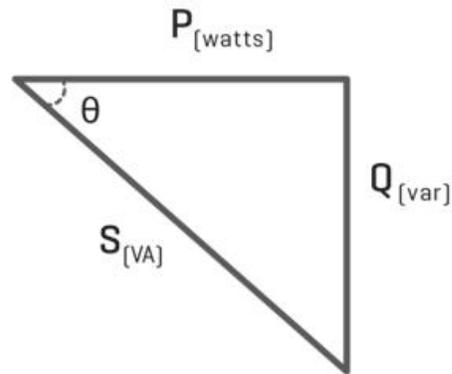


## 2. LANDASAN TEORI

### 2.1 Daya Listrik

Dalam sistem kelistrikan, yang dimaksud dengan daya adalah energi yang diperlukan untuk mentransfer satu muatan / elektron tiap satuan waktu. Daya listrik terbagi menjadi tiga jenis yaitu daya aktif, daya reaktif, dan daya nyata.



Gambar 2.1 Segitiga Daya

Sumber: Sankaran (2002, p134)

#### 2.1.1 Daya Aktif

Daya aktif merupakan daya yang dapat diubah menjadi bentuk energi lain.

Rumus dari daya aktif adalah (Sankaran, p133):

$$P_{1\phi} = V_{LN} \times I_L \times \cos \theta \quad (2.1)$$

$$P_{3\phi} = \sqrt{3} \times V_{LL} \times I_L \times \cos \theta \quad (2.2)$$

Keterangan:

$P_{1\phi}$  = Daya aktif 1 fasa (Watt)

$P_{3\phi}$  = Daya aktif 3 fasa (Watt)

$V_{LN}$  = Tegangan *Line-Netral* (V)

$V_{LL}$  = Tegangan *Line-Line* (V)

$I_L$  = Arus *Line* (A)

$\theta$  = Perbedaan sudut antara tegangan dan arus

### 2.1.2 Daya Reaktif

Daya reaktif merupakan daya yang diperlukan oleh peralatan listrik yang berkerja dengan sistem elektromagnet. Daya reaktif ini diperlukan untuk menghasilkan medan magnet pada motor, sehingga akan dihasilkan torsi dan motor akan dapat berputar. Rumus daya reaktif adalah:

$$Q1\phi = V_{LN} \times I_L \times \sin \theta \quad (2.3)$$

$$Q3\phi = \sqrt{3} \times V_{LL} \times I_L \times \sin \theta \quad (2.4)$$

Keterangan:

$Q1\phi$  = Daya reaktif 1 fasa (VAR)

$Q3\phi$  = Daya reaktif 3 fasa (VAR)

$V_{LN}$  = Tegangan *Line-Netral* (V)

$V_{LL}$  = Tegangan *Line-Line*(V)

$I_L$  = Arus *Line* (A)

$\theta$  = Perbedaan sudut antara tegangan dan arus

### 2.1.3 Daya Nyata

Daya nyata merupakan penjumlahan vektor daya aktif dan daya reaktif.

Rumus daya nyata adalah (Sankaran, p134):

$$S = P + jQ \quad (2.5)$$

$$|S| = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.6)$$

Keterangan:

$S$  = Daya nyata (VA)

$P$  = Daya aktif (Watt)

$Q$  = Daya reaktif (VAR)

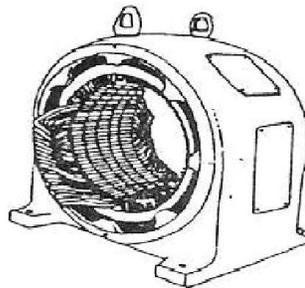
## 2.2 Motor Induksi

Motor induksi merupakan motor arus bolak – balik (AC) yang paling sering dijumpai di industri – industri maupun rumah tangga. Motor induksi pada dasarnya mempunyai 3 bagian penting:

1. Stator : Merupakan bagian yang diam dan mempunyai kumparan yang dapat menginduksikan medan elektromagnetik kepada kumparan rotornya.

2. Celah : Merupakan celah udara, tempat berpindahnya energi dari stator ke rotor.
3. Rotor : Merupakan bagian yang bergerak akibat adanya induksi magnet dari kumparan stator yang diinduksikan kepada kumparan rotor.

Stator dibentuk dari laminasi – laminasi tipis yang terbuat dari aluminium ataupun tembaga, dan kemudian dibentuk bersama – sama menjadi inti stator. Diantara stator dan rotor terdapat celah udara yang merupakan ruangan antara stator dan rotor. Pada celah udara ini lewat fluks induksi stator yang memotong kumparan rotor sehingga menyebabkan rotor berputar. Celah udara yang terdapat antara stator dan rotor diatur sedemikian rupa sehingga didapatkan hasil kerja motor yang optimum. Bila celah udara antara stator dan rotor terlalu besar akan mengakibatkan efisiensi motor induksi rendah, sebaliknya bila jarak antara celah terlalu kecil/sempit akan menimbulkan kesukaran mekanis pada mesin.

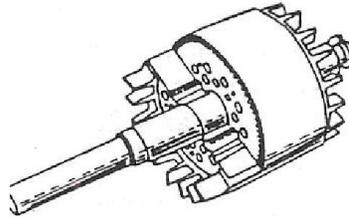


Gambar 2.2 Stator

Sumber: Zuhail (2000, p.101)

Rotor motor induksi tiga fasa dapat dibedakan menjadi dua jenis yaitu rotor sangkar (*squirrel cage rotor*) dan rotor belitan (*wound rotor*). Bagian – bagian rotor sangkar terdiri dari:

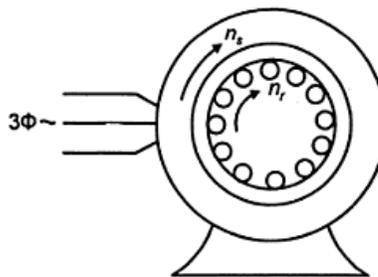
- Inti rotor, bahannya dari besi lunak atau baja silikon sama dengan inti stator.
- Alur, bahannya dari besi lunak atau baja silikon sama dengan inti. Alur merupakan tempat meletakkan belitan (kumparan) rotor.
- Belitan rotor, bahannya dari tembaga.
- Poros atau as.



Gambar 2.3 Rotor Sangkar  
Sumber: Zuhail (2000, p101)

Pada motor induksi tidak terdapat hubungan listrik antara stator dengan rotor, karena arus pada rotor merupakan arus induksi. Jika belitan stator diberi tegangan tiga fasa, maka belitan stator akan dialiri arus tiga fasa. Arus ini menghasilkan medan magnet yang berputar dengan kecepatan sinkron. Ketika medan magnetik memotong konduktor rotor, di dalam konduktor tersebut akan diinduksikan GGL. GGL induksi menyebabkan arus mengalir di dalam konduktor rotor sehingga dengan adanya aliran arus pada konduktor rotor di dalam medan magnet yang dihasilkan stator, maka akan dibangkitkan gaya ( $F$ ) yang berkerja pada motor.

### 2.2.1. Prinsip Kerja Motor Induksi



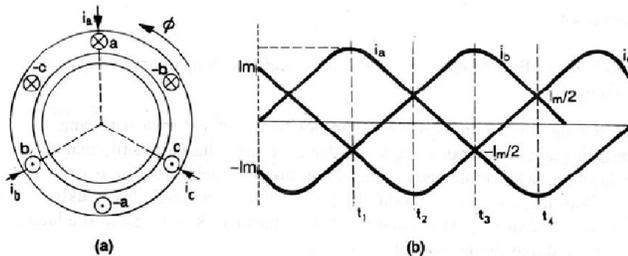
Gambar 2.4 Prinsip Kerja Motor Induksi  
Sumber: Zuhail (2000, p105)

Prinsip kerja dari motor induksi adalah sebagai berikut (Zuhail, 2000):

1. Apabila sumber tegangan tiga fasa disuplai pada kumparan stator akan timbul medan putar dengan kecepatan  $n_s = 120 \frac{f}{p}$  (2.7)
2. Medan putar stator tersebut akan memotong batang konduktor pada rotor.
3. Akibatnya pada kumparan rotor timbul tegangan induksi (ggl) sebesar:  

$$E_{2s} = 4.44 f_2 N_2 \phi_m$$
 (untuk satu fasa). (2.8)  
 $E_{2s}$  adalah tegangan induksi pada saat rotor berputar.
4. Karena kumparan rotor merupakan rangkaian yang tertutup, maka ggl (E) akan menghasilkan arus (I).
5. Adanya arus (I) di dalam medan magnet menimbulkan gaya (F) pada rotor.
6. Bila kopel mula yang dihasilkan oleh gaya (F) pada rotor cukup besar untuk memikul kopel beban, rotor akan berputar searah dengan medan putar stator.
7. Seperti telah dijelaskan pada (3) tegangan induksi timbul karena terpotongnya batang konduktor (rotor) oleh medan putar stator. Artinya agar tegangan terinduksi diperlukan adanya perbedaan relatif antara kecepatan medan putar stator ( $n_s$ ) dengan kecepatan berputar rotor ( $n_r$ ).
8. Perbedaan kecepatan antara  $n_r$  dan  $n_s$  disebut *slip* (s) dinyatakan dengan:  

$$s = (n_s - n_r)/n_s \times 100\%$$
 (2.9)
9. Bila  $n_r = n_s$ , tegangan tidak akan terinduksi dan arus tidak mengalir pada kumparan rotor, dengan demikian tidak dihasilkan kopel. Kopel motor akan ditimbulkan apabila  $n_r$  lebih kecil dari  $n_s$ .
10. Dilihat dari cara kerjanya, motor induksi disebut juga sebagai motor tak serempak atau asinkron.



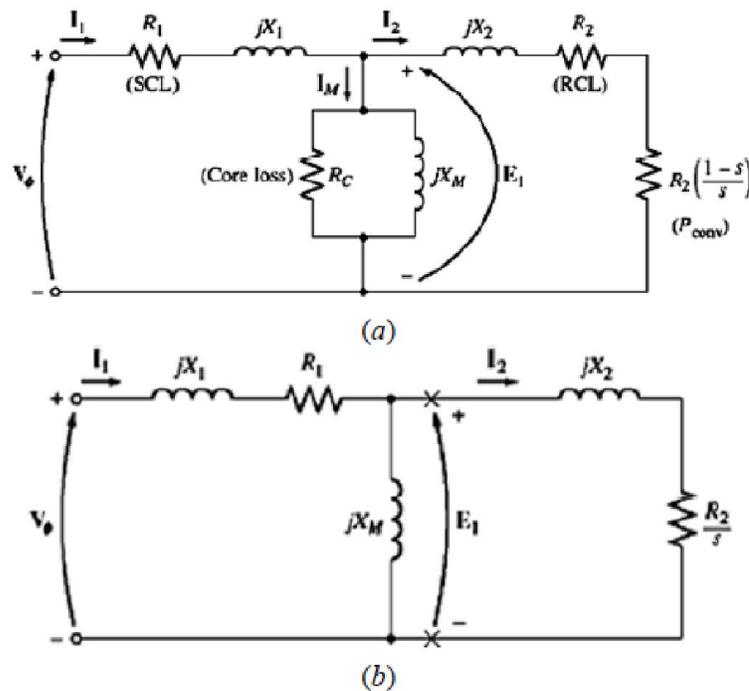
Gambar 2.5 Medan Putar Motor Induksi

Sumber: Zuhail (2000)

### 2.2.2. Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi

Operasi dari motor induksi tergantung pada induksi arus dan tegangan di dalam rangkaian rotor yang berasal dari rangkaian stator karena adanya aksi transformator. Induksi arus dan tegangan pada motor induksi pada dasarnya sama dengan operasi transformator, maka rangkaian ekuivalen motor induksi akan menyerupai rangkaian ekuivalen dari transformator.

Rangkaian ekuivalen per fasa dari transformator dapat menyatakan operasi dari motor induksi. Sebagaimana halnya pada transformator, maka terdapat tahanan ( $R_1$ ) dan induktansi sendiri ( $X_1$ ) pada belitan stator yang direpresentasikan dalam rangkaian ekuivalen. Gambar 2.6(a) memperlihatkan rangkaian ekuivalen per fasa motor induksi, sedangkan gambar 2.6(b) merupakan rangkaian ekuivalen alternatif.



Gambar 2.6 Rangkaian ekuivalen motor induksi

Sumber: Yandri (2011, p39)

Keterangan:

- $R_1$  = tahanan stator
- $X_1$  = reaktansi bocor stator
- $R_2$  = tahanan rotor mengacu ke stator
- $X_2$  = reaktansi bocor rotor mengacu ke stator
- $R_c$  = tahanan inti besi
- $X_m$  = reaktansi magnetisasi
- $I_1$  = arus stator
- $I_2$  = arus rotor mengacu ke stator
- $V_\phi$  = tegangan sumber
- $E_1$  = tegangan induksi stator

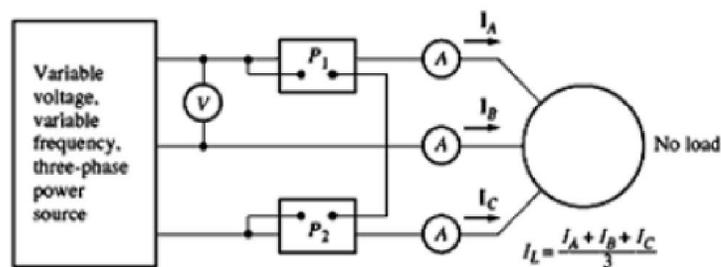
### 2.2.3. Pengujian Motor Induksi

Pengujian rangkaian ekivalen motor induksi sangat berguna sebagai alat untuk menentukan respon dari motor terhadap perubahan beban. Pengujian motor induksi dapat disamakan dengan pengujian *short circuit* dan *open circuit* pada transformator.

Ada 3 jenis pengujian yang digunakan untuk menentukan karakteristik motor induksi:

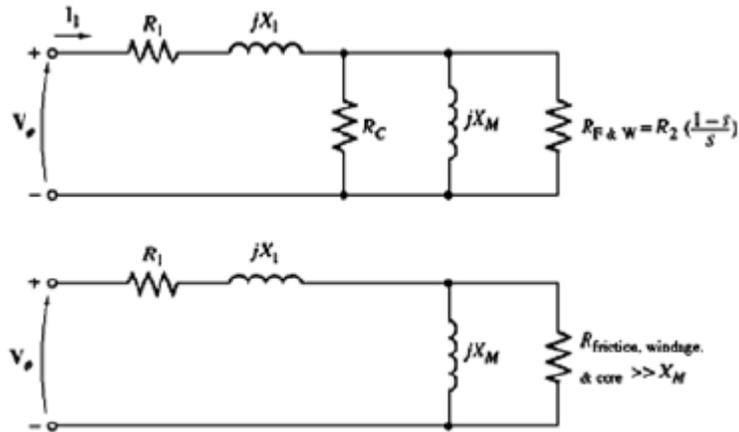
#### 1. Pengujian tanpa beban

Pengujian tanpa beban (*no-load test*) beroperasi tanpa menggunakan beban pada motor dan penahan rotor dilepas. Berikut adalah rangkaian untuk percobaan yang diperlihatkan pada gambar 2.7 dan rangkaian ekivalen motor induksi pada kondisi beban nol pada gambar 2.8:



Gambar 2.7 Rangkaian Percobaan

Sumber: Yandri (2011, p40)



Gambar 2.8 Rangkaian Ekivalen Tanpa Beban

Sumber: Yandri (2011, p40)

Pada kondisi ini yang hanya merupakan beban motor adalah rugi – rugi gesek dan angin, sehingga *slip* pada motor bernilai sangat kecil (kemungkinan sekitar 0,001 atau kurang). Pada gambar 2.8 rangkaian ekivalen menggambarkan operasi motor pada kondisi dimana tahanan  $R_c$  dan  $R_2 (1-s)/s$  yang terhubung paralel dengan reaktansi magnetisasi  $X_M$ . Arus yang dibutuhkan untuk menghasilkan medan magnet bernilai sangat besar pada motor induksi. Hal ini dikarenakan tingginya nilai reluktansi dan celah udara, sehingga reaktansi  $X_M$  akan bernilai jauh lebih kecil dibandingkan dengan nilai tahanan yang paralel dengannya. Dengan arus *lagging* yang besar, sebagian besar jatuh tegangan (*voltage drop*) akan terjadi pada komponen – komponen induktif rangkaian, dengan demikian impedansi *input* ekivalen secara pendekatan.

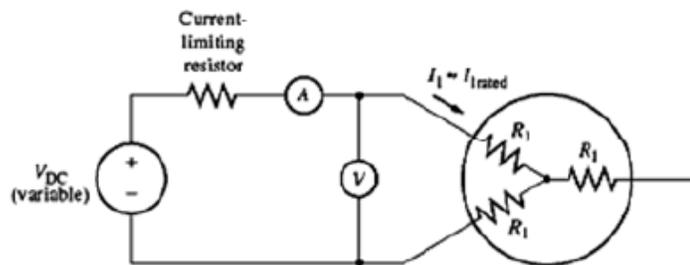
Dari gambar 2.8, tahanan inti ( $R_c$ ) dan reaktansi magnetisasi ( $X_M$ ) dapat ditentukan dengan cara sebagai berikut:

$$|Z_{eq}| \approx X_1 + X_M \quad (2.10)$$

Dan jika dengan cara lain  $X_1$  dapat ditentukan, maka reaktansi magnetisasi  $X_M$  juga akan dapat diketahui.

## 2. Pengujian DC untuk penentuan tahanan stator

Pengujian ini dilakukan dengan menghubungkan belitan stator motor induksi dengan tegangan DC. Karena arusnya adalah arus DC maka tidak ada tegangan yang diinduksikan pada rangkaian rotor, dengan demikian tidak ada arus yang mengalir pada rotor. Disamping itu pada arus DC, reaktansi motor bernilai nol. Dengan demikian, satu-satunya arus yang membatasi motor adalah tahanan stator dan karena itu besarnya tahanan dapat ditentukan. Rangkaian dasar untuk percobaan DC ini diperlihatkan pada gambar 2.9 dengan hubungan terminal motor induksi adalah Y.



Gambar 2.9 Rangkaian percobaan untuk pengujian tahanan DC

Sumber: Yandri (2011, p41)

Dari gambar 2.9 mengalir arus melalui dua belitan, sehingga tahanan total pada lintasan arus adalah  $2R_1$ . Oleh karena itu,

$$2R_1 = \frac{V_{DC}}{I_{DC}} \quad (2.11)$$

$$R_1 = \frac{V_{DC}}{2 I_{DC}} \quad (2.12)$$

Bila stator dihubungkan *delta*, maka tahanan yang terukur adalah dua tahanan stator yang terhubung seri dan paralel dengan satu tahanan stator maka besar tahanan stator yang terukur dikalikan dengan 1.5

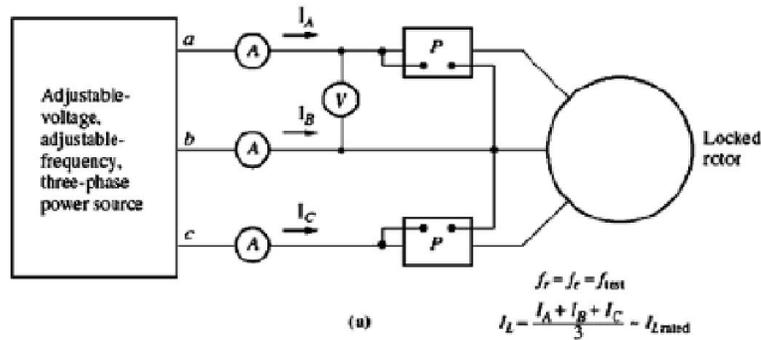
$$R_1 = \frac{3 V_{DC}}{2 I_{DC}} \quad (2.13)$$

Selain pengujian DC, resistansi dapat diukur secara langsung pada motor induksi dengan mengukur pada lilitan tiap fasa.

### 3. Pengujian rotor ditahan (*short circuit test*)

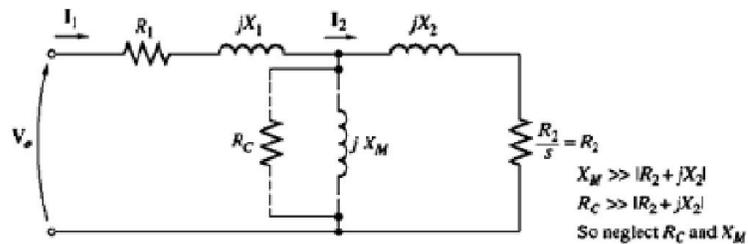
Tujuan dari pengujian ini adalah untuk menentukan konstanta motor induksi seperti  $R_2$  (tahanan rotor),  $X_1$  (reaktansi stator), dan  $X_2$  (reaktansi rotor).

Pada pengujian ini, rotor ditahan sehingga tidak dapat berputar, tegangan sumber dihubungkan ke motor. Tegangan sumber akan dinaikkan dari nol sampai arus nominal. Ketika arus mencapai nilai nominal, tegangan, arus, dan daya yang mengalir dicatat. Berikut adalah rangkaian percobaan dan rangkaian ekivalen dari percobaan rotor ditahan.



Gambar 2.10 Rangkaian percobaan rotor ditahan

Sumber: Yandri (2011, p41)



Gambar 2.11 Rangkaian ekivalen motor

Sumber: Yandri (2011, p41)

Pada gambar 2.11 perhatikan bahwa, dikarenakan rotor tidak bergerak, slip  $\approx 1$ , dan dengan demikian  $R_2/s$  justru sama dengan  $R_2$  (nilainya sangat kecil). Karena kecilnya nilai  $R_2$  dan  $X_2$  maka hampir seluruh arus *input* akan mengalir melaluinya, dibandingkan dengan arus yang mengalir melalui  $X_M$  yang nilainya jauh lebih besar. Oleh karena itu, rangkaian pada kondisi ini terlihat seperti kombinasi seri dari  $X_1$ ,  $R_1$ ,  $X_2$ , dan  $R_2$ .

Dari gambar 2.11, daya yang masuk ke motor sama dengan:

$$P_{in} = \sqrt{3} \times V_{LL} \times I_L \cos \theta \quad (2.15)$$

Total impedansi pada rangkaian kondisi rotor ditahan,

$$|Z_{LR}| = \frac{V_{LL}}{\sqrt{3}I_L} \quad (2.16)$$

Bila

$$|Z_{LR}| = R_{LR} + jX_{LR} \quad (2.18)$$

Maka

$$R_{LR} = |Z_{LR}| \cos \theta \quad (2.19)$$

$$jX_{LR} = j|Z_{LR}| \sin \theta \quad (2.20)$$

Tahanan rotor ditahan  $R_{LR}$  sama dengan:

$$R_{LR} = R_1 + R_2 \quad (2.21)$$

Reaktansi rotor ditahan  $X_{LR}$  sama dengan,

$$X_{LR} = X_1 + X_2 \quad (2.22)$$

Tabel 2.1 Tabel distribusi  $X_1$  dan  $X_2$  pada berbagai desain motor induksi

Desain Rotor	$X_1$ dan $X_2$ sebagai fungsi dari $X_e$	
	$X_1$	$X_2$
\Wound Rotor (Performance varies with rotor resistance)	0.5 $X_{RL}$	0.5 $X_{RL}$
Desain A (Normal starting torque, normal starting current)	0.5 $X_{RL}$	0.5 $X_{RL}$
Desain B (Normal starting torque, low starting current)	0.4 $X_{RL}$	0.6 $X_{RL}$
Desain C (High starting torque, low starting current)	0.3 $X_{RL}$	0.7 $X_{RL}$
Desain D (High starting torque, high slip)	0.5 $X_{RL}$	0.5 $X_{RL}$

Sumber: Yandri (2011, p42)

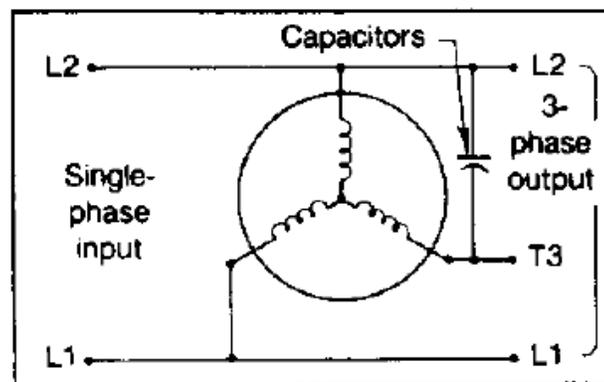
### 2.3 Rotary Converter

*Rotary converter* menggunakan motor induksi sebagai mesin yang berputar untuk mengubah listrik satu fasa menjadi listrik tiga fasa. Motor tersebut untuk mengoperasikan peralatan tiga fasa. *Rotary converter* menggunakan motor

induksi tiga fasa dan kapasitor yang dikombinasikan untuk menghasilkan listrik tiga fasa dengan menggunakan sumber listrik satu fasa. Sumber listrik satu fasa dihubungkan pada dua dari tiga fasa motor induksi.

### 2.3.1. Rangkaian Dasar

*Rotary converter* menggunakan sebuah motor induksi sebagai motor *idler*, dan dihubungkan kapasitor bank pada fasa ke fasa kumparan motor induksi. Motor induksi diberikan *input* sumber listrik satu fasa, seperti pada gambar 2.12.



Gambar 2.12 Rangkaian Sederhana dari *rotary converter*

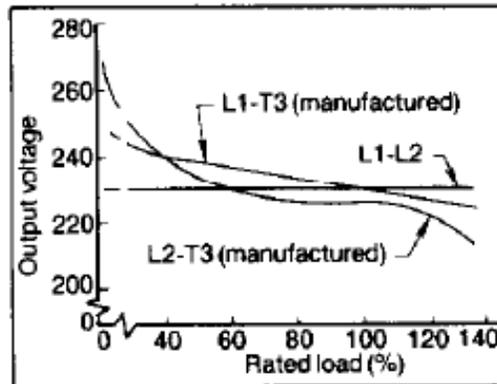
Sumber: Katz, Larry H (p.4)

Kapasitor disini digunakan untuk menggeser tegangan ke medan magnet yang berdekatan untuk menghasilkan torsi pada rotor. Dari *input* yang diberikan melalui induksi tercipta arus rotor. Arus rotor menciptakan medan magnet yang secara bergiliran menginduksi setiap kumparan stator yang posisinya berjarak  $120^\circ$ . Sehingga menghasilkan *output* tiga fasa *sinusoidal* dengan setiap fasa bergeser  $120^\circ$ . Fasa bergeser terjadi karena induksi dan dibantu adanya kapasitor. Tidak diragukan lagi bahwa *output* tegangan dari proses *rotary* adalah sumber listrik tiga fasa di dalam sebuah motor tiga fasa. Namun *rotary converter* memiliki ratio 1:1, yang berarti tegangan *input* listrik satu fasa dikonversikan kembali dan menghasilkan tegangan yang sama dictator terutama untuk fasa yang tidak terhubung dengan sumber satu fasa. *Output* dari *rotary converter* adalah 3-

wire *delta* dan tidak dapat menjadi 4-wire *wye*. Jika output yang dibutuhkan adalah 4-wire *wye* maka harus menggunakan *delta-wye transformer*.

### 2.3.2. Karakteristik output

Output dari *rotary converter* tergantung dari beban. Pada gambar 2.13, pada saat tanpa beban tegangan fasa (L2-T3 dan L1-T3) akan lebih besar daripada tegangan yang masuk. Pada saat memiliki beban penuh, tiga tegangan akan seimbang. Jika beban melebihi pada kapasitas *rotary converter* maka tegangan pada output akan turun drastis dan ketiga tegangan menjadi tidak seimbang.



Gambar 2.13 Output tegangan beban untuk *rotary converter* dengan 230V supply

Sumber: Katz, Larry H (p.4)

### 2.3.3. Kontrol

Sistem kontrol yang paling umum dipakai untuk *rotary converter* adalah sebuah saklar pemutus untuk isolasi dan perlindungan hubung singkat. *Rotary converter* dapat terus menerus diaktifkan sampai dimatikan secara manual. Sistem starting *rotary converter* menggunakan *start capacitor* sampai motor mencapai rpm maksimal. Untuk menghubungkan *start capacitor* dapat menggunakan push button atau relay, dengan syarat *start capacitor* akan terputus bila mencapai rpm maksimal.

#### 2.3.4. Ukuran Kabel (Katz, Larry H)

Ada dua buah ukuran kabel yang terdapat pada *rotary converter*. Yang pertama adalah kabel tiga fasa menuju beban dan yang kedua adalah kabel dari sumber satu fasa menuju *rotary converter*. Langkah awal adalah mengetahui arus maksimum dari beban. Untuk kabel tiga fasa, arus maksimum beban dikalikan 1.25 (125%) untuk mengetahui nilai arus pada kabel sesuai dengan *NEC Section 430-22(a)*. Lihat pada Persamaan 2.23

Minimum rating arus kabel pada motor =

$$1.25 \times \text{Arus beban penuh} \quad (2.23)$$

Untuk kabel sumber satu fasa arus maksimum beban dikalikan dengan 2.2 (220%). Lihat pada Persamaan 2.24

Minimum rating arus dari *input* phasa konverter =

$$2.2 \times \text{Arus beban penuh} \quad (2.24)$$