_L$ ) dan tahanan saluran ( $R_L$ ). Analisis saluran sehubungan dengan penggunaan kapasitor dapat ditunjukkan dalam penghematan yang diperoleh akibat penurunan rugi-rugi saluran. Secara sederhana diagram satu garis pembebanan saluran dapat digambarkan sebagai berikut :



Gambar 3-5 Diagram satu garis pembebanan saluran

(Seelye 1982 Hal 124)

MILIK UPT PERPUSTAKAAN  
IKIP PADANG

Rugi-rugi ( $P_R$ ) dihitung dari beban  $S_L$  (kVA) pada saluran tersebut yang menghasilkan rugi-rugi total saluran.

$$P_R = \frac{R_L \cdot S_L^2}{1000 \cdot V_R^2} = \frac{R_L \cdot (P_L^2 + Q_L^2)}{1000 \cdot V_R^2} \dots\dots\dots 3.4$$

Dimana :

- $P_R$  = rugi-rugi saluran per fasa (ohm/fasa)
- $P_L$  = daya aktif beban (kW)
- $R_L$  = Resistansi saluran (ohm)
- $Q_L$  = Kapasitas Kapasitor (kVA/fasa)
- $S_L$  = beban total saluran (kVA)
- $Q_C$  = kapasitas kapasitor (kVAR)
- $V_R$  = tegangan fasa netral (kV)

$P_L$  yang berhubungan dengan rugi-rugi adalah jumlah pemakaian daya beban yang tidak dapat diturunkan dengan pemasangan kapasitor. Rugi-rugi yang dihitung dari beban  $Q_L$  adalah akibat konsumsi daya reaktif beban. Daya reaktif dapat bernilai positif (akibat beban-beban induktif, atau negatif dalam bentuk kapasitor daya yang dapat dipasang pada saluran untuk memenuhi kebutuhan daya reaktif induktif beban.

Karena rugi-rugi saluran sebanding dengan  $S_L$  kwadrat maka rugi-rugi sebanding dengan  $Q_L$  kwadrat bila  $P_L$  dianggap konstanta. Hal tersebut ditunjukkan dalam persamaan

$$\delta P_R = \delta Q_L^2 \dots\dots\dots 3.5$$

persamaan di atas secara tidak langsung menyatakan bahwa perbaikan rugi-rugi untuk beban tertentu tidak tergantung dari beban  $P$  tetapi tergantung pada pengurangan kVAR.

Dengan pemasangan kapasitor maka rugi-rugi pada saluran tersebut menjadi

$$P_R = \frac{R_L [(P_L^2 + (Q_L - Q_C)^2)]}{1000 \cdot V_R^2} \dots\dots\dots 3.6$$

Penghematan yang diperoleh adalah perbedaan besar rugi-rugi sebelum dan sesudah pemasangan kapasitor yang dinyatakan sebagai

$$\delta P_R = P_R - P_R' = \frac{R_L \cdot [Q_L^2 - (Q_L - Q_C)^2]}{1000 \cdot V_R^2} \dots\dots\dots 3.7$$

Dari persamaan tersebut terlihat bahwa penghematan yang diperoleh dengan kompensasi sebanding dengan kwadrat perbedaan  $(Q_L - Q_C)$ . Persamaan di atas merupakan konsep

yang penting untuk memahami penghematan yang didapat dari pemasangan kapasitor untuk mengoreksi beban-beban induktif tapi juga menentukan berapa tinggi rugi-rugi yang dapat terjadi dari pemilihan penempatan dan kapasitor yang tidak benar.

Untuk saluran radial yang lebih dari satu bus beban perhitungan didapatkan dengan pendekatan sebagai berikut :

$$\delta(P_{Ri}) = \frac{t^2}{Q_{Lkom}^2} \cdot (\delta(P_{Ri}) = \frac{t^2}{Q_{Lkom}^2} (Q_{Lkom}^i - Q_{ckom}^i)^2 \cdot R_i / (1000 \cdot V_i^2) \dots 3.8$$

dimana :

$\delta(P_{Ri})$  = Penurunan rugi-rugi seksi ke-i

$Q_{Lkom}^i$  = Jumlah pembebanan kVAR total di saluran ke-i

$Q_{ckom}^i$  = Jumlah kVAR kapasitor total yang dipasang antara bus i ke beban-beban

#### 4. Menaikan Tingkat Tegangan

Faktor daya yang rendah akan mengakibatkan drop tegangan yang besar. Pemasangan kapasitor pada saluran dapat menurunkan besarnya drop tegangan. Drop tegangan yang terjadi akibat pembebanan saluran dapat dijelaskan dengan gambar 3-6.

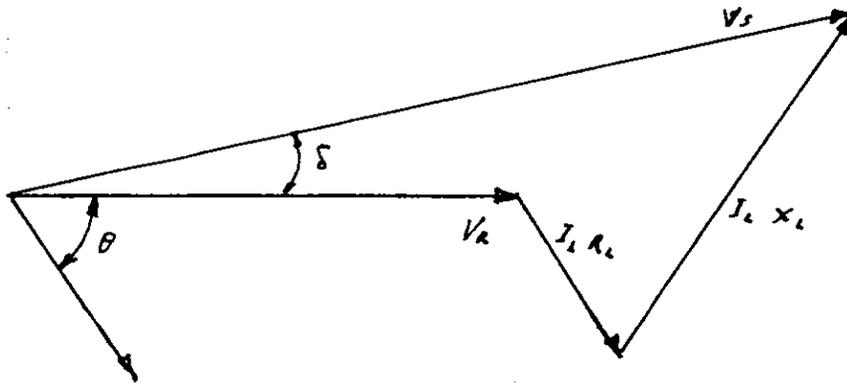
$V_R = V_R \angle 0$  sebagai referensi

$V_S = V_S \angle \delta$

$I_L = I_L \angle \theta$  maka :

$$V_S = V_R - I_L \cdot Z$$

$$V_S(\cos \theta - j \sin \theta) = V_R \angle 0 + I(\cos \theta - j \sin \theta) \cdot (R + jX) \dots 3.9$$



Gambar 3-6 Diagram phasor pembebanan saluran

(Seelye 1982 Hal 128)

pada umumnya  $\delta$  kecil dibandingkan  $\theta$  sehingga dapat dianggap  $\delta = 0$  dan untuk jaringan distribusi  $R$  hampir sama dengan  $X$ , maka :

$$V_S = V_R + I_L [R_L \cos \theta + X_L \sin \theta] - j [R_L \sin \theta - X_L \cos \theta] \dots 3.10$$

Jika untuk pendekatan komponen imajiner diabaikan maka didapat :

$$V_s = V_r + I_L R_L + I_x X_L \dots\dots\dots 3.11$$

$$\delta V = I_L R_L + I_x X_L$$

Pengaruh pemasangan kapasitor adalah untuk mengurangi komponen reaktif ( $I_x$ ) sebesar  $I_c$ . Jadi setelah pemasangan kapasitor drop tegangan menjadi :

$$\delta V = I_L R_L + (I_x - I_c) X_L \dots\dots\dots 3.12$$

#### 5. Penghematan Biaya Pemakaian Energi

Berdasarkan tarif daya listrik yang berlaku mulai 1993, maka untuk golongan pelanggan-pelanggan tertentu dikenakan biaya tambahan kelebihan pemakaian kVARh. Harga kelebihan pemakaian kVARh berdasarkan golongan tarif seperti pada tabel berikut :

Tabel 3-1 Harga kVARh berdasarkan golongan tarif PLN

No	Golongan Tarif	Batas Daya (kVA)	Harga Kelebihan Pemakaian kVARh (Rp/kVARh)
1.	S-4/TM	201 ke atas	120.5
2.	SS-4/TM	201 ke atas	135.5
3.	U-4/TM	201 ke atas	179.0
4.	H-3/TM	100 s/d 200	157.0
5.	H-4/TM	201 ke atas	152.5
6.	I-3/TR	14 s/d 200	121.5
7.	I-3/TM	201 ke atas	114.0
8.	I-4/TM	30000 ke atas	106.0
9.	G-4/TM	201 ke atas	125.0

Harga kelebihan pemakaian kVARh diberlakukan apabila jumlah pemakaian kVARh pelanggan yang tercatat dalam satu

bulan lebih besar dari 0.6197 kali jumlah pemakaian kWh pada bulan tersebut, sehingga faktor daya ( $\cos \theta$ ) rata-rata sebulan kurang dari 0.85.

$$kVARhp = (kVARh_1 - 0.6197 * kWh) \dots\dots\dots 3.13$$

dengan :

$kVARhp$  = jumlah pemakaian  $kVARh$  yang harus dibayar

$kVARh_1$  = jumlah pemakaian  $kVARh$  perbulan

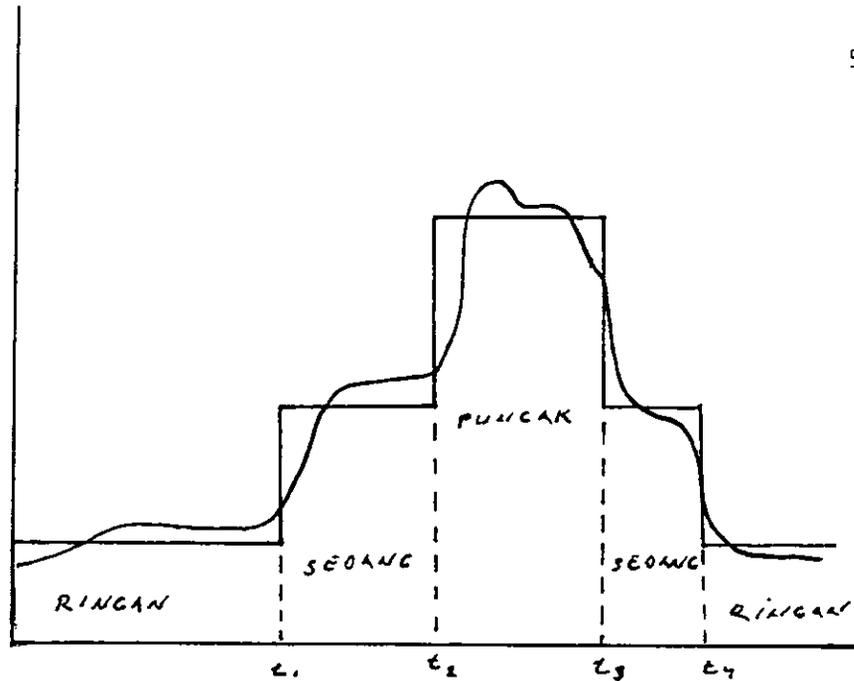
$kWh$  = jumlah pemakaian kWh perbulan

Untuk menghilangkan biaya pinalti kelebihan pemakaian  $kVARh$  maka  $\cos \theta$  rata-rata per bulan harus lebih besar atau sama dengan 0.85

## B. KURVA BEBAN...

### 1. Kurva Beban Harian

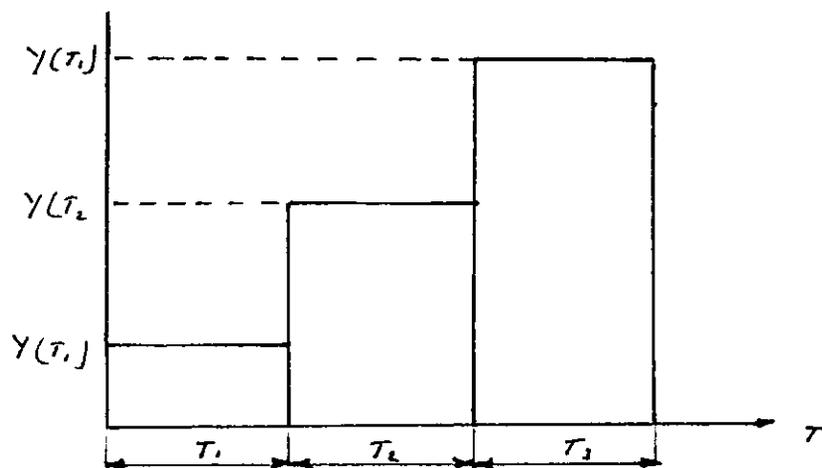
Kurva beban harian menunjukkan besarnya konsumsi daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) dari beban. Besarnya beban merupakan fungsi kontinu terhadap waktu, selanjutnya untuk mempermudah perhitungan dari kurva beban hasil pengukuran digunakan pendekatan dengan fungsi diskrit. Gambar 3-4 menunjukkan contoh kurva beban pada rentang waktu tertentu.



Gambar 3-7 Kurva beban harian  
(Yusra Sabri 1990 Hal 17)

## 2. Kurva Lama Beban (Load Duration Curve)

Perhitungan manfaat dari perbaikan daya dilakukan untuk rentang waktu perbulan, maka untuk menyederhanakan perhitungan dibuat asumsi kurva lama beban merupakan fungsi diskrit terhadap waktu.



Gambar 3-8 Kurva lama beban

(Yusra Sabri 1990 Hal 18)

Dari kurva lama beban pada gambar 3-5, untuk mendapatkan kondisi beban pada periode T tertentu maka daya beban dapat dinyatakan sebagai :

$$P_n (T) = P_n^{\text{puncak}} * Y (T_n)$$

$$Q_n (T) = Q_n^{\text{puncak}} * Y (T_n) \dots\dots\dots 3.14$$

dimana

$P_n (T)$  = Daya aktif bus beban P

$Q_n (T)$  = Daya reaktif bus beban

$P_n^{\text{puncak}}$  = Daya aktif puncak

$Q_n^{\text{puncak}}$  = Daya reaktif puncak

$Y (T_n)$  = Tingkat beban k-n

Jumlah variabel n bergantung pada kondisi variasi beban. Untuk pembahasan selanjutnya kondisi variasi beban dikelompokkan menjadi beban puncak, beban sedang, dan beban ringan.

### C. KAPASITAS KAPASITOR :

Kapasitor paralel mempunyai harga kapasitas kVAR tertentu sesuai dengan standar fabrikasi. Ukuran standar kapasitas kapasitor merupakan kelipatan bulat dari ukuran standar terkecil  $Q_0^c$ . Kapasitas kapasitor maksimum yang dapat dipasang pada suatu bus dirumuskan sebagai :

$$Q_{\text{maks}}^c = K \cdot Q_0^c \quad K = \text{bilangan bulat.} \dots\dots\dots 3.15$$

Jadi kemungkinan kapasitas pada setiap bus yang dapat dipilih adalah  $\{Q_0^c, 2Q_0^c, \dots, K^*Q_0^c\}$ .

Dengan asumsi kondisi beban dikelompokkan menjadi tiga, maka kemungkinan kapasitas kapasitor yang dapat dipasang dapat dibedakan menjadi :

1. Kapasitor tetap
2. Kapasitor Variabel

Pertimbangan pemilihan penggunaan kapasitor tetap antara lain : pemakaian pada beban-beban jaringan yang relatif konstan dan biaya instalasi yang lebih murah. Kapasitor saklar bisa digunakan pada jaringan yang mempunyai beban fluktuatif yang besar, dimana kompensasi pada tingkat beban ringan masih belum mencapai tujuan yang diinginkan.

#### 1. Kapasitor Tetap

Kapasitor tetap mempunyai kapasitas yang konstan tidak bergantung pada perubahan tingkat pembebanan jaringan.

$$Q(T_1) = Q(T_2) = Q(T_n) = \text{konstan.}$$

Pemilihan kapasitas kapasitor tetap dibatasi oleh dasar beban minimum pada lokasi pemasangan kapasitor tersebut.

## 2. Kapasitor Saklar

Kapasitas kapasitor saklar dapat diatur sesuai dengan tingkat beban. Untuk setiap lokasi pemasangan kapasitor terdapat  $n+1$  setting pengaturan kapasitor, dimana  $n$  adalah jumlah tingkat beban jaringan. Setting kapasitor pada beban puncak ( $Q^C_{maks}$ ) mempunyai kapasitas lebih besar atau sama dengan kapasitas kapasitor pada tingkat beban yang lain. Jadi ukuran nominal kapasitor ditentukan oleh ukuran kapasitor pada beban puncak.

$$Q^C(T_1) \geq Q^C(T_2) \geq Q^C(T_n)$$

Kapasitas kapasitor pada tingkat beban yang lebih besar adalah  $= k^* Q^C_0$  dimana  $Q^C_0 =$  kapasitas kapasitor terkecil dan  $k = (0,1,2, \dots, n)$ .

## 3. Biaya Instalasi Kapasitor

Biaya instalasi kapasitor meliputi harga kapasitor dan biaya pemasangan kapasitor. Untuk instalasi kapasitor tetap diasumsikan biaya pemasangan kapasitor sama dengan dua kali biaya pembelian kapasitor. Untuk instalasi kapasitor saklar, diperlukan peralatan tambahan berupa 'Reaktif Power Regulator' yang dilengkapi dengan  $\cos \theta$ -meter, Fast computer program (FCP) System, dan fasilitas pemilihan operasi otomatis dan manual.

#### D. PERUMUSAN PENERAPAN KAPASITOR

Seperti telah diuraikan pada bagian awal, ada dua alternatif pemasangan kapasitor berdasarkan tegangan kerja sistem. Pemasangan kapasitor pada bus-bus tegangan menengah (TM) dan pemasangan pada bus-bus tegangan rendah (TR). Pada pembahasan selanjutnya evaluasi pemasangan kapasitor hanya dilakukan pada pemasangan di panel distribusi utama (main Distribution Panel) tegangan rendah. Pemilihan kapasitas kapasitor maksimum pada satu lokasi pemasangan dibatasi oleh besarnya beban reaktif pada bus dilokasi tersebut, yaitu besar kapasitas kapasitor maksimum  $= k^* Q^C_0 \leq Q^L_{maks}$ .

##### 1. Fungsi Objektif Peletakan Kapasitor

Dalam menentukan lokasi pemasangan kapasitor, fungsi objektif yang diperhitungkan meliputi :

- Biaya investasi kapasitor, meliputi biaya pengadaan kapasitor dan peralatan pelengkap lainnya.
- Penghematan dari penurunan rugi-rugi sistem.
- Penghematan dari penurunan kapasitas sistem, yaitu besarnya beban yang bisa ditambahkan hingga mencapai pembebanan semula.
- Penghematan dari pengurangan biaya pinalti akibat kelebihan pemakai kVARh.

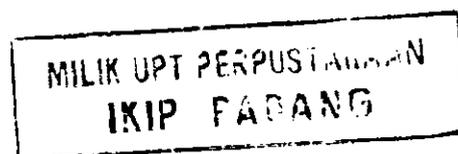
## 2. Tahap-tahap Penentuan Letak Kapasitor

Tahapan yang dilakukan dalam penentuan letak kapasitor adalah sebagai berikut :

### a. Tahap I Pemasangan Kapasitor Tetap

Peletakan kapasitor dimulai dengan meletakkan kapasitor tetap pada seluruh bus dengan kapasitas masing-masing kelipatan dari unit kapasitor terkecil dengan batas maksimum tidak lebih dari kondisi beban ringan masing-masing bus. Pertama hitung  $\cos \theta$  rata-rata sebulan pada seluruh kondisi beban setelah pemasangan kapasitor, jika  $\cos \theta > 0.85$ , langkah selanjutnya menghitung penghematan-penghematan yang diperoleh dari peletakan kapasitor tetap tersebut untuk seluruh kondisi beban. Dengan memperhitungkan biaya investasi pemasangan kapasitor dan penghematan-penghematan yang diperoleh dilakukan analisis ekonomis jangka waktu pengembalian investasi (payback period). Evaluasi selanjutnya melepas kapasitor yang terdekat dengan gardu masuk PLN, dengan cara yang sama dilakukan perhitungan  $\cos \theta$  dan penghematan yang diperoleh untuk kondisi pemasangan tersebut. Langkah selanjutnya mengurangi jumlah kapasitor hingga batas  $\cos \theta$  lebih besar atau sama dengan 0.85 tidak terpenuhi. Jadi evaluasi hanya dilakukan untuk kombinasi yang menghasilkan  $\cos \theta$  minimum sebesar 0.85.

$$\begin{aligned} PP_{\min} &= PP_1 \\ \Delta PP_n &= PP_n - PP_{n-1} \dots\dots\dots 3.16 \end{aligned}$$



Selanjutnya hasil perhitungan jangka waktu pengembalian investasi dibandingkan untuk setiap kompensasi bus hingga diperoleh nilai yang paling minimum untuk pemasangan kapasitor tetap dengan cara sebagai berikut :

Jika  $\delta PP_n$  = berharga positif maka dilakukan perbandingan nilai  $PP_{min}$  nilai  $PP$  selanjutnya. Sedangkan jika harga negatif langkah selanjutnya menukar nilai  $PP_n$  dengan cara sebagai berikut :

$$PP_{min} = PP_n$$

#### b. Tahap II Pemasangan Kapasitor Variabel

Pemasangan kapasitor variabel diawali dengan fungsi objektif dari kombinasi peletakan satu kapasitor dengan kapasitas kapasitor maksimum tidak melebihi besar beban reaktif puncak pada lokasi pemasangan tersebut. Dengan cara yang sama dilakukan langkah-langkah evaluasi seperti pada pemasangan kapasitor tetap. Langkah selanjutnya adalah pemasangan untuk dua kapasitor variabel. Jumlah kombinasi untuk pemasangan dua kapasitor pada jaringan dengan n-buah bus lokasi pemasangan dapat dihitung sebagai berikut :

$$JK = \frac{n!}{(n-2)! \cdot 2!} \dots\dots\dots 3.17$$

Secara umum jumlah kombinasi dan n-buah bus dengan m-buah lokasi pemasangan kapasitor dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$JK = \frac{n!}{(n-m)! \cdot m!} \dots\dots\dots 3.18$$

Dengan cara yang sama seperti pada tahap I, setiap kombinasi dihitung juga periode waktu pengembalian (PP) dan dibandingkan hasilnya hingga diperoleh nilai PP minimum.

BAB IV  
PEMASANGAN KAPASITOR SHUNT PADA  
JARINGAN DISTRIBUSI

Suatu penyulangan yang mempunyai beban yang tidak merata dapat ditransformasikan menjadi suatu penyulang yang berbeban kombinasi merata dan beban terpusat dengan memakai suatu teknik, yang disebut teknik tahanan dasar. Pada kenyataannya, biasanya beban penyulang adalah beban tidak merata dan penyulang mempergunakan kawat yang penampangnya tidak sama di sepanjang penyulang. Juga penampang kawat semakin kecil dengan makin jauhnya jaringan dari gardu induk. Setelah ditransformasikan maka penyulang ekuivalen mempunyai beban kombinasi merata dan terpusat dan penampang kawat sama sepanjang jaringan.

Prinsip ekuivalensi ini adalah bahwa penyulang yang mempunyai beban yang tidak merata dan atau penampang kawat tidak sama sepanjang penyulang harus menghasilkan rugi-rugi daya puncak dan rugi-rugi energi yang sama dengan penyulang yang mempunyai beban-beban kombinasi merata dan penampang kawat yang sama sepanjang jaringan. Ekuivalensi tersebut dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\sum_{j=1}^n i_j^2 \cdot R_j = \frac{1}{3} \cdot I^2 \cdot R_{\text{dasar}}$$

Dimana :

$$\sum_{j=1}^n i_j^2 \cdot R_j = \text{rugi-rugi daya puncak jaringan tidak merata}$$

$$\frac{1}{3} \cdot I^2 \cdot R_{\text{dasar}} = \text{rugi-rugi daya puncak jaringan ekuivalen}$$

$R_{\text{dasar}}$  = Resistansi ekuivalen jaringan ber beban merata dengan sebuah beban akhir (beban terpusat).

$i_j$  = Arus reaktif pada seksi ke-j dari jaringan berbeban tidak merata.

$R_j$  = resistansi pada seksi ke-j dari jaringan berbeban tidak merata.

$I$  = arus reaktif dari penyulang berbeban kombinasi merata terpusat.

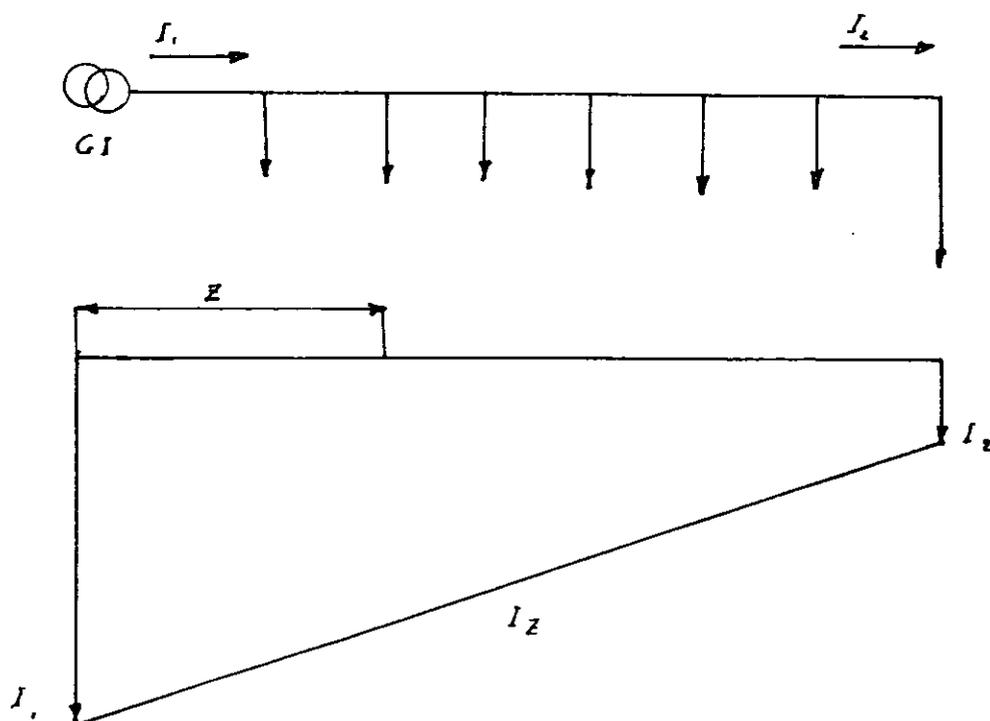
Setelah proses ekuivalen, langkah selanjutnya adalah menentukan lokasi dan ukuran optimum dari kapasitor yang harus dipasangkan, untuk mengoptimasi pengurangan rugi-rugi daya puncak dan rugi-rugi energi. Kendala yang dipakai adalah penurunan dan kenaikan tegangan pada sisi beban setelah pemasangan kapasitor. Dimana penurunan atau kenaikan tegangan tersebut tidak melebihi harga batas yang ditentukan. Kemudian dihitung perbaikan tingkat tegangan, perbaikan faktor daya dan penambahan kapasitas penyaluran daya.

Selanjutnya ditentukan penghematan maksimum, yaitu selisih antara keuntungan yang didapat dengan biaya

pemasangan kapasitor shunt. Ditentukan pula keuntungan yang didapat dengan adanya pertumbuhan beban.

#### A. PENGURANGAN RUGI RUGI DAYA PUNCAK

Rugi-rugi daya puncak sebelum adanya pemasangan kapasitor shunt, pada jaringan yang mempunyai kombinasi beban merata dan terpusat dapat dianalisis dengan bantuan gambar 4.1.



Gbr. 4.1.a Jaringan dengan beban merata dan terpusat

Gbr. 4.1.b Distribusi arus reaktif sepanjang saluran

(Turhan Gonen 1986 Hal 414)

MILIK UPT PERPUSTAKAAN  
IKIP PADANG

Persamaan arus reaktif jaringan:

$$I_z = I_1 - (I_1 - I_2) \cdot z \quad 0 \leq z \leq 1$$

Rugi-rugi daya puncak :

$$\begin{aligned} L &= 3 \int_0^1 I_z^2 \cdot R \, dz \\ &= 3 \int_0^1 [I_1 - (I_1 - I_2)z]^2 \cdot R \, dz \\ &= [I_1^2 + I_1 I_2 + I_2^2] \cdot R \text{ watt} \end{aligned}$$

dimana :

$I_1$  = arus reaktif total pada awal jaringan

$I_2$  = arus reaktif beban akhir

$I_z$  = arus reaktif jaringan

$R$  = resistansi jaringan

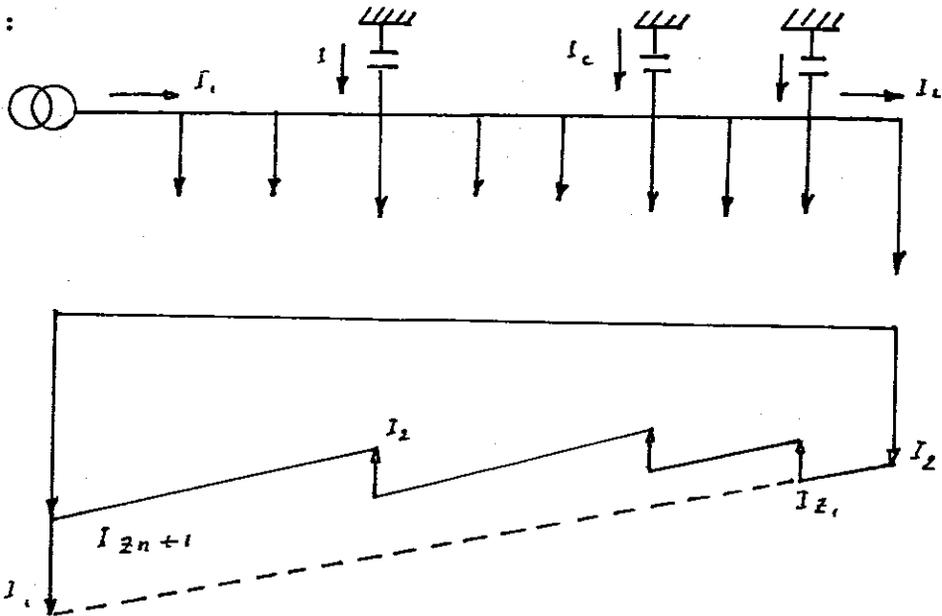
$z$  = jarak yang diukur dari gardu induk.

Jika persamaan rugi-rugi daya puncak di atas dinyatakan dalam per-unit, dimana dalam per-unit, dimana dalam perunit, harga  $R = 1 \text{ pu}$ ,  $I_1 = 1,0 \text{ pu}$  dan  $I_2$  merupakan per-unit dari  $I_1$ .

Daya dasar sistem perunit =  $R \cdot I_1^2 \times 10^{-3} \text{ kW}$ . Maka :

$$L = \left[ 1 + I_2 + I_2^2 \right] \quad (\text{pu}) \dots\dots\dots (4.1)$$

Setelah dipasang  $n$  buah kapasitor shunt pada penyulang, maka distribusi arusnya dapat digambarkan sebagai berikut:



Gambar. 4.2.a Pemasangan  $n$  buah kapasitor shunt pada jaringan

Gambar. 4.2.b Distribusi arus reaktif sepanjang jaringan

(Turani Gonen, 1986 Hal 416)

Persamaan arus reaktif sepanjang saluran :

$$\begin{aligned}
 I_{z_1} &= I_1 - (I_1 - I_2) \cdot z & a_1 < z \leq 1 \\
 I_{z_2} &= (I_1 - I_c) - (I_1 - I_2) \cdot z & a_1 < z \leq 1 \\
 I_{z_2} &= (I_1 - (n-1)I_c) - (I_1 - I_2) \cdot z & a_1 < z \leq 1 \\
 I_{z_{2n+1}} &= (I_1 - n \cdot I_c) - (I_1 - I_2) \cdot z & 0 \leq z \leq a_n
 \end{aligned}$$

Rugi-rugi daya puncak setelah pemasangan n buah kapasitor shunt, adalah :

$$\begin{aligned}
 L_{cn} &= 3R \left( \int_0^{a_n} [(I_1 - nI_c) - (I_1 - I_2)z]^2 dz \right. \\
 &+ \int_{a_n}^{a_{n1}} [(I_1 - (n-1)I_c) - (I_1 - I_2)z]^2 dz \\
 &+ \dots \dots \dots \\
 &+ \int_{a_1}^1 [(I_1 - (I_1 - I_2)z)]^2 dz \\
 &= 3R \left( [n^2 I_c^2 - 2I_1 I_c - (n-1)^2 I_c^2] a_n \right. \\
 &\quad \left. + I_c (I_1 - I_2) a_n^2 + \dots \dots \dots \right. \\
 &\quad \left. + [ (I_c^2 - 2I_1 I_c) a_1 + I_c (I_1 - I_2) a_1^2 ] \right) \\
 &+ 3R ( I_1^2 + I_1 I_2 + I_2^2 \text{ (watt)} \\
 &= 3 \left( [(n^2 I_c^2 - 2I_c - (n-1)^2 I_c^2) a_n + I_c (1 - I_2) a_n^2 \right. \\
 &\quad \left. + \dots \dots \dots \right. \\
 &\quad \left. + [ (I_c^2 - 2I_c) a_1 + I_c (1 - I_2) a_1^2 ] \right) \\
 &+ (1 + I_2 + I_2^2) \cdot R \quad \text{(pu)} \quad \dots \dots (4.2)
 \end{aligned}$$

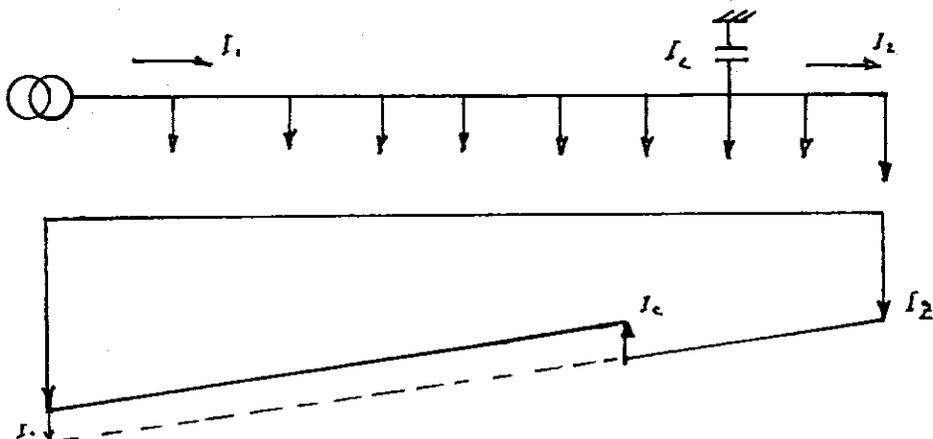
Dengan  $I_c$  merupakan per-unit dari  $I_1$ . Pengurangan rugi-rugi daya puncak dengan adanya pemasangan n kapasitor shunt, adalah :



$$\begin{aligned}
 L &= L - L_{cn} \\
 &= 3 \left[ \left\{ \frac{((n-1)^2 - n^2) I_c^2}{c} + 2 I_c \right\} a_n - I_c (1 - I_2) a \right] \\
 &\quad + \left[ \frac{(2 I_c - I_c) a_1}{c} - I_c - I_c (1 - I_2) a \right] \\
 &= 3 I_c \sum_{m=1}^n a_m [2 - a_m (1 - I_2) - (2m-1) I_c] \quad (\text{pu}) \dots\dots (4.3)
 \end{aligned}$$

Dapat diambil sebagai contoh adalah pemasangan sebuah kapasitor unit shunt. Analisis rugi-rugi daya puncak setelah pemasangan sebuah kapasitor shunt, dapat diturunkan dibawah ini. Dari gambar 4.3.b terlihat persamaan arus reaktif penyulang :

$$\begin{aligned}
 I_z &= (I_1 - I_c) - (I_1 - I_z) z && ; a \leq z \leq a \\
 I_z &= I_1 - (I_1 - I_2) z && ; a \leq z \leq 1
 \end{aligned}$$



Gambar 4.3. Pemasangan sebuah kapasitor shunt pada jaringan dan distribusi arus reaktif sepanjang Jaringan (Seelye 1982 Hal 136)

Rugi-rugi daya puncak

$$\begin{aligned}
 L_{c1} &= 3 \int_0^1 I_z^2 \cdot R \, dz \\
 &= 3R \left[ \int_0^a [(I_1 - I_c) - (I_1 - I_2)z]^2 \right. \\
 &\quad \left. + \int_a^1 [(I_1 - (I_1 - I_2)z)]^2 dz \right] \\
 &= R [I_1^2 + I_1 I_2 + I_2^2] \\
 &\quad + 3a \cdot R I_c \cdot [-2I_1 + a(I_1 - I_2) + I_c] \text{ (watt)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 L_{c1} &= (1 + I_2 + I_2^2) + 3a I_c (-2 + a(1 - I_2) + I_c) \quad (\text{pu}) \\
 &\dots\dots (4.4)
 \end{aligned}$$

Dimana  $I_2$  dan  $I_c$  merupakan per unit dari  $I_1$ . Dengan daya dasar  $RI_1^2 \times 10^{-3}$  kW.

Pengurangan rugi-rugi daya puncak setelah pemasangan sebuah kapasitor shunt, didapat dengan mengurangi persamaan 4.1 dengan persamaan 4.4. Maka didapat :

$$\begin{aligned}
 L &= L - L_{c1} \\
 &= [1 + I_2 + I_2^2] - [(1 + I_2 + I_2^2) + 3a I_c (-2 + a(1 - I_2) + I_c)] \\
 &= 3a I_c [2 - a(1 - I_2) - I_c] \quad \dots\dots (4.5)
 \end{aligned}$$

Lokasi optimum, dimana didapatkan pengurangan rugi-rugi daya puncak maksimum, pada pemasangan sebuah kapasitor shunt, dengan harga  $I_c$  tertentu, didapat dengan menurunkan persamaan 4.5 terhadap  $a$  dan menyamakan nol. Maka :

$$\frac{\partial(\Delta L)}{\partial a} = \frac{\partial}{\partial a} \left[ 3aI_c [2-a(1-I_2) - I_c] \right]$$

Sehingga didapat :

$$a_{opt} = \frac{2 - I_c}{2(1-I_2)} \quad ; \quad 0 \leq a \leq 1 \quad \dots\dots\dots (4.6)$$

Sedangkan pengurangan rugi-rugi daya puncak maksimum setelah pemasangan sebuah kapasitor, didapat dengan memasukkan persamaan 4.6 ke dalam persamaan 4.5. Sehingga didapat :

$$\Delta L_{maks} = \frac{3 I_c}{(1-I_2)} \left[ 1-I_c + \frac{I_c^2}{4} \right] \quad \dots\dots\dots (4.7)$$

Dengan mengganti  $I_c$  dengan  $K/n$ , dimana  $k$  adalah tingkat kompensasi total untuk semua kapasitor, sedangkan  $n$  adalah jumlah kapasitor, didapat :

$$L_{maks} = \frac{3 K}{(1-I_2)} \left[ (1-K) + \frac{K^2}{4} \right] \quad \dots\dots\dots (4.8)$$

Tingkat kompensasi optimum didapat dengan menurunkan persamaan 4.8 terhadap  $K$  dan menyamakan nol. Maka :

$$\begin{aligned} \frac{\partial (L_{maks})}{\partial K} &= \frac{\partial}{\partial K} \left[ \frac{3 K}{(1-I_2)} \left[ (1-K) + \frac{K^2}{4} \right] \right] \\ &= 0 \end{aligned}$$

Didapat :

$$K_{opt} = 2/3 \text{ (pu)} \quad \dots\dots\dots (4.9)$$

Rugi-rugi daya puncak optimum, pada pemasangan sebuah kapasitor shunt, didapat dengan memasukkan persamaan 4.9 ke dalam persamaan 4.8. Sehingga didapat :

$$L_{opt} = \frac{8}{9(1-I_2)} \quad (\text{pu}) \quad \dots\dots (4.10)$$

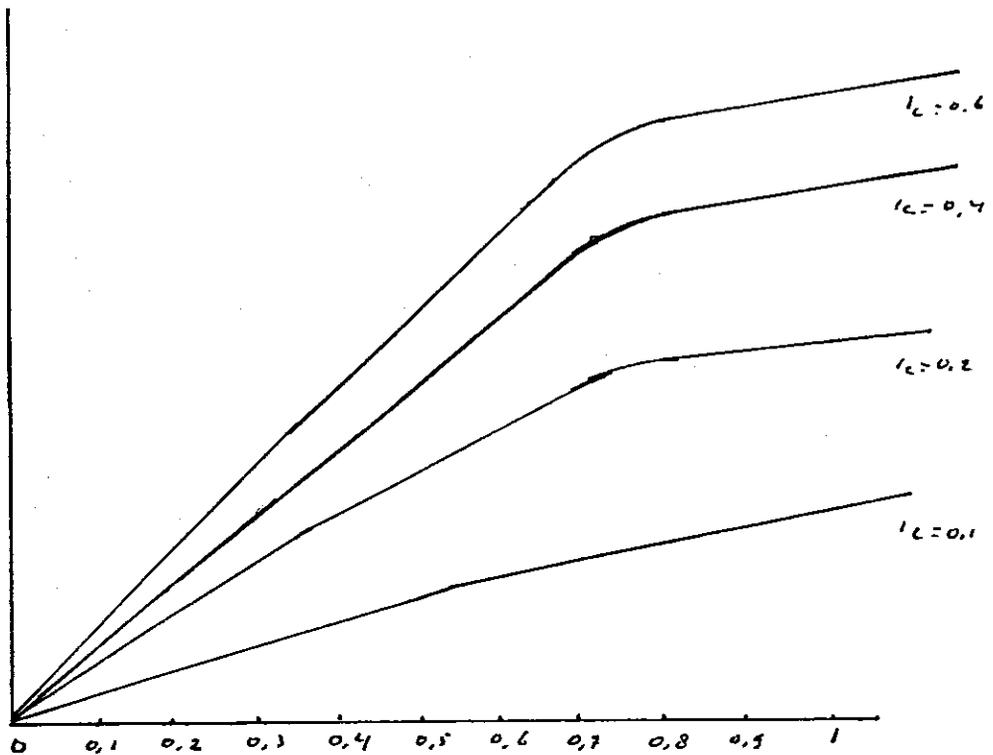
Dari persamaan 4.10 terlihat bahwa untuk harga  $I_2$  tertentu dan kapasitor diletakkan pada lokasi optimum, maka terdapat satu harga tingkat kompensasi,  $I_c$  yang memberikan harga pengurangan rugi-rugi daya puncak yang maksimum. Jika harga tingkat kompensasi tersebut diturunkan atau dinaikan, akan mengakibatkan pengurangan rugi-rugi daya puncak menjadi lebih kecil. Hal ini terlihat pada gambar 4.4.

Gambar 4.4 menunjukkan bahwa untuk suatu harga  $I_2$  dan  $I_c$  tertentu, maka hanya terdapat satu lokasi optimum, yang menghasilkan rugi-rugi daya puncak yang maksimum. Jika lokasi kapasitor tersebut diubah, maka akan terjadi penurunan pada pengurangan rugi-rugi daya puncak.

#### B. PENGURANGAN RUGI RUGI ENERGI-

Hubungan antara rugi-rugi energi dengan rugi-rugi daya puncak dapat dituliskan sebagai berikut :

$$E = L \times L_s \times T \quad (\text{pu}) \quad \dots\dots (4.11)$$



Gambar 4.4 Pengurangan rugi-rugi daya puncak, sebagai fungsi dari lokasi kapasitor, untuk  $I_2 = 0,25$

(Turhan Gonen 1986 Hal 417)

Dimana :

$E$  = rugi-rugi energi (pu)

$L$  = rugi-rugi daya puncak (pu)

$L_s$  = faktor rugi-rugi beban

$T$  = lama waktu kapasitor terpasang (jam)

Dengan diketahuinya harga faktor beban reaktif,  $F_{1d}$  maka secara pendekatan faktor rugi-rugi dapat dicari. Hubungannya sebagai berikut :

$$L_s = 0,3 F_{1d} + 0,7 (F_{1d})^2 \quad \dots\dots\dots (4.12)$$

Harga faktor beban dicari dengan membagi arus reaktif rata-rata penyulang dengan arus reaktif puncak penyulang pada suatu periode tertentu.

Pengurangan rugi-rugi energi setelah pemasangan n buah kapasitor shunt, didapat :  
.bpoff

$$\Delta E = 3I_c T \sum_{m=1}^n a_m \left[ 2F_{1d} - a_m F_{1d} (1-I_2) - (2m-1)I_c \right] \quad (\text{pu}) \quad \dots\dots (4.13)$$

Sehingga pengurangan rugi-rugi energi setelah pemasangan sebuah kapasitor shunt, didapat dengan mengganti harga n=1, dan didapat :

$$\Delta E = 3aI_c T [2F_{1d} - aF_{1d}(1-I_2) - I_c] \quad (\text{pu}) \quad \dots\dots\dots (4.14)$$

Lokasi optimum kapasitor, dimana didapatkan pengurangan rugi-rugi energi maksimum pada pemasangan sebuah kapasitor shunt, dapat dicari dengan menurunkan persamaan 3.14 terhadap lokasi kapasitor, a dan menyamakannya nol. Maka :

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\Delta E)}{\partial a} &= \frac{\partial}{\partial a} \left[ 3aI_c T [2F_{1d} - aF_{1d}(1-I_2) - I_c] \right] \\ &= 0 \end{aligned}$$

Sehingga didapat :

$$a_{\text{opt}} = \frac{2F_{1d} - I_c}{2F_{1d}(1-I_2)} \quad ; \quad 0 \leq a \leq 1 \quad \dots\dots\dots (4.15)$$

Pengurangan rugi-rugi maksimum didapat dengan memasukkan persamaan 4.15 ke dalam persamaan 4.14. Sehingga didapat hasil sebagai berikut :

$$\Delta E_{\text{maks}} = 3TF_{1d}^2 \left[ \frac{I_c}{F_{1d}} - \left( \frac{I_c}{F_{1d}} \right)^2 + \frac{1}{4} \left( \frac{I_c}{F_{1d}} \right)^3 \right]$$

$$\Delta E_{\text{maks}} = 3TF_{1d}^2 \left[ \frac{K}{F_{1d}} - \left( \frac{K}{F_{1d}} \right)^2 + \frac{1}{4} \left( \frac{K}{F_{1d}} \right)^3 \right]$$

(pu) ..... (4.17)

Tingkat kompensasi optimum didapat dengan menurunkan persamaan 4.17 terhadap K, dan menyamakannya nol. Maka :

$$\frac{\partial (E_{\text{maks}})}{\partial K} = \frac{\partial}{\partial K} \left[ 3TF_{1d}^2 \left[ \frac{K}{F_{1d}} - \left( \frac{K}{F_{1d}} \right)^2 + \frac{1}{4} \left( \frac{K}{F_{1d}} \right)^3 \right] \right]$$

$$= 0$$

Sehingga didapat :

$$K_{\text{opt}} = \frac{2}{3} F_{1d} \quad (\text{pu}) \quad \text{..... (4.18)}$$

Pengurangan rugi-rugi energi maksimum, didapat dengan memasukkan persamaan 4.18 ke dalam persamaan 4.17.

$$\Delta E_{\text{maks}} = \frac{8 \cdot F_{1d}^2 \cdot T}{9(1-I_2)} \quad (\text{pu}) \quad \text{..... (4.19)}$$

Gambar 4.5 memperlihatkan hubungan antara pengurangan rugi-rugi energi dengan tingkat kompensasi dimana kapasitor diletakkan pada lokasi optimumnya, untuk berbagai

macam harga  $I$ . Dari gambar diatas terlihat bahwa untuk harga  $I_z$  dan  $F_{ld}$  tertentu akan terdapat suatu harga tingkat kompensasi optimum, yang akan menghasilkan pengurangan rugi-rugi energi maksimum, dengan kapasitor diletakkan pada lokasi optimumnya.

Sedangkan gambar 4.6 memperlihatkan hubungan antara pengurangan rugi-rugi energi dengan tingkat kompensasi,  $I_c$ , untuk harga  $I_2$  tertentu dan berbagai harga  $F_{ld}$ . Dengan menganalisis gambar diatas terlihat bahwa :

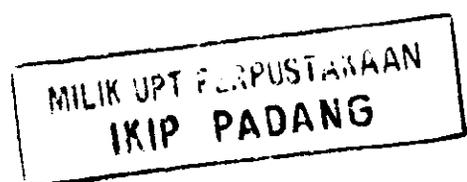
1. Setiap harga  $F_{ld}$  mempunyai tingkat kompensasi optimum, yang menghasilkan pengurangan rugi-rugi energi maksimum.
2. Untuk suatu harga tingkat optimasi, akan menghasilkan pengurangan rugi-rugi energi yang semakin besar dengan membesarnya faktor beban reaktif,  $F_{ld}$ .

### C. JATUH TEGANGAN

Pada umumnya beban membutuhkan tingkat tegangan yang baik. Dalam arti tingkat tegangan pada sisi beban tidak boleh melewati batas tegangan yang diijinkan. Jatuh tegangan tersebut biasanya tidak boleh melebihi 3% dari tegangan nominal sistem.

Jatuh tegangan pada jaringan dapat dituliskan sebagai berikut :

$$V_D = V - V_b \quad \dots\dots (4.20)$$



Dimana

$V_D$  = jatuh tegangan jaringan

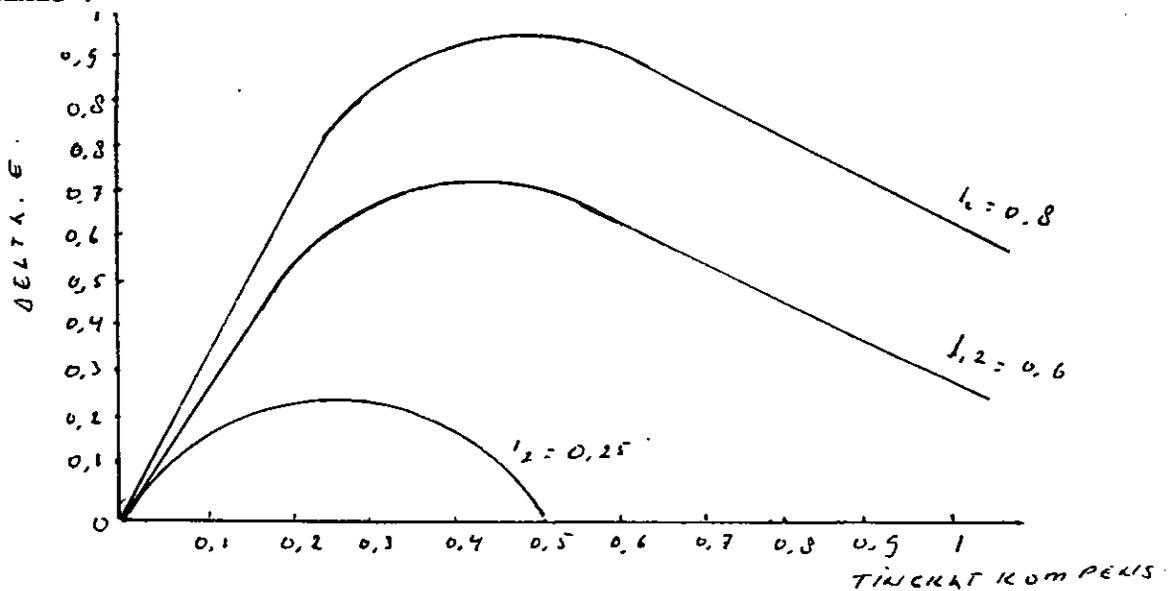
$V$  = tegangan awal jaringan

$V_b$  = tegangan beban

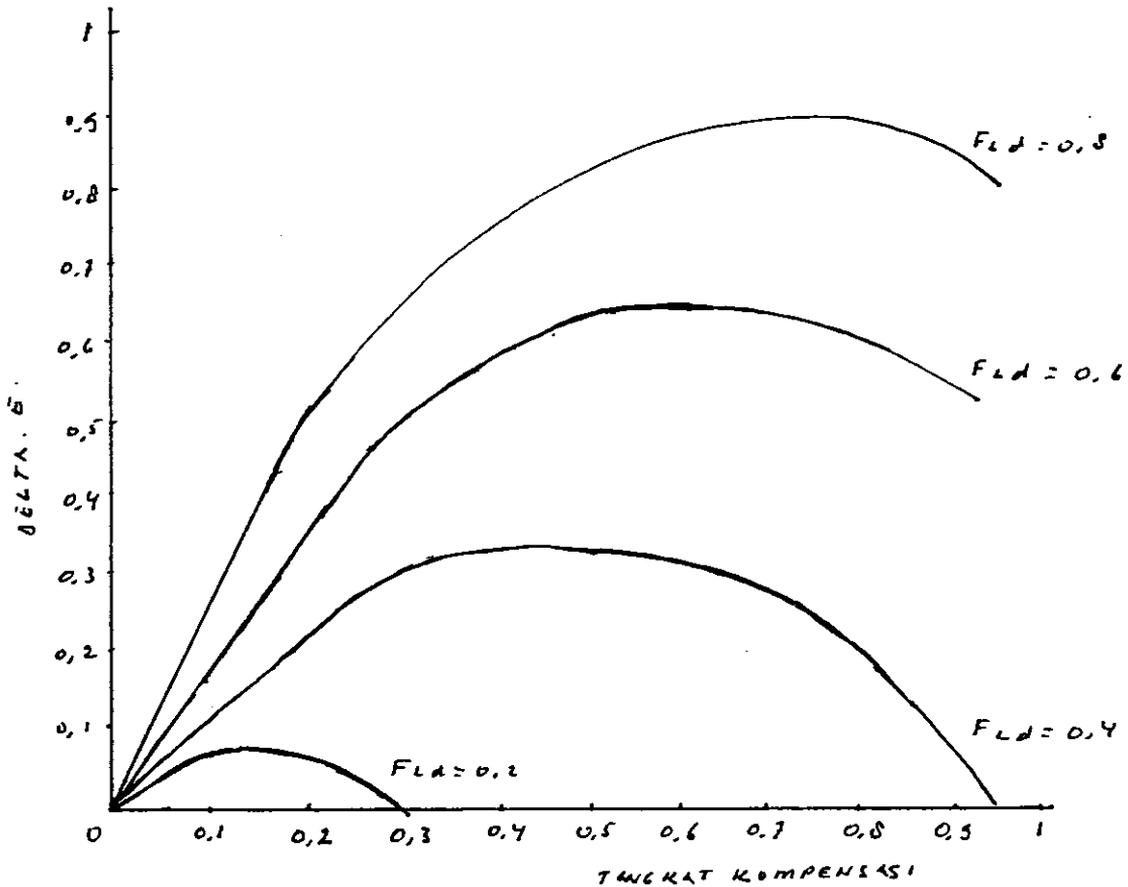
Atau tegangan beban dapat dinyatakan :

$$V_S = V - V_b \quad \dots\dots (4.21)$$

Dengan  $V_b$  adalah tegangan antara tegangan awal jaringan dengan tegangan beban. Karena jaringan terdiri dari beberapa seksi, dimana jumlah seksi tergantung pada jumlah beban, maka beda tegangan dapat dituliskan sebagai berikut :



Gambar. 4.5 Pengurangan rugi-rugi energi sebagai fungsi dari tingkat kompensasi untuk  $F_{ld} = 0,8$



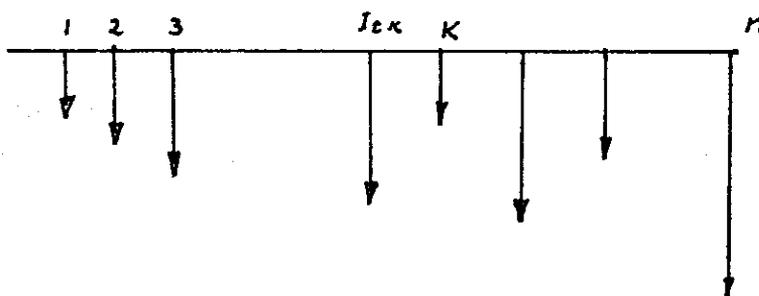
Gambar. 4.6 Pengurangan rugi-rugi energi sebagai fungsi dari tingkat kompensasi untuk  $I_2 = 0,25$

(Turhan Gonen 1986 Hal 419)

$$\begin{aligned}
 V_b(k) &= \sum_{i=1}^k V_b(i) \\
 &= \sum_{i=1}^k I_{ti} (R_i + jX_i) \quad \dots\dots\dots (4.22)
 \end{aligned}$$

Dari persamaan 4.22 terlihat bahwa beda tegangan tergantung kepada arus yang mengalir pada tiap seksi dan impedansi tiap seksi. Dengan makin besarnya arus dan impedansi

jaringan maka makin besar beda tegangan dan dengan begitu jatuh tegangan akan membesar pula.



Gambar 4.7 Jaringan sebelum pemasangan kapasitor

(Seelye 1982 Hal 134)

Beda tegangan sebelum pemasangan kapasitor shunt dapat dijabarkan seperti dibawah ini :

Pada gambar 4.7 terlihat, impedansi pada seksi ke-k adalah :

$$Z_k = R_k + jX_k$$

Arus yang mengalir pada seksi ke-k

$$I_{tk} = I_{rk} - jI_{xk}$$

Dengan :

$I_{rk}$  = komponen arus aktif

$I_{xk}$  = komponen arus reaktif

Sehingga beda tegangan pada jaringan :

$$V_b(k) = \sum_{i=1}^k V_b(i)$$

1997年12月  
1997年12月

$$\begin{aligned}
 &= \sum_{i=1}^k I_{ti} \cdot (R_i + jX_i) \\
 &= \sum_{i=1}^k (I_{ri} - jI_{xi}) (R_i + jX_i) \\
 &= \sum_{i=1}^k (I_{ri}R_i + I_{xi}X_i) + j(I_{ri}X_i - I_{xi}R_i) \\
 &\dots\dots (4.23)
 \end{aligned}$$

Dimana :

$$i = 1, 2, 3, \dots\dots k$$

$$k = 1, 2, 3, \dots\dots n$$

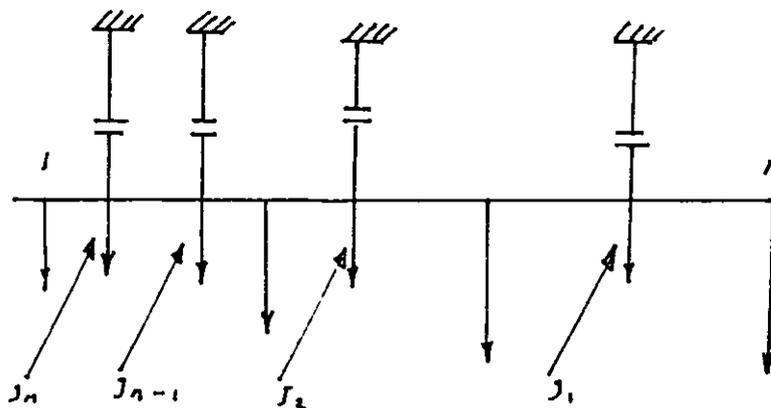
Sedangkan beda tegangan setelah pemasangan kapasitor, dapat dijelaskan sebagai berikut.

Arus tiap-tiap seksi

$$I_{tk} = I_{rk} - j(I_{xk} - nI_c) \quad 1 \leq k \leq j_n$$

$$I_{tk} = I_{rk} - j(I_{xk} - (n-1)I_c) \quad j_n \leq k \leq j_{n-1}$$

$$I_{tk} = I_{rk} - jI_{xk} \quad j_1 \leq k \leq n$$



$j_n$  = nomor titik beban yang dipasang kapasitor ke-n

Gambar 4.8 Jaringan setelah pemasangan kapasitor

Untuk :  $1 \leq k \leq j_n$

$$V_b(k) = \sum_{i=1}^k (I_{ri}R_i + I_{xi}X_i) + j(I_{ri}X_i) - nI_c$$

$$\sum_{i=1}^k (X_i - jR_i)$$

Untuk :  $j_n \leq k \leq j_{n-1}$

$$V_b(k) = \sum_{i=1}^k (I_{ri}R_i + I_{xi}X_i) + j(I_{ri}X_i - I_{xi}R_i) - nI_c$$

$$\sum_{i=1}^{j_n} (X_i - jR_i) - (n-1)$$

$$\sum_{i=j_n}^k (X_i - jR_i)$$

Untuk :  $j_1 \leq k \leq n$

$$V_b(k) = \sum_{i=1}^k (I_{ri}R_i + I_{xi}X_i) + j(I_{ri}X_i - I_{xi}R_i) - nI_c$$

$$\sum_{i=1}^{j_n} (X_i - jR_i) - (n-1)I_c$$

$$\sum_{i=j_n}^{j_{n-1}} (X_i - jR_i)$$

.....

$$- I_c \sum_{i=j_2}^{j_1} (X_i - jR_i)$$

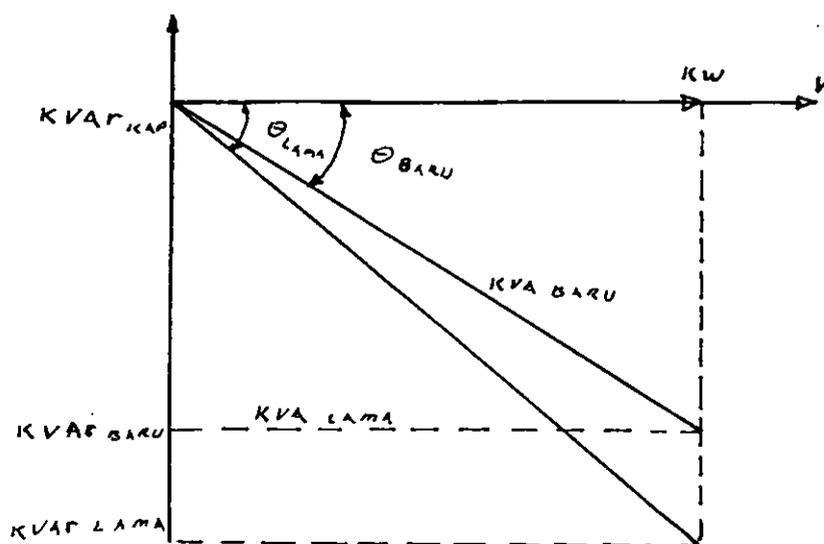
..... (4.24)

Yang harus diperhatikan dalam pemasangan kapasitor adalah naiknya tingkat tegangan pada sisi beban, terutama pada keadaan beban ringan. Karena tingginya tingkat tegangan

dapat menyebabkan kerusakan pada beban, misalnya motor listrik.

#### D. PERBAIKAN FAKTOR KERJA PENYULANG:

Dengan adanya kapasitor shunt, maka sebagian kebutuhan daya reaktif akan dipenuhi oleh kapasitor shunt tersebut. Dengan demikian daya reaktif yang mengalir pada jaringan lebih kecil. Untuk daya aktif yang sama, hal tersebut akan menyebabkan faktor daya menjadi lebih besar. Hal ini dapat dijelaskan seperti dibawah ini. Hubungan antara faktor daya, sudut phasa dan daya aktif serta daya semu adalah :



Gambar 4.9 Diagram phasor daya sebelum dan sesudah pemasangan kapasitor shunt

(Seelye 1982. Hal 142)

$$pf = \cos \phi = \frac{kW}{kVA}$$

Sehingga

$$kW = kVA \cos \phi$$

Sebelum pemasangan kapasitor

$$pf = \cos \phi_{lama} = \frac{kW}{kVA} \dots\dots (4.25)$$

Setelah pemasangan kapasitor

$$pf_{baru} = \cos \phi_{baru} = \frac{kW}{kVA_{baru}}$$

juga,

$$kVA_{baru} = [(kVA \cos \phi)^2 + (kVA \sin \phi - kVAR_{kap})^2]^{1/2}$$

Sehingga :

$$pf_{baru} = \frac{kVA \cos \phi}{[(kVA \cos \phi)^2 + (kVA \sin \phi - kVAR_{kap})^2]^{1/2}} \dots\dots (4.26)$$

#### E. PENERAPAN KAPASITAS PENULANG DAYA!

Seperti telah diterangkan diatas setelah pemasangan kapasitor, maka daya semu yang mengalir pada jaringan menjadi lebih kecil. Hal ini memungkinkan jaringan dapat memenuhi kebutuhan daya beban dalam jumlah yang lebih besar.

$$\begin{aligned} kVA_{tambahan} &= kVA - kVA_{baru} \\ &= kVA \left\{ 1 - [\cos \phi]^2 \right. \\ &\quad \left. + (\sin \phi - \frac{kVAR_{kap}}{kVA})^2 \right\}^{1/2} \dots (4.27) \end{aligned}$$

MILIK UPT PERPUSTAKAAN  
IKIP PADANG

#### F. OPTIMASI PEMASANGAN KAPASITOR SHUNT PADA JARINGAN DISTRI BUSI PRIMER

Pada pemasangan kapasitor shunt pada jaringan distribusi primer harus diperhatikan optimasinya. Dengan mengoptimasi ukuran dan letak kapasitor, maka akan didapatkan penghematan yang optimum.

Yang dijadikan fungsi obyektif dalam hal ini adalah penghematan yang diakibatkan oleh pengurangan rugi-rugi dikurangi dengan biaya pemasangan kapasitor. Jika dalam proses optimasi ternyata ukuran kapasitor optimum yang tidak sesuai dengan ukuran kapasitor standar yang ada, maka untuk perhitungan penghematan, diambil dua ukuran kapasitor standar, yang ukurannya lebih kecil daripada ukuran kapasitor optimum. Juga jika dalam proses optimasi ternyata lokasi kapasitor optimum tidak tepat pada gardu distribusi/beban, maka lokasi untuk perhitungan penghematan diambil dua lokasi gardu distribusi/beban yang mengapit lokasi optimum kapasitor. Ukuran dan lokasi kapasitor yang dipilih adalah ukuran dan lokasi kapasitor yang menyebabkan penghematan paling besar, dengan menaikkan tingkat tegangan beban masih dibawah 35 dari tegangan nominal sistem. Dalam keadaan beban puncak ini ditentukan penghematan yang maksimal untuk tiap-tiap tahun. Dalam menghitung penghematan ini diperhitungkan faktor pertumbuhan beban penyulang. Sehingga penghematan tahun ke-0

(tahun sekarang) tidak sama dengan penghematan tahun-tahun selanjutnya, sampai tahun batas pertumbuhan beban. Sedangkan dari tahun batas pertumbuhan beban sampai tahun guna kapasitor besar penghematan akan tetap.

#### 1. Fungsi Obyektif Penghematan Biaya

Fungsi obyektif penghematan biaya adalah penghematan yang diakibatkan karena mengecilnya rugi-rugi dikurang biaya pemasangan kapasitor, yang dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$S = C_1 L + C_2 E - \sum_{m=1}^n C_K I_{cm} - n C_T \quad \dots\dots (4.28)$$

Dimana :

$C_1$  = biaya tahunan rugi-rugi daya puncak (Rp/kW/th)

$C_2$  = biaya tahunan rugi-rugi energi (Rp/kWh/th)

$C_K$  = biaya variabel tahunan pemasangan kapasitor  
(Rp/kVAr/th)

$C_T$  = biaya tetap tahunan pemasangan kapasitor  
(Rp/th)

$\Delta L$  = pengurangan rugi-rugi daya puncak (kW)

$\Delta E$  = pengurangan rugi-rugi energi (kWh)

$I_{cm}$  = tingkat kompensasi kapaitor ke-m

$S$  = penghematan biaya

$n$  = jumlah kapasitor

Dari persamaan pengurangan rugi-rugi daya puncak, persamaan 4.13, maka persamaan penghematan dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
S &= 3I_c \sum_{m=1}^n a_m \{ (C_1 + C_2 F_{1d} \cdot T) [2 - a_m(1 - I_2)] \\
&\quad - (C_1 + C_2 T) (2m-1) I_c \} - \sum_{m=1}^n C_K \cdot I_{cm} \\
&\quad - n \cdot C_T \\
&= 3 \frac{K}{n} \sum_{m=1}^n a_m \{ (C_1 + C_2 F_{1d} \cdot T) [2 - a_m(1 - I_2)] \\
&\quad - (C_1 + C_2 T) (2m-1) \frac{K}{n} \} - K \cdot C_K \\
&\quad - n \cdot C_T \\
&= 3 \frac{K}{n} \sum_{m=1}^n a_m \{ (C_3 [2 - a_m(1 - I_2)]) \\
&\quad - C_4 (2m-1) \frac{K}{n} \} - K \cdot C_K \\
&\quad - n \cdot C_T \quad \dots (4.29)
\end{aligned}$$

Dimana

$$C_3 = C_1 + C_2 F_{1d} T \quad \dots (4.30)$$

$$C_4 = C_1 + C_2 T \quad \dots (4.31)$$

## 2. Lokasi Optimum dan Ukuran Optimum Kapasitor Shunt

Lokasi optimum kapasitor dapat ditentukan dengan menurunkan persamaan 4.29 terhadap  $a_m$  dan menyamakannya nol.

$$\frac{\partial S}{\partial a_m} = \frac{\partial}{\partial a_m} \left[ 3 \frac{K}{n} \sum_{m=1}^n a_m \{ C_3 [2 - a_m(1 - I_2)] \right]$$

$$\begin{aligned}
 & - C_4(2m-1) \frac{K}{n} \} - KC_K - nC_r] \\
 = & \left[ 3 \frac{K}{n} \sum_{m=1}^n \{ C_3(2-2a_m(1-I_2)) \right. \\
 & \left. - C_4(2m-1) \frac{K}{n} \} \right] = 0
 \end{aligned}$$

Sehingga didapat :

$$a_m = \frac{2 C_3 - C_4(2m-1) K/n}{2 C_3 (1 - I_2)} \dots\dots (4.32)$$

Penghematan maksimum diperoleh dengan memasukkan persamaan 4.32 ke dalam persamaan 4.29.

Sehingga didapat :

$$\begin{aligned}
 S_{\text{maks}} = & \frac{3 K}{4C_3(1-I_2)} \left[ 4C_3^2 - 4C_3C_4K \right. \\
 & \left. + \frac{C_4^2 (2n-1)(2n+1)K^2}{3n^2} \right] - K.C_K \\
 & - n.C_r \dots\dots (4.33)
 \end{aligned}$$

Tingkat kompensasi optimum dapat diperoleh dengan menurunkan persamaan 4.33 terhadap K dan menyamakannya nol.

$$\begin{aligned}
 \frac{S_{\text{maks}}}{K} = & \frac{3}{4C_3(1-I_2)} \left[ 4C_3^2 - 8C_3C_4K \right. \\
 & \left. + \frac{3C_4^2 (2n-1)(2n+1)}{3n^2} K^2 \right] - C_K \\
 = & 0
 \end{aligned}$$

Sehingga didapat :

$$K_{opt} = \frac{12C_3C_4n - 2n (9C_3 \cdot C_4)}{3C_4^2 (2n-1)(2n+1)} - \frac{2n [3C_K^2 C_3 C_4^2 (4n-1)(1-I_2)]}{3C_4^2 (2n-1)(2n+1)}$$

Sedangkan penghematan optimum dapat dicari dengan memasukkan persamaan 4.34 ke dalam persamaan 4.35.

### 3. Pertumbuhan Beban Penyulang

Pada kenyataannya beban berkembang dari tahun ke tahun. Dan biasanya pertumbuhan beban penyulang tersebut tidak merata. Dalam tulisan ini pertumbuhan bebannya dianggap merata, artinya semua beban mempunyai tingkat pertumbuhan yang sama. Pertumbuhan bebannya dinyatakan sebagai berikut :

$$I_k = I_0 \left( 1 + \frac{p}{100} \right)^k \quad \dots\dots (4.36)$$

Dimana :

$I_0$  = beban pada tahun sekarang (tahun ke-0)

$I_k$  = beban pada tahun ke-k

$p$  = tingkat pertumbuhan beban per-tahun (%/th)

$k$  = jumlah tahun = 0,1,2,3 ..... k

Pertumbuhan beban penyulang ini dibatasi oleh kemampuan jaringan dalam mengalirkan arus.

MILIK UPT PERPUSTAKAAN  
IKIP PADANG

## DAFTAR PUSTAKA

1. Fink, Electric Power Distribution. (New York Mc Graw-Hill Book Company 1978)
2. Seelye. H. P., Electrical Distribution Engineering. (New York Mc Graw-Hill Book Company 1982)
3. Tomson, Distribution System Planning. (New York Mc Graw-Hill Book Company 1980)
4. Turan Conen, Electric Power Distribution System Engineering. (New York Mc Graw-Hill Book Company 1986)
5. Westing House, Electric Transmission And Distribution.  
Reference Book (East Pittidurng 1964)
6. Yusra Sabri, Konsep Rancangan System Distribusi Dan Peramalan Beban. (Bandung, Penerbit ITA 1990)
7. Yoseph Administer, Electric Circuits. (New York Mc Graw-Hill Book Company 1972)