

## STUDI ANALISIS PENGARUH HARMONISA AKIBAT PENGGUNAAN VARIABLE SPEED DRIVE PADA MOTOR INDUKSI TIGA FASA

Ir. Mohammad Amir, M.Sc, Ade Irman Firdaus

Prodi Teknik Elektro-Fakultas Teknologi Industri, Institut Sains Dan Teknologi Nasional

*Abstrak* - Motor induksi tiga fasa digunakan sebagai penggerak utama mesin-mesin di dunia industri. Hal ini dikarenakan motor induksi mempunyai beberapa keuntungan. Namun yang menjadi pertimbangan penggunaan aplikasi ini adalah sistem pengaturan kecepatannya sangat mempengaruhi efisiensinya. Sebagian besar alat yang digunakan sebagai pengatur kecepatan putaran motor induksi tiga fasa adalah *Variable Speed Drive (VSD)*, dimana VSD merupakan beban non linear. Pemakaian beban non linear akan menghasilkan bentuk gelombang arus dan tegangan sinusoidal yang tidak murni.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengevaluasi *Total Harmonic Value (THDv dan THDi)* pada sebuah VSD dengan memakai beberapa beban 750 W dan 15 kW. Pada hasil pengukuran dengan beban motor 750 W menunjukkan bahwa nilai *Total Harmonic Distortion Arus (THDi) Fase-Netral* yang terkecil 94,35% dan terbesar 101,03%. Dan pada beban motor 15 kW dengan nilai *Total Harmonic Distortion Arus (THDi) Fase-Netral* yang terkecil 40,62% dan yang terbesar 48,08%. Pada motor 15 kW saat harmonik ke-5 memiliki rugi tembaga rotor yang tertinggi sebesar 0,4702 W dan penangaruh terhadap torsi sebesar 4,02E-03 N.m.

**Kata Kunci:** *non linear, VSD, THDi, THDv dan Tiga Fasa*

*Abstract* - Three-phase induction motors are used as the prime mover of machines in the industrial world. This is because induction motors have some advantages. However, the consideration of the use of this application is the speed setting system greatly affect its efficiency. Most of the tools used to control the speed of rotation of three phase induction motor. The control system use *Variable Speed Drive (VSD)*, where VSD is non linear load. The use of non-linear loads will result in an impure current waveform and sinusoidal voltage.

The purpose of this study was to evaluate *Total Harmonic Value (THDv and THDi)* on a VSD using some 750 W and 15 kW loads. On the measurement result with 750 W motor load showed that value of *Total Harmonic Distortion (THDi)* is smallest 94,35% and biggest 101,03%. And at 15 kW motor load with value of *Total Harmonic Distortion Flow (THDi) Phase-Neutral* the smallest 40.62% and the largest 48.08%. On a 15 kW motor when the 5th harmonic has the highest rotor copper loss of 0,4702 W and torque of 4,02E-03 N.m.

**Keywords:** *non linear, VSD, THDi, THDv dan Tiga Fasa*

### I. PENDAHULUAN

Motor induksi tiga fasa banyak digunakan sebagai penggerak utama mesin-mesin di dunia industri. Motor induksi mempunyai beberapa kelebihan antara lain, bentuk yang sederhana, konstruksi cukup kuat, harga murah dan dapat diandalkan.

Namun yang menjadi pertimbangan penggunaan aplikasi ini adalah sistem pengaturan kecepatannya sangat mempengaruhi efisiensinya dan tergantung pada jenis motor serta sistem pengendalinya. Sebagian besar alat yang digunakan sebagai pengatur kecepatan putaran motor induksi tiga fasa adalah *Variable Speed Drive (VSD)* [6].

VSD adalah peralatan yang menggunakan dioda sebagai penyearah untuk merubah tegangan jala-jala arus bolak balik menjadi tegangan searah selanjutnya diubah kembali menjadi tegangan bolak balik, yang menurut standard IEEE 519-2014 merupakan salah satu beban non linear penyebab gelombang harmonik.[8]

Pokok permasalahan yang akan dibahas di dalam skripsi ini adalah bagaimana besar pengaruh harmonisa pada penggunaan *variable speed drive* dalam pengaturan kecepatan motor induksi fasa tiga.

Dan batasan masalahnya dalam penelitian meliputi:

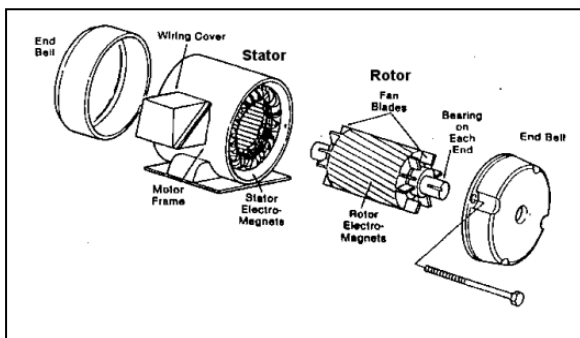
- 1) Harmonisa yang diukur dan dihitung secara teori merupakan dari sumber yaitu *variable speed drive*
- 2) Menganalisis besarnya hanya *Individual Harmonic Distortion (IHD)* yang dihasilkan *variable speed drive* tipe FR-E520 dengan kapasitas daya 750 W dan 12 kW
- 3) Beban yang digunakan motor induksi fasa tiga
- 4) Standar harmonisa yang digunakan mengikuti standar IEC 61000-3-2 kelas D
- 5) Tidak membahas resonansi dalam filter

II. LANDASAN TEORI

A. Motor Induksi

Motor induksi merupakan motor listrik arus bolak balik (ac) bekerja berdasarkan induksi medan magnet stator ke statornya, dimana arus rotor motor ini bukan diperoleh dari sumber tertentu, tetapi merupakan arus yang terinduksi sebagai akibat adanya perbedaan relatif antara putaran rotor dengan medan putar (*rotating magnetic field*) yang dihasilkan oleh arus stator. Motor induksi memiliki dua komponen listrik utama (Gambar 2.4) [3]:

- 1) Rotor. Motor induksi menggunakan dua jenis rotor:
  - a) Rotor kandang tupai terdiri dari batang penghantar tebal yang dilekatkan dalam petak-petak slots paralel. Batang-batang tersebut diberi hubungan pendek pada keduaujungnya dengan alat cincin hubungan pendek.
  - b) Lingkaran rotor yang memiliki gulungan tiga fase, lapisan ganda dan terdistribusi. Dibuat melingkar sebanyak kutub stator. Tiga fase digulungi kawat pada bagian-bagiannya.
- 2) Stator. Stator dibuat dari sejumlah stampings dengan slots untuk membawa gulungan tiga fase. Gulungan ini dilingkarkan untuk sejumlah kutub yang tertentu. Gulungan diberi spasi geometri sebesar 120 derajat.



Gbr. 2.4 Konstruksi Motor Induksi Fasa Tiga

Motor induksi bekerja berdasarkan induksi elektromagnetik dari kumparan stator kepada kumparan rotornya. Bila kumparan stator motor induksi 3-fasa yang dihubungkan dengan suatu sumber tegangan 3-fasa, maka kumparan stator akan menghasilkan medan magnet yang berputar.

Penghantar (kumparan) rotor yang dialiri arus ini berada dalam garis gaya fluks yang berasal dari kumparan stator sehingga kumparan rotor akan mengalami gaya Lorentz. Medan putar pada stator tersebut akan memotong konduktor-konduktor pada rotor, sehingga rotor pun akan turut berputar mengikuti medan putar stator.

Kecepatan berputarnya medan putar ini disebut kecepatan sinkron. Besarnya kecepatan sinkron ini adalah sebagai berikut [5] :

$$n = \frac{120f}{p} \tag{2-2}$$

Dengan :

n = kecepatan putar (rpm)

f = frekuensi stator (Hz)

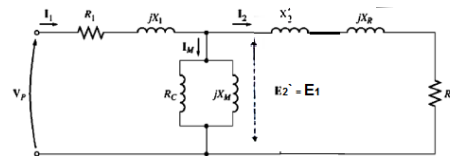
P = jumlah kutub stator (buah)

$\omega$  = kecepatan putaran sinkron medan magnet stator

Misalnya rotor pada motor induksi berputar dengan kecepatan  $\omega_r$ , dan medan magnet stator berputar dengan kecepatan  $\omega_s$ , perbedaan kecepatan relatif antara kecepatan medan magnet putar stator terhadap kecepatan rotor, ini disebut kecepatan slip besarnya sebagai berikut.[5]

$$slip, s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \tag{2-3}$$

Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi 3-fasa



Gbr. 2.6 Rangkaian Ekuivalen Dengan Rotor Disesuaikan Terhadap Stator

Gambar 2.6 merupakan gambar rangkaian pendekatan (ekuivalen) motor induksi fasa tiga perfasa yang sudah merupakan standar untuk menganalisa rangkaian karena sisi rotor dilihat dari sisi stator.[5]

Arus rotor

Dalam motor induksi, bila tegangan diberikan pada gulungan stator maka gulungan rotor mesin ikut terinduksi. Secara umum, semakin besar gerak relatif antara medan magnet rotor dan stator, semakin besar tegangan dan frekuensi rotor yang dihasilkan. Besar magnitude dan frekuensi akibat tegangan yang diinduksikan pada rotor itu berbanding lurus dengan slip rotor. Berikut ini gambar 2.7 menunjukkan rangkaian ekuivalen rotor pada sebuah motor induksi.

Dari persamaan 2-6 dimana frekuensi pada belitan rotor itu  $f_2 = sf_1$ , tegangan yang diinduksikan dalam rotor mengandung resistansi dan reaktansi. Jika resistansi rotor  $R_R$  konstan dan didalam reaktansi terdapat slip maka dapat ditulis persamaan [5]

$$\begin{aligned} X_R &= 2 \pi s f_2 L_R \\ &= s (2 \pi f_2 L_R) \\ &= s X_{R0} \end{aligned} \tag{2-9}$$

Untuk menghitung daya output pada sebuah motor induksi dapat dinyatakan dengan persamaan dibawah ini:[6]

$$P_R = 3 I_R^2 \frac{R_R}{S}$$

$$= \frac{3s R_R E_R^2}{R_r^2 + (s\omega_s L_r)^2} \quad (2-14)$$

Berikut ini adalah metode dalam pengontrolan kecepatan pada motor induksi yang banyak digunakan:[6]

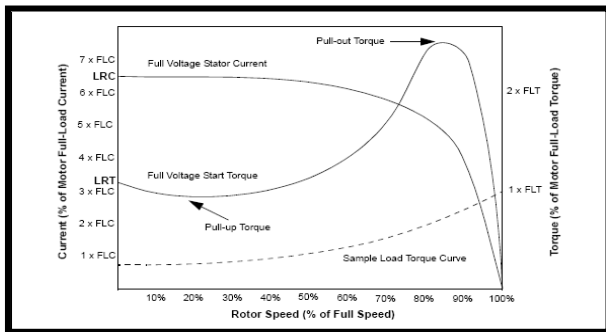
- a) Kontrol tegangan stator
- b) kontrol daya Slip
- c) Kontrol variabel-tegangan, frekuensi variabel (V-f)
- d) Kontrol variabel-arus, variabel-frekuensi (I-f)

**Hubungan Antara Beban, Kecepatan Dan Torque**

Gambar 2.16 menunjukkan grafik *torque*-kecepatan motor induksi AC tiga fase dengan arus yang sudah ditetapkan. Bila motor [3]:

- 1) Mulai menyala ternyata terdapat arus nyala awal yang tinggi dan torque yang rendah (“pull-up torque”).
- 2) Mencapai 80% kecepatan penuh, torque berada pada tingkat tertinggi (“pull-out torque”) dan arus mulai turun.
- 3) Pada kecepatan penuh, atau kecepatan sinkron, arus torque dan stator turun ke nol.

Gbr. 2.16 Grafik *Torque*-Kecepatan Motor



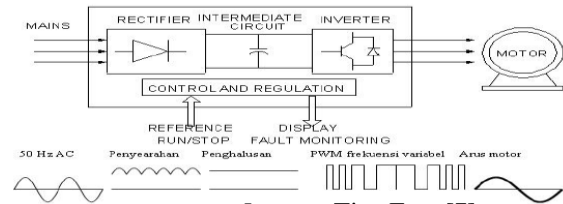
Induksi AC 3-Fase

**B. Variable Speed Drive**

*Variable speed drive* biasa disebut juga dengan *Inverter* adalah peralatan yang menggunakan dioda sebagai penyearah untuk merubah tegangan jala-jala arus bolak balik menjadi tegangan searah selanjutnya diubah kembali menjadi tegangan bolak balik. Terdapat tiga jenis utama desain *inverter* yan tersedia

saat ini. Ketiganya dikenal dengan *inverter* sumber arus (CSI), *inverter* sumber tegangan (VSI), dan *Inverter* dengan pengatur lebar pulsa/ *pulse width modulated* (PWM).

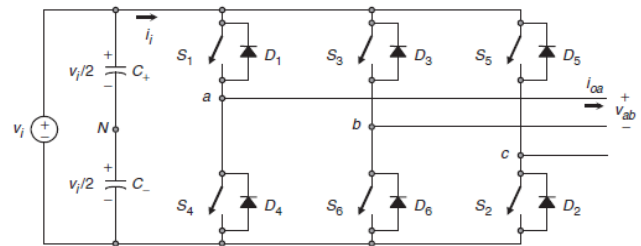
Bentuk gelombang tegangan keluaran *inverter* biasanya juga tidak sinusoida murni karena masih mengandung komponen frekuensi yang tidak diinginkan. Jika tegangan seperti ini digunakan untuk mencatu daya pada beban, seperti motor induksi, akan menambah kerugian, getaran dan riak dalam motor. Gambaran secara umum *inverter* dapat dilihat pada gambar 2.17 berikut ini.



Gbr. 2.17 *Inverter* Tiga Fasa [7]

1) *Voltage Source Inverter (VSI)*

Jenis *inverter* ini menggunakan konverter jembatan dioda untuk mengubah tegangan input AC ke DC. Memiliki kemampuan untuk mengatur nilai tegangan DC mulai dari 0 hingga mendekati 600 VDC. Gambar 2.19 rangkaian variabel *inverter* tegangan fasa tiga.



Gbr. 2.19 Rangkaian Variable *Inverter* Tegangan Fasa Tiga [6]

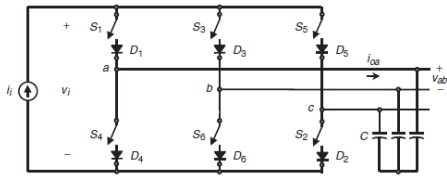
TABEL 2.2 SAKLAR MODE ON/OFF DIODA PADA VSI [6]

State	State #	v <sub>ab</sub>	v <sub>bc</sub>	v <sub>ca</sub>	Space vector
S <sub>1</sub> , S <sub>2</sub> , and S <sub>6</sub> are on and S <sub>4</sub> , S <sub>5</sub> , and S <sub>3</sub> are off	1	v <sub>i</sub>	0	-v <sub>i</sub>	$\vec{v}_1 = 1 + j0.577$
S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub> , and S <sub>1</sub> are on and S <sub>5</sub> , S <sub>6</sub> , and S <sub>4</sub> are off	2	0	v <sub>i</sub>	-v <sub>i</sub>	$\vec{v}_2 = j1.155$
S <sub>3</sub> , S <sub>4</sub> , and S <sub>2</sub> are on and S <sub>6</sub> , S <sub>1</sub> , and S <sub>5</sub> are off	3	-v <sub>i</sub>	v <sub>i</sub>	0	$\vec{v}_3 = -1 + j0.577$
S <sub>4</sub> , S <sub>5</sub> , and S <sub>3</sub> are on and S <sub>1</sub> , S <sub>2</sub> , and S <sub>6</sub> are off	4	-v <sub>i</sub>	0	v <sub>i</sub>	$\vec{v}_4 = -1 - j0.577$
S <sub>5</sub> , S <sub>6</sub> , and S <sub>4</sub> are on and S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub> , and S <sub>1</sub> are off	5	0	-v <sub>i</sub>	v <sub>i</sub>	$\vec{v}_5 = -j1.155$
S <sub>6</sub> , S <sub>1</sub> , and S <sub>5</sub> are on and S <sub>3</sub> , S <sub>4</sub> , and S <sub>2</sub> are off	6	v <sub>i</sub>	-v <sub>i</sub>	0	$\vec{v}_6 = 1 - j0.577$
S <sub>1</sub> , S <sub>3</sub> , and S <sub>5</sub> are on and S <sub>4</sub> , S <sub>6</sub> , and S <sub>2</sub> are off	7	0	0	0	$\vec{v}_7 = 0$
S <sub>4</sub> , S <sub>6</sub> , and S <sub>2</sub> are on and S <sub>1</sub> , S <sub>3</sub> , and S <sub>5</sub> are off	8	0	0	0	$\vec{v}_8 = 0$

2) *Current Source Inverters*

Jenis *inverter* satu ini menggunakan dioda untuk menghasilkan tegangan DC-link yang

bervariasi untuk suplai ke bagian *inverter* seperti pada Gambar 2.21. Beda dengan VSI yang mengontrol tegangan, CSI justru mengontrol arus yang akan disuplai ke motor. Dan pada tabel 2.2 sembilan keadaan saklar mode ON/OFF dioda.



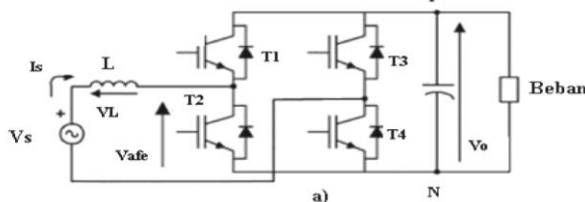
Gbr. 2.20 *Current Source Inverter* fasa tiga [6]

TABLE 2.1 SAKLAR MODE ON/OFF DIODA [6]

State	State #	$i_{oa}$	$i_{ob}$	$i_{oc}$	Space vector
$S_1$ and $S_2$ are on and $S_3, S_4, S_5,$ and $S_6$ are off	1	$i_i$	0	$-i_i$	$\vec{i}_1 = 1 + j0.577$
$S_2$ and $S_3$ are on and $S_4, S_5, S_6,$ and $S_1$ are off	2	0	$i_i$	$-i_i$	$\vec{i}_2 = j1.155$
$S_3$ and $S_4$ are on and $S_5, S_6, S_1,$ and $S_2$ are off	3	$-i_i$	$i_i$	0	$\vec{i}_3 = -1 + j0.577$
$S_4$ and $S_5$ are on and $S_6, S_1, S_2,$ and $S_3$ are off	4	$-i_i$	0	$i_i$	$\vec{i}_4 = -1 - j0.577$
$S_5$ and $S_6$ are on and $S_1, S_2, S_3,$ and $S_4$ are off	5	0	$-i_i$	$i_i$	$\vec{i}_5 = -j1.155$
$S_6$ and $S_1$ are on and $S_2, S_3, S_4,$ and $S_5$ are off	6	$i_i$	$-i_i$	0	$\vec{i}_6 = 1 - j0.577$
$S_1$ and $S_4$ are on and $S_2, S_3, S_5,$ and $S_6$ are off	7	0	0	0	$\vec{i}_7 = 0$
$S_3$ and $S_6$ are on and $S_1, S_2, S_4,$ and $S_5$ are off	8	0	0	0	$\vec{i}_8 = 0$
$S_5$ and $S_2$ are on and $S_6, S_1, S_3,$ and $S_4$ are off	9	0	0	0	$\vec{i}_9 = 0$

3) *Pulse Width Modulation*

Teknik penyaklaran memberikan output yang lebih sinusoidal dibandingkan dua jenis *inverter* sebelumnya. Drive yang menggunakan PWM lebih efisien dan memberikan performa yang lebih tinggi. Bentuk rangkaian dan prinsip kerja dari penyearah PWM satu fasa seperti yang pada Gambar 2.23.



Gbr. 2.23 Penyearah PWM Satu Fasa *Full Bridge* [8]

KEUNTUNGAN DAN KEKURANGAN VSD

**Keuntungan** tersebut termasuk operasi pada kecepatan yang berbeda secara signifikan dari kecepatan sinkron, penghematan energi, mengurangi shock mekanik, peningkatan kinerja proses, meningkatkan efisiensi, mengurangi keausan mekanis, peningkatan kehidupan tanaman, mengurangi total biaya kepemilikan, mengurangi tingkat kesalahan sistem, dan gangguan ac berkurang aplikasi tertentu.

Beberapa **kelemahan** adalah [6]:

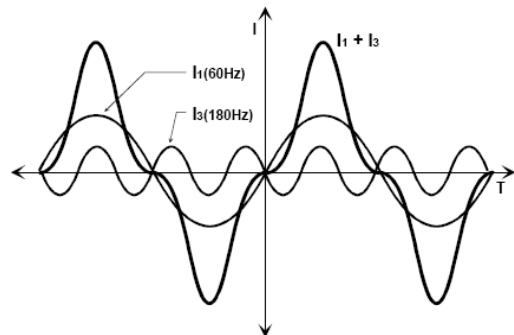
1. Kebisingan akustik

2. Panas pada Motor
3. Harmonik pasokan

C. Harmonisa

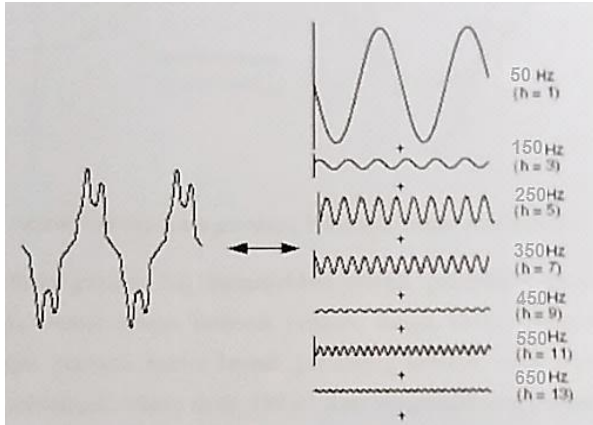
Harmonisa adalah gangguan yang terjadi pada sistem distribusi tenaga listrik akibat terjadinya distorsi gelombang arus dan tegangan. Pada dasarnya, harmonisa adalah gejala pembentukan gelombang-gelombang dengan frekuensi berbeda yang merupakan perkalian bilangan bulat dengan frekuensi dasarnya. Biasanya istilah harmonik ini digunakan untuk mendefinisikan distorsi gelombang sinus arus dan tegangan pada amplitudo dan frekuensi yang berbeda.

Gelombang yang terdistorsi terdiri dari beberapa harmonik, dan harmonik yang pertama dikenal sebagai frekuensi dasar atau fundamental. Seterusnya harmonik dengan kelipatan ganjil dari frekuensi fundamental disebut dengan harmonik ganjil dan harmonik kelipatan genap dari frekuensi fundamental disebut sebagai harmonik genap. Distorsi harmonik disebabkan karena adanya beban non inear dalam sistem tenaga (Dugan, 2004). Beban non linear adalah salah satu jenis peralatan listrik yang berperilaku dapat mengubah bentuk gelombang arus atau tegangan kepada bentuk tertentu yang tidak sinusoida lagi, dan salah satu contohnya adalah *inverter*. Gambar 2.24 berikut menunjukkan bentuk gelombang sinusoida yang terdistorsi oleh harmonik.



Gbr. 2.24 Gelombang Fundamental dan Harmonik ke-3 berbeda fasa 180° [9]

Harmonisa urutan genap biasanya memiliki *Root Mean Square* (RMS) yang lebih kecil dibandingkan dengan harmonisa urutan ganjil. Jumlah antara frekuensi fundamental dan kelipatannya, akan menyebabkan frekuensi fundamental tidak lagi berbentuk sinus murni, tetapi mengalami distorsi ini ditunjukkan pada gambar 2.25.



Gbr. 2.25 Bentuk Gelombang Yang Terdistorsi Akibat Harmonisa Ganjil [9]

**SUMBER HARMONISA**

Beberapa peralatan yang dapat menyebabkan timbulnya harmonisa antara lain catu daya, komputer, printer, lampu flurescent yang menggunakan elektronik ballast (lampu hemat energi), power elektronik (Thyristor), dan dan peralatan elektronik yang didalamnya banyak terdapat komponen semi konduktor atau elektronika daya sebagai rangkaian pengendali motor listrik.

**INDEKS HARMONISA**

Untuk menganalisis pengaruh harmonik terhadap kualitas tegangan dan arus ditentukan oleh indeks harmonik, yaitu THD (*Total Harmonic Distortion*) dan TDD (*Total Demand Distortion*) Perbandingan nilai komponen harmonik dengan komponen fundamental biasanya dinyatakan dalam persen, indeks ini disebut dengan THD (*Total Harmonic Distortion*). THD biasanya digunakan untuk menyatakan penyimpangan bentuk gelombang yang mengandung harmonik terhadap gelombang sinusoida murni dalam satu periode. Untuk nilai tegangan dan arus *RMS* dari gelombang sinusoidal dapat dihitung nilai puncak gelombang dibagi  $\sqrt{2}$  dan secara deret *fourier* untuk tegangan dan arus ditunjukkan Persamaan (2.17 dan 2.18) [11].

$$V_{RMS} = V_0^2 + \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{V_n}{\sqrt{2}}\right)^2}$$

$$I_{RMS} = I_0^2 + \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{I_n}{\sqrt{2}}\right)^2}$$

Nilai IHD dan THD untuk harmonik arus dan tegangan pada orde ke-n didefinisikan sebagai berikut:

$$V_n/V_1 \text{ dan } I_n/I_1 \tag{2-19}$$

Besar nilai *Total Harmonic Distortion* (THD) untuk tegangan dan arus ditunjukkan pada Persamaan (2.5 dan 2.6) yaitu: [11]

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{V_n}{\sqrt{2}}\right)^2}}{\frac{V_1}{\sqrt{2}}} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} (V_n)^2}}{V_1}$$

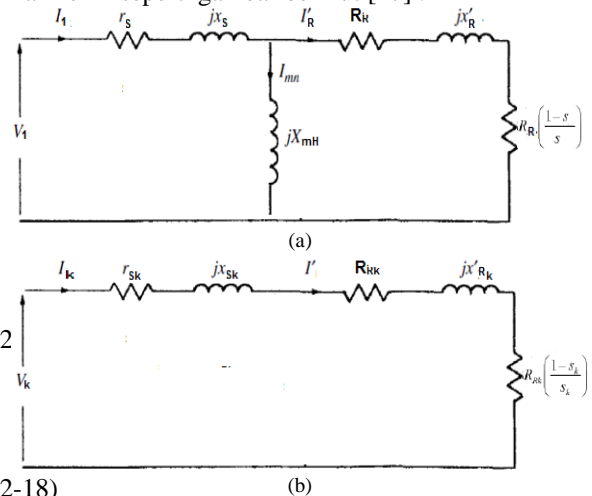
$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{I_n}{\sqrt{2}}\right)^2}}{\frac{I_1}{\sqrt{2}}} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} (I_n)^2}}{I_1} \tag{2-21}$$

Sedangkan TDD (*Total Demand Distortion*) merupakan distorsi harmonik arus total yang dapat dinyatakan sebagai berikut; [12]

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_L} \tag{2-22}$$

**HARMONIK PADA MOTOR INDUKSI**

Motor VSD induksi sering dijumpai menggunakan eksitasi dengan mengubah frekuensi statis atau lebih dikenal VSD (*Variable Speed Drive*) atau inverter. Motor induksi yang dieksitasi dengan VSD hampir tidak bisa terhindar dari bentuk gelombang yang terdistorsi harmonik dalam tegangan dan arus yang dihasilkan. Sumber tegangan yang terdistorsi harmonik akan menghasilkan arus eksitasi yang mengandung harmonik pula, sehingga gelombang arus yang timbul tidak sinusoidal murni. Hal ini akan mempengaruhi medan putar yang dihasilkan. Permodelan motor induksi dibawah pengaruh harmonik seperti gambar berikut [17]:



(2-18) Gbr. 2.26 Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi (a) Fundamental (b) Harmonik ke-k [17]

Gambar rangkaian 2.27 adalah diatas adalah rangkaian motor induksi. Ketika mtor berjalan mendekati kecepatan sinkron fundamental, rangkaian ekuivalen harmonik sangat mirip dengan rangkaian rotor setara dikunci untuk harmonik tertentu yang

dipertimbangkan. Cabang *magnetizing* dapat diabaikan karena reaktansi *magnetizing* untuk harmonik ke-k ( $kX_m$ ) jauh lebih besar daripada impedansi kebocoran rotor untuk harmonik ke-k ( $Z_{Rk}$ ). Gambar 2.27 (a) menunjukkan rangkaian setara disederhanakan untuk komponen fundamental dan gambar 2.27 (b) untuk harmonik ke-k. Arus harmonik k kemudian diberikan sebagai [17]:

$$I_k = \frac{V_k}{\sqrt{\left(R_{sk} + \frac{R_{sk}}{s_k}\right)^2 + (X_{Rk} + X_{sk})^2}} \quad (2-23)$$

- $I_k$  : Komponen arus harmonik orde k
- $V_k$  : Komponen tegangan harmonik orde k
- $R_{sk} : X_{sk}$  : Tahanan dan reaktansi stator pada harmonik orde k
- $R_{Rk} : X_{Rk}$  : Tahanan dan reaktansi rotor pada harmonik orde k

Adanya slip pada motor induksi maka efek harmonisa terhadap motor induksi juga diperhitungkan. Untuk menghitung  $s_k$ , slip harmonik dengan persamaan dibawah ini [17] :

$$s_k = \frac{kN_s \pm N_r}{kN_s} = \frac{kN_s \pm (1-s)N_s}{kN_s} = \frac{k \pm (1-s)}{k} \quad (2-24)$$

- k : Orde Harmonik
- $N_s$  : Kecepatan Putar Medan stator
- $N_r$  : Kecepatan putar Rotor
- ; tanda  $\pm$  tergantung dari sequence orde harmonik k
- Rotation Sequences According to harmonik number

+	1st	7th	13th	19th
0	3rd	9th	15th	21st
-	5th	11th	17th	23rd

Motor induksi memiliki rugi-rugi daya karena di dalam motor induksi terdapat komponen tahanan tembaga dari belitan stator dan rotor, dan komponen induktor belitan stator dan rotor.

1. DAYA CELAH UDARA ( $P_{AG}$ )

Daya celah udara adalah daya yang terjadi pada stator motor induksi. Daya celah udara merupakan hasil pengurangan rugi-rugi tembaga stator ( $P_{SCL}$ ) dan rugi-rugi inti ( $P_{CORE}$ ) memiliki persamaan :

$$P_{AG} = P_{in} - P_{SCL} + P_{CORE} \quad (2.26)$$

$$P_{AG} = 3I_R^2 \frac{R_R}{s} \quad (2-27)$$

2. RUGI DAYA STATOR

Rugi Daya Stator merupakan rugi yang dihasilkan dari rugi tembaga pada belitan stator. Rugi daya stator dapat ditulis dengan persamaan :

$$P_{SCL} = 3I_1^2 R_S \quad (2.28)$$

3. RUGI DAYA ROTOR YANG DIKEMBANGKAN

Rugi Daya Rotor yang dikembangkan biasa disebut  $P_{CONV}$ .  $P_{CONV}$  dapat dihitung dengan persamaan :

$$P_{CONV} = 3I_1^2 R_R \left(\frac{1-s}{s}\right) \quad (2.29)$$

Hubungan antara ketiga daya tersebut dapat ditulis dengan persamaan

$$P_{AG} : P_{SCL} : P_{CONV} = 1 : s : (1-s) \quad (2.30)$$

**Harmonisa Terhadap Torsi**

Arus harmonik terjadi akibat penggerakan motor induksi dalam stator mesin AC (slip harmonik positif  $S_k$ ). Penggerakan ini menimbulkan torsi poros dalam arah yang sama dengan kecepatan medan harmonis.

. Untuk arus harmonisa  $I_n$ , dimana  $I_n^2 \left(\frac{r'_{2n}}{s_k}\right)$

adalah daya pada stator dibagi dengan kecepatan harmonik. Persaman rumus dapat ditulis sebagai berikut [12] :

$$\tau_n = \frac{\left(\frac{I_n^2}{n}\right) \left(\frac{r'_{2n}}{s_k}\right)}{\omega_r} \quad (2-31)$$

III. SISTEM PENGUKURAN DAN PENGAMBILAN DATA

A. Batasan Harmonisa Berdasarkan Standar IEC61000-3-2

Batasan arusnya dituliskan dalam bentuk mA/W dan dibatasi pada/harga absolut yang nilainya diperlihatkan oleh Tabel 3.1.

TABLE 3. 1 STANDAR ARUS HARMONIS IEC61000-3-2 KELAS D

Harmonic (n)	75 W < P < 600 W (mA/W)	P > 600 W (A)
3	3.4	2.30
5	1.9	1.14
7	1.0	0.77
9	0.5	0.40
11	0.35	0.22
13	0.296	0.21
15 ≤ n ≤ 391	3.85/n	2.25/n

**B. Batasan Harmonisa Berdasarkan Standar IEEE 519-2014**

Distorsi tegangan pada sistem tenaga disebabkan oleh interaksi antara arus beban yang terdistorsi dan impedansi linier sistem. Pada tabel 3.2 batas distorsi arus harmonik yang diijinkan dalam sebuah distribusi listrik. Dan juga pada tabel 3.2 batas batas tegangan distorsi pada jaringan listrik.

TABEL 3.2 BATAS DISTORSI ARUS UNTUK SISTEM DISTRIBUSI MENURUT IEEE 519-2014 (120 V SAMPAI 69 kV) [14]

Maximum harmonic current distortion in percent of $I_L$						
Individual harmonic order (odd harmonics) <sup>a,b</sup>						
$I_h/I_L$	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
$< 20^\circ$	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20 < 50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50 < 100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100 < 1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

TABEL 3.3 BATAS DISTORSI TEGANGAN PADA POINT OF COMMON COUPLING (PCC) MENURUT IEEE 519-2014 [14]

Bus voltage $V$ at PCC	Individual harmonic (%)	Total harmonic distortion THD (%)
$V \leq 1.0$ kV	5.0	8.0
1 kV < $V \leq 69$ kV	3.0	5.0
69 kV < $V \leq 161$ kV	1.5	2.5
161 kV < $V$	1.0	1.5 <sup>a</sup>

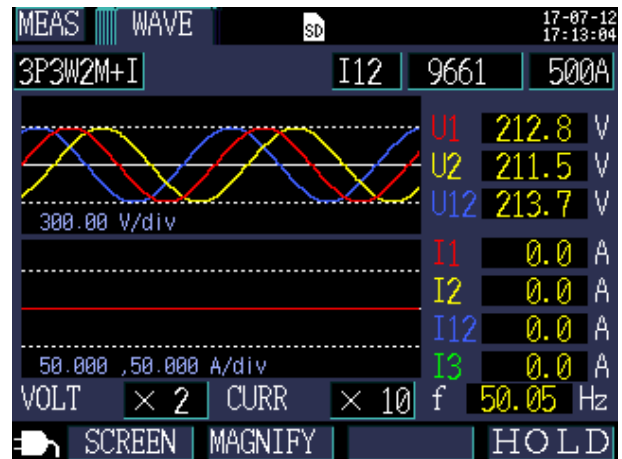
**C. Penelitian Karakteristik Harmonik Sumber Tegangan**

Sumber tegangan yang dipakai dalam penelitian ini adalah trafo 3 fasa yang disupply dari jaringan PLN. Tegangan sumber untuk inverter digunakan 220 Volt antar fasa. Hasil pengukuran sampai dengan harmonik ke-10 diperlihatkan pada tabel 3.3

TABEL 3.3 DATA HASIL PENGUKURAN HARMONIK PADA SUMBER PLN

Nomor Harmonik	Fasa R	Fasa S	Fasa T
	Tegangan (V)	Tegangan (V)	Tegangan (V)
1	216,9	217,1	216,8
2	1,1	0,9	1
3	2	2,1	2,0
4	0,4	0,36	0,4
5	3,6	3,45	3,5
6	0,4	0,4	0,4
7	0,4	0,4	0,4
8	0,3	0,3	0,3
9	1,0	1,0	1,0
10	0,2	0,2	0,2

Untuk melihat gelombang sinusoidal dengan menggunakan alat bantu HIOKI 3360-10, berikut adalah bentuk gelombang sumber untuk masing-masing fasa.



Gbr 3.4 Data Hasil Pengukuran Harmonik pada Sumber PLN Dengan HIOKI 3360-20

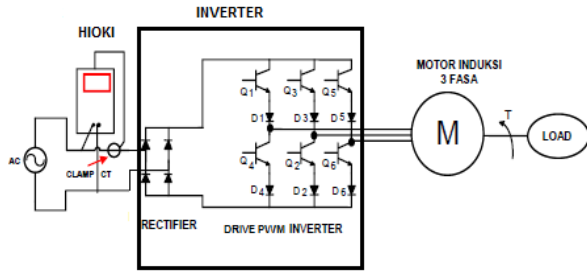
**D. Penelitian Karakteristik Harmonik Pada VSD**

Variable speed drive (VSD) dalam penelitian menggunakan 2 tipe yang berbeda yaitu Mistubishi FR-F720 Daya 750 W dan 15 kW. Tabel 3.4 hasil pengukuran keluaran dari inverter.

TABEL 3.4 PARAMETER KELUARAN DARI INVERTER 750 W DAN 15 kW

Parameter	Satuan	Mitsubishi FR-E720 dengan daya 750 W	Mitsubishi FR-E720 dengan daya 12 kW
S (Apparent Power)	VA	445	3,83 k
P (Active Power)	Watt	195	2,15 k
Q (Reactive Power)	VAr	400	3,17 k
PF (Power Factor)	-	- 0,497	0,66
THDv	%	1.4	1,3
THDi	%	185,49	46,83
Frekuensi	Hz	50	50
V (Phase Voltage)	Volt	219,7	220
I (Phase Current)	Ampere	1,76	14,22

Untuk mengukur sebuah harmonik pada VSD dapat diperlihatkan pada gambar 3.5 dengan alat ukur HIOKI 6280-20.



Gbr. 3.5 Cara Mengukur Harmonik Pada VSD dengan HIOKI

Pada alat tersebut didapat data hasil pengukuran individual distorsi harmonisa arus (*IHDi*) dan individual distorsi harmonisa tegangan (*IHDv*) dari setiap orde harmonisa diperlihatkan pada tabel 3.3. Orde harmonisa yang ditampilkan adalah orde harmonisa ganjil dari orde ke-1 sampai dengan orde ke-13 dengan nilai yang berbeda untuk setiap harmonisa. Hasil pengukuran arus harmonik pada saat tegangan keluaran *inverter* 220 Volt sampai orde ke-13 dengan merujuk ke standar IEC61000-3-2.

TABEL 3.5 DATA HASIL PENGUKURAN HARMONISA ARUS DAN

TEGANGAN INVERTER PADA BEBAN 750 W DAN 12 kW

TYPE	FR-E520-0,75K		FR-F720 -15k		
	R - N (A)	S - N (A)	R - N (A)	S - N (A)	T - N (A)
1	0,76	0,78	20	23,7	22,4
3	0,77	0,74	1,4	1,4	2,6
5	0,76	0,76	7,8	8,1	8,7
7	0,63	0,6	5,2	5,2	5,7
9	0,5	0,5	0,4	0,2	0,6
11	0,41	0,39	1,7	1,6	1,8
13	0,31	0,33	1,7	1,8	1,8

TYPE	FR-E520-0,75K		FR-F720 -15k		
	R - N (A)	S - N (A)	R - N (A)	S - N (A)	T - N (A)
1	220	219,9	214,3	213,1	213,1
3	1,5	1,6	1,1	1,3	0,5
5	1,6	1,6	2	2,2	1,8
7	1,3	1,1	1	1,1	1,2
9	1,6	1,7	0,4	0,3	0,3
11	0,5	0,4	1,6	1,2	0,6
13	0,5	0,5	0,6	0,5	0,3

Pada tabel 3.5 menunjukkan bahwa semakin besar beban yang digunakan maka semakin harmonik ini dapat dilihat pada orde ke-5. Adapun tegangan harmonik tidak berpengaruh karena motor itu hanya menyerap arus.

#### IV. PERHITUNGAN DAN ANALISA HARMONISA VSD

##### A. Total Harmonik Distorsi Pada Tegangan Sumber

Menggunakan persamaan 2-20, diperoleh THD tegangan sumber pada fasa R sebesar 1,94 %, pada fasa S 1,64%, dan pada fasa T 1,55% Nilai ini masih berada di bawah standar IEEE 519-2014 yaitu 5% (tegangan sampai 69 kV). Jadi sumber tegangan ini masih bisa dipakai karena kandungan harmoniknya belum melebihi standar.

##### B. Total Harmonik Distorsi Pada VSD

TABLE 4.1 MERUPAKAN TABEL HASIL PENGUKURAN HARMONIK INDIVIDUAL ARUS UNTUK VSD FR720-750 W DI BANDINGKAN DENGAN STANDART IEC 61000-3-2 KELAS D.

TABEL 4.1 HASIL PENGUKURAN ARUS HARMONIK KONDISI BERBEBAN PADA TEGANGAN KELUARAN VSD 750 W

TYPE	FR-F720-0,75K		Batasan Arus Harmonisa Standar IEC61000-3-2 Kelas D (P>600W) (A)
	R - N (A)	S - N (A)	
1	0,76	0,78	0
3	0,77	0,74	2.30
5	0,76	0,76	1.14
7	0,63	0,6	0.77
9	0,5	0,5	0.40
11	0,41	0,39	0.22
13	0,31	0,33	0.21

Persamaan 2-20, diperoleh nilai THD dari beban 0,75 kW pada fasa R sebesar 189,84% dan S sebesar 181,14%.

TABLE 4.2 MERUPAKAN TABEL HASIL PENGUKURAN HARMONIK INDIVIDUAL ARUS UNTUK VSD FR720-15 kW DI BANDINGKAN DENGAN STANDART IEC 61000-3-2 KELAS D.

TABEL 4.2 HASIL PENGUKURAN TEGANGAN HARMONIK KONDISI BERBEBAN PADA BEBAN MOTOR 15 kW

TYPE	FR-F720-0,75K			Batasan Arus Harmonisa Standar IEC61000-3-2 Kelas D (P>600W) (A)
	R - N (A)	S - N (A)	T - N (A)	
1	20	23,7	22,4	0
3	1,4	1,4	2,6	2.30
5	7,8	8,1	8,7	1.14
7	5,2	5,2	5,7	0.77
9	0,4	0,2	0,6	0.40



11	1,7	1,6	1,8	0,22
13	1,7	1,6	1,8	0,21

Persamaan 2-20, diperoleh nilai THD dari beban 0,75 kW pada fasa R sebesar 88,93%, S sebesar 42,29% dan fasa T sebesar 49,26%.

C. Harmonik Pada Susut Daya

Tabel 4-3 merupakan tabel hasil pengukuran terhadap motor yang diuji yaitu 750 W dan 15 kW. Adapun susut daya pada beban motor tersebut dapat dihitung sebagai berikut :

TABEL 4.3 PARAMETER MOTOR YANG DIUJI

type Motor	750 W	15 kW
Tahanan Stator (Ω)	0,00428	0,01379
induktansi stator (Ω)	0,000067	0,000152
tahanan rotor (Ω)	0,000831	0,007728
induktansi rotor (Ω)	0,000067	0,000152
P <sub>mec</sub> (W)	195	5,88 k
n <sub>m</sub> (rpm)	1596,7	2569,5
V <sub>in</sub> (V)	219,7	213,9
I (A)	1,76	19,6
Pf	-0,497	0,8

Berdasarkan tabel 3.3 menunjukkan nilai harmonik ke-5 memiliki nilai harmonik individual tertinggi yaitu 7,8 A (fasa R), 8,1 A (fasa S), 8,7 A (fasa T) pada beban motor 15 kW.

Slip pada motor induksi 15 kW

$$s = \frac{n_{sync} - n_m}{n_m} = \frac{3000 - 2569,5}{2569,5} = 0,1435$$

Dari persamaan 2.24 maka slip harmonik yang dihasilkan

$$s_k = \frac{k - (1 - s)}{k} = \frac{5 - (1 - 0,1435)}{5} = 0,8287$$

Arus harmonik dapat menimbulkan rugi tambahan pada rugi tembaga rotor, yaitu sebesar :

$$P_{kcur} = I_{kr}^2 \cdot R_r = 7,8^2 \times 0,007728 = 0,4702 \text{ W}$$

Dari persamaan 2.30 bisa dicari daya mekanik baik daya mekanik fundamental maupun daya mekanik harmonik. Daya mekanik harmonik yaitu sebesar :

$$\frac{P_{kcur}}{P_{kmac}} = \frac{s_k}{1 - s_k}$$

$$\begin{aligned} \frac{P_{kcur}}{P_{kmac}} &= \frac{0,8287}{1 - 0,8287} \\ P_{kmac} &= \frac{0,1713}{0,8287} \times 0,47017152 \\ &= 0,0972 \text{ W} \end{aligned}$$

Jadi total susut daya di rotor hasil dari tambahan rugi-rugi tembaga di rotor ditambah dengan rugi-rugi daya mekanik harmonik ditambah dengan rugi-rugi daya hasil mekanik fundamental.

$$\begin{aligned} P_{tot} &= P_{kcur} + P_{kmac} + P_{1mec} \\ &= 0,472 + 0,0972 + 5880 \\ &= 5880,5692 \text{ W} \end{aligned}$$

D. Harmonik terhadap Torsi

Pada analisa ini diambil dari nilai arus individual harmonik yaitu pada harmonik ke-5 dari beban 15 kW. Dari persamaan 2.31 pengaruh arus harmonik rotor terhadap torsi dapat dihitung sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \tau_n &= \frac{\left(\frac{I_n^2}{n}\right) \left(\frac{r'_{2n}}{s_k}\right)}{\omega_r} = \frac{7,8^2 \times 0,007728}{5 \times 0,8287} \\ &= \frac{0,1134720695}{2569,5 \times 2\pi \times \frac{1}{60}} \\ &= \frac{0,1134720695}{282,2720999} = 0,402 \text{ mN.m} \end{aligned}$$

V. SIMPULAN

Dari perhitungan dan analisa di Bab IV, maka dapat ditarik simpulan sebagai berikut :

1) Dengan beban 750 W menunjukkan nilai harmonik yang melebihi batas standar IEC61000-3-2 kelas D pada orde 9, 11, 13 dengan nilai IHDi yang paling besar 0,78 A dan terkecil 0,33 A. Jadi Total Harmonic Distortion arus (THDi) fase-netral untuk fasa R 94,35% dan fase-netral untuk fasa S 101,03%. Nilai ini melebihi nilai THD yang diijinkan yaitu sebesar 10%.

2) Dengan beban 12 kW menunjukkan nilai harmonik yang melebihi batas standar IEC61000-3-2 kelas D pada hampir disemua orde dengan nilai IHDi yang paling besar 8,7 A dan terkecil 0,2 A. Jadi Total Harmonic Distortion arus (THDi) fase-netral yang terkecil 41,86% dan yang terbesar 49,26%. Nilai ini melebihi nilai THD yang diijinkan yaitu sebesar 10%.

3) Rugi-rugi daya pada motor induksi 12 kW terhadap arus harmonik menunjukkan bahwa terdapat tambahan rugi tembaga pada rotor. Rugi tembaga pada rotor yang tertinggi sebesar 0,4702 W dan terkecil 1,236 mW.

4) Dalam penelitian ini pengaruh harmonik terhadap torsi ditunjukkan pada harmonik ke-5 dengan torsi hanya sebesar 4,02E-03 N.m.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Anthony Zuriman, *Mesin Listrik Arus Bolak – Balik*, Penerbit ANDI : Yogyakarta
- [2] Siswoyo,, 2008, “Teknik Listrik Industri Jilid 2”, Direktorat Pembinaan Sekolah Kejuruan, Departemen Pendidikan Nasional, Jakarta, Indonesia
- [3] Bureau of Energy Efficiency (BEE), Ministry of Power, India. *Components of an Electric Motor*. 2005.  
[www.energymanagertraining.com/equipment\\_all/electric\\_motors/eqp\\_comp\\_motors.htm](http://www.energymanagertraining.com/equipment_all/electric_motors/eqp_comp_motors.htm)
- [4] Parekh, R., Microchip Technology Inc. *AC Induction Motors Fundamentals, AN887*. 2003.  
[www.microchip.com/www1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00887a.pdf](http://www.microchip.com/www1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00887a.pdf).
- [5] Stephen J. Chapman, *Electric Machinery Fundamentals*, Mc. Graw Hill, 2005, Singapore.
- [6] Muhammad H, Rasyid, 1993, *Power Electronics Circuit, Devices, and Applications Second Edition*, New Jersey : Prentice Hall, Upper Saddle River.
- [7] Yulius Salu Pirade, “Studi Beban Tidak Seimbang Terhadap Arus Netral Pada Transformator Distribusi P.70 Pada PLN Cabang Palu”, *Majalah MEKTEK Tahun XI, No.4, September 2009*.
- [8] Sabirin Taufiq, 2010, Variable Speed Drive Part 1  
[www.taufiqsabirin.wordpress.com/2010/08/04/variable-speeddrive-part-1/](http://www.taufiqsabirin.wordpress.com/2010/08/04/variable-speeddrive-part-1/).
- [9] Reza Perkasa Alamasyah, 2010 *Analisa Pengaruh Beban Harmonisa (Lampu Hemat Energi) Terhadap Pengantar*, Skripsi Program Studi Teknik Elektro UI, Depok.
- [10] Johan Lundquist, 2001, On Harmonic Distortion in Power Systems, Sweden
- [11] Grady Mack, 2005, *Understanding Power System Harmonic*, University of Texas at Austin
- [12] Arillaga, Jos dan Neville R. Watson., 2003, *Power System Harmonic*, Jhon Wiley & Sons, Ltd, New Zealand.
- [13] IEC 61000-3-21 (1990) Electromagnetic Compatibility (EMC)—Part 2: Environment—Section 1: Description of the Environment—Electromagnetic Environment of Low-Frequency Conducted Disturbances and Signalling in Public Supply System. IEC, Geneva.
- [14] IEEE 519-1992, IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems (ANSI). IEEE, New York.
- [15] Kingsirn, E.A. and Jordan, H.E. (1968) Polyphase Induction Motor Performance and Losses on Non-Sinusoidal Voltage Sources, *IEEE Trans.*, PAS-87, 624-31
- [16] Subekti, L., & Sasongko. (2000). Pengaruh Distorsi Harmonik Total Terhadap Efisiensi Motor Induksi *Proceeding Seminar Elektrik dan Elektronika Daya* (pp. 45-46). Yogyakarta: Fakultas Teknik UGM.
- [17] Khederzadeh, M. (2007). Enhanced Thermal Model for Motors Fed with Distorted Waveform. IEEE.
- [18] Yusron, M.Syaeful. 2014. *Pengaruh Harmonik Terhadap Unjuk Kerja Motor Induksi Tiga Fasa*. Skripsi Program Studi Teknik Elektro UI, Depok