

BAB II

OPTIMALISASI

PADA SISTEM KELISTRIKAN

2.1 Penjadualan Optimal Pembangkit dan Penyaluran Daya Listrik

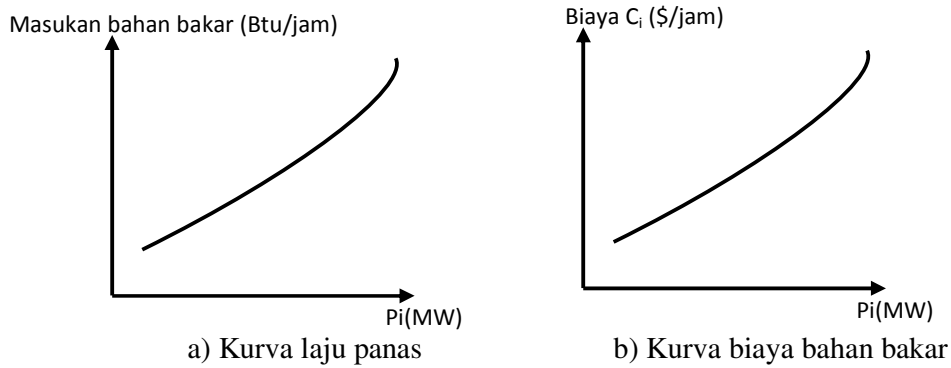
Setiap Pembangkit tidak ditempatkan dengan jarak yang sama dari pusat beban, tergantung lokasi pembangkit yang mungkin dibangun. Oleh karena itu biaya bahan bakar setiap pembangkit akan berbeda. Untuk menghemat biaya operasi dalam pengiriman daya nyata dari pusat pembangkit ke pusat beban, maka diperlukan strategi yang jitu dalam **penjadualan pembangkitan untuk mengoptimalkan** antara pemenuhan permintaan beban terhadap biaya operasi pembangkit yang minimum. Teknik optimasi ini disebut **"optimal power flow (OPF)**. OPF ini biasanya digunakan **untuk mengoptimasi aliran daya** dari sistem berskala besar. **Cara ini dilakukan dengan memperkecil fungsi-fungsi objektif yang dipilih sambil mempertahankan daya guna sistem yang dapat diterima dari batas kemampuan daya pada generator.**

Pengiriman daya nyata yang optimal pada pembangkit dimaksudkan untuk memperkecil jumlah keseluruhan biaya operasi dengan memperhitungkan rugi-rugi daya nyata pada saluran. Faktor-faktor yang mempengaruhi pengiriman daya nyata yang optimal pada pembangkit adalah: **beroperasinya generator yang efisien, biaya bahan bakar, dan rugi-rugi daya pada saluran transmisi.** Banyak juga generator yang beroperasi secara efisien di dalam sistem tenaga namun hal itu tidak menjamin bahwa biaya operasinya minimum. Hal ini disebabkan oleh biaya bahan bakar yang tinggi. Jika stasiun pembangkit berada pada tempat yang jauh dari pusat beban maka rugi-rugi daya pada saluran transmisi dapat menjadi besar. Oleh sebab itu stasiun pembangkit tersebut menjadi sangat tidak ekonomis.

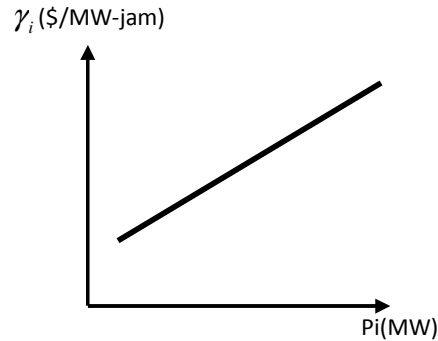
Masukan pada stasiun termal umumnya diukur dalam **Btu/jam** dan keluarannya dalam **MW**. Kurva masukan dan keluaran dalam bentuk sederhana dari sebuah unit

thermis berupa kurva laju panas seperti ditunjukkan pada gambar 2.1(a). Kurva Btu/jam terhadap MW menjadi \$/jam terhadap MW akan menghasilkan kurva biaya bahan bakar seperti yang diperlihatkan pada gambar 2.1(b). Biaya bahan bakar pada generator ini bisa digambarkan seperti sebuah fungsi kuadrat dari daya nyata pada pembangkit, sebagai berikut.

$$C_i = \alpha_i + \beta_i P_i + \gamma_i \cdot P_i^2 \quad (2.1)$$



Gambar 2.1 Kurva karakteristik laju panas dan biaya bahan bakar sebuah pembangkit



Gambar 2.2 Tipikal kurva biaya tambahan bahan bakar

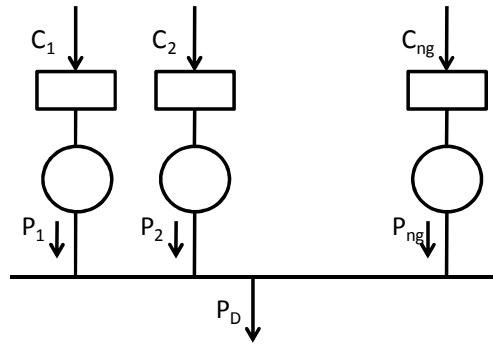
Turunan biaya bahan bakar terhadap daya nyata pada persamaan (2.1) adalah berupa kurva biaya tambahan bahan bakar dan gambarnya diperlihatkan pada gambar 2.2. Turunan dari persamaan (2.1) ini adalah sebagai berikut.

$$\frac{dC_i}{dP_i} = \beta_i + 2 \cdot \gamma_i P_i \quad (2.2)$$

Karena setiap pembangkit mempunyai biaya sendiri yang belum tentu sama dengan biaya pembangkit yang lain, maka penjadualan penggunaan pembangkit secara optimal perlu diperhatikan agar diperoleh biaya terkecil dengan penyaluran daya yang optimal.

2.2 Optimal power flow (OPF) dalam Mengoptimisasi Aliran Daya dari Sistem Berskala Besar

Masalah penyaluran daya listrik yang optimal yang paling tinggi adalah ketika rugi-rugi daya pada saluran transmisi diabaikan. Masalah ini tidak mempertimbangkan bentuk sistem dan impedansi saluran. Contoh yang diambil pada sistem satu bus dengan banyak pembangkit dan terdapat sebuah beban diperlihatkan pada gambar 2.3.



Gambar 2.3 Sebuah bus yang menghubungkan ng jumlah generator dan sebuah beban

Ketika rugi-rugi daya pada saluran transmisi diabaikan, dan jumlah permintaan beban ' P_D ' dianggap sama dengan jumlah daya dari semua pembangkit, maka untuk menentukan total biaya produksi pada pembangkit di masing-masing stasiun adalah seperti persamaan berikut.

$$C_t = \sum_{i=1}^{ng} C_i = \sum_{i=1}^n \alpha_i + \beta_i P_i + \gamma_i P_i^2 \quad (2.3)$$

dan

$$\sum_{i=1}^{ng} P_i = P_D \quad (2.4)$$

dengan:

C_t = total biaya produksi

C_i = biaya produksi dan pembangkit ke-i

P_i = daya nyata dari pembangkitan ke-i

P_D = total daya nyata pada permintaan beban

ng = total jumlah stasiun pembangkit

Sebuah tipikal pendekatan untuk menambah batasan ke dalam fungsi objektif dengan menggunakan bilangan pengali Langrange dari persamaan di atas dapat dibuatkan seperti berikut.

$$L = C_i + \lambda \left(P_D - \sum_{i=1}^{ng} P_i \right) \quad (2.5)$$

Selanjutnya, minimum dari suatu fungsi tanpa batas adalah untuk menentukan titik dimana sebagian dari fungsi untuk variabel-variabel sama dengan nol dapat dibuatkan seperti persamaan berikut.

$$\frac{\partial L}{\partial P_i} = 0 \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = 0 \quad (2.7)$$

Dari persamaan (2.6) diperoleh:

$$\frac{\partial C_i}{\partial P_i} + \lambda(0 - 1) = 0$$

Karena:

$$C_i = C_1 + C_2 + \dots + C_{ng}$$

Maka:

$$\frac{\partial C_i}{\partial P_i} = \frac{dC_i}{dP_i} = \lambda$$

Sehingga kondisi untuk pengiriman biaya produksi dari pembangkit ke-i yang optimum adalah:

$$\frac{dC_i}{dP_i} = \lambda, \text{ dengan } i = 1, \dots, ng \quad (2.8)$$

Atau:

$$\beta_i + 2\gamma_i P = \lambda \quad (2.9)$$

Dari persamaan (2.9), untuk menentukan harga P_i adalah

$$P_i = \frac{\lambda - \beta_i}{2\gamma_i} \quad (2.10)$$

Hubungan-hubungan yang diberikan oleh persamaan (2.10) diketahui sebagai persamaan-persamaan koordinat sebagai fungsi dari λ . Persamaan (2.10) dapat diselesaikan secara iterasi. Harga λ didapat dengan mensubstitusikan harga P_i pada persamaan (2.10) ke persaan (2.4) yang hasilnya adalah sebagai berikut.

$$\sum_{i=1}^{ng} \frac{\lambda - \beta_i}{2\gamma_i} = P_D \quad (2.11)$$

atau:

$$\lambda = \frac{P_D + \sum_{i=1}^{ng} \frac{\beta_i}{2\gamma_i}}{\sum_{i=1}^{ng} \frac{1}{2\gamma_i}} \quad (2.12)$$

Penyelesaian pengiriman daya nyata yang optimal dari pembangkit dengan mengabaikan rugi-rugi daya dapat dilakukan secara analisis. Bila rugi-rugi daya diperhitungkan harus diselesaikan secara iterasi. Dalam sebuah teknik penyelesaian secara iterasi, harga λ didapat dari sebuah perhitungan dengan harga estimasi awal yang telah ditentukan terlebih dahulu, kemudian diselesaikan hingga nilai ΔP_i (daya nyata tambahan) dalam sebuah ketelitian yang akurat. Penyelesaian secara cepat dapat dilakukan dengan menggunakan metode gradien yang ditunjukkan pada persamaan (2.11) dan dapat ditulis ulang sebagai berikut.

$$f(\lambda) = P_D \quad (2.13)$$

Persamaan (2.13) di atas bila ditulis dalam deret Taylor pada sebuah titik operasi $\lambda^{(k)}$ dan dengan mengabaikan bentuk orde paling tinggi akan menghasilkan:

$$f(\lambda)^{(k)} + \left(\frac{df(\lambda)}{d\lambda} \right)^{(k)} \Delta\lambda^{(k)} = P_D \quad (2.14)$$

atau:

$$\Delta\lambda^{(k)} = \frac{\Delta P^{(k)}}{\left(\frac{df(\lambda)}{d\lambda} \right)^{(k)}} = \frac{\Delta P^{(k)}}{\sum \left(\frac{dP_i}{d\lambda} \right)^{(k)}} \quad (2.15)$$

atau:

$$\Delta\lambda^{(k)} = \frac{\Delta P^{(k)}}{\sum \frac{1}{2\gamma_i}} \quad (2.16)$$

Sehingga:

$$\lambda^{(k+1)} = \lambda^{(k)} + \Delta\lambda^{(k)} \quad (2.17)$$

dan

$$\Delta P^{(k)} = P_D - \sum_{i=1}^{ng} P_i^{(k)} \quad (2.18)$$

Proses dilanjutkan sampai $\Delta P^{(k)}$ lebih kecil dari sebuah ketelitian yang telah ditentukan.

Contoh 2.1

Fungsi biaya bahan bakar untuk tiga stasiun pembangkit thermal dalam satuan \$/jam yang diberikan:

$$C_1 = 500 + 5,3 P_1 + 0,004P_1^2$$

$$C_2 = 400 + 5,5 P_2 + 0,006P_2^2$$

$$C_3 = 200 + 5,8 P_3 + 0,009P_3^2$$

Dengan P_1 , P_2 dan P_3 dalam satuan MW. Beban total P_D adalah 800 MW. Dengan mengabaikan rugi-rugi daya pada saluran, tentukan daya optimal yang dikirim dari masing-masing stasiun pembangkit dan biaya total bahan bakar dalam satuan \$/jam dengan metode:

(a) menggunakan persamaan (2.12)

(b) menggunakan persamaan (2.8)

(c) teknik iterasi

Penyelesaian:

(a) Dari persamaan (2.12) dapat ditentukan harga λ

$$\lambda = \frac{800 + \frac{5,3}{0,008} + \frac{5,5}{0,012} + \frac{5,8}{0,018}}{\frac{1}{0,008} + \frac{1}{0,012} + \frac{1}{0,018}} = \frac{800 + 144,0555}{263,8889} = 8,5... \$ / MW - jam$$

Subtitusikan harga λ di atas ke persamaan (2.10) sehingga didapat pengiriman daya optimal sebagai berikut.

$$P_1 = \frac{8,5 - 5,3}{2(0,004)} = 400 MW$$

$$P_2 = \frac{8,5 - 5,5}{2(0,006)} = 250 MW$$

$$P_3 = \frac{8,5 - 5,8}{2(0,009)} = 150 MW$$

(b) Harga $\lambda = 8,5$ \$/MW – jam. Bila dimasukkan ke dalam persamaan (2.8) akan didapatkan:

$$\frac{dC_1}{dP_1} = 5,3 + 0,008P_1 = 8,5$$

$$\frac{dC_2}{dP_2} = 5,5 + 0,012P_2 = 8,5$$

$$\frac{dC_3}{dP_3} = 5,8 + 0,018P_3 = 8,5$$

Sehingga diperoleh $P_1 = 400$ MW, $P_2 = 250$ MW dan $P_3 = 150$ MW

(c) Bila menggunakan penyelesaian metode teknik iterasi, asumsi harga λ sebagai iterasi pertama ditentukan, misal $\lambda^{(1)} = 6,0$ \$/MW-jam. Dari persamaan (2.10) didapatkan:

$$P_1^{(1)} = \frac{6,0 - 5,3}{2(0,004)} = 87,50 MW$$

$$P_2^{(1)} = \frac{6,0 - 5,5}{2(0,006)} = 41,6667 MW$$

$$P_3^{(1)} = \frac{6,0 - 5,8}{2(0,009)} = 11,1111 MW$$

Dengan $P_D = 800$ MW, maka dari persamaan (2.16) dan persamaan (2.18) didapatkan hasil:

$$\Delta P^{(1)} = 800 - (87,5 + 41,6667 + 11,1111) = 659,7222 MW$$

$$\Delta \lambda^{(1)} = \frac{659,7222}{\frac{1}{2(0,004)} + \frac{1}{2(0,006)} + \frac{1}{2(0,009)}} = \frac{659,7222}{263,8889} = 2,5... \$ / MW - jam$$

Nilai λ baru adalah:

$$\lambda^{(2)} = 6 + 2,5 = 8,5... \$ / MW - jam$$

Proses selanjutnya, untuk iterasi kedua ditentukan dengan :

$$P_1^{(2)} = \frac{8,5 - 5,3}{2(0,004)} = 400MW$$

$$P_2^{(2)} = \frac{8,5 - 5,5}{2(0,006)} = 250MW$$

$$P_3^{(2)} = \frac{8,5 - 5,8}{2(0,009)} = 150MW$$

dan

$$\Delta P^{(2)} = 800 - (400 + 250 + 150) = 0$$

Jadi daya optimal yang dikirim dari masing-masing stasiun pembangkit dan biaya tambahan adalah:

$$P_1 = 400 \text{ MW}$$

$$P_2 = 250 \text{ MW}$$

$$P_3 = 150 \text{ MW}$$

$$\lambda = 8,5... \$ / MW - jam$$

Biaya total bahan bakar didapat dari persamaan (2.3) seperti berikut.

$$C_1 = C_1 + C_2 + C_3$$

$$\begin{aligned} C_1 &= (500 + 5,3(400) + 0,004(400)^2) + (400 + 5,5(250) + 0,006(250)^2) + \\ &\quad (200 + 5,8(150) + 0,009(150)^2) \\ &= 6.682,5 \text{ \$/jam} \end{aligned}$$

2.3 Optimasi Operasi Sistem Hidrotermal dengan Memperhitungkan Batas-batas Generator

Keluaran daya dari generator seharusnya tidak melebihi keperluan operasi stabilitas sistem sehingga daya dari generator tersebut terbatas pada batas minimum dan maksimum yang diberikan. Persoalannya, bagaimana memperoleh hasil daya nyata/real untuk setiap stasiun pembangkit yang optimal sehingga fungsi objektif (misalnya biaya produksi total) seperti yang didefinisikan pada persamaan (2.3) adalah minimum sesuai dengan batasan yang diberikan oleh persamaan (2.4) dan ketentuan ketidaksamaan seperti yang diberikan oleh:

$$P_{i(\min)} \leq P_i \leq P_{i(\max)}, \text{ dengan } i = 1, \dots, n_g \quad (2.19)$$

Dengan $P_{i(\min)}$ dan $P_{i(\max)}$ adalah daya nyata minimum dan daya nyata maksimum dari stasiun pembangkit ke i .

Syarat Kuhn-Tucker melengkapi syarat Lagrangian untuk mengikuti ketentuan ketidaksamaan. Syarat-syarat untuk pengiriman daya nyata yang optimal dari pembangkit dengan mengabaikan rugi-rugi daya adalah sebagai berikut.

$$\frac{dC_i}{dP_i} = \lambda, \text{ untuk } P_{i(\min)} \leq P_i \leq P_{i(\max)} \quad (2.20)$$

$$\frac{dC_i}{dP_i} \leq \lambda, \text{ untuk } P_i = P_{i(\max)} \quad (2.21)$$

$$\frac{dC_i}{dP_i} \geq \lambda, \text{ untuk } P_i = P_{i(\min)} \quad (2.22)$$

P_i didapat dari persamaan (2.10) dan iterasi berlangsung sampai $\sum P_i = P_D$

Contoh 2.2

Tentukan daya optimal yang dikirim dari stasiun pembangkit hidro termal dan biaya total bahan bakarnya untuk 3 pembangkit thermal dalam satuan \$/jam dari contoh 2.1 dengan beban total 975 MW dan batasan keluaran daya dari generator diberikan:

$$200 \leq P_1 \leq 450$$

$$150 \leq P_2 \leq 350$$

$$100 \leq P_3 \leq 225$$

Penyelesaian:

Harga estimasi awal lambda $\lambda^{(1)} = 6,0$ \$/jam. Sebagai iterasi pertama dari persamaan (2.10) didapatkan:

$$P_1^{(1)} = \frac{6,0 - 5,3}{2(0,004)} = 87,50 MW$$

$$P_2^{(1)} = \frac{6,0 - 5,5}{2(0,006)} = 41,6667 MW$$

$$P_3^{(1)} = \frac{6,0 - 5,8}{2(0,009)} = 11,1111 MW$$

Dengan $P_D = 975$ MW, maka dari persamaan (2.16) dan persamaan (2.18) didapatkan hasil:

$$\Delta P^{(1)} = 975 - (87,5 + 41,6667 + 11,1111) = 834,7222 MW$$

$$\Delta \lambda^{(1)} = \frac{834,7222}{\frac{1}{2(0,004)} + \frac{1}{2(0,006)} + \frac{1}{2(0,009)}} = \frac{834,7222}{263,8889} = 3,1632 \text{ \$/ MW - jam}$$

Nilai λ baru adalah:

$$\lambda^{(2)} = 6 + 3,1632 = 9,1632 \text{ \$/ MW - jam}$$

Proses selanjutnya, iterasi kedua ditentukan dengan :

$$P_1^{(2)} = \frac{9,1632 - 5,3}{2(0,004)} = 482,8947 MW$$

$$P_2^{(2)} = \frac{9,1632 - 5,5}{2(0,006)} = 305,2632 MW$$

$$P_3^{(2)} = \frac{9,1632 - 5,8}{2(0,009)} = 186,8421 MW$$

Dan

$$\Delta P^{(2)} = 975 - (482,8972 + 305,2632 + 186,8421) = 0$$

Dari hasil perhitungan di atas diperoleh $\Delta P^{(2)} = 0$ yang dicapai dalam dua iterasi, tetapi nilai $P_1 = 482,8972$ MW telah melewati batas atas yang seharusnya sebesar 450 MW. Oleh karena itu perlu dilakukan iterasi ketiga dengan mencari ulang $\Delta P^{(2)}$ yang baru sebagai berikut.

$$\Delta P^{(2)} = 975 - (450 + 305,2632 + 186,8421) = 32,8947 MW$$

Kemudian dari persamaan (2.16) diperoleh sebagai berikut.

$$\Delta\lambda^{(1)} = \frac{32,8947}{\frac{1}{2(0,006)} + \frac{1}{2(0,009)}} = \frac{32,8947}{138,8889} = 0,2368.\$/MW - jam$$

Nilai λ baru adalah:

$$\lambda^{(2)} = 9,1632 + 0,2368 = 9,4.\$/MW - jam$$

Proses selanjutnya, iterasi ketiga ditentukan dengan :

$$P_1^{(3)} = 450MW$$

$$P_2^{(3)} = \frac{9,4 - 5,5}{2(0,006)} = 3252MW$$

$$P_3^{(3)} = \frac{9,4 - 5,8}{2(0,009)} = 200MW$$

Dan

$$\Delta P^{(3)} = 975 - (450 + 325 + 200) = 0$$

Jadi daya optimal yang dikirim dari masing-masing stasiun pembangkit dan biaya tambahan adalah:

$$P_1 = 450 MW$$

$$P_2 = 325 MW$$

$$P_3 = 200 MW$$

$$\lambda = 9,4.\$/MW - jam$$

Biaya total bahan bakar didapat dari persamaan (2.3) seperti berikut.

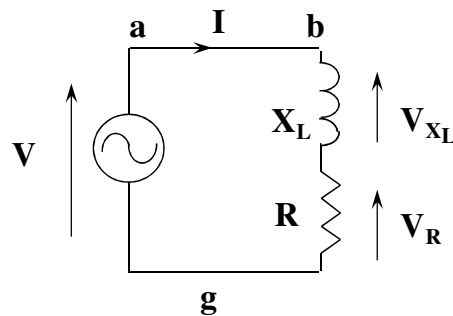
$$C_1 = C_1 + C_2 + C_3$$

$$\begin{aligned} C_1 &= [500 + 5,3(450) + 0,004(450)^2] + [400 + 5,5(325) + 0,006(325)^2] \\ &\quad + [200 + 5,8(200) + 0,009(200)^2] \\ &= 8236,25 \$/jam \end{aligned}$$

2.4 Minimisasi Rugi-rugi Daya pada Saluran Transmisi dan Distribusi Tenaga Listrik

Saluran transmisi dan distribusi tenaga listrik mempunyai panjang saluran yang berbeda-beda tergantung jarak beban dari station pembangkit atau dari gardu induk. Untuk meminimalisasi rugi-rugi pada saluran transmisi dan distribusi dapat dilakukan dengan cara; memperbesar luas penampang saluran, menaikkan tegangan sistem pada saluran dan memperbaiki faktor daya sistem tenaga.

Memperbesar luas penampang saluran bertujuan untuk memperkecil tahanan penghantar pada saluran, sedangkan menaikkan tegangan pada saluran bertujuan untuk memperkecil arus yang mengalir pada kawat / saluran, yang otomatis memperkecil rugi-rugi daya pada saluran sistem tenaga.



Gambar 2.4 Model sederhana rangkaian ekuivalen dari suatu beban disuplai oleh sumber tegangan AC

Besarnya faktor daya pada beban akan mempengaruhi juga rugi-rugi daya pada saluran transmisi dan distribusi. Bila faktor daya beban kecil, maka arus yang mengalir pada saluran akan lebih besar jika dibandingkan dengan faktor daya beban yang lebih besar. Bentuk rangkaian ekuivalen sederhana beban pada sistem tenaga listrik ini diperlihatkan pada gambar 2.4.

Dari rangkaian ekuivalen pada gambar 2.4 dapat diperoleh besarnya impedansi total pada beban sebesar:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} \quad (2.23)$$

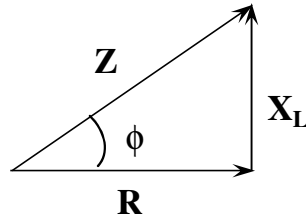
Yang mana:

Z = impedansi total beban (ohm)

R = tahanan total pada beban (ohm)

X_L = reaktansi induktif total pada beban (ohm)

Bentuk hubungan vektor impedansi ini diperlihatkan pada gambar 2.5



Gambar 2.5 Bentuk hubungan vektor antara R, X_L dan Z pada beban

Dari gambar 2.5 dapat dibuatkan hubungan sebagai berikut.

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{X_L}{R} \right) \quad (2.24)$$

$$R = Z \cos(\phi) \quad (2.25)$$

$$X_L = Z \sin(\phi) = 2\pi \cdot f \quad (2.26)$$

$$\cos(\phi) = \text{faktor daya} \quad (2.27)$$

yang mana:

f = frekuensi sumber (Hz)

$\pi = 3,14$

Berdasarkan hubungan persamaan di atas, maka juga dapat dibuatkan hubungan segitiga daya sebagai berikut.

$$S = V \cdot (I^*) = P + jQ = I^2 \cdot Z \quad (2.28)$$

$$P = S \cdot \cos(\phi) = I_R^2 \cdot R \quad (2.29)$$

$$Q_L = S \cdot \sin(\phi) = I_L^2 \cdot X_L \quad (2.30)$$

$$\cos(\phi) = \frac{P}{|S|} \quad (2.31)$$

yang mana:

S = Daya kompleks (VA)

P = Daya aktif (Watt)

Q_L = Daya reaktif dari induktif (VAR)

Karena beban yang dimodelkan adalah rangkaian R dan X_L (yang umum), maka faktor daya yang terjadi adalah di bawah satu (tertinggal). Untuk memperbaiki faktor

daya, maka perlu ditambahkan kapasitor AC yang dipasang paralel dengan beban, karena daya listrik yang dihasilkan kapasitor ini berlawanan arah dengan daya listrik yang diserap oleh beban induktif (Q_L). Bentuk hubungan daya listrik kapasitif ini dengan reaktansi kapasitif dijabarkan sebagai berikut.

$$Q_C = S \cdot \sin(-\phi) = I_C^2 \cdot X_C = V_C \cdot I_C \quad (2.32)$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C} \quad (2.33)$$

Untuk mempertajam pemahaman bersama ini diberikan contoh persoalan dan pembahasan seperti pada contoh 2.3.

Contoh 2.3

Sebuah sumber tenaga 1-fasa mensuplai beban 660 VA pada tegangan 220V, frekuensi 50 Hz dengan faktor daya 0,8 tertinggal. Tentukanlah.

- Arus yang melewati saluran pada kondisi ini
- Besarnya kapasitor yang dipasang paralel dengan beban agar faktor daya menjadi satu

Penyelesaian

Diketahui:

faktor daya = $\cos \phi = 0,8$ tertinggal

maka: $\phi = 36,87$

$\sin \phi = \sin (36,87) = 0,6$

$S_L = 660 \text{ VA}$, $V_t = 220 \text{ V}$

maka:

$$a) I_a = (S_L/V_t)^* = (660 \angle 36,87 / 220)^* = 3 \angle -36,87 \text{ A}$$

$$b) Q_C = S \cdot \sin(\phi) = 660 \cdot 0,6 = 396 \text{ VAR}$$

$$I_C = Q_C / V_t = 396 / 220 = 1,8 \text{ A}$$

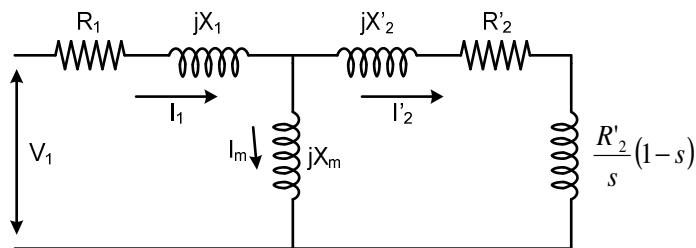
$$X_C = Q_C / (I_C)^2 = 396 / (1,8)^2 = 122,22 \text{ ohm}$$

$$C = \frac{1}{\omega X_C} = \frac{1}{2 \cdot (3,14) \cdot 50 \cdot 122,22} = 26,06 \mu F$$

2.5 Optimisasi Sistem Pengoperasian Motor Listrik

Motor listrik merupakan suatu alat yang paling banyak digunakan dalam kehidupan sehari-hari. Dalam perkembangan saat ini, maka motor yang paling banyak digunakan adalah motor listrik AC, terutama motor induksi. Motor induksi yang berdaya kecil banyak digunakan dalam skala rumah tangga, seperti kipas angin, mesin cuci dan lain sebagainya. Sedangkan untuk motor induksi berskala besar, biasanya adalah motor induksi 3-fasa yang banyak digunakan oleh industri.

Dalam sistem pengopersian motor listrik, maka motor ini akan mencapai **efisiensi tertinggi pada beban 80% sampai dengan 85%** dari kondisi beban penuhnya. Motor ini tidak boleh dibebani terlalu lama dengan beban di atas kapasitasnya, karena akan memperpendek umur motor. Khusus untuk motor induksi 3-fasa, ada beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam mengoperasikan motor agar motor dapat dioperasikan se-optimal mungkin dengan kondisi terbaik pada motor. Untuk itu perlu diketahui rangkaian ekivalen motor induksi 3-fasa ini seperti yang diperlihatkan pada gambar 2.6.



Gambar 2.6 Rangkaian ekivalen motor induksi 3-fasa per fasa

Dari gambar 2.6 dapat dijelaskan:

V_1 = Tegangan sumber perfasa pada kumparan stator

R_1 = Resistansi kumparan stator

X_1 = Reaktansi Induktif kumparan stator

R_2' = Resistansi kumparan rotor dilihat dari sisi stator

X_2' = Reaktansi Induktir kumparan rotor dilihat dari sisi stator

X_m = Reaktansi magnet pada Motor

$\frac{R_2'}{s}(1-s)$ = Resistansi yang mewakili beban motor

I_1 = Arus kumparan stator

I_2' = Arus pada kumparan rotor dilihat dari sisi stator

I_m = Arus Magnet

Dengan mengacu ke gambar 2.6, maka akan diperoleh:

$$Z_2' = \frac{R_2'}{s} + jX_2' \quad (2.34)$$

Bila:

$$Z_{p_2} = \frac{Z_2' \times jX_m}{Z_2' + jX_m} \quad (2.35)$$

$$Z_t = Z_1 + Z_{p_2} \quad (2.36)$$

Maka:

$$i_L = \frac{V_1}{Z_t} = I \angle \phi \quad (2.37)$$

Dan bila:

$$V_{AB} = V_1 - i_1 \cdot x \cdot Z_1 \quad (2.38)$$

maka:

$$(i_2') = \frac{V_{AB}}{Z_2'} \quad (2.39)$$

Kemampuan motor induksi sangat ditentukan oleh torsi mekanik yang dihasilkan motor. Torsi ini berhubungan dengan kemampuan motor untuk mesuplai beban mekanik. Oleh karena itu Torsi mekanik (T_m) secara umum dapat dirumuskan

sebagai berikut.

$$Tm = \frac{P_m}{\omega_r} = \frac{P_g}{\omega_s} = \frac{I_2'^2 \cdot R_2' / s}{\omega_s} \quad (2.40)$$

dengan :

$$\omega_r = \frac{2\pi \cdot Nr}{60} \quad (2.41)$$

$$\omega_s = \frac{2\pi \cdot Ns}{60} \quad (2.42)$$

ω_r = kecepatan sudut (mekanik) dari rotor (rad/dt)

ω_s = kecepatan sudut (mekanik) dari medan magnet stator (rad/dt)

Bila dilihat torsi mekanik yang ditransfer pada rotornya (dengan memperhatikan slip pada motor), maka akan diperoleh hasil sebagai berikut.

$$Tg = \frac{1}{\omega_s} \left[\frac{sE_2'^2 R_2}{R_2'^2 + (sX_2')^2} \right] = \frac{s\alpha}{s^2 + \alpha^2} k \quad (2.43)$$

Dimana:

$$k = \frac{E_2'^2}{\omega_s X_2'}, \text{ dan } \alpha = \frac{R_2'}{X_2'} = \frac{R_2'}{X_2'}$$

Torsi start yang dibutuhkan pada motor induksi pada saat akan bergerak dapat dihitung dengan memasukkan nilai $s = 1$ pada persamaan (2.43). Selanjutnya dengan memperhatikan persamaan (2.40), torsi mekanik yang bermanfaat untuk memutar rotor menjadi:

$$Tm = \frac{1}{\omega_s} P_m = P_g (1-s) = \frac{s\alpha(1-s)}{s^2 + \alpha^2} k \quad (2.44)$$

Torsi maksimum dicapai pada $\frac{dT}{ds} = 0$, maka dari persamaan (2.43) diperoleh

hasil:

$$\frac{dT}{ds} = \alpha (s^2 + \alpha^2) - s \cdot \alpha (2s) = 0$$

$$s^2 + \alpha^2 - 2s^2 = 0$$

$$s^2 = \alpha^2$$

$$s = \pm \alpha \quad (2.45)$$

Dari keadaan ini akan diperoleh torsi maksimum (T_{mx}) sebesar:

$$T_{mx} = \frac{k\alpha^2}{2\alpha^2} = 0,5 \cdot k \quad (2.46)$$

Jadi motor dapat beroperasi dengan kondisi torsi maksimum jika besar tahanan rotor (R_2) sama dengan reaktansi induktif kumparan rotor (X_2).

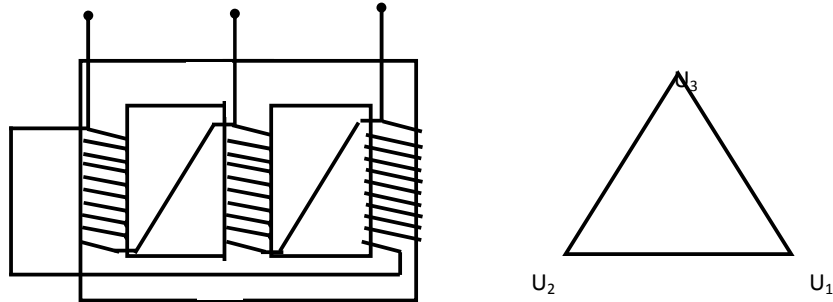
2.6 Optimalisasi Pembebanan Transformator

Transformator merupakan peralatan listrik yang digunakan untuk memindahkan daya listrik bolak balik dari satu rangkaian ke rangkaian yang lain dengan prinsip induksi medan magnet. Transformator ini akan mempunyai efisiensi yang tinggi bila dibebani dengan beban 80% sampai dengan 85% beban penuhnya, sama halnya seperti motor induksi. Trafo ini tidak boleh dibebani terlalu lama melebihi kapasitasnya karena akan memperpendek umur trafo.

Khusus untuk transformator 3-fasa, pembebanan trafo sangat dipengaruhi pula oleh bentuk hubungan kumparan trafo yang dapat dijelaskan sebagai berikut.

1. Hubungan delta

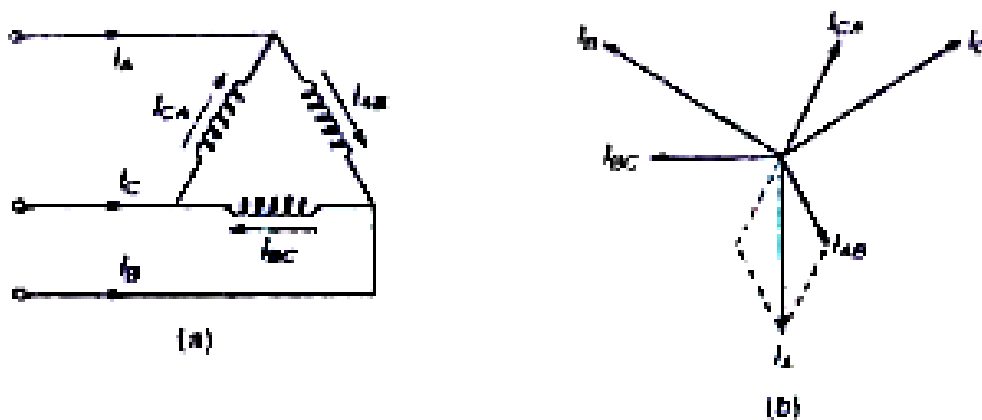
Bentuk hubungan kumparan trafo 3 fasa dalam bentuk hubungan delta diperlihatkan pada gambar 2.7 dan gambar 2.8.



Gambar 2.7 Bentuk lilitan trafo 3-fasa untuk hubungan delta

Tegangan transformator tiga fasa dengan kumparan yang dihubungkan secara delta mempunyai tegangan-tegangan yaitu V_{AB} , V_{BC} dan V_{CA} yang masing-masingnya berbeda fasa sebesar 120° listrik. Bila mengacu kepada keadaan normal (analisa segitiga ABC) dengan acuan tegangan $V_{AB} = A \angle 0^\circ$, maka $V_{BC} = A \angle 240^\circ$ dan $V_{CA} = A \angle 120^\circ$, dengan A = besarnya nilai tegangan antar saluran pada trafo 3 fasa. Bila trafo 3 fasa dalam keadaan seimbang, maka penjumlahan secara vektoris ketiga tegangan ini = nol.

$$V_{AB} + V_{BC} + V_{CA} = 0 \quad (2.47)$$



Gambar 2.8 Bentuk hubungan delta pada kumparan trafo 3 fasa: a) pembahagian arus yang melewati trafo, b) hubungan dari masing-masing arus yang melewati trafo secara vektoris.

Untuk menentukan besarnya nilai arus saluran yang melewati trafo 3 fasa diberikan sebagai berikut.

$$I_A = I_{AB} - I_{CA} \quad (2.48)$$

$$I_B = I_{BC} - I_{AB} \quad (2.49)$$

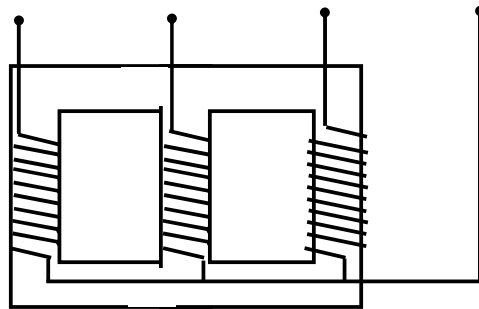
$$I_C = I_{CA} - I_{BC} \quad (2.50)$$

Bila trafo dalam keadaan seimbang, maka harga mutlak dari masing-masing arus saluran pada trafo adalah $\sqrt{3}$ dikali harga mutlak dari arus fasanya (arus yang melewati kumparan trafo) atau dapat dituliskan sebagai berikut..

$$I_A = I_B = I_C = \sqrt{3} I_{AB} = \sqrt{3} I_{BC} = \sqrt{3} I_{CA} \quad (2.51)$$

2. Hubungan Bintang

Bentuk hubungan kumparan trafo 3 fasa dalam bentuk hubungan bintang diperlihatkan pada gambar 2.9 dan gambar 2.10. Tegangan transformator tiga fasa dengan kumparan yang dihubungkan secara bintang mempunyai tegangan-tegangan yaitu V_{AB} , V_{BC} dan V_{CA} yang masing-masingnya berbeda fasa sebesar 120° listrik. Bila mengacu kepada keadaan normal (analisa segitiga ABC) dengan acuan bila tegangan $V_{AB} = A \angle 0^\circ$, maka $V_{BC} = A \angle 240^\circ$ dan $V_{CA} = A \angle 120^\circ$, dengan A = besarnya nilai tegangan antar saluran pada trafo 3 fasa. Bila trafo 3 fase dalam keadaan seimbang, maka penjumlahan secara vektoris ketiga tegangan ini = nol.



Gambar 2.9 Bentuk lilitan trafo 3-fasa untuk hubungan bintang

Besarnya nilai arus saluran dan arus fasa yang melewati trafo 3 fasa saat hubungan bintang mempunyai besar yang sama, karena arus yang melewati saluran pada trafo (I_L) sama dengan arus yang melewati kumparan trafo (I_{ph}). Bila trafo dalam keadaan seimbang, maka besarnya nilai arus yang melewati masing-masing saluran trafo (I_L) mempunyai harga mutlak yang sama atau dapat juga dituliskan sebagai berikut..

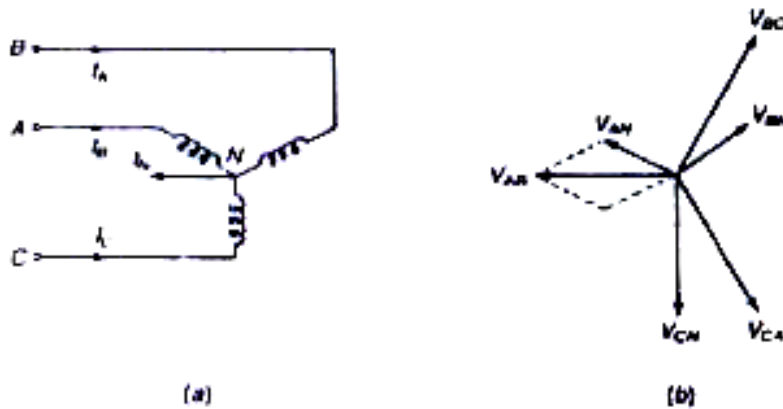
$$I_A = I_B = I_C = I_L = I_{ph} \quad (2.52)$$

Selanjutnya, harga mutlak dari masing-masing tegangan antar saluran pada trafo adalah $\sqrt{3}$ dikali harga mutlak dari tegangan fasanya (tegangan antara saluran dengan netral pada trafo) atau dapat dituliskan sebagai berikut..

$$V_{AB} = \sqrt{3} \cdot V_{AN} \quad (2.53)$$

$$V_{BC} = \sqrt{3} \cdot V_{BN} \quad (2.54)$$

$$V_{CA} = \sqrt{3} \cdot V_{CN} \quad (2.55)$$



Gambar 2.10 Bentuk hubungan bintang pada kumparan trafo 3 fase: a) pembahagian arus yang melewati trafo, b) hubungan tegangan antar saluran (antar fasa) terhadap tegangan fasa (antara fasa dengan netral) pada trafo secara vektoris.

Dari penjabaran di atas terlihat bahwa bila trafo terhubung delta, maka arus yang melewati kumparan trafo lebih kecil dari arus yang melewati penghantar pada salurannya, sedangkan bila trafo terhubung bintang, maka arus yang melewati kumparan trafo sama besarnya dengan arus yang melewati saluran. Berdasarkan kondisi ini, maka dibutuhkan kumparan dan isolasi kumparan yang lebih baik untuk trafo hubungan bintang.