

## MESIN LISTRIK ARUS BOLAK-BALIK

Mesin Arus Bolak-balik terdiri dari generator dan motor listrik. Baik generator maupun motor listrik terbagi menjadi Mesin Sinkron (serempak) maupun Mesin Asinkron (tak serempak).

Dikatakan mesin sinkron karena jumlah putarannya sinkron atau sama dengan jumlah frekuensinya. Misalnya jika  $f = 50$  Hertz, maka jumlah putarannya  $50 \times 60$  atau  $50 \times 60 = 3000$  putaran permenit (PPM) sehingga disebut mesin sinkron.

### 1. Sifat-sifat Mesin Sinkron

1. Jumlah putarannya tetap, jika beban terlalu berat maka motor akan berhenti.

$$N_s = \frac{120}{P} \times f \dots\dots\dots 5-1$$

$N_s$  = putaran sinkron (Rpm)  
 $F$  = frekuensi (Hertz)  
 $P$  = jumlah kutub

2. Memerlukan gerak mula oleh motor lain
3. Sanggup dioprasikan pada seluruh daerah faktor kerja (leading atau leagging)

Dari ketiga sifat tersebut, maka motor sinkron jarang digunakan, tetapi generator sinkron banyak digunakan untuk pembangkit energi listrik.

### 2. Sifat-sifat mesin Asinkron

Dikatakan mesin Asinkron (tak serempak), karena putarannya tak sama dengan jumlah frekuensinya, jadi jumlah putarannya selalu lebih rendah karena adanya slip kecepatan.

Sifat-sifat Mesin Asinkron

1. Mempunyai slip kecepatan, yang merupakan perbedaan kecepatan sinkron dengan kecepatan sebenarnya.

$$\text{Slip} = N_s - N \dots\dots\dots 5-2$$

$$\text{Prosentase Slip} \rightarrow S = (N_s - N) / N_s \times 100 \% \dots\dots\dots 5-3$$

$N_s$  = Kecepatan sinkron  
 $N$  = Kecepatan sebenarnya  
 $S$  = Slip

2. Mudah dijalankan
3. Besar tenaganya.

### 3. MOTOR INDUKSI

#### *Konstruksi Motor Induksi*

- 1). **Stator merupakan bagian motor yang diam terdiri dari**

- a. rumah stator dari besi tuang

- b. inti stator dari besi lunak atau baja silikon
- c. alur dan gigi, materialnya sama dengan dengan inti, dimana alur itu adalah tempat meletakkan belitan
- d. belitan stator dari tembaga.

**2). Rotor merupakan bagian yang berputar, terdiri dari :**

- a. Inti rotor, bahanya dibuat sama dengan inti stator
- b. Alur dan gigi, materialnya sama dengan inti, yaitu tempat meletakkan lilitan.
- c. Belitan rotor, bahannya dari tembaga dan konstruksinya ada dua macam
  - c.1. Motor induksi dengan rotor sangkar atau rotor kurungan (Squirrel Cage) → Tiap alur terdapat batang tembaga atau alumunium tak berisolasi. Ujung-ujungnya dihubung singkat oleh cincin tembaga sehingga merupakan kurungan.
  - c.2. Motor induksi dengan rotor belitan dan disebut juga motor induksi gelang seret (cincin geser) atau slipring motor.

**3.2.Prinsip Dasar Motor Induksi**

- 1). Jika kumparan motor diberi arus listrik, maka timbul medan putar pada sekitar lilitan stator dengan kecepatan :

$$N_s = \frac{120}{P} f$$

- 2). Dalam medan putar ada penghantar yang merupakan rangkaian tertutup, sehingga diinduksikan ggl sebesar  $E_s = 4,44 \times f \times N \times Q_m$  pada saat rotor berputar.
- 3). GGL induksi menyebabkan arus induksi (I) dalam penghantar tersebut, sehingga penghantar bearus (rotor) akan mengalami gaya lorent (F) yang mengakibatkan munculnya torsi.
- 4). Penghantar atau rotor dipasang pada tromol dengan poros bekerja suatu kopel (torsi) akibatnya tromol tersebut berputar pada porosnya.

**Slip (S)**

Slip Timbul karena perbedaan perputaran medan putar stator dan perputaran rotor.

- 1). Slip Mutlak →  $S = N_s - N$
- 2). % Slip →  $S = (N_s - N) / N_s \times 100 \%$

Pengaruh Slip Terhadap Frekuensi arus rotor, Tegangan induksi dan Reaktansi Kumparan.

Jika motor masih diam, maka frekuensi arus rotor = frekuensi penyedia

Jika motor jalan, maka frekuensi dipengaruhi slip

Misalkan : frekuensi arus rotor adalah  $f_2$

$$N_s = 120/P \times f_1 \quad \rightarrow \quad f_1 = (N_s \times P) / 120 \quad \dots\dots\dots 5-4$$

$$\text{Kecepatan Slip} \rightarrow N_s - N = (120 \times f_2) / P$$

$$P(N_s - N) = 120 f_2 \quad \rightarrow \quad f_2 = P(N_s - N) / 120 \quad \dots\dots\dots 5-5$$

Bandingkan  $f_2$  dengan  $f_1$

$$f_1 / f_2 = \frac{P (N_s - N) / 120}{(N_s \times P) / 120}$$

$$F_1 / f_2 = P (N_s - N) / 120 \times 120 / (P \times N_s)$$

$$f_1 / f_2 = (N_s - N) / N_s$$

$$f_1 / f_2 = S \rightarrow f_2 = S f_1 \dots\dots\dots 5-6$$

$f_1$  = Frekuensi penyedia

$f_2$  = frekuensi arus rotor

**Tegangan Induksi**

$$E^1 = 4,44 \times f_1 \times N \times Q_m \rightarrow \text{GGL pada waktu star (diam)}$$

$$E^2 = 4,44 \times s f_1 \times N \times Q_m \rightarrow \text{GGL pada waktu motor berputar}$$

Jadi :

$$E_2 = S E_1 \dots\dots\dots 5-7$$

**Reaktansi kumparan**

$$X_1 = 2 \pi \times f_1 \times L \rightarrow \text{Reaktansi pada waktu motor star}$$

$$X_2 = 2 \pi \times S f_1 \times L \rightarrow \text{Reaktansi pada waktu motor berputar}$$

Jadi :

$$X_2 = S X_1 \dots\dots\dots 5-8$$

**Contoh Soal :**

Motor induksi 3 fase, 4 kutub bekerja dengan sumber tegangan yang frekuensinya 50 Hz.

Hitung : a. Kecepatan medan putar stator

b. Kecepatan rotor jika slip 0,04

c. frekuensi arus rotor jika slip 0,03

d. frekuensi motor pada waktu diam

Jawab :

a.  $N_s = (120 \times f) / P = (120 \times 50) / 4 = 1500 \text{ Rpm}$

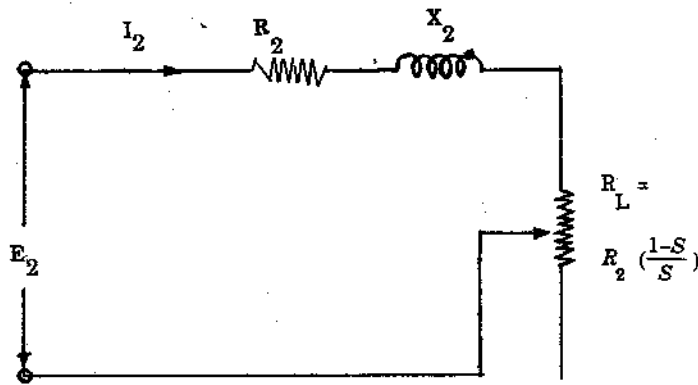
b.  $S = (N_s - N) / N_s \rightarrow 0,04 = (1500 - N) / 1500$   
 $N = 1440 \text{ Rpm}$

c.  $f_2 = S f_1 = 0,03 \times 50 = 1,5 \text{ Hz}$

d. Pada waktu motor diam  $S = 1$   
jadi  $f_2 = f_1 = 50 \text{ Hz}$ .

**.Rangkaian Rotor Motor Induksi**

Belitan/kumparan rotor bila digambarkan secara rangkaian listrik sebagai berikut.



Gambar 5-4. Rangkaian rotor motor induksi

- $R_2$  = Tahanan dari kumparan rotor dalam ohm perfase
- $X_2$  = reaktansi kumparan rotor pada waktu masih diam dalam ohm perfase
- $R_2 \left( \frac{1-s}{s} \right)$  adalah simulasi beban dari motor induksi
- $I_2$  = arus yang mengalir dari kumparan rotor
- $E_2$  = ggl yang dibangkitkan oleh kumparan rotor, pada waktu rotor dalam keadaan diam

**Pada waktu rotor bergerak**

$$E_{2s} = S \times E_2$$

$$X_{2s} = S \times X_2$$

Jadi  $I_2 = (E_2) / \sqrt{(R_2)^2 + (X_{2s})^2}$

$$= S E_2 / \sqrt{(R_2)^2 + S (X_2)^2}$$

$$= E_2 / \sqrt{(R_2/S)^2 + (X_2)^2} \dots\dots\dots 5-9.$$

Dari rangkaian rotor tersebut dapat dituliskan :

$$R_2/S = R_2 + R_2 (1-S)/S$$

Jika persamaa tersebut dikalikan  $(I_2)^2$  , maka :

$$(I_2)^2 R_2/S = (I_2)^2 R_2 + (I_2)^2 R_2 (1-S)/S \dots\dots\dots 5-10$$

Dimana :

$(I_2)^2 R_2/S =$  Daya yang diterima rotor ( $P_2$ ), atau daya input rotor (daya masuk rotor) atau daya yang ditarik oleh rotor

$$(I_2)^2 R_2 = \text{Rugi-rugi tembaga rotor atau daya yang hilang berupa panas } (P_{CU})$$

$(I_2)^2 R_2 (1 - S)/S =$  Daya keluaran (output) rotor berupa daya mekanik ( $P_m$ ) atau daya output rotor yang masih kotor.

Sehingga didapatkan :

Rugi tembaga rotor ( $P_{CuR} = S \times$  (daya masuk rotor atau ( $P_2$ ))

Daya mekanik ( $P_m$ ) =  $(1 - S) \times$  (daya masuk rotor atau ( $P_2$ ))

$$P_2 : P_m : (P_{CuR}) = 1 : (1 - S) : S$$

Contoh

Motor induksi 3 fase rotor kurung, 4 kutub, 60 Hz sedang bekerja dengan kecepatan 1710 Rpm. Rugi tembaga rotor 6 KW/fase. Hitung :

daya masuk rotor

frekuensi arus rotor

Jawab :

$$N_s = 120 f / P = 120 \times 60 / 4 = 1800 \text{ Rpm}$$

$$N = 1710 \text{ Rpm}$$

$$S = (N_s - N) / N_s = (1800 - 1710) / 1800 = 0,05 \text{ atau } 5 \%$$

Daya masuk rotor = rugi tembaga rotor /  $S$

$$= (6 \text{ KW/fase}) / 0,05 = 120 \text{ KWh per fase}$$

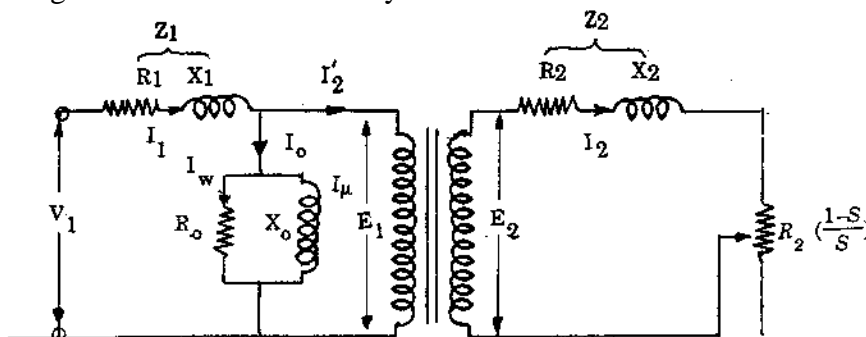
Frekuensi arus rotor

$$. f_2 = S f_1 = 0,05 \times 60 = 3 \text{ Hz.}$$

Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi

Rangkaian ekuivalen motor induksi bisa dilakukan dengan rangkaian ekuivalen sebenarnya dan rangkaian ekuivalen pendekatan

Rangkaian Ekuivalen Sebenarnya



Gambar 5-5. Rangkaian listrik motor induksi

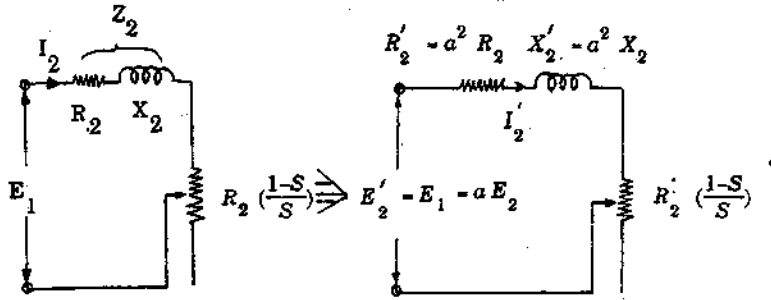
1). Rangkaian kumparan stator

$R_1 =$  tahanan kumparan stator  $\rightarrow$  Ohm per fase

$X_1 =$  reaktansi kumparan stator  $\rightarrow$  Ohm per fase

- Ro = tahanan rangkaian penguat → Ohm perfase
- Xo = Reaktansi rangkaian penguat → Ohm perfase
- I<sub>1</sub> = arus yang mengalir pada kumparan stator jika motor berbeban
- I<sub>o</sub> = Arus yang mengalir pada kumparan statornya jika motor tidak berbeban
- E<sub>1</sub> = GGL induksi pada kumparan stator.

2). Rangkaian kumparan rotor



GAMBAR 5-6. RANGKAIAN ROTOR MOTOR INDUKSI YANG DILIHAT/DIPINDAHKAN KESISI STATOR

$E_2' = a E_2 = E_1$       Dimana  $a =$  perbandingan transformasi

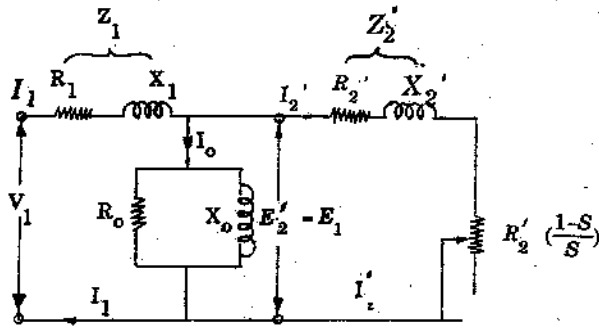
$I_2' = I_2 / a$

$a = (N_1 \text{ KW}_1) / N_2 \text{ KW}_2$

$R_2' / S = a^2 R_2 / S$

$X_2' = a^2 X_2$

- N<sub>1</sub> = Banyak lilitan kumparan stator
- N<sub>2</sub> = Banyak lilitan kumparan rotor
- KW<sub>1</sub> = Kp<sub>1</sub> x Kd<sub>1</sub> = faktor belitan stator
- KW<sub>2</sub> = Kp<sub>2</sub> x Kd<sub>2</sub> = faktor belitan rotor
- Kp = faktor kisar belitan
- Kd = faktor distribusi dari belitan



Gambar 5-4. Rangkaian ekivalen yang sebenarnya motor induksi

Dari Gambar rangkaian ekivalen sebenarnya didapatkan :

1). Impedansi rangkaian stator

$$Z_1 = (R_1 + jX_1) = \sqrt{(R_1)^2 + (X_1)^2} \angle \arctg \frac{X_1}{R_1}$$

2). Impedansi Rangkaian penguat

$$Z_0 = 1/Y_0 = \frac{1}{1/R_0 - j1/X_0}$$

$$Z_0 = \frac{1}{\sqrt{(1/R_0)^2 + (1/X_0)^2} \angle \arctg X_0/R_0}$$

3). Impedansi rotor yang telah dipindahkan ke stator

$$Z_2' = \left(\frac{R_2'}{s}\right)^2 + jX_2'^2$$

$$Z_2' = \sqrt{(R_2'/s)^2 + (X_2')^2} \angle \arctg X_2' / \frac{R_2'}{s}$$

4). Impedansi total dari rangkaian yang diberikan kesumber tegangan  $V_1$

$$Z_{total} = Z_1 + \frac{Z_0 \cdot Z_2'}{Z_0 + Z_2'} = [Z_{total} \angle Q$$

5). Arus stator atau arus jala-jala yang ditarik oleh stator ( $I_1$ )

$$I_1 = \frac{V_1}{Z_{total}} = [I_1] \angle Q$$

6). Daya input stator ( $P_1$ ) atau daya yang ditarik stator

$$P_1 = V_1 I_1 \cos Q$$

7). Faktor daya input

$$(P.F) \text{ input} = \cos Q$$

8). Arus yang mengalir pada rotor

$$I'_2 = I_1 \frac{Z_0}{Z_0 + Z_2}$$

9). Arus beban nol

$$I_0 = I_1 \frac{Z'_2}{Z_0 + Z'_2}$$

10). Rugi tembaga stator

$$P_{CU R} = I_1^2 R_1 \rightarrow \text{watt}$$

11). Rugi Inti

$$P_c = I_0^2 R_0 \rightarrow \text{watt}$$

12). Daya masuk rotor (daya input rotor) atau daya yang ditarik rotor

$$P_2 = (I_2')^2 R_2 / S = I_1^2 R_{AB} \rightarrow \text{watt perfase}$$

13). Rugi tembaga rotor

$$P_{CU R} = (I_2')^2 R_2 = S \cdot P_2 \rightarrow \text{watt perfase}$$

14). Daya Mekanik atau daya output yang masih kotor

$$P_m = (I_2')^2 R_2' \left[ \frac{1-S}{S} \right] = (1-S)P_2 \rightarrow \text{watt perfase}$$

15). Daya ouput atau daya keluaran bersih (BHP)

$$P_o = P_m - (\text{rugi-rugi angin dan gesekan}) \rightarrow \text{watt perfase}$$

16). Efisiensi

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} \times 100\%$$

17). Untuk besaran dalam 3 fase, maka nilai  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_{cus}$ ,  $P_c$ ,  $P_m$ ,  $P_o$  dikalikan 3 sedangkan  $I_1$ ,  $I_2$  dan  $I_0$  tetap

18). Torsi Elektromagnetis

$$T_g = \frac{P_m}{2\pi N / 60} \text{ Newton-meter}$$

Contoh.

Suatu motor induksi 220 volt, 3 fase, 4 kutub, 50 Hz hubungan bintang (Y) mempunyai daya 5 HP.

$$R_1 = 0,45 \text{ Ohm}; \quad R_2' = 0,4 \text{ Ohm}; \quad B_0 = -1/3 \text{ Mho}$$

$$X_1 = 0,8 \text{ Ohm}; \quad X_2' = 0,8 \text{ Ohm}; \quad G_0 = 0$$

Rugi inti stator 50 watt, rugi angina dan gesekan 150 watt; untuk slip 0,04.

Pergunakanlah rangkaian sebenarnya untuk menghitung :



- |                       |                        |                     |
|-----------------------|------------------------|---------------------|
| a. Arus infut         | b. Pf input            | c. Daya masuk rotor |
| d. Daya masuk mekanik | e. Torsi elektromagnet | f. Daya output      |
| g. Efisiensi          |                        |                     |

Jawab :

Lihat gambar rangkaian sebenarnya, Ro atau Go = 0 (diabaikan), maka untuk Zo hanya terdiri dari Bo atau Xo; selanjutnya Zo diparalel dengan  $Z_2'$  menghasilkan  $Z_{AB}$

$$Z_{AB} = \frac{JX_o(R_2'/S + JX_2')}{(R_2'/S) + J(X_2' + X_o)} = \frac{J30(10 + J0,8)}{10 + J30,8}$$

$$= 8,58 + J 3,56 = 9,29 \angle 22,5^\circ$$

$$Z_{total} = Z_1 + Z_{AB} = (0,45 + J 0,8) + (8,58 + J 3,56)$$

$$= 10 \angle 25,8^\circ$$

$$V_1 = V_{fase} = \frac{220}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ$$

a). Arus input

$$I_1 = \frac{V_i}{Z_t} = \frac{127 \angle 0^\circ}{10 \angle 25,8^\circ} = 12,7 \angle -25,8^\circ \text{ ampere}$$

b). Pf Input

$$\cos 25,8^\circ = 0,9 \text{ terbelakang}$$

c). Daya masuk motor

$$P_2 = 3(I_2')^2 \left(\frac{R_2'}{S}\right) = 3I_1^2 R_{AB}$$

$$= 3 \times (12,7)^2 \times 8,58 = 4152 \text{ watt}$$

d). Daya mekanik

$$P_m = (1 - S) P_2$$

$$= (1 - 0,04) \times 4152 = 3986 \text{ watt}$$

e). Torsi elektromagnet

$$N_s = \frac{120f}{P} = \frac{120 - 50}{4} = 1500 \text{ Rpm}$$

$$N = (1 - S) N_s = (1 - 0,04) 1500 = 1440 \text{ Rpm}$$

Jadi :

$$T_g = \frac{P_m}{2\pi N / 60} = \frac{3986}{2\pi 1440 / 60} = 26,5 \text{ N-m}$$

f). Daya output

$$P_o = P_m - \text{rugi-rugi angin dan gesekan}$$

$$= 3986 - 150 = 3836 \text{ watt}$$

g). Efisiensi :

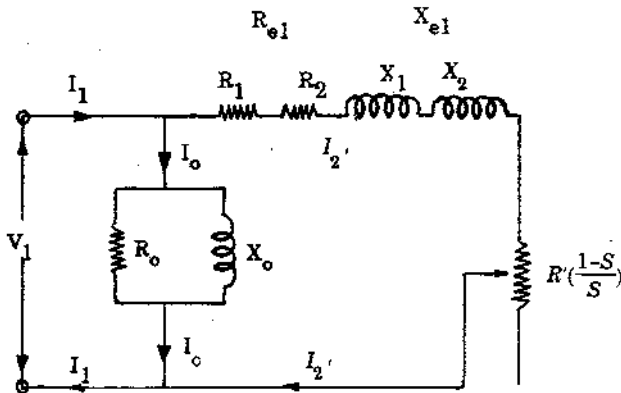
$$\eta = \frac{P_o}{P_i} \times 100\% = \frac{P_o}{P_o + \text{rugi} - \text{rugi inti}} \times 100\%$$

Rugi-rugi :

$P_{cus} = 3(I_1')^2 R_1 = 3 \times (12,7)^2 \times 0,45$	= 218 watt
$P_c = \text{rugi-rugi inti stator}$	= 50 watt
$P_{cur} = (I_2')^2 R_2 = S \cdot P_2 = 0,04 \times 4152$	= 166 watt
Rugi angin dan gesekan	= 150 watt
Rugi-rugi total	= 584 watt

$$\eta = \frac{3836}{3836 + 584} \times 100\% = 86,8 \%$$

### 3.6.2. Rangkaian Ekuivalen Pendekatan



Gambar 5-8. Rangkaian ekuivalen pendekatan dari motor induksi

Rangkaian ekuivalen pendekatan dibuat untuk memudahkan perhitungan, dari gambar 5-8  $Z^1$  dan  $Z^2$ , kemudian diparalelkan dengan  $Z_o$ . Analisis perhitungannya sama dengan analisis perhitungan rangkaian sebenarnya; Hasilnya berbeda sekitar 2-5% sehingga masih dalam toleransi. Hasil kesalahan 2-5% tersebut disebabkan pada rangkaian ekuivalen pendekatan arus  $I^1$  tidak melalui  $Z^1$  demikian pula  $I_o$ .

### Torsi Pada Motor Induksi

1). Torsi yang dibangkitkan oleh motor, waktu rotornya belum berputar ( $T^{WBB}$ )

$$T_{WBB} = K_1 E_2 I_2 \cos Q_2 \rightarrow N - m$$

$E_2$  adalah GGL induksi di rotor, waktu belum berputar

$I_2$  adalah arus rotor

$\cos Q_2$  adalah faktor kerja rotor

$$K_1 = \frac{3}{2\pi N_s}$$

2). *Torsi start pada motor induksi*

$$T_s = \frac{K_1 E_2^2 R_2}{R_2^2 + X_2^2} \rightarrow \text{N-m}$$

$E_2$  = GGL induksi di rotor, waktu belum berputar

$R_2$  = Resistansi rotor per fase

$X_2$  = reaktansi rotor per fase

Catatan : Torsi start maksimum jika  $R_2 = X_2$

3). *Torsi motor waktu rotor sudah berputar*

$$T_{WB} = \frac{K_1 (SE_2)^2 R_2}{R_2 + (SX_2)^2}$$

$S$  = Slip

Catatan : Torsi motor maksimum waktu berputar

$T_{WBmak} \rightarrow$  jika  $R_2 = SX_2$

4). *Torsi Beban*

$$T_B = \frac{3(I_2')^2 R_2}{S} = \frac{P_m}{1-S}$$

$I_2'$  adalah arus rotor yang ditinjau dari stator

$P_m$  adalah daya mekanik

5). *Hubungan antara torsi maksimum waktu rotor berputar ( $T_{WBmak}$ ) dengan torsi beban penuh ( $T_{BP}$ )*

$$\frac{T_{BP}}{T_{WBmak}} = \frac{2aS_{BP}}{a^2 + S_{BP}^2}$$

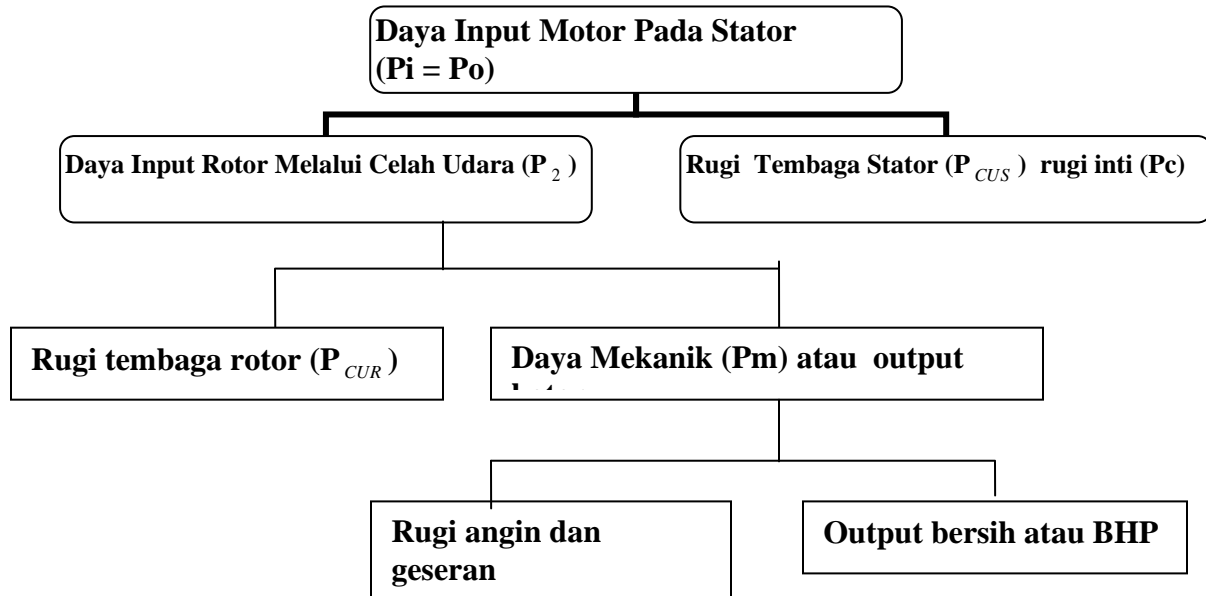
$S_{BP}$  adalah slip pada waktu beban penuh

$$a = \frac{R_2}{X_2}$$

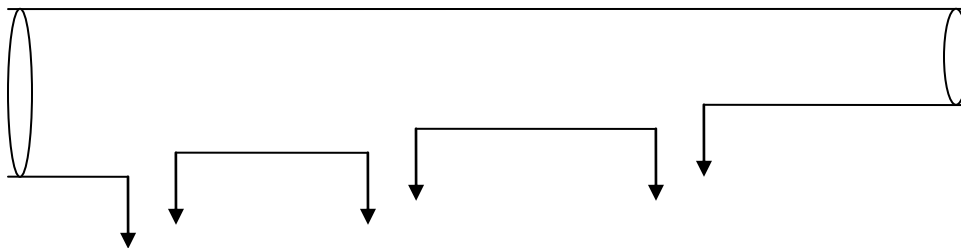
6). Hubungan antara torsi start ( $T_s$ ) dengan torsi maksimum waktu berputar ( $T^{WBmak}$ )

$$\frac{T_s}{T_{WBmaks}} = \frac{2a}{1+a^2}$$

**.Tingkatan Daya Motor Induksi**



Gambar 5-9. Tingkatan daya pada motor induksi



Gambar 5-10

1. Motor induksi 3 fase, 400volt, 6 kutub, 60 Hz bekerja pada kecepatan 1140 Rpm dengan input 40 KW pada faktor kerja 0,8 terbelakang. Rugi stator total 1 KW, rugi angin dan geseran 2 KW. Hitung :

- Slip dan arus input
- Rugi tembaga rotor

Daya output

Efisiensi

Jawab :

$$N_s = \frac{120 \times 60}{6} = 1200 \text{ Rpm}$$

$$S = \frac{1200 - 1140}{1200} = 0,05 \text{ atau } 5 \%$$

$$P_i = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos Q$$

$$4000 = \sqrt{3} \cdot 400 \cdot I \cdot 0,8 \rightarrow I = 72,2 \text{ Amper}$$

b. Input motor	=	40 KW
Rugi stator	=	1 KW
Daya masuk rotor	=	40 - 1 = 39 KW
Rugi tembaga rotor	=	S x Daya masuk rotor
	=	0,05 x 39 = 1,95 KW

c. Daya mekanik	=	39 (1 - 0,05) = 37,05 KW
Daya output (BHP)	=	37,05 - 2 = 35,05 KW

d. Efisiensi motor	=	$\frac{P_i}{P_o} \times 100\%$
	=	$\frac{35,05}{40} \times 100\% = 87,6\%$

Motor induksi rotor kurung 3 fase, 8 kutub, 50 Hz, mempunyai  $R_{rotor} = 0,001 \text{ Ohm}$  perfase,  $X_{(0)rotor} = 0,005 \text{ Ohm}$  perfase;  $T_{WBmaks} = 520 \text{ N-m}$ ; sedang bekerja melayani beban penuh pada slip 2 %. Hitung :

Torsi beban penuh ( $T_{BP}$ )

Apabila kemudian beban ditambah sehingga  $T_{BP} = T_{WBmaks}$ , menjadi berapakah kecepatannya

Jawab :

$$a = \frac{R_2}{X_2} = \frac{0,001}{0,005} = 0,2$$

a).

$$S_{BP} = 0,02 \rightarrow 2 \%$$

$$\frac{T_{BP}}{T_{WBmaks}} = \frac{2a \cdot S_{BP}}{a^2 + S_{BP}^2} = \frac{2 \times 0,2 \times 0,02}{0,04 + 0,0004} = \frac{0,008}{0,0404} = 0,198$$

$$T_{BP} = 0,198 \times 520 = 102,97 \text{ N-m}$$

b).  $T_{BP} = T_{WBmaks}$

$$\frac{T_{BP}}{T_{WBmaks}} = \frac{2aS_{BP}}{a^2 + S_{BP}^2} = 1$$

$$\frac{2 \times 0,2 \times S_{BP}}{0,04 + S_{BP}^2} = 1 \rightarrow S_{BP}^2 - 0,4S_{BP} + 0,04 = 0$$

$$(S_{BP} - 0,2)^2 = 0 \rightarrow S_{BP} = 0,2 = 20 \%$$

$$N_s = \frac{120xf}{P} = \frac{120 \times 60}{8} = 750 \text{ Rpm}$$

$$S_{BP} = \frac{N_s - N}{N_s} \rightarrow 0,2 = \frac{750 - N}{750}$$

$$N = 750 - 150 = 600 \text{ Rpm}$$

Motor induksi 3 fase rotor lilit, 6 kutub, 50 Hz, resistansi kumparan rotor 0,02 Ohm perfase, sedang melayani beban penuh dengan kecepatan 960 Rpm. Dengan pengaturan resistansi seperti lazimnya motor slipring, kecepatannya menjadi 800 Rpm. Terangkan bagaimana caranya dan hitung nilainya. (Pada torsi beban tetap).

Jawab :

Caranya adalah dengan menyisipkan resistansi tambahan pada rangkaian rotor agar putarannya dapat diatur.

Kecepatan medan putar stator

$$N_s = \frac{120xf}{P} = \frac{120 \times 50}{8} = 1000 \text{ Rpm}$$

Kecepatan 960 Rpm waktu melayani beban penuh

$$\text{Slip } (S_1) = \frac{N_s - N}{N_s} = \frac{1000 - 960}{1000} = 0,04 \rightarrow 4 \%$$

$$\text{Torsi beban } (T_B) = \frac{3(I_2')^2 R_2}{S} = \frac{3(I_2')^2 \times 0,02}{0,04} \text{ watt sinkron}$$

Kecepatan turun menjadi 800 Rpm setelah disisipkan resistansi (R), pada resistansi kumparan rotor ( $R^2$ )

$$\text{Slip } (S_2) = \frac{N_s - N}{N_s} = \frac{1000 - 800}{1000} = 0,2 \rightarrow 20 \%$$

$$\text{Torsi beban } (T_B) = \frac{3(I_2')^2 (R_2 + R)}{S_2} = \frac{3(I_2')^2 \times (0,02 + R)}{0,2} \text{ watt sinkron}$$

Torsi beban tetap

$$\frac{3(I_2')^2 \times 0,02}{0,04} = \frac{3(I_2')^2 \times (0,02 + R)}{0,2}$$

$$0,05 = 0,1 + 5R$$

$$R = 0,08 \text{ Ohm}$$

Motor induksi rotor belitan (slipring motor) 3 fase, 400/200 volt, hubungan Y-Y, mempunyai resistansi rotor perfase 0,06 Ohm dan reaktansi rotor perfase pada waktu diam 0,3 Ohm. Hitung resistansi yang diperlukan dan harus ditambahkan pada rangkaian rotor agar torsi start sama dengan torsi maksimum waktu rotor berputar.

Jawab :

$$\frac{T_s}{T_{WBmaks}} = \frac{2a}{1+a^2}; T_s = T_{WBmaks}$$

$$1 = \frac{2a}{1+a^2} \rightarrow a^2 - 2a + 1 = 0 \rightarrow (a-1)^2 = 0 \rightarrow a = 1$$

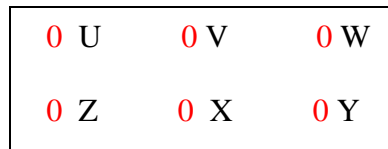
$$a = \frac{R_2 + R}{X_2} \text{ dengan } R = \text{resistansi yang harus ditambahkan pada rangkaian rotor}$$

$$1 = \frac{0,06 + R}{0,3} \rightarrow R = 0,3 - 0,06 = 0,24 \text{ Ohm.}$$

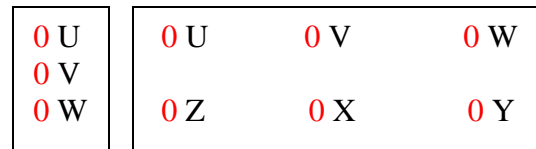
### 3.9 MACAM HUBUNGAN LILITAN MOTOR 3 FASA

Untuk motor induksi rotor hubung singkat biasanya terminal lilitan yang keluar ada 6 terminal (lihat gambar 5-10 a)

Untuk motor induksi rotor menggunakan cincin geser biasanya terminal lilitan yang keluar lebih dari 6 terminal (lihat gambar 5-10 b)



Gambar 5-10 a



Gambar 5-10 b

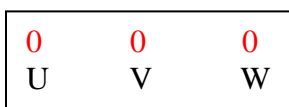
#### Hal- hal Yang Harus Diperhatikan Dalam Menghubungkan Motor

##### 1) Lihat Papan nama pada motor, misalnya;

Dayanya 5 HP  
 Tegangannya 220/380 V  
 Putarannya 1450 Rpm  
 Hubungannya Y/ $\Delta$   
 Efisiensinya 0,86  
 Frekuensinya 50 Hz

##### 2). Melihat Terminal yang ada pada motor atau hubungan-hubungan lilitan dengan kode U,V,W,Z,X,Y

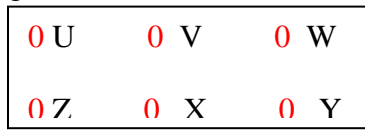
###### 2.1. Hubungan 3 terminal



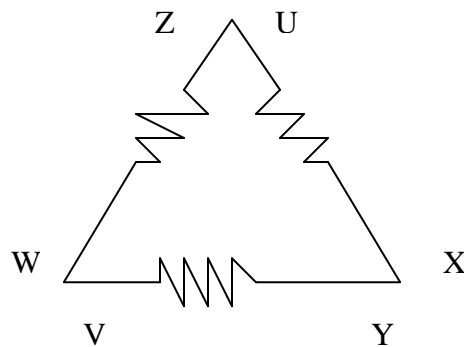
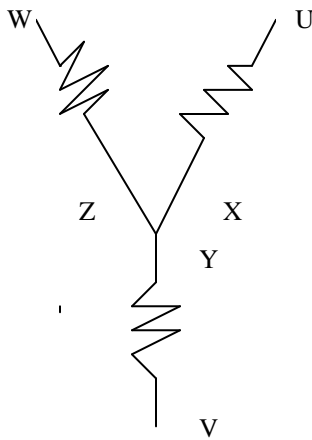
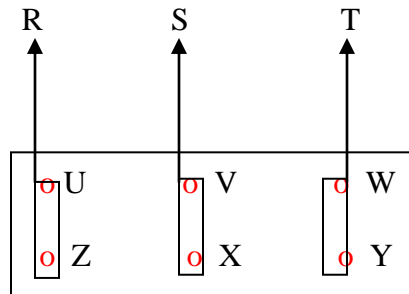
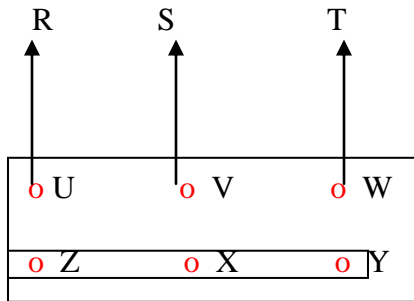
Gambar 5-11

Digunakan hanya satu hubungan lilitan apakah Bintang (Y) atau segitiga ( $\Delta$ )

2.2. Hubungan 6 terminal



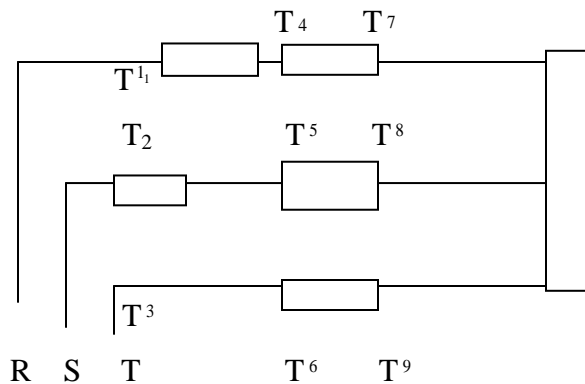
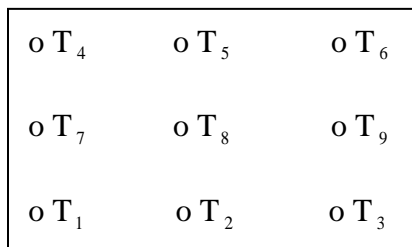
Bisa digunakan untuk hubungan Y dan segitiga (dapat untuk tegangan (220/380 V)  
Gambar 5-12 a



Gambar 5-12 b. Hubungan Bintang

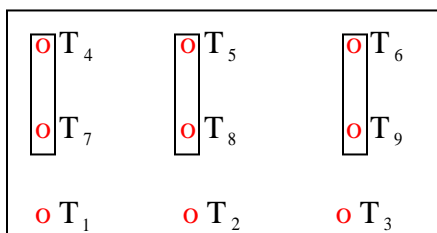
Gambar 5-12 c. Hubungan Segitiga

2.3. Hubungan 9 terminal

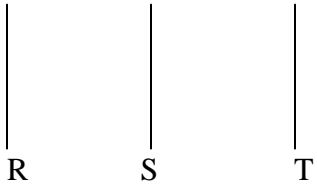


Gambar 5-13 a. Lilitan motor 9 terminal

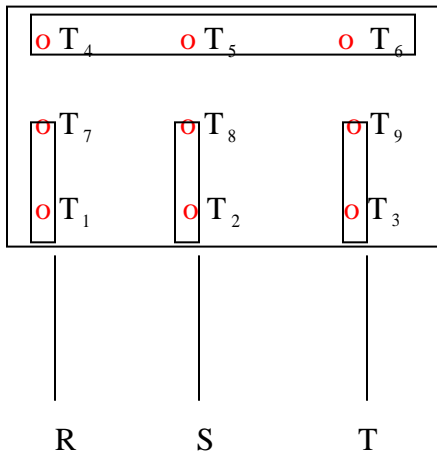
Gambar 5-13 b. Sambungan bintang dalam Lilitan motor



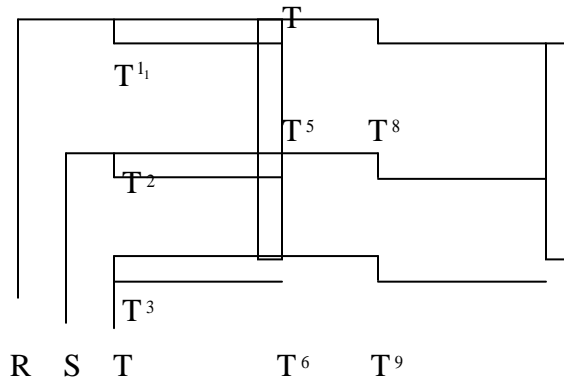




Gambar 5-13 c. Hubungan bintang dalam terminal motor

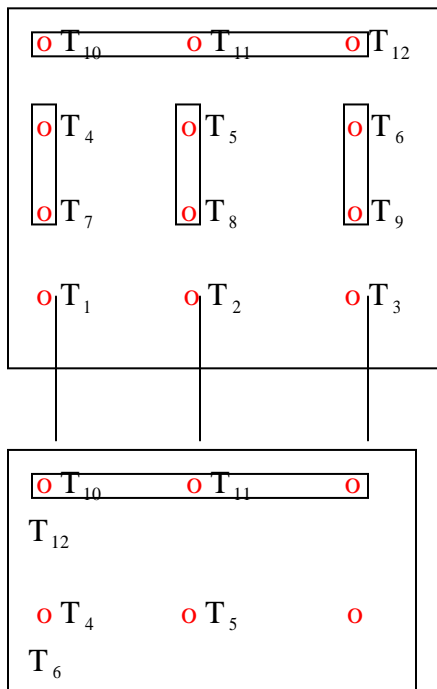


Gambar 1-13 d. Hubungan Segitiga Dalam terminal motor

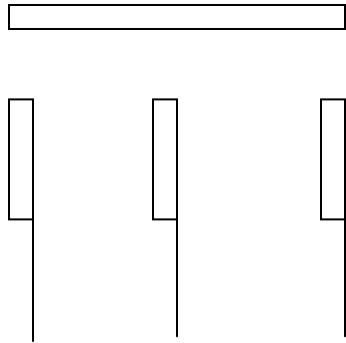


Gambar 5-13 e. Hubungan Segitiga Di Dalam Lilitan motor

2.4. Hubungan 12 Terminal



Gambar 5-14 a. Hubungan bintang Dalam terminal motor



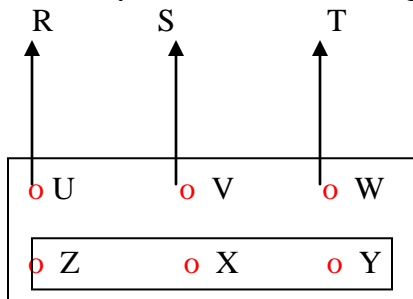
Gambar 5-14 b. Hubungan segitiga  
Dalam terminal motor

### 3.10. ARAH PUTAR MOTOR 3 FASA

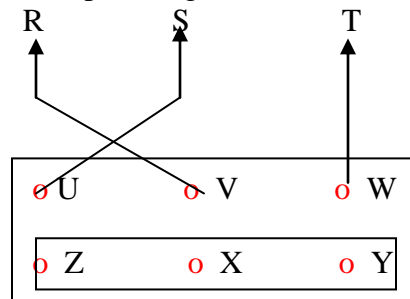
Untuk menggerakkan mesin-mesin, kebanyakan digunakan motor arus bolak-balik tiga fasa. Stator motor-motor ini membangkitkan suatu medan magnet putar. Oleh karena itu motor-motor ini juga dinamakan motor arus putar.

Motor-motor ini dihubungkan dengan jaringan arus bolak-balik tiga fasa. Jika jaringannya terdiri dari 4 kawat hantaran, hanya hantaran-hantaran fasanya saja yang dihubungkan, sedangkan hantaran netralnya tidak digunakan.

Untuk membalik arah putar motor tiga fasa, maka hanya dua fasanya saja yang ditukar, misalnya fasa R dan S, sedangkan fasa T tetap (lihat gambar 5-15)



Gambar 5-15 a. Putaran ke kanan



Gambar 5-15 b. Putaran ke kiri

### Membalik Putaran dengan sakelar TPDT

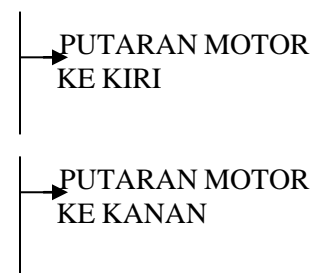
#### Cara Kerjanya :

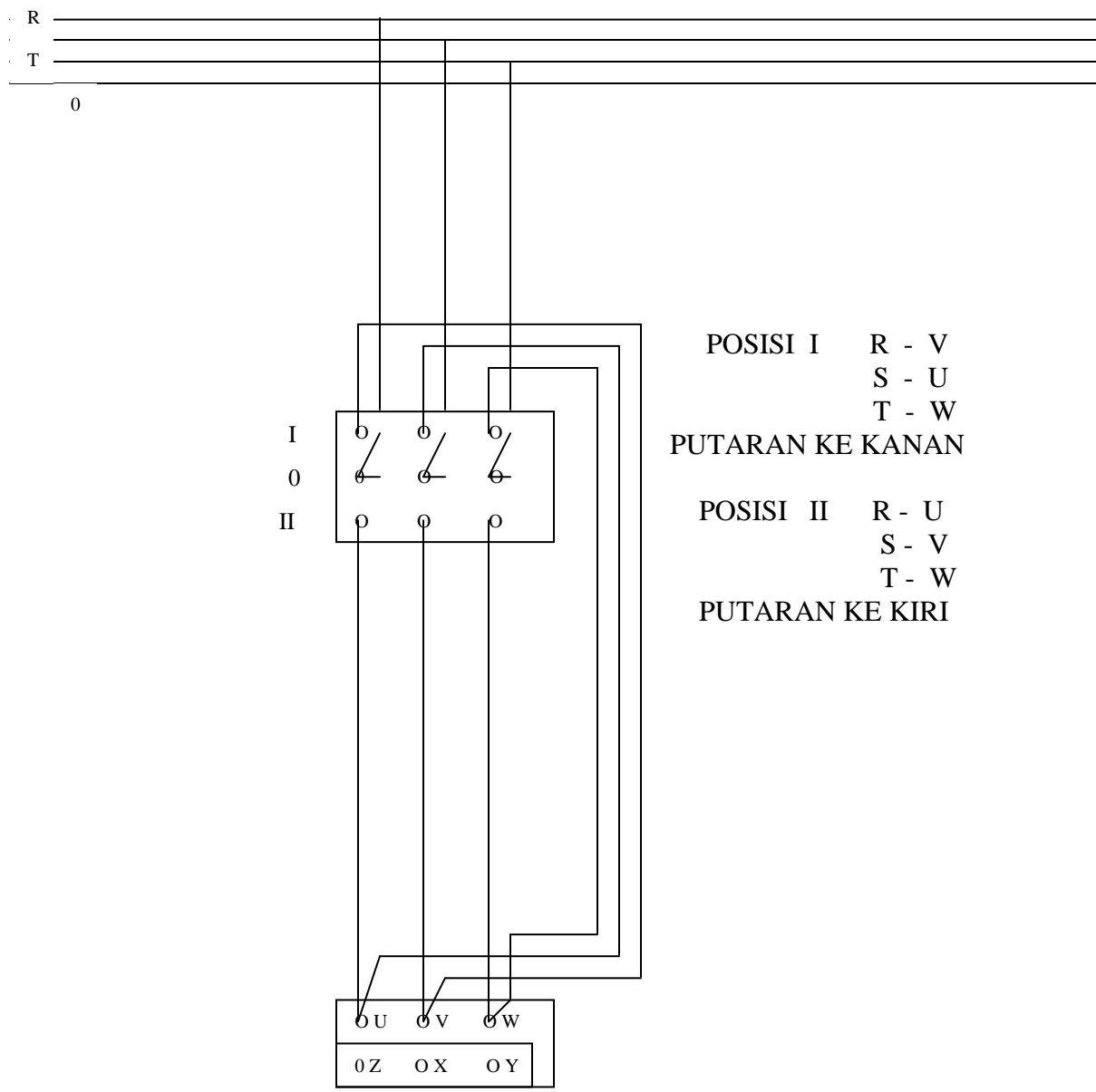
JIKA SAKELAR DALAM POSISI I, MAKA ARUS DARI

- KABEL R TERHUBUNG KE TERMINAL V PADA MOTOR
- KABEL S TERHUBUNG KE TERMINAL U PADA MOTOR
- KABEL T TERHUBUNG KE TERMINAL W PADA MOTOR

JIKA POSISI SAKELAR DIPINDAH KE POSISI II, MAKA

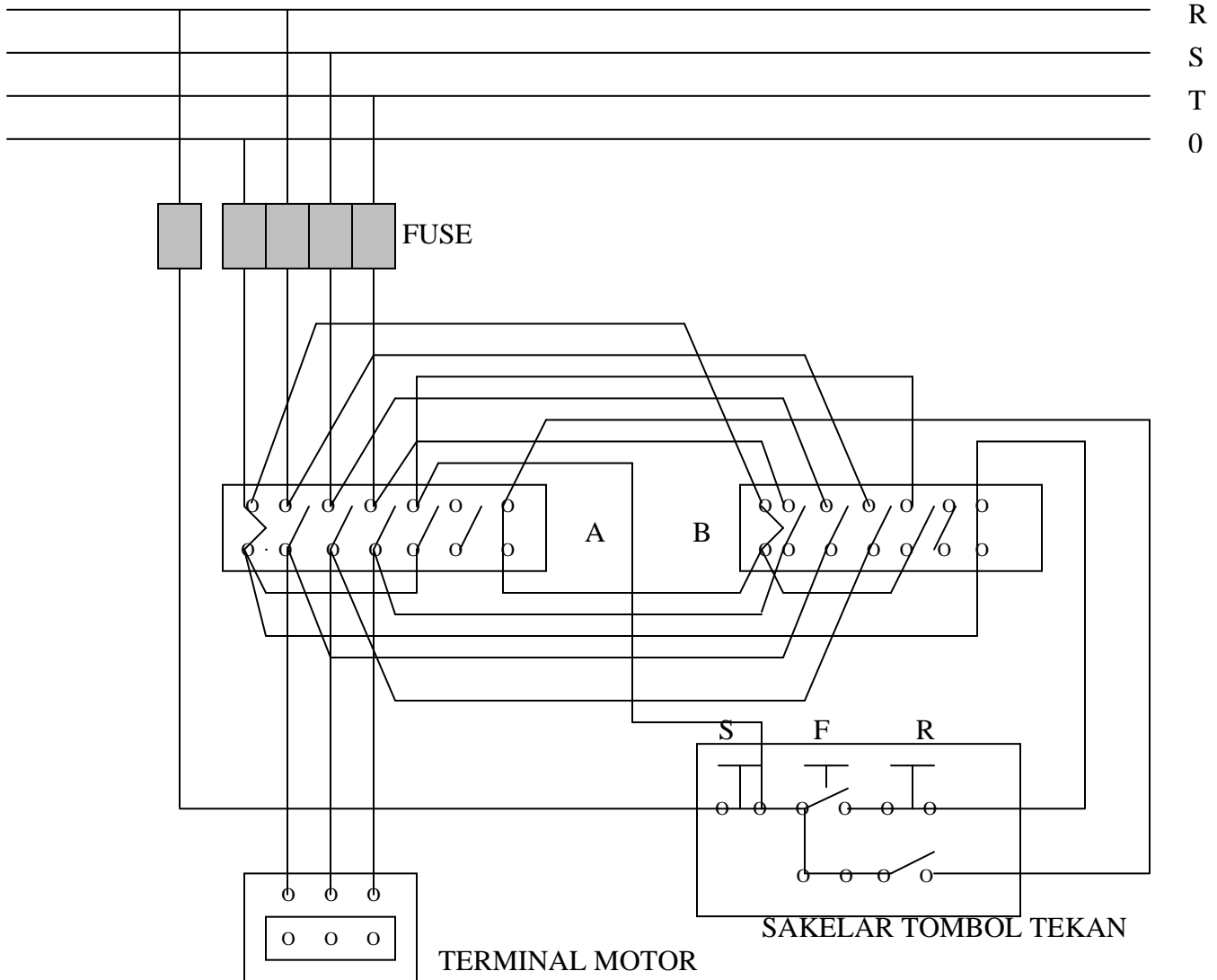
- KABEL R TERHUBUNG KE TERMINAL U PADA MOTOR
- KABEL S TERHUBUNG KE TERMINAL V PADA MOTOR
- KABEL T TERHUBUNG KE TERMINAL W PADA MOTOR





Gambar 5-16, Cara Membalik Putaran Dengan Sakelar TPDT

## Membalik putaran motor 3 fasa dengan sakelar magnetik



**Gambar 5-17. Cara Membalik Putaran Dengan Sakelar Magnetik (Rangkaian Mesin Bubut)**

### Cara Kerja Gambar 5-17

1. JIKA TOMBOL F DITEKAN. MAKA ARUS DARI R MASUK MELALUI TOMBOL S KE TOMBOL F → KE TOMBOL R → KE NC KONTAKTOR B DAN KELILILITAN KONTAKTOR A SEHINGGA KONTAKTOR A BEKERJA, MAKA MOTOR BERPUTAR KE KANAN. TOMBOL F JIKA DILEPAS MAKA KONTAKTOR A TETAP BEKERJA KARENA MENDAPAT ARUS PENGGANTI DARI TOMBOL S KE KONTAK NO KONTAKTOR A DAN DITERUSKAN KE LILITAN KONTAKTOR A

2. JIKA INGIN MEMBALIK PUTARAN MOTOR DENGAN CARA MENEKAN TOMBOL R, HARUS DI STOP DAHULU MELALUI TOMBOL S KARENA ARUS DARI NO TOMBOL R TERPUTUS PADA KONTAK NC KONTAKTOR A (SEBAGAI PENGUNCI). BEGITU JUGA SEBALIKNYA.
3. JIKA TOMBOL R DITEKAN DALAM KEADAAN KONTAKTOR A TIDAK BEKERJA MAKA ARUS AKAN SAMPAI KELILITAN KONTAKTOR B MELALUI NO TOMBOL R KE KONTAK NC KONTAKTOR A DAN DITERUSKAN KE LILITAN KONTAKTOR B, SEHINGGA KONTAKTOR B BEKERJA. DAN MOTOR BERPUTAR KE KIRI. JIKA TOMBOL R DILEPAS KONTAKTOR B TETAP JALANKARENA ADA ARUS PENGGANTI MELALUI KONTAK NO KONTAKTOR B YANG DITERUSKAN KE LILITAN KONTAKTOR B.

### 3.11. CARA-CARA MENGHUBUNGKAN MOTOR 3 FASA

1. Penyambungan secara langsung
2. Menghidupkan motor dengan sakelar bintang-segitiga
3. menghidupkan motor dengan kumparan hambatan
4. Menghidupkan motor dengan transformator awal gerak
5. Menghidupkan motor dengan rangkaian khusus lilitan stator.

Beberapa petunjuk untuk menghidupkan (mengasut) motor 3 fasa

Daya Nominal motor	Cara untuk pengasutan
Kurang dari 1,5 – 2,25 KW	Dihubungkan langsung dengan jaringan
Sampai 4 - 6 KW	Dengan sakelar bintang-segitiga
Sampai 8 - 12 KW	Dengan sakelar bintang-segitiga yang dilengkapi dengan tahanan-tahanan
Lebih dari 8 - 12 KW	Dengan transformator asut atau motor angker gelang seret dengan tahanan asut rotor

#### 1). Dihubung Langsung Dengan Jaringan

Biasanya digunakan untuk motor-motor rotor sangkar.

Gambar 5-18 a. → Hanya boleh digunakan jika tombol tekannya diletakkan dekat motor. Kerugiannya jika terjadi hubungan tanah misalnya titik P, maka sakelar dapat hidup; jadi hanya digunakan untuk mesin-mesin yang tidak berbahaya.

Gambar 5-18 b. → Digunakan mesin-mesin yang dapat membahayakan, jika terjadi tiba-tiba jalan. Misalnya mesin adon, derek, lift, mesin pemecah, mesin aduk beton dan sebagainya. S dan Sh adalah sakelar bantu.

#### 2) Hubungan Bintang dan segitiga motor 3 fasa

Jaringan distribusi tegangan rendah PLN umumnya memiliki tegangan 220/380 Volt. Sebuah motor harus digunakan dalam hubungan bintang atau segitiga tergantung pada tegangan jaringannya. Biasanya tegangan yang harus dihubungkan dengan motor, dapat dilihat dari plat merknya, misalnya 220/380 V atau 380/660 V. Misalnya dalam plat merk motor 380/660 V, maka kumparan-kumparan motornya harus mendapat tegangan

380 V. Jadi tegangan yang lebih rendah pada plat merknya adalah tegangan yang harus dihubungkan dengan kumparan-kumparan motor. Oleh karena itu jika tegangan jaring 220/380 V, maka motor harus dihubungkan dalam bentuk segitiga. Jika dihubungkan bintang, maka kumparan-kumparannya mendapat tegangan 220 V. Tegangan yang diterima motor juga tidak boleh terlalu rendah karena bisa merusak motor.

Untuk motor yang dalam palat mananya tertulis tegangan 220/380 V, hubungan yang harus dilakukan sebagai berikut.

- a. Jika sistem tegangan jaringnya 220/380 V, maka motor ini harus dihubungkan dalam hubungan bintang, karena kumparan-kumparannya harus mendapat tegangan 220 V.
- b. Jika sistem tegangan jaringnya 127/220 V, maka motor ini harus digunakan dalam hubungan segitiga.

Misalkan daya motor adalah 6,6 KVA, maka pada beban penuh arusnya adalah :

Untuk sistem tegangan jaring 220/380 V

$$I_n = \frac{6600}{380\sqrt{3}} = 10 \text{ A}$$

Arus ini adalah arus yang juga mengalir dalam kumparan-kumparan motor.

- b. untuk sistem tegangan jaring 127/220 V

$$I_n = \frac{6600}{220\sqrt{3}} = 10\sqrt{3} = 17,3 \text{ A}$$

Arus yang mengalir dalam kumparan-kumparan motor tetap 10 A, yaitu :

$$\frac{17,3}{\sqrt{3}} = 10 \text{ A}$$

Tegangan kumparannya sama dengan 220 V, sama seperti a.

Jika motor ini dihubungkan langsung dengan jaringan, maka arus asutnya akan 6 x arus nominalnya, jadi :

Untuk kasus a  $\rightarrow$  sama dengan 6 x 10 A = 60 A

Untuk kasus b  $\rightarrow$  sama dengan 6 x 17,3 A = 103,8 A

Misalkan kita lihat kasus b, jika motor lebih dahulu dihubungkan dalam hubungan bintang dan kemudian setelah kecepatan putarnya mencapai nominal, baru diubah kedalam hubungan segitiga; maka arus asutnya akan jauh lebih kecil. Dalam hubungan bintang, kumparan motornya hanya akan mendapat 127 volt dan bukan 220 V. Jadi arus asutnya dalam kumparan motor sekarang akan  $\sqrt{3}$  kali lebih kecil, yaitu :

$$6 \times \frac{10}{\sqrt{3}} = 34,6 \text{ A}$$

Karena motornya dihubungkan dalam hubungan bintang, arus asutnya dalam jaringan akan sama dengan arus asut dalam kumparan motor, jadi sama dengan 34,6 A.

Jadi kalau motornya lebih dahulu dihubungkan dalam hubungan bintang, arus asutnya dalam jaringan akan menjadi sepertiganya saja  $34,6/103,8 = 1/3$

Kemungkinan untuk mengurangi arus asut ini dipraktikkan dengan menggunakan sakelar bintang segitiga untuk menjalankan motornya. Karena arus asutnya lebih kecil, kopel asutnya juga lebih kecil, sehingga kecepatan putar motornya akan meningkat lebih lambat. Jika menggunakan sakelar bintang-segitiga, sakelarnya tidak boleh dibiarkan dalam kedudukan hubungan bintang. Sebab kalau dibiarkan dalam kedudukan bintang,

arus dalam kumparan motor akan ditentukan oleh beban motor. Dalam hal contoh di atas, jika motornya diberi beban penuh, arus dalam kumparannya sekarang akan sama dengan :

$$\frac{6600}{220\sqrt{3}} = 10\sqrt{3} = 17,3 \text{ A}$$

## MESIN SEREMPAK

### 6.1 Umum

Sebagaimana pada mesin arus searah dan mesin tak serempak maka mesin serempak dibagi atas dua macam :]

1. *Generator serempak* (generator sinkron = generator arus bolak-balik =alternator yang banyak digunakan pada pembangkit tenaga listrik ).
2. *Motor serempak* (motor sinkron), dapat dipergunakan untuk memutar atau menggerakkan mesin-mesin produksi di pabrik atau industri yang menghendaki putaran tetap. Biasanya harganya mahal dan dipesan khusus. Konstruksi dari mesin serempak baik sebagai generator maupun sebagai motor adalah sama, perbedaan hanya pada prinsip kerjanya.

Sebagaimana pada generator arus searah, belitan (kumparan) jangkar ditempatkan pada jangkar ( rotor ) sedangkan belitan medan ditempatkan pada stator, demikian pula untuk generator serempak dengan kapasitas kecil.

Akan tetapi pada generator serempak yang dipergunakan untuk pembangkit dengan kapasitas besar, *belitan* atau *kumparan jangkar ditempatkan pada stator, sedangkan belitan medan ditempatkan pada rotor dengan alasan :*

1. Belita jangkar lebih kompleks dari pada belitan medan sehingga lebih mudah dan lebih terjamin ditempatkan pada struktur yang diam serta tegar yakni stator.
2. Lebih mudah mengisolasi dan melindungi belitan jangkar terhadap tegangan yang tinggi.
3. Pendinginan belitan jangkar mudah karena inti stator yang dibuat cukup besar sehingga dapat didinginkan dengan udara paksa.
4. Belitan medan mempunyai tegangan rendah sehingga dapat efisien biladi pakai pada kecepatan yang tinggi.

Pada umumnya generator serempak ukurannya lebih besar dari pada generator arus searah, demikian pula kapasitasnya, karena disini tidak diperlukan lagi komutator.

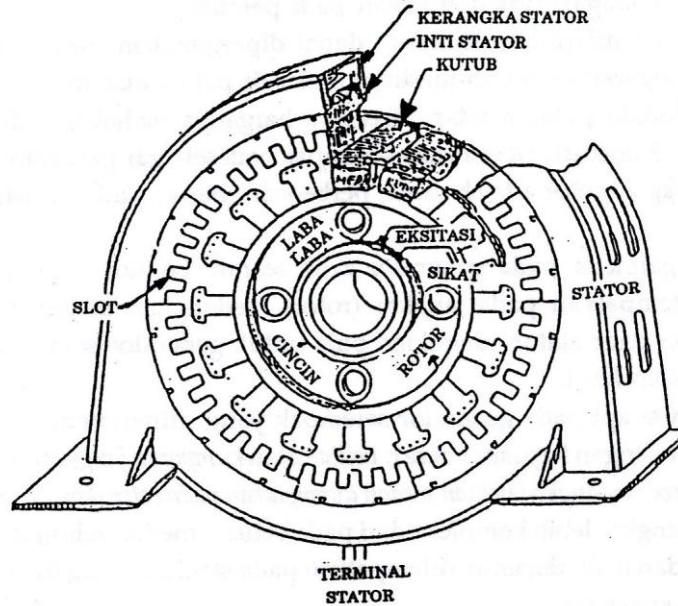
### 6-2. Konstruksi Mesin Serempak.

Konstruksi mesin serempak baik untuk generator maupun untuk motor terdiri dari:

1. *Stator* adalah bagian dari mesin yang diam dan berbentuk silinder.
2. *Rotor* adalah bagian dari mesin yang berputar juga berbentuk silinder
3. *Celah udara* adalah ruangan antara stator dan rotor

Konstruksi mesin serempak ini dapat dilihat pada gambar 6-1 berikut



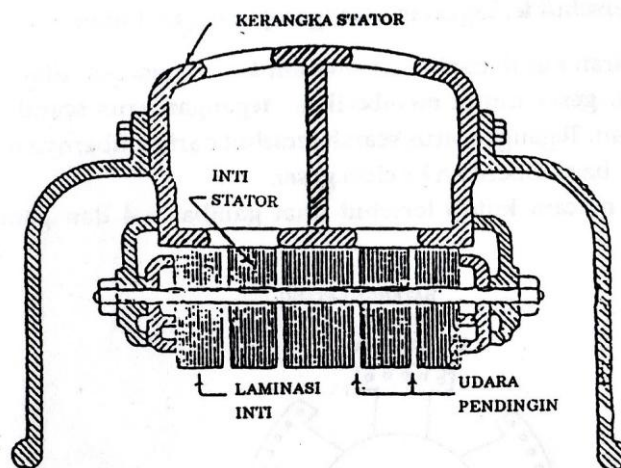


Gambar 6-1. konstruksi mesin serempak

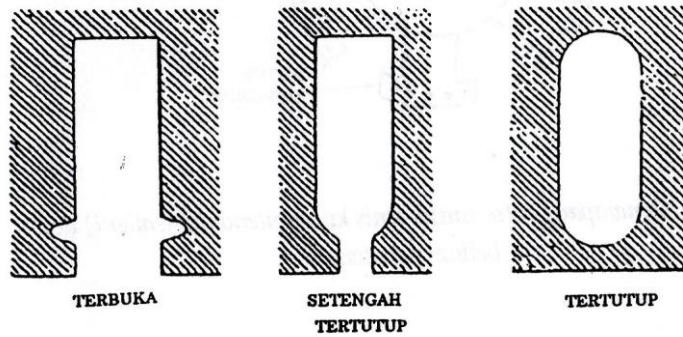
#### 6-2-1. Konstruksi stator

Konstruksi stator terdiri dari :

1. Kerangka atau gandar dari besi tuang untuk menyangga inti jagkar, lihat gambar 6-2
2. Inti jangkar dari besi lunak / baja silicon, lihat gambar 6-2
3. Alur / parit / slot dan gigi tempat meletakkan belitan (kumparan) bentuk alur ada yang terbuka, setengah tertutup dan tertutup, lihat gambar 6-3
4. Belitan jangkar terbuat dari tembaga, yang diletakan pada alur, keterangan selanjutnyabaca pada sub bab 6-3



Gambar 6-2. Kerangka dan inti stator Mesin Serempak



**Gambar 6-3** bentuk alur (slot) jangkar pada stator mesin serempak.

#### 6-2-2. Konstruksi Rotor

Konstruksi rotor terdiri dari dua jenis :

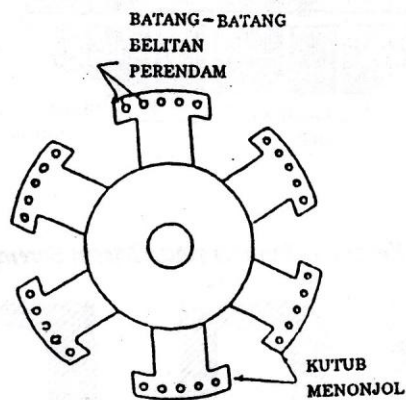
1. Jenis kutub menonjol (sailent pole) untuk generator dengan kecepatan rendah dan medium.

Kutub menonjol terdiri dari inti kutub, badan kutub dan sepatu kutub. Belitan medan dililitkan pada badan kutub, pada sepatu kutub juga dipasang belitan peredam (*damp winding*). Belitan kutub dari tembaga, badan kutub dan sepatu kutub dari besi lunak.

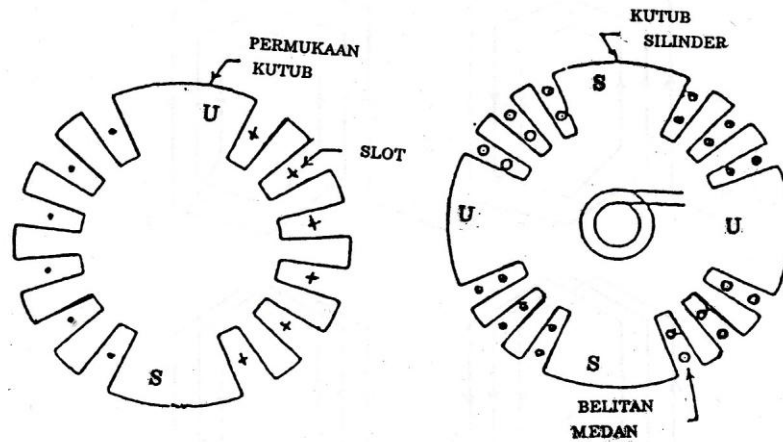
2. Jenis kutub silinder untuk generator dengan kecepatan tinggi, terdiri dari alur-alur yang dipasang kumparan medan juga ada gigi. Alur dan gigi tersebut atas pasangan –pasangan kutub.

Kumparan kutub dari kedua macam kutub tersebut dihubungkan dengan cincin geser untuk memberikan tegangan arus searah sebagai penguat medan. Tegangan arus searah tersebut dari sumbernya bilakukan melalui sikat, baru diberikan ke cincin geser.

Kedua macam kutub tersebut lihat gambar 6-4 dan gambar 6-5 berikut:



**Gambar 6-4** Penampang rotor untuk jenis kutub menonjol (sailent) dengan belitan peredam



**Gambar 6-5** Penampang rotor untuk jenis kutub silinder

### 6-3. Belitan jangkar.

Belitan jangkar yang ada di stator dan selanjutnya disebut belitan stator dirangkai untuk hubungan tiga fasa yang terdiri atas :

1. belitan satu lapis (*single layer winding*)
2. belitan dua lapis (*double layer winding*)

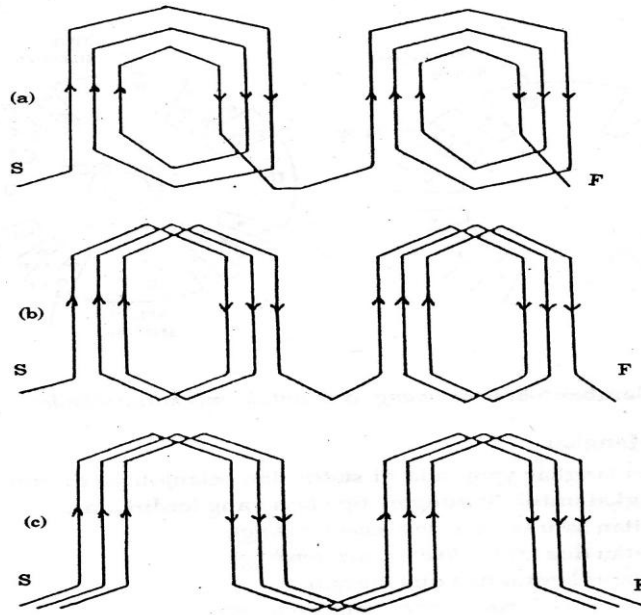
Belitan satu lapis bentuknya dua macam:

- a. Mata rantai (*cocertis or chain winding*)
- b. Gelombang (*wave*)

Belitan dua lapis bentuknya juga dua macam

- a. Jenis Gelombang (*wave*)
- b. Jenis gelung (*lap*)

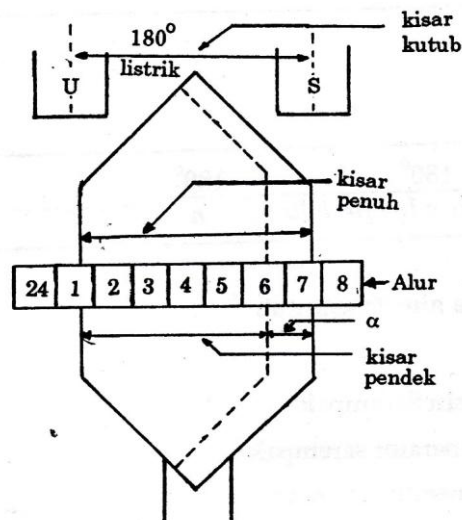
Jarak antara sisi belitan dan cara meletakkan belitan pada alur / slot menimbulkan factor kisar atau factor gawang (*factor pitch*) dan factor distribusi (*distribution factor*). Jenis-jenis belitan tersebut dapat lihat gambar berikut:



**Gambar 6-6** rangkaian belitan jangkar di stator mesin serempak  
 (a). konsentrasi atau spiral  
 (b). gelung (*lap*)  
 (c). gelombang (*wave*)

### 6-3-1. Factor Kaisar

Bila kaisar atau gawang antara sisi lilitan yang satu dan sisi lilitan yang lain sama dengan jarak antara kutub yakni  $180^\circ$  listrik maka lilitan tersebut dikatakan mempunyai gawang penuh atau kaisar penuh, lihat gambar 6-7



**Gambar 6-7.** kaisar atau gawang lilitan jangkar

Bila jarak antara lilitan yang satu dengan yang lain kurang dari  $180^\circ$  listrik, lilitan tersebut dikatakan mempunyai kaisar pendek (*gawang pendek*).

Factor kisar (*factor gawang*) atau  $k_c$  atau  $k_p$  adalah perbandingan antara kisar pendek terhadap kisar penuhnya atau dapat dihitung dengan persamaan :

$$k_c = k_p = \cos \alpha / 2 \dots \dots \dots (6-1)$$

6-3-2 Faktor distribusi

Lilitan jangkar pada tiap fasa tidak dipusatkan hanya pada satu alur / slot tetapi didistribusikan pada beberapa alur /slot menyebabkan suatu factor yang disebut factor distribusi ( $k_d$ ) yang dapat dihitung dengan persamaan :

$$k_d = \frac{\sin m\beta / 2}{m \sin \beta / 2} \dots \dots \dots (6-2)$$

dengan

$$\beta = \frac{180^\circ}{\text{banyaknyadurperkutub}} = \frac{180^\circ}{n} \dots \dots \dots (6-3)$$

m = Banyaknya alur/fase/kutub

**6-4. Prinsip kerja Mesin Serempak.**

6-4-1. Prinsip Kerja generator serempak

Prinsip Kerja generator serempak berdasarkan induksi elektromagnetis. Setelah rotor diputar oleh penggerak mula (*prime mover*), dengan demikian kutub-kutub yang ada pada rotor akan berputar. Jika kumparan kutub diberi arus searah maka pada permukaan kutub akan timbul medan magnet (garis-garis gaya fluks) yang berputar, Kkecepatannya sama dengan putaran kutub.

Garis-garis gaya fluks yang berputar tersebut akan memotong kumparan jangkar yang ada dictator sehingga pada kumparan jangkar tersebut timbul EMF atau GGL atau tegangan induksi. Frekuensi EMF (GGL0 atau tegangan induksi tersebut mengikuti persamaan:

$$f = \frac{PN}{120} \text{ Hz} \dots \dots \dots (6-4)$$

Dengan p = banyaknya kutub  
N = Kecepatan putar (rpm).

Oleh karena frekuensi dari tegangan induksi tersebut di Indonesia sudah tetentu yakin 50 Hz dan jumlah kutub selalu genap maka putaran kutub/putaran rotor/putaran penggerak mula sudah tertentu.

Besar tegangan induksi yang timbul pada kumparan jangkar yang ada di stator akan mengikuti persamaan :

$$E = 4,44 . k_c . k_d . f . \Phi . T \text{ volt / fase} \dots \dots \dots (6-5)$$

Dengan  $k_c$  = factor kisar;  $k_d$  = factor distribusi  
F = frekuensi dalam Hz atau cps  
 $\Phi$  = fluks /kutub dalam Weber  
T = banyaknya lilitan /fase =1/2 Z adalah banyaknya sisi lilitan per-fase, satu lilitan ada dua sisi

### 6-4-2. Prinsip Kerja motor serempak

Prinsip Kerja motor serempak karena interaksi dua medan menyebabkan torsi yang memutar rotor. Apabila kumparan jangkar yang ada di stator diberi sumber tegangan tiga fase dari jala-jala maka pada kumparan medan yang ada di rotor diberi arus searah, maka pada permukaan kutub timbul medan magnet yang arahnya dari kutub utara ke kutub selatan.

Interaksi antara medan putar pada kumparan jangkar yang ada di stator serta medan magnet antara kutub utara dan selatan yang ada di rotor, menyebabkan gaya yang berpasangan dan akan membangkitkan torsi, torsi tersebut akan memutar rotor dengan kecepatan yang sama/sinkron dengan perputaran medan putar stator.

Contoh soal 6-1 :

Hitung kecepatan dan tegangan per fase serta tegangan antar fase dari suatu generator serempak 4 kutub, tiga fase, 50 Hz, hubungan Y dengan 36 alur (slot), tiap slot berisi 30 penghantar (sisi lilitan). Fluks per kutub 0,05 Weber terdistribusi sinusoidal.

Penyelesaian :

$$f = \frac{PN}{120} \rightarrow N = \frac{120 \cdot f}{p} = \frac{120 \times 50}{4} = 1500 \text{ rpm}$$

$$\beta = \frac{180^\circ}{36/4} = 20^\circ; m = \frac{36}{4 \times 3} = 3$$

$$k_d = \frac{\sin 3 \times 20^\circ / 2}{3 \sin 20^\circ / 2} = 0,96$$

$$k_c = 1; Z = 36 \times 30 / 3 = 360$$

$$T_{\text{preface}} = 360 / 2 = 180$$

$$E_p = 4,44 \times 1 \times 0,96 \times 50 \times 0,05 \times 180 = 1920 \text{ volt / fase}$$

$$E_L = \sqrt{3} E_p = \sqrt{3} \times 1920 = 3320 \text{ volt}$$

Contoh soal 6-2 :

Suatu generator serempak tiga fase, 4 kutub, 50 Hz mempunyai 15 alur per kutub, tiap alur berisi 10 penghantar. Setiap penghantar dari tiap fase dihubungkan seri dengan factor distribusi 0,95 dan factor kisar 1. Pada waktu beban nol, EMF antara fase 1825 volt, hitung fluks per kutub.

Penyelesaian :

$$k_c = 1; k_d = 0,95; f = 50 \text{ Hz}$$

$$EMF/\text{fase} = 1825 / \sqrt{3} \text{ volt} = E_p$$

$$\text{Banyaknya alur} = 4 \times 15 = 60$$

$$\text{Banyaknya alur per fase} = 60 / 3 = 20$$

$$\text{Banyaknya lilitan per fase} = 20 \times 10 / 2 = 100 = T$$

$$E = 4,44 \times k_c \times k_d \times f \times \Phi \times T$$

$$1825 / \sqrt{3} = 4,44 \cdot 1 \cdot 0,95 \cdot 50 \cdot \Phi \cdot 100$$

$$\Phi = \frac{1825 / \sqrt{3}}{4,44 \cdot 1 \cdot 0,95 \cdot 50 \cdot 100} = 49,97 \text{ m Wb}$$

### 6-5. Generator Serempak Berbeban.

Jika generator serempak belum berbeban maka EMF (E) yang dibangkitkan pada kumparan jangkar yang ada distator sama dengan tegangan terminalnya (V).

Waktu generator berbeban maka EMF (E) tersebut diatas tidak sama dengan tegangan terminalnya (V), tegangan terminal akan bervariasi karena:

1. Jatuh tegangan (*voltage drop*) karena resistans jangkar ( $R_a$ ) sebesar  $I R_a$ .
2. Jatuh tegangan karena reaktans bocor ( $X_L$ ) dari jangkar sebesar  $(I X_L)$ .
3. Jatuh tegangan karena reaksi jangkar sebesar  $(I X_a)$ .

Reaksi jangkar disebabkan oleh arus beban (I) yang mengalir pada kumparan jangkar, arus tersebut akan menimbulkan medan yang melawan medan utama sehingga seolah-olah jangkar mempunyai reaktans sebesar  $X_a$ .

Reaktans bocor ( $X_L$ ) dan reaktans karena reaksi jangkar ( $X_a$ ) akan menimbulkan reaktans sikron sebesar ( $X_s$ ) yang mengikuti persamaan berikut:

$$\underline{X_s = X_L + X_a} \dots\dots\dots (6-6)$$

$$\underline{E = V + I(R_a + jX_s)} \dots\dots\dots (6-7)$$

Tegangan pada waktu generator berbeban secara vektor akan mengikuti persamaan :

Dengan : E = EMF jangkar

V = tegangan terminal

I = arus beban

$R_a$  = resistans jangkar

$X_s = X_L + X_a$  = reaktans sinkron

### 6-6. Diagram Vektor Generator Serempak Berbeban.

Diagram vector ini mempunyai besaran-besaran sebagai berikut :

$E_o$  = EMF (tegangan induksi) pada waktu beban nol dari jangkar.

E = EMF waktu jangkar berbeban atau setelah ada reaksi jangkar. E secara vector kurang dari  $E_o$  karena jatuh tegangan sebesar  $I X_a$ .

Ada kalanya E ini ditulis sebagai  $E_a$ .

V = tegangan terminal, secara vector kurang dari  $E_o$  karena jatuh tegangan sebesar

$I Z_s$  atau kurang dari E karena jatuh tegangan sebesar I Z dengan  $Z = \sqrt{R_a^2 + X_L^2}$

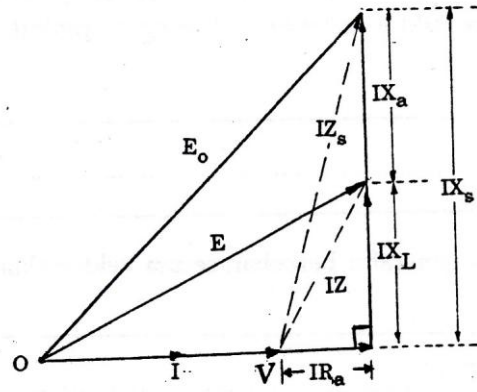
I = Arus jangkar per fase.

$\Phi$  = sudut factor kerja (sudut factor daya atau sudut factor beban )

Diagram vector ( diagram phasor) dari generator serempak yang berbeban ada 3 macam:

1. Diagramvektor untuk beban non induktif.

Dalam hal ini vector tegangan terminal dan vector arus sefase atau factor kerjanya satu (unity), lihat gambar 6-8 berikut :



**Gambar 6-8.** diagram vector dari generator serempak berbeban non induktif.

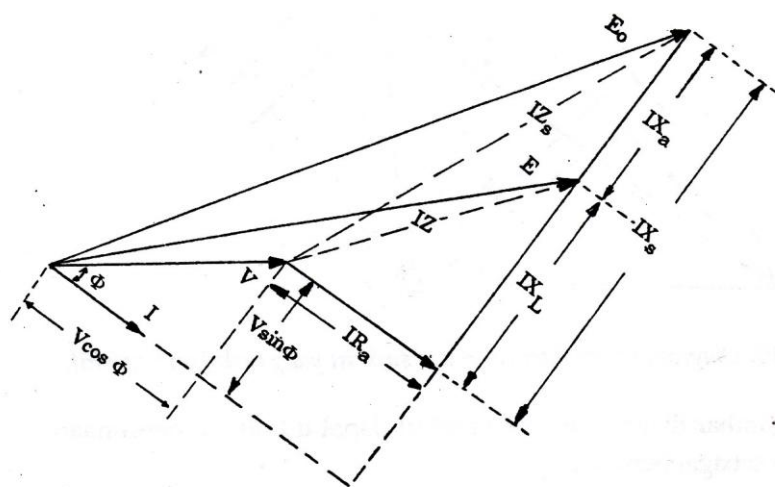
Dari diagram vector pada gambar 6-8 disebelah dapat dituliskan persamaan tergangannya sebagai berikut :

$$\overline{E_o} = \overline{V} + I\sqrt{R_a^2 + jX_s} \dots\dots\dots(6-8)$$

Atau

$$E_o = \sqrt{(V + IR_a)^2 + (IX_s)^2} \dots\dots\dots(6-9)$$

2. Diagram vector untuk beban induktif berikut :  
 Bila generator serempak berbeban, dimana bebannya unduktif maka vector arus terkebelakang atau mengikuti (*lagging*) terhadap vector tegangan, lihat gambar (6-9) berikut :



**Gambar 6-9.** Diagram vector dari generator serempak yang bebannya induktif

Dari diagram vector pada gambar 6-9 disebelah dapat dituliskan persamaan tegangannya sebagai berikut :

$$E_o = \sqrt{(V \cos\Phi + R_a)^2 + (V \sin\Phi + IX_s)^2} \dots\dots\dots(6-10)$$

3. Diagram vector untuk beban kapasitif





**6-7. Regulasi tegangan generator serempak .**

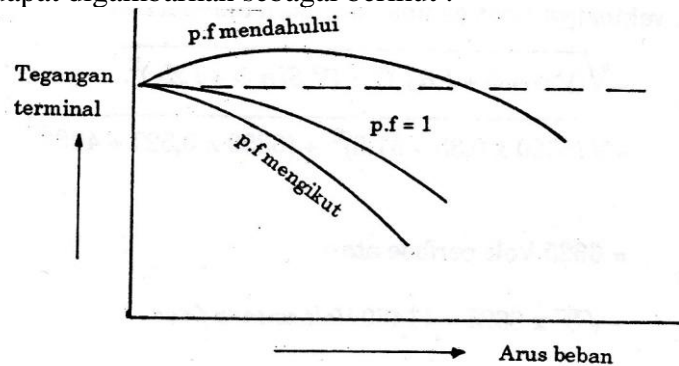
Perubahan beban pada generator serempak akan menyebabkan perubahan tegangan diterminalnya, besarnya perubahan tersebut tidak hanya tergantung dari perubahan beban tapi juga tergantung pada factor beban (*factor kerja = factor daya*).

Hal tersebut menimbulkan istilah regulasi tegangan bila beban penuh dilepas dimana eksitasi atau penguatannya serta kecepatannya tetap, dibagi dengan tegangan terminal, atau dirumuskan sebagai berikut :

$$\% \text{Regulasi} = \frac{E_o - V}{V} \times 100\% \dots\dots\dots (6-12)$$

Dengan catatan :

1.  $E_o - V$  bukan pengurangan vector.
2. untuk beban dengan factor daya mendahului atau beban kapasitif, regulasi negative karena tegangan terminal ( $V$ ) ada kalanya lebih tinggi dari  $E_o$ .
3. persamaan regulasi tegangan tersebut untuk generator serempak yang mempunyai kapasitas kecil, akan tetapi untuk generator serempak dengan kapasitas besar belum di bahas pada buku ini.
4. karakteristik tegangan generator serempak sehubungan dengan regulasi tegangan tersebut dapat digambarkan sebagai berikut :



**Gambar 6-11.** karakteristik tegangan terminal dari generator serempak versus arus beban dengan berbagai factor beban.

Contoh soal 6-4:

Suatu generator serempak 3Φ, 50 KVA, 440 Volt, 50 Hz hubungan Y dengan resistans jangkar yang efektif 0,25 ohm/fase, reaktanssinkron 3,2 ohm/fase dan reaktans bocor 0,5 ohm/fase. Hitung untuk beban penuh dengan factor daya ( $pf$ )=1.

- a. EMF waktu berbeban ( $E_a$ )
- b. EMF waktu beban nol ( $E_o$ )
- c. % regulasi pada beban penuh.

*Penyelesaian:*

Dari diagram vector gambar 6-8 diperoleh bahwa :

- a. EMF ( $E_a$ ) adalah jumlah vector dari :
  - i. tegangan terminal  $V$ .
  - ii.  $I R$  dan
  - iii.  $I X_L^a$

$$V = 440 / \sqrt{3} = 254 \text{ volt}$$

$$\text{Arus beban penuh : } I = \frac{50.000}{\sqrt{3} \times 440} = 65,6 \text{ Ampere}$$

$$I R_a = 65,6 \times 0,25 = 16,4 \text{ volt}$$

$$I X_L = 65,6 \times 0,5 = 32,8 \text{ volt}$$

$$E_a = \sqrt{(V + I R_a)^2 + (I X_L)^2}$$

$$= \sqrt{(254 + 16,4)^2 + (32,8)^2} = 272 \text{ Volt / fase}$$

$$= \sqrt{3} \times 272 = 471 \text{ volt antara fase}$$

b. EMF ( $E_o$ ) adalah jumlah vector dari  $V$ ,  $I R_a$ , dan  $I X_s$

$$E_o = \sqrt{(V + I R_a)^2 + (I X_s)^2}$$

$$E_o = \sqrt{(254 + 16,4)^2 + (65,6 \times 3,2)^2} = 342 \text{ volt / fase}$$

$$E_o = \sqrt{3} \times 342 = 592 \text{ volt / fase}$$

$$\text{c. \% Regulasi} = \frac{E_o - V}{V} \times 100\% = \frac{342 - 254}{54} \times 100\% = 34,65\%$$

### 6-8. Efisiensi generator serempak.

Efisiensi atau daya guna atau rendemen dari generator serempak dapat dihitung seperti pada generator arus searah yang dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$E_{\text{efisiensi}} = \frac{\text{Dayaoutput}(P_o)}{\text{Dayainput}(P_i)} \times 100\% \dots\dots\dots (6-13)$$

atau

$$E_{\text{efisiensi}} = \frac{[\text{Dayainput}(P_i)] - [\text{rugi total}]}{[\text{Dayainput}(P_i)]} \times 100\% \dots\dots\dots (6-14)$$

atau

$$E_{\text{efisiensi}} = \left[ 1 - \frac{[\text{rugi total}]}{[\text{dayainput}(P_i)]} \right] \times 100\% \dots\dots\dots (6-15)$$

atau

$$E_{\text{efisiensi}} = \left[ 1 - \frac{[\text{rugi total}]}{(P_o) + [\text{rugi total}]} \right] \times 100\% \dots\dots\dots (6-16)$$

atau

$$E_{\text{efisiensi}} = \frac{\text{dayaoutput}(P_o)}{(P_o) + [\text{rugi total}]} \times 100\% \dots\dots\dots (6-17)$$

Pada waktu generator serempak berbeban, rugi-rugi yang terjadi terdiri dari:

1. Rugi-rugi rotasi yang terdiri dari:

- a. Rugi angin dan geseran.
  - b. Rugi geseran sikat pada cincin geser.
  - c. Rugi ventilasi pada waktu pendinginan mesin
  - d. Rugi histeris dan arus pusar di stator.
2. Rugi-rugi listrik yang terdiri dari :
    - a. rugi pada kumparan medan
    - b. rugi pada kumparan jangkar
    - c. rugi pada kontak singkat
  3. Rugi eksitasi yang dipakai untuk penguatan.
  4. Rugi beban sasar (stray load loss)

Contoh soal 6-5 :

Suatu generator serempak 3 $\Phi$ , 2000 KVA, 2300 volt bekerja pada beban penuh dengan factor daya 0,85. Resistans arus searah dari belitan jangkar pada 75<sup>0</sup> C antara fase 0,08 ohm. Medan menarik arus 72 ampere pada tegangan 125 volt dari peralatan penguatan. Rugi angin dan geseran 18,8 Kw, rugi inti 37,6 Kw, rugi beban sasar 2,2 Kw. Hitung efisiensi dengan mengandaikan resistans jangkar yang efektif =1,3 x resistans arus searah.

*Penyelesaian :*

Daya output ( $P_o$ ) = 2000 x 0,85 = 1700 Kw

$$I_L = \frac{2.000.000}{\sqrt{3}.2300} = 503 \text{ Amp}$$

$$R_a = \frac{0,08}{2} \times 1,3 = 0,052 \text{ ohm/ fase}$$

Rugi angina dan geseran	18,8 Kw
Rugi inti	37,6 Kw
Rugi medan (125 x 72 /1000)	9,0 Kw
Rugi jangkar = 3x (503) <sup>2</sup> x 0,052	39,4 Kw
Rugi beban sasar	2,2 Kw
Rugi total	= 107,0 Kw

$$\text{Efisiensi} = \eta = \left[ 1 - \frac{107}{1700 + 107} \right] \times 100\% = 94,1\%$$

### 6-9. Kerja parallel.

*Maksu dan tujuan kerja parallel*

1. Memperbesar kapasitas daya yang dibangkitkan untuk melayani beban yang besar atau konsumen, karena perkembangan beban yang terus meningkat.
2. Menjaga kontinuitas pelayanan kepada konsumen karena ada generator serempak atau ada pembangkit yang akan diperbaiki atau direparasi.

*Syarat kerja parallel*

1. Harga sesaat EMF kedua generator serempak harus sama besarnya dan arah vector nya bertentangan atau berlawanan. Sama halnya apabila satu generator serempak di parallel dengan jala-jala.
2. Frekuensi kedua generator serempak atau generator serempak dengan jala-jala harus sama.

3. Fase kedua generator serempak sama dan vektornya saling berlawanan atau bertentangan, demikian juga untuk generator serempak yang diparalel dengan jala-jala.
4. Urutan fase kedua generator serempak atau antara generator serempak dengan jala-jala harus sama.

Biasanya pada pembangkit tenaga listrik peralatan yang dipergunakan untuk memararel adalah *synchronoscope* untuk system yang lama, akan tetepi pada pembangkit system yang baru dipergunakan alat ukur (meter) yang ada tulisannya *fast* dan *slow*.

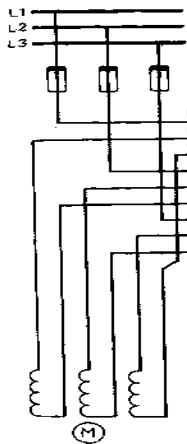
## 7. Latihan Soal-soal

1. Terangkan kegunaan dari mesin serempak !
2. Terangkan prinsip kerja mesin serempak !
3. Terangkan maksud dan syarat kerja paralel dari generator serempak!
4. Suatu generator serempak dengan kecepatan 250 rpm membangkitkan tegangan dengan frekuensi 50 Hz, mempunyai 216 alur, tiap alur berisi 5 pengantar, tiap lilitan dengan kisar penuh untuk 3 fase hubungan (Y). fluks per kutub 30 mWb. Hitung EMF per fase dan antara fase!
5. Suatu generator serempak 3 fase, 8 kutub, hubungan Y. Stator mempunyai 160 alur dengan 6 penghantar tiap alur, belitan dengan kisar penuh. Kecepatan rotor 750 rpm. Factor distribusi belitan 0,85. tegangan yang di bangkitkan 1000 volt antara fase. Hitung fluks yang dibutuhkan!
6. Suatu generator serempak 3 fase, 16 kutub mempunyai 144 alur dan tiap alur berisi 4 penghantar.  
Kecepatan 375 rpm, fluks  $5 \times 10^2$  Wb per kutub.  
Gawang lilitan  $150^0$  listrik. Hitung EMF per fase dan antara fase!
7. hitung tegangan induksi yang efektif per fase dari generator serempak 3 fase, 10 kutub, 50 Hz dengan 2 alur per kutub per fase dan 4 penghantar per alur, gawang (kisar) lilitan  $150^0$  listrik serta fluks per kutub 0,120 Wb.
8. Suatu generator serempak 3 fase, 16 kutub, hubungan Y mempunyai alur 144 dengan 10 penghantar per alur.  
Fluks per kutub 30 mWb hitung frekuensi, tegangan per fase dan antara fase jika kecepatan 375 rpm.
9. Suatu generator serempak  $3\Phi$ , 6000 KVA 6.600 volt, hubungan Y, 50 Hz melayani beban penuh dengan factor daya 0,8 mengikuti dan tegangan terminal 6.600 volt, jika resistans kumparan jangkar 0,2 ohm per fase dan reaktans sinkronnya 5,8 ohm per fase, hitung EMF antara fase yang harus dibangkitkan!
10. Suatu generator serempak  $3\Phi$ , 1200 KVA, 6600 volt, hubungan bintang dengan resistans jangkar 0,4 ohm per fase dan reaktans sinkronnya 5,8 ohm per fase, hitung EMF antara fase yang harus dibangkitkan!
11. suatu generator serempak  $3\Phi$ , 100 KVA, 11000 volt hubungan Y, mempunyai resistans jangkar 0,45 ohm per fase dan reaktans sinkron 4,62 ohm per fase.  
Hitung regulasi tegangan dari generator serempak tersebut waktu beban penuh pada factor daya 0,8 mengikut dan factor daya 0,8 mendahului

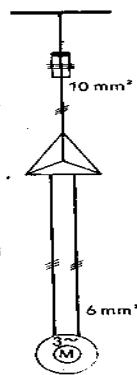
Dan bukan 10 A. Jadi motornya akan menjadi terlalu panas, dan akhirnya akan terbakar. Untuk motor-motor yang kapasitasnya lebih besar dari 5 HP, maka untuk startingnya biasanya harus menggunakan sakelar bintang-segitiga (Y- $\Delta$ ). Hal ini karena pada waktu start kuat arusnya bisa beberapa kali (6 kali) arus nominalnya, karena jika tidak menggunakan rangkaian starting maka kemungkinan akan memutuskan sekering pusat yang mengakibatkan motor tidak bisa bekerja.

Gambar 5-19 memperlihatkan diagram sebuah sakelar bintang-segitiga. Selanjutnya menurut ketentuan kalau saluran yang menghubungkan motor dengan sakelar bintang-segitiga digunakan kabel dengan luas penampang penghantar  $6 \text{ mm}^2$  atau lebih.

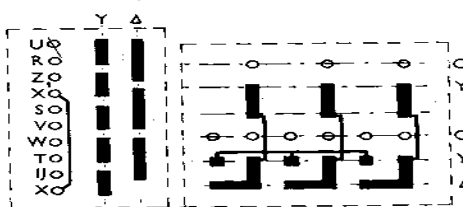
Jika untuk saluran supalinya digunakan kabel  $10 \text{ mm}^2$ , untuk saluran yang menghubungkan motor dengan sakelar bintang-segitiganya boleh digunakan kabel  $6 \text{ mm}^2$  (lihat Gambar 5-20).



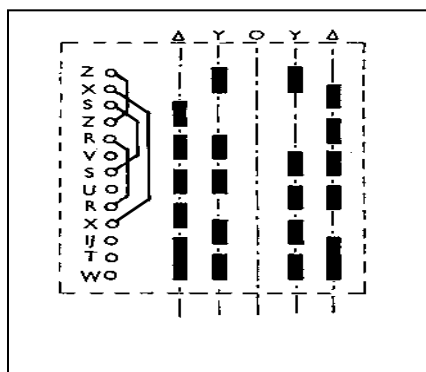
Gambar 5-19



Gambar 5-20

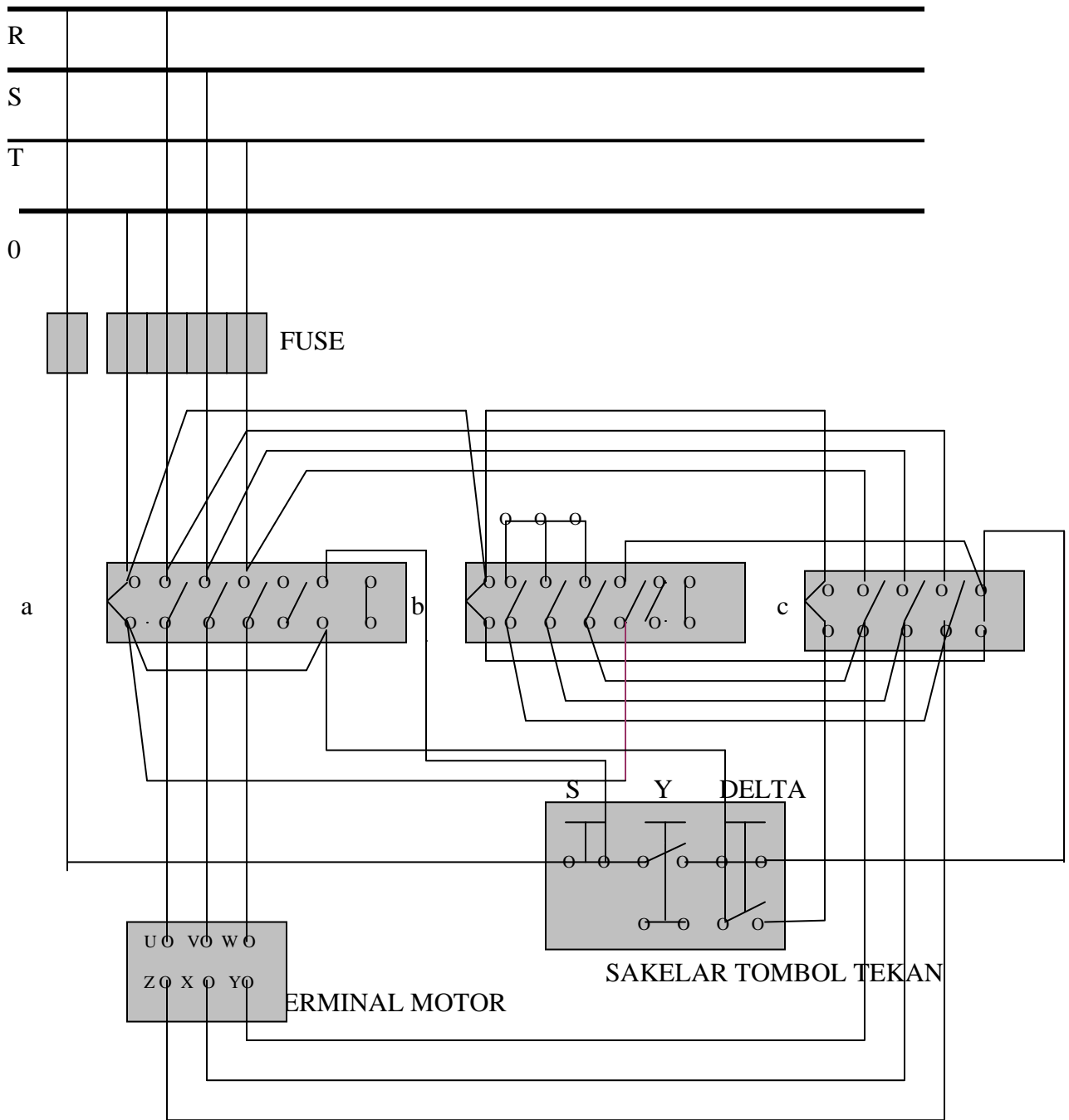


Gambar 5-21



GAMBAR 5-22 Diagram bentangan sakelar balik bintang-segitiga

### Rangkaian Starting Bintang-Segitiga dengan menggunakan sakelar magnetik



Gambar 5-23. Rangkaian Starting Bintang-Segitiga

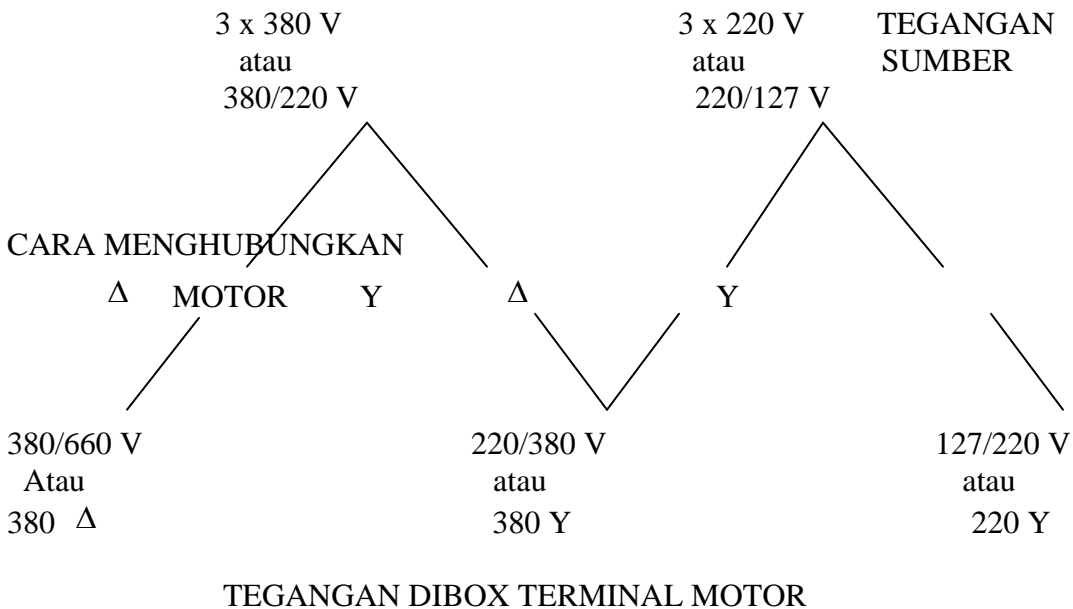
PRINSIP KERJANYA :

1. PADA WAKTU STARTING, MAKA TEKAN TOMBOL Y SEHINGGA ARUS DARI TOMBOL Y KE KONTAK NC KONTAKTOR C DAN DITERUSKAN

KE LILITAN KONTAKTOR B SEHINGGA KONTAKTOR B BEKERJA. KETIKA KONTAKTOR B BEKERJA MAKA ARUS DARI NC KONTAKTOR C DISALURKAN JUGA KE NO KONTAKTOR B DAN DITERUSKAN KE LILITAN KONTAKTOR A, SEHINGGA KONTAKTOR A DAN B BEKERJA BERSAMA-SAMA, AKIBATNYA SISTEM BEKERJA DALAM HUBUNGAN BINTANG. JIKA TOMBOL KONTAK Y DILEPAS KONTAKTOR A DAN B TETAP BEKERJA. HAL INI KARENA ADA ARUS PENGGANTI DARI KONTAKTOMBOL STOP MENGALIR KE NO KONTAKTOR A JUGA KE LILITAN KONTAKTOR C.

2. JIKA LANGSUNG DITEKAN TOMBOL DELTA, MAKA SEMUA KONTAKTOR TIDAK DAPAT BEKERJA. HAL INI KARENA TIDAK ADA ALIRAN ARUS.
3. SETELAH MOTOR BERJALAN BEBERAPA SAAT MAKA TEKAN TOMBOL DELTA, MAKA MOTOR BERUBAH DALAM HUBUNGAN DELTA. HAL INI KARENA PADA SAAT DITEKAN TOMBOL DELTA, MAKA LILITAN KONTAKTOR C TIDAK DAPAT ARUS SEHINGGA KONTAKTOR B TIDAK BEKERJA DAN LILITAN KONTAKTOR C MENDAPAT ARUS SEHINGGA KONTAKTOR C BEKERJA. SEDANGKAN KONTAKTOR A TERUS BEKERJA.

### Kemungkinan-kemungkinan untuk menghubungkan motor 3 fasa



### 3.12. MEMERIKSA MOTOR INDUKSI



1. Periksa as dari motor induksi dengan cara menggerakkan as motor itu ke atas dan ke bawah.
2. Periksa lilitan motor dengan menggunakan Ohm meter

### **Gangguan pada motor Induksi 3 fasa**

#### **Motor Induksi Rotor sangkar**

##### **Motor sulit dijalankan**

- sekering pada jaringan ada yang putus
- salah satu lilitan motor ada yang terbuka
- beban motor terlalu besar

##### **Motor berputar dalam keadaan panas**

- beban terlalu besar
- saluran pendingin tertutup atau kurang baik
- terdapat hubungsingkat pada lilitan stator
- tegangan yang diterima motor terlalu rendah atau terlalu tinggi
- frekuensi yang diterima terlalu rendah
- Salah satu dari kumparan/ lilitan stator terbuka
- Salah satu fasanya terbuka
- Terdapat hubung singkat dengan stator

##### **Motor berputar lambat**

- beban terlalu berat
- tegangan terlalu rendah atau frekuensi terlalu rendah yang diterima motor
- adanya keretakan pada rangkajangkar/rotor
- bantalan as roto macet atau bantalannya kotor
- terdapat hubungsingkat pada lilitan stator
- salah satu fasanya terbuka

#### **Motor Induksi Gelang seret**

##### **2.1. Motor sulit dijalankan**

- sekering pada jaringan ada yang putus
- salah satu lilitan motor ada yang terbuka
- beban motor terlalu besar
- Salah satu tahanan muka ada yang terbuka
- Tekanan dari sikat-sikat kurang sempurna
- Sikat-sikat tidak menyentuh pada cincin kolektor
- Terdapat hubungan yang terbuka pada rangkaian di dalam rotor/jangkar

##### **Motor berputar dalam keadaan panas**

- beban terlalu besar
- saluran pendingin tertutup atau kurang baik
- terdapat hubungsingkat antara lilitan stator
- tegangan yang diterima motor terlalu rendah atau terlalu tinggi
- frekuensi yang diterima terlalu rendah
- Salah satu dari kumparan/ lilitan stator terbuka

- Salah satu fasanya terbuka

### **2.3. Motor berputar sangat lambat**

- a. beban terlalu besar
- b. tegangan atau frekuensi yang diterima motor terlalu rendah atau terlalu tinggi
- c. Salah satu dari kumparan/ lilitan stator terbuka
- d. Salah satu fasanya terbuka
- e. terdapat hubungsingkat pada gulungan stator