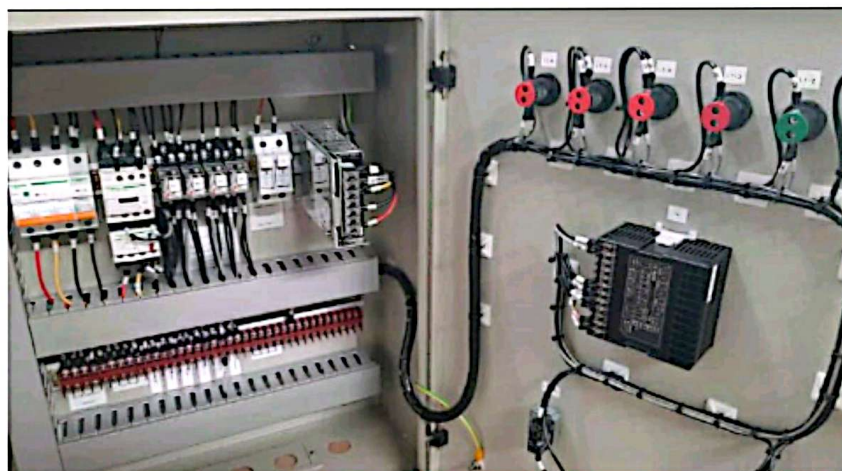


DIKTAT KULIAH

MESIN - MESIN LISTRIK

Ir. Iriandi Ilyas, MT



Mesin-Mesin Listrik

7.1. Transformator Satu Fasa

Tujuan :

- Memahami cara kerja transformator.
- Mampu menggambarkan diagram fasor.
- Mampu melakukan perhitungan-perhitungan pada transformator satu fasa melalui hasil uji beban nol dan uji hubung singkat.

Transformator banyak digunakan dalam teknik elektro. Dalam sistem komunikasi, transformator digunakan pada rentang frekuensi audio sampai frekuensi radio dan video, untuk berbagai keperluan. Kita mengenal misalnya *input transformers*, *interstage transformers*, *output transformers* pada rangkaian radio dan televisi. Transformator juga dimanfaatkan dalam sistem komunikasi untuk penyesuaian impedansi agar tercapai transfer daya maksimum.

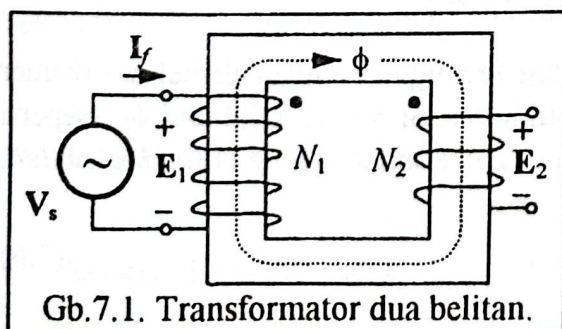
Dalam penyaluran daya listrik banyak digunakan transformator berkapasitas besar dan juga bertegangan tinggi. Dengan transformator tegangan tinggi ini penyaluran daya listrik dapat dilakukan dalam jarak jauh dan susut daya pada jaringan dapat ditekan. Di jaringan distribusi listrik banyak digunakan transformator penurun tegangan, dari tegangan menengah 20 kV menjadi 380 V untuk distribusi ke rumah-rumah dan kantor-kantor pada tegangan 220 V. Transformator daya tersebut pada umumnya merupakan transformator tiga fasa. Dalam pembahasan ini kita akan melihat transformator satu fasa lebih dulu.

Kita telah mempelajari transformator ideal pada waktu membahas rangkaian listrik. Berikut ini kita akan melihat transformator *tidak ideal* sebagai piranti pemroses daya. Akan tetapi kita hanya akan membahas hal-hal yang fundamental saja, karena transformator akan dipelajari secara lebih mendalam pada pelajaran mengenai mesin-mesin listrik.

Mempelajari perilaku transformator juga merupakan langkah awal untuk mempelajari konversi energi elektromekanik. Walaupun konversi energi elektromekanik membahas konversi energi antara sistem mekanik dan sistem listrik, sedangkan transformator merupakan piranti konversi energi listrik ke listrik, akan tetapi kopling antar sistem dalam kedua hal tersebut pada dasarnya sama yaitu kopling magnetik.

Teori Operasi Transformator. Diagram Fasor

Transformator Dua Belitan Tak Berbeban. Jika pada induktor Gb.10.5. kita tambahkan belitan ke-dua, kita akan memperoleh transformator dua belitan seperti terlihat pada Gb.7.1.



Belitan pertama kita sebut belitan primer dan yang ke-dua kita sebut belitan sekunder. Jika fluksi di rangkaian magnetiknya adalah $\phi = \Phi_{maks} \sin \omega t$, maka fluksi ini akan menginduksikan tegangan di belitan primer sebesar

$$e_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt} = N_1 \Phi_{maks} \omega \cos \omega t \quad (7.1)$$

atau dalam bentuk fasor

$$E_1 = E_1 \angle 0^\circ = \frac{N_1 \omega \Phi_{maks}}{\sqrt{2}} \angle 0^\circ ; \quad E_1 = \text{nilai efektif} \quad (7.2)$$

Karena $\omega = 2\pi f$ maka

$$E_1 = \frac{2\pi f N_1}{\sqrt{2}} \Phi_{maks} = 4.44 f N_1 \Phi_{maks} \quad (7.3)$$

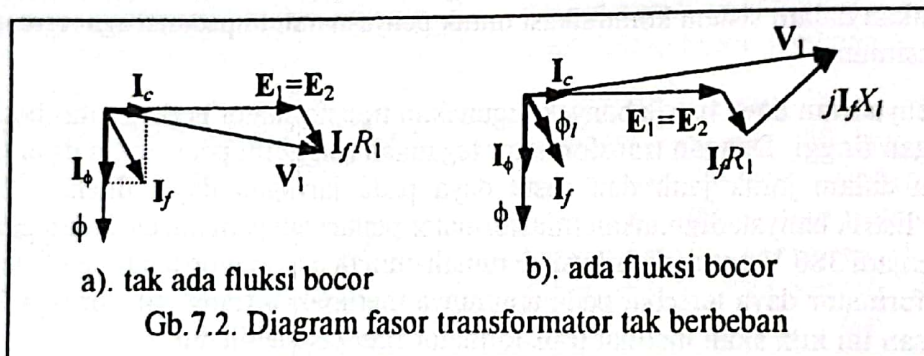
Di belitan sekunder, fluksi tersebut menginduksikan tegangan sebesar

$$E_2 = 4.44 f N_2 \Phi_{maks} \quad (7.4)$$

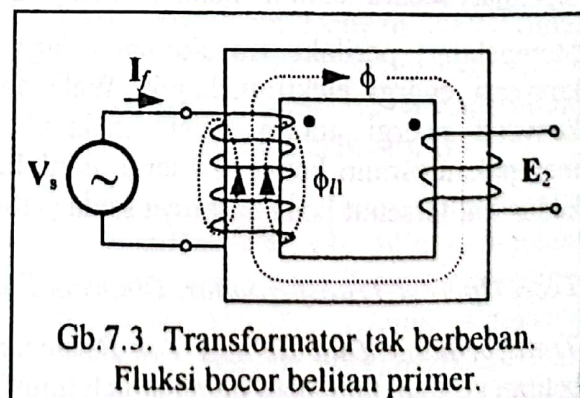
Dari (7.3) dan (7.4) kita peroleh

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \equiv a = \text{rasio transformasi} \quad (7.5)$$

Perhatikanlah bahwa E_1 sefasa dengan E_2 karena dibangkitkan (diinduksikan) oleh fluksi yang sama. Karena E_1 mendahului ϕ dengan sudut 90° maka E_2 juga mendahului ϕ dengan sudut 90° . Jika rasio transformasi $a = 1$, dan resistansi belitan primer adalah R_1 , diagram fasor tegangan dan arus adalah seperti ditunjukkan oleh Gb.7.2.a. Arus I_f adalah arus magnetisasi, yang dapat dipandang sebagai terdiri dari dua komponen yaitu I_ϕ (90° dibelakang E_1) yang menimbulkan ϕ dan I_c (sefasa dengan E_1) yang mengatasi rugi-rugi inti. Resistansi belitan R_1 dalam diagram fasor ini muncul sebagai tegangan jatuh $I_f R_1$.



Fluksi Bocor. Fluksi di belitan primer transformator dibangkitkan oleh arus yang mengalir di belitan primer. Dalam kenyataan, tidak semua fluksi magnet yang dibangkitkan tersebut akan melingkupi baik belitan primer maupun sekunder. Selisih antara fluksi yang dibangkitkan oleh belitan primer dengan fluksi bersama (yaitu fluksi yang melingkupi kedua belitan) disebut fluksi bocor. Fluksi bocor ini hanya melingkupi belitan primer saja dan tidak seluruhnya berada dalam inti transformator tetapi juga melalui udara. (Lihat Gb.7.3). Oleh karena itu reluktansi yang dihadapi oleh fluksi bocor ini praktis adalah reluktansi udara. Dengan demikian fluksi bocor tidak mengalami gejala histerisis sehingga fluksi ini sefasa dengan arus magnetisasi. Hal ini ditunjukkan dalam diagram fasor Gb.7.2.b.



Fluksi bocor, secara tersendiri akan membangkitkan tegangan induksi di belitan primer (seperti halnya ϕ menginduksikan E_1). Tegangan induksi ini 90° mendahului ϕ_{11} (seperti halnya E_1 90° mendahului ϕ) dan dapat dinyatakan sebagai suatu tegangan jatuh ekuivalen, E_{11} , di rangkaian primer dan dinyatakan sebagai

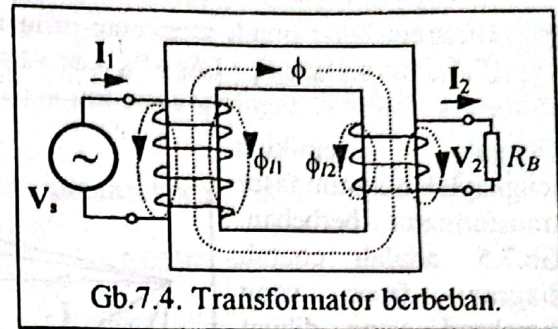
$$E_{11} = j I_f X_1 \quad (7.6)$$

dengan X_1 disebut *reaktansi bocor* rangkaian primer. Hubungan tegangan dan arus di rangkaian primer menjadi

$$V_1 = E_1 + I_1 R_1 + E_{11} = E_1 + I_1 R_1 + j I_1 X_1 \quad (7.7)$$

Diagram fasor dengan memperhitungkan adanya fluksi bocor ini adalah Gb.7.4.b.

Transformator Berbeban. Rangkaian transformator berbeban resistif, R_B , diperlihatkan oleh Gb.7.4. Tegangan induksi E_2 (yang telah timbul dalam keadaan transformator tidak berbeban) akan menjadi sumber di rangkaian sekunder dan memberikan arus sekunder I_2 . Arus I_2 ini membangkitkan fluksi yang berlawanan arah dengan fluksi bersama ϕ dan sebagian akan bocor (kita sebut *fluksi bocor sekunder*).



Fluksi bocor ini, ϕ_{12} , sefasa dengan I_2 dan menginduksikan tegangan E_{12} di belitan sekunder yang 90° mendahului ϕ_{12} . Seperti halnya untuk belitan primer, tegangan E_{12} ini diganti dengan suatu besaran ekuivalen yaitu *tegangan jatuh ekuivalen* pada *reaktansi bocor sekunder* X_2 di rangkaian sekunder. Jika resistansi belitan sekunder adalah R_2 , maka untuk rangkaian sekunder kita peroleh hubungan

$$E_2 = V_2 + I_2 R_2 + E_{12} = V_2 + I_2 R_2 + j I_2 X_2 \quad (7.8)$$

dengan V_2 adalah tegangan pada beban R_B .

Sesuai dengan hukum Lenz, arus sekunder membangkitkan fluksi yang melawan fluksi bersama. Oleh karena itu fluksi bersama akan cenderung mengecil. Hal ini akan menyebabkan tegangan induksi di belitan primer juga cenderung mengecil. Akan tetapi karena belitan primer terhubung ke sumber yang tegangannya tak berubah, maka arus primer akan naik. Jadi arus primer yang dalam keadaan transformator tidak berbeban hanyalah arus magnetisasi I_f , bertambah menjadi I_1 setelah transformator berbeban. Pertambahan arus ini haruslah sedemikian rupa sehingga fluksi bersama ϕ dipertahankan besarnya dan E_1 juga tetap seperti semula. Dengan demikian maka persamaan rangkaian primer (7.7) tetap terpenuhi.

Pertambahan arus primer dari I_f menjadi I_1 adalah untuk mengimbangi fluksi lawan yang dibangkitkan oleh I_2 sehingga ϕ dipertahankan. Jadi haruslah

$$N_1(I_1 - I_f) - N_2(I_2) = 0 \quad (7.9)$$

Pertambahan arus primer ($I_1 - I_f$) disebut arus penyeimbang yang akan mempertahankan ϕ . Makin besar arus sekunder, makin besar pula arus penyeimbang yang diperlukan yang berarti makin besar pula arus primer. Dengan cara inilah terjadinya transfer daya dari primer ke sekunder. Dari (7.9) kita peroleh arus magnetisasi

$$I_f = I_1 - \frac{N_2}{N_1}(I_2) = I_1 - \frac{I_2}{a} \quad (7.10)$$

Diagram Fasor. Dengan persamaan (7.7) dan (7.8) kita dapat menggambarkan secara lengkap diagram fasor dari suatu transformator. Penggambaran kita mulai dari belitan sekunder dengan langkah-langkah:

- Gambarkan V_2 dan I_2 . Untuk beban resistif, I_2 sefasa dengan V_2 . Selain itu kita dapat gambarkan $I'_2 = I_2/a$ yaitu besarnya arus sekunder jika dilihat dari sisi primer.
- Dari V_2 dan I_2 kita dapat menggambarkan E_2 sesuai dengan persamaan (7.8) yaitu

$$E_2 = V_2 + I_2 R_2 + E_{12} = V_2 + I_2 R_2 + j I_2 X_2$$

Sampai di sini kita telah menggambarkan diagram fasor rangkaian sekunder.

- Dengan demikian lengkaplah diagram fasor transformator berbeban. Gb.7.5. adalah contoh diagram fasor yang dimaksud, yang dibuat dengan mengambil rasio transformasi

Gb.7.5. Diagram fasor lengkap, transformator berbeban resistif . $a > 1$

Penyelesaian :

$$\Phi_m = \frac{E_1 \sqrt{2}}{N_1 \omega} = \frac{V_1 \sqrt{2}}{N_1 \omega} = \frac{220 \sqrt{2}}{160 \omega}$$
$$\Phi'_m = \frac{V'_1 \sqrt{2}}{N_1 \omega} = \frac{110 \sqrt{2}}{160 \omega}$$
$$\Phi_m'' = \frac{V_1''\sqrt{2}}{(1/2)N_1\omega} = \frac{55\sqrt{2}}{80\omega} = \frac{110\sqrt{2}}{160\omega}$$
$$\Phi_m = \frac{V_1'' \sqrt{2}}{(1/2)N_1\omega} = \frac{110\sqrt{2}}{80\omega} = \frac{220\sqrt{2}}{160\omega}$$

d). Dengan $N_1/N_2 = 160/40 = 4$ maka jika tegangan primer 220 V, tegangan sekunder adalah 55 V. Jika tegangan primer 110 V, tegangan sekundernya 27.5 V. Jika

tegangan 55 V diterapkan pada setengah belitan primer, tegangan sekunder adalah 27.5 V. Jika tegangan 110 V diterapkan pada setengah belitan primer, tegangan sekunder adalah 55 V.

CONTOH 7.2 : Sebuah transformator satu fasa mempunyai belitan primer dengan 400 lilitan dan belitan sekunder 1000 lilitan. Luas penampang inti efektif adalah 60 cm^2 . Jika belitan primer dihubungkan ke sumber 500 V (rms) yang frekuensinya 50 Hz, tentukanlah kerapatan fluksi maksimum dalam inti serta tegangan di belitan sekunder.
Penyelesaian :

Dengan mengabaikan resistansi belitan dan reaktansi bocor, maka

$$V_1 = \frac{N_1 \omega \Phi_m}{\sqrt{2}} = 500 \rightarrow \Phi_m = \frac{500\sqrt{2}}{400 \times 2\pi \times 50} = 0.00563 \text{ weber}$$

$$\rightarrow \text{Kerapatan fluksi maksimum : } B_m = \frac{0.00563}{0.006} = 0.94 \text{ weber/m}^2$$

$$\text{Tegangan belitan sekunder adalah } V_2 = \frac{1000}{400} \times 500 = 1250 \text{ V}$$

CONTOH 7.3 : Dari sebuah transformator satu fasa diinginkan suatu perbandingan tegangan primer / sekunder dalam keadaan tidak berbeban 6000/250 V. Jika frekuensi kerja adalah 50 Hz dan fluksi dalam inti transformator dibatasi sekitar 0.06 weber, tentukan jumlah lilitan primer dan sekunder.

Penyelesaian :

Pembatasan fluksi di sini adalah fluksi maksimum. Dengan mengabaikan resistansi belitan dan reaktansi bocor,

$$V_1 = \frac{N_1 \omega \Phi_m}{\sqrt{2}} = 6000 \rightarrow N_1 = \frac{6000\sqrt{2}}{2\pi \times 50 \times 0.06} = 450 \Rightarrow N_2 = \frac{250}{6000} \times 450 = 18.75$$

Pembulatan jumlah lilitan harus dilakukan. Dengan melakukan pembulatan ke atas, batas fluksi maksimum Φ_m tidak akan terlampaui. Jadi dapat kita tetapkan

$$\Rightarrow N_2 = 20 \text{ lilitan} \quad \Rightarrow N_1 = \frac{6000}{250} \times 20 = 480 \text{ lilitan}$$

Rangkaian Ekuivalen

Transformator adalah piranti listrik. Dalam analisis, piranti-piranti listrik biasanya dimodelkan dengan suatu rangkaian listrik ekuivalen yang sesuai. Secara umum, rangkaian ekuivalen hanyalah penafsiran secara rangkaian listrik dari suatu persamaan matematik yang menggambarkan perilaku suatu piranti. Untuk transformator, ada tiga persamaan yang menggambarkan perilakunya, yaitu persamaan (7.7), (7.8), dan (7.10), yang kita tulis lagi sebagai satu set persamaan (7.11).

$$V_1 = E_1 + I_1 R_1 + jI_1 X_1 ; E_2 = V_2 + I_2 R_2 + jI_2 X_2 ; I_1 = I_f + I_2' \text{ dengan } I_2' = \frac{N_2}{N_1} I_2 = \frac{I_2}{a} \quad (7.11)$$

Dengan hubungan $E_1 = aE_2$ dan $I_2' = I_2/a$ maka persamaan ke-dua dari (7.11) dapat ditulis sebagai

$$\frac{E_1}{a} = V_2 + aI_2' R_2 + jaI_2' X_2 \Rightarrow E_1 = aV_2 + I_2'(a^2 R_2) + jI_2'(a^2 X_2) \quad (7.12)$$

$$= V_2' + I_2' R_2' + jI_2' X_2'$$

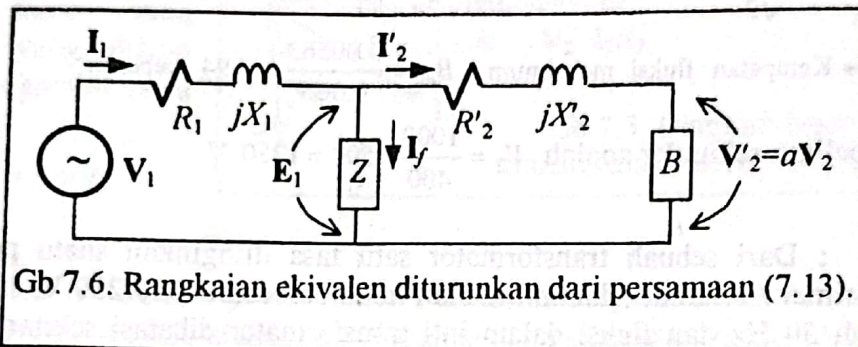
$$\text{dengan } V_2' = aV_2 ; R_2' = a^2 R_2 ; X_2' = a^2 X_2$$

Dengan (7.12) maka (7.11) menjadi

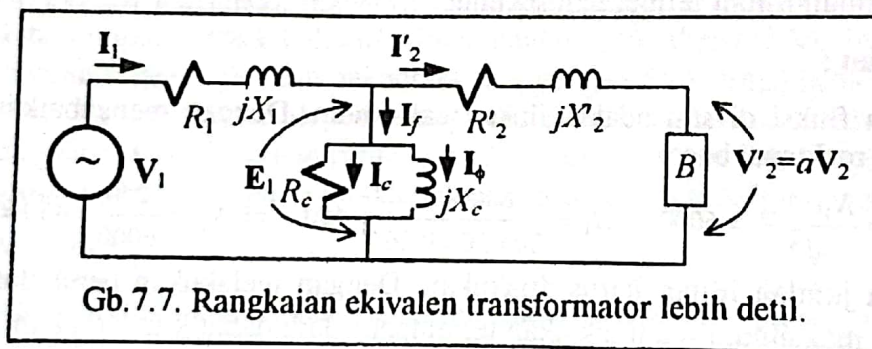
$$V_1 = E_1 + I_1 R_1 + j I_1 X_1 \quad ; \quad E_1 = a V_2 + I_2' R_2' + j I_2' X_2' \quad ; \quad I_1 = I_f + I_2' \quad (7.13)$$

I_2' , R_2' , dan X_2' adalah arus, resistansi, dan reaktansi sekunder yang dilihat oleh sisi primer. Dari persamaan (7.13) dibangunlah rangkaian ekuivalen transformator seperti Gb.7.6. berikut ini.

Pada diagram fasor Gb.7.5. kita lihat bahwa arus magnetisasi dapat dipandang sebagai terdiri dari dua komponen, yaitu I_c dan I_ϕ . I_c sefasa dengan E_1 sedangkan I_ϕ 90° dibelakang E_1 . Dengan demikian maka impedansi Z pada rangkaian ekuivalen Gb.7.6. dapat dinyatakan sebagai hubungan paralel antara suatu resistansi R_c dan impedansi induktif jX_ϕ sehingga rangkaian ekuivalen transformator secara lebih detil menjadi seperti Gb.7.7.

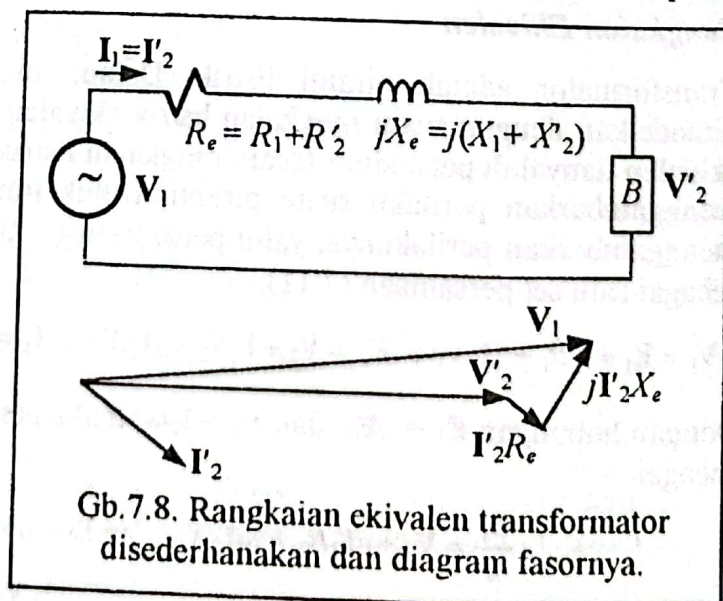


Gb.7.6. Rangkaian ekuivalen diturunkan dari persamaan (7.13).



Gb.7.7. Rangkaian ekuivalen transformator lebih detil.

Rangkaian Ekuivalen Yang Disederhanakan. Pada transformator yang digunakan pada tegangan bolak-balik yang konstan dengan frekuensi yang konstan pula (seperti misalnya transformator pada sistem tenaga listrik), besarnya arus magnetisasi hanya sekitar 2 sampai 5 persen dari arus beban penuh transformator. Keadaan ini bisa dicapai karena inti transformator dibangun dari material dengan permeabilitas magnetik yang tinggi. Oleh karena itu, jika I_f diabaikan terhadap I_1 kesalahan yang terjadi dapat dianggap cukup kecil. Pengabaian ini akan membuat rangkaian ekuivalen menjadi lebih sederhana seperti Gb.7.8.



Gb.7.8. Rangkaian ekuivalen transformator disederhanakan dan diagram fasornya.

Impedansi Masukan. Resistansi beban B adalah $R_B = V_2/I_2$. Dilihat dari sisi primer resistansi tersebut menjadi

$$R'_B = \frac{V'_2}{I'_2} = \frac{aV_2}{I_2/a} = a^2 \frac{V_2}{I_2} = a^2 R_B \quad (7.14)$$

Dengan melihat rangkaian ekivalen yang disederhanakan Gb.7.10, impedansi masukan adalah

$$Z_{in} = \frac{V_1}{I_1} = R_e + a^2 R_B + jX_e \quad (7.15)$$

Penentuan Parameter Transformator

Dari rangkaian ekivalen lengkap Gb.7.7. terlihat ada enam parameter transformator yang harus ditentukan, R_1 , X_1 , R'_2 , X'_2 , R_c , dan X_ϕ . Resistansi belitan primer dan sekunder dapat diukur langsung. Salah satu metoda pengukuran metoda *jembatan*. Untuk menentukan empat parameter yang lain kita memerlukan metoda khusus seperti diuraikan berikut ini.

Uji Tak Berbeban (Uji Beban Nol). Uji beban nol ini biasanya dilakukan pada sisi tegangan rendah karena catu tegangan rendah maupun alat-alat ukur tegangan rendah lebih mudah diperoleh. Sisi tegangan rendah menjadi sisi masukan yang dihubungkan ke sumber tegangan sedangkan sisi tegangan tinggi terbuka. Pada belitan tegangan rendah dilakukan pengukuran tegangan masukan V_r , arus masukan I_r , dan daya (aktif) masukan P_r . Karena sisi primer terbuka, I_r adalah arus magnetisasi yang cukup kecil sehingga kita dapat melakukan dua pendekatan. Pendekatan yang pertama adalah mengabaikan tegangan jatuh di reaktansi bocor sehingga V_r sama dengan tegangan induksi E_r . Pendekatan yang kedua adalah mengabaikan kehilangan daya di resistansi belitan sehingga P_r menunjukkan kehilangan daya pada R_{cr} (R_c dilihat dari sisi tegangan rendah) saja.

$$\begin{aligned} \text{Daya kompleks masukan: } |S_r| &= V_r I_r \quad ; \quad \cos \theta = \frac{P_r}{|S_r|} = \frac{P_r}{V_r I_r} \rightarrow \sin \theta = \frac{\sqrt{|S_r|^2 - P_r^2}}{|S_r|} \\ \Rightarrow I_{cr} &= I_r \cos \theta \quad ; \quad I_{\phi r} = I_r \sin \theta \\ \Rightarrow R_{cr} &= \frac{V_r}{I_{cr}} = \frac{V_r}{I_r \cos \theta} \quad ; \quad X_{\phi r} = \frac{V_r}{I_{\phi r}} = \frac{V_r}{I_r \sin \theta} \end{aligned} \quad (7.16)$$

Uji Hubung Singkat. Uji hubung singkat dilakukan di sisi tegangan tinggi dengan sisi tegangan rendah dihubungkan-singkat. Sisi tegangan tinggi menjadi sisi masukan yang dihubungkan dengan sumber tegangan. Tegangan masukan harus cukup rendah agar arus di sisi tegangan rendah masih dalam batas nominalnya. Pengukuran di belitan tegangan tinggi dilakukan seperti halnya pada uji beban nol, yaitu tegangan masukan V_t , arus masukan I_t , dan daya (aktif) masukan P_t . Tegangan masukan yang dibuat kecil mengakibatkan rugi-rugi inti menjadi kecil sehingga kita dapat membuat pendekatan dengan mengabaikan rugi-rugi inti. Dengan demikian kita dapat menggunakan rangkaian ekivalen yang disederhanakan Gb.7.9. Daya P_t dapat dianggap sebagai daya untuk mengatasi rugi-rugi tembaga saja, yaitu rugi-rugi pada resistansi ekivalen yang dilihat dari sisi tegangan tinggi R_{et} .

$$P_t = I_t^2 R_{et} \rightarrow R_{et} = \frac{P_t}{I_t^2} \quad ; \quad V_t = I_t |Z_{et}| \rightarrow |Z_{et}| = \frac{V_t}{I_t} \rightarrow X_e = \sqrt{Z_{et}^2 - R_{et}^2} \quad (7.17)$$

Dalam perhitungan ini kita memperoleh nilai $R_{et} = R_1 + R'_2$. Nilai resistansi masing-masing belitan dapat diperoleh dengan pengukuran terpisah sebagaimana telah disebutkan di atas.

Untuk reaktansi, kita memperoleh nilai $X_{et} = X_1 + X'_2$. Kita tidak dapat memperoleh informasi untuk menentukan reaktansi masing-masing belitan. Jika sekiranya nilai reaktansi masing-masing belitan diperlukan kita dapat mengambil asumsi bahwa $X_1 = X'_2$. Kondisi ini sesungguhnya benar adanya jika transformator dirancang dengan baik.

CONTOH 7.5 : Pada sebuah transformator 25 KVA, 2400/240 volt, 50 Hz, dilakukan uji beban nol dan uji hubung singkat.

Uji beban nol pada sisi tegangan rendah memberikan hasil

$$V_r = 240 \text{ volt}, I_r = 1.6 \text{ amper}, P_r = 114 \text{ watt}$$

Uji hubung singkat yang dilakukan dengan menghubungkan-singkat belitan tegangan rendah memberikan hasil pengukuran di sisi tegangan tinggi

$$V_t = 55 \text{ volt}, I_t = 10.4 \text{ amper}, P_t = 360 \text{ watt}$$

a). Tentukanlah parameter transformator dilihat dari sisi tegangan tinggi. b). Berapakah rugi-rugi inti dan rugi-rugi tembaga pada beban penuh ?

Penyelesaian :

a). Uji beban nol dilakukan di sisi tegangan rendah. Jadi nilai R_c dan X_ϕ yang akan diperoleh dari hasil uji ini adalah dilihat dari tegangan rendah, kita sebut R_{cr} dan $X_{\phi r}$.

$$\cos \theta = \frac{P}{VI} = \frac{114}{240 \times 1.6} = 0.3 \quad ; \quad \sin \theta = \frac{\sqrt{(240 \times 1.6)^2 - 114^2}}{240 \times 1.6} = 0.95$$

$$R_{cr} = \frac{V}{I_c} = \frac{240}{1.6 \cos \theta} = \frac{240}{1.6 \times 0.3} = 500 \Omega \quad ; \quad X_{\phi r} = \frac{V}{I_\phi} = \frac{240}{1.6 \times 0.95} = 158 \Omega$$

Jika dilihat dari sisi tegangan tinggi :

$$R_{ct} = a^2 R_{cr} = \left(\frac{2400}{240} \right)^2 \times 500 = 50 \text{ k}\Omega \quad ; \quad X_{\phi t} = a^2 X_{\phi r} = 15.8 \text{ k}\Omega$$

Resistansi ekivalen dan reaktansi bocor ekivalen diperoleh dari uji hubung singkat. Uji hubung singkat yang dilakukan di sisi tegangan tinggi ini memberikan

$$R_{et} = \frac{P_t}{I_t^2} = \frac{360}{(10.4)^2} = 3.33 \Omega \quad ;$$

$$|Z_{et}| = \frac{V_t}{I_t} = \frac{55}{10.4} = 5.29 \Omega \quad \rightarrow \quad X_{et} = \sqrt{5.29^2 - 3.33^2} = 4.1 \Omega$$

b). Pada pembebanan penuh fluksi bersama dalam inti transformator hampir sama dengan fluksi dalam keadaan beban nol. Jadi rugi-rugi inti pada pembebanan penuh adalah 114 Watt. Rugi-rugi tembaga tergantung dari besarnya arus. Besarnya arus primer pada beban penuh adalah sama dengan arus sisi tegangan tinggi pada percobaan hubung singkat, yaitu

$$I_1 = \frac{|S|}{V_1} = \frac{25000}{2400} = 10.4 \text{ A} \quad \rightarrow \quad P_{cu} = I_1^2 R_{et} = (10.4)^2 \times 3.33 = 360 \text{ W}$$

Karena pada uji hubung singkat arus sisi tegangan tinggi dibuat sama dengan arus beban penuh, maka rugi-rugi tembaga adalah penunjukan wattmeter pada uji hubung singkat.

Efisiensi dan Regulasi Tegangan.

Efisiensi suatu piranti didefinisikan sebagai

$$\eta = \frac{\text{daya keluaran [watt]}}{\text{daya masukan [watt]}} \quad (7.18)$$

Karena daya keluaran sama dengan daya masukan dikurangi rugi-rugi daya, maka efisiensi dapat dinyatakan sebagai

$$\eta = 1 - \frac{\text{rugi-rugi daya [watt]}}{\text{daya masukan [watt]}} \quad (7.19)$$

Formulasi (7.19) ini lebih sering digunakan. Untuk transformator rugi-rugi daya dapat segera diperoleh melalui uji beban nol dan uji hubung singkat, yaitu jumlah rugi inti dan rugi tembaga.

Regulasi tegangan transformator didefinisikan sebagai perubahan besarnya tegangan sekunder bila arus berubah dari beban penuh ke beban nol dengan tegangan primer dijaga tetap. Jadi

$$\text{Regulasi Tegangan} = \frac{V_2 \text{ beban nol} - V_2 \text{ beban penuh}}{V_2 \text{ beban penuh}} = \frac{|V_1/a| - |V_2|}{|V_2|} = \frac{|V_1| - |aV_2|}{|aV_2|} = \frac{|V_1| - |V_2'|}{|V_2'|} \quad (7.25)$$

Dengan memperhatikan diagram fasor Gb.7.9. maka (7.25) menjadi

$$\text{Regulasi Tegangan} = \frac{|V_2' + I_2'(R_e + jX_e)| - |V_2'|}{|V_2'|} \quad (7.26)$$

CONTOH 7.6 : Transformator pada contoh 7.5. mencatu beban 25 KVA pada faktor daya 0.8. a). Hitunglah efisiensinya. b). Hitunglah regulasi tegangannya.

Penyelesaian :

a). Total rugi daya : $P_{c+cu} = 114 + 360 = 474 \text{ W} = 0.474 \text{ KW}$

Daya keluaran : $P_o = 25000 \times 0.8 = 20 \text{ KW}$

Efisiensi : $\eta = 1 - \frac{0.474}{20} = 0.976 \text{ atau } 97.6 \%$

b). Mengambil V_2 sebagai referensi : $V_2' = 10 \times 240 = 2400 \angle 0^\circ \text{ V}$.

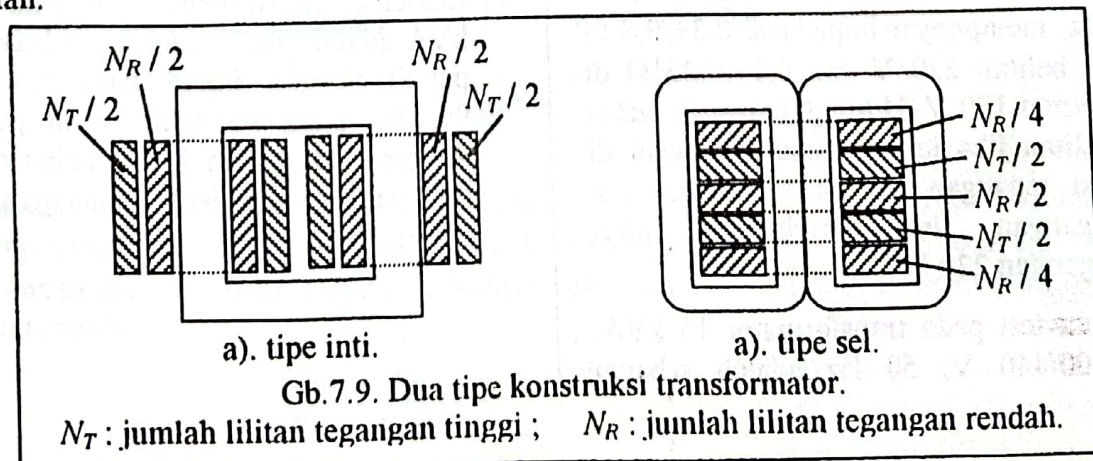
$I_2' = I_2 / a = (25000 / 240) / 10 \angle -\cos^{-1} 0.8 = 10.4 \angle -36.8^\circ$

Reg. Tegangan = $\frac{|2400 \angle 0^\circ + 10.4 \angle -36.8^\circ (3.33 + j4.1)| - 2400}{2400} = 0.022 \text{ atau } 2.2 \%$

Konstruksi Transformator

Dalam pembahasan transformator, kita melihat transformator dengan satu inti dua belitan. Belitan primer digulung pada salah satu kaki inti dan belitan sekunder digulung pada kaki inti yang lain. Dalam kenyataan tidaklah demikian. Untuk mengurangi fluksi bocor, belitan primer dan sekunder masing-masing dibagi menjadi dua bagian dan digulung di setiap kaki inti. Belitan primer dan sekunder digulung secara *konsentris* dengan belitan sekunder berada di dalam belitan primer. Dengan cara ini fluksi bocor dapat ditekan sampai hanya beberapa persen dari fluksi bersama. Pembagian belitan seperti ini masih mungkin dilanjutkan untuk lebih menekan fluksi bocor, dengan biaya yang sudah barang tentu lebih tinggi.

Dua tipe konstruksi yang biasa digunakan pada transformator satu fasa adalah *core type* (*tipe inti*) dan *shell type* (*tipe sel*). Gb.7.9.a. memperlihatkan konstruksi tipe inti dengan belitan primer dan sekunder yang terbagi dua. Belitan tegangan rendah digulung dekat dengan inti yang kemudian dilingkupi oleh belitan tegangan tinggi. Konstruksi ini sesuai untuk tegangan tinggi karena masalah isolasi lebih mudah ditangani. Gb.7.9.b. memperlihatkan konstruksi tipe sel. Konstruksi ini sesuai untuk transformator daya dengan arus besar. Inti pada konstruksi ini memberikan perlindungan mekanis lebih baik pada belitan.



7.2. Transformator Pada Sistem Tiga Fasa.

Tujuan :

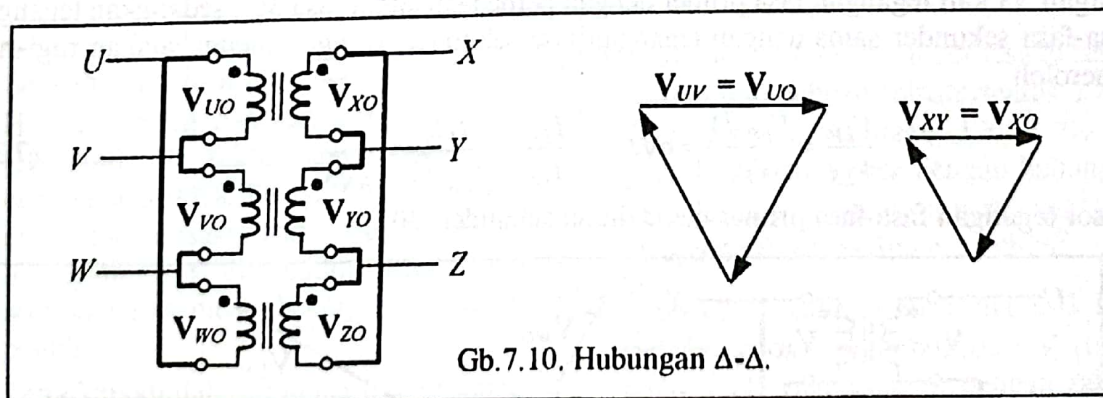
- Memahami berbagai hubungan transformator untuk sistem tiga fasa.
- Mampu melakukan perhitungan-perhitungan tegangan pada berbagai hubungan transformator tiga fasa.

Pada sistem tiga fasa, penaikan dan penurunan tegangan dapat dilakukan dengan dua cara yaitu : (a) menggunakan tiga unit transformator satu fasa, (b) menggunakan satu unit transformator tiga fasa.

Transformator tiga fasa mempunyai inti dengan tiga kaki dan setiap kaki mendukung belitan primer dan sekunder. Untuk penyaluran daya yang sama, penggunaan satu unit transformator tiga fasa akan lebih ringan, lebih murah dan lebih efisien dibandingkan dengan tiga unit transformator satu fasa. Akan tetapi penggunaan tiga unit transformator satu fasa juga mempunyai beberapa kelebihan dibandingkan dengan satu unit transformator tiga fasa. Misalnya biaya awal yang lebih rendah, jika untuk sementara beban dapat dilayani dengan dua unit saja dan unit ketiga ditambahkan jika penambahan beban telah terjadi. Terjadinya kerusakan pada salah satu unit tidak mengharuskan pemutusan seluruh penyaluran daya. Pemilihan cara mana yang lebih baik, tergantung dari berbagai pertimbangan keadaan-khusus. Pada dasarnya kedua cara adalah sama. Berikut ini kita akan melihat hubungan primer-sekunder transformator, dengan melihat pelayanan sistem tiga fasa melalui tiga unit transformator satu fasa.

Hubungan Δ - Δ . Pada waktu menghubungkan tiga transformator satu fasa untuk melayani sistem tiga fasa, hubungan sekunder harus diperhatikan agar sistem tetap seimbang. Diagram hubungan ini diperlihatkan pada Gb.7.10. Fasa primer disebut dengan fasa U-V-W sedangkan fasa sekunder disebut fasa X-Y-Z. Fasor tegangan fasa primer kita sebut V_{UO} , V_{VO} , V_{WO} dengan nilai V_{FP} , dan tegangan fasa sekunder kita sebut V_{XO} , V_{YO} , V_{ZO} dengan nilai V_{FS} . Nilai tegangan saluran (tegangan fasa-fasa) primer dan sekunder kita sebut V_{LP} dan V_{LS} . Nilai arus saluran primer dan sekunder masing-masing kita sebut I_{LP} dan I_{LS} sedang nilai arus fasanya I_{FP} dan I_{FS} . Rasio tegangan fasa primer terhadap sekunder $V_{FP}/V_{FS} = a$. Dengan mengabaikan rugi-rugi untuk hubungan Δ - Δ kita peroleh :

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{V_{FP}}{V_{FS}} = a ; \quad \frac{I_{LP}}{I_{LS}} = \frac{I_{FP}\sqrt{3}}{I_{FS}\sqrt{3}} = \frac{1}{a} \quad (7.27)$$



Hubungan Δ -Y. Hubungan ini diperlihatkan pada Gb.7.12. Tegangan fasa-fasa primer sama dengan tegangan fasa primer, sedangkan tegangan fasa-fasa sekunder sama dengan $\sqrt{3}$ kali tegangan fasa sekunder dengan perbedaan sudut fasa 30° . Dengan mengabaikan rugi-rugi kita peroleh

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}\sqrt{3}} = \frac{V_{FP}}{V_{FS}} = \frac{a}{\sqrt{3}} ; \quad \frac{I_{LP}}{I_{LS}} = \frac{I_{FP}\sqrt{3}}{I_{FS}} = \frac{\sqrt{3}}{a} \quad (7.28)$$

Fasor tegangan fasa-fasa sekunder mendahului primer 30° .

7.2. Transformator Pada Sistem Tiga Fasa.

Tujuan :

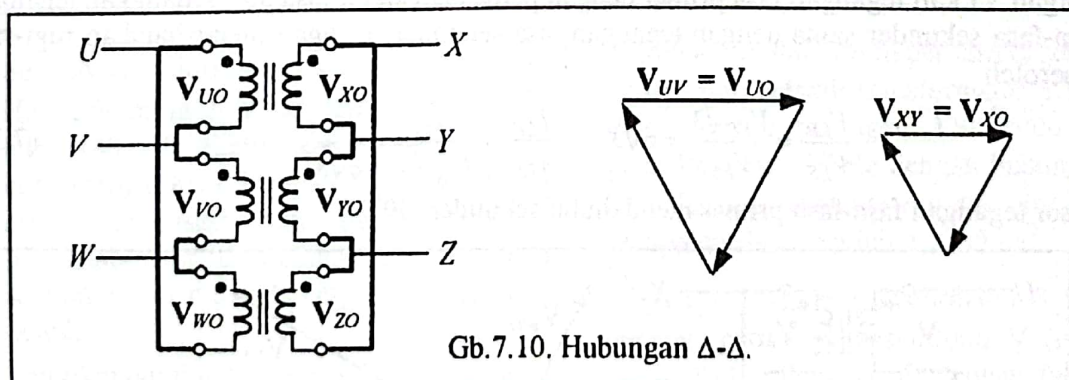
- Memahami berbagai hubungan transformator untuk sistem tiga fasa.
- Mampu melakukan perhitungan-perhitungan tegangan pada berbagai hubungan transformator tiga fasa.

Pada sistem tiga fasa, penaikan dan penurunan tegangan dapat dilakukan dengan dua cara yaitu : (a) menggunakan tiga unit transformator satu fasa, (b) menggunakan satu unit transformator tiga fasa.

Transformator tiga fasa mempunyai inti dengan tiga kaki dan setiap kaki mendukung belitan primer dan sekunder. Untuk penyaluran daya yang sama, penggunaan satu unit transformator tiga fasa akan lebih ringan, lebih murah dan lebih efisien dibandingkan dengan tiga unit transformator satu fasa. Akan tetapi penggunaan tiga unit transformator satu fasa juga mempunyai beberapa kelebihan dibandingkan dengan satu unit transformator tiga fasa. Misalnya biaya awal yang lebih rendah, jika untuk sementara beban dapat dilayani dengan dua unit saja dan unit ketiga ditambahkan jika penambahan beban telah terjadi. Terjadinya kerusakan pada salah satu unit tidak mengharuskan pemutusan seluruh penyaluran daya. Pemilihan cara mana yang lebih baik, tergantung dari berbagai pertimbangan keadaan-khusus. Pada dasarnya kedua cara adalah sama. Berikut ini kita akan melihat hubungan primer-sekunder transformator, dengan melihat pelayanan sistem tiga fasa melalui tiga unit transformator satu fasa.

Hubungan Δ - Δ . Pada waktu menghubungkan tiga transformator satu fasa untuk melayani sistem tiga fasa, hubungan sekunder harus diperhatikan agar sistem tetap seimbang. Diagram hubungan ini diperlihatkan pada Gb.7.10. Fasa primer disebut dengan fasa U - V - W sedangkan fasa sekunder disebut fasa X - Y - Z . Fasor tegangan fasa primer kita sebut V_{UO} , V_{VO} , V_{WO} dengan nilai V_{FP} , dan tegangan fasa sekunder kita sebut V_{XO} , V_{YO} , V_{ZO} dengan nilai V_{FS} . Nilai tegangan saluran (tegangan fasa-fasa) primer dan sekunder kita sebut V_{LP} dan V_{LS} . Nilai arus saluran primer dan sekunder masing-masing kita sebut I_{LP} dan I_{LS} sedang nilai arus fasanya I_{FP} dan I_{FS} . Rasio tegangan fasa primer terhadap sekunder $V_{FP}/V_{FS} = a$. Dengan mengabaikan rugi-rugi untuk hubungan Δ - Δ kita peroleh :

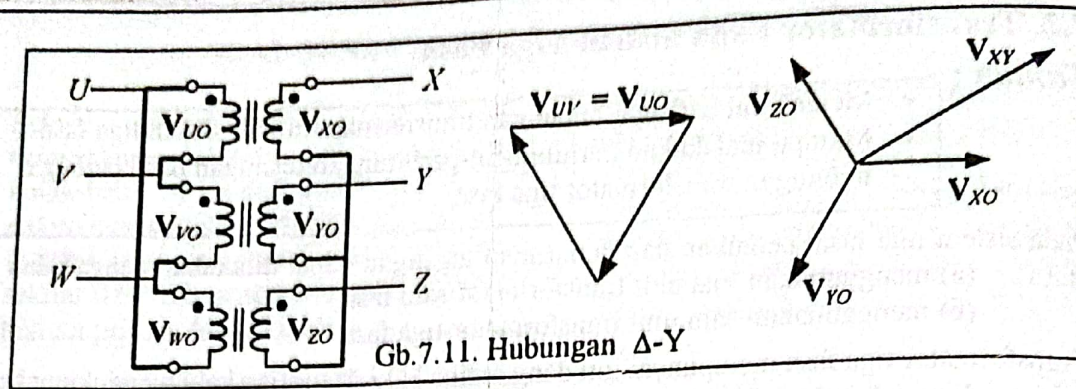
$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{V_{FP}}{V_{FS}} = a ; \quad \frac{I_{LP}}{I_{LS}} = \frac{I_{FP}\sqrt{3}}{I_{FS}\sqrt{3}} = \frac{1}{a} \quad (7.27)$$



Hubungan Δ - Y . Hubungan ini diperlihatkan pada Gb.7.12. Tegangan fasa-fasa primer sama dengan tegangan fasa primer, sedangkan tegangan fasa-fasa sekunder sama dengan $\sqrt{3}$ kali tegangan fasa sekunder dengan perbedaan sudut fasa 30° . Dengan mengabaikan rugi-rugi kita peroleh

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{V_{FP}}{V_{FS}\sqrt{3}} = \frac{a}{\sqrt{3}} ; \quad \frac{I_{LP}}{I_{LS}} = \frac{I_{FP}\sqrt{3}}{I_{FS}} = \frac{\sqrt{3}}{a} \quad (7.28)$$

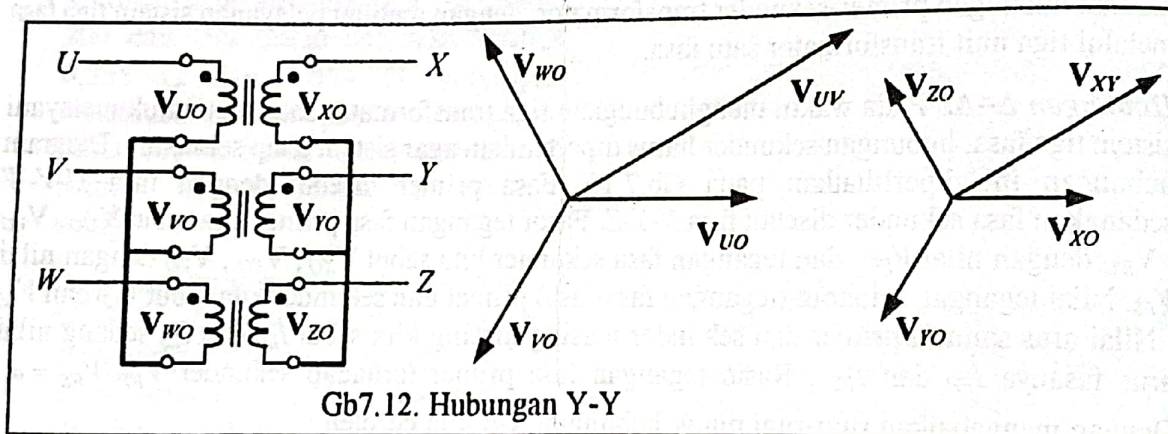
Fasor tegangan fasa-fasa sekunder mendahului primer 30° .



Hubungan Y-Y. Hubungan ini diperlihatkan pada Gb.7.12. Tegangan fasa-fasa primer sama dengan $\sqrt{3}$ kali tegangan fasa primer dengan perbedaan sudut fasa 30° , tegangan fasa-fasa sekunder sama dengan $\sqrt{3}$ kali tegangan fasa sekunder dengan perbedaan sudut fasa 30° . Perbandingan tegangan fasa-fasa primer dan sekunder adalah

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{V_{FP}\sqrt{3}}{V_{FS}\sqrt{3}} = a ; \frac{I_{LP}}{I_{LS}} = \frac{I_{FP}}{I_{FS}} = \frac{1}{a} \quad (7.29)$$

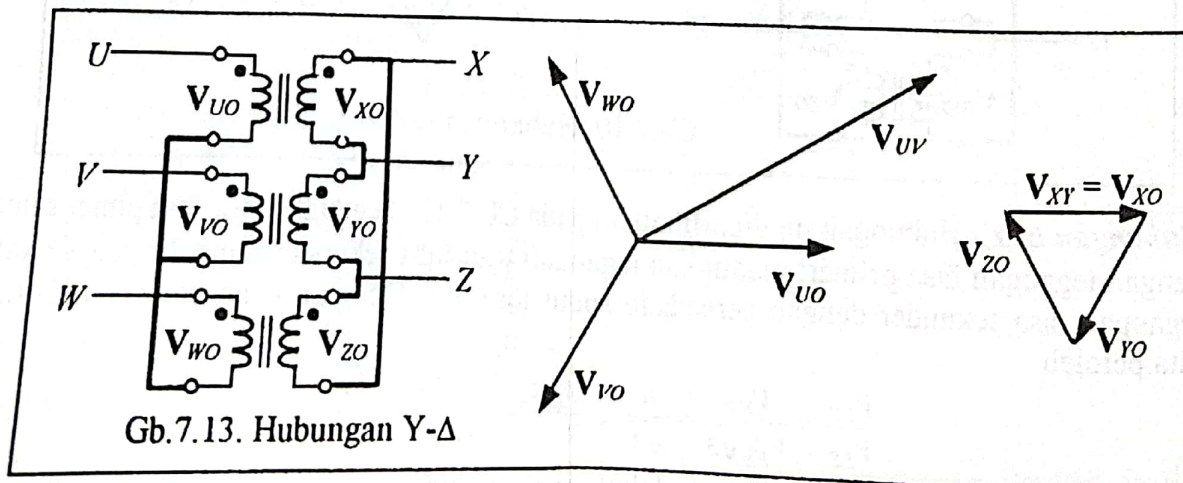
Antara fasor tegangan fasa-fasa primer dan sekunder tidak terdapat perbedaan sudut fasa.



Hubungan Y-Δ. Hubungan ini terlihat pada Gb.7.13. Tegangan fasa-fasa primer sama dengan $\sqrt{3}$ kali tegangan fasa primer dengan perbedaan sudut fasa 30° , sedangkan tegangan fasa-fasa sekunder sama dengan tegangan fasa sekunder. Dengan mengabaikan rugi-rugi diperoleh

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{V_{FP}\sqrt{3}}{V_{FS}} = a\sqrt{3} ; \frac{I_{LP}}{I_{LS}} = \frac{I_{FP}}{I_{FS}\sqrt{3}} = \frac{1}{a\sqrt{3}} \quad (7.30)$$

Fasor tegangan fasa-fasa primer mendahului sekunder 30° .



CONTOH 7.7 : Sebuah transformator penurun tegangan 3 fasa, tegangan primernya dihubungkan pada sumber 6600 V dan mengambil arus 10 A. Jika rasio transformasi adalah 12, hitunglah tegangan saluran sekunder, arus saluran sekunder dan daya keluaran untuk hubungan-hubungan berikut : (a) Δ - Δ ; (b) Y-Y ; (c) Δ -Y ; (d) Y- Δ .

Penyelesaian :

a). Untuk hubungan Δ - Δ :

$$V_{LS} = V_{FS} = \frac{V_{FP}}{a} = \frac{V_{LP}}{a} = \frac{6600}{12} = 550 \text{ V} ;$$

$$I_{LS} = I_{FS} \sqrt{3} = a I_{FP} \sqrt{3} = a \frac{I_{LP}}{\sqrt{3}} \sqrt{3} = 12 \times 10 = 120 \text{ A}.$$

b). Untuk hubungan Y-Y :

$$V_{LS} = V_{FS} \sqrt{3} = \frac{V_{FP}}{a} \sqrt{3} = \frac{V_{LP}}{\sqrt{3} a} \sqrt{3} = \frac{6600}{12} = 550 \text{ V} ;$$

$$I_{LS} = I_{FS} = a I_{FP} = a I_{LP} = 12 \times 10 = 120 \text{ A}.$$

c). Untuk hubungan Δ -Y :

$$V_{LS} = V_{FS} \sqrt{3} = \frac{V_{FP}}{a} \sqrt{3} = \frac{V_{LP}}{a} \sqrt{3} = \frac{6600}{12} \sqrt{3} = 953 \text{ V} ;$$

$$I_{LS} = I_{FS} = a I_{FP} = a \frac{I_{LP}}{\sqrt{3}} = 12 \frac{10}{\sqrt{3}} = 69,3 \text{ A}.$$

d) Untuk hubungan Y- Δ :

$$V_{LS} = V_{FS} = \frac{V_{FP}}{a} = \frac{1}{a} \frac{V_{LP}}{\sqrt{3}} = \frac{1}{12} \frac{6600}{\sqrt{3}} = 318 \text{ V} ;$$

$$I_{LS} = I_{FS} \sqrt{3} = a I_{FP} \sqrt{3} = a I_{LP} \sqrt{3} = 12 \times 10 \times \sqrt{3} = 208 \text{ A}.$$

Dengan mengabaikan rugi-rugi daya keluaran sama dengan daya masukan.

$$|S_{keluaran}| = |S_{masukan}| = V_{LP} I_{LP} \sqrt{3} = 6,6 \times 10 \sqrt{3} = 114,3 \text{ kVA}.$$

7.3. Generator Sinkron

Tujuan :

- Memahami cara kerja generator sinkron.
- Memahami hubungan jumlah kutub, kecepatan perputaran, frekuensi, dan mampu menghitung tegangan imbas pada jangkar.
- Mampu menggambarkan diagram fasor dan memahami rangkaian ekuivalen mesin sinkron rotor silindris.
- Mampu melakukan perhitungan sederhana pada mesin sinkron melalui karakteristik celah udara dan karakteristik hubung singkat.

Kita telah melihat bahwa pada transformator terjadi alih energi dari sisi primer ke sisi sekunder. Energi di ke-dua sisi transformator tersebut sama bentuknya (yaitu energi listrik) akan tetapi mereka mempunyai peubah sinyal (yaitu tegangan dan arus) yang berbeda besarnya. Kita katakan bahwa transformator merupakan piranti konversi energi dari energi listrik ke energi listrik.

Kita perhatikan pula bahwa peubah-peubah sinyal di sisi sekunder transformator muncul karena fluksi di inti transformator merupakan fungsi waktu. Fluksi fungsi waktu ini dibangkitkan oleh arus di sisi primer, yang juga merupakan fungsi waktu. Fluksi fungsi waktu dapat pula dibangkitkan dengan cara lain misalnya secara mekanis; cara inilah yang dilaksanakan pada piranti konversi energi dari energi mekanis ke energi listrik atau disebut konversi energi *elektromekanik*. Konversi energi elektromekanik ini tidak hanya dari mekanis ke listrik tetapi juga dari listrik ke mekanis, dan dilandasi oleh dua hukum dasar yang kita kenal yaitu hukum Faraday dan hukum Ampere. Secara matematis kedua hukum ini dinyatakan dalam persamaan (10.1) dan (10.7)

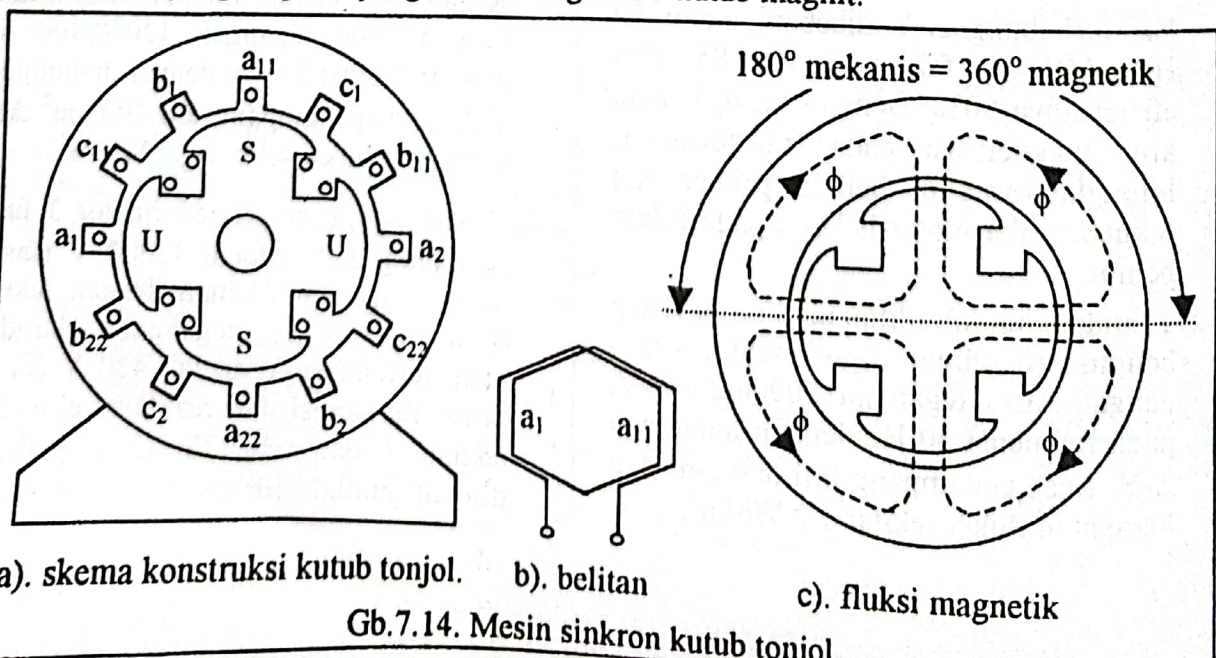
$$e = -\frac{d\lambda}{dt} = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (10.1) \quad \text{dan} \quad F = K_B B i f(\theta) \quad (10.7)$$

Persamaan (10.1) menunjukkan bagaimana tegangan dibangkitkan dan persamaan (10.7) menunjukkan bagaimana gaya mekanis ditimbulkan.

Berikut ini kita akan mempelajari mesin konversi energi yang sangat luas digunakan di pusat-pusat pembangkit listrik, yang disebut generator sinkron. Ada dua macam konstruksi yang akan kita lihat yaitu konstruksi *kutub tonjol* dan konstruksi *rotor silindris*.

Mesin Kutub Tonjol Keadaan Tak Berbeban

Skema konstruksi mesin ini adalah seperti terlihat pada Gb.7.14.a. Mesin ini terdiri dari bagian stator yang mendukung belitan-belitan a_1a_{11} sampai c_2c_{22} pada alur-alurnya, dan bagian rotor yang berputar yang mendukung kutub-kutub magnet.



Belitan pada stator tempat kita memperoleh energi disebut *belitan jangkar*. Belitan pada rotor yang dialiri arus eksitasi untuk menimbulkan medan magnet disebut *belitan eksitasi*. Pada gambar ini ada empat kutub magnet. Satu siklus kutub S-U pada rotor memiliki kisar sudut (yang kita sebut *sudut magnetis* atau *sudut listrik*) 360° . Kisar sudut 360° ini melingkupi tiga belitan di stator dengan posisi yang bergeser 120° antara satu dengan lainnya. Misalnya belitan a_1a_{11} dan belitan b_1b_{11} berbeda posisi 120° , belitan b_1b_{11} dan c_1c_{11} berbeda posisi 120° , dan mereka bertiga berada di bawah satu kisaran kutub S-U. Tiga belitan yang lain, yaitu a_2a_{22} , b_2b_{22} , dan c_2c_{22} berada dibawah satu kisaran kutub S-U yang lain dan mereka juga saling berbeda posisi 120° . Karena mesin ini merupakan mesin empat kutub (dua pasang kutub) maka satu periode siklus mekanik (perputaran rotor) sama dengan dua periode siklus magnetik. Jadi hubungan antara sudut kisaran mekanik dan sudut kisaran magnetik adalah

$$\theta_{\text{magnetik}}[\text{derajat}] = 2 \times \theta_{\text{mekanik}}[\text{derajat}]$$

atau secara umum

$$\theta_{\text{magnetik}}[\text{derajat}] = \frac{p}{2} \times \theta_{\text{mekanik}}[\text{derajat}] \quad (7.31)$$

dengan p adalah jumlah kutub.

Kecepatan sudut mekanik adalah

$$\omega_{\text{mekanik}} = \frac{d\theta_{\text{mekanik}}}{dt} = 2\pi f_{\text{mekanik}} \quad (7.32)$$

Frekuensi mekanik f_{mekanik} adalah jumlah siklus mekanik per detik yang tidak lain adalah kecepatan perputaran rotor per detik. Biasanya kecepatan perputaran rotor dinyatakan dengan jumlah *rotasi per menit* (rpm). Jadi jika kecepatan perputaran rotor adalah n rpm, maka jumlah siklus per menit adalah $\frac{n}{60}$ atau $f_{\text{mekanik}} = \frac{n}{60}$ siklus per detik.

Kecepatan sudut magnetik adalah

$$\omega_{\text{magnetik}} = \frac{d\theta_{\text{magnetik}}}{dt} = 2\pi f_{\text{magnetik}} \quad (7.33)$$

Dengan hubungan (7.31) maka (7.33) menjadi

$$\omega_{\text{magnetik}} = \frac{p}{2} \omega_{\text{mekanik}} = \frac{p}{2} 2\pi f_{\text{mekanik}} = \frac{p}{2} 2\pi \frac{n}{60} = 2\pi \frac{pn}{120}$$

yang berarti

$$f_{\text{magnetik}} = \frac{pn}{120} \text{ siklus per detik} \quad (7.34)$$

Perubahan fluksi magnetik akan membangkitkan tegangan induksi di setiap belitan. Karena fluksi magnet mempunyai frekuensi $f_{\text{magnetik}} = \frac{pn}{120}$ Hz maka tegangan pada belitanpun akan mempunyai frekuensi

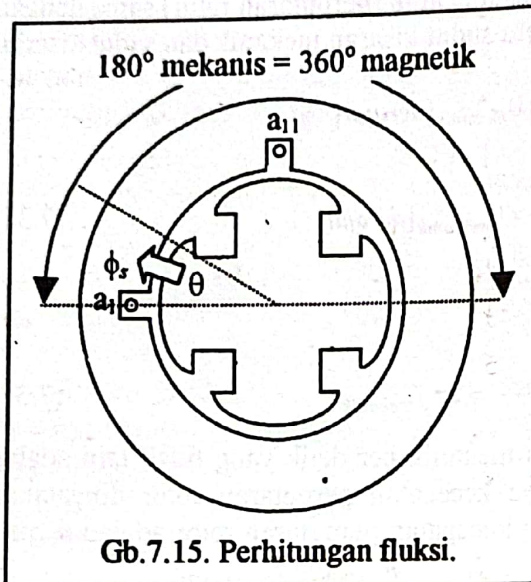
$$f_{\text{tegangan}} = \frac{pn}{120} \text{ Hz} \quad (7.35)$$

Dengan (7.35) ini jelaslah bahwa untuk memperoleh frekuensi tertentu, kecepatan perputaran rotor harus sesuai dengan jumlah kutub. Jika diinginkan $f = 50$ Hz misalnya, untuk $p = 2$ maka $n = 3000$ rpm; jika $p = 4$ maka $n = 1500$ rpm; jika $p = 6$ maka $n = 1000$ rpm, dan seterusnya. Konstruksi mesin dengan kutub menonjol seperti pada Gb.7.14. sesuai untuk mesin putaran rendah tetapi tidak sesuai untuk mesin putaran tinggi karena kendala-kendala mekanis. Untuk mesin putaran tinggi digunakan rotor dengan konstruksi silindris.

Dengan pergeseran posisi belitan 120° magnetik untuk setiap pasang kutub, maka kita mendapatkan tegangan sistem tiga fasa untuk setiap pasang kutub, yaitu e_{a1} pada belitan a_1a_{11} , e_{b1} pada b_1b_{11} , dan e_{c1} pada c_1c_{11} . Demikian pula kita memperoleh tegangan e_{a2} , e_{b2} dan e_{c2} pada belitan-belitan di bawah pasangan kutub yang lain. Jadi setiap pasang kutub akan membangkitkan tegangan sistem tiga fasa pada belitan-belitan yang berada dibawah

pengaruhnya. Tegangan yang sefasa, misalnya e_{a1} dan e_{a2} , dapat dijumlahkan untuk memperoleh tegangan yang lebih tinggi atau diparalelkan untuk memperoleh arus yang lebih besar.

Tegangan yang terbangkit di belitan pada umumnya diinginkan berbentuk gelombang sinus $v = A \cos \omega t$, dengan pergeseran 120° untuk belitan fasa-fasa yang lain. Tegangan sebagai fungsi waktu ini pada transformator dapat langsung diperoleh di belitan sekunder karena fluksinya merupakan fungsi waktu. Pada mesin sinkron, fluksi dibangkitkan oleh belitan eksitasi di rotor yang dialiri arus searah sehingga fluksi tidak merupakan fungsi waktu. Akan tetapi fluksi yang ditangkap oleh belitan stator harus merupakan fungsi waktu agar



persamaan (10.1) dapat diterapkan untuk memperoleh tegangan. Fluksi sebagai fungsi waktu diperoleh melalui putaran rotor. Jika ϕ adalah fluksi yang dibangkitkan di rotor dan memasuki celah udara antara rotor dan stator dengan nilai konstan maka, dengan mengabaikan efek pinggir, laju pertambahan fluksi yang ditangkap oleh belitan stator adalah

$$\frac{d\phi_s}{dt} = \phi \frac{d\theta_{\text{magnetik}}}{dt} = \phi \omega_{\text{magnetik}} \quad (7.36)$$

Karena $\omega_{\text{magnetik}} = 2\pi f_{\text{magnetik}} = 2\pi \frac{pn}{120}$, maka

$$\frac{d\phi_s}{dt} = \phi \pi \frac{pn}{60} \quad (7.37)$$

Dari (7.34) kita peroleh tegangan pada belitan, yaitu

$$v = -N \frac{d\phi_s}{dt} = -N \phi \pi \frac{pn}{60} \quad (7.38)$$

Jika ϕ bernilai konstan, tidaklah berarti (7.38) memberikan suatu tegangan konstan karena ϕ bernilai konstan positif untuk setengah periode dan bernilai konstan negatif untuk setengah periode berikutnya. Maka (7.38) memberikan tegangan bolak-balik yang tidak sinus. Untuk memperoleh tegangan berbentuk sinus, ϕ harus berbentuk sinus juga. Akan tetapi ia tidak dibuat sebagai fungsi sinus terhadap waktu, akan tetapi sebagai fungsi sinus posisi, yaitu terhadap θ_{magnetik} . Jadi jika

$$\phi = \phi_m \cos \theta_{\text{magnetik}} \quad (7.39)$$

maka laju pertambahan fluksi yang dilingkupi belitan adalah

$$\begin{aligned} \frac{d\phi_s}{dt} &= \frac{d\phi}{dt} = \frac{d}{dt} (\phi_m \cos \theta_{\text{magnetik}}) = -\phi_m \sin \theta_{\text{magnetik}} \frac{d\theta_{\text{magnetik}}}{dt} \\ &= -\phi_m \omega_{\text{magnetik}} \sin \theta_{\text{magnetik}} = -\phi_m \left(2\pi \frac{pn}{120} \right) \sin \theta_{\text{magnetik}} \end{aligned} \quad (7.40)$$

sehingga tegangan belitan

$$\begin{aligned} e &= -N \frac{d\phi_s}{dt} = N \phi_m \pi \frac{pn}{60} \sin \theta_{\text{magnetik}} \\ &= 2\pi f N \phi_m \sin \theta_{\text{magnetik}} = \omega N \phi_m \sin \omega t \end{aligned} \quad (7.41)$$

Persamaan (7.41) memberikan nilai sesaat dari tegangan yang dibangkitkan di belitan stator. Nilai maksimum dari tegangan ini adalah

$$E_m = \omega N \phi_m \text{ Volt} \quad (7.42)$$

dan nilai efektifnya adalah

$$E_{rms} = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = \frac{\omega N \phi_m}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f}{\sqrt{2}} N \phi_m = 4,44 f N \phi_m \text{ Volt} \quad (7.43)$$

Dalam menurunkan formulasi tegangan di atas, kita menggunakan perhitungan fluksi seperti diperlihatkan pada Gb.7.15. yang merupakan penyederhanaan dari konstruksi mesin seperti diperlihatkan pada Gb.7.14.a. Di sini ada beberapa hal yang perlu kita perhatikan yaitu:

1. Belitan terdiri dari hanya satu gulungan, misalnya belitan $a_1 a_{11}$, yang ditempatkan di sepasang alur stator, walaupun gulungan itu terdiri dari N lilitan. Belitan semacam ini kita sebut *belitan terpusat*.
2. Lebar belitan, yaitu kisar sudut antara sisi belitan a_1 dan a_{11} adalah 180° magnetik. Lebar belitan semacam ini kita sebut *kisar penuh*.

Dalam praktek lilitan setiap fasa tidak terpusat di satu belitan, melainkan terdistribusi di beberapa belitan yang menempati beberapa pasang alur stator. Belitan semacam ini kita sebut *belitan terdistribusi*, yang dapat menempati stator sampai $1/3$ kisaran penuh (60° magnetik). Selain dari pada itu, gulungan yang menempati sepasang alur secara sengaja dibuat tidak mempunyai lebar satu kisaran penuh; jadi lebarnya tidak 180° akan tetapi hanya 80% sampai 85% dari kisaran penuh. Pemanfaatan belitan terdistribusi dan lebar belitan tidak satu kisar penuh dimaksudkan untuk menekan pengaruh harmonisa yang mungkin ada di kerapatan fluksi. Sudah barang tentu hal ini akan sedikit mengurangi komponen fundamental dan pengurangan ini dinyatakan dengan suatu faktor K_w yang kita sebut *faktor belitan*. Biasanya K_w mempunyai nilai antara 0,85 sampai 0,95. Dengan adanya faktor belitan ini formulasi tegangan (7.43) menjadi

$$E_{rms} = 4,44 f N K_w \phi_m \text{ Volt} \quad (7.44)$$

Dalam pengenalan ini kita hanya melihat mesin sinkron kutub tonjol dalam keadaan tak berbeban; analisis dalam keadaan berbeban akan kita pelajari lebih lanjut pada pelajaran khusus mengenai mesin-mesin listrik. Selanjutnya kita akan melihat mesin sinkron rotor silindris.

CONTOH 7.8 : Sebuah generator sinkron tiga fasa, 4 kutub, belitan jangkar terhubung Y, mempunyai 12 alur pada statornya dan setiap alur berisi 10 konduktor. Fluksi kutub terdistribusi secara sinus dengan nilai maksimumnya 0,03 Wb. Kecepatan perputaran rotor 1500 rpm. Carilah frekuensi tegangan jangkar dan nilai rms tegangan jangkar fasa-netral dan fasa-fasa.

Penyelesaian :

Frekuensi tegangan jangkar adalah

$$f = \frac{p n}{120} = \frac{4 \times 1500}{120} = 50 \text{ Hz}$$

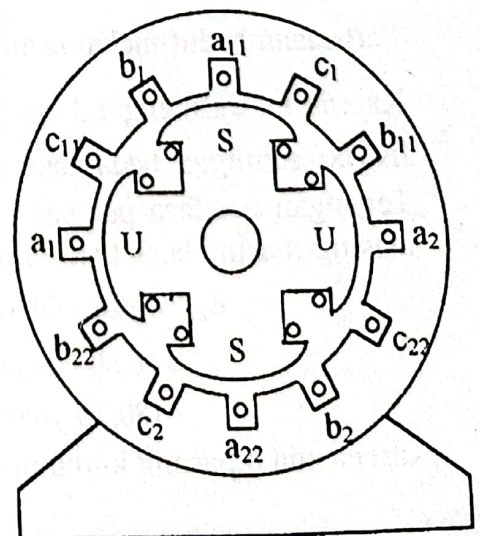
Jumlah alur per kutub adalah $\frac{12}{4} = 3$ yang berarti

setiap pasang kutub terdapat 3 belitan yang membangun sistem tegangan tiga fasa. Jadi setiap fasa terdiri dari 1 belitan yang berisi 10 lilitan. Nilai rms tegangan jangkar per fasa per pasang kutub adalah

$$E_{ak} = 4,44 f N \phi_m = 4,44 \times 50 \times 10 \times 0,03 = 66,6 \text{ V}$$

Karena ada dua pasang kutub maka tegangan per fasa adalah : $2 \times 66,6 = 133 \text{ V}$.

Tegangan fasa-fasa adalah $133 \sqrt{3} = 230 \text{ V}$.



CONTOH 7.9 : Soal seperti pada contoh 7.8. tetapi jumlah alur pada stator ditingkatkan menjadi 24 alur. Ketentuan yang lain tetap.

Penyelesaian :

Frekuensi tegangan jangkar tidak tergantung jumlah alur. oleh karena itu frekuensi tetap 50 Hz.

Jumlah alur per kutub adalah $\frac{24}{4} = 6$ yang berarti setiap pasang kutub terdapat 6 belitan

yang membangun sistem tegangan tiga fasa. Jadi setiap fasa pada satu pasang kutub terdiri dari 2 belitan yang masing-masing berisi 10 lilitan. Nilai rms tegangan jangkar untuk setiap belitan adalah $E_{al} = 4,44 f N \phi_m \text{ V} = 4,44 \times 50 \times 10 \times 0,03 = 66,6 \text{ V}$.

Karena dua belitan tersebut berada pada alur yang berbeda, maka terdapat beda fasa antara tegangan imbas di keduanya. Perbedaan sudut mekanis antara dua alur yang

berurutan adalah $\frac{360^\circ}{24} = 15^\circ$ mekanik. Karena mesin mengandung 4 kutub atau 2 pasang

kutub, maka 1° mekanik setara dengan 2° listrik. Jadi selisih sudut fasa antara tegangan di dua belitan adalah 30° listrik sehingga tegangan rms per fasa per pasang kutub adalah jumlah fasor tegangan di dua belitan yang berselisih fasa 30° tersebut.

$$E_{ak} = 66,6 + 66,6(\cos 30^\circ + j \sin 30^\circ) = 124,8 + j33,3$$

Karena ada 2 pasang kutub maka $E_a = 2 \times \sqrt{(124,8)^2 + (33,3)^2} = 258 \text{ V}$

Tegangan fasa-fasa adalah $258 \sqrt{3} = 447 \text{ V}$

CONTOH 7.10 : Soal seperti pada contoh 7.8. tetapi jumlah alur pada stator ditingkatkan menjadi 144 alur, jumlah kutub dibuat 16 (8 pasang), kecepatan perputaran diturunkan menjadi 375 rpm. Ketentuan yang lain tetap.

Penyelesaian :

Frekuensi tegangan jangkar : $f = \frac{16 \times 375}{120} = 50 \text{ Hz}$

Jumlah alur per kutub $\frac{144}{16} = 9$ yang berarti terdapat 9 belitan per pasang kutub yang membangun sistem tiga fasa. Jadi tiap fasa terdapat 3 belitan. Tegangan di tiap belitan adalah $E_{al} = 4,44 \times 50 \times 10 \times 0,03 = 66,6 \text{ V}$; sama dengan tegangan per belitan pada contoh sebelumnya karena frekuensi, jumlah lilitan dan fluksi maksimum tidak berubah.

Perbedaan sudut mekanis antara dua alur yang berturutan adalah $\frac{360^\circ}{144} = 2,5^\circ$ mekanik.

Karena mesin mengandung 16 kutub (8 pasang) maka 1° mekanik ekuivalen dengan 8° listrik, sehingga beda fasa tegangan pada belitan-belitan adalah $2,5 \times 8 = 20^\circ$ listrik. Tegangan per fasa per pasang kutub adalah jumlah fasor dari tegangan belitan yang masing-masing berselisih fasa 20° .

$$\begin{aligned} E_{ak} &= 66,6 + 66,6 \angle 20^\circ + 66,6 \angle 40^\circ \\ &= 66,6(1 + \cos 20^\circ + \cos 40^\circ + j(\sin 20^\circ + \sin 40^\circ)) \\ &= 180,2 + j65,6 \end{aligned}$$

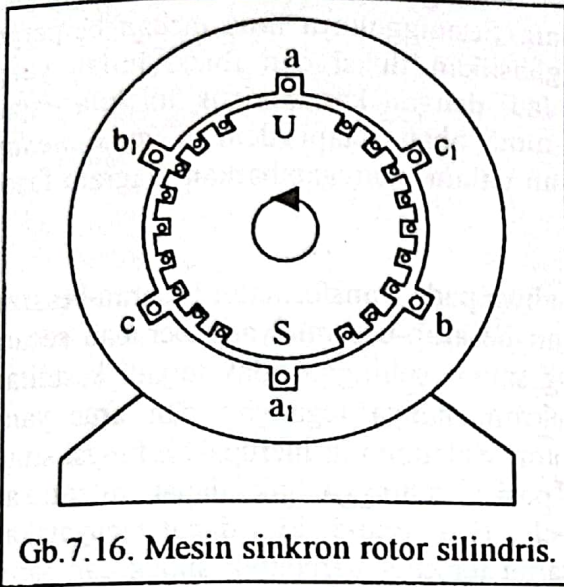
Karena ada 8 pasang kutub maka tegangan fasa adalah

$$E_a = 8 \times \sqrt{(180,2)^2 + (65,6)^2} = 8 \times 191,8 = 1534 \text{ V}$$

Tegangan fasa-fasa adalah $1534 \sqrt{3} = 2657 \text{ V}$

Mesin Sinkron Rotor Silindris

Sebagaimana telah disinggung di atas, mesin kutub tonjol sesuai untuk perputaran rendah. Untuk perputaran tinggi digunakan mesin rotor silindris yang skemanya diperlihatkan ada Gb.7.16. Rotor mesin ini berbentuk silinder



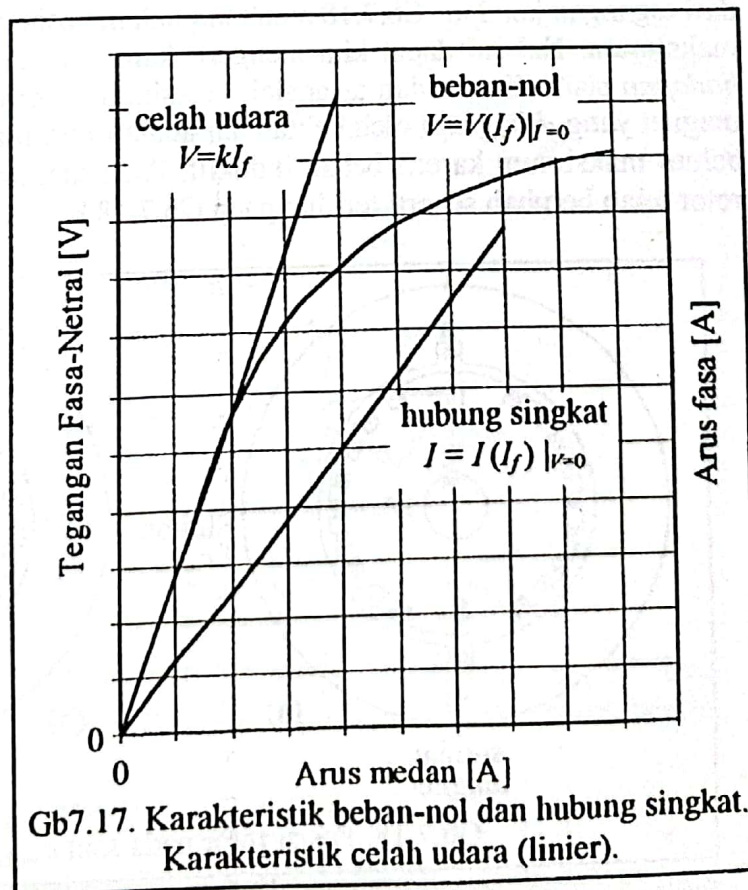
Gb.7.16. Mesin sinkron rotor silindris.

dengan alur-alur untuk menempatkan belitan eksitasi. Dengan konstruksi ini, reluktansi magnet jauh lebih merata dibandingkan dengan mesin kutub menonjol. Di samping itu kendala mekanis untuk perputaran tinggi lebih mudah diatasi dibanding dengan mesin kutub menonjol. Belitan eksitasi pada gambar ini dialiri arus searah sehingga rotor membentuk membentuk sepasang kutub magnet U-S seperti terlihat pada gambar. Pada stator digambarkan tiga belitan terpusat aa_1 , bb_1 dan cc_1 masing-masing dengan lebar kisaran penuh agar tidak terlalu rumit, walaupun dalam kenyataan pada umumnya dijumpai belitan-belitan terdistribusi dengan lebar lebih kecil dari kisaran penuh.

Karena reluktansi magnet praktis konstan untuk berbagai posisi rotor (pada waktu rotor berputar) maka situasi yang kita hadapi mirip dengan transformator. Perbedaannya adalah bahwa pada transformator kita mempunyai fluksi konstan, sedangkan pada mesin sinkron fluksi tergantung dari arus eksitasi di belitan rotor. Kurva magnetisasi dari mesin ini dapat kita peroleh melalui *uji beban nol*. Dalam uji beban nol, mesin diputar pada perputaran sinkron (3000 rpm) dan belitan jangkar terbuka. Kita mengukur *tegangan keluaran* pada belitan jangkar sebagai fungsi *arus eksitasi* (disebut juga *arus medan*) pada belitan eksitasi di rotor. Kurva tegangan keluaran sebagai fungsi arus eksitasi seperti terlihat pada Gb.7.17. disebut *karakteristik beban nol*.

Bagian yang berbentuk garis lurus pada kurva itu disebut *karakteristik celah udara* dan kurva inilah (dengan ekstrapolasinya) yang akan kita gunakan untuk melakukan analisis mesin sinkron.

Karakterik lain yang penting adalah *karakteristik hubung singkat* yang dapat kita peroleh dari *uji hubung singkat*. Dalam uji hubung singkat ini mesin diputar pada kecepatan perputaran sinkron dan terminal belitan jangkar dihubungkan singkat (belitan jangkar terhubung Y). Kita mengukur arus fasa sebagai fungsi dari arus eksitasi. Kurva yang akan kita peroleh akan terlihat seperti pada Gb.7.17. Kurva ini berbentuk garis lurus karena untuk mendapatkan arus beban penuh pada percobaan ini,



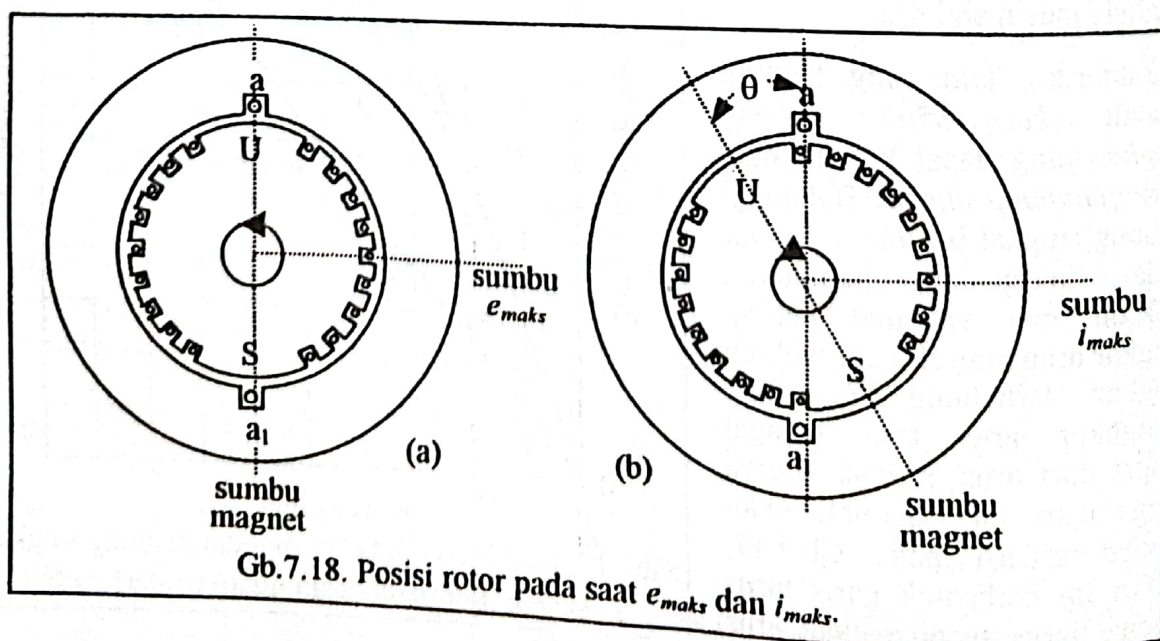
Gb.7.17. Karakteristik beban-nol dan hubung singkat. Karakteristik celah udara (linier).

arus eksitasi yang diperlukan tidak besar sehingga rangkaian magnetiknya jauh dari keadaan jenuh. Fluksi magnet yang dibutuhkan hanya sebatas yang diperlukan untuk membangkitkan tegangan untuk mengatasi tegangan jatuh di impedansi belitan jangkar.

Perhatikanlah bahwa karakteristik beban-nol dan hubung singkat memberikan tegangan maupun arus jangkar sebagai fungsi arus medan. Sesungguhnya arus medan berperan memberikan mmf (lilitan ampere) untuk menghasilkan fluksi dan fluksi inilah yang mengimbaskan tegangan pada belitan jangkar. Jadi dengan karakteristik ini kita dapat menyatakan pembangkit fluksi tidak dengan mmf akan tetapi dengan *arus medan ekuivalennya* dan hal inilah yang akan kita lakukan dalam menggambarkan diagram fasor yang akan kita pelajari berikut ini.

Diagram Fasor. Reaktansi Sinkron. Kita ingat bahwa pada transformator besaran-besaran tegangan, arus dan fluksi, semuanya merupakan besaran-besaran yang berubah secara sinusoidal terhadap waktu dengan frekuensi yang sama sehingga tidak terjadi kesulitan menyatakannya sebagai fasor. Pada mesin sinkron, hanya tegangan dan arus yang merupakan fungsi sinus terhadap waktu; fluksi rotor, walaupun ia merupakan fungsi sinus tetapi tidak terhadap waktu tetapi terhadap posisi sehingga tak dapat ditentukan frekuensinya. Menurut konsep fasor yang kita pelajari di Bab-5, kita dapat menyatakan besaran-besaran ke dalam fasor jika besaran-besaran tersebut berbentuk sinus dan sama frekuensinya. Oleh karena itu kita harus mencari cara yang dapat membuat fluksi rotor dinyatakan sebagai fasor. Hal ini mungkin dilakukan jika kita tidak melihat fluksi rotor sebagai dirinya sendiri melainkan melihatnya dari sisi belitan jangkar. Walaupun fluksi rotor hanya merupakan fungsi posisi, tetapi ia dibawa berputar oleh rotor dan oleh karena itu belitan jangkar melihatnya sebagai fluksi yang berubah terhadap waktu. Justru karena itulah terjadi tegangan imbas pada belitan jangkar sesuai dengan hukum Faraday. Dan sudah barang tentu frekuensi tegangan imbas di belitan jangkar sama dengan *frekuensi fluksi yang dilihat* oleh belitan jangkar.

Kita misalkan generator dibebani dengan beban induktif sehingga arus jangkar tertinggal dari tegangan jangkar. Gb.7.18.a. menunjukkan posisi rotor pada saat imbas tegangan di a_1 maksimum. Hal ini dapat kita mengerti karena pada saat itu kerapatan fluksi magnet di *hadapan* sisi belitan a dan a_1 adalah maksimum. Perhatikanlah bahwa pada saat itu fluksi magnet yang *dilingkupi* oleh belitan aa_1 adalah minimum. Sementara itu arus di belitan aa_1 belum maksimum karena beban induktif. Pada saat arus mencapai nilai maksimum posisi rotor telah berubah seperti terlihat pada Gb.7.18.b.



Karena pada mesin dua kutub sudut mekanis sama dengan sudut magnetis, maka beda fasa antara tegangan dan arus jangkar sama dengan pegeseran rotasi rotor, yaitu θ . Arus jangkar memberikan mmf jangkar yang membangkitkan medan magnet lawan yang akan memperlemah fluksi rotor. Karena adanya reaksi jangkar ini maka arus eksitasi haruslah sedemikian rupa sehingga tegangan keluaran mesin dipertahankan.

Catatan : Pada mesin rotor silindris mmf jangkar mengalami reluktansi magnet yang sama dengan yang dialami oleh mmf rotor. Hal ini berbeda dengan mesin kutub tonjol yang akan membuat analisis mesin kutub tonjol memerlukan cara khusus sehingga kita tidak melakukannya dalam bab pengenalan ini.

Diagram fasor (Gb.7.19) kita gambarkan dengan ketentuan berikut

1. Diagram fasor dibuat per fasa dengan pembebanan induktif.
2. Tegangan terminal V_a dan arus jangkar I_a adalah nominal.
3. Tegangan imbas digambarkan sebagai tegangan naik; jadi tegangan imbas tertinggal 90° dari fluksi yang membangkitkannya (lihat catatan di akhir Bab-10).
4. Belitan jangkar mempunyai reaktansi bocor X_l dan resistansi R_a .
5. Mmf (fluksi) dinyatakan dalam arus ekuivalen.

Dengan mengambil tegangan terminal jangkar V_a sebagai referensi, arus jangkar I_a tertinggal dengan sudut θ dari V_a (beban induktif). Tegangan imbas pada jangkar adalah

$$E_a = V_a + I_a(R_a + jX_l) \quad (7.45)$$

Tegangan imbas E_a ini harus dibangkitkan oleh fluksi celah udara Φ_a yang dinyatakan dengan arus ekuivalen I_{fa} mendahului E_a 90° . Arus jangkar I_a memberikan fluksi jangkar Φ_a yang dinyatakan dengan arus ekuivalen $I_{\phi a}$. Jadi fluksi dalam celah udara merupakan jumlah dari fluksi rotor Φ_f yang dinyatakan dengan arus ekuivalen I_f dan fluksi jangkar. Jadi

$$I_{fa} = I_f + I_{\phi a} \quad \text{atau} \quad I_f = I_{fa} - I_{\phi a} \quad (7.46)$$

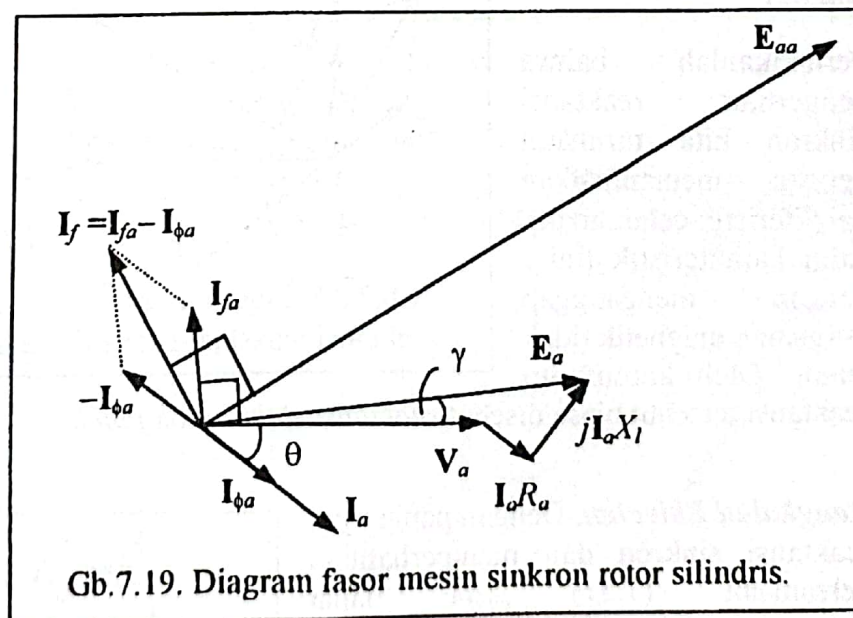
Dengan perkataan lain arus eksitasi rotor I_f haruslah cukup untuk membangkitkan fluksi celah udara untuk membangkitkan E_a dan mengatasi fluksi jangkar agar tegangan terbangkit E_a dapat dipertahankan. Perhatikan Gb.7.19. I_f membangkitkan tegangan E_{aa} 90° di belakang I_f dan lebih besar dari E_a .

Hubungan antara nilai E_a dan I_{fa} diperoleh dari karakteristik celah udara,

sedangkan antara nilai I_a dan $I_{\phi a}$ diperoleh dari karakteristik hubung singkat. Dari karakteristik tersebut, seperti terlihat pada Gb.7.17., dapat dinyatakan dalam bentuk hubungan

$$E_a = k_v I_{fa} \quad \text{dan} \quad I_a = k_i I_{\phi a} \quad \text{atau} \quad I_{fa} = E_a / k_v \quad \text{dan} \quad I_{\phi a} = I_a / k_i \quad (7.47)$$

dengan k_v dan k_i adalah konstanta yang diperoleh dari kemiringan kurva. Dari (7.47) dan Gb.7.19. kita peroleh



$$I_f = I_{fa} - I_{\phi a} = \frac{E_a}{k_v} \angle (90^\circ + \gamma) + \frac{I_a}{k_i} \angle (180^\circ - \theta) = j \frac{E_a}{k_v} \angle \gamma - \frac{I_a}{k_i} \angle -\theta \quad (7.48)$$

Dari (7.48) kita peroleh E_{aa} yaitu

$$\begin{aligned} E_{aa} &= -jk_v I_f = -jk_v \left(j \frac{E_a}{k_v} \angle \gamma - \frac{I_a}{k_i} \angle -\theta \right) = E_a \angle \gamma + j \frac{k_v}{k_i} I_a \angle -\theta \\ &= E_a + j \frac{k_v}{k_i} I_a \end{aligned} \quad (7.49)$$

Suku kedua (7.49) dapat kita tulis sebagai $jX_{\phi a} I_a$ dengan

$$X_{\phi a} = \frac{k_v}{k_i} \quad (7.50)$$

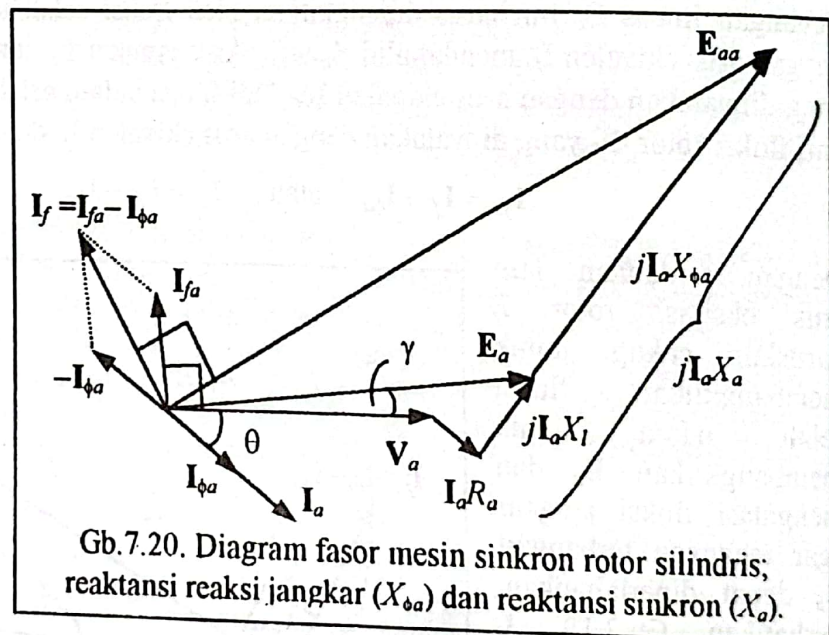
yang disebut *reaktansi reaksi jangkar* karena suku ini timbul akibat adanya reaksi jangkar. Selanjutnya (7.49) dapat ditulis

$$\begin{aligned} E_{aa} &= E_a + jX_{\phi a} I_a = V_a + I_a (R_a + jX_l) + jX_{\phi a} I_a \\ &= V_a + I_a (R_a + jX_a) \end{aligned} \quad (7.51)$$

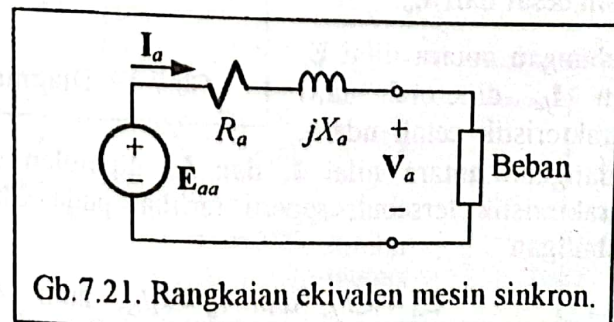
dengan $X_a = X_l + X_{\phi a}$ yang disebut *reaktansi sinkron*.

Diagram fasor Gb.7.19. kita gambarkan sekali lagi menjadi Gb.7.20. untuk memperlihatkan peran reaktansi reaksi jangkar dan reaktansi sinkron.

Perhatikanlah bahwa pengertian reaktansi sinkron kita turunkan dengan memanfaatkan karakteristik celah udara, yaitu karakteristik linier dengan menganggap rangkaian magnetik tidak jenuh. Oleh karena itu reaktansi tersebut biasa disebut *reaktansi sinkron tak jenuh*.



Rangkaian Ekuivalen. Dengan pengertian reaktansi sinkron dan memperhatikan persamaan (7.51) kita dapat menggambarkan rangkaian ekuivalen mesin sinkron dengan beban seperti terlihat pada Gb.7.21. Perhatikanlah bahwa rangkaian ekuivalen ini adalah rangkaian ekuivalen per fasa. Tegangan V_a adalah tegangan fasa-netral dan I_a adalah arus fasa.



CONTOH 7.11 : Sebuah generator sinkron tiga fasa 10 MVA, terhubung Y, 50 Hz, Tegangan fasa-fasa 13,8 kV, mempunyai karakteristik celah udara yang dapat dinyatakan sebagai $E_a = 53,78 I_f$ V dan karakteristik hubung singkat $I_a = 2,7 I_f$ A (I_f dalam ampere). Resistansi jangkar per fasa adalah $0,08 \Omega$ dan reaktansi bocor per fasa $1,9 \Omega$. Tentukanlah arus eksitasi (arus medan) yang diperlukan untuk membangkitkan tegangan terminal nominal jika generator dibebani dengan beban nominal seimbang pada faktor daya $0,8$ lagging.

Penyelesaian :

Tegangan per fasa adalah $V_a = \frac{13800}{\sqrt{3}} = 7967,4$ V.

Arus jangkar per fasa : $I_a = \frac{10 \times 10^6}{13800 \times \sqrt{3}} = 418,4$ A.

Reaktansi reaksi jangkar : $X_{\phi a} = \frac{k_v}{k_i} = \frac{53,78}{2,7} = 19,92 \Omega$

Reaktansi sinkron : $X_a = X_l + X_{\phi a} = 1,9 + 19,92 = 21,82 \Omega$

Dengan mengambil V_a sebagai referensi, maka $V_a = 7967,4 \angle 0^\circ$ V dan $I_a = 418,4 \angle -36,87^\circ$, dan tegangan terbangkit :

$$E_{aa} = V_a + I_a(R_a + jX_a) = 7967,4 \angle 0^\circ + 418,4 \angle -36,87^\circ (0,08 + j21,82)$$

$$\approx 7967,4 \angle 0^\circ + 9129,5 \angle 53,13^\circ = 13445,1 + j7303,6$$

$$E_{aa} = \sqrt{(13445,1)^2 + (7303,6)^2} = 15300$$
 V

Arus eksitasi yang diperlukan adalah

$$I_f = \frac{E_{aa}}{k_v} = \frac{15300}{53,78} = 284,5$$
 A

Daya. Daya per fasa yang diberikan ke beban adalah

$$P_f = V_a I_a \cos \theta \quad (7.52)$$

Pada umumnya pengaruh resistansi jangkar sangat kecil dibandingkan dengan pengaruh reaktansi sinkron. Dengan mengabaikan resistansi jangkar maka diagram fasor mesin sinkron menjadi seperti Gb.7.22.

Dari Gb.7.22. terlihat bahwa

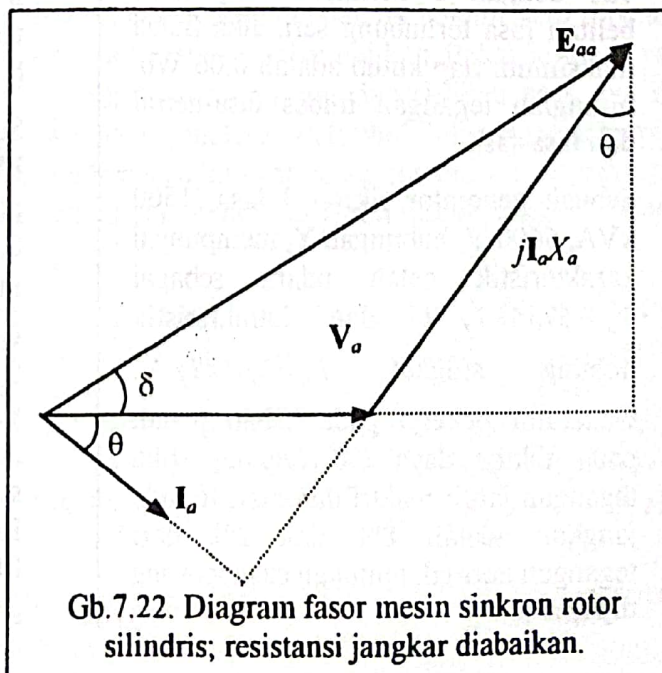
$$E_{aa} \sin \delta = I_a X_a \cos \theta \quad \text{atau}$$

$$I_a \cos \theta = \frac{E_{aa}}{X_a} \sin \delta$$

Dengan demikian maka (7.52) dapat ditulis sebagai

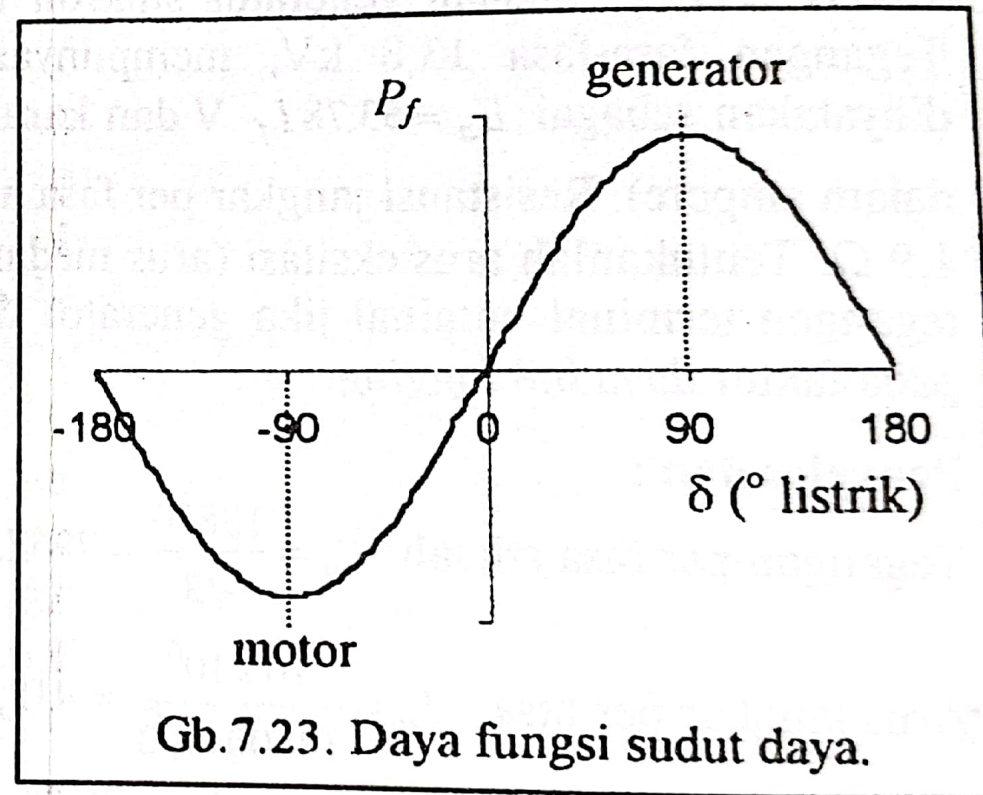
$$P_f = \frac{V_a E_{aa}}{X_a} \sin \delta \quad (7.53)$$

Persamaan (7.53) ini memberikan formulasi daya per fasa dan sudut δ menentukan besarnya daya; oleh karena itu sudut δ disebut *sudut daya* (power angle).



Gb.7.22. Diagram fasor mesin sinkron rotor silindris; resistansi jangkar diabaikan.

Daya P_f merupakan fungsi sinus dari sudut daya δ seperti terlihat pada Gb.7.23. Untuk $0 < \delta < 180^\circ$ daya bernilai positif, mesin beroperasi sebagai generator yang memberikan daya. (Jangan dikacaukan oleh konvensi pasif karena dalam menggambarkan diagram fasor untuk mesin ini kita menggunakan ketentuan *tegangan naik* dan *bukan tegangan jatuh*). Untuk $0 > \delta > -180^\circ$ mesin beroperasi sebagai motor, mesin menerima daya.



Gb.7.23. Daya fungsi sudut daya.

Dalam pengenalan mesin-mesin listrik ini, pembahasan mengenai mesin sikron kita cukupkan sampai di sini. Pembahasan lebih lanjut akan kita peroleh pada pelajaran khusus mengenai mesin-mesin listrik.

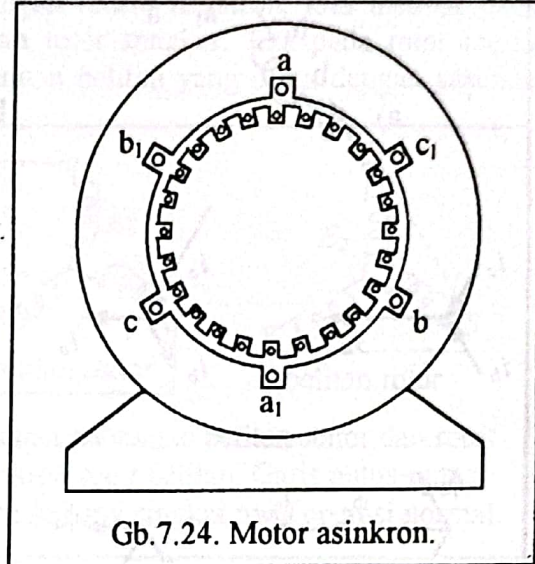
7.4. Motor Asinkron

Tujuan :

- Memahami cara kerja motor asinkron.
- Mampu melakukan perhitungan-perhitungan sederhana pada motor asinkron melalui rangkaian ekivalen.

Konstruksi Dan Cara Kerja

Motor merupakan piranti konversi dari energi listrik ke energi mekanik. Salah satu jenis yang banyak dipakai adalah motor asinkron atau motor induksi. Di sini kita hanya akan melihat motor asinkron tiga fasa. Stator memiliki alur-alur untuk memuat belitan-belitan yang akan terhubung pada sistem tiga fasa. Gb.7.23. hanya memperlihatkan tiga belitan pada stator sebagai belitan terpusat, yaitu belitan aa_1 , bb_1 dan cc_1 yang berbeda posisi 120° mekanik. Susunan belitan ini sama dengan susunan belitan pada stator generator sinkron. Ketiga belitan ini dapat dihubungkan Y ataupun Δ untuk selanjutnya disambungkan ke sumber tiga fasa. Rotor mempunyai alur-alur yang berisi konduktor dan semua konduktor pada rotor ini dihubungkan singkat di ujung-ujungnya. Inilah salah satu konstruksi rotor yang disebut *rotor sangkar* (susunan konduktor-konduktor itu berbentuk sangkar).

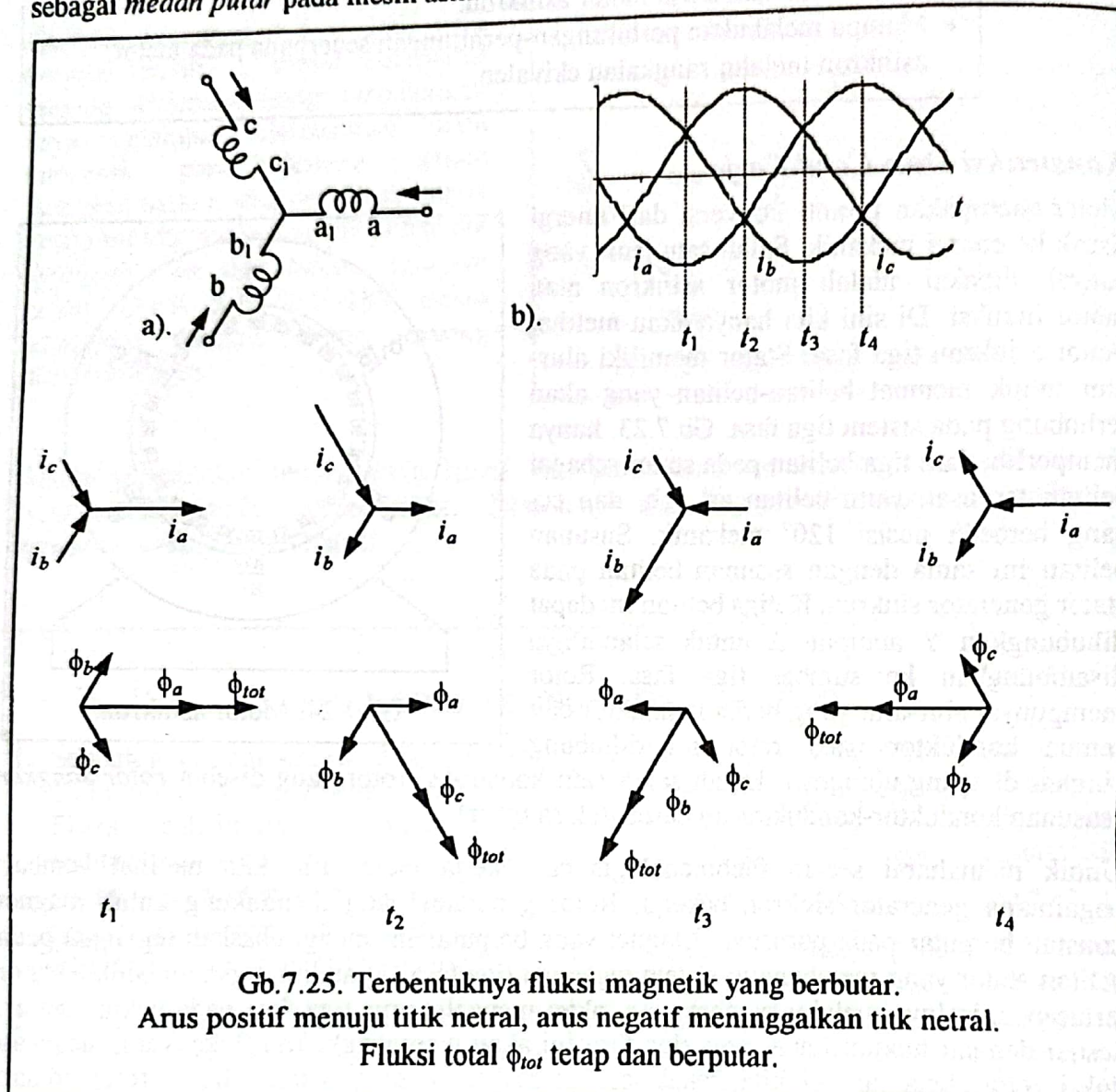


Untuk memahami secara fenomenologis cara kerja motor ini, kita melihat kembali bagaimana generator sinkron bekerja. Rotor generator yang mendukung kutub magnet konstan berputar pada porosnya. Magnet yang berputar ini mengimbaskan tegangan pada belitan stator yang membangun sistem tegangan tiga fasa. Apabila rangkaian belitan stator tertutup, misalnya melalui pembebanan, akan mengalir arus tiga fasa pada belitan stator. Sesuai dengan hukum Lenz, arus tiga fasa ini akan membangkitkan fluksi yang melawan fluksi rotor; kejadian ini kita kenal sebagai reaksi jangkar. Karena fluksi rotor adalah konstan tetapi berputar sesuai perputaran rotor, maka fluksi reaksi jangkar juga harus berputar sesuai perputaran fluksi rotor karena hanya dengan jalan itu hukum Lenz dipenuhi. Jadi mengalirnya arus tiga fasa pada belitan rotor membangkitkan fluksi konstan yang berputar. Sekarang, jika pada belitan stator motor asinkron diinjeksikan arus tiga fasa (belitan stator dihubungkan pada sumber tiga fasa) maka akan timbul fluksi konstan berputar seperti layaknya fluksi konstan berputar pada reaksi jangkar generator sinkron. Demikianlah bagaimana fluksi berputar timbul jika belitan stator motor asinkron dihubungkan ke sumber tiga fasa.

Kita akan melihat pula secara skematis, bagaimana timbulnya fluksi berputar. Untuk itu hubungan belitan stator kita gambarkan sebagai tiga belitan terhubung Y yang berbeda posisi 120° mekanis satu sama lain seperti terlihat pada Gb.7.25.a. Belitan-belitan itu masing-masing dialiri arus i_a , i_b , dan i_c yang berbeda fasa 120° listrik seperti ditunjukkan oleh Gb.7.25.b. Masing-masing belitan itu akan membangkitkan fluksi yang berubah terhadap waktu sesuai dengan arus yang mengalir padanya. Kita perhatikan situasi yang terjadi pada beberapa titik waktu.

Perhatikan Gb.7.25. Pada t_1 arus i_a maksimum negatif dan arus $i_b = i_c$ positif. Ke-tiga arus ini masing-masing membangkitkan fluksi ϕ_a , ϕ_b dan ϕ_c yang memberikan fluksi total ϕ_{tot} .

Kejadian ini berubah pada t_2 , t_3 , t_4 dan seterusnya yang dari Gb.7.25. terlihat bahwa fluksi total berputar seiring dengan perubahan arus di belitan tiga fasa. Peristiwa ini dikenal sebagai *medan putar* pada mesin asinkron.



Kecepatan perputaran dari medan putar harus memenuhi relasi antara jumlah kutub, frekuensi tegangan dan kecepatan perputaran sinkron sebagaimana telah kita kenal pada mesin sinkron yaitu

$$f_1 = \frac{p n_s}{120} \text{ Hz} \quad \text{atau} \quad n_s = \frac{120 f_1}{p} \text{ rpm} \quad (7.54)$$

dengan f_1 adalah frekuensi tegangan stator, n_s adalah kecepatan perputaran medan putar yang kita sebut perputaran sinkron. Jumlah kutub p ditentukan oleh susunan belitan stator. Pada belitan stator seperti pada contoh konstruksi mesin pada Gb.7.24, jumlah kutub adalah 2, sehingga jika frekuensi tegangan 50Hz maka perputaran sinkron adalah 3000 rpm. Untuk mempuat jumlah kutub menjadi 4, belitan stator disusun seperti pada stator mesin sinkron pada Gb.7.14.

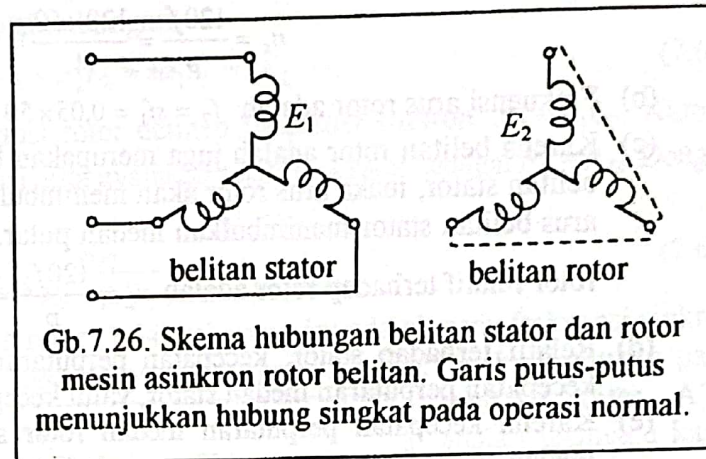
Selanjutnya medan magnet berputar yang ditimbulkan oleh stator akan mengimbaskan tegangan pada konduktor rotor. Karena konduktor rotor merupakan rangkaian tertutup, maka akan mengalir arus yang kemudian berinteraksi dengan medan magnet yang berputar dan timbullah gaya sesuai dengan hukum Ampere. Dengan gaya inilah terbangun torka yang akan membuat rotor berputar dengan kecepatan perputaran n . Perhatikanlah bahwa untuk terjadi torka, harus ada arus mengalir di konduktor rotor dan untuk itu harus ada tegangan

imbas pada konduktor rotor. Agar terjadi tegangan imbas, maka kecepatan perputaran rotor n harus lebih kecil dari kecepatan perputaran medan magnet (yaitu kecepatan perputaran sinkron n_s) sebab jika kecepatannya sama tidak akan ada fluksi yang terpotong oleh konduktor. Dengan kata lain terjadi beda kecepatan antara rotor dengan medan putar, atau terjadi *slip* yang besarnya adalah :

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (7.55)$$

Nilai s terletak antara 0 dan 1.

Rotor Belitan. Pada awal pengenalan kita dengan mesin asinkron, kita melihat pada konstruksi yang disebut mesin asinkron dengan rotor sangkar. Jika pada rotor mesin asinkron dibuat alur-alur unruk meletakkan susunan belitan yang sama dengan susunan belitan stator maka kita mempunyai mesin asinkron *rotor belitan*. Terminal belitan rotor dapat dihubungkan dengan cincin geser (yang berputar bersama rotor) dan melalui cincin geser ini dapat dihubungkan pada resistor untuk keperluan pengaturan perputaran. Skema hubungan belitan stator dan rotor diperlihatkan pada Gb.7.26. ; pada waktu operasi normal belitan rotor dihubung singkat. Hubungan seperti ini mirip dengan transformator. Medan putar akan mengimbaskan tegangan baik pada belitan stator maupun rotor.



Gb.7.26. Skema hubungan belitan stator dan rotor mesin asinkron rotor belitan. Garis putus-putus menunjukkan hubung singkat pada operasi normal.

Tegangan imbas pada stator adalah :

$$E_1 = 4,44 f N_1 K_{w1} \phi_m \quad (7.56)$$

dengan K_{w1} adalah faktor belitan stator, $f = \frac{p n_s}{120}$ = frekuensi tegangan stator, ϕ_m adalah fluksi maksimum di celah udara, N_1 adalah jumlah lilitan belitan stator.

Jika belitan rotor terbuka dan rotor tidak berputar, maka tegangan imbas pada belitan rotor adalah

$$E_2 = 4,44 f N_2 K_{w2} \phi_m \quad (7.57)$$

dengan K_{w2} adalah faktor belitan rotor, $f = \frac{p n_s}{120}$ = frekuensi tegangan stator (karena rotor tidak berputar), ϕ_m adalah fluksi maksimum di celah udara sama dengan fluksi yang mengimbaskan tegangan pada belitan stator, N_2 adalah jumlah lilitan belitan rotor.

Jika rotor dibiarkan berputar dengan kecepatan perputaran n maka terdapat *slip* seperti ditunjukkan oleh (7.55). Frekuensi tegangan imbas pada rotor menjadi

$$f_2 = \frac{p (n_s - n)}{120} = \frac{p s n_s}{120} = s f \text{ Hz} \quad (7.58)$$

Jadi frekuensi tegangan rotor diperoleh dengan mengalikan frekuensi stator dengan *slip* s ; oleh karena itu ia sering disebut *frekuensi slip*. Tegangan imbas pada belitan rotor dalam keadaan berputar menjadi

$$E_{22} = s E_2 \quad (7.59)$$

Jika rotor tak berputar (belitan rotor terbuka), maka dari (7.56) dan (7.57) kita peroleh

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1 K_{w1}}{N_2 K_{w2}} = a \quad (7.60)$$

Situasi ini mirip dengan transformator tanpa beban.

CONTOH 7.12. : Tegangan seimbang tiga fasa 50 Hz diberikan kepada motor asinkron tiga fasa, 4 kutub. Pada waktu motor melayani beban penuh, diketahui bahwa *slip* yang terjadi adalah 0,05. Tentukanlah : (a) kecepatan perputaran medan putar relatif terhadap stator; (b) frekuensi arus rotor; (c) kecepatan perputaran medan rotor relatif terhadap stator; (d) kecepatan perputaran medan rotor relatif terhadap stator; (e) kecepatan perputaran medan rotor relatif terhadap medan rotor.

Penyelesaian:

- (a) Relasi antara kecepatan medan putar relatif terhadap stator (kecepatan sinkron) dengan frekuensi dan jumlah kutub adalah $f = \frac{p n_s}{120}$. Jadi kecepatan perputaran medan putar adalah

$$n_s = \frac{120f}{p} = \frac{120 \times 50}{4} = 1500 \text{ rpm}$$

- (b) Frekuensi arus rotor adalah $f_2 = s f_1 = 0,05 \times 50 = 2,5 \text{ Hz}$.
 (c) Karena belitan rotor adalah juga merupakan belitan tiga fasa dengan pola seperti belitan stator, maka arus rotor akan menimbulkan pula medan putar seperti halnya arus belitan stator menimbulkan medan putar. Kecepatan perputaran medan putar rotor relatif terhadap rotor adalah $n_2 = \frac{120 f_2}{p} = \frac{120 \times 2,5}{4} = 75 \text{ Hz}$
 (d) Relatif terhadap stator, kecepatan perputaran medan rotor harus sama dengan kecepatan perputaran medan stator, yaitu kecepatan sinkron 1500 rpm.
 (e) Karena kecepatan perputaran medan rotor sama dengan kecepatan perputaran medan stator, kecepatan perputaran relatifnya adalah 0.

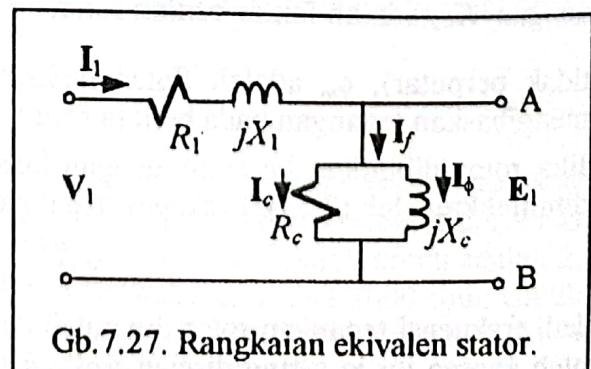
Rangkaian Ekvivalen

Rangkaian ekvivalen yang akan kita pelajari adalah rangkaian ekvivalen per fasa.

Rangkaian Ekvivalen Stator. Jika resistansi belitan primer per fasa adalah R_1 dan reaktansinya adalah X_1 , sedangkan rugi-rugi inti dinyatakan dengan rangkaian paralel suatu resistansi R_c dan reaktansi X_ϕ seperti halnya pada transformator. Jika V_1 adalah tegangan masuk per fasa pada belitan stator motor dan E_1 adalah tegangan imbas pada belitan stator oleh medan putar seperti diberikan oleh (7.56), maka kita akan mendapatkan hubungan fasor

$$V_1 = I_1(R_1 + jX_1) + E_1 \quad (7.61)$$

Fasor-fasor tegangan dan arus serta reaktansi pada persamaan (7.61) ini adalah pada frekuensi sinkron $\omega_s = 2\pi f_1$. Rangkaian ekvivalen stator menjadi seperti pada Gb.7.27, yang mirip rangkaian primer transformator. Perbedaan terletak pada besarnya I_f yang pada transformator berkisar antara 2 – 5 persen dari arus nominal, sedangkan pada motor asinkron arus ini antara 25 – 40 persen arus nominal, tergantung dari besarnya motor. Selain itu reaktansi bocor X_1 pada motor jauh lebih besar karena adanya celah udara dan belitan stator terdistribusi pada permukaan dalam stator sedangkan pada transformator belitan terpusat pada intinya. Tegangan E_1 pada terminal AB pada rangkaian ekvivalen ini haruslah merefleksikan peristiwa yang terjadi di rotor.



Gb.7.27. Rangkaian ekvivalen stator.

Rangkaian Ekvivalen Rotor. Jika rotor dalam keadaan berputar maka tegangan imbas pada rotor adalah E_{22} . Jika resistansi rotor adalah R_{22} dan reaktansinya adalah X_{22} maka arus rotor

adalah :

$$I_{22} = \frac{E_{22}}{(R_{22} + jX_{22})} \quad (7.62)$$

Perhatikanlah bahwa fasor-fasor tegangan dan arus serta nilai reaktansi pada persamaan (7.62) ini adalah pada frekuensi rotor $\omega_2 = 2\pi f_2$, berbeda dengan persamaan fasor (7.61). Kita gambarkan rangkaian untuk persamaan (7.62) ini seperti pada Gb.7.28.a.

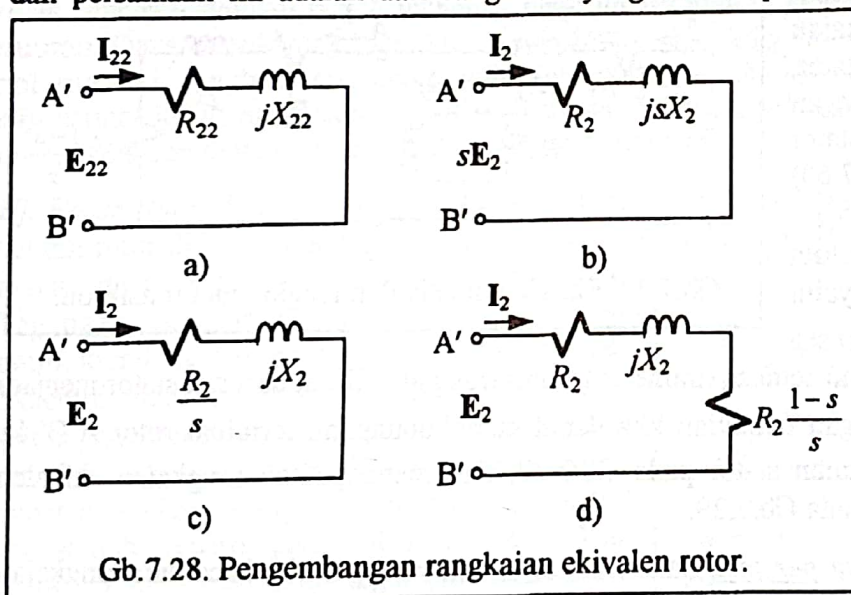
Menurut (7.59) $E_{22} = sE_2$ dimana E_2 adalah tegangan rotor dengan frekuensi sinkron ω_s . Reaktansi rotor X_{22} dapat pula dinyatakan dengan frekuensi sinkron; jika L_2 adalah induktansi belitan rotor (yang merupakan besaran konstan karena ditentukan oleh konstruksinya) maka kita mempunyai hubungan

$$X_{22} = \omega_2 L_2 = s\omega_s L_2 = sX_2 \quad (7.63)$$

Di sini kita mendefinisikan reaktansi rotor dengan frekuensi sinkron $X_2 = \omega_s L_2$. Karena Resistansi tidak tergantung frekuensi, kita nyatakan resistansi rotor sebagai $R_2 = R_{22}$. Dengan demikian maka arus rotor menjadi

$$I_2 = \frac{sE_2}{R_2 + jsX_2} \quad (7.64)$$

Persamaan fasor tegangan dan arus rotor (7.64) sekarang ini adalah pada frekuensi sinkron dan persamaan ini adalah dari rangkaian yang terlihat pada Gb.7.28.b. Tegangan pada terminal rotor A'B' adalah tegangan karena ada slip yang besarnya adalah sE_2 . Dari rangkaian ini kita dapat menghitung besarnya daya nyata yang diserap rotor per fasa, yaitu



Gb.7.28. Pengembangan rangkaian ekvivalen rotor.

terminal rotor A'B' adalah tegangan karena ada slip yang besarnya adalah sE_2 . Dari rangkaian ini kita dapat menghitung besarnya daya nyata yang diserap rotor per fasa, yaitu

$$P_{cr} = I_2^2 R_2 \quad (7.65)$$

Jika pembilang dan penyebut pada persamaan (7.64) kita bagi dengan s kita akan mendapatkan

$$I_2 = \frac{E_2}{\frac{R_2}{s} + jX_2} \quad (7.66)$$

Langkah matematis ini tidak akan mengubah nilai I_2 dan rangkaian dari persamaan ini adalah seperti pada Gb.7.28.c. Walaupun demikian ada perbedaan penafsiran secara fisik. Tegangan pada terminal rotor A'B' sekarang adalah tegangan imbas pada belitan rotor dalam keadaan rotor tidak berputar dengan nilai seperti diberikan oleh (7.57) dan bukan tegangan karena ada slip. Jika pada Gb.7.28.b. kita mempunyai rangkaian riil rotor dengan resistansi konstan R dan tegangan terminal rotor yang tergantung dari slip, maka pada Gb.7.28.c. kita mempunyai rangkaian ekvivalen rotor dengan tegangan terminal rotor tertentu dan resistansi yang tergantung dari slip. Tegangan terminal rotor pada keadaan terakhir ini kita sebut tegangan celah udara pada terminal rotor dan daya yang diserap rotor kita sebut

daya celah udara, yaitu :

$$P_g = I_2^2 \frac{R_2}{s} \quad (7.67)$$

Daya ini jauh lebih besar dari P_{cr} pada (7.65). Pada mesin besar nilai s adalah sekitar 0,02 sehingga P_g sekitar 50 kali P_{cr} . Perbedaan antara (7.67) dan (7.65) terjadi karena kita beralih dari tegangan rotor riil yang berupa tegangan *slip* ke tegangan rotor dengan frekuensi sinkron. Daya nyata P_g tidak hanya mencakup daya hilang pada resistansi belitan saja tetapi mencakup *daya mekanis* dari motor. Daya mekanis dari rotor ini sendiri mencakup daya keluaran dari poros motor untuk memutar beban ditambah daya untuk mengatasi *rugi-rugi rotasi* yaitu rugi-rugi akibat adanya gesekan dan angin. Oleh karena itu daya P_g kita sebut daya celah udara artinya daya yang dialihkan dari stator ke rotor melalui celah udara yang meliputi daya hilang pada belitan rotor (rugi tembaga rotor) dan daya mekanis rotor. Dua komponen daya ini dapat kita pisahkan jika kita menuliskan

$$\frac{R_2}{s} = R_2 + R_2 \left(\frac{1-s}{s} \right) \quad (7.68)$$

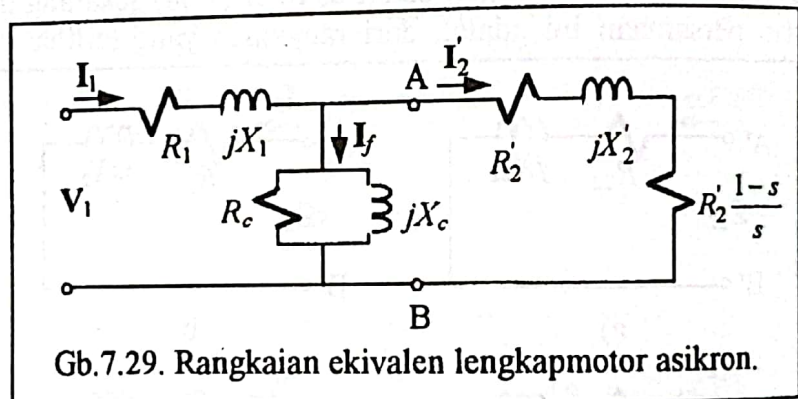
Suku pertama (7.68) akan memberikan daya hilang di belitan rotor (per fasa) $P_{cr} = I_2'^2 R_2$ dan suku kedua memberikan daya keluaran mekanik ekivalen

$$P_m = I_2'^2 R_2 \left(\frac{1-s}{s} \right) \quad (7.69)$$

Dengan cara ini kita akan mempunyai rangkaian ekivalen rotor seperti pada Gb.7.28.d.

Rangkaian Ekivalen Lengkap. Kita menginginkan satu rangkaian ekivalen untuk mesin asinkron yang meliputi stator dan rotor. Agar dapat menghubungkan rangkaian rotor dengan rangkaian stator, kita harus melihat tegangan rotor E_2 dari sisi stator dengan memanfaatkan (7.60) yang memberikan $E_1 = aE_2$.

Jika E_2 pada Gb.7.28.d. kita ganti dengan $E_1 = aE_2$, yaitu tegangan rotor dilihat dari sisi stator, maka arus rotor dan semua parameter rotor harus pula dilihat dari sisi stator menjadi I_2' , R_2' dan X_2' . Dengan demikian kita dapat menghubungkan terminal rotor A'B' ke terminal AB dari rangkaian stator pada Gb.7.27. dan mendapatkan rangkaian ekivalen lengkap seperti terlihat pada Gb.7.29.



Gb.7.29. Rangkaian ekivalen lengkap motor asinkron.

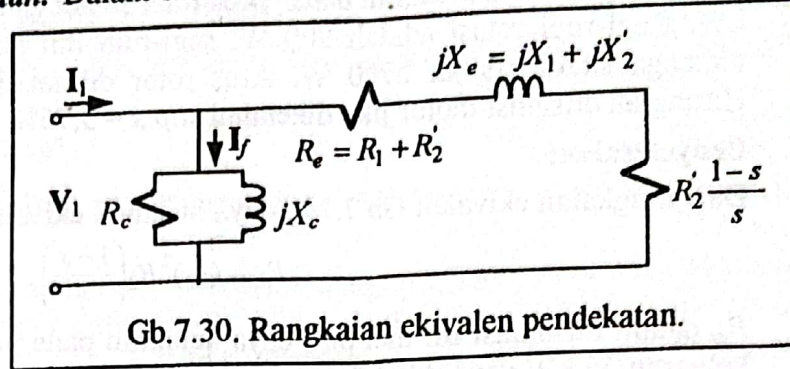
Aliran Daya. Aliran daya *per fasa* dalam motor asinkron dapat kita baca dari rangkaian ekivalen sebagai berikut. Daya (riil) yang masuk ke stator motor melalui tegangan V_1 dan arus I_1 digunakan untuk :

- mengatasi rugi tembaga stator : $P_{cs} = I_1^2 R_1$
- mengatasi rugi-rugi inti stator : P_{inti}
- daya masuk ke rotor, disebut daya celah udara $P_g = (I_2')^2 \frac{R_2'}{s}$, yang digunakan untuk
 - mengatasi rugi-rugi tembaga rotor : $P_{cr} = (I_2')^2 R_2'$
 - memberikan daya mekanis rotor $P_m = (I_2')^2 R_2' \left(\frac{1-s}{s} \right)$, yang terdiri dari :
 - daya untuk mengatasi rugi rotasi (gesekan dan angin) : P_{rotasi}
 - daya keluaran di poros rotor : P_o .

Jadi urutan aliran daya secara singkat adalah :

$$P_o = P_m - P_{rotasi} \quad ; \quad P_m = P_g - P_{cr} \quad ; \quad P_g = P_{in} - P_{inti} - P_{cs}$$

Rangkaian Ekuivalen Pendekatan. Dalam melakukan analisis motor asinkron kita sering menggunakan rangkaian ekuivalen pendekatan yang lebih sederhana seperti pada Gb.7.30. Dalam rangkaian ini kita rugi-rugi tembaga stator dan rotor disatukan menjadi $(I_2')^2 R_e$. Bagaimana R_e dan X_e ditentukan akan kita bahas berikut ini.



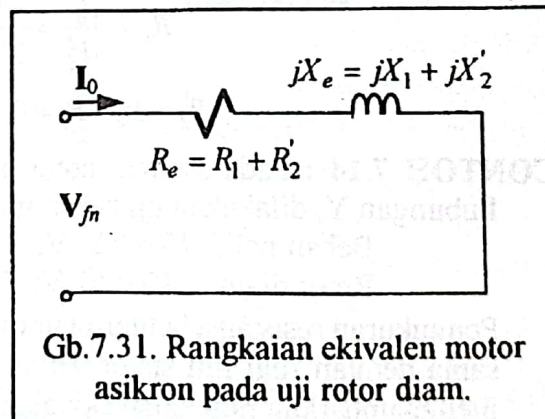
Penentuan Parameter Rangkaian

Pengukuran Resistansi. Resistansi belitan stator maupun belitan rotor dapat diukur. Namun perlu diingat bahwa jika pengukuran dilakukan dengan menggunakan metoda pengukuran arus searah dan pengukuran dilakukan pada temperatur kamar, harus dilakukan koreksi-koreksi. Dalam pelajaran lebih lanjut kita akan melihat bahwa resistansi untuk arus bolak-balik lebih besar dibandingkan dengan resistansi pada arus searah karena adanya gejala yang disebut *efek kulit*. Selain dari itu, pada kondisi kerja normal, temperatur belitan lebih tinggi dari temperatur kamar yang berarti nilai resistansi akan sedikit lebih tinggi.

Uji Beban Nol. Dalam uji beban nol stator diberikan tegangan nominal sedangkan rotor tidak dibebani dengan beban mekanis. Pada uji ini kita mengukur daya masuk dan arus saluran. Daya masuk yang kita ukur adalah daya untuk mengatasi rugi tembaga pada beban nol, rugi inti, dan daya celah udara untuk mengatasi rugi rotasi pada beban nol. Dalam uji ini *slip* sangat kecil, arus rotor cukup kecil untuk diabaikan sehingga biasanya arus eksitasi dianggap sama dengan arus uji beban nol yang terukur.

Uji Rotor Diam. Uji ini analog dengan uji hubng singkat pada transformator. Dalam uji ini belitan rotor di hubng singkat tetapi rotor ditahan untuk tidak berputar. Karena *slip* $s = 1$, maka daya mekanis keluaran adalah nol. Tegangan masuk pada stator dibuat cukup rendah untuk membatasi arus rotor pada nilai yang tidak melebihi nilai nominal. Selain itu, tegangan stator yang rendah (antara 10 – 20 % nominal) membuat arus magnetisasi sangat kecil sehingga dapat diabaikan. Rangkaian ekuivalen dalam uji ini adalah seperti pada Gb.7.31. Perhatikan bahwa kita mengambil tegangan fasa-netral dalam rangkaian ekuivalen ini.

Jika P_d adalah daya tiga fasa yang terukur dalam uji rotor diam, I_d adalah arus saluran dan V_d adalah tegangan fasa-fasa yang terukur dalam uji ini, maka



$$R_e = X_1 + jX_2' = \frac{P_d}{3I_d^2}$$

$$Z_e = \frac{V_d}{I_d \sqrt{3}} \quad (7.70)$$

$$X_e = \sqrt{Z_e^2 - R_e^2} = X_1 + X_2'$$

Jika kita menggunakan rangkaian ekuivalen pendekatan, pemisahan antara X_1 dan X_2' tidak diperlukan dan kita langsung memanfaatkan X_e .

CONTOH 7.12 : Daya keluaran pada poros rotor motor asinkron tiga fasa 50 Hz adalah 75 kW. Rugi-rugi rotasi adalah 900 W; rugi-rugi inti stator adalah 4200 W; rugi-rugi tembaga stator adalah 2700 W. Arus rotor dilihat dari sisi stator adalah 100 A. Hitunglah efisiensi motor jika diketahui slip $s = 3,75\%$.

Penyelesaian:

Dari rangkaian ekuivalen Gb.7.29., daya mekanik ekuivalen adalah

$$P_m = (I_2')^2 R_2' \left(\frac{1-s}{s} \right).$$

P_m dalam formulasi ini meliputi daya keluaran pada poros rotor dan rugi rotasi. Daya keluaran 75 kW yang diketahui, adalah daya keluaran pada poros rotor sedangkan rugi rotasi diketahui 900 W sehingga

$$P_m = 75000 + 900 = 75900 \text{ W}$$

dan rugi-rugi tembaga rotor adalah

$$P_{cr} = (I_2')^2 R_2' = \frac{P_m s}{1-s} = \frac{75900 \times 0,0375}{1-0,0375} = 2957 \text{ W}$$

Efisiensi motor adalah

$$\eta = \frac{P_{keluaran}}{P_{keluaran} + \text{rugi-rugi}} \times 100\% = \frac{75000}{75000 + 4200 + 2700 + 900 + 2957} \times 100\% = 87,45\%$$

CONTOH 7.13 : Uji rotor diam pada sebuah motor asinkron tiga fasa rotor belitan, 200 HP, 380 V, hubungan Y, memberikan data berikut: daya masuk $P_d = 10 \text{ kW}$, arus saluran $I_d = 250 \text{ A}$, $V_d = 65 \text{ V}$ dan pengukuran resistansi belitan rotor memberikan hasil $R_1 = 0,02 \Omega$ per fasa. Tentukan resistansi rotor dilihat di stator.

Penyelesaian :

Menurut (7.70) kita dapat menghitung

$$R_e = \frac{P_d}{3I_d^2} = \frac{10000}{3 \times (250)^2} = 0,0533 \Omega \text{ per fasa}$$

$$R_2' = R_e - R_1 = 0,0533 - 0,02 = 0,0333 \Omega \text{ per fasa}$$

CONTOH 7.14 : Pada sebuah motor asinkron tiga fasa 10 HP, 4 kutub, 220 V, 50 Hz, hubungan Y, dilakukan uji beban nol dan uji rotor diam.

Beban nol : $V_0 = 220 \text{ V}$; $I_0 = 9,2 \text{ A}$; $P_0 = 670 \text{ W}$

Rotor diam : $V_d = 57 \text{ V}$; $I_d = 30 \text{ A}$; $P_d = 950 \text{ W}$.

Pengukuran resistansi belitan stator menghasilkan nilai $0,15 \Omega$ per fasa. Rugi-rugi rotasi sama dengan rugi inti stator. Hitung: (a) parameter-parameter yang diperlukan untuk menggambarkan rangkaian ekuivalen (pendekatan); (b) arus eksitasi dan rugi-rugi inti.

Penyelesaian :

a). Karena terhubung Y, tegangan per fasa adalah $V_1 = \frac{220}{\sqrt{3}} = 127 \text{ V}$.

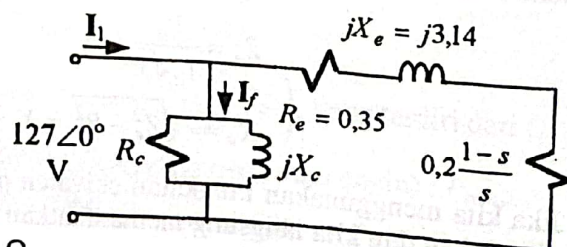
Uji rotor diam memberikan :

$$R_e = \frac{P_d}{3(I_d)^2} = \frac{950}{3 \times (30)^2} = 0,35 \Omega.$$

$$R_2' = R_e - R_1 = 0,35 - 0,15 = 0,2 \Omega$$

$$Z_e = \frac{V_d}{\sqrt{3} \times I_d} = \frac{57}{\sqrt{3} \times 30} = 1,1 \Omega$$

$$X_e = \sqrt{Z_e^2 - R_e^2} = \sqrt{(1,1)^2 - (0,35)^2} = 1,04 \Omega$$



b). Pada uji beban nol, arus rotor cukup kecil untuk diabaikan; jadi arus yang mengalir pada uji beban nol dapat dianggap arus eksitasi I_f .

$$\text{Daya pada uji beban nol } P_0 = 670 = V_0 I_f \cos \theta \sqrt{3} \Rightarrow \cos \theta = \frac{670}{220\sqrt{3} \times 9,2} = 0,19 \text{ lagging.}$$

$$\text{Jadi : } I_f = 9,2 \angle 0 = 9,2 \angle -79^\circ.$$

$$\text{Rugi inti : } P_{\text{inti}} = P_0 - 3 \times I_0^2 R_0 = 670 - 3 \times 9,2^2 \times 0,15 = 632 \text{ W}$$

CONTOH 7.15 : Motor pada contoh 7.14. dikopel dengan suatu beban mekanik, dan pengukuran pada belitan stator memberikan data : daya masuk 9150 W, arus 28 A, faktor daya 0,82. Tentukanlah : (a) arus rotor dilihat dari sisi stator; (b) daya mekanis rotor; (c) slip yang terjadi; (d) efisiensi motor pada pembebanan tersebut jika diketahui rugi rotasi 500 W.

Penyelesaian :

a). Menggunakan tegangan masukan sebagai referensi, dari data pengukuran dapat kita ketahui fasor arus stator, yaitu: $I_1 = 28 \angle -35^\circ$. Arus rotor dilihat dari sisi stator adalah :

$$\begin{aligned} I_2' &= I_1 - I_f = 28 \angle -35^\circ - 9,2 \angle -79^\circ \\ &= 28(0,82 - j0,57) - 9,2(0,19 - j0,98) = 21,2 - j6,94 = 22,3 \angle -18^\circ \text{ A} \end{aligned}$$

b). Daya mekanis rotor adalah :

$$\begin{aligned} P_m &= P_{\text{in}} - P_{\text{inti}} - P_{\text{cs}} - P_{\text{cr}} \\ &= 9150 - 632 - 3 \times 28^2 \times 0,15 - 3 \times 22,3^2 \times 0,2 = 7867 \text{ W} \end{aligned}$$

c). Slip dapat dicari dari formulasi $P_g = P_{\text{in}} - P_{\text{inti}} - P_{\text{cs}} = \frac{3 \times (I_2')^2 R_2'}{s}$.

$$s = \frac{3(I_2')^2 R_2'}{P_g} = \frac{3 \times 22,3^2 \times 0,2}{9150 - 632 - 3 \times 28^2 \times 0,15} = 0,0365 \text{ atau } 3,65 \%$$

e). Rugi rotasi = 500 W.

$$\text{Daya keluaran sumbu rotor : } P_o = P_m - P_{\text{rotasi}} = 7867 - 500 = 7367 \text{ W}$$

$$\text{Efisiensi motor : } \eta = \frac{P_o}{P_{\text{in}}} \times 100\% = \frac{7367}{9150} \times 100\% = 80\%$$

Torka

Pada motor asinkron terjadi alih daya dari daya listrik di stator menjadi daya mekanik di rotor. Sebelum dikurangi rugi-tembaga rotor, alih daya tersebut adalah sebesar daya celah udara P_g dan ini memberikan torka yang kita sebut torka elektromagnetik dengan perputaran sinkron. Jadi jika T adalah torka elektromagnetik maka

$$P_g = T \omega_s \quad \text{atau} \quad T = \frac{P_g}{\omega_s} \quad (7.71)$$

Torka Asut. Torka asut (*starting torque*) adalah torka yang dibangkitkan pada saat $s = 1$, yaitu pada saat perputaran masih nol. Besarnya arus rotor ekuivalen berdasarkan rangkaian ekuivalen Gb.7.30. dengan $s = 1$ adalah

$$I_2' = \frac{V_1}{\sqrt{(R_1 + R_2')^2 + (X_1 + X_2')^2}} \quad (7.72)$$

Besarnya torka asut adalah

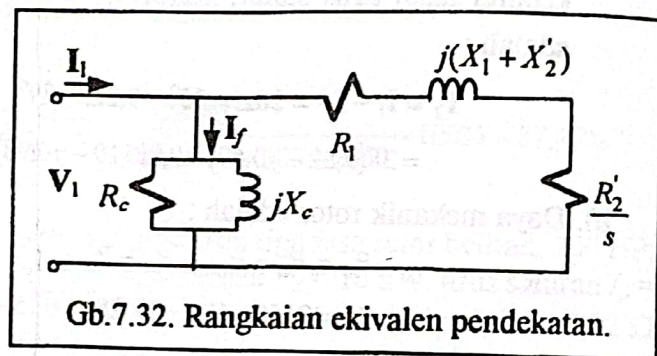
$$T_a = \frac{P_g}{\omega_s} = \frac{1}{\omega_s} \times 3(I_2')^2 \times \frac{R_2'}{s} = \frac{1}{\omega_s} \frac{3V_1^2 R_2'}{(R_1 + R_2')^2 + (X_1 + X_2')^2} \quad (7.73)$$

Pada saat $s = 1$ impedansi sangat rendah sehingga arus menjadi besar. Oleh karena itu pada waktu pengasutan tegangan direduksi dengan menggunakan cara-cara tertentu untuk membatasinya arus. Sudah barang tentu penurunan tegangan ini akan memperkecil torka asut. Persamaan (7.73) menunjukkan bahwa jika tegangan diturunkan setengahnya, torka asut akan turun menjadi seperempatnya.

Torka maksimum. Torka ini penting diketahui, bahkan menjadi pertimbangan awal pada waktu perancangan mesin dilakukan. Torka ini biasanya bernilai 2 sampai 3 kali torka nominal dan merupakan kemampuan cadangan mesin. Kemampuan ini memungkinkan motor melayani beban-beban puncak yang berlangsung beberapa saat saja. Perlu diingat bahwa torka puncak ini tidak dapat diberikan secara kontinyu sebab akan menyebabkan pemanasan yang akan merusak isolasi.

Karena torka sebanding dengan daya celah udara P_g , maka torka maksimum terjadi jika alih daya ke rotor mencapai nilai maksimum. Dari rangkaian ekuivalen pendekatan Gb.7.32., teorema alih daya maksimum mensyaratkan

bahwa alih daya ke $\frac{R_2'}{s}$ akan maksimum jika



Gb.7.32. Rangkaian ekuivalen pendekatan.

$$\frac{R_2'}{s_m} = \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2} \quad \text{atau} \quad s_m = \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}} \quad (7.74)$$

Persamaan (7.74) memperlihatkan bahwa s_m dapat diperbesar dengan memperbesar R_2' . Suatu motor dapat dirancang agar torka asut mendekati torka maksimum dengan menyesuaikan nilai resistansi rotor.

Arus rotor pada waktu terjadi alih daya maksimum adalah

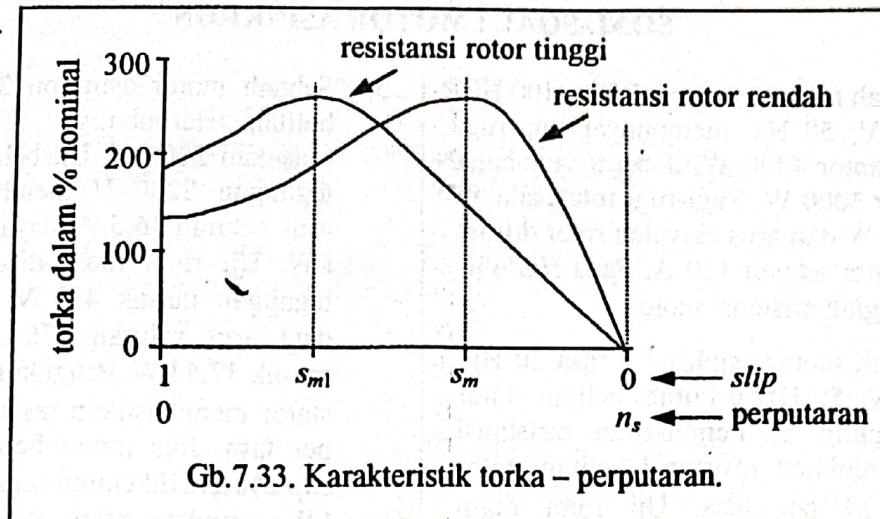
$$\begin{aligned} I_2' &= \frac{V_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s_m}\right)^2 + (X_1 + X_2')^2}} = \frac{V_1}{\sqrt{\left(R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}\right)^2 + (X_1 + X_2')^2}} \\ &= \frac{V_1}{\sqrt{2R_1^2 + 2R_1\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2} + 2(X_1 + X_2')^2}} \end{aligned} \quad (7.75)$$

Torka maksimum adalah

$$T_m = \frac{1}{\omega_s} \times 3(I_2')^2 \frac{R_2'}{s_m} = \frac{1}{\omega_s} \frac{3V_1^2}{2\left(R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}\right)} \quad (7.76)$$

Persamaan (7.76) ini memperlihatkan bahwa torka maksimum tidak tergantung dari besarnya resistansi rotor. Akan tetapi menurut (7.74) slip maksimum s_m berbanding lurus memberikan torka maksimum akan tetapi tidak mengubah besarnya torka maksimum itu sendiri.

Karakteristik Torka – Perputaran. GB.7.33. memperlihatkan bagaimana torka berubah terhadap perputaran ataupun terhadap *slip*.



Pada gambar ini diperlihatkan pula pengaruh resistansi belitan rotor terhadap karakteristik torka-perputaran. Makin tinggi resistansi belitan rotor, makin besar *slip* tanpa mengubah besarnya torka maksimum.

Aplikasi. Motor dibagi dalam beberapa katagori menurut karakteristik spesifiknya sesuai dengan kemampuan dalam penggunaannya. Berikut ini data motor yang secara umum digunakan, untuk keperluan memutar beban dengan kecepatan konstan dimana tidak diperlukan torka asut yang terlalu tinggi. Beban-bekan yang dapat dilayani misalnya kipas angin, *blower*, alat-alat pertukangan kayu, pompa sentrifugal. Dalam keadaan tertentu diperlukan pengasutan dengan tegangan yang direduksi dan jenis motor ini tidak boleh dibebani lebih secara berkepanjangan karena akan terjadi pemanasan.

HP	jumlah kutub	torka asut %	torka maks	arus asut	<i>slip</i>	faktor daya	efisiensi
0,5	2	150	sampai	500 %	3 %	0,87	87 %
sampai	4	150	250 %	sampai	sampai	sampai	sampai
200	6	135	tidak	1000 %	5 %	0,89	89 %
	8	125	kurang				
	10	120	dari				
	12	115	200 %				
	14	110					
	16	105					

Pengendalian. Dalam pemakaian, kita harus memperhatikan pengendaliannya. Pengendalian berfungsi untuk melakukan asut dan menghentikan motor secara benar, membalik perputaran tanpa merusakkan motor, tidak mengganggu beban lain yang tersambung pada sistem pencatu yang sama. Hal-hal khusus yang perlu diperhatikan dalam pengendalian adalah : (a) pembatasan torka asut (agar beban tidak rusak); (b) pembatasan arus asut; (c) proteksi terhadap pembebanan lebih; (d) proteksi terhadap penurunan tegangan; (e) proteksi terhadap terputusnya salah satu fasa (yang dikenal dengan *single phasing*).

Kita cukupkan sampai di sini pembahasan kita mengenai motor asinkron. Pengetahuan lebih lanjut akan kita peroleh pada pelajaran khusus mengenai mesin-mesin listrik.