

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. LATAR BELAKANG MASALAH

Dalam mengoperasikan sistem tenaga listrik dengan skala yang relatif besar (beban puncak), sering diperlukan suatu teknik untuk menjaga operasi dalam kondisi yang optimum dalam arti tercapai biaya bahan bakar yang minimum dan rugi-rugi jaringan yang minimum, untuk mencapai harga tersebut sering dihadapkan pada kendala profil tegangan dan pembebanan lebih pada saluran transmisi atau peralatan lain dalam sistem. Hal ini menjadi perhatian utama untuk menangani sistem tenaga berskala besar secara efektif dan efisien. Aliran daya optimum berguna mengatasi berbagai kesulitan dalam operasi perencanaan dan pengendalian sistem tenaga listrik.

Yang dimaksud dengan aliran daya optimum adalah aliran daya yang menghasilkan rugi-rugi daya yang minimum. Untuk mencapai hal ini diperlukan penyuntikan daya reaktif ke dalam sistem. Dimana dan berapa besar daya reaktif tersebut yang dapat disuntikan diperlukan analisa aliran daya. Dalam analisa aliran daya ini perlu diperhatikan profil tegangan yang terjadi agar ada dalam batas-batas yang diperbolehkan. Metode yang digunakan untuk menangani masalah ini berdasarkan teknik optimasi dan diarahkan untuk meminimalkan kerugian dan total sistem untuk memperbaiki profil tegangan. permasalahan.

Penggunaan metode aliran daya optimum dalam sistem tenaga untuk mengamati dan mengelola profil tegangan pada pusat-pusat beban yang berbeda.

1.2. TUJUAN PENULISAN

Tujuan penulisan Tugas Akhir ini adalah :

1. Sebagai salah satu syarat kelulusan dalam jenjang Strata Satu (S-1) pada Jurusan Teknik Elektro, Sekolah Tinggi Teknik PLN Jakarta.
2. Mengetahui dan Mengatasi berbagai kesulitan dalam perencanaan operasi dan pengendalian sistem tenaga listrik serta untuk menangani sistem tenaga berskala besar secara efektif dan efisien.

1.3. PEMBATASAN MASALAH

Dalam penulisan tugas akhir ini, penulis membatasi ruang lingkup permasalahan dan penelitian pada sistem tenaga listrik dan sistem transmisi.

1.4. METODE PENULISAN

1. Melakukan studi kepustakaan mengenai teori-teori pendukung yang berhubungan dengan masalah yang dibahas.
2. Peninjauan lapangan pada PLN P3B Gandul.

1.5. SISTEMATIKA PENULISAN

A B S T R A K

Bab I Pendahuluan

Pada Bab I dijelaskan tentang latar belakang permasalahan, tujuan penulisan, metode pengambilan data, batasan makalah dan sistimatika penulisan.

- 1.1 Latarbelakang Masalah
- 2.1 Tujuan Penulisan
- 3.1 Batasan Masalah
- 4.1 Metoda Penulisan
- 5.1 Sistimatika Penulisan

Bab II Teori Dasar Perhitungan Aliran Daya

Pada bab ini berisikan teori penunjang berupa teori dasar proses penyediaan energi tenaga listrik, sistem tenaga listrik yang sederhana, dasar-dasar perhitungan aliran daya berupa; macam-macam bus persamaan dasar aliran daya dan metode perhitungan dengan menggunakan metode newton

rephson. Diharapkan setelah membaca membaca bab ini akan mudah memahami ketika melanjutkan ke bab III dan bab IV.

Bab III Aliran Daya Yang Optimum

Pada bab ini berisikan hal-hal mengenai pembangkitan yang optimum, aliran daya yang optimum, kendala-kendala mengenai pembangkitan dan aliran daya yang optimum serta langkah-langkah dalam mengatasi kendala-kendala tersebut.

Bab IV Analisa Load Flow Dengan Menggunakan Program Etap

Pada bab ini menjelaskan tentang sistem 500 kV Jawa Bali, kondisi pembangkitan aliran daya 500 kV disertai profil tegangannya, kendala profil tegangan yang kurang baik di bawah sistem 500 kV, dan solusi dalam mengatasinya.

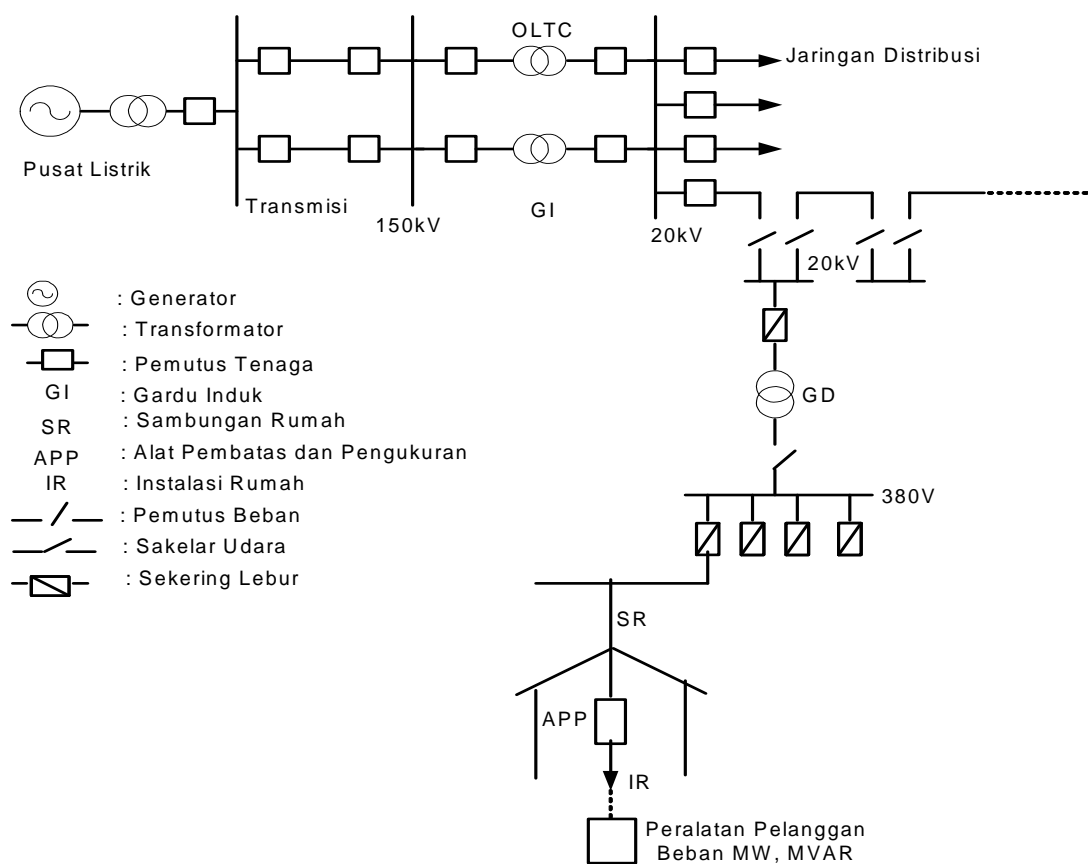
Bab V Penutup

Pada bab ini merupakan bab penutup dari penulisan tugas akhir ini, yaitu berupa kesimpulan dari pembahasan bab-bab sebelumnya.

BAB II

TEORI DASAR PERHITUNGAN ALIRAN DAYA

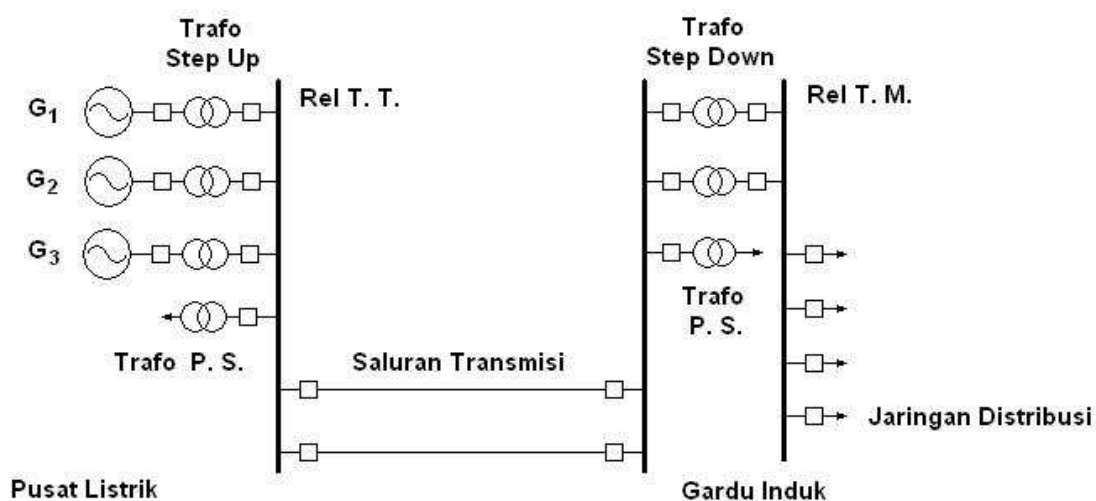
2.1 Proses Penyediaan Tenaga Listrik



Gambar 2.1. Proses Penyampaian Tenaga Listrik dari Pusat-Pusat Listrik sampai ke Beban

Gambar 2.1. menunjukkan bahwa sistem tenaga listrik terdiri atas lima sub-sistem utama, yaitu: pusat pembangkit, transmisi, gardu induk, jaringan distribusi, dan beban.

Tenaga listrik atau Energi Listrik dibangkitkan dalam Pusat-pusat Listrik seperti PLTA, PLTU, PLTG, PLTGU, PLTP dan PLTD kemudian disalurkan melalui saluran transmisi terlebih dahulu dinaikkan tegangannya oleh transformator penaik tegangan (step up transformator) yang ada di Pusat Listrik. Hal ini digambarkan oleh gambar 2.2 di bawah ini :



Gambar 2.2 Skema Pusat listrik Yang Dihubungkan Melalui Saluran Transmisi ke Gardu Induk

Saluran transmisi tegangan tinggi di PLN kebanyakan mempunyai

tegangan 66KV, 150KV, 500KV. Khusus untuk tegangan 500KV dalam praktek saat ini disebut sebagai tegangan ekstra tinggi. Masih ada beberapa saluran transmisi dengan tegangan 30KV, namun tidak dikembangkan lagi oleh PLN. Saluran transmisi ada yang berupa saluran udara dan ada pula yang berupa kabel tanah. Karena saluran udara harganya jauh lebih murah dibandingkan dengan kabel tanah adalah bahwa saluran udara mudah terganggu, misalnya karena kena petir, kena pohon dan lain-lain.

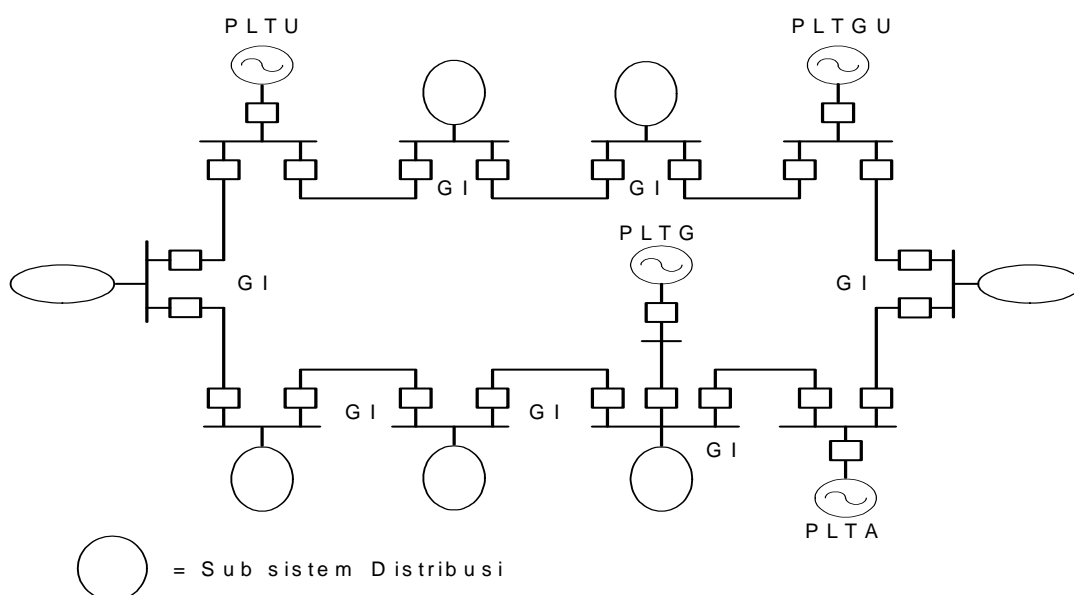
Setelah tenaga listrik disalurkan melalui saluran transmisi maka sampailah tenaga listrik ke Gardu Induk (GI) untuk diturunkan tegangannya melalui transformator penurun tegangan (step down transformator) menjadi tegangan menengah atau yang juga disebut sebagai tegangan distribusi primer. Tegangan distribusi primer yang dipakai PLN adalah 20KV, 12KV dan 6KV. Kecenderungan saat ini menunjukkan bahwa tegangan distribusi primer PLN yang berkembang adalah 20KV.

Jaringan setelah keluar dari GI biasa disebut jaringan distribusi, sedangkan jaringan antara Pusat Listrik dengan GI biasa disebut jaringan transmisi. Setelah tenaga listrik disalurkan melalui jaringan distribusi primer maka kemudian tenaga listrik diturunkan tegangannya dalam gardu-gardu distribusi menjadi tegangan rendah dengan tegangan 380/220 Volt 220/127 Volt, kemudian disalurkan melalui Jaringan Tegangan Rendah untuk selanjutnya disalurkan ke rumah-rumah pelanggan (konsumen) PLN melalui

Sambungan Rumah maka tenaga listrik selanjutnya melalui alat pembatas daya dan KWH meter.

2.2 Sistem Tenaga Listrik

Contoh sederhana dari sistem tenaga listrik pada gambar di bawah ini, dimana menggambarkan sebuah Sistem Tenaga Listrik yang terdiri dari sebuah PLTU, sebuah PLTA, sebuah PLTG dan 7 buah GI.



Gambar 2.3. Konfigurasi Sederhana dari Sebuah Sistem Tenaga Listrik

Untuk keperluan penyediaan tenaga listrik bagi para pelanggan, diperlukan berbagai peralatan listrik. Berbagai peralatan listrik ini dihubungkan satu sama lain mempunyai inter relasi dan secara keseluruhan membentuk suatu sistem tenaga listrik. Yang dimaksud dengan Sistem Tenaga Listrik di sini adalah sekumpulan Pusat Listrik dan Gardu Induk (pusat Beban) yang satu

sama lain dihubungkan oleh Jaringan Transmisi sehingga merupakan sebuah kesatuan interkoneksi. Dalam sebuah Sistem Tenaga Listrik umumnya terdapat beberapa macam Pusat Listrik seperti PLTU, PTGU, PLTA dan PLTG. Di setiap Gardu Induk terdapat Sub Sistem Distribusi yang melayani konsumsi listrik pelanggan sehingga sub sistem distribusi merupakan beban sistem. Konsumsi listrik dari pelanggan atau pemakai tenaga listrik meliputi pemakaian daya aktif dan daya reaktif. Profil tegangan dalam sistem tergantung kepada beban yang ada pada masing-masing GI serta impedansi dari saluran transmisi, profil tegangan sangat dipengaruhi oleh konsumsi daya reaktif di setiap Gardu Induk. Sumber daya reaktif adalah yang ada di Pusat-Pusat Listrik yang dapat diatur dengan melakukan pengaturan dengan arus medan penguat, di Gardu Induk terdapat *On Load tap changer* (OLTC) namun *on load tap changer* tidak menghasilkan daya reaktif atau hanya merupakan katup untuk mengalirkan daya reaktif. Untuk memperbaiki profil tegangan seringkali diperlukan sumber daya reaktif tambahan berupa Kapasitor dan *Static Var Compensator* (SVC).

Pusat-pusat Listrik dan GI satu sama lain dihubungkan oleh saluran transmisi seperti yang digambarkan oleh gambar 2.3 agar tenaga listrik dapat mengalir sesuai dengan kebutuhan dan terbentuklah suatu sistem tenaga listrik. Setiap GI sesungguhnya merupakan beban untuk suatu daerah pelanggan tertentu, bebannya berubah-ubah sepanjang waktu sehingga juga daya yg dibangkitkan dalam pusat-pusat listrik harus selalu berubah. Perubahan beban

dan perubahan pembangkitan daya ini selanjutnya juga menyebabkan aliran daya dalam saluran-saluran transmisi berubah-ubah sepanjang waktu.

Dalam proses penyediaan tenaga listrik bagi para pelanggan seperti diuraikan di atas tidak dapat dihindarkan timbulnya rugi-rugi dalam jaringan disamping adanya tenaga listrik yang harus disisihkan untuk pemakaian sendiri. Proses pembangkitan tenaga listrik dalam Pusat-pusat Listrik Termis memerlukan biaya bahan bakar yang tidak sedikit. Biaya bahan bakar dan rugi-rugi dalam jaringan merupakan faktor-faktor yang harus ditekan agar menjadi sekecil mungkin dengan tetap memperhatikan mutu dan keandalan.

Dalam hal pengembangan Sistem Tenaga Listrik , pada masa kini dapat dijumpai pelistrikan desa dengan menggunakan PLTD atau PLTA Mikro. Selanjutnya apabila beban bertambah maka jumlah unit pembangkit dalam PLTD ditambah. Tetapi pada PLTA hal ini sering tidak bisa dilakukan karena potensi hidranya terbatas. Begitu pula pada PLTD penambahan unit pembangkit ada batasnya walaupun pada umumnya lebih leluasa dibandingkan dengan PLTA. Apabila Pusat Listrik yang ada sudah tidak mungkin diperluas lagi maka perlu dibangun Pusat Listrik lain untuk melayani perkembangan beban. Demikianlah dalam perkembangannya akan terbentuk sistem dengan beberapa Pusat Listrik yang mengisi suatu jaringan tertentu. Sistem Tenaga Listrik yang terakhir ini menjadi sebuah sub sistem apabila diintrkoneksi dengan sub sistem lain yang serupa, sehingga terbentuk suatu sistem interkoneksi. Dalam sistem yang terisolir yang terdiri dari sebuah Pusat Listrik saja pembagian beban antara unit

pembangkit dapat dilakukan dalam rangka mengikuti kebutuhan beban dari para pemakai listrik yang selalu berubah sepanjang waktu.

2.3 Dasar-dasar Perhitungan Aliran Daya

Sebelum studi aliran daya ini dilakukan sistem yang dianalisa harus terlebih dahulu direpresentasikan dengan suatu diagram pengganti.

2.3.1 Diagram Segaris

Suatu sistem tiga fasa yang simetris selalu dipecahkan per satu fasa dengan menggambarkan diagram segaris atau *single line diagram*. Maksud diagram segaris itu adalah untuk memberikan semua informasi yang perlu dan dalam bentuk yang sesuai dengan sistem itu. Diagram segaris itu berbeda-beda sesuai dengan studi yang akan dilakukan. Persoalan-persoalan pokok dalam sistem tenaga adalah : aliran daya, operasi ekonomik, hubung singkat, kestabilan peralihan, pengaturan-pengaturan daya aktif dan frekuensi dan

pengaturan daya reaktif dan tegangan serta pelepasan beban. Dilihat dari batasan waktu, persoalan-persoalan diatas dapat dikelompokkan dalam tiga kelompok keadaan yaitu : keadaan mantap, keadaan peralihan, dan keadaan subperalihan. Pada studi aliran daya dan operasi ekonomik yang dibutuhkan adalah besaran-besaran dalam keadaan mantap, pada studi kestabilan peralihan dibutuhkan besaran-besaran dalam keadaan peralihan dan pada studi hubung singkat dibutuhkan besaran-besaran dalam keadaan sub-peralihan. Pada studi

pengaturan dan pelepasan beban besaran-besaran yang dibutuhkan tergantung dari keadaan yang diinginkan, mantap atau peralihan.

Oleh karena itu, representasi sistem tenaga listrik itu digambarkan sesuai dengan studi-studi yang akan dilakukan, dan banyaknya keterangan yang dimasukkan dalam diagram tergantung pada maksud diagram tersebut dibuat. Misalnya dalam studi aliran daya beban-beban dan tahanan-tahanan harus digambarkan, tempat pemutus tenaga dan rele tidak penting, jadi tidak perlu digambarkan, juga impedansi hubungan netral ke tanah tidak perlu digambarkan. Dalam studi hubung singkat, tempat dan spesifikasi dari pemutus tenaga dan rele harus diberikan, sedangkan tahanan biasanya dapat diabaikan. Demikian juga beban statik dapat diabaikan. Pengabaian ini dilakukan untuk menyederhanakan sebuah resistor, dihubungkan ke sebuah rel dan melalui sebuah transformator panaik tegangan ke saluran transmisi. Sebuah generator yang lain, yang ditanahkan melalui sebuah reaktor, dihubungkan ke sebuah rel dan melalui sebuah transformator pada ujung yang lain dari saluran transmisi itu.

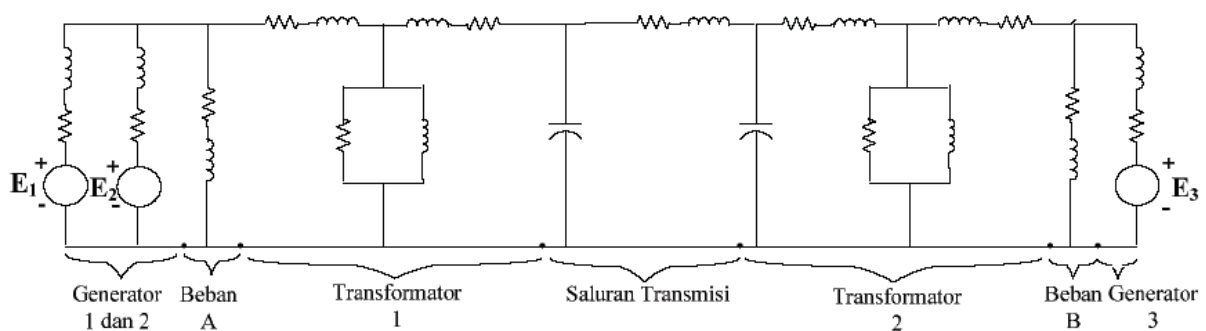
Sebuah beban dihubungkan ke masing-masing rel. Pada diagram itu keterangan mengenai beban, rating generator, transformator, dan reaktansi bermacam-macam komponen rangkaian sering juga diberikan.



Gambar 2.4. Diagram Segaris Suatu Sistem Listrik

2.3.2 Diagram Impedansi dan Diagram Reaktansi

Untuk dapat menghitung kinerja suatu sistem dalam keadaan berbeban atau terjadinya suatu gangguan, diagram segaris digunakan untuk menggambar rangkaian ekuivalen fasa tunggal dari sistem. Gambar 2.5 menggabungkan rangkaian-rangkaian ekuivalen dari berbagai komponen yang diperlihatkan pada Gambar 2.4 untuk membentuk diagram impedansi sistem. Jika diinginkan untuk melakukan studi beban, beban tertinggal A dan B digantikan dengan resistansi dan reaktansi induktif dalam hubungan seri. Diagram impedansi tidak memasukkan impedansi pembatas arus yang ditunjukkan pada diagram segaris diantara netral generator dan tanah karena dalam keadaan seimbang tidak ada arus yang mengalir dalam tanah dan netral generator berada pada potensial yang sama dengan netral sistem. Karena arus magnet suatu transformator biasanya diabaikan dalam rangkaian ekuivalen transformator.



Gambar 2.5 Diagram Impedansi dari diagram segaris gambar 2.4

Seperti telah disebutkan terdahulu, resistansi sering diabaikan dalam perhitungan gangguan, juga dalam program komputer digital. Tentu saja pengabaian resistansi akan menimbulkan sedikit kesalahan, tetapi hasilnya masih dapat diterima karena reaktansi induktif suatu sistem jauh lebih besar dari resistansinya. Resistansi dan reaktansi induktif tidak dijumlahkan secara langsung, dan impedansi tidak akan jauh berbeda dengan resistansi induktif jika resistansinya kecil. Beban-beban yang tidak menyangkut mesin-mesin yang berputar sangat kecil pengaruhnya terhadap arus saluran total pada waktu terjadi gangguan oleh karena itu biasanya diabaikan. Tetapi beban yang berupa motor serempak selalu dimasukkan dalam perhitungan gangguan karena e.m.f yang dibangkitkan besar sumbangannya pada arus hubung singkat. Diagram itu harus memperhitungkan motor induksi sebagai sebuah e.m.f yang dibangkitkan dalam hubungan seri dengan suatu reaktansi induktif jika diagram tersebut dimaksudkan untuk menentukan arus yang timbul segera sesudah terjadinya gangguan.

Motor induksi diabaikan dalam perhitungan arus beberapa periode setelah terjadinya gangguan karena arus yang diberikan oleh sebuah motor induksi hilang dengan cepat setelah motor tersebut dihubung singkat. Jika ingin menyederhanakan perhitungan arus gangguan dengan mengabaikan semua beban statis, semua resistansi, arus magnet masing-masing transformator, dan kapasitansi saluran transmisi, diagram impedansi itu menjadi diagram reaktansi seperti ditunjukkan gambar 2.6. Penyederhanaan ini hanya berlaku untuk

2.3.5 Representasi Saluran Transmisi

Untuk keperluan analisa dan perhitungan maka diagram pengganti biasanya dibagi dalam 3 kelas, yaitu:

1. Saluran pendek (<80 km)
2. Saluran menengah (80-250 km)
3. Saluran Panjang (>250 km)

Sebenarnya klasifikasi di atas sangat kabur dan sangat relatif. Klasifikasi saluran transmisi harus didasarkan atas besar kecilnya kapasitansi ke tanah. Jadi bila kapasitansi ke tanahnya kecil, dengan demikian arus bocor ke tanah kecil terhadap arus beban, maka dalam hal ini kapasitansi ke tanah dapat diabaikan, dan dinamakan saluran pendek. Tetapi bila kapasitansi ke tanah sudah mulai besar sehingga tidak dapat diabaikan, tetapi belum begitu besar sekali sehingga masih dapat dianggap seperti kapasitansi terpusat (*lumped capacitance*), dan ini dinamakan saluran menengah. Bila kapasitansi itu besar sekali sehingga tidak mungkin lagi dianggap sebagai kapasitansi terpusat, dan harus dianggap terbagi rata sepanjang saluran, maka dalam hal ini dinamakan saluran panjang.

Diatas telah disebutkan bahwa klasifikasi berdasarkan panjang kawat sangat kabur. Seperti diketahui semakin tinggi tegangan operasi maka kemungkinan timbulnya korona akan sangat besar. Korona ini akan memperbesar kapasitansi, dengan demikian memperbesar arus bocor. Jadi ada kalanya walaupun panjang saluran hanya 50 km, misalnya, bila tegangan kerja

sangat tinggi (Tegangan Ekstra Tinggi, EHV, apalagi Tegangan Ultra Tinggi, UHV) maka kapasitansi relatif besar sehingga tidak mungkin lagi diabaikan walaupun panjang saluran hanya 50 km. Jadi untuk memperoleh hasil yang teliti, sebelum menggambarkan diagram pengganti saluran transmisi, lebih baik bila dihitung terlebih dahulu kapasitansi termasuk korona. Dalam prakteknya klasifikasi saluran transmisi menurut panjangnya seperti tertera di atas sudah memadai.

2.3.6 Representasi Beban-beban

Beban-beban dapat dibagi dalam dua golongan, yaitu: beban statik dan beban berputar; motor sinkron atau motor asinkron. Beban statik dan beban berputar biasanya direpresentasikan sebagai impedansi konstan Z atau sebagai daya konstan P dan Q , tergantung dari alat hitung yang digunakan. Perhitungan dengan tangan atau *Network Analyzer* dengan impedansi konstan, sedang bila dihitung dengan komputer digital direpresentasikan dengan daya P dan Q konstan.

2.3.7 Klasifikasi Bus

Jenis bus pada sistem tenaga, yaitu

1. *Load bus* (bus beban)

Setiap bus yang tidak memiliki generator disebut dengan *load bus*. Pada bus ini daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) diketahui sehingga sering juga

disebut bus PQ. Daya aktif dan reaktif yang disuplai ke dalam sistem tenaga adalah mempunyai nilai positif, sementara daya aktif dan reaktif yang dikonsumsi bernilai negative. Besaran yang dapat dihitung pada bus ini adalah V dan d .

2. *Generator bus* (bus generator)

Generator bus dapat disebut dengan *voltage controlled bus* karena tegangan pada bus dibuat selalu konstan. Setiap bus generator dimana memiliki daya megawatt yang dapat diatur melalui *prime mover* (penggerak mula) dan besaran tegangan yang dapat diatur melalui arus eksitasi generator sehingga bus ini sering juga disebut dengan PV bus. Besaran yang dapat dihitung dari bus ini adalah Q dan d .

3. *Slack bus*

Slack bus sering juga disebut dengan *Swing bus* atau rel berayun. Adapun besaran yang diketahui dari bus ini adalah tegangan (V) dan sudut beban(d). Suatu sistem tenaga biasanya didesign memiliki bus ini yang dijadikan referensi yaitu besaran $d = 00$. Besaran yang dapat dihitung dari bus ini adalah daya aktif dan reaktif. Secara singkat klasifikasi bus dalam sistem tenaga terdapat pada tabel 2.1 yaitu besaran yang dapat diketahui dan tidak dapat diketahui pada bus tersebut.

Tabel 2.1 Klasifikasi Bus Pada Sistem Tenaga

Tipe Bus	Besaran Yang Diketahui	Besaran Yang Tidak Diketahui
Slack	$[V] = 1.0 ; \theta = 0^\circ$	P, Q
Generator (PV Bus)	P, [V]	Q, θ
Load (PQ Bus)	P, Q	[V], θ

Tanda P dan Q

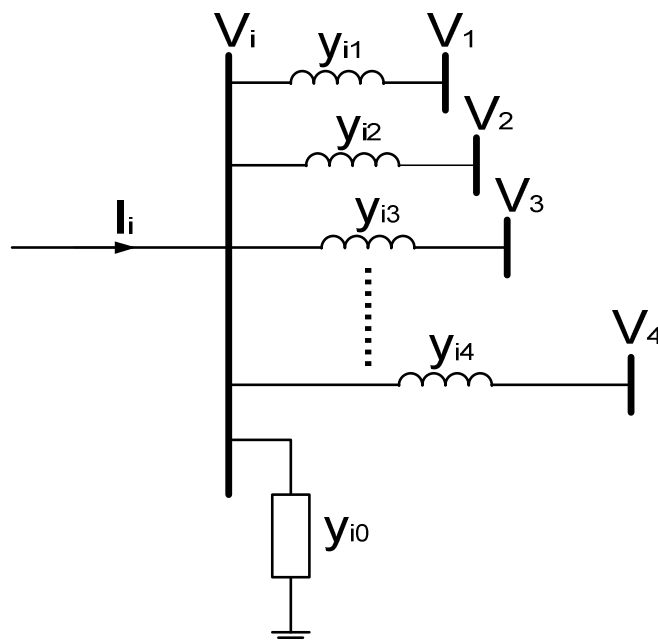
Salah satu yang harus diingat dalam analisa aliran daya adalah tanda daya nyata (P) dan daya reaktif (Q). Daya reaktif *lagging* adalah daya reaktif positif menunjukkan arusnya bersifat induktif dan daya reaktif *leading* adalah daya negative menunjukkan arusnya bersifat kapasitif dan arus bus positif adalah arus yang arahnya menuju bus. Dikarenakan aliran arus generator menuju bus dan aliran arus beban meninggalkan bus, sehingga tanda daya adalah positif untuk bus generator dan negative untuk bus beban. Oleh karena itu, dapat mengikuti ketentuan yang telah dibuat, yaitu:

1. P dan Q dengan bus beban bersifat induktif (bus beban dengan faktor daya *lagging*) adalah kedua nilai negative ($S = - P - jQ$).
2. P dan Q dengan bus beban bersifat kapasitif (bus beban dengan faktor daya *leading*) adalah negative dan positif berturut-turut ($S = - P + jQ$).

3. P dan Q bus generator bersifat induktif (bus dengan generator sedang beroperasi pada faktor daya *lagging*) adalah kedua bernilai positif ($S = P + jQ$).
4. P dan Q bus generator bersifat kapasitif (bus dengan generator sedang beroperasi faktor daya *leading*).
5. Daya reaktif dari peralatan kompensasi kapasitif shunt dilokasi bus adalah positif.

2.3.8 Persamaan Aliran Daya

Jaringan sistem seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.7, saluran transmisinya direpresentasikan dengan model π yang mana impedansi-impedansinya telah diubah menjadi admitansi-admitansi dalam satuan per unit.



Gambar 2.7. Tipikal bus dari sistem sederhana

Aplikasi Hukum Arus Kirchoff pada bus ini diberikan dalam :

$$\begin{aligned} I_i &= y_{i0} V_i + y_{i1} (V_i - V_1) + y_{i2} (V_i - V_2) + \dots + y_{in} (V_i - V_n) \\ &= (y_{i0} + y_{i1} + y_{i2} + \dots + y_{in})V_i - y_{i1} \cdot V_1 - y_{i2} \cdot V_2 - \dots - y_{in} \cdot V_n \end{aligned} \quad (2.1)$$

Atau

$$I_i = V_i \sum_{j=0}^n y_{ij} - \sum_{j=1}^n y_{ij} \cdot V_j \quad \text{dimana } j \neq i \quad (2.2)$$

Daya aktif dan daya reaktif pada bus I adalah :

$$P_i + jQ_i = V_i I_i^*$$

Atau

$$I_i = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*}$$

Dengan mensubstitusi kedua persamaan diatas, maka hasilnya :

$$V_i \sum_{j=0}^n y_{ij} - \sum_{j=1}^n y_{ij} \cdot V_j = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} \quad (2.3)$$

Persamaan 2.3 diatas adalah persamaan umum untuk aliran daya, untuk menyelesaikanya dibutuhkan teknik iterasi, misalnya saja gauss seidel, newton raphson, fast decouple, dll.

2.3.9 Metode Perhitungan Dengan Menggunakan Metode Newton Raphson

Metode Newton Raphson dapat menyelesaikan permasalahan aliran daya untuk sistem lebih besar dengan lebih efektif. Jumlah iterasi yang diperlukan tergantung dari jumlah bus dalam sistem. Persamaan aliran daya ditulis dalam bentuk koordinat kompleks.

Daya yang mengalir suatu titik (bus) di dalam sistem kelistrikan dipasok dari atau mengalir ke beberapa bus lain. Parameter yang dihitung dalam hal ini adalah tegangan di suatu bus k (V_k). Admittansi antara bus penerima (k) dan bus pengirim (j) dengan simbol Y_{kj} .

Tegangan sistem disimbolkan sebagai :

$$V_k = E_k + jF_k \quad (2.4)$$

Admittansi antara dua bus k dan j adalah :

$$Y_{kj} = G_{kj} + jB_{kj} \quad (2.5)$$

Besar arus yang mengalir dari bus-bus lain (j) ke suatu bus (k) dapat diperoleh berdasarkan hukum kirchoff sebagai berikut :

$$I_k = \sum_{j=1}^n Y_{kj} V_j \quad \text{atau} \quad I_k = Y_{kk} V_k + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n Y_{kj} V_j \quad (2.6)$$

Persamaan daya semu pada bus k

$$S_k^* = V_k^* I_k \quad (2.7)$$

Subtitusikan persamaan (2.6) ke dalam persamaan (2.7)

$$S_k^* = V_k^* \left[Y_{kk} V_k + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n Y_{kj} V_j \right] \quad (2.8)$$

Dimana

$$S_k^* = P_k - jQ_k \quad (2.9)$$

$$V_k^* = E_k - jF_k \quad (2.10)$$

Subtitusikan persamaan (2.9) dan (2.10) ke dalam persamaan (2.8), persamaan daya semu menjadi

$$P_k - jQ_k = (E_k - jF_k) \left[Y_{kk} (E_k + jF_k) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n (G_{kj} + jB_{kj}) (E_j + jF_j) \right] \quad (2.11)$$

Dengan memisahkan komponen real dan imajiner, didapatkan persamaan untuk daya aktif dan daya reaktif seperti persamaan dibawah ini

$$P_k = G_{kk} (E_k^2 + F_k^2) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n (E_k (G_{kj} E_j - B_{kj} F_j) + F_k (G_{kj} F_j + B_{kj} E_j)) \quad (2.12)$$

$$Q_k = -B_{kk} (E_k^2 + F_k^2) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n (F_k (G_{kj} E_j - B_{kj} F_j) - E_k (G_{kj} F_j + B_{kj} E_j)) \quad (2.13)$$

Untuk membentuk matriks jacobian perhatikan persamaan (2.14)

$$\Delta S_k^i = J \Delta V_k^{i+1} \quad (2.14)$$

Bentuk matriks jacobian

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \\ \cdot \\ \cdot \\ \Delta P_n \\ \Delta Q_2 \\ \Delta Q_3 \\ \cdot \\ \cdot \\ \Delta Q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial E_2} & \frac{\partial P_2}{\partial E_3} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial E_n} & \frac{\partial P_2}{\partial F_2} & \frac{\partial P_2}{\partial F_3} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial F_n} \\ \frac{\partial P_3}{\partial E_2} & \frac{\partial P_3}{\partial E_3} & \dots & \frac{\partial P_3}{\partial E_n} & \frac{\partial P_3}{\partial F_2} & \frac{\partial P_3}{\partial F_3} & \dots & \frac{\partial P_3}{\partial F_n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \frac{\partial P_n}{\partial E_2} & \frac{\partial P_n}{\partial E_3} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial E_n} & \frac{\partial P_n}{\partial F_2} & \frac{\partial P_n}{\partial F_3} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial F_n} \\ \frac{\partial Q_2}{\partial E_2} & \frac{\partial Q_2}{\partial E_3} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial E_n} & \frac{\partial Q_2}{\partial F_2} & \frac{\partial Q_2}{\partial F_3} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial F_n} \\ \frac{\partial Q_3}{\partial E_2} & \frac{\partial Q_3}{\partial E_3} & \dots & \frac{\partial Q_3}{\partial E_n} & \frac{\partial Q_3}{\partial F_2} & \frac{\partial Q_3}{\partial F_3} & \dots & \frac{\partial Q_3}{\partial F_n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \frac{\partial Q_n}{\partial E_2} & \frac{\partial Q_n}{\partial E_3} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial E_n} & \frac{\partial Q_n}{\partial F_2} & \frac{\partial Q_n}{\partial F_3} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial F_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta E_2 \\ \Delta E_3 \\ \cdot \\ \cdot \\ \Delta E_n \\ \Delta F_2 \\ \Delta F_3 \\ \cdot \\ \cdot \\ \Delta F_n \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Atau dalam bentuk yang lebih sederhana

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta E \\ \Delta F \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Komponen diagonal dan off-diagonal dari J_1 adalah :

- Komponen diagonal

$$\frac{\partial P_k}{\partial E_k} = 2G_{kk} E_k + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n (G_{kj} E_j - B_{kj} F_j) \quad (2.17)$$

- Komponen off-diagonal

$$\frac{\partial P_k}{\partial E_j} = G_{kj} E_k + B_{kj} F_k \quad (2.18)$$

Komponen diagonal dan off-diagonal dari J_2 adalah :

- Komponen diagonal

$$\frac{\partial P_k}{\partial E_k} = 2G_{kk} F_k + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n (G_{kj} F_j + B_{kj} E_j) \quad (2.19)$$

- Komponen off-diagonal

$$\frac{\partial P_k}{\partial E_j} = -B_{kj} E_k + G_{kj} F_k \quad (2.20)$$

Komponen diagonal dan off-diagonal dari J_3 adalah :

- Komponen diagonal

$$\frac{\partial Q_k}{\partial E_k} = -2B_{kk} E_k - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n (G_{kj} F_j + B_{kj} E_j) \quad (2.21)$$

- Komponen off-diagonal

$$\frac{\partial Q_k}{\partial E_j} = G_{kj} F_k - B_{kj} E_k \quad (2.22)$$

Komponen diagonal dan off-diagonal dari J_4 adalah :

- Komponen diagonal

$$\frac{\partial P_k}{\partial E_k} = -2B_{kk} F_k + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n (G_{kj} E_j - B_{kj} F_j) \quad (2.23)$$

- Komponen off-diagonal

$$\frac{\partial P_k}{\partial E_j} = -B_{kj} F_k + G_{kj} E_k \quad (2.24)$$

Besaran ΔP_k^i dan ΔQ_k^i adalah selisih dari penjadwalan dengan hasil perhitungan setiap iterasi, atau lebih dikenal dengan power residual (daya sisa).

Persamaan daya sisa :

$$\Delta P_k^i = P_k^{sp} - P_k^i \quad (2.25)$$

$$\Delta Q_k^i = Q_k^{sp} - Q_k^i \quad (2.26)$$

Differensial tegangan yang berisi nilai-nilai ΔE dan ΔF sekarang dapat diperoleh dengan menginverskan matriks jacobian, menjadi :

$$\begin{bmatrix} \Delta E \\ \Delta F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

Perkiraan baru untuk tegangan

$$E_k^{(i+1)} = E_k^i + \Delta E_k^i \quad (2.28)$$

$$F_k^{(i+1)} = F_k^i + \Delta F_k^i \quad (2.29)$$

2.4 Analisa Hasil Aliran Daya

Aliran Daya (*Load Flow*) adalah gambar atau potret terhadap keadaan aliran daya pada masing-masing peralatan listrik yang terjadi pada suatu waktu

tertentu pada sistem tenaga listrik. Yang dimaksud peralatan listrik disini adalah pembangkit, penghantar, dan trafo tenaga. Karena daya dapat mengalir pada peralatan listrik yang disebabkan adanya beda tegangan antar Gardu Induk, maka pada potret *load flow* tersebut juga dapat diperoleh informasi tentang tegangan masing-masing Gardu Induk. Demikian juga rugi daya total maupun pada masing-masing peralatan listrik dapat diketahui pula.

Syarat sistem tenaga listrik beroperasi dalam keadaan normal adalah :

1. Daya pembangkitan = beban + rugi daya

Jika : Daya pembangkitan = beban + rugi daya, maka $f = 50$ Hz

Daya pembangkitan $>$ beban + rugi daya, maka $f > 50$ Hz

Daya pembangkitan $<$ beban + rugi daya, maka $f < 50$ Hz

2. Tegangan disetiap Gardu Induk 500 kV : $90\% < V < 105\%$
3. Tidak ada peralatan listrik (meliputi pembangkit, penghantar, trafo, dsb) yang *over load* atau berbeban lebih
4. Aman
 - Artinya *N-1 Security Criteria* terpenuhi. Dalam sistem tenaga listrik tersebut, tersedia masing-masing minimal satu peralatan listrik cadangan. Untuk pembangkit, harus tersedia cadangan pembangkitan daya sebesar minimal sama dengan kapasitas satu unit terbesar di sistem tersebut.

- *Breaking Capacity* (kemampuan memutuskan daya hubung singkat) di masing-masing pemutus (PMT) pada Gardu Induk adalah lebih besar daripada *Short Circuit Level*-nya (daya hubung singkat). Demikian halnya, bagi peralatan listrik lainnya.
- Batas stabilitas pada sistem tenaga listrik tersebut tidak dilampaui

Studi *Load Flow* biasanya diperlukan untuk perencanaan operasi Harian, Mingguan, Tahunan, Lima tahunan dan sepuluh tahunan serta pada kasus tertentu seperti Hari Raya, Tahun Baru, kondisi pelepasan penghantar tertentu untuk pemeliharaan dan sebagainya. Juga, studi *Load Flow* dapat digunakan untuk menentukan lokasi dan kapasitas pembangkit baru yang akan masuk ke gangguan.

Manfaat potret *Load Flow* antara lain yaitu :

1. Mengetahui beban atau daya yang mengalir pada peralatan listrik dan kemudian dibandingkan dengan Kemampuan Hantar Daya (KHD) dari peralatan tersebut. Normalnya, KHD peralatan listrik lebih besar dari daya yang mengalir padanya. Jika daya yang mengalir tersebut ternyata lebih besar dari KHD dari peralatan tersebut, maka yang harus dilakukan adalah :
 - Pengaturan penjatahan pembangkitan daya pada masing-masing pembangkit atau rekonfigurasi jaringan sedemikian

sehingga daya mengalir menjadi lebih kecil daripada Kemampuan Daya Hantar-nya.

- Investasi untuk penggantian peralatan listrik dengan Kemampuan Hantar Daya yang lebih baik.

2. Mengetahui tegangan disetiap Busbar (GITET). Jika tegangan $< 90\%$ atau $> 105\%$ maka yang harus dilakukan :

- Pengaturan penjatahan pembangkitan daya
- Rekonfigurasi jaringan
- Investigasi pemasangan kompensator MVAR (kapasitor atau Reaktor)

2.4.1 Model Permasalahan Aliran Daya

Model permasalahan aliran beban hubungan-hubungan nonlinier diantaranya dengan memasukkan daya bus, daya beban, dan tegangan bus dan sudutnya, dengan menyediakan jaringan tetap pada parameter-parameter sirkit. Ini menjadi acuan kebanyakan studi sistem perencanaan dan juga titik awal untuk studi transient dan stabilitas dinamik. Bagian ini menyediakan suatu perumusan mengenai masalah aliran beban dan strategi untuk solusi yang berhubungan dengannya. Untuk memahami dasar dari sistem, tiga fasa diasumsikan sebagai hitungan perunit, hubungan sistem tenaga yang kompleks

dan teknik analisa sirkit. Ada tiga metoda numerik yang populer untuk memecahkan persamaan aliran daya. Yaitu metoda Gauss-Seidel (G-S), metoda Newton-Raphson (N-R), dan metoda Fast Decoupled.

Metoda Newton-Raphson merupakan metoda yang lebih baik dari metoda Gauss-Seidel, karena memperlihatkan suatu karakteristik konvergensi yang lebih cepat. Metoda Newton-Raphson mempunyai kelemahan pada “flat start” yang dimulai dengan *algoritma Gauss-Seidel* yang diikuti oleh *algoritma Newton-Raphson* setelah beberapa iterasi. Metoda *Fast Decoupled* lebih cepat untuk solusi aliran beban. Metode ini merupakan suatu variasi dari metoda *Newton-Raphson*, yang mana metoda ini diperkenalkan oleh Scoot dan Alsac (1974).

2.4.2 Analisa Hasil Perhitungan Aliran Daya

Dalam studi aliran daya, terdapat tiga masalah yang biasa ditemui yaitu tegangan rendah atau tegangan tinggi, beban lebih, dan kekurangan suplai daya

Tabel 2.2 Permasalahan dan Solusi Pada Studi Load Flow

Masalah Pada Load Flow	Solusi
A.1 Tegangan Rendah	<ul style="list-style-type: none"> • Pindah beban • Rekonfigurasi • Pasangan Kapasitor

A.2 Tegangan lebih	<ul style="list-style-type: none">• Rekonfigurasi• Pasangan Reaktor
B. Overload di Trafo dan Transmisi	<ul style="list-style-type: none">• Pindah Beban• Rekonfigurasi• Investasi Penggantian Konduktor atau Trafo Dengan Kapasitas Lebih Besar
C. Kekurangan Suplai Daya	<ul style="list-style-type: none">• Membangun Pembangkit Baru Yang Dapat Menaikan Tegangan di Sekitar dan Meningkatkan Keandalan atau Memperbesar KWH Siap Jual• Membangun GI/GITET Baru Sekaligus Untuk Menampung Beban Berat, Menaikan Tegangan, Meningkatkan Keandalan atau Memperbesar KWH Siap Jual Kepada Konsumen Sekitarnya.

BAB III

PEMBANGKITAN YANG OPTIMUM DAN ALIRAN DAYA

YANG OPTIMUM

3.1 Pembangkitan Yang Optimum

Dalam pengoperasian Sistem Tenaga Listrik diharapkan tercapai biaya pembangkitan yang optimum dalam arti tercapai biaya bahan bakar yang minimum. Untuk mencapai hal ini langkah-langkah yang dilakukan adalah :

- Membuat perkiraan beban jangka pendek 168 jam (1 minggu).
- Membagi beban yang optimum antara kelompok hidro dan kelompok Thermal dengan memperhitungkan jumlah air yang tersedia.
- Dalam subsistem termis perlu dilakukan pembangian beban yang optimum agar tercapai biaya bahan bakar yang minimum.melalui proses unit komitmen dan economic load dispatch.

Pembagian beban tersebut di atas meliputi pembagian yang daya aktif (MW) karena daya aktif yang menyangkut biaya bahan bakar.

3.1.1 Perkiraan Beban Jangka Pendek

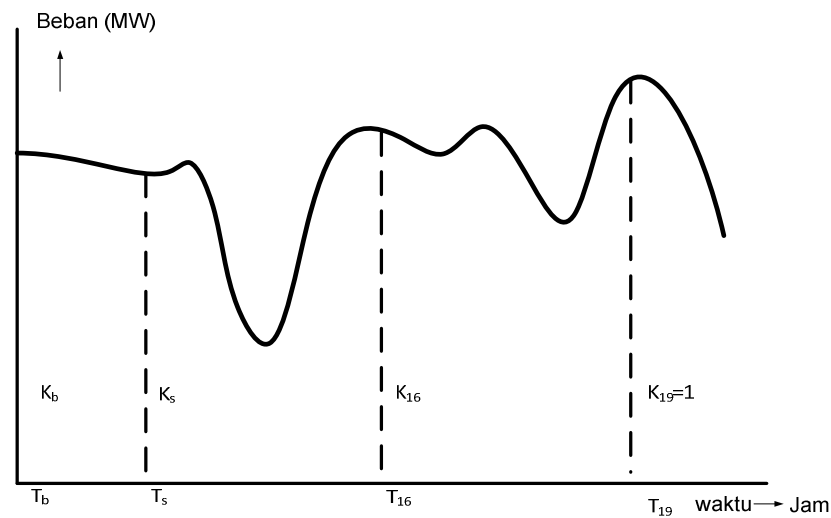
Dalam suatu perencanaan operasi, kejadian-kejadian yang telah lewat atau realisasi data operasi akan berpengaruh pada suatu hasil rencana operasi.demikian juga halnya dalam merencanakan beban, data realisasi operasi

akan dipergunakan sebagai pijakan dasar dalam penentuan perkiraan kurva beban. Pada kenyataannya karakteristik kejadian setiap realisasi beban tidak selalu sama untuk setiap saat, namun demikian karakteristik tersebut masih mempunyai pola-pola yang spesifik bila dibuat pendekatan karakteristiknya disamping tetap memperhatikan pola pergeseran karena adanya hari libur yang selalu tidak tetap. Pola-pola inilah yang akan dipergunakan sebagai acuan dalam menentukan prakiraan beban¹.

Perkiraan beban jangka pendek adalah untuk jangka waktu beberapa jam sampai satu minggu (168 jam). Dalam perkiraan beban jangka pendek terdapat batas atas untuk beban maksimum dan batas bawah untuk beban minimum yang ditentukan oleh perkiraan Beban Jangka Menengah. Besarnya beban untuk setiap jam ditentukan dengan memperhatikan grafik beban di waktu lalu dengan memperhatikan berbagai informasi yang dapat mempengaruhi besarnya beban sistem seperti acara televisi, cuaca dan suhu udara.

Contoh metode yang dipakai untuk memperkirakan beban adalah *metode koefisien beban*.

¹ Elyasib, Agung Hariyanto, Budi Mulyana "Prakiraan Beban Sistem Jawa Bali", PT PLN (Persero) P3B, 2005 Hal : 1/7



Gambar 3.1 metode koefisien beban

Metoda ini dipakai untuk memperkirakan beban harian dari suatu sistem tenaga listrik. Beban untuk setiap jam diberi koefisien yang menggambarkan besarnya beban pada jam tersebut dalam perbandingannya terhadap beban puncak, misalnya $K_4 = 0,6$ berarti beban pada jam 04.00 adalah sebesar 0,6 kali beban puncak yang terjadi pada jam 19.00 ($K_{19} = 1$).

Koefisien-koefisien ini untuk hari Senin s/d Minggu dan juga untuk hari libur bukan Minggu. Beban puncak dapat diperkirakan dengan melihat beban puncak mingguan tahun-tahun yang lalu kemudian dengan menggunakan koefisien-koefisien tersebut bisa diperkirakan grafik beban harian untuk suatu minggu yang akan datang. Koefisien-koefisien ini perlu dikoreksi secara terus-menerus berdasarkan hasil pengamatan atas beban yang sesungguhnya terjadi.

Setelah didapat perkiraan grafik beban harian dengan metode koefisien masih perlu dilakukan koreksi-koreksi berdasarkan informasi-informasi terakhir mengenai perkiraan suhu dan kegiatan masyarakat. Jika setelah koreksi-koreksi ini ternyata masih ada penyimpangan dalam operasi real time, maka adalah tugas operator sistem (dispatcher) untuk mengatasi penyimpangan ini.

Apabila telah didapat koefisien beban puncak mingguan selama satu tahun maka metoda ini dapat pula dikembangkan untuk perkiraan beban puncak mingguan tertinggi dalam satu tahun, dengan memperhatikan langgam/grafik beban puncak mingguan.

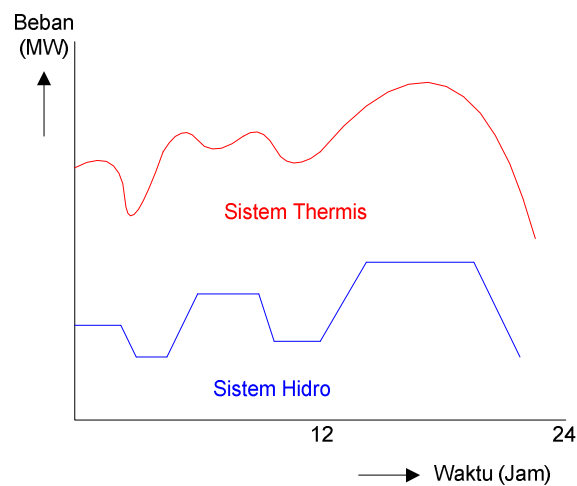
3.1.2 Optimasi Hidro-Thermis

Dalam sistem interkoneksi yang terdiri dari bermacam-macam unit pembangkit secara garis besar dapat dikelompokkan kedalam 2 kelompok besar yaitu kelompok pembangkit hidro dan kelompok pembangkit termis.

Kelompok pembangkit hidro berfungsi menekan biaya bahan bakar dalam sistem semaksimal mungkin. Kelompok pembangkit hidro selain mempunyai hubungan secara listrik melalui sistem interkoneksi sering kali secara hidrolik juga mempunyai hubungan satu sama lain seperti hubungan kaskade dan paralel. Dari segi potensi hidrolik, kelompok pembangkit dapat digambarkan sebagai gudang energi yang tersimpan dalam kolam-kolam tando. Energi berupa

potensi hidrolik ini setiap saat bisa dikonversikan menjadi energi listrik yang langsung masuk kedalam sistem interkoneksi.

Dalam sistem tenaga listrik yang terdiri dari sejumlah PLTA dan sejumlah Pusat Listrik Thermis, perlu dicari jalur pembagian beban antara subsistem Hidro (kelompok PLTA) dan subsistem Thermis (kelompok Pusat Listrik Thermis) agar didapat operasi yang optimum bagi sistem tenaga listrik secara keseluruhan, dalam arti dicapai biaya bahan bakar yang minimum



Gambar 3.2 *Jalur Pembagian Beban Antar Subsistem Hidro dan Subtermis*

Untuk memecahkan masalah ini dapat digunakan metoda gradien. Dalam menggunakan metode ini, dilakukan beberapa pengabaian, namun masih memberikan hasil yang cukup berarti. Dasar deret Taylor :

$$\Delta q_H = \frac{\partial q(P_H)}{\partial P_H} \Delta P_H + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 q(P_H)}{\partial P_H^2} (\Delta P_H^2) + \dots \dots \dots \quad (3.1)$$

Dalam perhitungan selanjutnya hanya dipakai suku pertama dari deret Taylor suku-sukunya berikutnya diabaikan, maka didapat :

$$\Delta q_H = \frac{\partial q(P_H)}{\partial P_H} \Delta P_H \quad (3.2)$$

Biaya bahan bakar per satuan waktu (misalnya dalam Rupiah / jam) sebagai fungsi daya yang dibangkitkan sub sistem termis adalah $F(P_T)$. Dengan penjelasan serupa seperti penjelasan tersebut diatas mengenai perubahan air, maka untuk kenaikan biaya bahan bakar per satuan waktu sebagai fungsi kenaikan pembangkitan subsistem termis adalah :

$$\Delta F(P_T) = \frac{\partial F(P_T)}{\partial P_T} \Delta P_T \quad (3.3)$$

Untuk mendapatkan hubungan antara Δq_H dari persamaan (3.2) dengan $F(P_T)$ dari persamaan (3.3) dipakai persamaan kendala yaitu :

$$P_B + P_L - P_H - P_T = 0 \quad (3.4)$$

Dimana :

- P_B = Adalah beban sistem (dalam MW)
- P_L = Daya yang hilang sebagai rugi-rugi dalam sistem
- P_H = Daya yang dibangkitkan oleh subsistem Hidro
- P_T = Daya yang dibangkitkan oleh subsistem Thermis

Apabila nilai P_L diabaikan atau dianggap $P_L =$ mendekati nol maka :

$$P_B - P_H - P_T = 0 \quad (3.5)$$

Dari persamaan (3.5) terlihat bahwa suatu kenaikan P_H harus diikuti dengan penurunan nilai P_T yang sama untuk melayani beban P_B yang tertentu, berarti bahwa :

$$\Delta P_H = -\Delta P_T \quad (3.6)$$

Sesungguhnya syarat untuk mendapatkan persamaan (3.6) yaitu bahwa $\Delta P_H = -\Delta P_T$ tidaklah sepenuhnya bahwa $P_L = 0$, asalkan ketergantungan P_L terhadap P_H dan P_T adalah sama, maka hal ini sudah terpenuhi. Hal ini praktis terpenuhi apabila nilai P_L yaitu rugi-rugi dalam jaringan transmisi adalah kecil, kurang dari 3% terhadap daya yang dibangkitkan.

Apabila persamaan (3.6) dimasukkan kedalam (3.3) maka didapatkan :

$$\Delta F(P_T) = \frac{F(P_{\partial T})}{\partial P_T} \Delta P_T = \frac{F(P_{\partial T})}{\partial P_T} (-\Delta P_H)$$

Dari persamaa (3.2) didapat :

$$\Delta q_H = \frac{\partial q(P_H)}{\partial P_H} \Delta P_H \text{ atau } \Delta P_H = \frac{\Delta q}{\frac{\partial q(P_H)}{\partial P_H}}$$

Maka selanjutnya :

$$\Delta F(P_T) = -\frac{\partial F(P_T)}{\partial P_T} \Delta P_H$$

$$\frac{\Delta F(P_T)}{\frac{\partial F(P_T)}{\partial P_T}} \Delta q_H$$

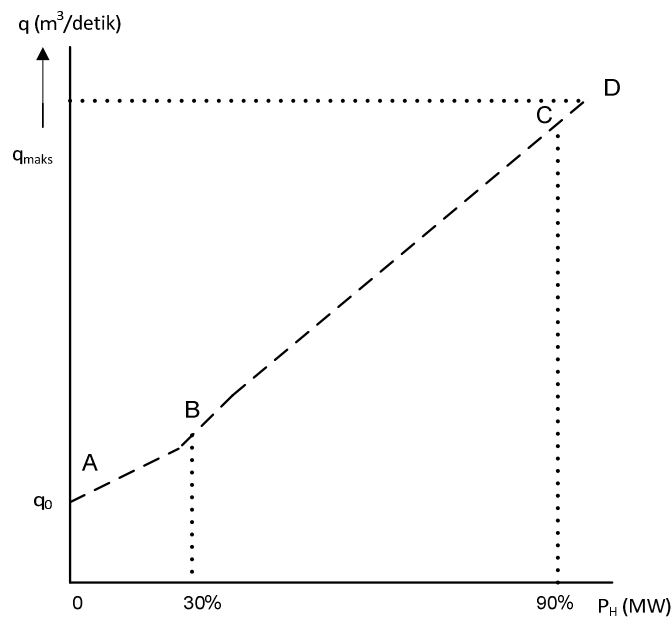
$$\frac{\partial q_H(P_H)}{\partial P_H}$$

$$\Delta F(P_T) = -\beta \Delta q \quad (3.7)$$

$$\text{Dimana } \beta = \frac{\frac{\partial F(P_T)}{\partial P_T}}{\frac{\partial q(P_H)}{\partial P_H}} \quad (3.8)$$

Persamaan (3.7) menggambarkan biaya bahan bakar yang dapat dilakukan sebagai fungsi Δq , artinya dengan menambahkan pemakaian air sebesar Δq , penghematan biaya bahan bakar fungsi $\Delta F(P_T)$ sebesar mungkin dengan cara melakukannya pada saat harga β (harga air) mencapai nilai maksimum.

Penyebut dari β yaitu $\beta = \frac{\partial q(P_H)}{\partial P_H}$ untuk periode yang pendek misalnya satu minggu (168 jam) praktis mempunyai nilai yang konstan, karena dalam jangka waktu pendek, tinggi air terjun PLTA praktis belum berubah. Selama tinggi air terjun tidak berubah maka nilai $\frac{\partial q(P_H)}{\partial P_H}$ praktis tidak berubah asal saja unit-unit PLTA beroperasi antara kira-kira 30% sampai 90% nilai nominal. Seperti terlihat pada gambar (2.4). unit PLTA mempunyai karakteristik pemakaian air yang praktis antara beban kira-kira 30% sampai 90% nilai nominal, sehingga pada selang beban ini $\frac{\partial q(P_H)}{\partial P_H}$ mempunyai nilai yang praktis besarnya konstan.



Gambar 3.3 Grafik Pemakaian Air Sebagai Fungsi
Beban Dari Unit PLTA

Tanda negatif pada persamaan (3.7) berarti pemakaian air sebesar Δq akan memberikan penghematan bahan bakar sebesar ΔF .

Pembilang dari β yaitu $\frac{\partial F(P_T)}{\partial P_T}$ disebut incremental cost, dengan memperhatikan persamaan (3.7) dan (3.8) untuk memanfaatkan air secara optimal, dengan cara :

- Pakailah air sebanyak mungkin sewaktu incremental cost tinggi.
- Hematlah air sebanyak mungkin sewaktu incremental cost rendah.

3.1.3 Pembagian Beban Yang Ekonomis Antara Unit-Unit Pembangkit Termis

Seperti yang diketahui, beban selalu berubah menurut waktu. Perubahan sistem beban ini harus diikuti oleh sub sistem termis, sehingga perlu difikirkan bagaimana membagi beban secara ekonomis diantara pembangkit-pembangkit termis yang beroperasi. Karena persoalan-persoalan praktis jadwal operasi unit-unit pembangkit dibuat untuk selang waktu tidak lebih kecil dari 1 jam. Sedangkan dalam selang waktu kurang dari 1 jam, beban sudah berubah. Jadi timbul masalah bagaimana membagi beban secara ekonomis diantara unit-unit pembangkit (yang dijadwalkan) beroperasi.

Setelah unit pembangkit termis yang akan beroperasi dijadwalkan berdasarkan perhitungan program unit commitment, maka unit-unit pembangkit termis ini harus mengambil beban dari sub termis yang didapatkan atas dasar perhitungan optimasi hydro-termis.

Seperti terlihat pada gambar perhitungan jadwal operasi unit termis dilakukan untuk selang waktu satu jam, bahkan kadang-kadang hasil ini masih perlu disesuaikan dengan kondisi unit pembangkit yang bersangkutan. Misalnya dari perhitungan didapat bahwa sebuah unit PLTU harus di-stop jam 06.00 dan di-start kembali jam 08.00. hal demikian dalam praktek tidak mungkin dilaksanakan, karena jarak waktu antara stop dan start kembali terlalu dekat. Perhitungan jadwal operasi dengan menggunakan selang waktu satu jam dalam

operasi real time (dalam waktu yang berjalan) perlu disesuaikan kembali secara terus-menerus, khususnya yang menyangkut beban subsistem termis. Setiap penyesuaian beban subsistem termis P_T dan real time tidak dapat dilakukan dengan mengubah komposisi unit termis yang telah dijadwalkan beroperasi berdasarkan alasan tersebut diatas.

Secara matematis beban sub sistem Termis P_T ditentukan dengan penyesuaian dalam real time dan beban ini harus dibagikan secara ekonomis diantara unit-unit Termis yang beroperasi, secara matematis hal ini dinyatakan sebagai berikut :

$$P_T = P_{T1} + P_{T2} + \dots + P_{Tno} \quad (3.9)$$

Dimana no = jumlah Unit Termis yang beroperasi. Objective functionnya, yaitu biaya bahan bakar adalah :

$$F(P_T) = \sum_{j=1}^{j=no} F_j(P_{Tj}) \quad (3.10)$$

Mengenai persamaan bahan bakar dari setiap unit pembangkit sebagai fungsi bebannya dapat digunakan persamaan :

$$F(P_T) = a_1 (P_{T1})^2 + b_1 P_{T1} + C_1 \quad (3.11)$$

Kondisi optimum tercapai apabila :

$$\frac{\partial L}{\partial P_{T1}} = 0 \quad \text{atau} \quad \frac{\partial F_1(P_{T1})}{\partial P_{T1}} - \lambda = 0 \quad \text{atau} \quad \frac{\partial F_1(P_{T1})}{\partial P_{T1}} = \lambda \quad (3.12)$$

$$\frac{\partial L}{\partial P_{T2}} = 0 \quad \text{atau} \quad \frac{\partial F_2(P_{T2})}{\partial P_{T2}} - \lambda = 0 \quad \text{atau} \quad \frac{\partial F_2(P_{T2})}{\partial P_{T2}} = \lambda \quad (3.13)$$

$$\frac{\partial L}{\partial P_{Tno}} = 0 \quad \text{atau} \quad \frac{\partial F_{no}(P_{Tno})}{\partial P_{Tno}} - \lambda = 0 \quad \text{atau} \quad \frac{\partial F_{no}(P_{Tno})}{\partial P_{Tno}} = \lambda \quad (3.14)$$

Dari persamaan-persamaan (3.12), (3.13), (3.14) didapat bahwa pembagian beban yang optimum diantara unit-unit pembangkit yang beroperasi terjadi apabila tercapai kondisi :

$$\frac{\partial F_1(P_{T1})}{\partial P_T} = \frac{\partial F_2(P_{T2})}{\partial P_{T2}} \dots \dots \dots \frac{\partial F_{no}(P_{Tno})}{\partial P_{Tno}} = \lambda \quad (3.15)$$

Secara persamaan (3.15) berarti bahwa pembagian beban yang optimum terjadi apabila unit-unit pembangkit termis beroperasi dengan incremental cost yang sama.

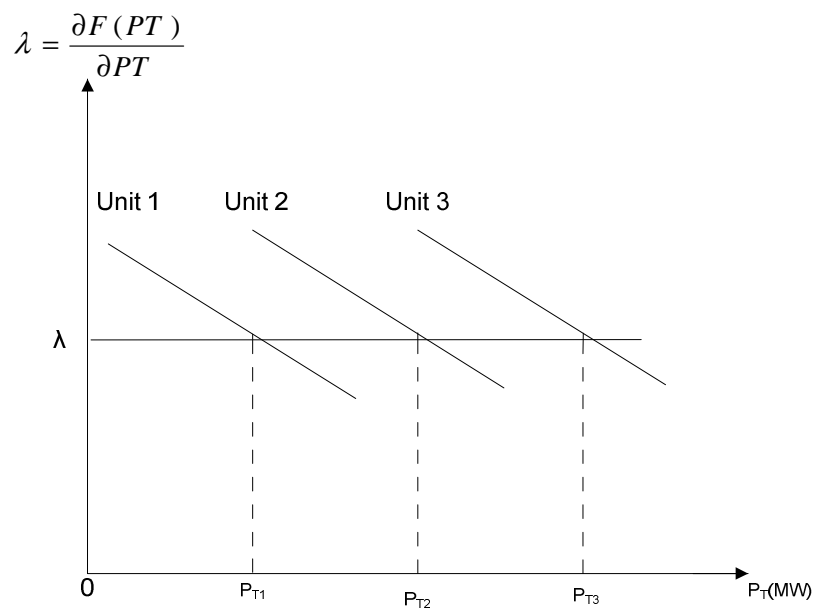
Untuk dapat mencapai kondisi demikian dalam proses real time incremental cost $\frac{\partial P(P_T)}{\partial P_T}$ dari setiap unit pembangkit perlu dihitung dan untuk ini dapat digunakan persamaan yang didapat dari persamaan (3.11) dengan menyatakan kurva input-output unit pembangkit termis secara matematis. Pendekatan kurva ini dengan persamaan kuadrat dalam praktek memberikan hasil yang cukup teliti.

aan input-output unit pembangkit termis dinyatakan secara pendekatan dengan menggunakan persamaan kuadrat, maka nilai incremental cost

$\frac{\partial F(P_T)}{\partial P_T}$ menjadi fungsi linier (garis lurus) sebagaimana ditunjukkan oleh gambar

3.4.

Program komputer untuk memecahkan persamaan (2.7) disebut program economic load dispatch.



Gambar 3.4 Grafik Incremental Cost $P_T = P_1 + P_2 + P_3$ sebagai

fungsi P_T untuk tiga unit Pembangkit

Untuk melayani besar beban tertentu pada saat t yaitu P_T , dicoba terlebih dahulu suatu nilai λ , lalu hitung P_{T1} , P_{T2} , P_{T3} dan seterusnya hingga dicapai

kondisi optimum. Kemudian hitung $\sum_{j=i}^{j=n} P_{Tj}$ apakah sama dengan nilai P_T yang kita

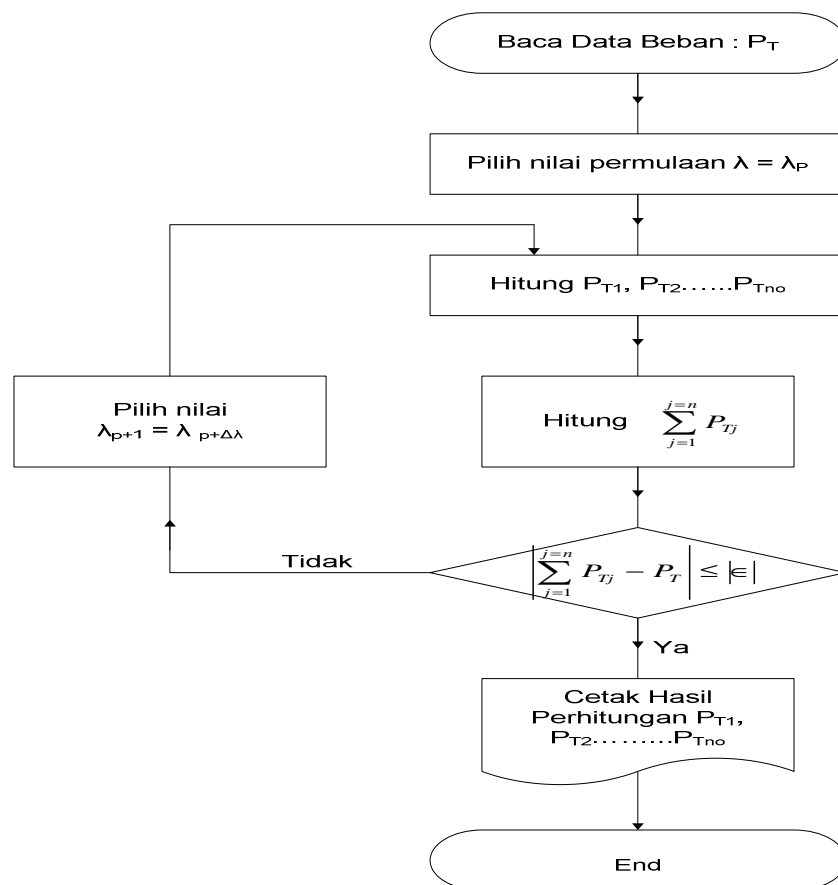
kehendaki, jika $\sum_{j=i}^{j=n} P_{Tj}$ belum sama dengan P_T maka dicoba nilai $\lambda_2 = \lambda_1 + \Delta\lambda$

T_j

yang memberikan nilai $P'_{T1}, P'_{T2}, P'_{T3} \dots P'_{Tn}$ kemudian hitung nilai

$\sum_{j=i}^{j=n} P'_{Tj}$ apakah sudah sama dengan P_T , apabila belum teruskan seperti

digambarkan oleh flow chart dibawah ini :



Gambar 3.5 *Flow Chart untuk menghitung pembagian beban diantara unit-unit pembangkit thermis dengan incremental cost yang sama*

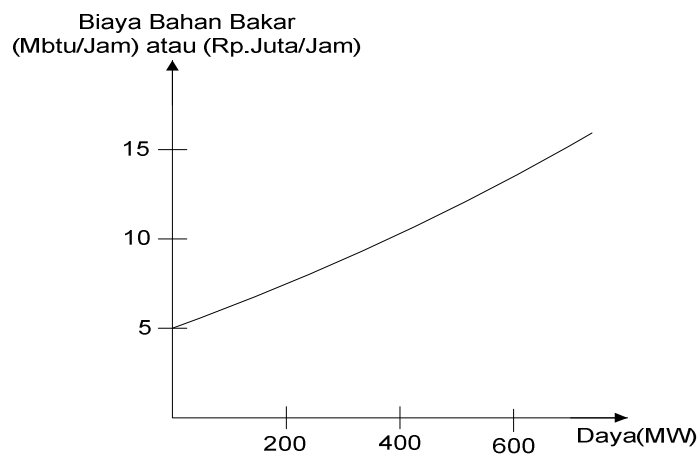
3.1.4 Economic Load Dispatch

Dalam praktek sistem tenaga listrik, pusat-pusat pembangkit tidak terletak pada jarak yang sama dari pusat beban sehingga penggunaan bahan bakar dalam pengoperasian penyaluran tenaga listrik menjadi berbeda. Pada kondisi operasi normal, kapasitas pembangkitan lebih besar dari total permintaan beban dan rugi-rugi. Ada banyak pilihan untuk penjadwalan pembangkitan dalam sistem interkoneksi tenaga listrik, tujuannya adalah mendapatkan jadwal daya aktif dan daya reaktif dari tiap pusat pembangkit dalam mengurangi biaya operasi. Oleh karena itu dibutuhkan .suatu cara bagaimana mengoperasikan unit-unit pembangkit untuk memenuhi beban tertentu secara ekonomis yang disebut dengan *economic dispatch*.

Tujuan utama *economic dispatch* adalah bagaimana mengoperasikan unit-unit pembangkit thermis yang bekerja, yang terdapat pada suatu sistem agar menghasilkan biaya operasi yang minimal. Yang dimaksud dengan mengoperasikan disini adalah bagaimana mendistribusikan beban antar unit pembangkit thermis karena setiap unit pembangkit thermis mempunyai biaya yang berbeda-beda dalam menyuplai beban sistem sehingga nantinya akan menghasilkan biaya yang minimal.

Karakteristik biaya setiap unit pembangkit thermis biasanya dinyatakan oleh karakteristik masukan-keluaran (*Input-Output*) dalam bentuk kurva dimana inputnya adalah masukan panas ke dalam unit yang dinyatakan oleh (Mbtu/Jam) atau bisa juga dinyatakan dalam biaya (Rp/Jam) dimana masukan panas

tersebut dikalikan oleh biaya yang digunakan untuk menghasilkan panas tersebut sedangkan outputnya adalah daya nyata (MW) yang bisa dihasilkan kurva input-output itu biasanya dalam bentuk kurva cekung seperti yang ditunjukkan oleh gambar 3.6



Gambar 3.6 Kurva Input-Output Suatu Unit Thermis

Kurva input-output suatu unit pembangkit thermis tersebut biasa dinyatakan secara matematis dalam bentuk persamaan kuadrat yaitu :

$$C = \sum_{i=1}^n \alpha_i + \beta_i P_i + \gamma_i P_i^2 \quad (3.16)$$

Turunan biaya bahan bakar terhadap daya nyata pada persamaan diatas berupa biaya tambahan biaya bahan bakar, turunan dari persamaan (3-1) adalah sebagai berikut :

$$\frac{dC_i}{dP_i} = 2\gamma_i P_i + \beta_i \quad (3.17)$$

Dimana $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ adalah koefisien biaya bahan bakar unit i dan P_i adalah daya yang dibangkitkan.

3.2 Mencapai aliran Daya Yang Optimum

Setelah dilakukan pembagian baban daya aktif seperti diuraikan pada Pembangkitan Yang Optimum, maka timbulah aliran daya optimum. Aliran daya optimum apabila rugi-rugi saluran transmisi mencapai nilai minimum. Untuk mencapai daya yang optimum ini perlu dilakukan pengaturan daya reaktif dalam sistem. Permasalahannya adalah sumber daya reaktif tidak selalu ada pada tiap bus sehingga perlu dilakukan pengaturan daya reaktif dengan sumber-sumber daya reaktif yang ada sehingga tercapai aliran daya yang optimum.

3.2.1 Sumber-sumber Daya Reaktif

Static VAR Compensator adalah sumber daya reaktif yang dapat diatur besarnya dan merupakan alat yang pengembangannya termasuk mutakhir. Generator dapat pula dipakai sebagai sumber daya reaktif dengan jalan mengatur arus penguat medan magnitnya. Apabila hanya diperlukan daya reaktif saja untuk suatu simpul dalam sistem tenaga listrik, maka penggunaan generator sebagai sumber daya reaktif tidaklah ekonomis.

Sumber-sumber daya reaktif dapat dipakai :

- a. Kondensator Sinkron

b. Kondensator Statis

c. Static VAR Compensator

Dalam pengaturan daya reaktif kadang-kadang diperlukan pengambilan daya reaktif dari sistem. Hal ini dapat dilakukan oleh Kondensator Sinkron dengan mengecilkan arus penguat medan magnetnya. Juga dapat dilakukan dengan Static VAR Compensator dengan jalan mengatur penyalanya. Kondensator Statis hanya dapat memberikan daya reaktif ke dalam sistem. Alat statis yang mengambil daya reaktif adalah reaktor, sehingga dalam praktek banyak dipakai reaktor apabila diperlukan pengambilan daya reaktif.

Makin tinggi tegangan sistem, makin banyak daya reaktif dihasilkan oleh sistem itu sendiri sebagai akibat besarnya nilai kapasitansi isolasi. Oleh karenanya pada sistem tegangan ekstra tinggi, misalnya sistem 500 KV seringkali dipakai Reaktor. Sebaliknya pada sistem tegangan menengah misalnya sistem 20 KV dan sistem tegangan rendah, sistem tidak menghasilkan cukup daya reaktif sebagai akibat rendahnya nilai kapasitansi isolasi, sehingga disini diperlukan sumber daya reaktif. Untuk keperluan ini dapat dipakai Kapasitor Statis.

Pada sistem yang tegangannya terletak antara 20 KV dan 500 KV sering diperlukan reaktor saat beban rendah dan diperlukan kapasitor statis pada saat beban tinggi. Variasi beban ini bisa berlangsung dalam 24 jam, sehingga perlu dilakukan pemasukan dan pengeluaran Reaktor dan Kapasitor silih berganti

dalam 24 jam. Secara operasional hal ini bisa merepotkan dan orang cenderung untuk dapat melakukannya secara otomatis.

Untuk dapat melakukannya secara otomatis, sumber daya reaktif harus dapat diatur mulai dari mengambil sampai dengan memberikan daya reaktif kedalam sistem. Sumber daya reaktif yang memenuhi syarat ini hanyalah kondensator sinkron dan Sttic VAR Compensator. Kondensator Sinkron, karena dimensinya yang relatif besar dan adanya bagian yang berputar jadi juga harganya menjadi mahal, praktis tidak dipakai lagi. Yang banyak dikembangkan orang sebagai sumber daya reaktif yang variabel adalah Statis VAR Compensator.

Dalam jaringan tegangan menengah kadang-kadang dipakai juga Sttic VAR Compensator yaitu apabila ada beban yang sering berubah secara mendadak misalnya tanur busur listrik yang menimbulkan kedipan tegangan (flicker) dalam sistem. Kedipan tegangan ini dapat dikurangi sampai batas yang tidak mengganggu dengan menggunakan Static VAR Compensator sebagai kompensator daya reaktif yang dipasang parallel dengan tanur busur, sehingga I_{total} dibuat hampir konstan, sehingga juga tegangan simpul V yang melayani pula pelanggan pelanggan lain tidak banyak berubah. Untuk ini Statik VAR Compensator SVC harus mengubah arusnya sesuai dengan perubahan arus tanur busur listrik TBL.

3.2.2 Alokasi Daya Reaktif Yang Optimum

Alokasi daya reaktif yang tepat dalam sistem bisa menghasilkan kondisi optimum, yaitu kondisi dengan rugi-rugi transmisi yang minimum.

Tidak semua simpul dalam sistem bisa menghasilkan daya reaktif yang optimum, sedangkan rugi-rugi transmisi dipengaruhi oleh letak beban dalam sistem, hal ini merupakan persoalan utama dalam menyelesaikan alokasi daya reaktif yang optimum.

Dalam penyediaan tenaga listrik bagi para pelanggan, tegangan yang konstan seperti halnya frekwensi yang konstan, merupakan salah satu syarat utama yang harus dipenuhi.

Oleh karenanya masalah pengaturan tegangan merupakan masalah operasi sistem tenaga listrik yang perlu mendapatkan penanganan tersendiri.

Pengaturan tegangan erat kaitannya dengan pengaturan daya reaktif dalam sistem.

Sistem tenaga listrik terdiri dari banyak GI dan Pusat Listrik. Dalam setiap GI maupun Pusat Listrik terdapat simpul (bus). Tegangan dari simpul di GI dan tegangan dari simpul di Pusat listrik bersama-sama membentuk profil tegangan sistem.

Berbeda dengan frekwensi yang sama dalam semua bagian sistem tegangan tidak sama dengan setiap bagian sistem, sehingga pengaturan tegangan adalah lebih sulit dibandingkan dengan pengaturan frekwensi. Kalau frekwensi praktis

hanya dipenuhi oleh daya nyata MW dalam sistem, di lain pihak tegangan dipengaruhi oleh

- a. Arus penguatan generator
- b. Daya reaktif beban
- c. Daya reaktif yang didapat dalam sistem (selain generator), misalnya kondensor dan dari reaktor
- d. Posisi tap transformator

Mengatur tegangan pada suatu titik simpul dalam sistem akan lebih mudah apabila di titik tersebut ada sumber daya reaktif yang bisa diatur, hal ini juga merupakan hal yang berbeda dengan pengaturan frekwensi, karena frekwensi dapat diatur dengan mengatur sumber daya nyata yang ada dimana saja dalam sistem. Dalam sistem tenaga listrik ada dua variabel yang dapat diatur secara bebas, disebut variabel pengatur (control variabel), yaitu daya nyata (MW) dan daya reaktif (MVAR). Seperti telah diuraikan diatas, pengaturan daya nyata akan mempengaruhi frekwensi, sedangkan pengaturan daya reaktif akan mempengaruhi tegangan. Butir a sampai d tersebut diatas adalah cara mengatur daya reaktif yang harus disediakan dalam sistem. Secara singkat dapat dikatakan bahwa :

MW merupakan variabel pengatur frekwensi

MVAR merupakan variabel pengatur tegangan

Di lain pihak, beban dalam sistem mengambil daya aktif dan daya reaktif dari sistem. Beban tidak bisa diatur karena tergantung pada kebutuhan banyak pelanggan yang mempergunakan tenaga listrik dari sistem.

3.3 Kendala-Kendala Operasi Yang Dihadapi

Dengan melakukan langkah-langkah seperti diuraikan dalam Pembangkitan Yang Optimum dan Mencapai Aliran Daya Yang Optimum di atas perlu dilakukan pengecekan atas kendala-kendala sebagai berikut :

- Profil Tegangan dalam sistem
- Adakah saluran yang mengalami beban lebih
- Nilai rugi-rugi daya dalam saluran transmisi

Dalam operasi sistem interkoneksi, masalah alokasi pembebanan unit-unit pembangkit merupakan masalah utama karena hal ini menyangkut biaya bahan bakar merupakan komponen biaya yang terbesar. Alokasi pembebanan inut pembangkit ini yang antara lain bertujuan untuk mencapai biaya bahan bakar minimum di mana dalam praktiknya harus memperhitungkan kendala-kendala operasi sehingga sering kali perlu dilakukan usaha mengatasi kendala operasi tersebut.

a. Aliran Daya dan Profil Tegangan Dalam Sistem

Alokasi beban unit pembangkit yang optimum dengan tujuan mencapai biaya bahan bakar yang minimum dalam praktik perlu dikaji pelaksanaannya, apakah menimbulkan aliran daya yang melampaui batas kemampuan saluran transmisi atau batas kemampuan peralatan lainnya. Seperti transformator daya atau transformator arus yang ada dalam sistem bersangkutan. Perlu juga diperhatikan profil tegangan yang terjadi dalam sistem apakah masih dalam batas-batas yang diijinkan.

b. Beban Maksimum dan Minimum Unit Pembangkit

Setiap unit pembangkit mempunyai kemampuan maksimum dalam membangkitkan tenaga listrik, baik karena desain maupun karena masalah pemeliharaan. Sedangkan beban minimum unit pembangkit lebih banyak ditentukan oleh desain.

c. Alokasi beban unit pembangkit yang optimum dengan tujuan mencapai biaya bahan bakar yang minimum dalam praktik perlu dikaji pelaksanaannya, apakah menimbulkan aliran daya yang melampaui batas kemampuan saluran transmisi atau batas kemampuan peralatan lainnya. Seperti transformator daya atau transformator arus yang ada dalam sistem.