

# UNJUK KERJA MOTOR INDUKSI ROTOR LILIT SEBAGAI VARIABEL-TRANSFORMATOR

(The Performance of a Wound Rotor Induction Motor used as a Variable Transformer)

Lukman Subekti<sup>1)</sup>, Ma'un Budiyanto<sup>2)</sup>

<sup>1,2)</sup> Dosen Program Diploma T. Elektro FT-UGM

Alamat Jalan Yacaranda Sekip Unit IV Yogyakarta Telp. 0274-6491302

E-mail: [lukmansubekti@yahoo.com](mailto:lukmansubekti@yahoo.com), [m.budiyanto@ugm.ac.id](mailto:m.budiyanto@ugm.ac.id)

## Abstract

Generally induction motor is used as a tool to change electric power to mechanic one. In forced condition wound-rotor induction motor can be used as transformer. This case can be accepted for both machines work by induction principle. Stator is the primary side of a three phase-transformer. Magnetic field produced by stator cuts across rotor conduction. This induction voltage causes the rotor current to flow. However, induction motor is one of non-linear load and be able to cause harmonic in alternating current.

The objective of this research is to acknowledge the work of wound-rotor induction motor when its function is changed into a transformer.

The research was done by the wound rotor supplied sinusoidal voltage as the primary of a three phase-transformer. The magnetic field produced by rotor cuts across stator conductor. Rotor position was regulated from  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $135^\circ$ , up to  $360^\circ$ . In stator winding, the amount of emf induced proportional to the rate of flux change and the number of its wound.

The result of research shows that wound-rotor induction motor can be used as variable transformer. Voltage change obtained is about 8%. Voltage waved form is defect sinusoidal. The average value of Total Harmonic Distortion (THD) is 1.8% for displacement of rotor angle from  $0^\circ$  up to  $360^\circ$ .

Keyword : performance, motor, used as, variable transformer

## 1 PENDAHULUAN

Pada waktu seorang praktisi memperbaiki peralatan listrik, terkadang memerlukan sumber listrik tegangan bolak-balik yang harus diubah-ubah besarnya. Hal ini dilakukan untuk memberikan suplai tegangan yang sesuai dengan tegangan yang dibutuhkan peralatan. Pensuplai tegangan yang lazim digunakan untuk tujuan tersebut adalah autotrafo tiga fase. Namun autotrafo tidak selalu tersedia di tempat. Apabila tersedia sebuah motor induksi rotor lilit, maka motor tersebut diharapkan dapat digunakan sebagai pengganti autotrafo tiga fase. Motor induksi adalah salah satu mesin listrik yang berfungsi untuk mengubah daya listrik menjadi daya mekanik. Namun mesin ini adalah salah satu jenis beban listrik non-linear yang dapat menimbulkan berbagai macam komponen harmonik di dalam jaringan listrik. Tentu saja mesin tersebut mempunyai andil dalam penurunan kualitas daya listrik.

Kualitas daya listrik sangat menentukan unjuk kerja dari peralatan yang disuplainya, karena itu jika motor induksi dialihfungsikan sebagai suplai daya listrik perlu dikaji sejauh mana efektifitasnya.

## 2 TINJAUAN PUSTAKA

Motor induksi tiga fase sangat mirip konstruksinya dengan transformator tiga fase. Motor induksi memiliki tiga buah belitan primer yang identik dan tiga buah belitan sekunder yang identik. Dalam keadaan siap berputar (*standstill*), motor induksi betul-betul bertingkah seperti transformator konvensional (Theodore Wildi, 1997). Pada saat *standstill*, ketika rotor belum berputar, medan putar yang memotong-motong penghantar rotor berada pada tingkat maksimum. Pada kondisi tersebut, tegangan yang dibangkitkan dalam rangkaian rotor akan mencapai nilai maksimum dan ditentukan oleh jumlah lilitan pada rotor. Maksudnya tegangan imbas dalam rotor dan stator tiap fase terkait oleh perbandingan lilitan, seperti halnya yang terjadi pada primer dan sekunder sebuah trafo. Hal itu juga frekuensi tegangan imbas rotor sama dengan frekuensi stator saat rotor diam. Dalam kondisi ini slipnya bernilai 1 atau 100% (Peter F. Ryff, 1994).

Jika suatu tegangan periodik nonsinusoidal diterapkan pada motor induksi, bentuk gelombang arusnya tidak akan menjadi sinusoidal, tetapi bentuk gelombang tersebut dapat direpresentasikan sebagai deret Fourier (Hart, 1997).

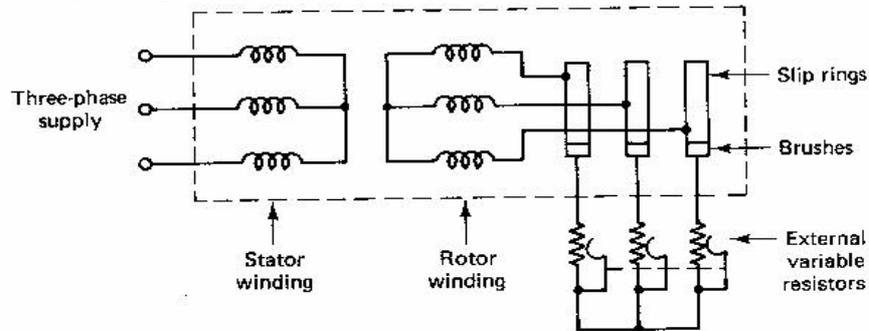
## 3. LANDASAN TEORI

Motor induksi rotor lilit umumnya dirancang jika dikehendaki pengaturan melalui sisi sekunder, yakni menambah tahanan luar sewaktu motor mulai berputar dan mengatur putaran sesuai kebutuhan beban saat motor sudah berputar.

Medan magnet putar stator ini akan memotong-motong konduktor pada kumparan rotor yang mengakibatkan pada ujung-ujung dari masing-masing kumparan rotor timbul gaya-ggerak listrik induksi sebesar :

dengan 
$$E_r = 4,44 \cdot f \cdot N_r \cdot \Phi_m \dots\dots\dots (1)$$

$E_r$  : tegangan induksi saat rotor start (Volt)  
 $f$  : frekuensi (Hz)  
 $N_r$  : jumlah kumparan rotor  
 $\Phi_m$  : fluks putar maksimum (Weber)



Gambar 1 Diagram Skema Motor Induksi Rotor Lilit

Dari gambar 1 terlihat bahwa ketiga ujung kumparan rotor dihubungkan dengan tiga cincin yang diisolasi satu terhadap yang lainnya. Melalui sikat yang menempel pada cincin tersebut, dihubungkan dengan resistor luar untuk mengatur arus pada rotor. Setelah timbul gaya gerak listrik induksi  $E_r$  pada rotor dan ketiga jepitan dirangkai tertutup, maka arus rotor akan mengalir.

Frekuensi yang dibangkitkan pada lilitan rotor adalah  $f_2$ , dengan

$$f_2 = \frac{(N_s - N_r) \cdot p}{120} \dots\dots\dots (2)$$

Sedangkan frekuensi medan putar stator adalah  $f_1$ , dengan

$$f_1 = \frac{N_s \times p}{120} \dots\dots\dots (3)$$

$p$  adalah jumlah kutub.

Dari persamaan di atas diperoleh persamaan berikut :

$$\frac{f_2}{f_1} = \frac{N_s - N_r}{N_s}$$

$$f_2 = s \times f_1$$

dengan  $s$  adalah slip motor

Slip adalah perbedaan kecepatan putar antara kecepatan putar medan stator ( $N_s$ ) dan kecepatan mekanik rotor ( $N_r$ ). Dalam prosentase, slip ( $s$ ) dinyatakan :

$$s = \frac{(N_s - N_r)}{N_s} \times 100\% \dots\dots\dots (4)$$

Besarnya slip berkisar antara 0% sampai dengan 100%. Apabila slip = 0 maka kecepatan putaran rotor ( $N_r$ ) akan sama dengan kecepatan medan putar stator ( $N_s$ ). Sebaliknya apabila rotor ditahan hingga berhenti ( $N_r$ ) = 0, maka slip = 1.

Dari persamaan  $f_2 = s \times f_1$  diketahui bahwa frekuensi rotor dipengaruhi oleh slip. Artinya bila rotor berhenti, maka baik rotor maupun stator memiliki frekuensi yang sama.

Pada saat motor induksi dalam keadaan *standstill*, artinya motor dihubungkan dengan sumber arus bolak balik (*alternating current*) dan pada saat awal belum berputar slip = 1, maka performa motor ini mirip dengan transformator tiga fase. Perbedaan yang nyata pada kondisi ini adalah : pada transformator umumnya kedua belitan berada pada inti besi yang sama, sedangkan pada motor induksi kedua belitan primer dan sekunder berada pada dua buah inti besi yang berbeda. Karena kedua buah belitan berada pada inti besi yang berbeda dan dibatasi oleh celah udara, maka posisi kedua belitan dimungkinkan untuk diubah-ubah.

Motor induksi dapat diidentikkan dengan transformator dengan kumparan stator sebagai kumparan primer, sedangkan kumparan rotornya sebagai kumparan sekunder. Bila sumber diberikan pada kumparan rotor, maka konfigurasi menjadi sebaliknya, yakni rotor sebagai primer sedangkan stator sebagai sekunder.

Transformator (trafo) adalah suatu alat listrik yang dapat memindahkan daya listrik pada satu tingkat tegangan listrik AC ke tingkat tegangan yang lain melalui gandingan magnet (Chapman, 1999). Kerja transformator yang berdasarkan prinsip induksi memerlukan adanya gandingan magnet antara rangkaian primer dan sekunder. Apabila kumparan primer dihubungkan dengan sumber tegangan sinusoidal maka akan mengalir arus bolak-balik dan timbul fluks magnet yang berubah-ubah terhadap intinya. Akibat adanya fluks magnet yang berubah-ubah pada kumparan primer akan timbul GGL induksi ( $e_p$ ). Adapun induksi pada kumparan primer dirumuskan sebagai :

$$e_p = -N_p \frac{d\Phi}{dt} \dots\dots\dots (5)$$

dengan  $e_p$  : GGL induksi pada kumparan primer (volt )  
 $N_p$  : Jumlah lilitan kumparan primer  
 $d\Phi$  : Perubahan garis-garis gaya magnet (weber)  
 $dt$  : perubahan waktu (detik)

Fluks magnet yang menginduksi GGL ( $e_p$ ) juga berimbas pada kumparan sekunder dengan demikian fluks tersebut menginduksi GGL ( $e_s$ ) pada kumparan sekunder yang nilainya adalah

$$e_s = -N_s \frac{d\phi}{dt} \dots\dots\dots (6)$$

dengan  $e_s$  : GGL induksi pada kumparan primer (volt )  
 $N_s$  : Jumlah lilitan kumparan sekunder  
 $d\Phi$  : Perubahan garis-garis gaya magnet (weber)  
 $dt$  : Perubahan waktu (detik)

Fluks pada t dinyatakan dengan pernyataan  $\Phi(t) = \Phi_m \times \sin \omega t$ , dimana  $\Phi_m$  nilai fluks maksimum dalam weber, sehingga ggl induksi pada kumparan primer adalah :

$$e_p = -N_p \times \omega \times \Phi_m \times \cos \omega t \dots\dots\dots (7)$$

Dari persamaan di atas dapat dibuktikan bahwa fluks magnet fungsi sinus akan menimbulkan GGL induksi fungsi sinus. GGL induksi akan tertinggal  $90^0$  terhadap fluks magnet. GGL induksi kumparan primer maksimum adalah sebesar  $(e_p)_{max} = N_p \times \omega \times \Phi_m$

Menurut Hart (1997), tegangan efektif didefinisikan sebagai tegangan yang setara dengan tegangan dc (*direct current*). Dalam pensuplai daya rerata nilai tegangan efektif juga dikenal sebagai nilai tegangan rms (*root mean square*). Besarnya tegangan efektif ( $E_p$ ) dapat dihitung dengan persamaan :

$$E_p = \frac{(e_p)_{max}}{\sqrt{2}} \dots\dots\dots (8)$$

$$E_p = 4,44 \times f \times N_p \times \Phi_m \dots\dots\dots (9)$$

Sedangkan besarnya tegangan imbas kumparan sekunder maksimum adalah :  $(e_s)_{max} = N_s \times \omega \times \Phi_m$ , besarnya tegangan efektif ( $E_s$ ) dapat dihitung dengan persamaan :

$$E_s = 4,44 \times f \times N_s \times \Phi_m \dots\dots\dots (10)$$

Dalam keadaan *standstill*, apabila pada rotor motor induksi posisinya digeser dengan variasi sudut tertentu, maka fluks maksimum yang diterima sisi sekunder akan memiliki nilai yang bervariasi pula.

Perbandingan lilitan adalah perbandingan banyaknya lilitan kumparan primer dan sekunder. Hal ini dapat dinyatakan dengan rumus sebagai berikut :

$$a = \frac{E_2}{E_1} = \frac{4,44 \times N_2 \times f \times \phi_m}{4,44 \times N_1 \times f \times \phi_m} \dots\dots\dots (11)$$

$$a = \frac{E_2}{E_1} = \frac{N_2}{N_1} \dots\dots\dots (12)$$

dengan  $a$  : perbandingan nilai lilitan  
 $E_1$  dan  $E_2$  : ggl induksi pada primer dan sekunder  
 $N_1$  dan  $N_2$  : jumlah lilitan primer dan sekunder

Sehingga berdasarkan perbandingan trafo ini dikenal beberapa jenis trafo, yaitu :

- a. Trafo *step up*, bila ggl induksi sekunder ( $E_2$ ) lebih besar dari ggl induksi ( $E_1$ ) atau ( $a > 1$ )
- b. Trafo *step down*, bila ggl induksi sekunder ( $E_2$ ) lebih kecil dari ggl induksi ( $E_1$ ) atau ( $a < 1$ )
- c. Trafo isolasi, bila ggl induksi sekunder ( $E_2$ ) sama dengan ggl induksi ( $E_1$ ) atau ( $a = 1$ )

Gaya gerak listrik (GGL) diukur dengan volt-meter dalam satuan volt (V). Bentuk gelombang tegangan dan arus periodik yang ada di peralatan direpresentasikan oleh deret Fourier sebagai :

$$v(t) = V_o + \sum_{n=1}^{\infty} V_n \cos(n \omega_o t + \theta_n) \dots\dots\dots (13).$$

Daya rata-rata dapat dihitung dengan persamaan :

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T v(t)i(t)dt \dots\dots\dots (15).$$

Daya rata-rata untuk tegangan dan arus periodik nonsinusoidal adalah :

$$P = \sum_{n=0}^{\infty} P_n = V_o I_o + \sum_{n=0}^{\infty} V_{n,rms} I_{n,rms} \cos(\theta_n - \phi_n) \dots\dots\dots (16).$$

dengan  $I_o$  : komponen arus searah  
 $V_o$  : komponen tegangan searah  
 $n$  : orde harmonik  
 $V_n$  : amplitudo tegangan harmonik orde ke- $n$   
 $I_n$  : amplitudo arus harmonik orde ke- $n$   
 $\theta_n$  : sudut fase tegangan harmonik orde ke- $n$   
 $\phi_n$  : sudut fase arus harmonik orde ke- $n$   
 $\omega$  :  $2\pi f$   
 $rms$  : nilai *root mean square*.

Distorsi harmonik total (THD = *Total Harmonic Distortion*) dari bentuk gelombang sinusoidal tidak murni adalah perbandingan semua nilai rms frekuensi bukan dasar terhadap nilai frekuensi dasar, adalah :

$$THD = \sqrt{\frac{\sum_{n \neq 1} V_{n,rms}^2}{V_{1,rms}^2}} \dots\dots\dots (17)$$

#### 4. METODE PENELITIAN

Bahan dan alat uji yang dipergunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

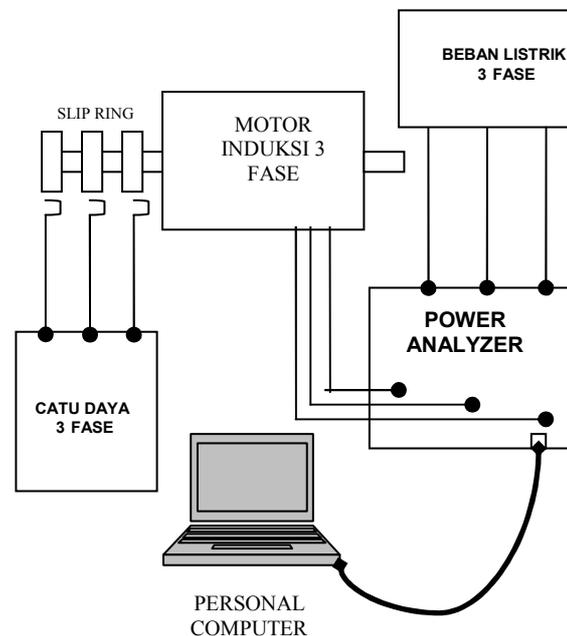
1. Motor Induksi rotor lilit 3 Fase dengan spesifikasi :  
 Type : DL10120  
 220/380 V  $\Delta$ /y      1,1/0,5 A  $\Delta$ /y      220 W  
 Cos  $\Theta$  0,7      2850 min<sup>-1</sup>      50 Hz  
 Isol KL. F

2. Motor Induksi rotor lilit 3 Fase dengan spesifikasi :

AEG. Type. CAM : 112 MU 4R1 Nr : 2T343690  
 $\Delta/y$  220/380 V 10,7/6,2 A 2,2 kW  
 Cos  $\Theta$  0,67 1410 rpm 50 Hz  
 Isol KL. B/F IP 44 VDE 0530 11,72 LFR Y 95 V 13,5 A

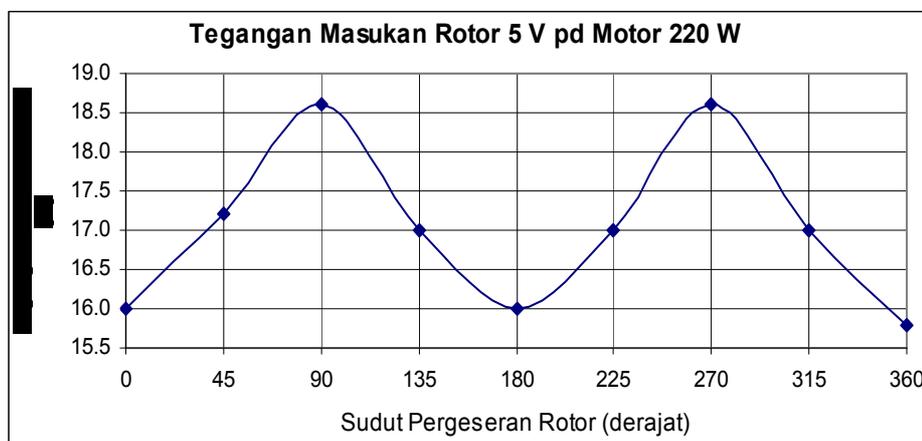
Prosedur Penelitian

1. Seperti ditunjukkan dalam gambar 2, rotor lilit motor induksi disuplai tegang bolak-balik dari catu daya dengan arus masukan dipantau sehingga tidak melebihi batas-batas pengenal yang tertera pada papan nama (*name plate*).
2. Dari sisi stator tegangan keluaran dapat diambil
3. Terminal stator dibiarkan tanpa beban, tetapi dihubungkan dengan volt meter, dan power analyzer.
4. Sisi rotor diputar pelan-pelan dengan tangan untuk mengatur tegangan keluaran.
5. Seluruh data pengukuran pada sisi stator direkam untuk dibandingkan dengan data sisi rotor.
6. Langkah di atas diulangi dengan kondisi sisi stator dihubungkan dengan beban listrik.



Gambar 2. Skema Rangkaian Percobaan

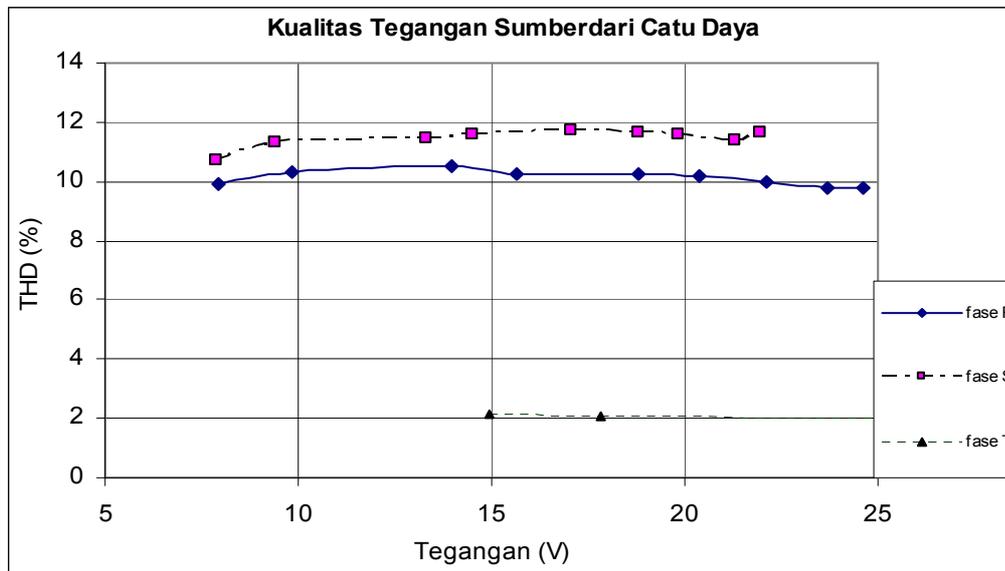
5 HASIL DAN PEMBAHASAN



Gambar 3. Tegangan Keluaran Stator Fungsi Sudut Pergeseran Rotor dengan Tegangan Masukan 5 V

Tampak pada Gambar 3 untuk pergeseran 0°, 180°, dan 360° nilai tegangan keluaran pada posisi minimal, artinya pada posisi tersebut fluks magnet pada rotor tidak efektif memotong penghantar stator. Seiring dengan pergeseran rotor pada posisi 90°, dan 270° tampak bernilai maksimum, artinya pada sudut ini fluks magnet memotong penghantar stator pada posisi mendekati tegak lurus.

Dalam satu periode putaran, tampak bahwa terjadi dua kali nilai puncak. Hal ini mengindikasikan bahwa motor tersebut memiliki dua buah kutub magnet.

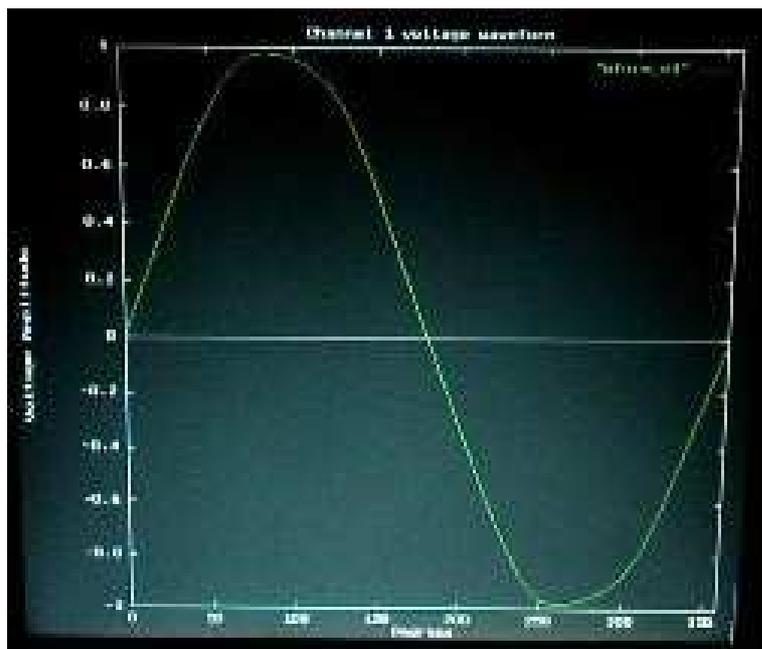


Gambar 4. Nilai THD Tegangan Keluaran dari Catu Daya

Tegangan sumber diperoleh dari catu daya 3 fase yang disuplaikan ke sisi rotor motor induksi rotor lilit. Gambar 4 menunjukkan masing-masing fase tidak sama, tetapi THD-nya relatif konstan untuk berbagai macam perubahan tegangan.

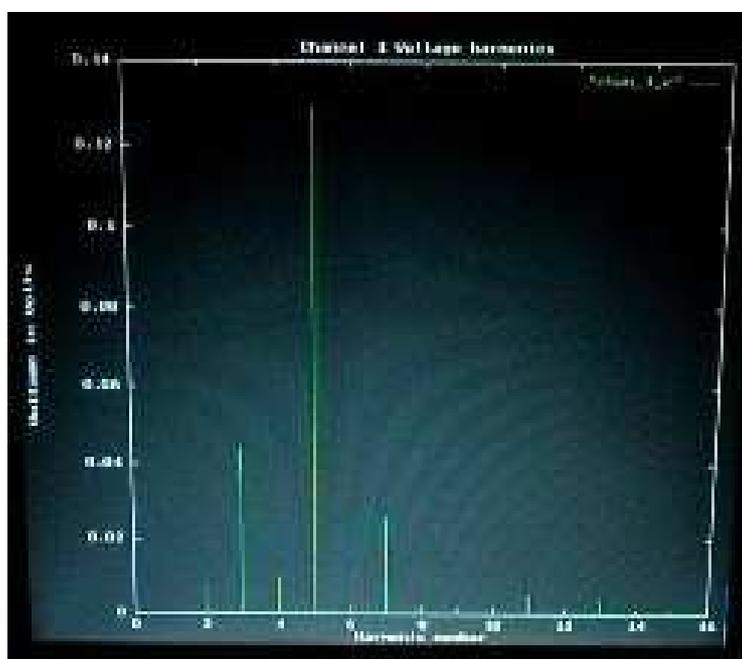
Tabel 1. Hasil Pengukuran Keluaran pada Stator Motor Induksi Rotor Lilit 220 W dengan Tegangan Masukan ke Rotor 5 V

No.	Sudut Pergeseran Rotor (derajat)	Fase R			Fase S			Fase T			Daya Total (W)
		Arus (A)	Teg. (V)	THD (%)	Arus (A)	Teg. (V)	THD (%)	Arus (A)	Teg. (V)	THD (%)	
1	0	0.663	9,35	2,23	0.685	9,70	1,90	0.688	9,71	1,90	10.24
2	45	0.702	9,95	1,88	0.687	9,82	1,95	0.667	9,44	2,09	9.939
3	90	0.674	9,59	2,20	0.682	9,72	1,88	0.707	10,06	1,86	9.889
4	135	0.704	9,96	1,95	0.689	9,75	1,87	0.666	9,43	2,07	10.09
5	180	0.660	9,36	2,26	0.681	9,73	1,78	0.686	9,76	1,79	10.12
6	225	0.710	10,15	1,84	0.679	9,74	2,11	0.682	9,72	1,88	9.928
7	270	0.684	9,73	2,09	0.685	9,82	1,83	0.692	9,88	1,83	10.22
8	315	0.712	10,12	1,84	0.697	9,92	1,98	0.694	9,86	1,84	10.03
9	360	0.670	9,50	2,09	0.674	9,62	1,99	0.681	9,68	1,99	9.895

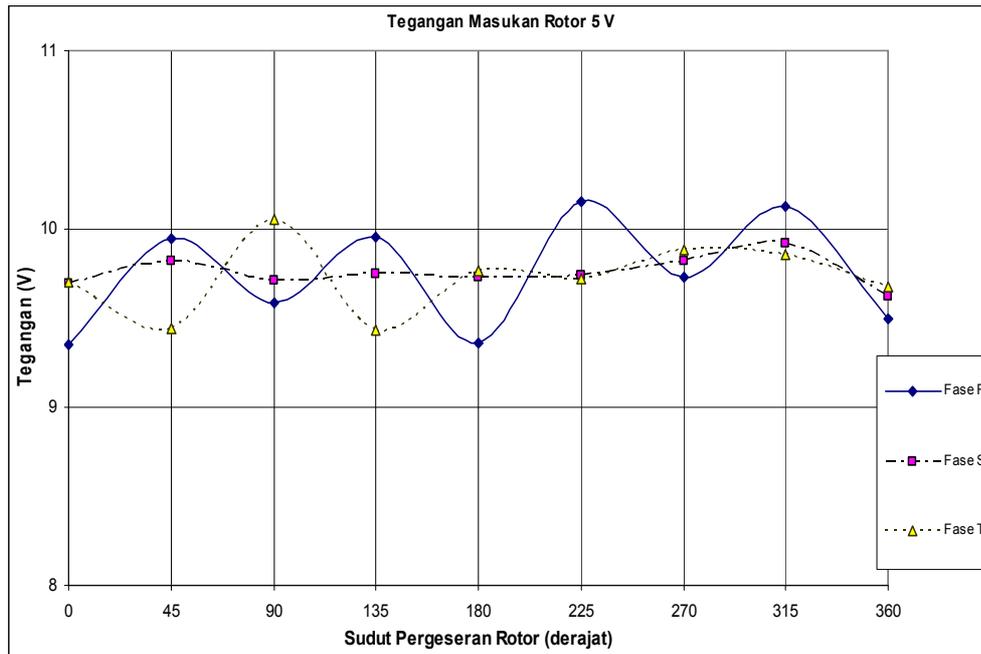


Gambar 5. Osilogram Bentuk Gelombang Tegangan Cacat 9,35 V

Gambar 5 adalah bentuk gelombang tegangan cacat hasil keluaran dari stator motor induksi dengan THD 2,23 %. Gambar tersebut merupakan rekaman tegangan pada fase R dengan Power Analyzer PM3000A yang memperhitungkan komponen harmonik dari harmonik ke-1 sampai dengan harmonik ke-15.



Gambar 6. Komponen Harmonik ke-1 hingga Harmonik ke-15 dari Gambar 5



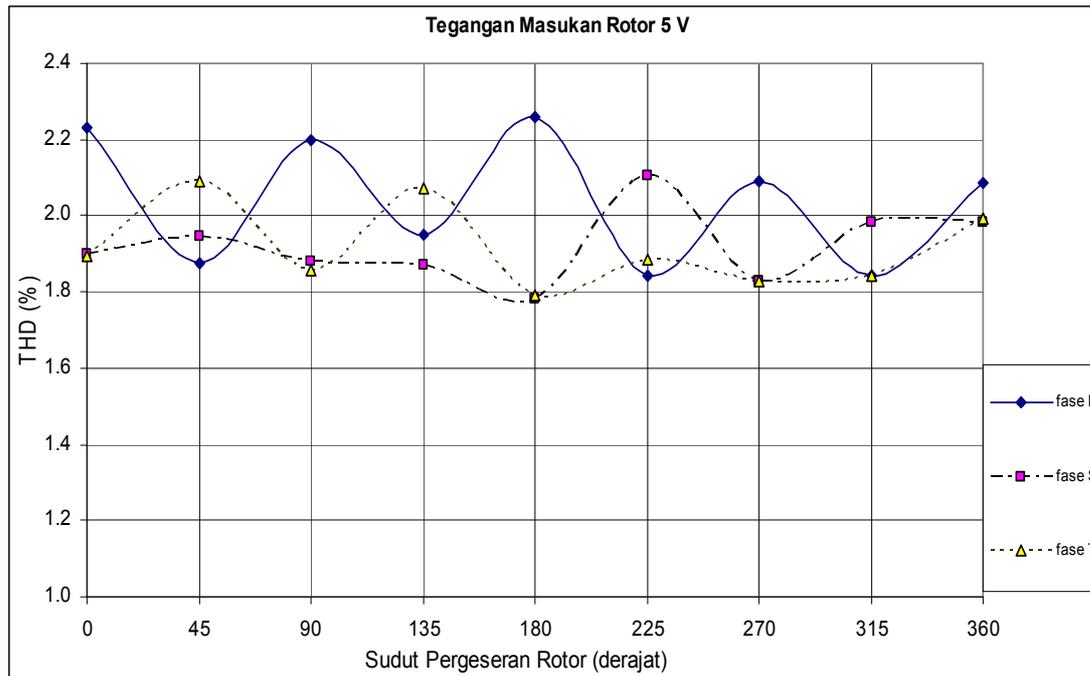
Gambar 7. Kurva Hasil Pengukuran Tegangan Stator Motor Induksi 2,2 kW dengan Tegangan Masukan ke Rotor 5 V

Pada rotor disuplai tegangan tiga fase 5 V antar fase, sedangkan pada sisi stator disambungkan beban resistor tiga fase seimbang. Tegangan keluaran stator berubah mengikuti pergeseran sudut rotor. Pergeseran sudut pada pengujian ini berpihak pada belitan rotor fase R, sehingga pada sudut pergeseran 0°, 90°, 180°, 270° dan 360° untuk fase R memiliki tegangan induksi minimum. Dengan menggeser sudut rotor tegangan berubah antara 9,35 V hingga 10,15 V pada fase R. Jadi perubahan tegangan pada fase R hanya berkisar 8 % saja.

Motor induksi ini memiliki 4 kutub, sehingga untuk memperoleh pergeseran sudut 180° listrik ekuivalen dengan sudut 90° geometris. Artinya untuk mendapatkan perpotongan fluks dengan kumparan stator yang tegak lurus (90°) cukup menggeser rotor dengan sudut 45° saja.

Tegangan masukan rotor 5 V adalah tegangan antar fase, sehingga tegangan fase-netral adalah 2,8 V. Dengan tegangan masukan (*input*) tersebut menghasilkan tegangan keluaran (*output*) maksimum 10,15 V, sehingga perbandingan lilitan rotor terhadap stator sekitar 1 : 4.

Perlu menjadi perhatian ketika tegangan keluaran pada stator memiliki nilai minimum, bukan berarti rasio lilitan stator terhadap rotor mengecil, tetapi disebabkan karena kerapatan fluks efektif yang memotong lilitan pada stator pada posisi yang mendekati sejajar. Sementara fluks-fluks dari fase yang lain akan mempengaruhi makin signifikan, sehingga kecacatan bentuk gelombang tegangan makin tinggi (nilai THD yang makin tinggi) pada tegangan keluaran yang minimum. Tingkat kecacatan bentuk gelombang dapat dicermati pada Gambar 8.



Gambar 8. Kurva Hasil Pengukuran THD Tegangan Stator Motor Induksi 2,2 kW dengan Tegangan Masukan ke Rotor 5 V

## 6 KESIMPULAN DAN SARAN

### Kesimpulan

1. Perubahan nilai tegangan keluaran pada motor induksi rotor lilit dikarenakan posisi pergeseran sudut pada rotor.
2. Perubahan tegangan yang diperoleh dengan memanfaatkan motor induksi sebagai variabel transformator memiliki daerah yang kecil, hanya berkisar 8%.
3. Pada saat tegangan keluaran menurun, justru memiliki kecacatan gelombang yang makin tinggi.
4. Kenaikan kecacatan gelombang tegangan dengan penggeseran sudut rotor mencapai 0,35 %.

### Saran

1. Jangan memberi beban berlebihan, karena meningkatnya arus rotor dapat mengakibatkan motor berputar.
2. Sumber tegangan yang disuplaikan ke rotor sebaiknya seimbang agar dapat mengoptimalkan kerja peralatan listrik yang tersambung ke motor.
3. Perlu tersedia dua unit power analyzer untuk penelitian yang serupa agar dapat dianalisa efisiensi penggunaan motor induksi sebagai transformator variabel.

## 7. DAFTAR PUSTAKA

- Wildi, Theodore, 1997, *Electrical Machines, Drives, and Power Systems*, 3 ed., Prentice-Hall International Editions, New Jersey, pp-184-269.
- Ryff, Peter F, 1994, *Electrical Machinery*, 2 ed, Prentice-Hall International, New Jersey, pp 184-195.
- Hart, D. W., 1997, *Introduction To Power Electronics*, 1 ed, Prentice-Hall International, London, pp 38-43.