

BAB II

DASAR TEORI

A. Umum

Dalam sirkuit tiga fasa memiliki tiga jenis daya listrik yaitu daya nyata (S), daya aktif (P), dan daya reaktif (Q). Pada segitiga daya dimana garis horisontal (alas) merupakan daya aktif dan garis vertikal (tinggi) merupakan daya reaktif. Sisi miring menunjukkan daya nyata yang besarnya diperoleh dengan menggunakan persamaan *Phytagoras*. Dari segitiga tersebut, apabila sudut teta = 0, artinya $\cos \text{teta} = \text{pf} = 1$ dan $\sin \text{teta} = 0$, akan diperoleh daya nyata segaris dengan daya aktif dan tidak ada daya reaktif. Kondisi ini dinamakan *Unity Power Factor*. Pengertian lain dari kondisi ini adalah bahwa seluruh daya listrik dipakai sebagai daya aktif (watt) dan tidak ada yang terbangun sebagai daya reaktif. Untuk industri, PLN menagihkan daya aktif dan daya reaktif sedangkan untuk rumah tangga, PLN hanya menagihkan daya aktif saja. (<http://truerhee.wordpress.com/2007/05/05/kapasitor-bank/>)

B. Kapasitor Daya

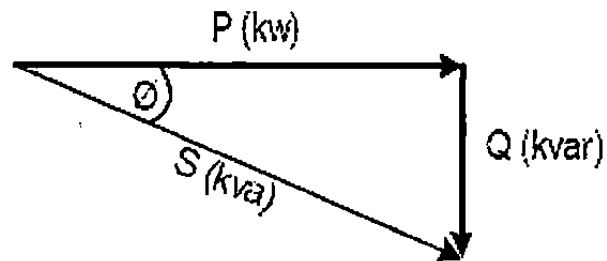
1. Pengertian Dasar Kapasitor Daya

Kapasitor daya merupakan suatu peralatan yang amat sederhana yaitu suatu peralatan yang terdiri dari dua pelat metal yang dipisahkan oleh dielektrik (bahan isolasi). Adapun bagian dari kapasitor daya yaitu kertas, foil dan cairan yang telah diimpregnasi tidak ada bagian yang bergerak

akan tetapi terdapat gaya yang bekerja sebagai fungsi dari medan listrik. Sistem penghantar biasanya terbuat dari aluminium murni atau semprotan logam. Sistem dielektriknya dapat dibuat dari kertas atau plastik dengan cairan perekat

2. Peranan Kapasitor dalam Penggunaan Energi Listrik

Besarnya energi atau beban listrik yang dipakai ditentukan oleh reaktansi (R), induktansi (L) dan kapasitansi (C). Besarnya pemakaian energi listrik itu disebabkan karena banyak dan beraneka ragam peralatan (beban) listrik yang digunakan. Sedangkan beban listrik yang digunakan umumnya bersifat induktif dan kapasitif. Di mana beban induktif (positif) membutuhkan daya reaktif seperti trafo pada rectifier, motor induksi (AC) dan lampu TL, sedang beban kapasitif (negatif) mengeluarkan daya reaktif. Daya reaktif itu merupakan daya tidak berguna sehingga tidak dapat dirubah menjadi tenaga akan tetapi diperlukan untuk proses transmisi energi listrik pada beban. Jadi yang menyebabkan pemborosan energi listrik adalah banyaknya peralatan yang bersifat induktif. Berarti dalam menggunakan energi listrik ternyata pelanggan tidak hanya dibebani oleh daya aktif (kW) saja tetapi juga daya reaktif (kVAR). Penjumlahan kedua daya ini akan menghasilkan daya nyata yang merupakan daya yang



Gambar 2.1 Segi Tiga Daya

Dari Gambar 2.1 tersebut diperoleh bahwa perbandingan daya aktif (kW) dengan daya nyata (kVA) dapat didefinisikan sebagai faktor daya (pf) atau $\text{Cos } \phi$.

$$\text{Cos } \phi = \text{pf} = P \text{ (kW)} / S \text{ (kVA)} \dots\dots\dots (2.1)$$

$$P \text{ (kW)} = S \text{ (kVA)} \cdot \text{Cos } \phi \dots\dots\dots (2.2)$$

Seperti kita ketahui bahwa harga $\text{Cos } \phi$ adalah mulai dari 0 s/d 1. Berarti kondisi terbaik yaitu pada saat harga P (kW) maksimum [$P \text{ (kW)} = S \text{ (kVA)}$] atau harga $\text{Cos } \phi = 1$ dan ini disebut juga dengan $\text{Cos } \phi$ yang terbaik. Namun dalam kenyataannya harga $\text{Cos } \phi$ yang ditentukan oleh PLN sebagai pihak yang mensuplai daya adalah sebesar 0,8. Jadi untuk harga $\text{Cos } \phi < 0,8$ berarti pf dikatakan jelek. Jika pf pelanggan jelek (rendah) maka kapasitas daya aktif (kW) yang dapat digunakan pelanggan akan berkurang. Kapasitas itu akan terus menurun seiring dengan semakin menurunnya pf sistem kelistrikan pelanggan.

Akibat menurunnya pf itu maka akan muncul beberapa persoalan sebagai berikut :

a. Membesarnya penggunaan daya listrik kWh karena rugi-rugi.

c. Mutu listrik menjadi rendah karena jatuh tegangan.

Untuk memperbesar harga $\cos \phi$ (pf) yang rendah hal yang mudah dilakukan adalah memperkecil sudut ϕ sehingga menjadi $\phi < \phi_1$ berarti $\cos \phi > \cos \phi_1$. Sedang untuk memperkecil sudut ϕ itu hal yang mungkin dilakukan adalah memperkecil komponen daya reaktif (kVAR). Berarti komponen daya reaktif yang ada bersifat induktif harus dikurangi dan pengurangan itu bisa dilakukan dengan menambah suatu sumber daya reaktif yaitu berupa kapasitor.

Proses pengurangan itu bisa terjadi karena kedua beban (induktor dan kapasitor) arahnya berlawanan akibatnya daya reaktif menjadi kecil. Bila daya reaktif menjadi kecil sementara daya aktif tetap maka harga pf menjadi besar akibatnya daya nyata (kVA) menjadi kecil sehingga rekening listrik menjadi berkurang.

Keuntungan lain mengecilnya daya reaktif adalah :

- Mengurangi rugi-rugi daya pada sistem.
- Adanya peningkatan tegangan karena daya meningkat.

3. Proses Kerja Kapasitor

Kapasitor yang akan digunakan untuk memperbesar pf dipasang paralel dengan rangkaian beban. Bila rangkaian itu diberi tegangan maka elektron akan mengalir masuk ke kapasitor. Pada saat kapasitor penuh dengan muatan elektron maka tegangan akan berubah. Kemudian elektron akan keluar dari kapasitor dan mengalir ke dalam rangkaian yang memerlukannya

tegangan yang berubah itu kembali normal (tetap) maka kapasitor akan menyimpan kembali elektron. Pada saat kapasitor mengeluarkan elektron (I_c) berarti sama juga kapasitor menyuplai daya reaktif ke beban. Keran beban bersifat induktif (+) sedangkan daya reaktif bersifat kapasitor (-) akibatnya daya reaktif yang berlaku menjadi kecil.

Rugi-rugi daya sebelum dipasang kapasitor :

$$\text{Rugi daya aktif} = I^2 R \text{ Watt} \dots\dots\dots (2.3)$$

$$\text{Rugi daya reaktif} = I^2 \times \text{VAR} \dots\dots\dots (2.4)$$

Rugi-rugi daya sesudah dipasang kapasitor :

$$\text{Rugi daya aktif} = (I^2 - I_c^2) R \text{ Watt} \dots\dots\dots (2.5)$$

$$\text{Rugi daya reaktif} = (I^2 - I_c^2) \times \text{VAR} \dots\dots\dots (2.6)$$

4. Pemasangan Kapasitor

Kapasitor yang akan digunakan untuk memperkecil atau memperbaiki pf penempatannya ada dua cara :

a. Terpusat kapasitor ditempatkan pada:

- Sisi primer dan sekunder transformator
- Pada bus pusat pengontrol

b. Cara terbatas kapasitor ditempatkan

- Feeder kecil
- Pada rangkaian cabang
- Langsung pada beban

(Suriadi, et al, 2006)

C. Kualitas Daya Listrik

Kualitas daya listrik (*Power Quality*) adalah tingkat kualitas dari jaringan listrik baik saluran transmisi maupun saluran distribusi serta tingkat efisiensi dari penggunaan energi pada jaringan tersebut. Sehingga peningkatan kualitas daya listrik pada sistem tenaga listrik sangatlah penting, mengingat bahwa kualitas daya listrik pada sistem tenaga berarti menghemat uang.

Prinsip fenomena yang terkait dalam kualitas daya adalah factor daya, harmonisa, fluktuasi tegangan, dips tegangan, dan transient tegangan lebih. Sedangkan parameter-parameter kualitas daya sebagai berikut :

- a. Faktor daya
- b. Level tegangan
- c. Frekuensi daya
- d. Harmonisa individual
- e. Total Harmonic Distortion (THD)
- f. Flicker tegangan
- g. Tiga phasa tak seimbang
- h. Tagangan turun (*Sag*) dan tegangan naik (*Swell*)
- i. Transient

(Stevenson W.D., 1994)

1. Kapasitor Bank untuk Koreksi Faktor Daya

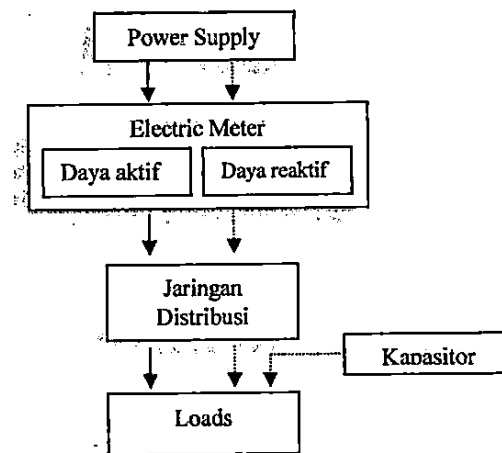
Salah satu fungsi dari kapasitor bank adalah untuk koreksi faktor daya.

Secara sederhana kapasitor terdiri dari dua buah plat logam yang

di antara keduanya ada bahan dielektrik dan kapasitor ini mempunyai sifat

menyimpan muatan listrik. Pada beberapa tahun lalu kebanyakan kapasitor terbuat dari dua buah plat aluminium murni yang dipisahkan oleh tiga atau lebih lapisan kertas yang dilapisi oleh bahan kimia. Kapasitor daya telah mengalami perkembangan yang begitu cepat selama 30 tahun terakhir. Karena bahan dielektrik yang digunakan lebih efisien serta teknologi pembuatan kapasitor lebih baik. (Stevenson W.D., 1994)

Berikut energi reaktif yang disuplai oleh kapasitor :



Gambar 2.2 Energi reaktif disuplai oleh kapasitor

Peralatan-peralatan listrik yang menyerap daya reaktif antara lain :

1. Motor induksi standar yang dibebani

100 % : $\cos \theta = 0.85$

75 % : $\cos \theta = 0.8$

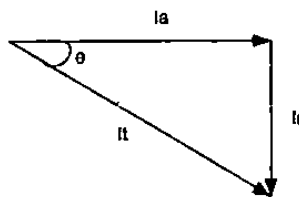
50 % : $\cos \theta = 0.73$

25 % : $\cos \theta = 0.55$

2. Lampu neon : $\cos \theta = 0.5$

3. Lampu discharge : $\cos \theta = 0.4$ s/d 0.6

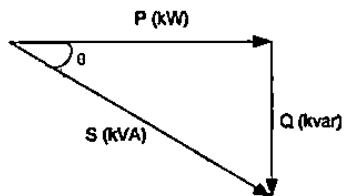
4. Oven (kompensasi) : $\cos \theta = 0.85$
5. Mesin solder : $\cos \theta = 0.8$
6. Mesin las : $\cos \theta = 0.5$
7. Dapur busur listrik : $\cos \theta = 0.8$
8. Trafo



I_t = arus nyata
 I_a = arus aktif
 I_r = arus reaktif

$$I_t = \sqrt{I_a^2 + I_r^2}$$

Gambar 2.3 Definisi arus nyata



S = daya nyata
 P = daya aktif
 Q = daya reaktif

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

Gambar 2.4 Definisi daya nyata

Dari Gambar 2.4 dapat kita lihat bahwa keuntungan dari penggunaan kapasitor bank secara ekonomis adalah adanya penurunan biaya listrik yang disebabkan oleh penurunan biaya energi reaktif dan penurunan konsumsi energi aktif dalam kWh (rugi-rugi energi). Sedangkan keuntungan kapasitor bank secara teknis yaitu adanya penurunan tegangan *drop*, peningkatan daya yang tersedia, penurunan rugi-rugi, dan perbaikan kualitas arus listrik bila digunakan sebagai *filter harmonic pasif*.

Definisi dari mutu instalasi listrik diukur dengan menggunakan Faktor

$$F = \frac{\text{Daya aktif kW}}{\text{Daya nyata kVA}} = \frac{P \text{ (kW)}}{S \text{ (kVA)}} = \cos \varphi \dots\dots\dots (2.7)$$

Pada sistem sinus atau bentuk gelombang tegangan dan arus sinus murni, $\cos \varphi$ menunjukkan besar daya reaktif yang diserap, dimana :

$$0 \leq \cos \varphi \leq 1$$

2. Perhitungan Rugi-Rugi Akibat Aliran Daya Reaktif

Pada sistem tenaga listrik diperlukan adanya suatu perhitungan rugi-rugi yang diakibatkan oleh adanya beban-beban yang menyerap daya reaktif. Untuk rugi-rugi akibat aliran daya reaktif dapat kita rumuskan sebagai berikut :

$$\Delta P = \frac{(P \tan \theta)^2}{V^2} R \dots\dots\dots (2.8)$$

dimana

ΔP : rugi-rugi akibat aliran daya reaktif

φ : sudut phasa antara tegangan dan arus suplai

R : tahanan saluran suplai

Apabila rugi-rugi saluran transmisi atau distribusi yang dikompensasi oleh kapasitor bank, maka :

$$\Delta P_{\text{comp}} = \frac{(Q - Q_c)^2}{V^2} R \dots\dots\dots (2.9)$$

dimana

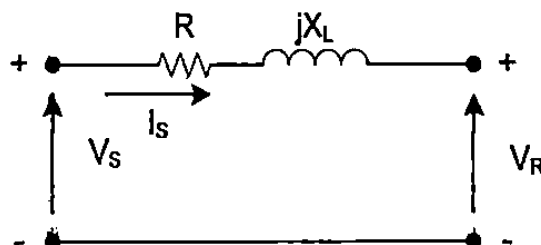
$$Q = P \tan \varphi$$

$$Q_c = \text{kapasitas kapasitor bank}$$

Rugi-rugi pada saluran distribusi tergantung pada lokasi dan pelanggan, dan harus dihitung untuk masing-masing pelanggan. Untuk menghitung rugi-rugi energi listrik, rugi daya dikalikan dengan jumlah jam beban mengkonsumsi daya listrik. Relatif sederhana atau mudah bila beban konstan, tetapi pada kenyataannya beban selalu berubah setiap saat, sehingga dibutuhkan suatu cara untuk menentukan rugi-rugi energi untuk beban yang berubah-ubah.

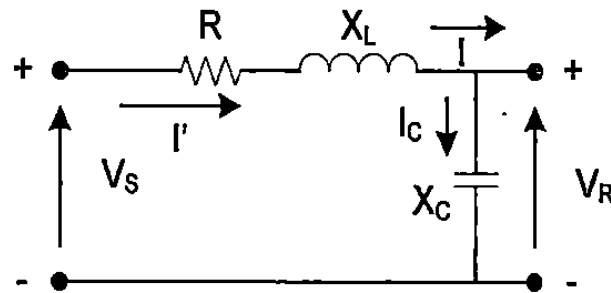
3. Pengaruh Perbaikan Faktor Daya Terhadap Tegangan

Perhatikan Gambar 2.5 dibawah ini. Gambar tersebut memperlihatkan kondisi suatu konduktor sebelum pemasangan kapasitor.



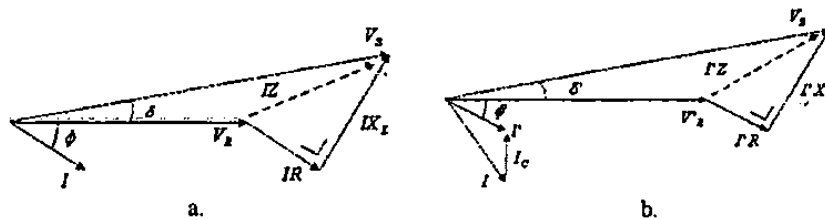
Gambar 2.5 Rangkaian konduktor sebelum pemasangan kapasitor

Sedangkan pada Gambar 2.6 dibawah diperlihatkan suatu sistem yang diberi kompensasi daya reaktif berupa kapasitor. Pemasangan kapasitor membuat kenaikan pada tegangan disisi terima (V_R) jika tegangan pengirim (V_s) dipertahankan konstan. Oleh karena itu dalam memperbaiki faktor daya, hal yang perlu dicegah adalah kemungkinan terjadinya fenomena *over voltage*



Gambar 2.6 Rangkaian konduktor setelah pemasangan kapasitor

4. Pengaruh Perbaikan Faktor Daya terhadap Rugi-rugi



Gambar 2.7 Pengaruh faktor daya

Pemasangan kapasitor juga mempengaruhi nilai arus, lihat Gambar 2.7 a. dan b. Dengan pemasangan kapasitor arus berkurang dari I menjadi I' . Dengan arus yang berkurang maka rugi-rugi panas pada jaringan (I^2R) menjadi berkurang. Disamping keuntungan penurunan *losses* daya riil, didapat pula keuntungan-keuntungan sebagai berikut :

- Keuntungan akibat MVA yang terserap menjadi berkurang.

Dengan arus yang semakin turun, maka MVA dari suplai dapat diperkecil. Ini sangat menguntungkan karena dapat menghindari 'penalti' dari pihak PLN.

- Keuntungan akibat penghematan kapasitor *feeder*

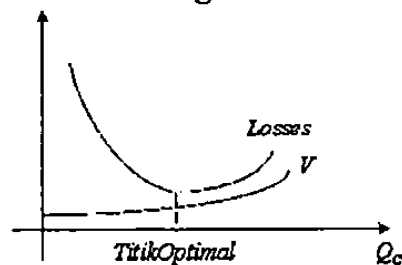
Akibat pemasangan kapasitor, drop tegangan akan berkurang.

c. Keuntungan akibat penghematan kapasitor gardu

Akibat pemasangan kapasitor juga berdampak pada penghematan kapasitor gardu. Untuk beban yang sama akan diperoleh pola operasi yang lebih aman. Penambahan sedikit beban dimungkinkan tanpa membangun GI baru.

5. Optimasi Tegangan dan Rugi-rugi

Telah dijelaskan bahwa perbaikan faktor daya akan menurunkan losses dan menaikkan tegangan. Kenaikan tegangan sendiri juga berdampak pada kenaikan *losses*. Oleh sebab itu perlu dicari suatu pola pemasangan kapasitor yang dapat menurunkan nilai losses secara signifikan namun tidak menyebabkan *over voltage*.



Gambar 2.8 Kurva Tegangan (V), losses vs daya reaktif (Q)

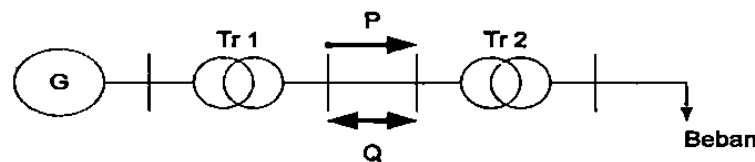
Gambar 2.8 membantu menjelaskan situasi yang terjadi akibat pemasangan kapasitor. Untuk setiap sistem terdapat titik optimal dengan nilai losses terendah. Jika setelah itu kapasitor ditambah maka *losses* akan kembali naik seiring dengan kenaikan tegangan (V).

Sebelum dilakukan pemilihan sumber daya reaktif guna perbaikan faktor daya maka harus diketahui komponen-komponen atau peralatan

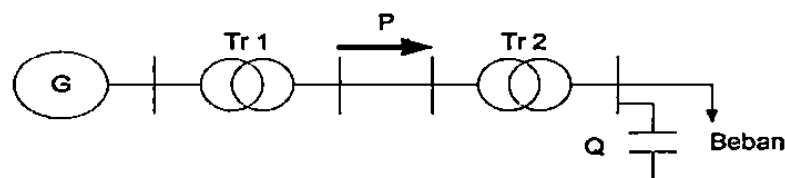
beberapa komponen yaitu generator sinkron, kondesor sinkron, kapasitor seri, dan kapasitor shunt.

6. Kompensasi Daya Reaktif

Daya reaktif induktif yang dibutuhkan peralatan listrik dapat dengan mudah diperoleh secara lokal dari kapasitor yang terhubung paralel (*shunt capacitors*). Dengan demikian aliran daya reaktif dari sumber atau pembangkit yang jauh bisa dihindari, sehingga dapat mengurangi rugi-rugi akibat aliran daya reaktif.



Gambar 2.9 Aliran daya tanpa kompensasi



Gambar 2.10 Aliran daya dengan kompensasi

Daya reaktif bisa dibangkitkan oleh kapasitor dan penggunaan kapasitor bank sebagai suplai daya reaktif pada sistem tenaga listrik adalah solusi terbaik untuk memproduksi daya reaktif, karena biaya awal dan pemeliharaannya tidak mahal.

Terdapat beberapa jenis kapasitor bank ada 3 macam yaitu :

1. *Central Compensation*

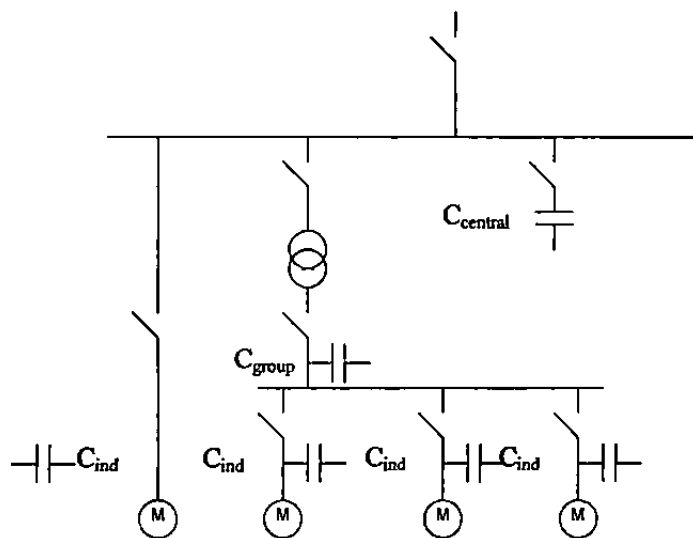
Yaitu kapasitor bank terhubung pada *High Voltage (HV) incoming feeder*.

2. *Group Compensation*

Yaitu kapasitor bank terhubung pada *Middle Voltage (MV) atau Low Voltage (LV) buses*.

3. *Individual Compensation*

Yaitu unit dari kapasitor terhubung pada setiap beban.



Gambar 2.11 Lokasi penempatan kapasitor bank

Tabel 2.1 Keuntungan pemasangan kapasitor bank

Keuntungan		
Central Compensation	Group Compensation	Indiv. Compensation
1. Pemanfaatan kompensasi daya reaktif lebih baik	1. Biaya pemasangan rendah	1. Meningkatkan kapasitas saluran suplai
2. Biaya pemeliharaan rendah	2. Kapasitas terpasang bisa dimanfaatkan sepenuhnya	2. Memperbaiki tegangan secara langsung
	3. Biaya	3. Kapasitor dan beban ON/OFF

	pemeliharaan rendah	bersamaan 4. Pemeliharaan dan pemasangan unit kapasitor mudah
--	---------------------	--

Tabel 2.2 Kerugian pemasangan kapasitor bank

Kerugian		
Central Compensation	Group Compensation	Indiv. Compensation
1. Switching peralatan pengaman bisa menimbulkan ledakan 2. Transient yang disebabkan oleh energizing grup kapasitor dalam jumlah besar 3. Kebutuhan ruangan 4. Hanya memberikan kompensasi pada sisi atasnya	1. Perlu dipasang kapasitor bank pada setiap MV/LV bus 2. Hanya memberikan kompensasi pada sisi atasnya 3. Kebutuhan ruangan	1. Biaya pemasangan tinggi 2. Membutuhkan perhitungan yang banyak 3. kVar terpasang tidak dimanfaatkan sepenuhnya 4. Terjadi fenomena transient yang besar akibat sering dilakukan switching ON/OFF 5. Waktu kapasitor OFF lebih lama dibandingkan waktu ON

Solusi yang terbaik adalah kombinasi antara individual dan group kompensasi. Walaupun solusi ini memerlukan perhitungan yang banyak, akan menghasilkan biaya yang minimal (investasi dan pemasangan).

D. Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik terdiri dari tiga bagian utama yaitu pusat pembangkit listrik, saluran transmisi, dan sistem distribusi. Saluran transmisi merupakan rantai penghubung antara pusat pembangkit listrik dan sistem distribusi dan

tenaga yang lain. Suatu sistem distribusi menghubungkan semua beban yang terpisah satu dengan yang lain kepada saluran transmisi. Hal ini terjadi pada stasiun pembantu (*substation*) dimana juga dilaksanakan transformasi tegangan dan fungsi pemutusan dan penghubungan beban (*switching*). (Ir. Sulasno, 1993)

1. Representasi Saluran Transmisi

Suatu hal yang perlu diperhatikan didalam perencanaan dan pengoperasian dari suatu sistem transmisi adalah pemeliharaan tegangan dalam batas-batas yang diijinkan pada setiap titik. Untuk itu perlu diketahui besar tegangan, arus serta daya yang mengalir pada setiap titik sepanjang saluran transmisi tersebut. Sebelum analisis dan perhitungan dapat dilakukan, terlebih dahulu saluran transmisi itu harus direpresentasikan dengan diagram pengganti.

Pada umumnya saluran-saluran transmisi itu adalah tiga fasa. Dalam keadaan tegangan dan arus simetris, maka analisisnya cukup dilakukan berdasarkan satu fasa (Ir. Sulasno, 1993). Untuk menggambarkan suatu saluran transmisi secara umum kedalam rangkaian ekivalennya, tahanan dan konduktansi dinyatakan sebagai admitansi shunt yang terbagi merata sepanjang saluran transmisi.

Parameter-parameter saluran transmisi sangat mempengaruhi besarnya tegangan bus dan aliran daya yang mengalir pada saluran tersebut. Pada saluran udara, konduktansi saluran (G) sangat kecil sehingga didalam

2. Representasi Saluran Distribusi

Sistem tenaga listrik meliputi sistem pembangkitan, sistem transmisi dan sistem distribusi. Sistem distribusi mempunyai peranan yaitu untuk menyalurkan dan mendistribusikan tenaga listrik kemasing-masing beban atau konsumen dengan mengubah tegangan listrik yang didistribusikan menjadi tegangan yang dikehendaki, karena kedudukan sistem distribusi merupakan bagian paling akhir dari keseluruhan sistem tenaga listrik yang mempunyai fungsi mendistribusikan langsung tenaga listrik pada beban atau konsumen yang membutuhkan.

Dalam pendistribusian tenaga listrik ke konsumen, tegangan listrik yang digunakan bervariasi tergantung dari jenis konsumen yang membutuhkan. Untuk konsumen industri biasanya digunakan tegangan menengah 20 KV atau 6.3 KV sedangkan untuk konsumen tegangan rendah 0.4 KV yang merupakan tegangan siap pakai untuk peralatan-peralatan perkantoran.

Sistem distribusi dapat diklasifikasikan menjadi dua bagian yaitu :

- a. Sistem Distribusi Primer.
- b. Sistem Distribusi Sekunder.

Untuk sistem distribusi Primer, tingkat tegangan yang digunakan meliputi tegangan menengah 20 KV atau 6.3 KV. Distribusi Primer merupakan bagian dari sistem distribusi yang berfungsi untuk menyalurkan dan mendistribusikan tenaga listrik dari pusat *supply* daya (Gardu Induk) ke pusat beban (Gardu Distribusi) ini pada umumnya

terbentang sepanjang daerah yang disupply tenaga listrik dengan membentuk jaringan atau penyulang-penyulang sampai kepusat beban paling akhir, oleh karena itu sistem distribusi ini sering disebut dengan sistem distribusi tegangan menengah.

Sedangkan sistem distribusi Sekunder merupakan bagian dari sistem distribusi tenaga listrik yang berfungsi menyalurkan dan mendistribusikan tenaga listrik secara langsung dari Gardu Induk ke masing-masing konsumen, seperti untuk mensupply tenaga listrik pada daerah perumahan biasa (kecil), pada daerah industri ringan di kota-kota maupun pedesaan, untuk penerangan jalan dan sebagainya. Tingkat tegangan yang digunakan adalah tegangan rendah 0.4 KV atau 380/220 Volt, oleh karena itu sistem distribusi ini sering disebut dengan sistem distribusi tegangan rendah.

Peralatan-peralatan yang ada pada sistem distribusi sekunder meliputi :

- a. *Low Voltage panel* pada trafo distribusi.
- b. Hantaran tegangan rendah.
- c. Sambungan ke pelanggan.
- d. KWh meter dan fuse pada pelanggan.

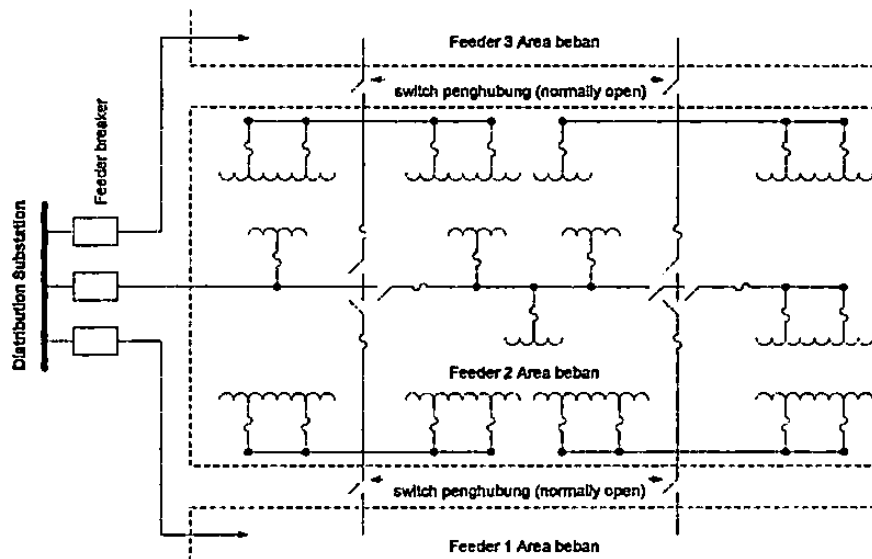
3. Struktur Sistem Jaringan Distribusi

Ada beberapa bentuk sistem jaringan yang umum digunakan untuk menyalurkan dan mendistribusikan tenaga listrik yaitu :

- a. Sistem Jaringan Distribusi Radial.
- b. Sistem Jaringan Distribusi Rangkaian Tertutup (*loop*).

- c. Sistem Jaringan Distribusi *Mesh*

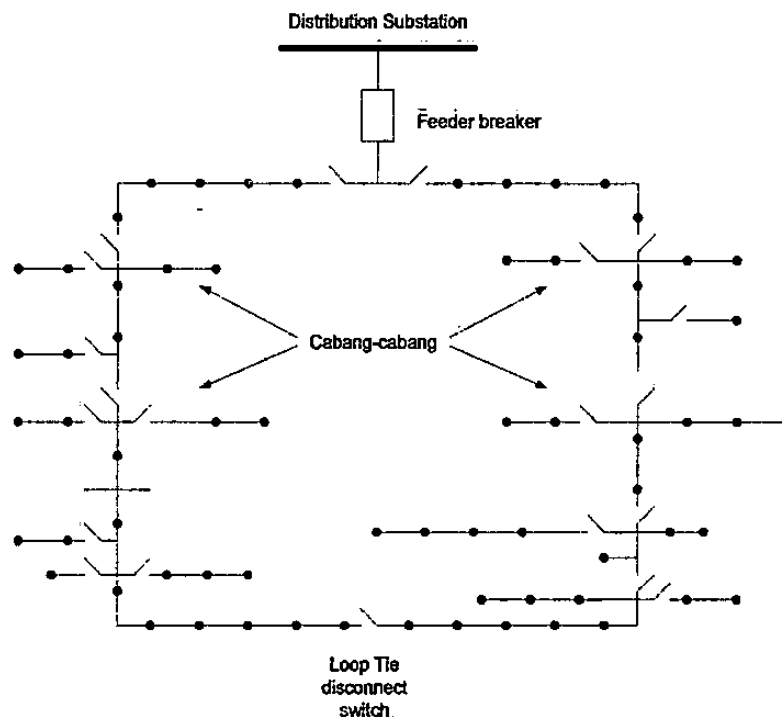
Bentuk jaringan ini merupakan bentuk dasar yang paling sederhana dan paling banyak digunakan. Sistem ini dikatakan radial karena dari kenyataan bahwa jaringan ini ditarik secara radial dari Gardu Induk ke pusat-pusat beban atau konsumen yang dilayaninya. Gambar 2.12 berikut merupakan sistem jaringan distribusi radial.



Gambar 2.12 Sistem jaringan distribusi Radial

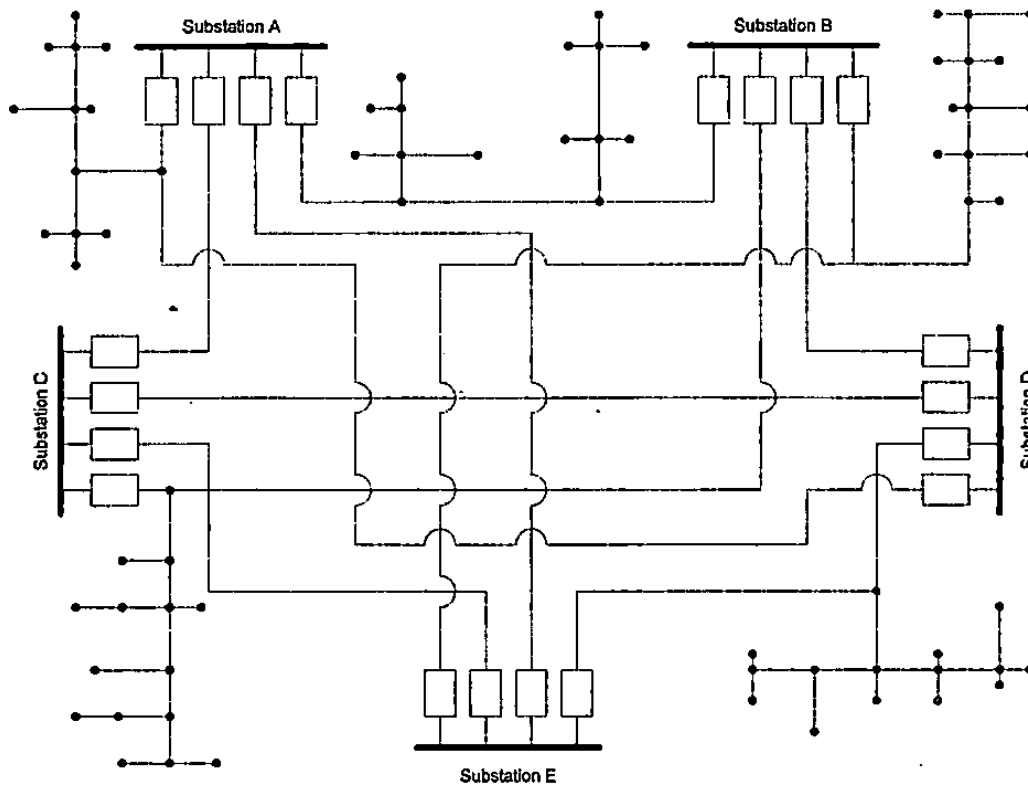
Pelayanan tenaga listrik untuk suatu daerah beban tertentu dilaksanakan dengan memasang transformator pada sembarang titik pada jaringan yang sedekat mungkin dengan daerah beban yang dilayaninya. Trafo ini berguna untuk menurunkan tegangan sistem agar dapat dikonsumsi pada beban konsumen. Kelemahan yang dimiliki oleh sistem radial adalah *voltage dropnya* cukup besar dan bila terjadi gangguan pada sistem akan dapat mengakibatkan jatuhnya sebagian atau bahkan keseluruhan beban sistem. Sedangkan keuntungannya adalah biaya pembangunannya relatif murah, pemeliharannya sederhana dan mudah untuk menentukan letak gangguan yang terjadi pada sistem

Sedangkan Sistem Jaringan yang kedua yaitu Jaringan Distribusi *Loop* (Rangkaian Tertutup). Sistem ini disebut rangkaian tertutup karena saluran primer yang menyalurkan daya sepanjang daerah beban yang dilayani membentuk suatu rangkaian tertutup. Gambar 2.13 menunjukkan bentuk umum dari sistem rangkaian tertutup.



Gambar 2.13 *Sistem jaringan distribusi Loop*

Sistem Jaringan Distribusi yang ketiga yaitu Sistem Jaringan Distribusi *Mesh*. Sistem ini merupakan kombinasi antara sistem radial dengan sistem *open loop*. Titik beban memiliki lebih banyak alternatif penyulang sehingga bila salah satu penyulang terganggu maka dengan segera dapat digantikan oleh penyulang lain. Dengan demikian kontinuitas penyaluran dayanya sangat terjamin. Gambar 2.14 merupakan bentuk dari



Gambar 2.14 *Sistem jaringan distribusi mesh*

Keadaan pada jaringan distribusi yang umum ditemukan adalah dimana terdapat dua atau lebih penyulang dari Gardu Induk berbentuk radial, kemudian pada titik tertentu dari penyulang-penyulang tersebut saling terhubung sehingga membentuk satu atau lebih *loop* dengan cabang-cabang radial yang cukup panjang. Perbandingan jumlah *loop* yang terbentuk dengan cabang keseluruhan sangat kecil. Selain bentuk-bentuk tersebut, juga dikenal struktur jaringan *spindle*, *EPI/Closter* yang semuanya itu merupakan hasil modifikasi dari sistem sebelumnya.

Pemilihan dari masing-masing bentuk sistem jaringan tersebut tergantung pada keperluan dan keandalan sistem yang diinginkan, seperti kontinuitas penyuluran/keamanan tenaga listrik dan perkembangan beban

E. Konsep Dasar Aliran Daya

Seorang sarjana teknik sistem tenaga bukan hanya bertugas untuk menangani pengoperasian normal dari suatu sistem, tetapi juga bertanggung jawab dalam menanggulangi keadaan-keadaan tidak normal yang mungkin terjadi. Karena itu para sarjana teknik harus faham benar akan rangkaian ac keadaan *steady-state*, terutama pada rangkaian tiga-phas.

1. Konsep Dasar Aliran Daya Pada Rangkaian Satu Phasa

Pada dasarnya daya listrik pada suatu elemen adalah tegangan pada elemen tersebut dikalikan dengan arus yang mengalir melalui elemen tersebut.

$$V = V_{max} \cdot \cos \omega t \dots\dots\dots (2.10)$$

$$i = I_{max} \cdot \cos (\omega t - \theta) \dots\dots\dots (2.11)$$

θ : +, untuk arus lagging

θ : -, untuk arus leading

Maka daya sesaat :

$$\begin{aligned} S &= v \cdot i \\ &= V_{max} \cdot I_{max} \cdot \cos \omega t \cdot \cos (\omega t - \theta) \dots (2.12) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S &= v \cdot i \\ &= \frac{V_{max} \cdot I_{max}}{2} \cdot \cos \theta (1 + \cos 2\omega t) + \frac{V_{max} \cdot I_{max}}{2} \sin \theta \cdot \sin 2\omega t \end{aligned}$$

atau

$$S = |V| |I| \cos \theta (1 + \cos 2\omega t) + |V| |I| \sin \theta \sin 2\omega t \dots\dots\dots (2.13)$$

dimana $|V|$ dan $|I|$ adalah besaran efektif dari tegangan dan arus

Penggunaan nilai efektif (rms) lebih sering dan mudah digunakan dari pada nilai maksimum. Dengan mensubstitusikan $V_{\max} = \sqrt{3} (V_{\text{rms}})$ dan $I_{\max} = \sqrt{3} (I_{\text{rms}})$ maka diperoleh :

$$P_{\text{average}} = V_{\text{rms}} I_{\text{rms}} \cos \theta \quad \dots\dots\dots (2.14)$$

P : disebut daya nyata / aktif (watt)

$\cos \theta$: disebut faktor kerja

“ LAGGING ” untuk rangkaian Induktif

“ LEADING ” untuk rangkaian Kapasitif

Daya yang masuk pada jaringan adalah hasil dari nilai efektif tegangan terminal, arus, dan kosinus dari sudut fasa θ , $\cos \theta$ disebut sebagai faktor daya (*power factor = pf*). Hal ini diterapkan pada tegangan dan arus sinusoidal. Untuk beban resistif murni, nilai dari $\cos \theta = 1$, dan semua arus pada rangkaian digunakan untuk menyalurkan daya dari sumber ke beban. Ketika ada reaktansi seperti halnya resistansi, komponen arus dalam rangkaian diikat untuk menyalurkan energi yang secara periodic disimpan dan dilepas dari reaktansi. Energi yang tersimpan, akan disalurkan menuju dan dari medan magnet dari induktansi atau medan listrik dari kapasitansi yang ditambahkan pada arus dalam rangkaian, tetapi tidak ditambahkan pada daya rata-rata.

Daya rata-rata dalam rangkaian disebut sebagai daya aktif, dan daya yang disuplai energi yang tersimpan pada elemen reaktif disebut sebagai daya reaktif.

$$P = VI \cos \theta \dots\dots\dots (2.15)$$

$$Q = VI \sin \theta \dots\dots\dots (2.16)$$

dimana :

Q : disebut daya semu / reaktif (VAr)

“positif” untuk beban induktif

“negatif” untuk beban kapasitif

Pada kedua persamaan, V dan I adalah nilai rms dari tegangan terminal dan arus, dan θ adalah sudut fasa antara arus yang tertinggal terhadap tegangan.

P dan Q berada pada dimensi yang sama, yaitu *watts*, namun untuk menekankan bahwa Q adalah daya reaktif maka Q dihitung dalam unit *voltampere reaktif* (Var). Dengan mengasumsikan V , $V \cos \theta$, dan $V \sin \theta$, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.4, masing-masing dikalikan dengan I , nilai arus rms. Ketika komponen tegangan $V \cos \theta$ dan $V \sin \theta$ dikalikan θ , akan berubah menjadi VI , P , dan Q .

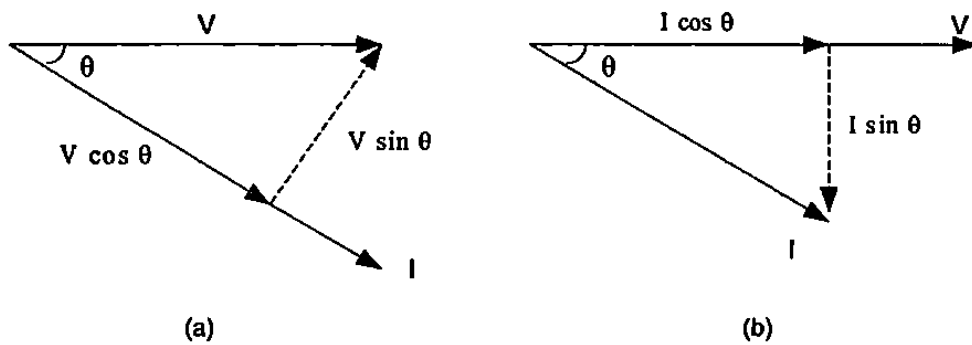
Daya yang dinyatakan dalam bentuk bilangan kompleks dilambangkan dengan S , terdiri dari komponen P dan Q yaitu :

$$\begin{aligned} S &= P + jQ \\ &= VI \cos \theta + j VI \sin \theta \\ &= VI (\cos \theta + j \sin \theta) \dots \dots \dots (2.17) \end{aligned}$$

dengan menggunakan identitas *Euler* diperoleh :

$$S = VI \angle \theta$$

$$(2.18)$$



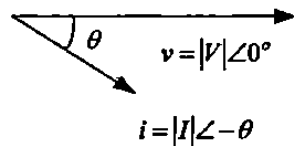
Gambar 2.15 Diagram fasor leading pada segitiga daya

Arus konjugate didefinisikan dengan menambah tanda bintang (^{*})

$$I^* = |I| \angle \theta \dots \dots \dots (2.19)$$

$$S = V I^* \dots \dots \dots (2.20)$$

a. Daya Listrik dalam Bentuk Kompleks



Daya listrik :

$$S = P + jQ \dots \dots \dots (2.21)$$

“ + ” I leading terhadap V

$\cos \theta$: Faktor Daya

$$S = |V| |I| \cos \theta + j |V| |I| \sin \theta$$

$$= |V| |I| (\cos \theta + j \sin \theta)$$

$$= |V| |I| \angle \theta^\circ$$

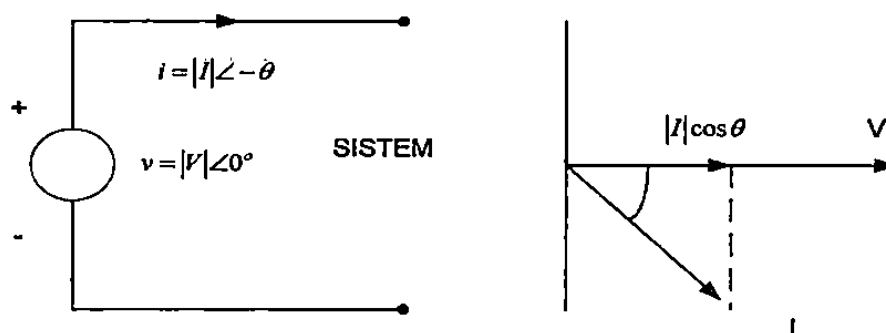
$$= (|V| \angle \theta^\circ) (|I| \angle -\theta^\circ)$$

$$= V I^*$$

$$|S| = \sqrt{P^2 + Q^2} \dots\dots\dots (2.22)$$

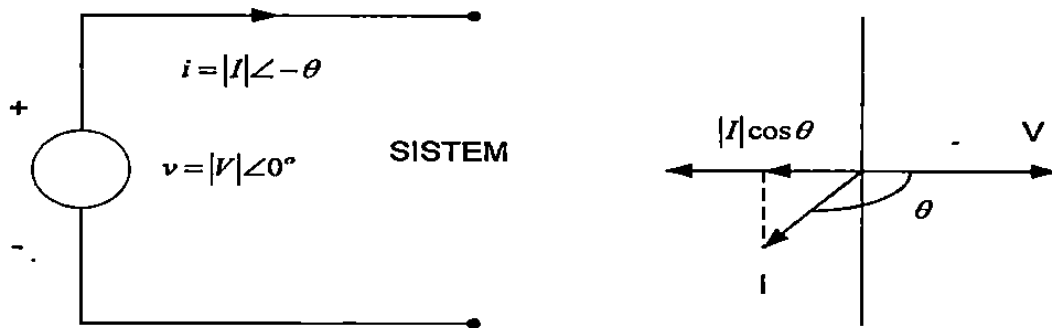
b. Aliran Daya Aktif

Apabila $|I| \cos \theta$ sephasa dengan V , berarti daya listrik dibangkitkan (sumber adalah generator) dan mengalir menuju sistem (arus keluar dari terminal positif).



Gambar 2.16 Diagram fasor aliran daya aktif $|I| \cos \theta$ dan V sephasa

$P = P (VI^*)$ mempunyai tanda positif



Gambar 2.17 Diagram fasor aliran daya aktif $|I| \cos \theta$ dan V beda fasa 180°

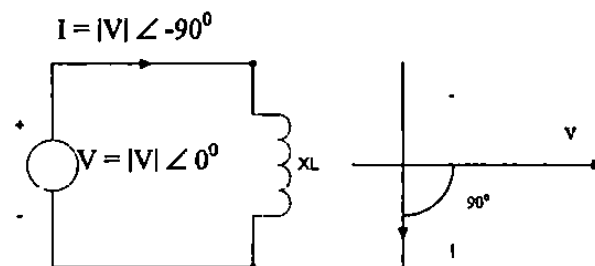
Dan apabila $|I| \cos \theta$ mempunyai beda fasa 180° terhadap V , berarti daya diserap (sumber adalah motor), dan arus menuju terminal positif dari sumber.

$P = R_e(VI^*)$ mempunyai tanda negatif.

c. Aliran Daya Reaktif

Daya reaktif sebesar $I^2 X_L$ (dengan tanda positif) diberikan pada induktansi atau induktansi menyerap daya reaktif. Arus I terbelakang (lagging) 90° terhadap V .

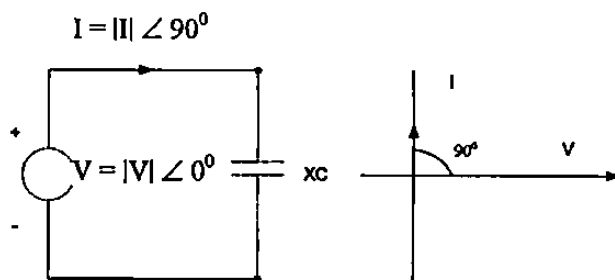
$Q = I_m(VI^*)$ mempunyai tanda positif.



Gambar 2.18 Diagram fasor aliran daya reaktif I lagging 90° terhadap V

Daya reaktif sebesar $I^2 X_c$ (dengan tanda negatif) diberikan pada kapasitor atau sumber menerima daya reaktif dari kapasitor. Arus i terbelakang (leading) 90° terhadap v

$Q = I_m(VI^\circ)$ mempunyai tanda negatif.

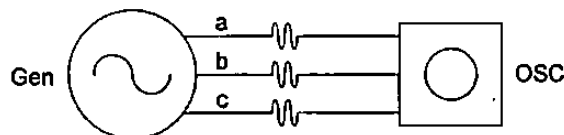


Gambar 2.19 Diagram fasor aliran daya reaktif I leading 90° terhadap V

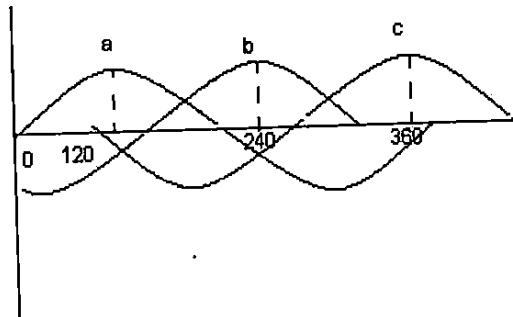
(Modul Analisis Sistem Tenaga Listrik 1)

2. Konsep Dasar Aliran Daya Pada Rangkaian Tiga Fasa

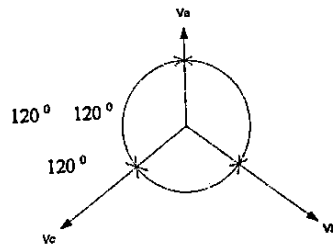
Daya listrik yang dibangkitkan, ditransmisikan, maupun didistribusikan pada beban sebagian besar menggunakan sistem tegangan tiga fasa. Penggunaan sistem tiga fasa lebih baik dari pada satu fasa, karena lilitan tiga fasa lebih efisien digunakan pada generator besi dan tembaga. Sistem tegangan tiga fasa yang seimbang terdiri dari tegangan satu fasa yang mempunyai magnitude dan frekuensi yang sama tapi antara satu dengan lainnya mempunyai beda fasa sebesar 120° .



Gambar 2.20 Generator 3 fasa



Gambar 2.21 Gelombang tegangan sistem 3 fasa

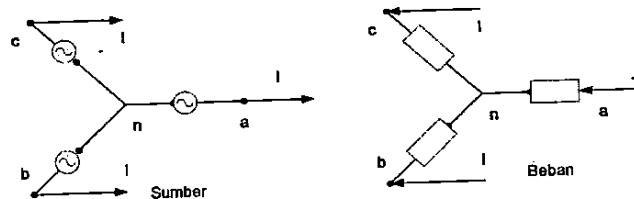


Gambar 2.22 Phasor tegangan sistem 3 fasa

Phasor tegangan dengan urutan fasa "abc"

3. Hubungan antara Arus dan Tegangan

Hubungan bintang (Y)



Gambar 2.23 Sistem 3 fasa hubungan bintang

- n : Titik netral
- V_{ab}, V_{bc}, V_{ca} : Tegangan "line"
- V_{an}, V_{bn}, V_{cn} : Tegangan "phasa"

Tegangan-tegangan fasa mempunyai magnitude yang sama, dan masing-masing mempunyai beda fasa 120° terhadap lainnya. Pada sistem 3 fasa hubungan bintang :

$$V_{L-L} = \sqrt{3} V_{L-N} \dots \dots \dots (2.23)$$

$$I_{L-L} = I_{L-N} \dots \dots \dots (2.24)$$

Sehingga :

$$\begin{aligned} P_{3\phi} &= \sqrt{3} V_{L-L} \cdot I_{L-L} \cos \theta \\ &= \sqrt{3} \sqrt{3} V_{L-N} \cdot I_{L-N} \cos \theta \\ &= 3 P_{L-N} \\ &= 3 P_{1\phi} \dots \dots \dots (2.25) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_{3\phi} &= \sqrt{3} V_{L-L} \cdot I_{L-L} \sin \theta \\ &= \sqrt{3} \sqrt{3} V_{L-N} \cdot I_{L-N} \sin \theta \\ &= 3 Q_{L-N} \\ &= 3 Q_{1\phi} \dots \dots \dots (2.26) \end{aligned}$$

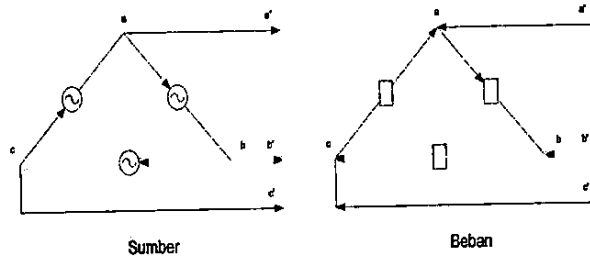
Pada sistem tiga fasa terminal positif yaitu a, b, dan c. Daya kompleks yang dikirim oleh fasa a generator adalah :

$$S_a = V_a I_a^* = V_{L-N} I_{L-N} \angle \theta^0 \dots \dots \dots (2.27)$$

Pada kondisi operasi setimbang, daya kompleks yang dikirimkan oleh fasa b dan c identik dengan S_a dan total daya kompleks S_{3φ} yang dikirim

$$\begin{aligned}
 &= 3 V_{L-N} I_{L-N} \cos \theta + j 3 V_{L-N} I_{L-N} \sin \theta \\
 &= 3 P_{L-N} + 3 Q_{L-N} \\
 &= P_{3\phi} + Q_{3\phi} \dots\dots\dots (2.28)
 \end{aligned}$$

Hubungan delta (Δ)



Gambar 2.24 Sistem 3 fasa hubungan delta

I_{ab}, I_{bc}, I_{ca} : arus "fasa"

$I_{aa'}, I_{bb'}, I_{cc'}$: arus "line"

Arus-arus fasa mempunyai magnitude yang sama, dan masing-masing mempunyai beda fasa 120^0 terhadap lainnya.

Pada sistem 3 fasa hubungan delta :

$$V_{L-L} = V_{L-N} \dots\dots\dots (2.29)$$

$$I_{L-L} = \sqrt{3} I_{L-N} \dots\dots\dots (2.30)$$

Sehingga,

$$\begin{aligned}
 P_{3\phi} &= \sqrt{3} V_{L-L} \cdot I_{L-L} \cos \theta \\
 &= \sqrt{3} \sqrt{3} V_{L-N} \cdot I_{L-N} \cos \theta \\
 &= 3 P_{L-N} \\
 &= 3 P_{1\phi} \dots\dots\dots (2.31)
 \end{aligned}$$

$$Q_{3\phi} = \sqrt{3} V_{L-L} \cdot I_{L-L} \sin \theta$$

$$\begin{aligned}
 &= \sqrt{3} \sqrt{3} V_{L-N} \cdot I_{L-N} \sin \theta \\
 &= 3 Q_{L-N} \\
 &= 3 Q_{1\phi} \dots \dots \dots (2.32)
 \end{aligned}$$

Pada sistem tiga fasa terminal positif yaitu a, b, dan c. Daya kompleks yang dikirim oleh fasa a generator adalah :

$$S_a = V_a I_a^* = V_{L-N} I_{L-N} \angle \theta^0 \dots \dots \dots (2.33)$$

Pada kondisi operasi setimbang, daya kompleks yang dikirimkan oleh fasa b dan c identik dengan S_a dan total daya kompleks $S_{3\phi}$ yang dikirim oleh generator adalah :

$$\begin{aligned}
 S_{3\phi} &= S_a + S_b + S_c = 3 S_a \\
 &= 3 V_{L-N} I_{L-N} \angle \theta^0 \\
 &= 3 V_{L-N} I_{L-N} \cos \theta + j 3 V_{L-N} I_{L-N} \sin \theta \\
 &= 3 P_{L-N} + 3 Q_{L-N} \\
 &= P_{3\phi} + Q_{3\phi} \dots \dots \dots (2.34)
 \end{aligned}$$


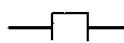
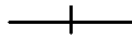




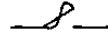






4. Diagram Segaris





Dengan menganggap bahwa sistem tiga fasa dalam keadaan seimbang. Penyelesaian pada analisis sistem tenaga dapat dikerjakan dengan menggunakan rangkaian satu Fasa dengan saluran netral sebagai saluran kembali. Untuk mempresentasikan suatu sistem tenaga listrik tiga Fasa cukup digunakan diagram satu Fasa yang digambarkan dengan memakai symbol-simbol dan saluran netral diabaikan yang disebut sebagai diagram segaris (*one line diagram*).

Pada diagram tersebut biasanya dilengkapi dengan data dari masing-masing komponen sistem tenaga listrik. Dalam menganalisis suatu sistem tenaga listrik, maka dimulai dari diagram segaris.

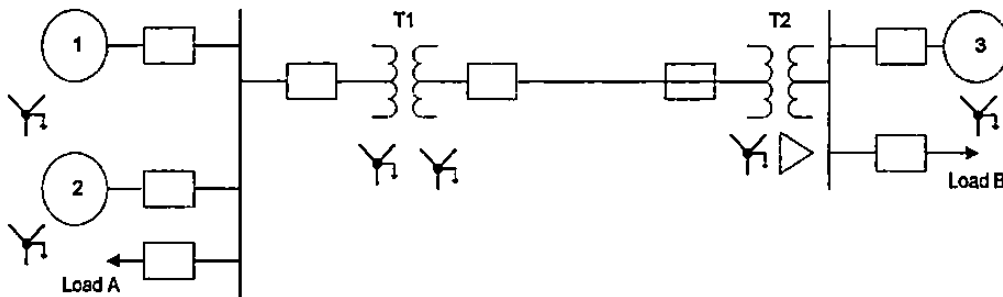
Dengan menggunakan rangkaian pengganti dari masing-masing komponen sistem tenaga listrik, diagram segaris tersebut dirubah menjadi diagram impedansi atau diagram reaktansi yang kemudian dapat dilakukan perhitungan atau analisis terhadap sistem.

Tabel 2.3 Simbol yang digunakan dalam diagram segaris

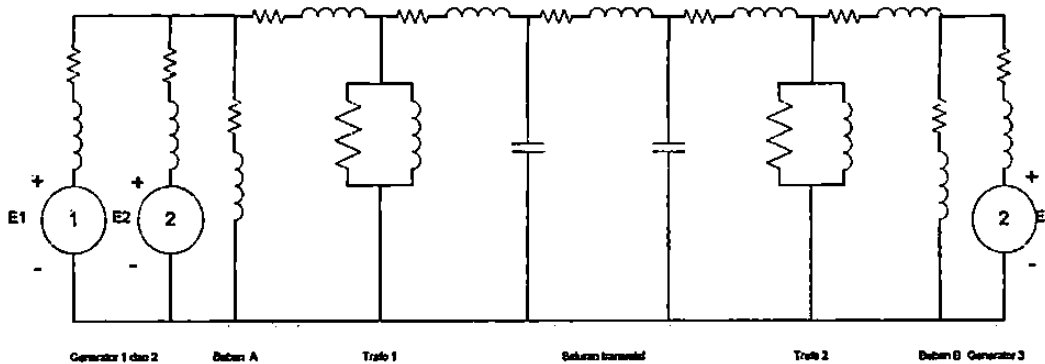
Symbol	Usage	Symbol	Usage
	Rotating Machine		Circuit Breaker
	Bus		Circuit Breaker (Air)
	Two-winding Transformer		Disconnect
	Three-winding Transformer		Fuse disconnect
	Delta Connection (3 ϕ ,three wire)		Fuse
	Wye Connection (3 ϕ ,neutral ungrounded)		Lightning Arrester
	Wye Connection (3 ϕ ,neutral grounded)		Current Transformer (CT)

	Line		Potential Transformer (PT)
	Static Load		Capacitor

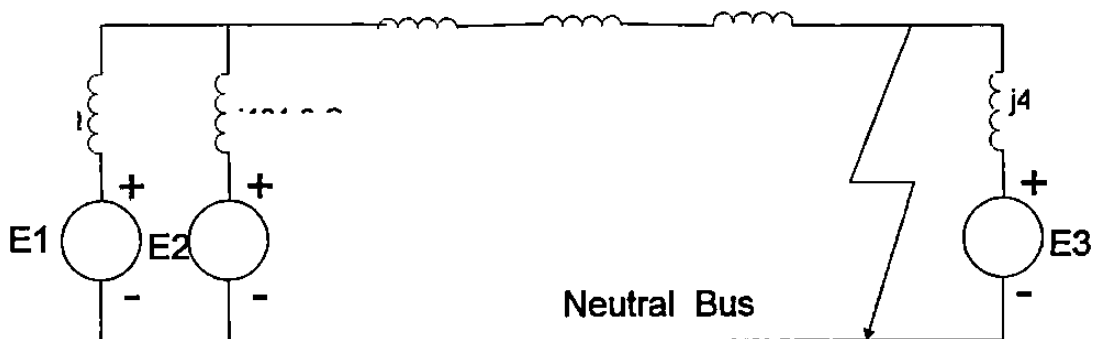
Berikut contoh diagram segaris yang dirubah menjadi diagram impedansi untuk perhitungan aliran daya.



Gambar 2.25 Contoh single line diagram



Gambar 2.26 Diagram impedansi



Gambar 2.27 Diagram impedansi dengan busbar netral

Semakin banyaknya masalah didalam sistem tenaga listrik sebagai akibat dari meningkatnya permintaan konsumen, bertambahnya jumlah saluran transmisi dan distribusi maka perlu adanya studi aliran beban dalam analisis sistem tenaga. Analisis ini diperlukan untuk perencanaan perluasan sistem, menentukan sistem operasi terbaik serta analisis stabilitas.

(Modul Analisis Sistem Tenaga Listrik 1)

Oleh karena itu diperlukan adanya alat bantu yang berupa peralatan komputer digital dalam analisis sistem, yang akan mempercepat proses analisis dan untuk mendapatkan hasil yang teliti.

F. Aliran Daya Fast Decoupled

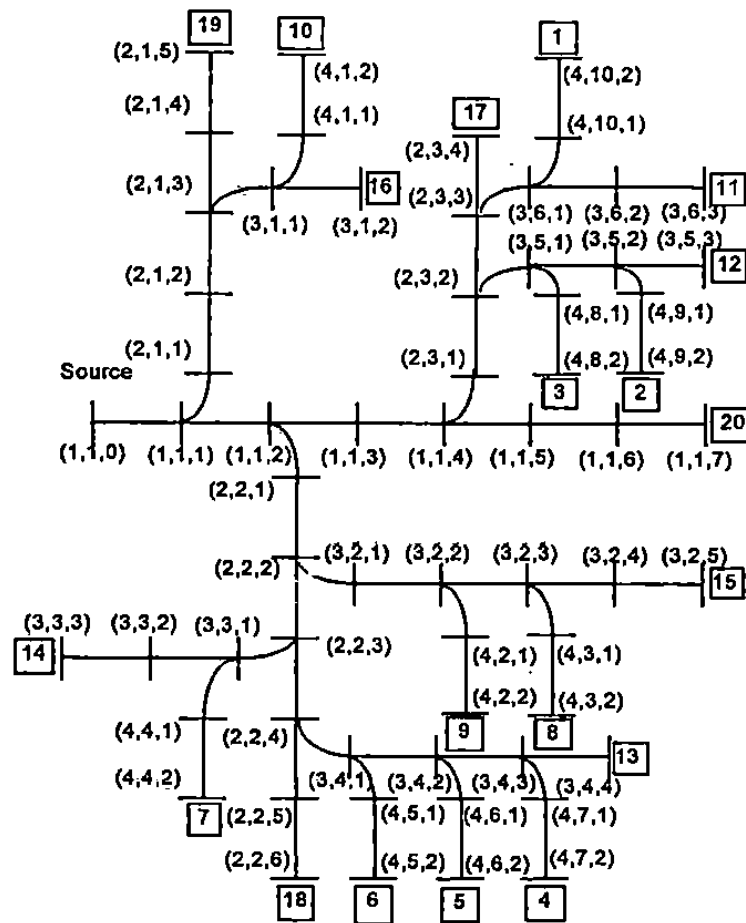
Metode penyelesaian aliran daya dikembangkan untuk menganalisis sistem transmisi tenaga listrik. Seperti metode Newton Raphson dan pengembangannya, merupakan metode yang paling banyak digunakan, namun metode-metode ini sering kali tidak cocok jika diterapkan dalam menganalisis sistem distribusi. (Cekmas Cerkdin, 2006)

Metode yang telah dikembangkan dengan memanfaatkan struktur topologi radial dari suatu sistem distribusi, ternyata memerlukan persamaan-persamaan aliran daya sebanyak jumlah bus dari sistem distribusi yang akan dianalisis. Sedangkan metode ini dapat digunakan untuk menyelesaikan persoalan aliran daya pada suatu sistem distribusi radial tiga fasa dan dapat diterapkan pada sistem yang besar serta pada keadaan sistem seimbang maupun tidak

seimbang dengan memanfaatkan struktur topologi radial didalam mengurangi jumlah persamaan-persamaan aliran daya. Pendekatan dalam pengembangan metode ini didasari pada kenyataan bahwa apabila pada salah satu ujung *feeder* distribusi diketahui besar tegangan dan arus serta arus injeksi yang mengalir pada setiap cabangnya maka besarnya tegangan dan arus pada ujung yang lain akan dapat dihitung.

1. Pengkodean pada Bus dan Cabang

Sistem radial dapat dinyatakan sebagai sebuah *feeder* induk dengan cabang-cabangnya. Setiap cabang dari *feeder* induk ini dapat memiliki sub-cabang atau cabang anak lagi dan cabang anak ini dapat memiliki cabang anak dan seterusnya. Pada pengkodean bus dan cabang ini digunakan bentuk *ordered triple* (l,m,n) untuk memudahkan dalam melakukan perhitungan aliran dayanya.



Gambar 2.28 Pengkodean bus dan cabang pada sistem distribusi

Dari *ordered triple* tersebut, satu merupakan tingkat kedalaman suatu cabang dari cabang induk. Dari Gambar 2.28 dapat dilihat bahwa cabang *feeder* utama memiliki nilai 1 sama dengan 1 kemudian pada setiap cabang dari *feeder* utama memiliki nilai 1 sama dengan 2 dan cabang dari sub-cabang ini memiliki nilai 1 sama dengan 3 dan seterusnya. Nilai m merupakan urutan dari cabang-cabang yang memiliki nilai 1 yang sama dan dimulai dari cabang yang paling dekat dengan *source bus* dari *feeder* induk. Dan nilai n merupakan urutan penomoran *bus* dalam suatu cabang. Disamping itu setiap cabang diberi nomor cabang yang urutannya dimulai

dari cabang yang memiliki nilai l yang paling besar sampai nilai l yang paling kecil.

2. Pemodelan Sistem

Pada tujuan studi aliran daya, sebuah sistem distribusi radial dimodelkan sebagai jaringan dari bus-bus yang dihubungkan oleh saluran-saluran distribusi, pemutus-pemutus ataupun transformator dengan sebuah tegangan pada titik awal bus atau *source bus* yang besarnya diketahui. Pada setiap bus mungkin terdapat beban, kapasitor shunt atau *cogenerator*.

Pemodelannya dapat digambarkan sebagai hubungan radial dari blok-blok diagram dasar seperti pada Gambar 2.29. Garis putus-putus menunjukkan elemen-elemen ini dapat terhubung delta. Selama sistem yang akan dianalisa adalah satu, dua atau tiga fasa maka ukuran persamaannya berturut-turut vektor kompleks skalar, 2×1 dan 3×1 . Untuk penyederhanaan diasumsikan semuanya adalah tiga fasa sehingga untuk sistem yang satu fasa atau dua fasa nantinya akan dapat diterapkan dalam program ini. Konsep dasar dari perumusan ini, bahwa tegangan dan arus pada satu bus dapat dinyatakan sebagai sebuah fungsi dari tegangan dan arus pada bus berikutnya. Jika

$$\omega_k = \begin{bmatrix} V_k \\ I_k + 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots 2.35$$

maka untuk bus berikutnya dapat dinyatakan sebagai :

$$\omega_{k+1} = \omega_k (a)$$

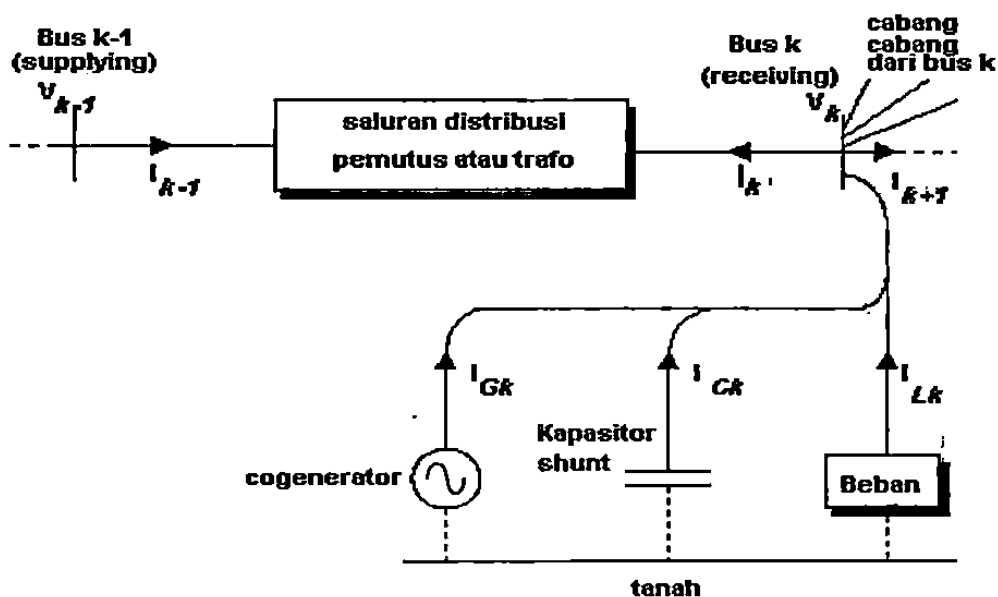
dimana ω_k : Persamaan kompleks 6×1 yang terdiri dari tegangan dan arus pada bus k.

Dari V_k akan dapat dihitung arus yang diinjeksikan oleh beban, kapasitor *shunt* dan *cogenerator* seperti pada Tabel 2.4 persamaan 2.38-2.42. Dari I_{k+1} dan arus I_j yang diinjeksikan pada setiap cabang yang berhubungan dengan bus k didapatkan

$$I_k' = I_{GK} + I_{CK} + I_{LK} - I_{LK+1} - \sum_{j \in A_k} I_j \dots\dots\dots 2.37$$

dimana I_j adalah arus-arus dari setiap percabangan dari bus k.

Jadi untuk setiap bus k dapat diekspresikan tegangan dan arus pada bus k-1 sebagai fungsi dari tegangan dan arus pada bus k.



Gambar 2.29 Blok Diagram dasar sistem distribusi radial

3. Pemodelan Beban

Pemodelan beban yang digunakan adalah model beban secara umum dimana beban tersebut dapat terhubung delta atau bintang dan memiliki

impedansi konstan, arus konstan atau daya kompleks yang konstan. Untuk beban terhubung bintang arus injeksinya dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.38 sampai dengan 2.40 dari Tabel 2.4. Tanda garis diatas variabelnya menunjukkan nilai yang konstan (tertentu). Sedangkan arus injeksi untuk beban yang terhubung delta dihitung dengan mengambil perbedaan dari elemen-elemen yang bersesuaian pada persamaan 2.38 - 2.40.

a. Pemodelan Kapasitor *Shunt*

Kapasitor shunt dimodelkan dalam hubungan delta atau bintang dengan admitansi yang konstan. Arus injeksinya untuk hubungan bintang dapat dinyatakan sebagai fungsi dari tegangan seperti pada persamaan 2.41 dari Tabel 2.4.

b. Pemodelan *Cogenerator*

Cogenerator dimodelkan dalam hubungan bintang atau delta dengan daya kompleks yang konstan. Arus injeksinya dinyatakan seperti pada persamaan 2.42 dari tabel 2.4.

c. Pemodelan Saluran

Model saluran yang digunakan adalah model (π) standar. Impedansi saluran distribusi k digambarkan dengan sebuah impedansi seri Z_k dan efek *line charging*nya terbagi diantara dua lengan yang besar admitansinya masing-masing adalah $Y_k/2$. Impedansi Z_k dan admitansi Y_k adalah matrik kompleks yang berukuran $n \times n$, dimana n adalah banyaknya phase pada saluran. Tegangan dan arus pada ujung

saluran didapatkan dengan persamaan 2.43 dan 2.44 dari Tabel 2.4. Pemodelan Pemutus-Pemutus. Sakelar-sakelar pemisah dimodelkan sebagai cabang dengan impedansi nol sehingga tegangan dan arusnya dihitung dengan persamaan 2.45 dan 2.46 dari Tabel 2.4.

d. Pemodelan Trafo

Trafo 3 (tiga) fasa dimodelkan dengan matriks admitansi, untuk hubungan bintang yang diketanahkan. Tegangan dan arus primer dapat dihitung jika diberikan tegangan dan arus sekunder seperti persamaan 2.47 dan 2.48 dari Tabel 2.4

Tabel 2.4 Bentuk Pemodelan dari elemen sistem.

Elemen		Update Equation	
Beban	Konstan Z	$I_{Lk} = V_k / \bar{Z}_{Lk}$	2.38
	Konstan I	$I_{Lk} = \bar{I}_{Lk}$	2.39
	Konstan PQ	$I_{Lk} = (\bar{S}_{Lk} / V_k)^*$	2.40
Kapasitor Shunt		$I_{Ck} = \bar{Y}_{Ck} \cdot V_k$	2.41
Cogenerator		$I_{Gk} = (\bar{S}_{Gk} / V_k)^*$	2.42
Saluran		$V_{k-1} = V_k + Z_k (\frac{1}{2} Y_k V_k - I_k)$	2.43
		$I_k = \frac{1}{2} Y_k (V_k + V_{k-1}) - I_k^o$	2.44
Pemutus		$V_{k-1} = V_k$	2.45
		$I_k = -I_k'$	2.46
Trafo		$V_{k-1} = (Y_k^{pp})^{-1} (I_k' - Y_k^{ps} V_k)$	2.47
		$I_k = Y_k^{pp} V_{k-1} + Y_k^{ps} V_k$	2.48

4. Perumusan Masalah

Metode aliran daya yang telah ada, jumlah persamaan-persamaan dari

k bus suatu sistem 3 (tiga) fasa adalah $6(k-1)$. Dalam metode Fast

Decoupled yang dibahas disini jumlah persamaan aliran daya akan direduksi/dikurangi menjadi 6 (enam) kali jumlah cabang pada sistem. Untuk lebih jelasnya pembahasan akan dimulai pada *feeder* tunggal (*single feeder*).

a. Feeder Tunggal

Jika diberikan besarnya tegangan dan arus pada salah satu ujung *feeder* maka tegangan dan arus pada ujung *feeder* yang lain akan dapat diketahui. Ada dua kondisi batas yaitu arus I_{k+1} pada ujung akhir *feeder* sama dengan nol dan tegangan \bar{V}_0 pada awal *feeder* memiliki bernilai konstan. Dari kondisi batas tersebut dapat dipilih apakah akan mencari arus I_0 pada ujung awal *feeder* ataukah tegangan V_k pada ujung akhir *feeder*. Tidak seperti I_0 , perkiraan nilai awal dari V_k bisa diperoleh dengan mudah tanpa melakukan perhitungan yaitu dengan nilai seimbang sebesar 1 pu, sehingga dari pertimbangan ini akan memilih V_n yaitu tegangan ujung akhir *feeder* sebagai variabel yang akan didapatkan.

Dengan menggunakan persamaan 2.36 dan kenyataan bahwa $I_{k+1} = 0$ maka dapat dihitung tegangan ujung awal *feeder* (*source voltage*) dan arusnya sebagai fungsi dari V_k . Dimulai dari ω_k dan cabang yang bersebelahan fungsi ω diperbaharui (diupdate) secara berurutan

$$\omega_{k-1} = g(\omega_k) = g\left(\begin{bmatrix} V_k \\ 0 \end{bmatrix}\right)$$

$$\omega_{k-2} = g(\omega_{k-1}) = g_{k-1} \bullet g_k\left(\begin{bmatrix} V_k \\ 0 \end{bmatrix}\right) \dots\dots\dots 2.49$$

$$\omega_0 = \begin{bmatrix} V_0 \\ I_1 \end{bmatrix} = g_l(\omega_l) = g_l \bullet \dots \bullet g_{k-1} \bullet g_k\left(\begin{bmatrix} V_k \\ 0 \end{bmatrix}\right) \dots\dots 2.50$$

Setelah didapatkan $V_0(V_n)$ dari hasil perhitungan seperti pada persamaan 2.50 diatas maka perbedaan antara nilai tegangan ini dengan tegangan referensi haruslah sama dengan nol, sehingga persamaan aliran daya ini dapat ditulis sebagai :

$$f(V_k) = V_0(V_k) - \bar{V}_0 = 0 \dots\dots\dots 2.51$$

Dimana V adalah persamaan kompleks 3×1 yang jumlahnya hanya tergantung pada jumlah cabang dari sebuah sistem dan tidak tergantung banyaknya bus pada sistem tersebut.

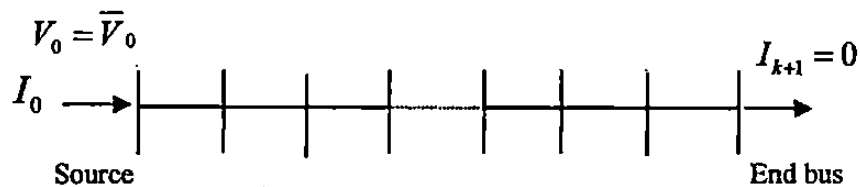
Jacobian dari $f(V_k)$ dapat dicari dengan cara berantai dari *jacobian* cabang G_k . *Jacobian* cabang G_k untuk sebuah bus k adalah *jacobian* dari persamaan 2.36.

$$G_k = \frac{\partial g_k}{\partial a_k} = \begin{vmatrix} \frac{\partial V_{k-1}}{\partial V_k} & \frac{\partial V_{k-1}}{\partial I_{k+1}} \\ \frac{\partial I_k}{\partial V_k} & \frac{\partial I_k}{\partial I_{k+1}} \end{vmatrix} \dots\dots\dots 2.52$$

Sehingga *jacobian* sistem untuk feeder tunggal sebelumnya adalah:

$$J(V_k) = \frac{\partial f}{\partial V_k} = \frac{\partial \bar{V}_0}{\partial V_k} = \frac{\partial \bar{V}_0}{\partial \omega_l} \cdot G_2 \dots G_{k-1} \cdot \frac{\partial g_k}{\partial V_k} \dots \dots \dots 2.53$$

Dimana bagian pertama dari perkalian tersebut merupakan setengah bagian atas dari G_l dan bagian akhir dari perkalian tersebut merupakan setengah bagian kiri dari G_k .



Gambar 2.30 Feeder Tunggal

b. Struktur Radial Secara Umum

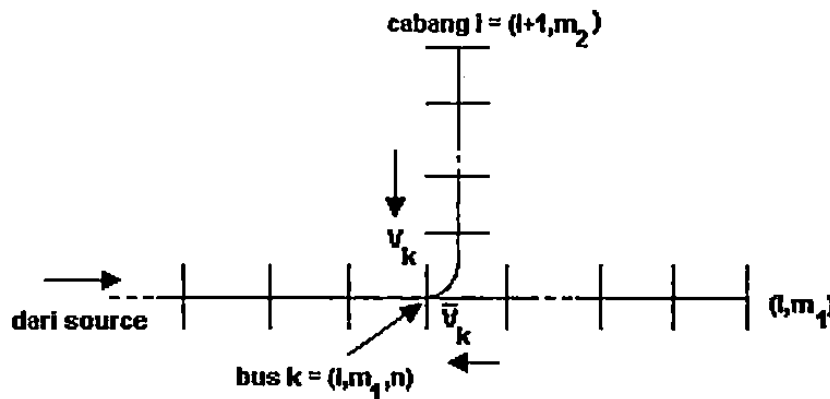
Untuk menangani struktur radial sistem distribusi yang berbeda-beda, dan mengingat bahwa tegangan dan arus pada ujung awal sebuah cabang dapat dihitung sebagai fungsi dari tegangan dan arus pada ujung akhir dari cabang tersebut, dan jika arus yang diinjeksikan pada setiap percabangan dari cabang tersebut diberikan /diketahui, maka perhitungan aliran daya pada sebuah sistem distribusi radial dapat dimulai dari cabang dengan tingkat nilai l tertinggi, dimana cabang pada tingkat l ini tidak memiliki cabang lagi.

Setelah semua cabang ditingkat l dihitung maka arus yang diinjeksikan kedalam cabang ditingkat $l-1$ akan dapat diketahui sehingga perhitungan pada cabang ditingkat $l-1$ dapat dimulai.

Selanjutnya setelah perhitungan pada cabang ditingkat $l-1$ selesai maka

arus yang diinjeksikan kedalam cabang dengan tingkat $l-2$ dapat

diketahui, begitu seterusnya sampai perhitungan dilakukan pada cabang induk (*main feeder*) dengan nilai $l=1$.



Gambar 2.31 *Perhitungan Perbedaan Tegangan*

Oleh karena itu perhitungan pada setiap bus yang terdapat percabangan diambil perbedaan dari dua tegangan yang dihitung dari setiap cabang yang tercabang dari bus tersebut. Sebagai contoh, pada Gambar 2.31 misalnya cabang (l, m_1) memiliki cabang dengan tingkat $l+1$ (misalnya dinamakan cabang i), yang tercabang pada bus k , maka perbedaan tegangan pada bus k dihitung dari perbedaan antara tegangan V_k yang dihitung dari ujung akhir cabang i dengan tegangan V_k yang dihitung dari tegangan ujung akhir cabang utama (l, m_1) sehingga kita akan memiliki persamaan yang bentuknya mirip dengan persamaan 2.51, dimana V_n diganti dengan x yang merupakan tegangan ujung akhir dari cabang-cabang yang bersesuaian yaitu :

$$f(x) = V(x) - \bar{V}(x) = 0$$

Fungsi f_i tidak tergantung pada semua elemen x tetapi hanya tergantung pada tegangan ujung akhir cabang yang disupply melalui bus k .

Sehingga dengan menggunakan persamaan 2.54 dalam sistem secara umum persamaan ini dapat ditulis sebagai

$$F(x) = 0 \quad \dots\dots\dots 2.55$$

Perlu dicatat bahwa (x) tidak selamanya konstan kecuali jika i adalah *feeder* utama (*main feeder*) dan k adalah *source bus*.

c. Algoritma Decoupled

Selama blok-blok yang tidak nol yang berada di bawah diagonal

memiliki $\frac{S_{Li}^*}{|V_i|^2}$ yang bernilai kecil serta dikalikan dengan Z_i yang

nilainya kecil pula maka blok-blok ini akan bernilai mendekati nol sehingga dapat kita abaikan. Dengan melakukan ini dapat dikatakan perbedaan tegangan untuk cabang ke- i hanya diakibatkan oleh tegangan ujung akhir dari induk cabang ke- i , sedangkan pengaruh tegangan dari ujung cabang-cabang yang lain diabaikan dan

Pendekatan ini akan mempercepat proses langkah ke-6 dari metode Newton di atas dan matrik jacobian sekarang menjadi lebih banyak yang kosong serta *triangular* sehingga langkah perbaikan (*update step*) pada langkah ke 6 tersebut dapat diselesaikan dengan substitusi balik.

d. Algoritma Fast Decoupled

Pada algoritma decoupled, evaluasi terhadap jacobian pada langkah ke 5 dari metode Newton masih terlalu sulit. Oleh karena itu pendekatan lebih lanjut dilakukan dengan memperhatikan nilai $Z_i \frac{S_{Li}^*}{|V_i|^2}$

yang kecil sehingga blok-blok bernilai mendekati "1" dapat diganti dengan nilai pasti (eksak) yaitu sama dengan "1", dan blok-blok yang bernilai mendekati "-1" diganti dengan nilai pasti "-1", sehingga jacobianya menjadi:

$$J_k = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots 2.57$$

Dengan melakukan pendekatan ini maka jacobian sekarang menjadi matrik konstan *triangular*. Ini berarti langkah ke 5 dari metode Newton telah dapat dihilangkan (dieleminir) dan penyelesaian langkah ke 6 menjadi substitusi balik yang sangat sederhana. Dengan demikian kita tidak perlu lagi untuk menyimpan jacobian ini selama melakukan perhitungan, karena kita telah mengetahui nilai-nilainya yang menunjukkan hubungan antara anak dan induk dari suatu

adalah matrik identitas positif 3×3 , dan “-1” adalah matrik identitas negatif 3×3 .

Dengan memperhatikan cara pembentukan matrik jacobian sistem seperti contoh di atas, maka struktur jacobian sistem untuk sistem distribusi seperti pada gambar 2.25.

Algoritma perhitungan Aliran daya Fast Decoupled untuk sistem distribusi radial tak seimbang selengkapnya adalah sebagai berikut:

Analisis aliran daya dengan metode fast decoupled tiga fasa sistem distribusi radial tak seimbang, mengikuti algoritma sebagai berikut:

1. Membaca data saluran seperti data impedansi, data pembebanan, serta hubungan antar bus dan antar saluran.
2. Menghitung arus injeksi per fasa (I_{ja} , I_{jb} , I_{jc}) pada bus dari suatu cabang.
3. Menghitung arus saluran per fasa (I_a , I_b , I_c) dari suatu bus ke bus sebelumnya pada suatu cabang.
4. Menghitung tegangan per fasa (V_a , V_b , V_c) dari bus sebelumnya pada suatu cabang.
5. Kembali ke langkah 2 sampai perhitungan dilakukan pada bus yang merupakan ujung awal dari suatu cabang.
6. Kembali ke langkah 2 untuk cabang-cabang berikutnya sampai perhitungan dilakukan pada cabang induk dari semua cabang yang

7. Menghitung perbedaan tegangan (toleransi) pada setiap cabang dimulai dari cabang induk.
8. Jika toleransi yang didapatkan belum memenuhi batas yang diijinkan maka kembali ke langkah 2.
9. Jika toleransi sudah memenuhi batas yang diijinkan maka tegangan akhir tersebut dianggap *konvergen* dan menjadi *output* program.

(Zimmerman, et al, 1995)

G. Genetic Algorithms

Masalah optimasi akhir-akhir ini berkembang cepat, terutama di bidang control. Untuk membahas masalah ini, pembahasan mengacu pada sebuah metode yang dapat melaksanakan tugas secara optimal. Dalam pemecahan masalah optimasi sering kali banyak pihak kurang percaya diri dalam penggunaan sebuah algoritma yang efisien yang dipilih untuk pendekatan optimal. Untuk beberapa masalah, metode optimisasi dapat digunakan pada algoritma probabilitas dengan baik. Metode probabilitas tidak menjamin harga optimum, tetapi dengan probabilitas secara acak, kesalahan dapat dibuat sekecil mungkin.

Masalah-masalah optimisasi praktis yang memanfaatkan algoritma kualitas tinggi telah memperkenalkan. Kita dapat mengaplikasikan metode penguatan yang terstimulasi atau sering dikatakan *Simulated Annealing* (SA), pada masalah penempatan jalur kawat dan komponen pada desain mikroprosesor atau untuk masalah masalah penjadwalan pada salesman untuk

menentukan *route* yang optimal. Pada pemecahan masalah optimisasi pada sistem kombinasi skala besar, teknik Monte Carlo dapat digunakan untuk mencari solusi optimal.

Secara umum, semua tugas yang diharapkan dapat diselesaikan secara cepat dengan memilih solusi yang terbaik. Tugas tersebut dapat dilihat sebagai proses optimisasi. Untuk ruang lingkup yang kecil, metode-metode klasik dan sederhana banyak digunakan. Untuk ruang lingkup yang lebih luas, disarankan untuk memakai teknik-teknik intelegensi tiruan. *Genetic Algorithm* (GA) atau dalam bahasa Indonesia menjadi Algoritma Genetika ada diantara teknik-teknik yang mempunyai kemampuan intelegen. Teknik itu adalah algoritma *stokastik* yang memanfaatkan fenomena alam. Gagasan di belakang GA adalah mengerjakan yang dikerjakan oleh alam.

Perkembangan GA berawal pada tahun 1960-an, tetapi pada periode ini pertumbuhannya cukup lambat. Pada 1975, Holland mempercepat pertumbuhan di bidang tersebut secara luar biasa. Masuk ke era tahun 70-an, penelitian GA dan pengembangannya oleh para akademisi dan para insinyur menjadi sangat luas. Alasan pengembangan GA itu adalah karena GA mudah dalam penjelasannya. Dalam bidang pabrikasi mikroelektronik yang menginginkan performasi yang baik dengan harga rendah, tetapi berkemampuan cepat GA dapat diandalkan. GA sebagai teknik untuk melacak dan melakukan proses optimasi kini siap untuk digali lebih dalam.

(Imam Robandi, 2006)

1. Penempatan Kapasitor

Penempatan bank kapasitor secara paralel dan ukuran MVar yang sesuai akan memberikan kompensasi daya reaktif, peningkatan pengaturan tegangan, perbaikan faktor daya, dan pengurangan rugi-rugi daya yang baik dalam peningkatan kualitas daya. Penempatan *bank capasitor optimal* merupakan sebuah penelitian yang banyak diminati dan dibatasi dengan tegangan dan arus harmonik.

Masalah penempatan kapasitor mencakup penentuan jumlah, tipe, lokasi, dan ukuran bank kapasitor yang optimal yang mampu meminimais biaya tahunan rugi-rugi daya dan biaya penggunaan kapasitor. Selain itu, batasan operasi dan kualitas daya dapat dijaga pada batas yang telah ditentukan.

Dari sekian banyak teknik yang pernah dilakukan untuk menempatkan kapasitor diasumsikan bahwa kondisi operasi adalah sinusoidal. Metode-metode ini termasuk *nonlinear programming*, metode pendekatan global (GA), *Simulated Annealing*, *Tabu Search*, *Artificial Neural Networks*, dan teori *Fuzzy logic*. Namun, semua pendekatan tersebut tidak memerhatikan keberadaan tegangan dan arus harmonik.

Beberapa publikasi terbaru telah memasukkan masalah tegangan terdistorsi untuk menyelesaikan masalah penempatan kapsitor. Penelitian ini termasuk *exhaustive search*, *local variation*, *mixed integer-nonlinier programming*, metode heuristik untuk penempatan kapasitor dan filter secara simultan, pemilihan sensitivitas maksimum, dan teori fuzzy

Metode-metode di atas dapat menyelesaikan masalah pekerjaan dengan cepat, tetapi metode-metode tersebut mengalami kesulitan karena ketidakmampuannya untuk menghindari solusi optimum lokal. *Simulated Annealing* (SA), *Tabu Search* (TS), dan GA adalah tiga teknik optimasi pendekatan global yang telah menunjukkan kemampuan yang baik untuk menempatkan kapasitor dalam kondisi sinusoidal. Metode GA, SA, dan TS memiliki kemampuan untuk mencari solusi optimum pendekatan global, walaupun beban perhitungannya cukup berat.

(Imam Robandi, 2006)

2. Penggunaan Genetic Algorithm

GA merupakan teknik optimasi global yang mampu menghitung penempatan dan menentukan ukuran bank kapasitor pada kondisi sinusoidal. GA memulai pembagian populasi dari solusi yang berpotensi. Hal itu memungkinkan eksplorasi dari beberapa harga optimum paralel, dan memperkecil kemungkinan pencarian pada lokal optimum.

Meskipun proses GA bersifat probabilistik, GA tidak melakukan pencarian acak secara total. Operator stokastik yang digunakan pada populasi mengarahkan pencarian pada *region hyperspace* (menjunjung asas konvergensi) yang akan menghasilkan nilai fitness yang lebih pantas.

Pada aplikasi ini dibahas metode GA untuk merumuskan masalah penempatan dan ukuran kapasitor untuk mengatur tegangan dan arus harmonik yang dibawa ke dalam perhitungan kapasitor tetap dengan jumlah teratas pada setiap bus dan sebuah feeder. Batasan operasional dan

kualitas daya termasuk dalam ikatan tegangan *rms*, *Total Harmonics Distortion* (THD), jumlah dan ukuran kapasitor yang dipasang, dan resonansi harmonik paralel.

(Imam Robandi, 2006)

3. Komponen-komponen Genetic Algorithm

Komponen-komponen Genetic algorithm adalah obyek yang akan dikenali dalam proses genetic algorithm itu sendiri serta subyek yang menjadi operator atau yang menjadi peran merubah priaku obyek itu sehingga menjadi individu baru.

Obyek dalam genetic algorithm ini adalah kromosom yang terdiri dari parameter-parameter yang akan dicari nilai optimasinya dengan menggunakan fungsi obyektif. Sedangkan yang menjadi subyek atau operatornya dalam genetic algorithmnya adalah diantaranya proses inisialisasi, kawin silang, dan mutasi.

a. Kromosom

Genetic algorithm mengadopsi dari peristiwa yang terjadi di alam yang kemudian dalam suatu program komputasi dengan menggunakan obyek utama yaitu kromosom dan dengan proses alam yang juga sama yaitu kawin silang (*crossover*), mutasi dan reproduksi. Kromosom menjadi obyek utama karena kromosomlah yang akan mengalami segala proses dari inisialisasi, seleksi, kawin silang, mutasi hingga reproduksi dan kemudian berulang lagi hingga mencapai generasi yang

Kromosom dalam Genetic algorithm seperti halnya pada tubuh makhluk hidup, terdiri dari deretan gen-gen yang berderet membentuk satu kesatuan. Gen-gen yang membentuk kromosom ini dalam Genetic algorithm terdiri dari bilangan biner (0 dan 1), integer, real, maupun huruf.

Dalam jaringan distribusi radial di PT. Semen Gresik (Persero) Tbk, satu nilai kapasitor pada aliran bus adalah satu gen, keseluruhan distribusi adalah satu kromosom, dan Faktor Daya (PF) pada swing bus, total semua harga kapasitor (total besar kapasitor), rugi P dan Q adalah fitnes (Nilai Kromosom).

Tabel 2.5 Bagian-bagian dari GA yang berada pada Jaringan Distribusi

JARINGAN DISTRIBUSI	DISEBUT	GENETIC ALGORITHM
Kapasitor	→	Gen
Keseluruhan Distribusi	→	Kromosom
Faktor Daya (PF), Rugi P, Rugi Q, Harga Kapasitor	→	Fitnes

Penggunaan symbol '0' dan '1' merupakan penginisial nilai gen pada kromosom, yang artinya gen tersebut bisa bernilai '0' dan '1'. Penggunaan nilai gen dengan symbol tersebut pada beberapa artikel mengenai sistem Genetic Algorithm (GA) pada umumnya (oleh banyak teori) tidak berlaku untuk sistem Genetic Algorithm jaringan distribusi radial di PT. Semen Gresik (Persero) Tbk.

Penggunaan nilai gen dalam Genetic Algorithm untuk sistem jaringan distribusi radial di PT. Semen Gresik (Persero) Tbk. tidak bernilai hanya '0' atau '1', tetapi bernilai mulai dari '0' dan sesuai daftar kapasitor. Jadi nilai gen bisa saja '0', '10', atau '112' dengan ketentuan: jika suatu bus/gen berkapasitor dengan nilai '0' maka dinyatakan bahwa pada bus tersebut tidak ada penempatan kapasitor.

Dari kromosom inilah nantinya parameter-parameter yang akan dioptimasi direpresentasikan, diolah, dan dari hasil ini akhirnya dikembalikan lagi menjadi parameter asli untuk mengetahui harga optimal yang telah dicapai.

4. Operator-operator dalam Genetic Algorithm

Pelaksana dari pemrosesan terhadap kromosom-kromosom yang dibentuk secara random dalam genetic algorithm disebut sebagai operator. Beberapa Operator yang berperan penting dalam genetic algorithm yaitu :

a. Fungsi Fitness (Obyektif)

Fungsi fitness adalah salah satu operator atau komponen yang sangat penting dalam Genetic algorithm, karena merupakan persyaratan untuk melangkah ke proses selanjutnya, yaitu proses seleksi.

Fungsi obyektif adalah sebuah persamaan fungsi yang memiliki peran untuk menghitung nilai sebuah kromosom (fitness). Persamaan ini adalah persamaan yang dibentuk dari sistem yang ada dengan memperhatikan apa yang direpresentasikan dalam kromosom tersebut

untuk menghasilkan berapa besarnya nilai kromosom tersebut. Nilai fitness dari kromosom-kromosom ini bermanfaat untuk proses selanjutnya, yaitu sebagai perbandingan untuk menghasilkan induk baru calon kawin silang.

Perbandingan ini adalah berhubungan dengan besarnya masing-masing fungsi obyektif pada setiap kromosom. Besarnya fungsi obyektif masing-masing fungsi obyektif ini nantinya akan diurutkan untuk menjadi indeks bagi kromosom yang akan dipilih menjadi calon induk yang akan mengalami proses berikutnya yaitu kawin silang.

b. Seleksi

Proses seleksi ini seperti telah disebutkan pada bagian sebelumnya adalah proses pemilihan calon induk yang akan diproses kawin silang atau proses berikutnya yaitu mutasi. Proses pemilihan ini didasarkan pada fungsi obyektif tiap kromosom yang diranking atau diurutkan berdasarkan besarnya dan kemudian urutan tersebut menjadi indeks bagi kromosom yang bersangkutan.

Kromosom yang berindeks fungsi obyektif terbesar akan mempunyai kemungkinan terbesar pula terpilih menjadi kromosom induk dalam proses kawin silang maupun proses mutasi.

c. Kawin Silang

Kromosom yang terpilih dari proses seleksi, maka akan mengalami proses kawin silang (*crossover*). Pemilihan kromosom yang berdasarkan nilai kekuatan (*fitness*) seluruh kromosom dalam populasi

tersebut dimaksudkan untuk membandingkan nilai probabilitas dari nilai fitness sebuah kromosom terhadap total fitness populasinya. Dengan demikian kromosom yang mempunyai nilai probabilitas yang paling besar akan mendapatkan kesempatan yang paling besar untuk dipilih sebagai induk-induk (*parents*) yang akan dikawin silang.

Proses kawin silang sendiri itu adalah proses menyilangkan gen-gen dari dua kromosom induk. Tentu tidak semua gen-gen dari dua kromosom induk tersebut yang saling ditukar, melainkan dimulai dari gen ke-sekian yang terpilih (nilainya telah ditentukan sebelumnya), sehingga akan terbentuk dua kromosom induk baru dan demikian pula kromosom-kromosom yang terpilih untuk proses kawin silang. Kromosom-kromosom induk baru ini kemudian bergabung lagi dengan kromosom lainnya untuk proses berikutnya.

Probabilitas suatu kromosom atau kemungkinan terpilihnya suatu kromosom untuk menjadi kromosom induk dalam proses kawin silang disebut dengan Probabilitas Kawin Silang yang nilainya antara 0.1 sampai 1.0.

d. Mutasi

Proses kawin silang yang telah terjadi dan terpilihlah kromosom, maka dalam mutasi yang terpilih adalah gen secara individual. Jadi proses mutasi tidak memandang kromosom melainkan gen. probabilitas mutasi akan menentukan gen-gen dari suatu populasi yang akan mengalami proses mutasi. Mutasi itu sendiri adalah proses

mengganti nilai gen sebelumnya dengan nilai baru yang ditentukan secara acak (*random*) dengan *range* yang ditentukan sebelumnya.

Gen-gen dengan nilai baru ini kemudian bergabung lagi dengan kromosom induknya masing-masing untuk ditentukan lagi nilai fitness barunya. Dan nilai fitness baru ini yang akan menentukan nilai optimal pada iterasi yang telah dilakukan.

Mutation rate yang banyak digunakan oleh literature berkisar antara 0 sampai 0,1. Angka tersebut sangat kecil yang sesuai dengan realitas di alam bahwa peluang mutasi adalah sangat langka. Untuk populasi besar diatas 100, *crossover rate* berharga 0,6, dan *mutation rate* berharga 0,001. Untuk populasi kecil (dibawah 100), *crossover rate* berharga 0,9 dan *mutation rate* berharga 0,1. (Imam Robandi, 2006).

e. Reinsertion (Reins)

Setelah mengalami proses mutasi, tentu ada kromosom-kromosom yang berubah nilai obyektifnya atau fitnessnya, dan ini tidak semua kromosom akan mengalami perubahan demikian, tergantung pada besarnya nilai probabilitas kromosomnya.

Dari kromosom-kromosom yang telah mengalami proses kawin silang dan mutasi tersebut untuk menggabungkan lagi dengan kromosom-kromosom lama yang tidak mengalami kawin silang dan mutasi, maka digunakan proses yang dinamakan reinsertion atau reins

Dari mutasi maka seluruh kromosom akan dihitung kembali nilai obyektifnya dan kemudian kromosom yang telah menjadi induk baru kemudian disisipkan lagi kedalam populasi lama sehingga jumlah populasinya tetap.

5. Parameter Genetic Algorithm

Terdapat beberapa parameter yang digunakan dalam genetic algorithm. Parameter tersebut digunakan untuk melihat kompleksitas dari genetic algorithm. Parameter yang digunakan tersebut adalah :

a. Jumlah Generasi (*MAXGEN*)

Merupakan jumlah maksimum generasi yang berarti jumlah maksimum perulangan (iterasi) yang dilakukan untuk mencapai nilai optimasi. Jumlah generasi ini mempengaruhi kestabilan output dan lama iterasi (waktu proses genetic algorithm). Jumlah generasi yang besar dapat mengarahkan kearah solusi yang optimal, namun akan membutuhkan waktu yang lama. Sedangkan jika jumlah generasinya terlalu sedikit maka solusi akan terjebak pada local optimum.

b. Ukuran Populasi (*POPSIZE*)

Ukuran populasi mempengaruhi kinerja dan efektifitas dari genetic algorithm. Jika ukuran populasi kecil maka populasi tidak menyediakan cukup materi untuk mencakup ruang permasalahan, sehingga pada umumnya kinerja genetic algorithm menjadi buruk. Dalam hal ini dibutuhkan ruang yang lebih besar untuk mempresentasikan keseluruhan ruang permasalahan. Selain itu

penggunaan populasi yang besar dapat mencegah terjadinya konvergensi pada wilayah lokal. Zbigniew Michalewics (1996) berpendapat banyak aplikasi genetic algorithm mempergunakan populasi pada range 50-100.

c. Probabilitas Crossover (P_C)

Probabilitas crossover digunakan untuk mengendalikan frekuensi operator *crossover*. Dalam hal ini, dalam populasi terdapat $P_C \times \text{POPSIZE}$ struktur (individu) yang melakukan pindah silang. Semakin besar nilai probabilitas *crossover* maka semakin cepat struktur baru yang diperkenalkan dalam populasi. Namun jika probabilitas *crossover* terlalu besar maka struktur dengan nilai fungsi obyektif yang baik dapat hilang dengan lebih cepat dari seleksi. Sebaliknya jika probabilitas terlalu kecil akan menghalangi proses pencarian dalam proses genetic algorithm. Zbigniew Michalewics (1996) berpendapat banyak aplikasi genetic algorithm mempergunakan angka probabilitas *crossover* pada range 0.65 – 1.

d. Probabilitas Mutasi (P_M)

Mutasi digunakan untuk meningkatkan variasi populasi digunakan untuk menentukan tingkat mutasi yang terjadi, karena frekuensi terjadinya mutasi tersebut menjadi $P_M \times \text{POPSIZE} \times N$, N adalah panjang struktur / gen dalam satu individu. Probabilitas mutasi yang rendah akan menyebabkan gen-gen yang berpotensi tidak di coba. Dan sebaliknya tingkat mutasi yang tinggi akan menyebabkan keturunan

akan semakin mirip dengan induknya. Dalam genetic algorithm, mutasi menjalankan aturan penting yaitu :

1. Mengganti gen-gen yang hilang selama proses seleksi.
2. Menyediakan gen-gen yang tidak muncul pada saat inisialisasi awal populasi.

Zbigniew Michalewics (1996) berpendapat banyak aplikasi genetic algorithm mempergunakan angka probabilitas mutasi pada daerah range 0.001 – 0.01

e. Panjang Kromosom (*NVAR*)

Merupakan panjang dari deret gen-gen yang membentuk satu kromosom. Jadi *NVAR* adalah jumlah gen-gen dalam satu kromosom itu sendiri. Gen-gen ini merupakan parameter-parameter dari suatu obyek yang akan dioptimalkan melalui segala proses dalam genetic algorithm tersebut. Semakin panjang dari *NVAR* ini akan memperlama proses genetic algorithm, namun hasil yang diperoleh akan bisa menjadi lebih kompleks.

6. Proses Genetic Algorithm

Sangat perlu untuk mengetahui proses dalam genetic algorithm. Dibawah ini akan diuraikan mengenai hal itu, dimana uraian ini merupakan penjabaran dari genetic algorithm seperti penjabaran pada

a. Pengkodean atau Representasi

Langkah pertama kali yang dilakukan dalam penggunaan genetic algorithm adalah melakukan pengkodean atau representasi terhadap permasalahan yang akan dilakukan. Kode-kode tersebut yang lazim dipakai dalam genetic algorithm seperti kode biner, bilangan real, huruf dan sebagainya.

Pengkodean tersebut diwujudkan dalam gen-gen yang membentuk kromosom, dimana kromosom-kromosom tersebut diidentifikasi sebagai x_i ($i = 1, 2, \dots, n$). Setiap elemen dalam kromosom ini adalah variabel *string* yang disebut gen, berisi nilai-nilai. Variabel-variabel ini dapat dinyatakan dalam bentuk bilangan biner, bilangan real, integer, atau huruf. Pengkodean *string* biner merupakan pendekatan klasik yang digunakan dalam penelitian genetic algorithm karena sederhana. Meskipun representasi dengan cara ini menyulitkan untuk beberapa permasalahan optimasi, misalnya permasalahan *graph coloring*. Digunakan teknik pengkodean yang lain seperti representasi *real number (floating point)*, representasi *order-based* (untuk *bin-patching*, *graph coloring*), *embedded lists* (untuk permasalahan penjadwalan (*scheduling*)), *variable element list* (untuk semi konduktor layout), dan *LISP S-expressions*.

Selanjutnya beberapa kromosom dibentuk dan berkumpul membentuk populasi. Populasi inilah populasi awal bagi genetic algorithm untuk awal melakukan pencarian solusi

b. Fungsi Fitness

Setelah kromosom-kromosom diidentifikasi, maka kemudian fungsi fitness dijalankan untuk mengetahui berapa nilai tiap kromosom dalam populasi tersebut. Fungsi *fitness* $f(x)$ akan sangat mempengaruhi terpilihnya kromosom-kromosom tertentu untuk mengalami proses selanjutnya yaitu kawin silang. Pada permulaan optimasi, biasanya nilai *fitness* masing-masing individu masih mempunyai rentang yang lebar. Seiring dengan bertambah besar generasi, beberapa kromosom mendominasi populasi dan mengakibatkan rentang nilai fitness semakin kecil. Hal ini dapat mengakibatkan konvergensi dini.

Selain itu untuk mempersiapkan langkah selanjutnya, seluruh nilai *fitness* yang didapat dari fungsi *fitness* ini dijumlahkan ($\sum f(x)$) sehingga akan diketahui berapa probabilitas sebuah kromosom ditinjau dari populasinya untuk terpilih menjadi induk yang akan diproses kawin silang sebagai induk yang dipilih.

c. Seleksi

Proses seleksi merupakan langkah lanjutan setelah menghitung nilai *fitness* pada masing-masing kromosom. Proses seleksi menentukan bagaimana genetic algorithm memilih orang tua (*parents*) untuk generasi selanjutnya. Menurut teori Darwin proses seleksi individu adalah: "*individu terbaik akan tetap hidup dan menghasilkan keturunannya*". Pada proses seleksi ini dapat menggunakan banyak

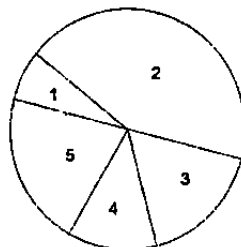
metode seperti *rank selection*, *roulettee wheel selection*, *elitism* dan lain sebagainya.

1). *Rank Selection*

Metode ini mengurutkan kromosom dengan nilai obyektif terbesar sampai nilai terkecil untuk kemudian tiap kromosom tersebut diberi nilai *fitness* yang berurutan besarnya dan dipilih secara acak. Metode ini lebih sederhana namun kemungkinan terpilihnya semua kromosom menjadi cukup besar.

2). *Roulette Wheel Selection*

Seleksi *Roulette Wheel* ini menentukan calon dari orang tua dengan menggunakan sebuah roda roulette, dimana area dari bagian roda disesuaikan dengan kromosom yang sebanding dengan kromosom yang diharapkan. Algoritma menggunakan cara acak untuk memilih satu dari bagian dengan sebuah kemungkinan. Metode seleksi ini yang paling umum digunakan. Pada Gambar 2.32, lingkaran roda *Roulette* merupakan F_{sum} dari 5 buah kromosom yang ada.



Gambar 2.32 *Roda Roulette*

Kromosom 2 adalah kromosom yang paling baik dan menempati interval yang paling besar. Sedangkan kromosom 1

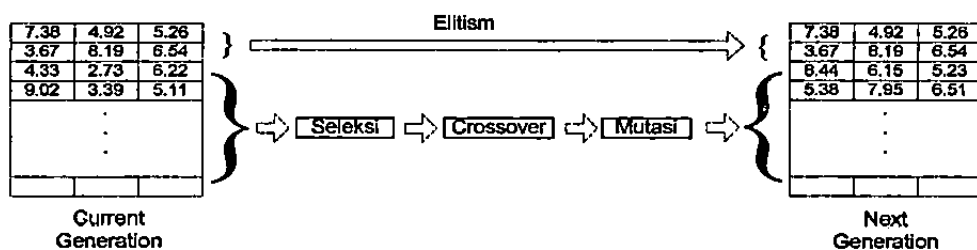
merupakan kromosom yang paling tidak sesuai dan menempati interval yang paling kecil pada roda *Roulette*. Untuk memilih kromosom, angka acak dibuat dalam interval $[0, F_{\text{sum}}]$ dan kromosom yang menempati segmen yang terletak pada angka acak akan terpilih.

3). *Elitism Selection*

Metode ini dianggap metode yang paling sederhana, karena hanya meng-*copy*-kan beberapa kromosom dengan nilai obyektif terbaik untuk tidak diproses kawin silang dan mutasi.

Selama membuat populasi baru dengan *crossover* dan mutasi, kemungkinan akan terjadi kehilangan kromosom terbaik (*best / few best*). *Elitism* adalah metode yang pertama kali meng-*copy*-kan kromosom terbaik (*best / few best*) kedalam populasi baru. Sisanya dikerjakan dengan cara biasa, yaitu melalui seleksi, *crossover* dan mutasi. *Elitism* dapat secara cepat meningkatkan performansi dari Genetic algorithm karena *elitism* menghindarkan hilangnya solusi terbaik (*best / few best*) yang telah ditemukan.

Ilustrasi kerja operator ini dapat digambarkan seperti pada gambar 2.33.



Gambar 2.33. Pembentukan Next Generation dalam Genetic Algorithm

Dari ketiga jenis seleksi, kemudian terbentuklah induk-induk baru untuk kemudian mengalami proses kawin silang.

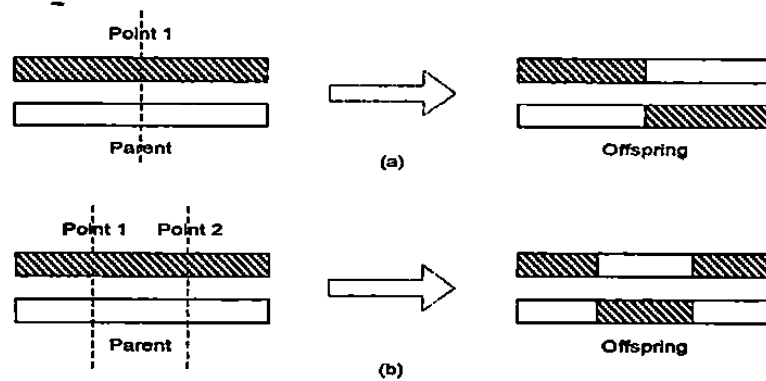
d. *Crossover* (Kawin Silang)

Proses kawin silang adalah proses saling menukarkan gen-gen antar induk-induk hasil seleksi. Tentu tidak semua gen-gen dari suatu kromosom induk ditukar ke induk lain, namun terlebih dahulu ditentukan posisi dari gen pada masing-masing induk yang akan saling dipertukarkan.

Fungsi dari *crossover* adalah menghasilkan kromosom anak dari kombinasi materi-materi gen dua kromosom induk. Cara kerjanya dengan membangkitkan sebuah nilai random r_k , $k = 1, 2, \dots$, *POPSIZE*. *Probabilitas crossover* (P_c) ditentukan dan digunakan untuk mengendalikan frekuensi operator *crossover*. Apabila nilai $r_k < P_c$ maka kromosom ke- k terpilih untuk mengalami *crossover*. *Crossover* yang paling sederhana adalah *one point crossover*. Posisi titik persilangan (*point*) ditentukan secara random pada range satu sampai panjang kromosom. Kemudian nilai *offspring* diambil dari dua *parent* tersebut dengan batas titik persilangan tersebut. Ilustrasi kerja operator ini digambarkan seperti pada Gambar 2.34 (a).

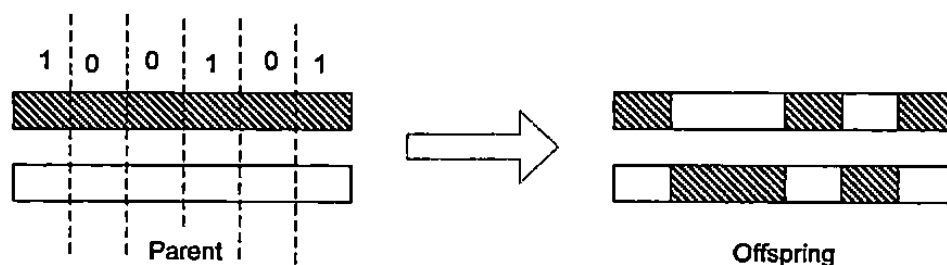
Kemudian ditingkatkan lagi dengan menggunakan *two point crossover*. Penentuan posisi titik persilangan sama seperti *one point crossover* sebelumnya. Pemilihan secara random dilakukan 2 kali. Kemudian nilai *offspring* diambil dari dua *parent* tersebut dengan

batas dua titik persilangan tersebut. Ilustrasi kerja operator ini digambarkan seperti pada Gambar 2.34 (b).



Gambar 2.34 (a) *One Point Crossover* (b) *Two Point Crossover*

Untuk *crossover* uniform dibangkitkan suatu nilai random 0 dan 1 sepanjang jumlah kromosom untuk nilai loci. Jika nilai yang dibangkitkan mempunyai nilai 1 maka *allele parent 2* dan *offspring 2* untuk loci tersebut diambil dari *allele parent 1* dan *offspring 2* untuk loci tersebut diambil dari *allele parent 2*. Ilustrasi kerja operator ini digambarkan seperti pada Gambar 2.35.



Gambar 2.35 *Uniform crossover*