

PENGARUH VARIASI KETIDAKSEIMBANGAN TEGANGAN TERHADAP KINERJA MOTOR INDUKSI TIGA FASA DENGAN NILAI FAKTOR KETIDAKSEIMBANGAN TEGANGAN YANG SAMA

Ahmad Muntashir Aulia, Zulkarnaen Pane
Konsentrasi Teknik Energi Listrik, Departemen Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Sumatera Utara (USU)
Jl. Almamater, Kampus USU Medan 20155 INDONESIA
e-mail: ahmadmaulia@yahoo.co.id

Abstrak

Tegangan suplai tiga fasa tidak seimbang merupakan fenomena yang terjadi ketika tegangan sistem yang seharusnya bernilai sama akan tetapi karena beberapa faktor terjadi adanya perbedaan yang cukup signifikan antara salah satu fasa dengan fasa yang lain. Hal ini tentunya berpengaruh terhadap kinerja beban listrik yang membutuhkan tegangan yang seimbang untuk dapat bekerja secara optimal, salah satunya adalah motor induksi tiga fasa. Tegangan suplai tiga fasa yang tidak seimbang tentu saja berpengaruh terhadap kinerja dari motor induksi tiga fasa pada saat beroperasi. Pada penelitian ini, dilakukan simulasi dengan menggunakan perangkat lunak matlab / simulink untuk melihat pengaruh delapan kondisi ketidakseimbangan tegangan terhadap kinerja motor induksi tiga fasa dengan faktor ketidakseimbangan tegangan yang sama namun terlebih dahulu sudah dilakukan beberapa percobaan untuk mengetahui parameter motor. Setelah dianalisis pada kondisi *steady state* (tunak) terlihat bahwa adanya perbedaan pengaruh dari tiap kondisi ketidakseimbangan tegangan walaupun faktor ketidakseimbangan tegangannya bernilai sama. Pada faktor ketidakseimbangan tegangan 4%, kondisi $2\phi - A$ memiliki efisiensi paling rendah yaitu 78.97%, kondisi $2\phi - UV$ memiliki torsi terendah yaitu 8.247 Nm dan kondisi $3\phi - UV$ memiliki penurunan kecepatan terbesar yaitu hingga 1388 Rpm.

Kata Kunci : ketidakseimbangan tegangan, motor induksi tiga fasa.

1. Pendahuluan

Motor induksi tiga fasa merupakan motor listrik yang paling banyak digunakan di industri. Oleh karena itu kinerja dari motor induksi sangatlah berpengaruh terhadap produktivitas dari suatu industri. Kinerja dari motor induksi erat kaitannya dengan kualitas tegangan yang disuplai. Apabila tegangan yang disuplai memiliki kualitas yang baik, maka motor induksi tersebut dapat bekerja secara optimal. Sebaliknya tegangan yang disuplai memiliki kualitas yang buruk, maka kinerja dari motor akan terganggu. Salah satu yang mempengaruhi kualitas dari tegangan adalah keseimbangan dari tegangan suplai. Ketidakseimbangan tegangan dalam sistem tiga fasa dapat didefinisikan sebagai kondisi dimana salah satu atau ketiga dari fasanya memiliki besaran yang berbeda atau tidak memiliki perbedaan sudut fasa sebesar 120° . Tegangan suplai tiga fasa yang tidak seimbang akan menimbulkan tegangan urutan

positif, negatif dan nol dimana pada keadaan normal (seimbang) yang ada hanya tegangan urutan positif saja.

Akibat yang ditimbulkan oleh tegangan urutan negatif adalah munculnya rotasi berlawanan arah dengan rotasi pada keadaan normal yang cenderung berujung terhadap kenaikan arus dan penurunan efisiensi. Ketidakseimbangan tegangan ini memiliki nilai yang bervariasi, tergantung kepada nilai tegangan tiap fasanya. Oleh karena itu ada faktor ketidakseimbangan tegangan yang disebut sebagai VUF (*Voltage Unbalance Factor*) sebagai acuan menentukan seberapa besar ketidakseimbangan tegangan yang terjadi pada suatu sistem.

Kebanyakan pembahasan tentang ketidakseimbangan tegangan hanya membahas tentang nilai faktor ketidakseimbangan tegangan (VUF) tanpa membahas kondisi dari ketidakseimbangan tersebut. Padahal ada banyak

kondisi yang menyebabkan ketidakseimbangan tegangan [1].

Pada penelitian ini penulis menggunakan perangkat lunak Matlab / Simulink sebagai media untuk melakukan simulasi ketidakseimbangan tegangan dengan parameter motor induksi yang diperoleh melalui percobaan yang dilakukan di Laboratorium Konversi Energi Listrik Fakultas Teknik USU Medan. Serta untuk pengolahan data dilakukan dengan menggunakan metode analisis komponen simetris yang diprogram menggunakan perangkat lunak Matlab.

2. Ketidakseimbangan Tegangan

Ketidakeimbangan tegangan menjadi fenomena yang diamati hampir diseluruh negara yang memiliki sistem tiga fasa. Meskipun tegangan yang dibangkitkan oleh generator bernilai seimbang akan tetapi pengaruh pembebanan yang tidak seimbang pada saat pendistribusian dan lain sebagainya dapat menyebabkan tegangan yang sampai ke beban menjadi tidak seimbang.

Ada banyak kondisi ketidakseimbangan tegangan terjadi dengan VUF (*Voltage Unbalance Factor*) yang sama [2] yaitu:

- a. $1\phi - UV$ (*Single Phase Under Voltage Unbalance*)

Adalah kondisi dimana salah satu fasa dari sistem tiga fasa bertegangan yang lebih rendah dibandingkan dengan tegangan nominalnya.

- b. $2\phi - UV$ (*Two Phases Under Voltage Unbalance*)

Adalah kondisi dimana tegangan dua dari tiga fasa bernilai lebih rendah dari nilai tegangan nominalnya.

- c. $3\phi - UV$ (*Three Phases Under Voltage Unbalance*)

Adalah kondisi dimana tegangan dari ketiga saluran dari sistem tiga fasa bernilai tidak seimbang dan bernilai lebih rendah dari nilai nominalnya.

- d. $1\phi - OV$ (*Single Phase Over Voltage Unbalance*)

Adalah kondisi dimana tegangan salah satu dari ketiga fasa bernilai lebih tinggi dari nilai tegangan nominalnya.

- e. $2\phi - OV$ (*Two Phases Over Voltage Unbalance*)

Adalah kondisi dimana tegangan dua dari tiga fasa bernilai lebih tinggi dari tegangan nominalnya.

- f. $3\phi - OV$ (*Three Phases Over Voltage Unbalance*)

Adalah kondisi dimana ketiga fasa dari sistem tiga fasa mengalami ketidakseimbangan tegangan yang bernilai lebih tinggi dari tegangan nominalnya.

- g. $1\phi - A$ (*Unequal Single Phase Angle Displacement*)

Jika tegangan tiga fasa seimbang, maka seharusnya perbedaan sudut fasanya sebesar 120° .

- h. $2\phi - A$ (*Unequal Two Phase Angles Displacement*)

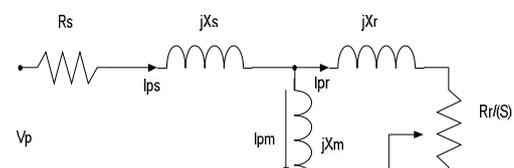
Sama seperti *Unequal Single Phase Angle Displacement* namun pada kondisi ini terdapat dua fasa yang berbeda terhadap fasa referensinya.

VUF (*Voltage Unbalanced Factor*) didefinisikan oleh IEC (*International Electrotechnical Commission*) sebagai perbandingan antara tegangan komponen negatif (V_n) dengan tegangan komponen positif (V_p) seperti pada Persamaan (1).

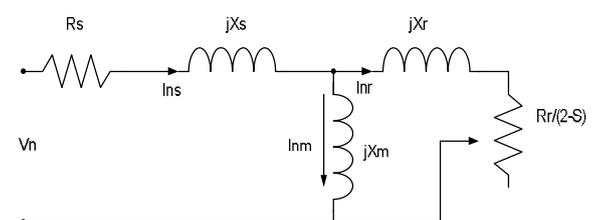
$$VUF = \frac{|V_n|}{|V_p|} \times 100\% \quad (1)$$

3. Analisis Steady State

Analisis *steady state* dari sebuah operasi motor induksi tiga fasa dengan suplai tegangan tidak seimbang dilakukan dengan menggunakan pendekatan komponen simetris dengan rangkaian ekuivalen seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1 dan 2 [2].



Gambar 1. Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi Urutan Positif



Gambar 2. Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi Urutan Negatif

Analisis dari rangkaian ekivalen pada Gambar 1 dan 2 didapat Persamaan (2) dan (3) untuk impedansi urutan positif (Z_p) dan impedansi urutan negatif (Z_n):

$$Z_p = R_s + jX_s + \frac{(jX_m)\left(\frac{R_r}{s} + jX_r\right)}{\frac{R_r}{s} + j(X_m + X_r)} \quad (2)$$

$$Z_n = R_s + jX_s + \frac{(jX_m)\left(\frac{R_r}{2-s} + jX_r\right)}{\frac{R_r}{2-s} + j(X_m + X_r)} \quad (3)$$

Parameter yang diperlukan untuk perhitungan ini adalah tahanan stator (R_s), rotor (R_r), reaktansi stator (X_s), rotor (X_r) dan reaktansi magnetisasi (X_m).

Karena motor dihubungkan dengan hubungan wye tiga kawat dan tidak ditanahkan maka urutan nol dari tegangan maupun arus tidak diperhitungkan. Oleh karena itu, arus urutan positif stator (I_{ps}) dan rotor (I_{pr}) serta arus urutan negatif stator (I_{ns}) dan rotor (I_{nr}) yang mengalir adalah seperti yang diperlihatkan pada Persamaan (4) hingga (10):

$$I_{ps} = \frac{V_p}{Z_p} \quad (4)$$

$$I_{pr} = I_{ps} \times \frac{(jX_m)}{\frac{R_r}{s} + j(X_m + X_r)} \quad (5)$$

$$I_{ns} = \frac{V_n}{Z_n} \quad (6)$$

$$I_{nr} = I_{ns} \times \frac{(jX_m)}{\frac{R_r}{2-s} + j(X_m + X_r)} \quad (7)$$

Persamaan (4) dan (5) merupakan persamaan arus stator dan rotor urutan positif dan Persamaan (6) dan (7) merupakan persamaan arus stator dan rotor urutan negatif. Sehingga didapat persamaan arus pada tiap fasa (I_{as} , I_{bs} , I_{cs}):

$$I_{as} = I_{ps} + I_{ns} \quad (8)$$

$$I_{bs} = a^2 I_{ps} + a I_{ns} \quad (9)$$

$$I_{cs} = a I_{ps} + a^2 I_{ns} \quad (10)$$

Daya input (P_{in} , Q_{in}) dan faktor daya ($\cos\phi$) motor dapat dihitung dengan menggunakan komponen simetris arus dan tegangan dengan Persamaan (11) sampai dengan (13):

$$P_{in} = Re [3(V_p \cdot I_{ps}^* + V_n \cdot I_{ns}^*)] \quad (11)$$

$$Q_{in} = Im [3(V_p \cdot I_{ps}^* + V_n \cdot I_{ns}^*)] \quad (12)$$

$$\text{faktor daya} = \cos \left[\tan^{-1} \left(\frac{Q_{in}}{P_{in}} \right) \right] \quad (13)$$

Dimana tanda (*) bermakna nilai konjugat.

Jika rugi-rugi inti dan mekanis diabaikan, daya keluaran dari motor ditunjukkan dengan Persamaan (14) sampai dengan (16):

$$P_p = 3I_{pr}^2 \left(\frac{1-s}{s} \right) R_r \quad (14)$$

$$P_n = 3I_{nr}^2 \left(\frac{s-1}{2-s} \right) R_r \quad (15)$$

$$P_{out} = P_p + P_n \quad (16)$$

P_n pada keadaan normal adalah bernilai negatif karena rotor berputar pada arah yang berlawanan dengan medan magnet yang dihasilkan oleh komponen urutan negatif.

Misalkan ω_m adalah kecepatan sudut rotor, dan ω_s adalah kecepatan sinkron. Maka torsi (T) keluaran dari motor ditentukan oleh Persamaan (17):

$$T = T_p + T_n = \frac{3R_r}{\omega_s} \left(\frac{I_{pr}^2}{s} - \frac{I_{nr}^2}{2-s} \right) \quad (17)$$

Maka efisiensi motor dapat dihitung menggunakan Persamaan (18):

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (18)$$

4. Metode Penelitian

Penelitian dilakukan dengan simulasi menggunakan perangkat lunak Matlab dilaksanakan pada bulan November 2013 dan adapun parameter motor didapat dengan cara pengambilan data langsung bertempat di Laboratorium Konversi Energi Listrik FT-USU Medan.

Adapun peralatan yang akan digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Motor induksi 3 fasa, rotor sangkar dengan spesifikasi:
 - AEG Typ AL 90LA - 4
 - Δ/Y 220/380 V 6,5/3,6 A
 - 1,5 KW
- Laptop (lengkap dengan sistem operasi beserta perangkat lunaknya)
- Power supply AC (PTAC)
- Power supply DC (PTDC)
- Volt meter
- Ampere meter
- Watt meter

Sebelum dilakukan simulasi, terlebih dahulu dilakukan beberapa percobaan untuk mendapatkan parameter motor induksi yang dibutuhkan pada saat ingin dilakukan simulasi

dan perhitungan seperti yang diperlihatkan pada Tabel 1 berikut:

Tabel 1 Percobaan Untuk Mendapatkan Parameter Motor Induksi.

Parameter Motor Induksi	Percobaan Yang Dilakukan
Tahanan stator (R_s)	• Percobaan Tahanan DC
Tahanan rotor (R_r)	• Percobaan Rotor Tertahan • Percobaan Tahanan DC
Reaktansi stator (X_s)	• Percobaan Rotor Tertahan
Reaktansi rotor (X_r)	• Percobaan Rotor Tertahan
Reaktansi magnetisasi (X_m)	• Percobaan Beban Nol

Setelah dilakukan percobaan seperti yang tertera pada Tabel 1. Didapati hasil seperti yang terdapat pada Tabel 2 sebagai berikut:

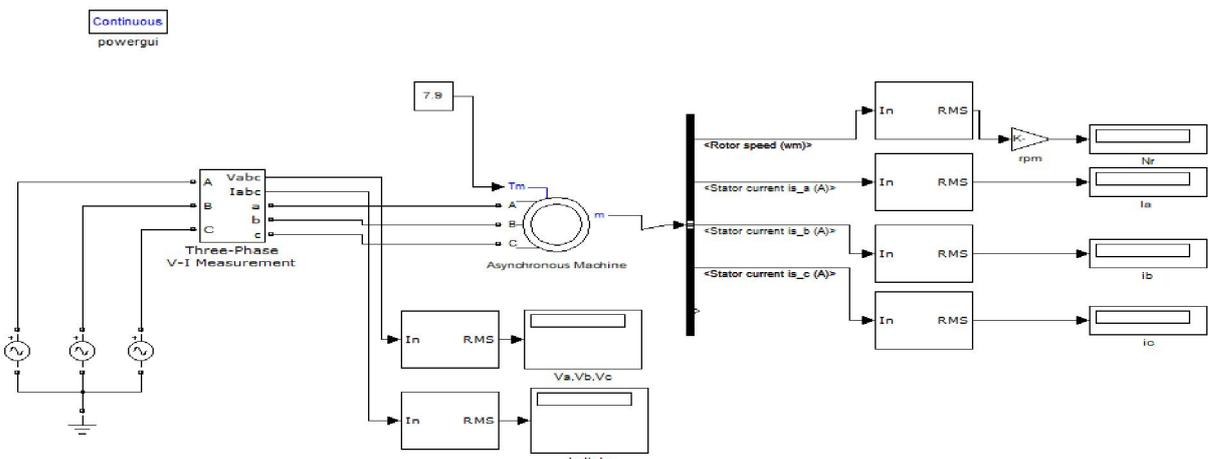
Tabel 2. Parameter Motor Induksi.

R_s	X_s	R_r	X_r	X_m
5,22 Ω	5,376 Ω	5,2 Ω	3,584 Ω	75,2 Ω

5. Simulasi

Motor induksi yang digunakan dalam simulasi ini adalah motor induksi tiga fasa rotor sangkar dengan spesifikasi sama dengan motor induksi pada percobaan sebelumnya. Rangkaian simulasi ditunjukkan oleh Gambar 3. Rangkaian simulasi ini digunakan untuk berbagai kondisi ketidakseimbangan tegangan dengan faktor ketidakseimbangan yang sama disetiap kondisi.

Simulasi dilakukan dengan cara memasukkan nilai parameter yang dibutuhkan oleh simulator yaitu spesifikasi motor induksi



Gambar 3. Rangkaian Simulasi.

dan tegangan perfasa. Selanjutnya motor diberikan beban mekanis sebesar 7,9 Nm.

Setelah simulasi dijalankan akan ditampilkan oleh simulator nilai arus perfasa, kecepatan putar motor induksi, serta torsi elektrik (T_e) yang dihasilkan oleh motor induksi.

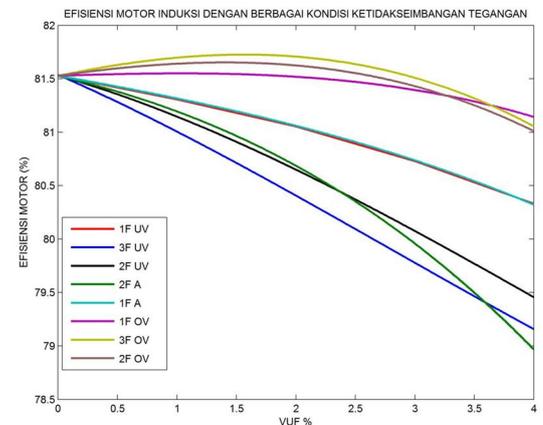
6. Hasil dan Pembahasan

Data hasil simulasi dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Simulasi Pada Kondisi Tegangan Seimbang.

VUF (%)	V_n (A)	T_e (Nm)	P_{in} (watt)	P_{out} (watt)	Eff (%)	RPM	
0	0	3,49	8,341	1499,3	1221.5	81.5	1409

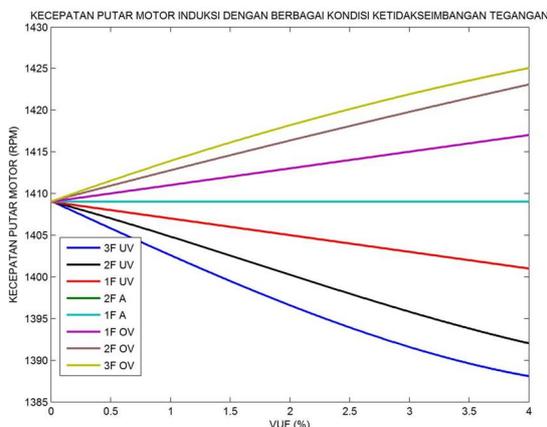
Efisiensi dari berbagai kondisi ketidakseimbangan tegangan adalah seperti yang tampak pada Gambar 4.



Gambar 4. Grafik Efisiensi Dari Motor Induksi Tiga Fasa Pada Beberapa Kondisi Ketidakseimbangan Tegangan

Efisiensi pada tiap kondisi terlihat menurun seiring dengan penambahan nilai ketidakseimbangan tegangan. Terlihat bahwa kondisi $3\phi - UV$ memiliki nilai efisiensi terendah dibandingkan dengan tujuh kondisi lainnya.

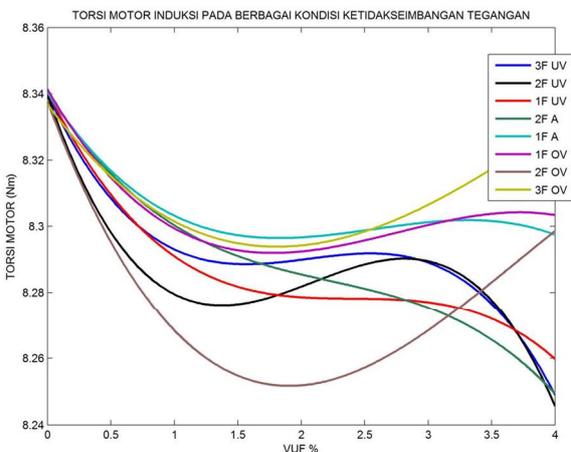
Kecepatan putar motor dari berbagai kondisi ketidakseimbangan tegangan adalah:



Gambar 5. Grafik Kecepatan Putar Rotor Motor Induksi Tiga Fasa Pada Beberapa Kondisi Ketidakseimbangan Tegangan

Kecepatan putar dari motor induksi tiga fasa terlihat beragam sesuai dengan kondisi ketidakseimbangan tegangan yang dialami oleh motor tersebut. Kondisi $3\phi - UV$ terjadi penurunan kecepatan putar yang cukup signifikan, sedangkan pada kondisi $3\phi - OV$ terjadi hal yang sebaliknya.

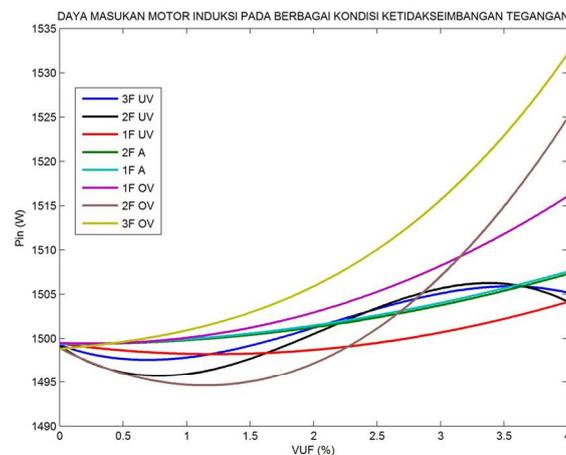
Torsi motor dari berbagai kondisi ketidakseimbangan tegangan adalah seperti pada Gambar 6.



Gambar 6. Grafik Torsi Motor Induksi Tiga Fasa Pada Beberapa Kondisi Ketidakseimbangan Tegangan

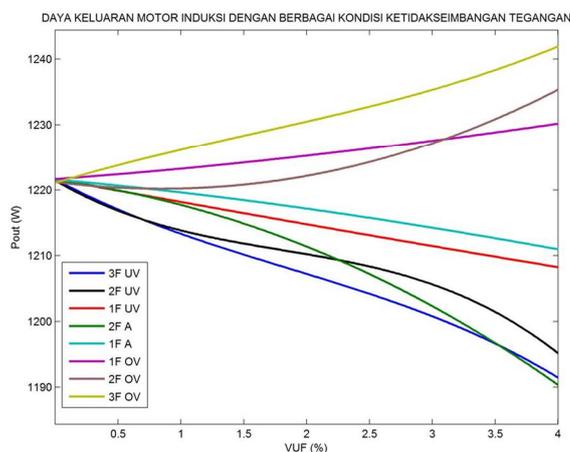
Torsi dari motor induksi terjadi penurunan yang beragam pada setiap kondisi ketidakseimbangan tegangan. Hal ini disebabkan munculnya torsi urutan negatif yang berlawanan arah dengan torsi urutan positifnya yang berakibat pada penurunan torsi motor induksi tersebut.

Daya masukan motor dari berbagai kondisi ketidakseimbangan tegangan adalah seperti pada Gambar 7.



Gambar 7. Grafik Daya Masukan Motor Induksi Tiga Fasa Pada Beberapa Kondisi Ketidakseimbangan Tegangan.

Daya keluaran motor dari berbagai kondisi ketidakseimbangan tegangan adalah seperti pada Gambar 8.



Gambar 8. Grafik Daya Keluaran Motor Induksi Tiga Fasa Pada Beberapa Kondisi Ketidakseimbangan Tegangan.

Daya masukan motor induksi terlihat meningkat dikarenakan kondisi ketidakseimbangan tegangan mengakibatkan

peningkatan nilai arus perfasa yang mengakibatkan daya masukan menjadi meningkat, namun hal ini tidak diiringi pula dengan daya keluaran motor yang pada sebagian kondisi mengalami penurunan yang berakibat pada penurunan efisiensi dari motor induksi. Tegangan yang berada diatas tegangan nominal akan mengakibatkan kerusakan isolasi pada motor. Nilai arus yang mengalir pada kondisi tegangan tidak seimbang jugalah berada diatas nilai nominalnya dan tidak seimbang sehingga dapat menyebabkan kerusakan pada saat motor beroperasi.

7. Kesimpulan

Berdasarkan uraian dan penelitian yang telah dilakukan, maka diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Dari hasil simulasi dan perhitungan didapatkan bahwa ketidakseimbangan tegangan dengan faktor ketidakseimbangan yang sama mengakibatkan perbedaan kecepatan putar motor, torsi elektrik dan efisiensi pada tiap kondisi yang berbeda.
2. Tegangan urutan positif yang lebih besar akan menghasilkan efisiensi motor yang lebih besar. Kondisi $3\phi - 0V$ memiliki efisiensi tertinggi dibandingkan kondisi yang lain.
3. Pada kondisi $3\phi - UV$ terjadi penurunan kecepatan terbesar yaitu sebanyak 1.5 % pada saat faktor ketidakseimbangan 4 %, sedangkan pada kondisi $3\phi - 0V$ terjadi peningkatan kecepatan putar motor sebesar 1.1 %.
4. Penurunan torsi terbesar terjadi pada kondisi $2\phi - UV$ yaitu sebesar 1.1 % pada faktor ketidakseimbangan 4 % , sedangkan kondisi $3\phi - 0V$ memiliki penurunan torsi terendah yaitu sebesar 0.1 %.
5. Ketidakseimbangan tegangan juga mengakibatkan ketidakseragaman nilai arus dimana beberapa darinya berada diatas nilai nominalnya, hal ini dapat berakibat buruk bagi motor.

8. Daftar Pustaka

- [1] Quispe, E., Gonzales, G., and Aguado, J., " Influence of unbalanced and waveform voltage on the performance characteristics of three-phase induction motors",

Universidad Autonoma de Occidente, Colombia.

- [2] Ching, Y., Chen, B.K., Lee, W.J., Hsu, Y.F., "Effects of various unbalanced voltages on the operation performance of an induction motor under the same voltage unbalance factor condition," Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference, 1997. Conference Record, Papers Presented at the 1997 Annual Meeting., IEEE 1997 , vol., no., pp.51,59, 11-16 May 1997
- [3] Pabla, A.S., "Electric Power Distribution Systems," Edisi Pertama. 1983. Penerbit Tata McGraw-Hill, New Delhi
- [4] Stevenson, W.D., " Analisis Sistem Tenaga Listrik," Edisi Keempat. 1983. Penerbit Erlangga, Jakarta.
- [5] Rijono, Y., "Dasar Teknik Tenaga Listrik", Edisi Revisi. 1997. Penerbit Andi, Yogyakarta.
- [6] Theraja, B.L., "A Text Book Of Electrical Technology", Edisi Kedelapan belas. 1981. Penerbit S.Chand & Company, New Delhi.
- [7] Sandhu, K.S., Chaudhary, V., "Simulation of Three-phase induction motor operating with voltage unbalance", National Institute of Technology Kurukshetra, ISBN:978-960-474-026-0, India.
- [8] Yandri. "Penentuan Parameter dan Arus Asut Motor Tiga Fasa". Laboratorium Konversi Energi Universitas Tanjungpura.