

BAB II

UNIFIED POWER FLOW CONTRLLER (UPFC) SECARA UMUM

2.1 Fungsi dan prinsip kerja UPFC

2.1.1 Flexible AC Transmission System (FACTS)

FACTS singkatan dari Flexible AC Transmission System pertamakali dikembangkan oleh Electric Power Research Institute (EPRI) di Palo Alto Negara bagian California di Amerika Serikat. Pada awal pengembangannya, teknologi FACTS ditunjukkan untuk menjawab permasalahan dalam peningkatan kapasitas pengertian daya listrik pada sistem jaringan transmisi dan juga untuk menyediakan peralatan kendali daya listrik yang terpercaya pada jalur transmisi yang diinginkan.

Pengoperasian sistem jaringan transmisi daya listrik kini telah memasuki era baru. Dalam tahapan baru ini, transmisi daya listrik tidak hanya akan menjadi jauh efisien dalam pemanfaatannya. Peningkatan pesat ke arah pemanfaatan sistem jaringan transmisi listrik secara optimal ini dimungkinkan dengan keberadaan dan semakin dewasanya aplikasi teknologi dibidang elektronika daya pada khususnya dan teknologi semi konduktor pada umumnya.

Pengendalian sistem daya listrik bolak – balik (AC) telah dikenal sebagai hal yang kompleks. Ini disebabkan oleh perubahan secara terus menerus antara medan magnit dan medan listrik. Bergeraknya arus listrik padasatu transmisi tidak hanya dipengaruhi oleh keberadaan tahanan tetapi juga dari iduktansi dan

kapasitansi disepanjang transmisi tersebut. Kombinasi dari ketiga hal inilah yang dikenal dengan istilah impedansi. Selain daripada itu, pada jaringan transmisi listrik AC, daya listrik mengalir dari ujung transmisi dengan tegangan fasa leading ke ujung yang lain yang bertegangan fasa tertinggal (lagging). Besarnya daya listrik yang mengalir pada suatu transmisi akan bertambah dengan semakin besarnya perbedaan sudut fasa antara kedua tegangan tersebut. Konsekuensinya, penambahan aliran daya listrik suatu transmisi dengan demikian dapat dilakukan dengan tiga cara :

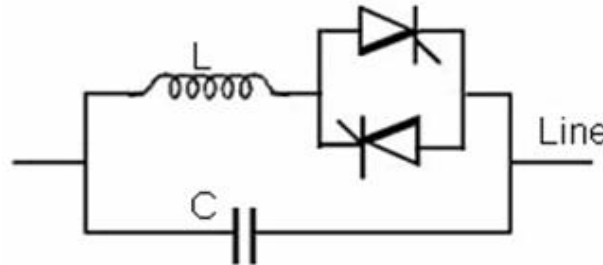
1. Menaikkan tegangan
2. Menambah selisih sudut antara dua ujung transmisi
3. Pengurangan impedansi dari transmisi

Teknologi FACTS inilah yang kemudian dikembangkan dengan salah satu tujuan untuk menyediakan peralatan yang fleksible dalam pengaturan dan pengendalian ketiga parameter aliran daya listrik tersebut. Dengan pengaturan dan pengendalian yang fleksibel ini maka harapan untuk memaksimalkan kapasitas transmisi pada tingkat batas panas (Thermal Rating) akan terwujud.

1. Pengontrolan seri

Pengontrolan seri dapat berupa impedansi variable, seperti kapasitor, reactor dan lain-lain atau elektronika daya berdasarkan sumber variable frekuensi. Pada prinsipnya pengontrolan seri memberikan tegangan secara seri pada saluran.

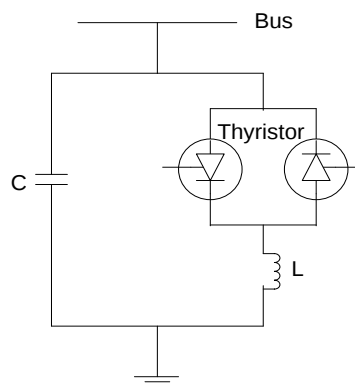
Contoh dari peralatan FACTS kontrol seri adalah Static Synchronous Series Compensator, Thyristor Controller Series Compensator (TSCS).



Gambar 2.1 Model TCSC

2. Pengontrol Shunt

Sama seperti pengontrol seri, pengontrol shunt dapat berupa impedansi variable, atau kombinasi dari keduanya. Pada prinsipnya pengontrol shunt memberikan arus pada sistem di titik penghubungnya. Contoh dari peralatan FACTS control shunt adalah Static Var Compensator (SVC), Static Synchronous Compensator (STATCOM).



Gambar 2.2 Model SVC

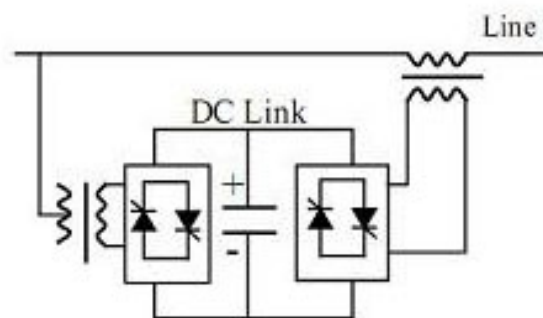
3. Pengontrol kombinasi seri dengan shunt

Alat ini merupakan kombinasi dari peralatan FACTS seri pada saluran transmisi. Selain itu dapat berupa gabungan alat control, dimana control seri memberikan kompensasi seri reaktif untuk setiap saluran, tetapi juga

memberikan daya nyata untuk saluran melalui jaringan daya. Kemampuan pemberian daya nyata dari gabungan control seri-seri, dinamakan interline power flow control, hal ini memungkinkan untuk menyeimbangkan aliran daya aktif dan reaktif pada saluran dan juga memaksimalkan kegunaan dari saluran transmisi. Dengan catatan bahwa yang dimaksud dengan gabungan disini adalah transmisi DC dengan kontrol konvrtter dihubungkan bersama untuk transfer daya nyata.

Kombinasi Pengontrol seri dan pengontrol shunt.

Pada prinsipnya, kombinasi kontrol seri dan shunt memberi tegangan pada saluran dengan bagian control seri. Bagaimanapun dengan gabungan antar seri dan shunt, memungkinkan pergantian daya nyata diantara control seri dan shunt melalui jaringan daya. Contoh dari peralatan FACTS control kombinasi seri dengan shunt adalah Unified Power Flow Controller (UPFC).



Gambar 2.3 UPFC

Keuntungan yang dapat diperoleh dari pemasangan FACTS diantaranya :

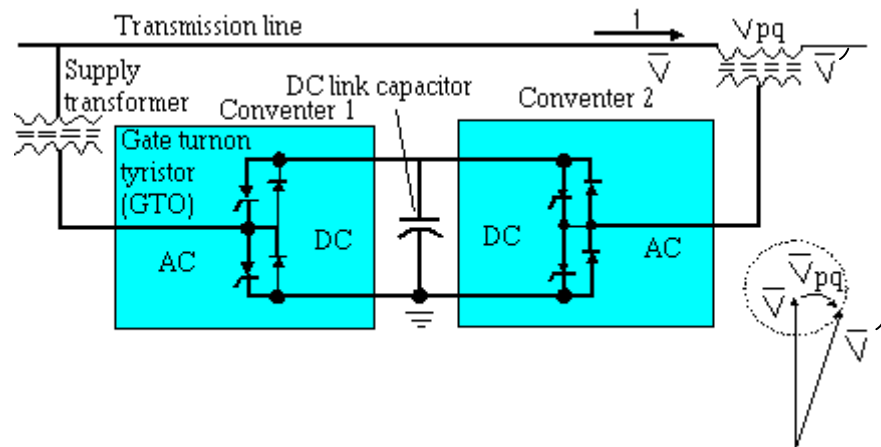
- Mampu mengendalikan aliran daya sesuai yang diinginkan
- Meningkatkan kapasitas penyaluran dari saluran mendekati batas thermal

- Meningkatkan keamanan sistem melalui peningkatan limit kestabilan, membatasi arus hubung singkat dan pembebanan lebih, dan meredam osilasi dari sistem tenaga dan mesin-mesin pada sistem
- Mampu mengurangi aliran daya reaktif untuk meningkatkan kemampuan saluran menyalurkan daya nyata/aktif

Prinsip dasar FACTS dalam menjalankan fungsinya meliputi perannya sebagai pengendali aliran daya, pengendali tegangan, peningkatan margin keamanan sistem, dan peredam osilasi daya.

2.1.2 UPFC Pada Saluran Transmisi

Perkembangan teknologi dewasa ini juga mempengaruhi dunia kelistrikan, dimana telah diciptakan teknologi – teknologi baru untuk menunjang kemajuan transmisi tenaga listrik. teknologi tersebut salah satunya adalah FACTS (Flexible AC Transmission System). Pada dasarnya, FACTS adalah kumpulan peralatan yang dibuat dari elektronik solid state untuk pengaturan atau pengendalian transmisi daya listrik secara fleksibel, salah satunya adalah Unified Power Flow Controller (UPFC). Perancangan alat ini berbasis inverter dengan menggunakan thyristor. Sebagaimana diilustrasikan pada gambar 2.4, pada UPFC, vector tegangan V_{pq} yang dihasilkan oleh inverter disuntikkan secara seri ke jaringan transmisi. Tegangan searah (dc) yang digunakan inverter ini didapatkan dari hasil penyearah (rectification) tegangan dari transmisi yang sama. UPFC merupakan alat kendali daya aktif dan daya reaktif secara terpisah pada transmisi listrik dan dapat dipasang pada ujung pengirim maupun penerima daya.



Gambar 2.4 Unified Power Flow Controller

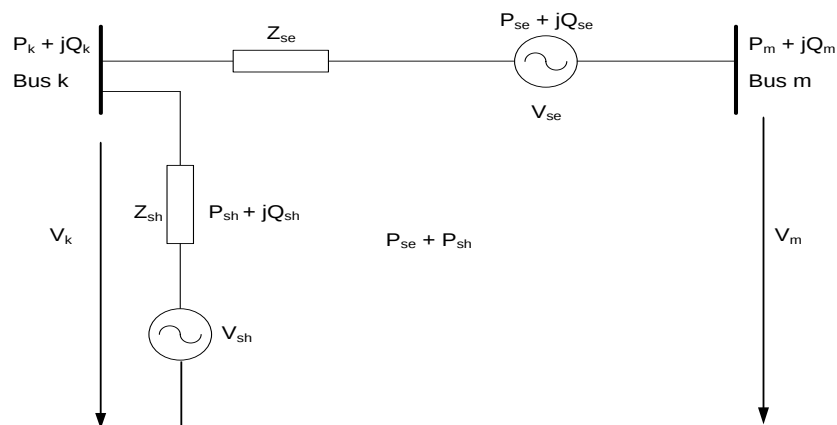
Lebih penting lagi, UPFC juga merupakan alat pengendali daya yang sangat fleksibel karena dapat menggunakan salah satu ataupun kombinasi parameter dasar dari system aliran daya yaitu tegangan transmisi, impedansi transmisi, dan selisih sudut fasa transmisi. Hal ini merupakan suatu keuntungan karena dengan pemasangan satu UPFC yang dapat mengendalikan ketiga parameter tersebut, maka tidak hanya system jaringan transmisi akan menjadi lebih baik, tetapi juga akan menjadi lebih murah dan mudah dalam pemeliharaan dan pengoperasiannya. Dengan kata lain pemasangan satu UPFC akan sama halnya dengan pemasangan alat TCSC, STATCON dan TCPR secara bersamaan.

Studi kasus terhadap UPFC, baik itu dalam skala besar maupun kecil telah berhasil dilaksanakan. Sebagai contoh, 1060 MVA UPFC telah dipasang pada jaringan transmisi 500kV yang menghubungkan kota Phoenix (Negara bagian Arizona) dengan kota Las Vegas (Negara bagian Nevada) dan kota Los Angeles (Negara bagian California). Gangguan tiga fasa pada satu titik di jaringan tersebut disimulasikan untuk investigasi reaksi UPFC dan peralatan konvensional. Hasil simulasi menunjukkan UPFC memberikan reaksi lebih stabil dibandingkan dengan reaksi peralatan konvensional. Tegangan dari transmisi menunjukkan lebih kurang

osilasinya dengan menggunakan UPFC dibandingkan pemasangan peralatan lama. Dengan demikian, UPFC merupakan alat yang dapat diandalkan untuk pengendalian aliran daya listrik dengan sekaligus menjaga kestabilan sistem jaringan transmisi itu sendiri.

2.1.3 Prinsip Pengoperasian UPFC

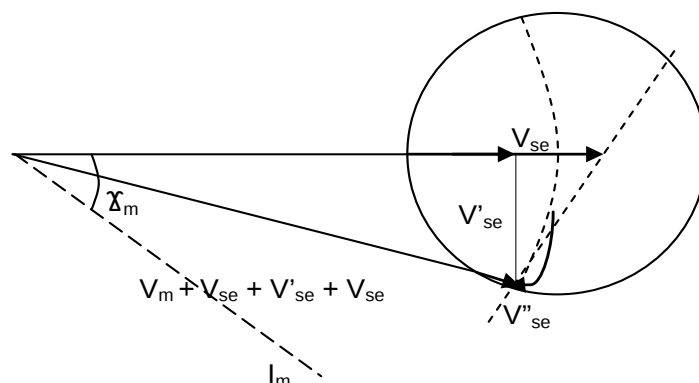
Dua converter sumber tegangan pada UPFC, dihubungkan melalui DC link yang dimodelkan sebagai dua sumber tegangan yang ideal, salah satu converter dihubungkan secara seri dan yang lain nya dihubungkan secara paralel diantara dua bus. Output pada sumber tegangan seri V_{se} dan θ_{se} dapat mengontrol magnitude dan sudut antara batas $V_{se\ maks} \leq V_{se} \leq V_{se\ min}$ dan $0 \leq \theta_{se} \leq 2\pi$ dan output pada sumber tegangan paralel adalah V_{sh} dan θ_{sh} dapat mengontrol antara batas $V_{sh\ maks} \leq V_{sh} \leq V_{sh\ min}$ dan $0 \leq \theta_{sh} \leq 2\pi$. Gambar 2.5 menggambarkan model sumber tegangan dari UPFC. Z_{se} dan Z_{sh} adalah impedansi dari dua kopling transformator dimana satu kopling dihubungkan secara seri dan yang lainnya dihubungkan secara paralel antar jaringan dan UPFC.



Gambar 2.5 Model Sumber Tegangan dari UPFC

Tegangan output converter (magnitude dan shunt) biasa digunakan untuk mengontrol aliran daya dan tegangan pada simpul dibawah ini.

- i. Magnitude tegangan bus dapat dikontrol dengan menginjeksi tegangan V_{se} sefasa atau tidak sefasa seperti ditunjukkan pada gambar 2.6 (θ_{se} adalah sefasa/tidak sefasa dengan sudut tegangan θ_k)
- ii. Aliran daya dapat dikontrol (kompensasi reaktif seri) dengan menginjeksi tegangan V_{se}' kuadrat (lead atau lag) ke arus jaringan ($\theta_{se} = \gamma_m \pm 90$, γ_m) adalah sudut antara V_m dan I_m) seperti ditunjukkan pada gambar 2.6.
- iii. Aliran daya dapat dikontrol (sebagai pergeseran fasa dengan menginjeksi magnitude tegangan 1 (V_{se}'') dalam kuadrat (lead atau lag) ke tegangan simpul θ_m , seperti ditunjukkan pada gambar 2.6



Gambar 2.6 Simultan control dari tegangan, impedansi sudut

2.2 Penempatan UPFC Dalam Sistem Tenaga Listrik

Dalam tugas akhir ini dibahas penempatan UPFC dalam sistem tenaga listrik terhadap stabilitas tegangan. Tegangan dalam sistem akan berubah sebagai akibat perubahan beban, hal ini terutama akan terjadi di ujung saluran yang

panjang, sehingga nilai rugi tegangan (voltage drop) relative besar, bisa mencapai 10%. UPFC sebaiknya ditempatkan di ujung saluran yang demikian dengan harapan bisa membantu menstabilkan tegangan, karena UPFC bisa menyuntikkan daya reaktif dalam arah seri dari saluran dan juga dalam arah paralel dari saluran.

Untuk bisa merencanakan UPFC secara tepat dengan tujuan seperti tersebut di atas, perlu dilakukan studi aliran daya, khususnya yang berkaitan dengan perubahan beban dan perubahan tegangan yang timbul dalam system. Hal ini akan dibahas dalam pasal II.3.

Karena perlu dikaji akibat lain yang mungkin timbul sebagai akibat penempatan UPFC tersebut.

2.3 Pengaruh UPFC Terhadap Aliran Daya dan Profil Tegangan

Pengaruh UPFC terhadap aliran daya dan profil tegangan sangat dipengaruhi oleh kompensasi reactor shunt dan kompensasi kapasitor seri.

2.3.1 Kompensasi

Kompensasi dimaksudkan untuk mengontrol tegangan kerja disetiap titik sepanjang saluran, memperkecil panjang elektrik dari saluran, jadi menaikkan stabilitas statis saluran dan untuk menaikkan kapasitas penyaluran.

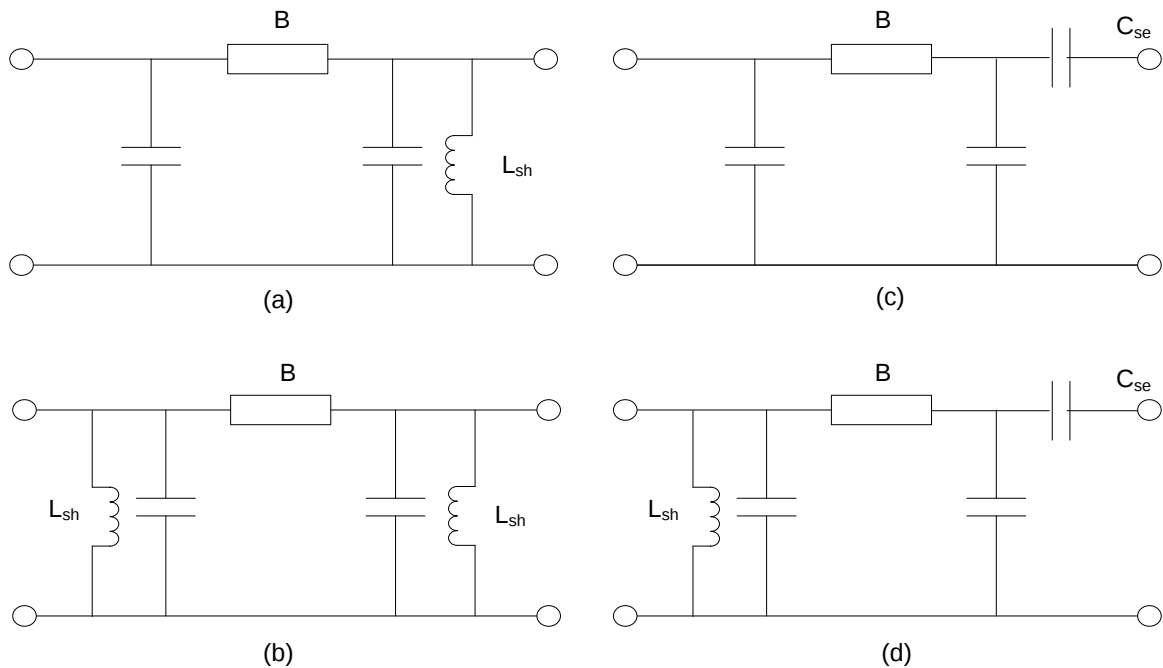
Alat-alat kompensasi pada saluran-saluran transmisi adalah reactor shunt, kapasitor seri atau kombinasi keduanya, gambar 2.7. kompensasi dengan reactor shunt biasanya digunakan pada transmisi jarak menengah dan kompensasi dengan kapasitor seri digunakan pada saluran yang lebih panjang.

Pada kompensasi dengan kapasitor seri, bila yang dipentingkan hanya keadaan saluran pada ujung-ujungnya, saluran transmisi dan kapasitor seri itu cukup direpresentasikan dengan sirkuit PI tanpa menimbulkan kesalahan yang berarti. Dalam hal ini penempatan fisik dari kapasitor seri sepanjang saluran tidak termasuk dalam perhitungan. Tetapi bila kondisi kerja sepanjang saluran diperhatikan, letak fisik kapasitor harus diperhatikan. Hal ini dapat diperoleh dengan menentukan konstanta umum ABCD dari bagian saluran di masing-masing sisi dari kapasitor dan mempresentasikan kapasitor itu dengan konstanta ABCD-nya.

Pada kompensasi reactor shunt, saluran transmisi dan reactor shunt terhubung shunt, demikian juga pada kompensasi kapasitor seri saluran transmisi dan kapasitor seri terhubung seri.

Derajat kompensasi pada kompensasi dengan reactor shunt adalah B_L/B_C , dimana B_L adalah suseptansi induktif dari reactor shunt, dan B_C adalah suseptansi kapasitif total dari saluran.

Derajat kompensasi pada kompensasi dengan kapasitor seri adalah X_C/X_L , dimana X_C adalah reaktansi kapasitif dari kapasitor seri dan X_L adalah reaktansi induktif total dari saluran perfasa.



Gambar 2.7 Saluran transmisi yang dikompensasi. (a) Kompensasi reactor shunt pada ujung beban ; (b) kompensasi reactor shunt pada kedua ujung; (c) kompensasi kapasitor seri pada ujung beban; (d) kombinasi kompensasi reactor shunt dan kapasitor seri.

2.3.2.1 Kompensasi Reaktor Shunt

Kompensasi reactor shunt dilakukan dengan memasang reactor shunt pada salah satu ujung saluran. Bila saluran itu panjang sekali, maka saluran dibagi dalam beberapa bagian dan setiap bagian dikompensasi. Sebagaimana disebutkan diatas tujuan kompensasi adalah untuk mengontrol tegangan kerja disetiap titik sepanjang saluran dan untuk memperkecil panjang dielektrik saluran.

Untuk memperoleh operasi praktis dan berguna bagi saluran transmisi di daerah seperempat sampai setengah panjang gelombang, perlu dipasang reactor shunt untuk mengontrol karakteristik dari saluran tersebut.

2.3.2.1.1 Pengaruh Kompensasi Shunt Terhadap Tegangan

Penurunan tegangan sepanjang saluran dapat diperoleh dengan memasang reactor shunt pada satu atau lebih titik. Semakin banyak seksi semakin datar tegangan itu. Dalam kondisi dimana saluran dibagi menjadi “n” seksi yang sama panjang, tegangan pada setiap lokasi reactor akan sama dengan tegangan ujung kirim pada keadaan beban nol dan dalam keadaan hubung terbuka. Tegangan ditengah-tengah tiap seksi akan tetap lebih besar dari tegangan jepit.

2.3.2.1.2 Pengaruh Reaktor Shunt Terhadap Penyaluran Daya

Dengan pemasangan reactor shunt pada saluran transmisi, ternyata makin banyak reactor shunt yang digunakan maka makin berkurang kapasitas penyaluran.

Pandanglah suatu saluran transmisi panjang tanpa rugi-rugi yang tidak dikompensasi, maka besar daya yang dapat disalurkan diberikan oleh persamaan (2.1)

$$P_R = \frac{|V_S| |V_R|}{|B|} \sin \delta \quad (2.1)$$

Dan bila $P_0 = I/Z_0$ maka :

$$\frac{P_R}{P_0} = \frac{|V_S| |V_R| \sin \delta}{\sin(\frac{2\pi}{\lambda} l)} \quad (2.2)$$

Bila saluran itu dibagi dalam “n” seksi yang sama dan masing-masing seksi dikompensasi sempurna, maka persamaan (2.2) berubah menjadi :

$$\frac{P_R}{P_o} = \frac{|V_s| |V_R| \sin \delta}{n \sin \left[\frac{2\pi l}{\lambda n} \right]} \quad (2.3)$$

Dimana :

V_s = Tegangan ujung pengiriman

V_R = Tegangan ujung penerimaan

P_R = Daya ujung penerimaan

P_o = Daya Natural

l = Panjang saluran transmisi

n = Banyak seksi

λ = Panjang Gelombang

dari persamaan (2-3) dapat dilihat, semakin banyak jumlah seksi “n” semakin berkurang besar daya yang dapat disalurkan. Jadi kompensasi dengan reactor shunt akan memperkecil kapasitas penyaluran. Hal ini dapat diatasi dengan menggunakan kapasitas seri.

2.3.2.2 Kompensasi Seri

Kompensasi ini dilakukan dengan kapasitor seri, kapasitor seri dipasang pada salah satu ujung saluran dan bila saluran lebih panjang maka dipasang pada kedua ujung saluran. Pemasangan kapasitor seri ini ditengah-tengah saluran adalah lebih baik tetapi lebih mahal karena harus menambah gardu khusus untuk instalasi kapasitor tersebut.

Kapasitor seri lebih efektif untuk mengkompensasikan reaktansi seri, dengan demikian menaikkan limit daya statis atau menaikkan limit daya statis atau menaikkan stabilitas saluran. Salah satu yang perlu diperhatikan dengan kompensasi seri ini adalah derajat kompensasi. Derajat kompensasi ini tidak boleh terlalu besar. Kompensasi 100 persen jelas tidak diperbolehkan karena akan menimbulkan resonansi seri. Derajat kompensasi yang dekat dengan kompensasi 100 persen juga berbahaya karena bila frekuensi turun, misalnya bila pembangkitan kurang, maka derajat kompensasi akan mendekati 100 persen, jadi akan terjadi resonansi. Ini disebut sebagai resonansi sub-sinkron. Misalkan :

$$X = \omega L = \text{Reaktansi seri total saluran}$$

$$C = \text{Kapasitansi dari kapasitor seri}$$

Misalkan juga derajat kompensasi 90%, jadi :

$$\frac{1}{\omega C} = 0,9 \omega L$$

Atau :

$$\frac{1}{\omega C \cdot \omega L} = 0.9$$

Sekarang bila frekuensi turun dari 50 hertz menjadi 48,5 hertz, jadi pengurangannya 30%, maka derajat kompensasinya sekarang menjadi :

$$\frac{1}{0.97 \omega C \cdot 0.97 \omega L} = \frac{90\%}{(0.97)^2} = 95.6 \%$$

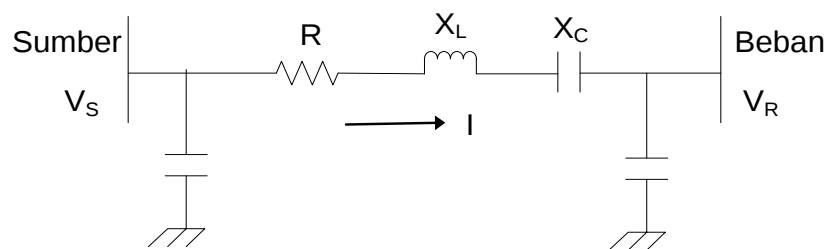
Dan bila frekuensi turun menjadi 47.5 hertz, jadi pengurangan frekuensi 50%, maka kompensasinya menjadi :

$$\frac{90\%}{(0.95)^2} = 99.72\%$$

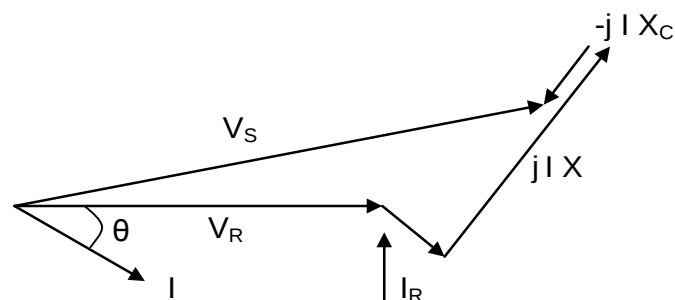
Dan ini sudah hampir mencapai resonansi dan berbahaya. Besar derajat kompensasi dalam praktek berkisar antara 40% sampai 60%.

2.3.2.2.1 Pengaruh Kapasitor Shunt Terhadap Tegangan

Dengan pemasangan kapasitor seri, reaktansi ekivalen berkurang, dengan demikian jatuh tegangan berkurang, jadi pengaturan tegangan lebih baik.



(a)



(b)

Gambar 2.8

(a) Diagram Satu garis saluran yang dikompensasikan dengan kapasitor seri

(b) Diagram vector tegangan kompensasi seri

2.3.2.2.2 Pengaruh Kapasitor Seri Terhadap Penyaluran Daya

Dengan kompensasi seri, reaktansi seri berkurang, jadi limit daya statis bertambah besar.

Besar daya yang disalurkan diberikan oleh persamaan (2.4)

$$P_R = \frac{|V_S| |V_R|}{|B|} \sin \delta \quad (2.4)$$

Untuk saluran menengah dengan representasi nominal π dan tahanan diabaikan, harga B diberikan oleh X yaitu reaktansi seri saluran.

Jadi bila pada saluran dipasang kapasitor seri maka reaktansi berubah menjadi $X - X_c$, dimana X_c adalah reaktansi kapasitif dari kapasitor seri. Daya yang disalurkan menjadi :

$$P_R = \frac{|V_S| |V_R|}{X - X_c} \sin \delta \quad (2.5)$$

Dari persamaan (2.5) dapat dilihat bahwa daya maksimum bertambah dengan kapasitor seri.

2.4 Load Flow

2.4.1 Umum

Studi aliran beban pada system tenaga listrik adalah suatu studi yang sangat penting, studi ini mengungkapkan kinerja aliran daya baik daya nyata maupun daya reaktif pada kondisi tertentu dalam operasi system pada keadaan mantap (steady state). Studi aliran beban juga memberikan informasi pembebanan jaringan dan transformator termasuk rugi-rugi dayanya di seluruh system tenaga listrik dan tegangan diberbagai titik di dalam sistem guna evaluasi dan regulasi kinerja operasi sistem tenaga. Studi aliran beban juga dapat digunakan untuk menganalisa pengembangan dalam menentukan kebutuhan (demand) tenaga listrik yang akan datang.

Perhitungan aliran beban dapat dilakukan dengan menggunakan matriks admitansi bus (Y_{bus}) atau matriks impedansi (Z_{bus}), namun lebih sederhana menggunakan matriks admitansi bus.

Bus adalah suatu simpul dimana satu atau beberapa saluran atau beban dan generator tersambung. Bus atau simpul dalam sistem tenaga listrik dibedakan berdasarkan kuantitas tertentu seperti terlihat dalam table berikut ini.

Tabel 2.1 Macam Bus Pada Studi Aliran Beban

No.	Macam Bus	Dispesifikasi	Tak Dispesifikasi	$\pm \%$
1.	Bus Beban atau PQ Bus	P_i, Q_i	V_i, σ_i	85 %
2.	Bus Generator atau Bus PV (Voltage controlled bus)	P_i, V_i	Q_i, σ_i	15 %
3.	Bus referensi atau slack bus Atau swing bus	V_i, σ_i	P_i, Q_i	1

➤ Bus Beban (PQ Bus)

Bus ini adalah bus terbanyak di dalam jaringan tenaga listrik kurang lebih 85 % dari jumlah bus beban ini P_i (daya nyata terinjeksi di bus i) dan Q_i (daya reaktif terinjeksi di bus i), Q_{Li} (daya reaktif beban di bus i) diketahui dari prakiraan beban (load forecast); P_{Gi} (daya reaktif dari generator di bus i) dispesifikasi atau nol (tidak ada generator pada bus i).

➤ Bus Generator (PV Bus)

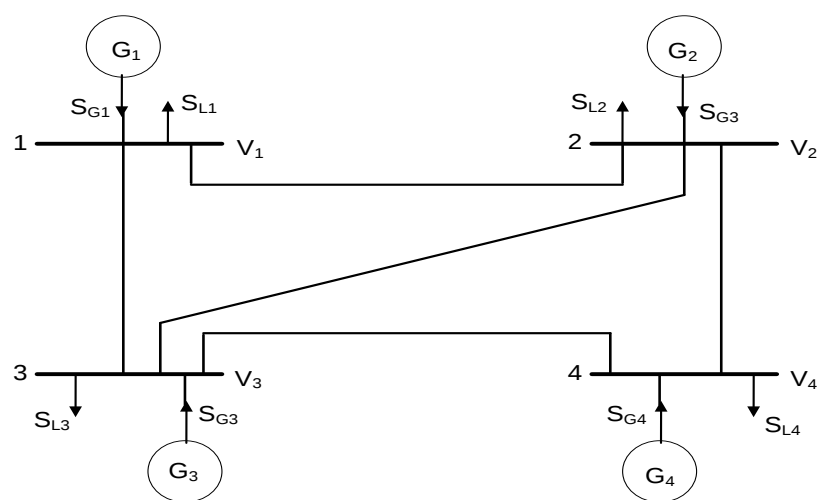
Pada bus ini P_{Li} dan Q_{Li} diketahui sebelumnya (prakiraan beban), P_i dan $|V_i|$ dispesifikasi sehingga P_{Gi} terspesifikasi sedangkan yang belum diketahui Q_i (juga Q_{Gi}) dan susut σ_i dari $|V_i|$.

➤ Bus Referensi (Slack Bus)

Bus referensi adalah bus generator, generator pada swing bus memasok perbedaan antara (difference between) daya nyata injeksi yang dispesifikasi ke dalam sistem pada bus-bus lainnya dan memasok daya nyata keluaran total beserta rugi-rugi daya sistem. Karena tegangan diseluruh sistem (jaringan) harus mendekati 1 pu, maka biasanya tegangan pada swing bus dispesifikasi sama dengan 1 pu, dan sudut σ_i diambil nol pada spesifikasi awal.

2.4.2 Formulasi Model Jaringan

Suatu sistem tenaga listrik terdiri dari sejumlah bus yang diintekoneksi oleh saluran transmisi. Pada beberapa bus tersambung generator-generator dan sisanya tersambung dengan beban dan sebagian bus lainnya tersambung dengan generator dan beban. Beberapa bus dapat dihubungkan dengan kapasitor statis atau synchronous condensers untuk memasok daya reaktif guna mengatur tegangan bus dan sistem.



Gambar 2.9 Diagram satu garis sistem

Untuk memudahkan dalam memahami permasalahan aliran daya, maka penjelasan tentang aliran daya akan menggunakan suatu model sistem tenaga listrik yang dapat dilihat pada gambar 2.9. saluran transmisi direpresentasikan dengan nominal n . Guna sistematis analisa, beban (nyata dan reaktif) dianggap negative terhadap daya dari generator dan daya di bus. Selanjutnya dapat dituliskan persamaan daya di bus i , sebagai berikut.

- Daya dipasok oleh generator :

$$S_{Gi} = P_{Gi} + jQ_{Li}$$

- Daya dikirim ke beban :

$$S_{Li} = P_{Li} + jQ_{Li}$$

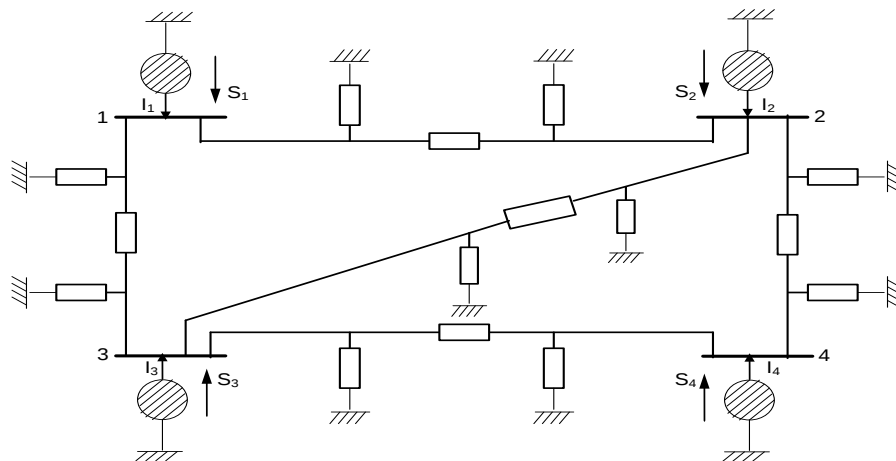
- Daya diinjeksi ke bus i :

$$S_i = S_{Gi} + S_{Li} = (P_{Gi} + jQ_{Li}) = (P_{Gi} - P_{Li}) + j(Q_{Gi} - Q_{Li})$$

$$\text{Jadi, } P_i = P_{Gi} - P_{Li} \text{ dan } Q_i = Q_{Gi} - Q_{Li}$$

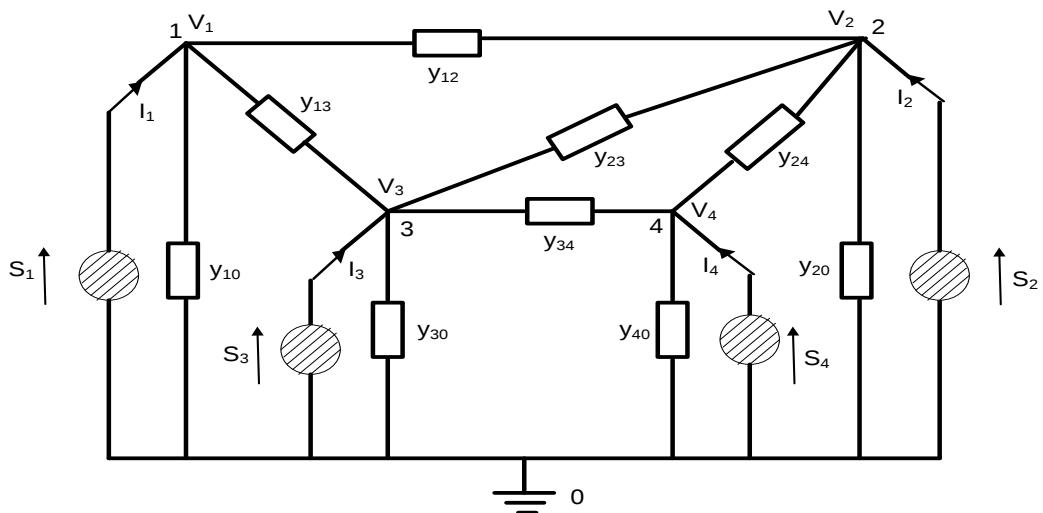
Dimana :

- $i = 1, 2, 3, \dots, n$, nomor bus dalam sistem tenaga.
- V_1, V_2, V_3 dan V_4 adalah tegangan bus 1, 2, 3 dan 4.
- G_1, G_2, G_3 dan G_4 adalah generator pada bus 1, 2, 3 dan 4.
- S_{G1}, S_{G2}, S_{G3} dan S_{G4} adalah daya yang dipasok oleh generator G_1, G_2, G_3 dan G_4 .
- S_{L1}, S_{L2}, S_{L3} dan S_{L4} adalah daya yang dipasok ke beban dari bus 1, 2, 3 dan 4.



Gambar 2.10 Rangkaian ekuivalen dengan impedansi dan sumber tegangan

Diagram gambar 2.10 adalah rangkaian ekuivalen gambar 2.9 yang dinyatakan dengan impedansi seri beserta admitansi shunt dari masing-masing saluran. Untuk perhitungan atau analisa diagram dibuat rangkaian ekuivalen dengan admitansi dan sumber arus seperti gambar 2.11.



Gambar 2.11 Rangkaian ekuivalen dengan admitansi dan sumber arus

Pada rangkaian ekuivalen gambar 2.11, semua sumber arus dan admitansi shunt pada bus di jumlah tersambung pada titik referensi pada

tegangan bumi, dengan demikian sistem dengan 4 bus mempunyai simpul 5 buah. Dengan mengasumsikan tiada admitansi bersama antara saluran, maka dengan hukum kirchoff dapat disusun persamaan-persamaan arus I dari diagram gambar 2.3, yakni I_1 , I_2 , I_3 dan I_4 , sebagai berikut :

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= V_1 y_{10} + (V_1 - V_2) y_{12} + (V_1 - V_3) y_{13} + (V_1 - V_4) y_{14} \\ I_2 &= V_2 y_{20} + (V_2 - V_1) y_{21} + (V_2 - V_3) y_{23} + (V_2 - V_4) y_{24} \\ I_3 &= V_3 y_{30} + (V_3 - V_1) y_{31} + (V_3 - V_2) y_{32} + (V_3 - V_4) y_{34} \\ I_4 &= V_4 y_{40} + (V_4 - V_1) y_{41} + (V_4 - V_2) y_{42} + (V_4 - V_3) y_{43} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Keterangan dari persamaan diatas ialah sebagai berikut :

- Admitansi shunt y_{i0} adalah admitansi dari bus I (atau simpul i) tersambung pada simpul referensi.
- y_{ik} adalah admitansi saluran antara simpul I dengan simpul k , sehingga $y_{ik} = y_{ki}$.
- V_i adalah tegangan simpul i .

Persamaan – persamaan arus di atas dapat ditulis dalam bentuk matrik sebagai berikut :

$$[I] = [Y] [V] \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} \\ Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Dengan:

$$Y_{11} = y_{10} + y_{12} + y_{13}$$

$$Y_{13} = y_{31} = -y_{13} = -y_{31}$$

$$Y_{22} = y_{20} + y_{21} + y_{23} + y_{24}$$

$$Y_{14} = Y_{41} = 0$$

$$Y_{33} = y_{30} + y_{31} + y_{32} + y_{34}$$

$$Y_{23} = Y_{32} = -y_{23} = -y_{32}$$

$$Y_{44} = y_{40} + y_{41} + y_{42} + y_{43}$$

$$Y_{24} = Y_{42} = -Y_{24} = -Y_{42}$$

$$Y_{12} = y_{21} = -y_{12} = -y_{21}$$

$$Y_{34} = Y_{43} = -y_{34} = -y_{43}$$

Penulisan masing – masing unsure Y_{bus} dan V_{bus} dengan notasi indeks dan sudutnya, misalnya :

$$Y_{ii} = |Y_{ii}| \angle \theta_{ii}$$

$$Y_{ik} = |Y_{ik}| \angle \theta_{ik}$$

$$V_i = |V_i| \angle \delta_i$$

$$V_k = |V_k| \angle \delta_k$$

2.4.3. Persamaan Aliran Beban dan Metoda Penyelesaiannya

Berdasarkan matriks persamaan (3) dapat dituliskan persamaan arus yang diinjeksikan di bus I dari suatu sistem yang mempunyai “n” buah bus adalah :

$$I_1 = Y_{i1} V_1 + Y_{i2} V_2 + Y_{i3} V_3 + \dots + Y_{ii} V_{ii} + \dots + Y_{in} V_n \quad (4)$$

Secara kompleks seperti dibawah ini :

$$I_1 = \sum_{k=1}^n Y_{ik} V_k \quad (5)$$

Bila sudut – sudut dari Y_{ii} , Y_{ik} , V_i , dan V_k disertakan persamaan (5) menjadi :

$$I_k = \sum_{k=1}^n |Y_{ik}| |V_k| \angle \theta_{ik} + \delta_k \quad (6)$$

Daya kompleks yang diinjeksikan di bus I, S_i adalah :

$$S_i = P_i - jQ_i = V_i I_i^* \quad (7)$$

Untuk perhitungan aliran beban lebih mudah dilakukan dengan I_i (daripada I^*) dan diambil konjugasi dari S_i , persamaan (7) sehingga diperoleh :

$$S_i^* = P_i - jQ_i = V_i^* I_i \quad (8)$$

Kemudian I_i diganti dengan persamaan (6) dan $V_i^* = |V_i| \angle -\delta_i$, maka :

$$S_i^* = P_i - jQ_i = |V_i| \sum_{k=1}^n |Y_{ik}| |V_k| \angle \theta_{ik} + \delta_k - \delta_i \quad (9)$$

Daya nyata :

$$P_i = |V_i| \sum_{k=1}^n |Y_{ik}| |V_k| \cos (\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i) \quad (10a)$$

Daya reaktif :

$$Q_i = -|V_i| \sum_{k=1}^n |Y_{ik}| |V_k| \sin (\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i) \quad (10b)$$

Untuk mempermudah penyelesaian studi aliran beban dilakukan penyederhanaan asumsi, yaitu :

1. Tahanan saluran pada umumnya kecil dibandingkan dengan reaktansi induktif saluran, sehingga dapat diabaikan dengan reaktansi induktif saluran, sehingga dapat diabaikan.
2. Sudut σ_i pada umumnya kecil, demikian juga $(\sigma_i - \sigma_k)$ juga kecil, sehingga $\sin \sigma_i \approx \sigma_i$ dan $\sin(\sigma_i - \sigma_k) \approx \sigma_i - \sigma_k$.

3. Kecuali swing bus, tegangan semua bus adalah tegangan kontrol, ini berarti semua tegangan bus dispesifikasi.

Berdasarkan ketiga asumsi diatas, persamaan (10a) dan (10b) dapat dimodifikasi menjadi :

$$P_i = |V_i| \sum_{k=1}^n |Y_{ik}| |V_k| \{-(\delta_k - \delta_i)\} \quad (11a)$$

$$Q_i = -|V_i| \sum_{k=1}^n |Y_{ik}| |V_k| \cos(\delta_k - \delta_i) + |V_i|^2 |Y_{ii}| \quad (11b)$$

Daya yang disalurkan dari satu bus ke bus lainnya, diturunkan dari persamaan diterima di ujung beban (P_R) yang ditransformasikan dari diagram lingkaran daya.

Daya nyata :

$$P_{ik} = \frac{|V_{ik}| |V_k|}{|X_{ik}|} \sin(\delta_i - \delta_k) \quad (12a)$$

Daya reaktif :

$$Q_{ik} = \frac{|V_i|^2}{|X_{ik}|} - \frac{|V_{ik}| |V_k|}{|X_{ik}|} \cos(\delta_i - \delta_k) \quad (12b)$$

2.4.4 Profil Tegangan

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 Gi dan tegangan dari simpul di pusat listrik bersama –

sama membentuk profil sistem. Keseluruhan sistem harus dijaga agar tegangan, arus dan dayanya masih terdapat dalam batas – batas yang diizinkan.

Pengaturan profil tegangan sistem ditentukan oleh dua factor :

- a. Besarnya daya reaktif yang harus disediakan.
- b. Tempat (simpul) penyediaan daya reaktif yang tepat.

Dalam prakteknya, tidak di semua simpul dapat disediakan daya reaktif, karena tidak semua simpul mempunyai pembangkit, kapasitor atau reactor, sehingga masalah alokasi daya reaktif untuk mencapai profil tegangan sistem yang diinginkan memerlukan analisa aliran daya yang tidak mudah.

2.5 Studi Aliran Beban dengan Metoda Newton Raphson

Metoda Newton Raphson merupakan metoda praktis untuk penyelesaian studi aliran beban suatu sistem tenaga yang besar. Metoda ini bekerja lebih cepat dan pasti mencapai konvergen dalam beberapa hal dibandingkan dengan metoda Gauss – Seidel. Beberapa keuntungan bila menggunakan metoda Newton Raphson dalam studi aliran beban :

1. Lebih akurat dan mempunyai kapasitas mencapai konvergen.
2. Hanya memerlukan sekitar 3 (tiga) iterasi, dibandingkan dengan metoda Gauss – Seidel yang memerlukan kurang lebih sekitar 25 iterasi, walaupun jumlah iterasi sangat tergantung besarnya sistem.
3. Metoda Newton Raphson tidak sensitif dalam penentuan atau pemilihan Slack – bus, regulator transformator, dll.

Sebelum membahas penerapan metoda Newton Raphson, sebaiknya kita meninjau secara umum lebih dahulu metoda Newton Raphson.

Petama – tama ditinjau persamaan aljabar non linier dengan satu persamaan :

$$f(x) = k \quad (13)$$

Asumsikan bahwa x^0 adalah nilai perkiraan awal dari x yang tidak diketahui dan Δx^0 adalah suatu nilai bila ditambahkan pada x^0 memberikan solusi yang benar, dengan kata lain $x^0 + \Delta x^0$ adalah solusi dari persamaan (13), sehingga diperoleh :

$$f(x^0 + \Delta x^0) = k \quad (14)$$

Selanjutnya persamaan (14) dapat dijabarkan kedalam persamaan Serrie Taylor, hasil nya sebagai berikut :

$$f(x^0 + \Delta x^0) = f(x^0) + \frac{1}{1!} \Delta x^0 \left(\frac{df(x)}{dx} \right)^0 + \frac{1}{2!} (\Delta x^0)^2 \left(\frac{d^2 f(x)}{dx^2} \right)^0 + \dots + \frac{1}{n!} (\Delta x^0)^n \left(\frac{d^n f(x)}{dx^n} \right)^0$$

Untuk mendapatkan nilai koreksi pada perkiraan awal, yakni Δx^0 , dilakukan dengan mengambil dua unsure pertama, karena biasanya tingkat yang tertinggi diabaikan, maka diperoleh :

$$f(x^0 + \Delta x^0) = f(x^0) + \Delta x^0 \left(\frac{df(x)}{dx} \right)^0$$

$$\Delta k = f(x^0 + \Delta x^0) - f(x^0) = \Delta x^0 \left(\frac{df(x)}{dx} \right)^0$$

$$\Delta x^0 = \frac{\Delta k}{\left(\frac{df(x)}{dx} \right)^0} = \frac{f(x^0 + \Delta x^0) - f(x^0)}{\left(\frac{df(x)}{dx} \right)^0} \quad (15)$$

Sehingga :

$$x^1 = x^0 + \Delta x^0 \quad (16)$$

Persamaan (16) adalah perkiraan nilai x pada iterasi pertama dan untuk nilai perkiraan x pada iterasi $(k + 1)$ adalah :

$$x^{k+1} = x^k + \Delta x^k = \frac{f(x^k + \Delta x^k) - f(x^k)}{\left(\frac{df(x)}{dx}\right)^k} \quad (17)$$

Iterasi diteruskan sampai diperoleh hasil :

$$(x^{k+1} - x^k) \leq \varepsilon$$

ε adalah nilai toleransi yang ditentukan.

Berikutnya akan ditinjau dua buah persamaan aljabar non linier masing – masing :

$$f_1(x_1, x_2) = k_1 \text{ dan } f_2(x_1, x_2) = k_2 \quad (18)$$

Seperti persamaan aljabar non linier diatas, persamaan (13) diasumsikan nilai perkiraan awal x_1^0, x_2^0 serta nilai koreksi awal Δx_1^0 dan Δx_2^0 , sehingga pada iterasi pertama persamaan (18) dapat ditulis (pada atau setelah iterasi pertama) :

$$\left. \begin{aligned} f_1\{(x_1^0 + \Delta x_1^0), (x_2^0 + \Delta x_2^0)\} &= k_1 \\ f_2\{(x_1^0 + \Delta x_1^0), (x_2^0 + \Delta x_2^0)\} &= k_2 \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

Sejalan dengan uraian diatas dalam pembahasan persamaan aljabar non linier dengan satu persamaan ke deret Taylor, maka diperoleh :

$$\left. \begin{aligned} \Delta k_1^0 &= f_1\{(x_1^0 + \Delta x_1^0), (x_2^0 + \Delta x_2^0)\} - f_1(x_1^0, x_2^0) \\ \Delta k_2^0 &= f_2\{(x_1^0 + \Delta x_1^0), (x_2^0 + \Delta x_2^0)\} - f_2(x_1^0, x_2^0) \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

Penggabungan persamaan (20) diperoleh :

$$\begin{bmatrix} \Delta k_1^0 \\ \Delta k_2^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_1}\right)^0 & \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_2}\right)^0 \\ \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_1}\right)^0 & \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_2}\right)^0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1^0 \\ \Delta x_2^0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta k_1^0 \\ \Delta k_2^0 \end{bmatrix} = J^0 \begin{bmatrix} \Delta x_1^0 \\ \Delta x_2^0 \end{bmatrix} \quad (22)$$

Maka:

$$\begin{bmatrix} \Delta x_1^0 \\ \Delta x_2^0 \end{bmatrix} = |J^0|^{-1} \begin{bmatrix} \Delta k_1^0 \\ \Delta k_2^0 \end{bmatrix} \quad (23)$$

Nilai x_1 dan x_2 pada perkiraan iterasi pertama adalah :

$$x_1^1 = x_1^0 + \Delta x_1^0 \quad \text{dan} \quad x_2^1 = x_2^0 + \Delta x_2^0 \quad (24)$$

Sedangkan nilai x_1 dan x_2 pada perkiraan iterasi (k+1) adalah :

$$x_1^{k+1} = x_1^k + \Delta x_1^k \quad \text{dan} \quad x_2^{k+1} = x_2^k + \Delta x_2^k \quad (25)$$

Dengan :

$$\begin{bmatrix} \Delta x_1^k \\ \Delta x_2^k \end{bmatrix} = |J^k|^{-1} \begin{bmatrix} \Delta k_1^k \\ \Delta k_2^k \end{bmatrix} \quad (26)$$

Proses iterasi dilanjutkan sampai diperoleh hasil yang konvergen, bila :

$$(x_1^{k+1} - x_1^k) \leq \varepsilon \quad \text{dan} \quad (x_2^{k+1} - x_2^k) \leq \varepsilon \quad (27)$$

Metode Newton Raphson juga dapat digunakan untuk menjelaskan “n” buah persamaan non linier, “n” buah persamaan.

Nilai – nilai P dan Q yang ditetapkan (dispesifikasi) adalah bersesuaian dengan konstanta – konstanta K (K_1 dan K_2) dari persamaan (18) sedangkan nilai – nilai perkiraan atau nilai – nilai awal dari besarnya tegangan beserta sudutnya adalah bersesuaian pula dengan nilai – nilai awal dari besarnya tegangan beserta sudutnya adalah bersesuaian pula dengan nilai – nilai perkiraan atau nilai – nilai awal x_1^0 dan x_2^0 dari persamaan (19) atau (20). Nilai – nilai perkiraan atau nilai awal digunakan untuk menghitung nilai – nilai P_i dan Q_i menggunakan persamaan – persamaan (31) dan (32), perbedaan antara nilai – nilai yang ditetapkan (dispesifikasi) dengan nilai – nilai hasil perhitungan didefinisikan :

$$\Delta P_i = P_{i(spsc)} - P_{i(calc)}^*$$

$$\Delta Q_i = Q_{i(spsc)} - Q_{i(calc)}$$

Untuk penyederhanaan pembahasan penggunaan metoda Newton Raphson dalam sistem tenaga listrik, akan dibahas suatu sistem tenaga listrik yang terdiri atas tiga buah rel, misalkan rel 1 adalah rel berayun dan perhitungan dilakukan pada rel 2 dan rel 3.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \\ \dots \\ \Delta Q_2 \\ \Delta Q_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_3} & \vdots & \frac{\partial P_2}{\partial |V_2|} & \frac{\partial P_2}{\partial |V_3|} \\ \frac{\partial P_3}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_3}{\partial \delta_3} & \vdots & \frac{\partial P_3}{\partial |V_2|} & \frac{\partial P_3}{\partial |V_3|} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_3} & \vdots & \frac{\partial Q_2}{\partial |V_2|} & \frac{\partial Q_2}{\partial |V_3|} \\ \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_3} & \vdots & \frac{\partial Q_3}{\partial |V_2|} & \frac{\partial Q_3}{\partial |V_3|} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \delta_2 \\ \Delta \delta_3 \\ \dots \\ \Delta V_2 \\ \Delta V_3 \end{bmatrix}$$

Unsur – unsur matrik kolom $\Delta\sigma_i$ dan $\Delta|V_i|$ bersesuaian dengan matrik kolom Δx_1^0 dan Δx_2^0 dari persamaan (21), merupakan koreksi – koreksi yang harus ditambahkan pada nilai perkiraan awal σ_i^0 dan $\Delta|V_i|^0$, yang selanjutnya guna mendapatkan nilai – nilai baru bagi perhitungan $\Delta P_i^{(1)}$ dan $\Delta Q_i^{(1)}$.

Turunan parsial dari P_i dan Q_i adalah :

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_k} = - \sum_{k=1}^n |V_i| |V_k| |Y_{ik}| \sin(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i) \quad (34)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_k} = - \sum_{k=1}^n |V_i| |V_k| |Y_{ik}| \cos(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i) \quad (35)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_k|} = \frac{\partial}{\partial |V_k|} \left\{ \sum_{k=1}^n |V_i| |V_k| |Y_{ik}| \cos(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i) \right\} \quad (36)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_k|} = \frac{\partial}{\partial |V_k|} \left\{ - \sum_{k=1}^n |V_i| |V_k| |Y_{ik}| \sin(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i) \right\} \quad (37)$$

Metoda Newton Raphson untuk studi aliran beban dapat diringkas dengan langkah – langkah sebagai berikut :

1. Asumsikan nilai $|V_i|$ dan σ_i pada semua bus PQ dan σ_i pada semua bus PV.

Dalam hal tidak adanya informasi lain, asumsikan $|V_i|$ pada semua bus PQ sebesar 1 Pu dan σ_i pada semua bus sama dengan nol.

2. Hitung P_i dan Q_i untuk semua bus PQ dan P_i untuk bus PV (kecuali slack bus) menggunakan persamaan (31) dan (32).
3. Hitung ΔP_i dan Q_i untuk semua bus PQ dan P_i untuk bus PV (kecuali slack bus), dengan rumus :

$$\Delta P_i = P_{i(\text{spec})} - P_{i(\text{calc})}$$

$$\Delta Q_i = Q_{i(\text{spec})} - Q_{i(\text{calc})}$$

4. Hitung elemen / unsur matriks jacobian dengan menggunakan rumus (34), (35), (36) dan (37).
5. Hitung $\Delta \sigma$ dan ΔV menggunakan persamaan (33).
6. Nilai kembali (update) nilai / besaran tegangan dan sudutnya untuk semua bus PQ dan nilai sudut fasa untuk semua bus PV.
7. Hitung Q_i untuk semua bus PV dan periksa (check) nilai : $Q_{i \min} < Q_i < Q_{i \max}$. bila sesuai kembali ke langkah 2 dan nilai iterasi berikutnya. Bila tidak sesuai, tentukan Q_i sama dengan $Q_{i \min}$ atau $Q_{i \max}$, dengan asumsi bus ini diperlakukan sebagai bus PQ, selanjutnya kembali ke langkah 2 dan mulai proses iterasi berikutnya.
8. Proses iterasi diteruskan sampai dicapai nilai – nilai ΔP_i dan ΔQ_i pada semua bus PQ dan nilai ΔP_i pada semua bus PV berada dalam batas toleransi yang ditentukan sebelumnya.
9. Hitung daya nyata dan daya reaktif yang disalurkan pada tiap saluran / penghantar.