

ANALISIS PENGARUH UNBALANCE UNDER VOLTAGE DAN UNBALANCE OVER VOLTAGE TERHADAP KINERJA MOTOR INDUKSI TIGA FASA

(Influence Analysis of Unbalance Under Voltage and Unbalance Over Voltage to Performance of Three Phase Induction Motor)

Hari Prasetijo

Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Sains dan Teknik,
Universitas Jenderal Soedirman
Jl. Mayjend Sungkono KM 05 Blater Purbalingga Indonesia,
Telp. (0281) 6596801
Email : aydinhari@yahoo.com

ABSTRAK

Studi ini membahas pengaruh unbalance under voltage (UBUV) dan unbalance over voltage (UBOV) sesuai standar NEMA MG-I 2003 terhadap kinerja motor induksi tiga fasa dengan analisis menggunakan perhitungan metode komponen simetris untuk mengetahui parameter-parameter analisis operasi motor induksi saat steady state diantaranya yaitu karakteristik arus, rugi-rugi daya, efisiensi, dan torsi motor induksi serta simulasi kecepatan putaran motor. Penelitian ini hanya sebagai studi teori dan pemodelan simulasi menggunakan software PSIM Profesional 9.0.3.400 dengan objek penelitian data tegangan tiga fasa yang tidak seimbang pada pelanggan industri PT. PLN dan motor induksi tiga fasa di laboratorium energi Teknik Elektro, Universitas Jenderal Soedirman. Hasil penelitian menunjukkan pada motor induksi 0,5 HP ketika terjadi UBUV dengan persentase 1,103% terjadi ketidakseimbangan arus 6,1%, rugi-rugi daya meningkat 6,22%, efisiensi menurun 3,19%, torsi menurun 7,53% dan kecepatan putaran menurun 0,386%. Sedangkan ketika terjadi UBOV dengan persentase 1,026% terjadi ketidakseimbangan arus 5,65%, rugi-rugi daya meningkat 22,82%, efisiensi menurun 2,96%, torsi meningkat 8,01% dan kecepatan putaran meningkat 0,165%.

Kata kunci: UBUV, UBOV, NEMA MG-I 2003, metode komponen simetris, motor induksi tiga fasa.

ABSTRACT

This study, discusses the influence of under voltage unbalance (UBUV) and over voltage unbalance (UBOV) according to NEMA standard MG-I 2003 to the performance of three-phase induction motor by analysis using the calculation symmetrical components method to determine the parameters of the analysis of induction motors operating at steady state among which are the characteristics of the current, the power losses, efficiency, and torque of an induction motor and the simulation of motor rotation. This study is only a theory and modeling simulation using software PSIM Professional 9.0.3.400 with the object of research data three-phase voltages unbalanced in industry subscribers of PT. PLN UPJ Purbalingga and three-phase induction motors in the laboratory energy of Electrical Engineering, Jenderal Sudirman University. The results showed the 0,5 HP induction motor when it occurred UBUV with the percentage of 1.103% occurred unbalance current 6,1%, the power losses increased 6,22%,

efficiency decreased 3,19%, torque decreased 7,53% and rotation decreased 0,386%. While when it occurred UBOV with percentage 1,026% occurred unbalance current 5,65%, the power losses increased 22,82%, efficiency decreased 2,96%, torque increased 8,01% and rotation increased 0,165%.

Keywords: *UBUV, UBOV, NEMA MG-I 2003, symmetrical components method, three-phase induction motor.*

PENDAHULUAN

Seiring meningkatnya kebutuhan listrik pada pelanggan listrik khususnya di industri-industri yang membutuhkan energi listrik dalam jumlah yang besar, faktor kualitas daya listrik harus memadai guna menunjang proses produksi yang optimal. Salah satu permasalahan kualitas daya listrik yang sering terjadi di industri yang menggunakan sistem listrik tiga fasa yaitu terjadinya ketidakseimbangan tegangan antar fasanya. Fenomena ketidakseimbangan tegangan ini sangat berpengaruh bagi kinerja peralatan-peralatan yang disuplai oleh tegangan tiga fasa. Salah satu peralatan industri yang keberadaannya sangat vital untuk proses produksi yaitu motor listrik.

Motor induksi merupakan salah satu mesin arus bolak-balik tenaga penggerak yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik dan sering digunakan dalam dunia industri karena memiliki beberapa keuntungan, yaitu konstruksi yang kuat, sederhana, dan tidak membutuhkan perawatan yang begitu banyak. Hampir dari 80% seluruh dunia industri menggunakan motor induksi yang berfungsi sebagai tenaga penggerak dari peralatan mekanis maupun dalam pemindahan material dari suatu tempat ke tempat yang lain (Sandhu, 2008).

Dalam pemakaiannya, motor harus mendapatkan tegangan yang konstan atau stabil. Bila tegangan listrik tidak stabil maka akan terjadi gangguan diantaranya adalah fluktuasi tegangan kerja yang cukup besar ataupun kecil. Adanya sumber tegangan yang tidak seimbang akan menyebabkan arus

yang mengalir masing-masing kumparan

motor akan menjadi tidak seimbang juga, sehingga motor akan menjadi panas. Selain itu gangguan tersebut juga dapat menyebabkan kecepatan motor berubah. Apabila hal ini berlangsung dalam waktu yang relatif lama, maka motor tidak dapat dioperasikan pada kapasitas normalnya apalagi untuk pengoperasian motor-motor yang terus menerus sehingga pada akhirnya efisiensi motor akan berkurang (Efendi, 2008).

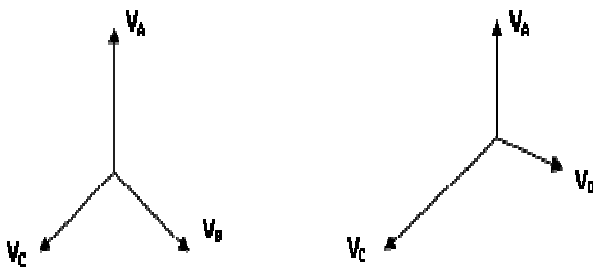
Oleh karena itu diperlukan kajian baik berupa analisis maupun penelitian di laboratorium atau industri untuk melihat bagaimana ketidakseimbangan pada tegangan sumber dapat memberikan suatu kontribusi yang akan berpengaruh bagi motor induksi tiga fasa. Sebelumnya sudah dilakukan penelitian oleh (Rafli, 2011) tentang ketidakseimbangan tegangan terhadap torsi motor induksi tiga fasa hanya dalam kondisi *unbalance under voltage*. Namun, dalam penelitian ini lebih dikembangkan pada permasalahan pengaruh variasi dari ketidakseimbangan tegangan sumber yaitu *unbalance under voltage* dan *unbalance over voltage* terhadap kinerja motor induksi tiga fasa yaitu meliputi rugi-rugi daya, efisiensi, torsi dan kecepatan motor induksi tiga fasa sesuai standar *National Electrical Manufacturers Association (NEMA)*. Dengan demikian bisa dilihat bagaimana relevansinya perbandingan variasi ketidakseimbangan tegangan sumber tersebut terhadap operasi motor induksi dengan analisis komponen simetris dan simulasi

Software PSIM Professional Version
9.0.3.400.

Variasi dan Ketidakseimbangan Tegangan Sumber

Sebuah sistem tenaga listrik 3 fasa yang seimbang adalah sistem dimana tegangan tiap fasanya yang diukur dari fasa ke netral memiliki besar magnitud yang sama dan memiliki perbedaan sudut fasa sebesar 120° seperti pada gambar (1). Sistem yang memiliki perbedaan pada besar magnitud dan sudut fasa yang tidak berbeda 120° dapat dikatakan sebuah sistem yang tidak seimbang seperti pada gambar (1). (Gosbell, 2002).

Ketidakseimbangan tegangan merupakan salah satu permasalahan kualitas daya listrik pada sistem tiga fasa yang umumnya terjadi di sistem distribusi karena pembebanan fasa yang tidak merata sehingga menimbulkan drop tegangan pada tiap fasa yang berbeda.



Gambar 1. Sistem Seimbang dan Sistem Tidak Seimbang

(Sumber : V.J Gosbell. *Voltage Unbalance, Technical Note No. 6*. Australia : *Integral Energy Power Quality Centre*.2002.p.2.)

Definisi Ketidakseimbangan Tegangan Menurut National Equipment Manufacturer's Association (NEMA).

Perhitungan ini adalah dengan peraturan NEMA (*National Electrical Manufacturers Association of USA*).

Nilai persentase *line voltage unbalance rate* (LVUR) dari ketidakseimbangan tegangan 3 fasa dapat dihitung dengan nilai selisih terbesar dari nilai rata-rata tegangan fasa-fasa dibagi nilai rata-rata tegangan fasa-fasanya dengan nilai sudut fasa diabaikan seperti pada persamaan (1). Dalam standar *NEMA Motor dan Generator MG1 part 14.36* memberikan rekomendasi bahwa motor dapat dioperasikan secara normal pada kapasitas rated jika *unbalance voltage* tidak lebih dari 1%.

$$\%LVUR = \frac{V_{line\ tertinggi} - V_{line\ rata-rata}}{V_{line\ rata-rata}} \cdot 100\% \dots (1)$$

Analisis Operasi Motor Induksi Tiga Fasa

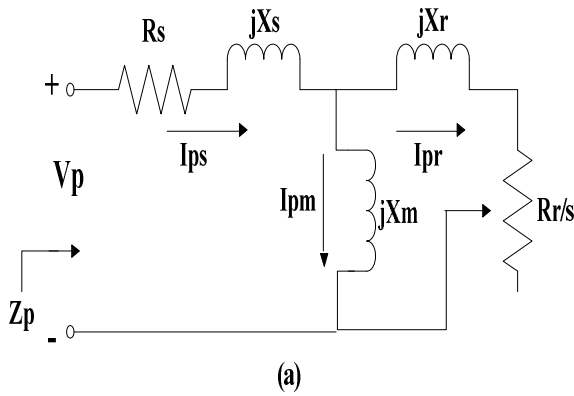
Ketika motor tiga fasa disuplai oleh sistem yang tidak seimbang maka tingkat ketidakseimbangan pada arus yang mengalir akan melebihi besarnya persentase tegangan tiga fasa tidak seimbang. Hal ini dapat dijelaskan oleh persamaan besarnya slip motor pada saat terjadi tegangan tidak seimbang. Besarnya slip motor pada komponen urutan positif diberikan oleh persamaan (2). (Gosbell, 2001)

$$S_1 = \frac{n_s - n_r}{n_s} \dots \dots \dots (2)$$

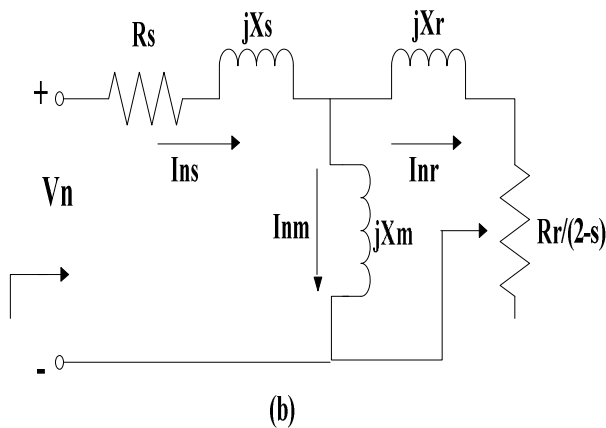
Sedangkan besarnya slip motor pada komponen negatif (S_2) diberikan oleh persamaan (3).

$$S_2 = \frac{-n_s - n_r}{-n_s} = (2 - S_1) \dots \dots \dots (3)$$

Dalam analisis operasi motor induksi kondisi sumber tegangan tidak seimbang dapat dikembangkan menjadi rangkaian ekuivalen urutan positif dan urutan negatif pada gambar (4) dan gambar (5).



Gambar 2. Rangkaian ekivalen urutan positif motor induksi



Gambar 3. Rangkaian ekivalen urutan negatif motor induksi.

(Sumber : Kanwarjit Singh Sandhu, *Simulations of Three- Phase Induction Motor Operating with Voltage Unbalanc,e* India : Institute of Technology Kurukshetra.2008.p.3)

Dimana,

- V_p : Tegangan urutan positif.
- V_n : Tegangan urutan negatif.
- R_s : Resistansi stator.
- X_s : Reaktansi stator.
- R_r : Resistansi rotor.
- X_r : Reaktansi rotor.
- X_m : Reaktansi magnetik.
- Z_p : Impedansi motor urutan positif.
- Z_n : Impedansi motor urutan negatif.
- I_{ps} : Arus stator urutan positif.

I_{pm} : Arus resistansi magnetik urutan positif.

I_{ns} : Arus stator urutan negatif.

I_{nr} : Arus rotor urutan negatif.

I_{pr} : Arus rotor urutan positif.

S : Slip.

Tegangan urutan positif dan negatif dari rangkaian ekivalen di atas menggunakan persamaan (4) dan (5).

$$V_p = \frac{V_A + a \cdot V_B + a^2 \cdot V_C}{3} \dots\dots\dots(4)$$

$$V_n = \frac{V_A + a^2 \cdot V_B + a \cdot V_C}{3} \dots\dots\dots(5)$$

Dari rangkaian ekivalen diatas dapat di berikan perhitungan untuk memperoleh nilai dari impedansi urutan positif (Z_p) dan impedansi urutan negatif (Z_n) dengan menggunakan persamaan (6) dan (7). (Shandu,2008)

$$Z_p = R_s + jX_s + \frac{(jX_m) \left(\frac{R_r}{s} + jX_r \right)}{\frac{R_r}{s} + j(X_m + X_r)} \dots\dots(6)$$

$$Z_n = R_s + jX_s + \frac{(jX_m) \left(\frac{R_r}{2-s} + jX_r \right)}{\frac{R_r}{2-s} + j(X_m + X_r)} \dots\dots(7)$$

Arus pada stator dan rotor untuk urutan positif adalah seperti pada persamaan (8) dan (9).

$$I_{ps} = \frac{V_p}{Z_p} \dots\dots\dots(8)$$

$$I_{pr} = I_{ps} \times \frac{(jX_m)}{\frac{R_r}{s} + j(X_m + X_r)} \dots\dots\dots(9)$$

Arus pada stator dan rotor untuk urutan negatifnya adalah seperti pada persamaan (10) dan (11).

$$I_{ns} = \frac{V_n}{Z_n} \dots\dots\dots(10)$$

$$I_{nr} = I_{ns} \times \frac{(jX_m)}{\frac{R_r}{2-s} + j(X_m + X_r)} \dots\dots\dots(11)$$

Sehingga arus yang mengalir pada tiap fasa I_A , I_B , dan I_C untuk motor induksi hubungan segitiga dan hubungan bintang yang tidak ditanahkan adalah seperti pada persamaan (12), (13) dan (14).

$$I_A = I_{ps} + I_{ns} \dots\dots\dots(12)$$

$$I_B = a^2 I_{ps} + a I_{ns} \dots\dots\dots(13)$$

$$I_C = a I_{ps} + a^2 I_{ns} \dots \dots \dots (14)$$

Untuk rugi-rugi daya tembaga stator, rotor (*copper losses*) dan rugi-rugi total dengan mengasumsikan rugi mekanik dan rugi inti diabaikan seperti pada persamaan (15), (16) dan (17).

$$P_{SCL} = 3 (I_{ps} + I_{ns})^2 R_s \dots \dots \dots (15)$$

$$P_{RCL} = 3 (I_{pr} + I_{nr})^2 R_r \dots \dots \dots (16)$$

$$P_{Rugi\ Total} = P_{SCL} + P_{RCL} \dots \dots \dots (17)$$

Dengan variabel rugi daya inti (*core losses*) dan rugi mekanik diabaikan maka besarnya daya output yang dihasilkan adalah seperti pada persamaan (18), (19) dan (20). (Sandhu, 2008)

$$P_p = 3 I_{pr}^2 \left(\frac{1-s}{s} \right) R_r \dots \dots \dots (18)$$

$$P_n = 3 I_{nr}^2 \left(\frac{s-1}{2-s} \right) R_r \dots \dots \dots (19)$$

$$P_{out} = P_p + P_n \dots \dots \dots (20)$$

Sehingga efisiensi motor dengan mengasumsikan rugi mekanik dan rugi inti diabaikan seperti pada persamaan (21).

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{losses}} \cdot 100\% \dots \dots \dots (21)$$

Torsi urutan positif dan urutan negatif serta torsi total yang dibangkitkan diberikan persamaan (22), (23) dan (24).

$$T_p = \frac{P_p}{\omega_m} = \frac{P_p}{\omega_s(1-s)} = 3 \frac{I_{pr}^2 R_r}{s \cdot \omega_s} \dots \dots \dots (22)$$

$$T_n = \frac{P_n}{\omega_m} = \frac{P_n}{\omega_s(1-s)} = 3 \frac{I_{nr}^2 R_r}{(2-s) \cdot \omega_s} \dots \dots \dots (23)$$

$$T = T_p + T_n = 3 \frac{R_r}{\omega_s} \left(\frac{I_{pr}^2}{s} - \frac{I_{nr}^2}{2-s} \right) \dots \dots \dots (24)$$

Data Penelitian

Pengumpulan data diambil di dua lokasi yang berbeda yaitu di laboratorium energi Teknik Elektro Universitas Jendral Soedirman untuk mengetahui data *sheet / nameplate* dari motor induksi tiga fasa dan di PT. PLN UPJ Purbalingga untuk mengetahui data tegangan sumber tiga fasa tidak

seimbang. Berikut adalah data penelitiannya :

- a. Motor Induksi Tiga Fasa
 - Data *name plate* motor induksi tiga fasa di laboratorium energi Teknik Elektro Universitas Jendral Soedirman adalah sebagai berikut :
 - Tipe Rotor : Sangkar Tupai
 - *Rated Output* : 0,5 HP / 0,37-0,4 kW
 - Frekuensi : 50 Hz
 - *Rated Voltage*: 220 / 380 V
 - *Rated Current*: 5,7 / 0,95 A
 - RPM (75% Full Load) : 2850 ^r/_{min}
 - *Winding Connection*: Y-Δ
 - Jumlah Kutub : 2 Kutub
 - Impedansi motor yang terdiri dari tahanan stator (Rs), tahanan rotor (Rr), reaktansi rotor (Xr), reaktansi stator (Xs), dan reaktansi magnetisasi (Xm) seperti pada tabel (1) berikut ini.

Tabel 1. Resistansi dan reaktansi motor induksi 0,5 HP

Rs (Ω)	Xs (Ω)	Xm (Ω)	Rr (Ω)	Xr (Ω)
35	9	320	17,2	4,3

Sumber : Data Penelitian.

b. Tegangan Tiga Fasa Tidak Seimbang

Data ini merupakan data primer yaitu tegangan *fasa – netral* (V_{an}, V_{bn}, V_{cn}) yang menyuplai motor induksi tiga fasa dengan nilai untuk masing-masing fasa yang tidak seimbang. Data ketidakseimbangan ini terdapat dua kondisi ketidakseimbangan tegangan yaitu kondisi *unbalance under voltage* (UBUV) pada tabel (2) dan *unbalance over voltage* (UBOV) pada tabel (3).

Tabel 2. Kondisi UBUV

Tegangan (V)			Nomor Tiang	Lokasi
Va	Vb	Vc		
212	214	206	KBL01-271-S-004	PT. X
215	217	216	KBL01-222-U-017-T-01	PT. XX

Tabel 3. Kondisi UBOV

Tegangan (V)			Nomor Tiang	Lokasi
Va	Vb	Vc		
229	231	223	PBG01-133-S-008-B-001	PT. Y
229	229	227	KBL01-222-014-T-009	PT. YY

Sumber : Data tegangan pelanggan PT. PLN UPJ Purbalingga tanggal 21-23 Februari 2012

Perhitungan Ketidakseimbangan Tegangan

Persentase
 Analisis ini dilakukan untuk mengetahui besarnya persentase ketidakseimbangan tegangan (*unbalance voltage*) berdasarkan definisi "National Electrical Manufacturers Association (NEMA) Motors and Generators Standards (MG-1 2003)" dengan nilai persentase *line voltage unbalance rate (LVUR)* seperti pada persamaan (1).

Data tegangan yang dianalisis yaitu pada kondisi UBUV tabel (2) dan kondisi UBOV tabel (3) di atas. Setelah dianalisis dapat dilihat hasilnya pada tabel (4) berikut ini.

Tabel 4. Perbandingan tegangan fasa netral dengan fasa-fasa dan hasil persentase ketidakseimbangan tegangan

Kondisi	Tegangan Φ -N(V)			Tegangan Φ - Φ (V)			% Unbalance
	Va	Vb	Vc	Vab	Vbc	Vca	
UBUV	212	214	206	368	363	362	1,10
	215	217	216	374	375	373	0,23
UBOV	229	231	223	398	393	391	1,03
	229	229	227	396	394	394	0,29

Dari beberapa kondisi ketidakseimbangan tegangan di atas terlihat persentase ketidakseimbangan yang terjadi, di mana tegangan tiga fasa tersebut akan menyuplai motor induksi tiga fasa. Pada kondisi UBUV yang terdiri dari dua kondisi terjadi persentase ketidakseimbangan tegangan sebesar masing-masing 1,103% dan 0,233% dan pada kedua kondisi UBOV terjadi persentase ketidakseimbangan tegangan masing-masing sebesar 1,026% dan 0,293%.

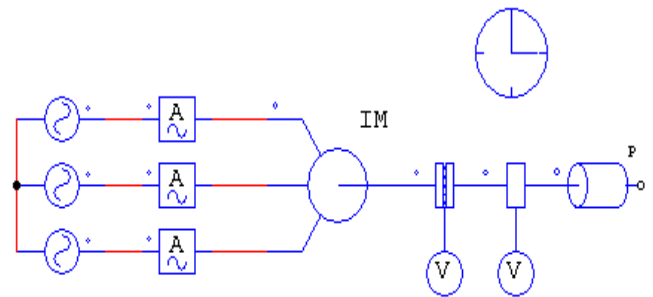
Standar NEMA MG-1 2003 memberikan rekomendasi bahwa motor dapat dioperasikan secara normal pada kapasitas rated jika *unbalance voltage*

tidak lebih dari 1%. Dari hasil perhitungan di atas persentase ketidakseimbangan tegangan pada kondisi UBUV dan UBOV terdapat kondisi yang masing-masing nilainya lebih dari 1% yaitu 1,103% dan 1,026% artinya apabila motor disuplai dengan ketidakseimbangan ini maka motor tidak bekerja secara normal. Sedangkan untuk kondisi UBUV dan UBOV dengan persentase masing-masing 0,223% dan 0,293% motor masih dalam keadaan normal apabila disuplai dengan besar ketidakseimbangan ini.

Analisis dan Simulasi Karakteristik Arus

Pada bagian ini analisis yang digunakan adalah dengan menggunakan metode komponen simetris menggunakan persamaan (12), (13) dan (14) di atas dan dapat dilihat hasilnya pada tabel (5).

Untuk pemodelan simulasi menggunakan simulasi *PSIM Profesional Version 9.0.3.400* seperti pada gambar (4) berikut.



Gambar 4. Rangkaian Simulasi PSIM Profesional Version 9.0.3.400

Hasil perhitungan dan simulasi karakteristik arus tiap fasa tertera pada tabel (5) berikut ini.

Tabel 5. Hasil arus tiap fasa menggunakan perhitungan metode komponen simetris dan simulasi

Kondisi	% Unbalance	Perhitungan			Simulasi			% Unbalance Arus
		Ia(A)	Ib(A)	Ic(A)	Ia(A)	Ib(A)	Ic(A)	
UBUV	1,10	0,79	0,85	0,76	0,82	0,84	0,78	6,1
	0,23	0,81	0,83	0,82	0,81	0,83	0,82	0,89
UBOV	1,03	0,86	0,91	0,82	0,86	0,89	0,82	5,65
	0,29	0,87	0,88	0,85	0,86	0,86	0,85	1,39
Seimbang	0	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0

Dari hasil perhitungan karakteristik arus ketika terjadi ketidakseimbangan tegangan baik kondisi UBUV maupun UBOV dalam operasi motor induksi tiga fasa sama-sama akan menimbulkan kenaikan ketidakseimbangan arus yang berlipat-lipat. Yaitu, ketika terjadi UBUV 1,103% dan UBOV 1,026% masing-masing menyebabkan ketidakseimbangan arus tiap fasanya sebesar 6,1% dan 5,65%. Terjadinya ketidakseimbangan arus di tiap fasa arus yang menyuplai motor induksi menyebabkan kontribusi kenaikan rugi-rugi daya yang terjadi dan akhirnya akan menaikkan suhu di dalam motor yang akan melebihi temperatur ambient atau suhu normal motor pada saat beroperasi.

Analisis Rugi-rugi Daya dan Efisiensi

Pada bagian ini akan dibahas pengaruh variasi ketidakseimbangan tegangan terhadap rugi-rugi daya dan efisiensi motor induksi tiga fasa.

Rugi-rugi daya yang dianalisis terdiri dari rugi-rugi tembaga stator, rotor dan rugi-rugi total kumparan dengan menggunakan persamaan (15), (16) dan (17) di atas. Hasil perhitungannya tertera pada tabel (6) berikut.

Perhitungan efisiensi yang terdiri dari daya output urutan positif, negatif dan daya output total serta rugi-rugi daya yaitu masing-masing menggunakan persamaan (18), (19), (20), (21) dan (17). Hasil perhitungannya seperti pada tabel (7) berikut.

Tabel 6. Hasil perhitungan rugi-rugi daya motor induksi

Kondisi	% Unbalance	Rugi-rugi Daya Tembaga Stator (watt)	Rugi-rugi Daya Tembaga Rotor (watt)	Rugi-rugi Daya Total (watt)	% Kenaikan Rugi-rugi Daya Total
UBUV	1,10	76	18	94	6,22%
	0,23	73	17	90	1,95%
UBOV	1,03	88	21	109	22,82%
	0,29	81	19	100	12,67%
Seimbang	0	72	16	88	0

Tabel 7. Hasil perhitungan efisiensi motor induksi

Kondisi	% Unbalance	Daya Output (watt)			Efisiensi (%)	% Penurunan Efisiensi
		+	-	Total		
UBUV	1,10	286,27	-0,06	286,21	75,25	3,19%
	0,23	300,89	-0,01	300,88	77,15	0,75%
UBOV	1,03	334,27	-0,06	334,21	75,43	2,96%
	0,29	336,23	-0,01	336,22	77,10	0,81%
Seimbang	0	309,43	-	309,43	77,73	0

Dari hasil perhitungan rugi-rugi daya dan efisiensi ketika terjadi ketidakseimbangan tegangan baik dalam kondisi UBUV maupun UBOV dalam operasi motor induksi tiga fasa maka sama-sama akan menimbulkan kontribusi kenaikan rugi-rugi daya yang terjadi. Yaitu, ketika terjadi UBUV 1,103% dan UBOV 1,026% masing-masing menyebabkan kenaikan rugi-rugi total sebesar 6,22% dan 22,82%. Terjadinya kenaikan rugi-rugi daya pada kumparan pada motor induksi karena adanya ketidakseimbangan arus tiap fasanya yang akan mengakibatkan terjadinya panas di dalam kumparan motor.

Akibat dari kenaikan rugi-rugi daya yang meningkat dan daya output urutan negatif ketika terjadi ketidakseimbangan tegangan maka

akan menyebabkan penurunan efisiensi motor. Yaitu, ketika terjadi UBUV 1,103% dan UBOV 1,026% masing-masing efisiensi menurun sebesar 3,19% dan 2,96%. Terjadinya kenaikan rugi-rugi daya tidak hanya akan menurunkan efisiensi motor namun juga akan mengakibatkan degradasi isolasi kumparan motor.

Analisis dan Simulasi Torsi Motor Induksi Tiga Fasa

Pada bagian ini akan dibahas torsi motor induksi yang terjadi akibat motor disuplai dengan sistem tegangan tidak seimbang. Analisis perhitungan torsi menggunakan persamaan (22), (23), (24). Rangkaian simulasi sama dengan sebelumnya pada gambar (4). Hasil perhitungan dan simulasi torsi tertera pada tabel (8).

Tabel 8. Hasil torsi motor induksi

Kondisi	% Unbalance	Torsi Urutan Positif (N.m)	Torsi Urutan Negatif (N.m)	Torsi Total (N.m)	Torsi Simulasi (N.m)
UBUV	1,103	0,9594	$-2,27 \cdot 10^{-4}$	0,9592	0,9741
	0,233	1,0087	$-1,31 \cdot 10^{-5}$	1,0086	1,0097
UBOV	1,026	1,1206	$-2,27 \cdot 10^{-4}$	1,1204	1,1048
	0,293	1,1272	$-1,75 \cdot 10^{-5}$	1,1271	1,1107
Seimbang	0	1,0373	-	1,0373	1,0373

Dari hasil perhitungan dan simulasi torsi motor induksi ketika terjadi ketidakseimbangan tegangan baik dalam kondisi UBUV maupun UBOV terlihat terjadi fluktuasi torsi. Yaitu, ketika terjadi UBUV 1,103% terjadi penurunan torsi terhadap kondisi normalnya sebesar 7,53% dikarenakan tegangan tiga fasa tidak seimbang yang menyuplai motor induksi tiga fasa berada di bawah kondisi normalnya yang mengakibatkan daya output urutan positif yang dihasilkan pada kondisi UBUV pun lebih kecil dari pada keadaan normalnya. Besarnya daya output motor akan berpengaruh pada besarnya torsi motor yang akan dihasilkan. Pengaruh dari penurunan torsi motor juga karena adanya torsi lawan atau torsi urutan negatif yang dihasilkan dari daya output urutan negatifnya. Semakin besar ketidakseimbangan tegangan maka akan semakin besar daya urutan negatif yang menyebabkan terjadinya torsi urutan negatif semakin meningkat dan pada akhirnya nilai torsi motor pun akan semakin menurun. Besarnya torsi motor akan mengalami penurunan dari kondisi normalnya seiring terjadinya penurunan daya output motor dan kenaikan torsi urutan negatif apabila motor beroperasi dalam kondisi UBUV.

Pada kondisi UBOV 1,026% terjadi penurunan torsi terhadap kondisi normalnya sebesar 8,01% dikarenakan tegangan tiga fasa tidak seimbang yang menyuplai motor induksi tiga fasa berada di atas kondisi normalnya yang mengakibatkan daya output urutan positif pada kondisi UBOV lebih besar dari pada keadaan normalnya. Torsi urutan negatif yang terjadi akibat adanya daya output urutan negatif akan menyebabkan penurunan torsi motor induksi. Namun, besarnya torsi motor pada kondisi UBOV di atas masih berada di atas besar torsi motor dalam keadaan normal atau seimbang karena nilai torsi urutan negatif sangat kecil sehingga penurunan torsi oleh torsi urutan negatif pun sangat kecil dan torsi urutan positif masih di atas kondisi seimbang.

Simulasi Kecepatan Putaran Motor Induksi

Pada bagian ini akan dibahas kecepatan putaran motor yang terjadi akibat motor disuplai dengan sistem tegangan tidak seimbang. Rangkaian simulasi sama dengan sebelumnya pada gambar (4). Hasil simulasi kecepatan putaran motor induksi tertera pada tabel (9) berikut ini.

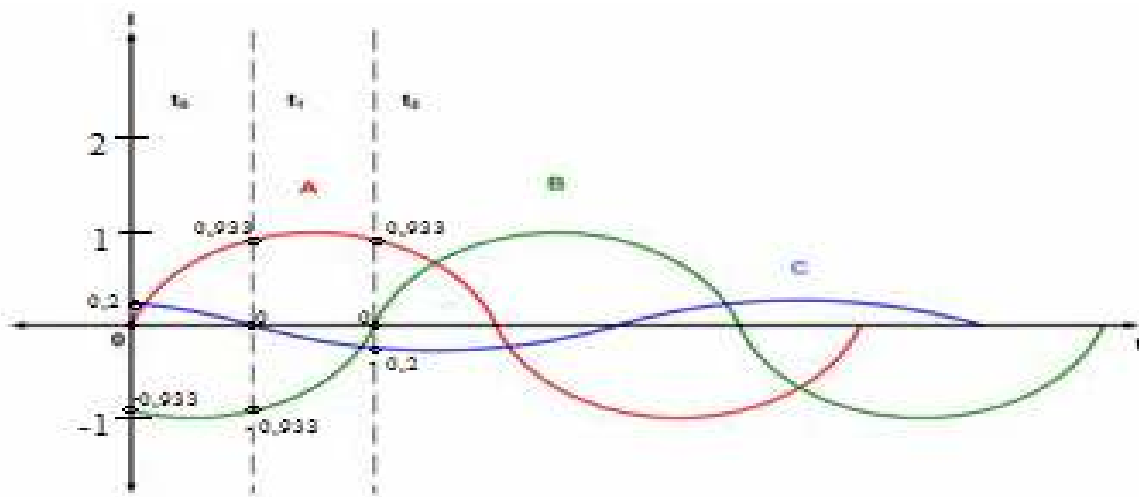
Tabel 9. Hasil simulasi kecepatan putaran motor induksi

Kondisi	% Unbalance	Kecepatan Putaran Motor (rpm)	% Perubahan Kecepatan Putaran Motor
UBUV	1,103	2839,0	- 0,386%
	0,233	2845,3	- 0,165%
UBOV	1,026	2852,4	+ 0,084%
	0,293	2852,9	+ 0,102%
Seimbang	0	2850	0

Dari hasil simulasi kecepatan putaran motor di atas dapat dilihat bahwa ketika terjadi ketidakseimbangan sumber tegangan tiga fasa di tiap-tiap fasanya menyebabkan perubahan kecepatan putaran motor. Yaitu, kondisi UBUV 1,103% terjadi penurunan kecepatan putaran motor terhadap kondisi normalnya sebesar 0,386% dikarenakan torsi motor yang dihasilkan pada kondisi UBUV di atas lebih kecil dari pada keadaan normalnya. Sedangkan untuk kondisi UBOV 1,026% terjadi kenaikan kecepatan putaran motor terhadap kondisi normalnya sebesar 0,084% dikarenakan torsi motor yang dihasilkan

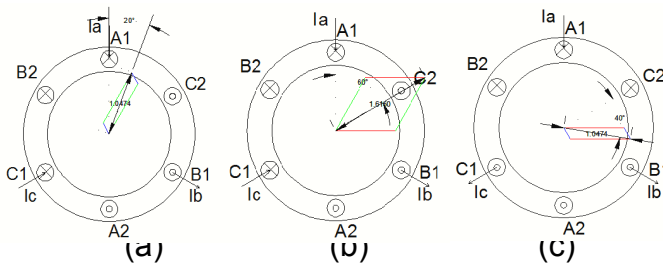
pada kondisi UBOV di atas lebih besar dari pada keadaan normalnya. Torsi motor yang dihasilkan motor induksi akan berpengaruh terhadap besarnya kecepatan putaran motor yang dihasilkan.

Dari perhitungan komponen simetris di atas ketika motor induksi tiga fasa disuplai tegangan tiga fasa tidak seimbang baik dalam kondisi UBUV maupun UBOV maka akan terjadi adanya komponen urutan negatif. Hal ini yang menyebabkan adanya arus urutan negatif yang mengalir pada stator dan menyebabkan ketidakseimbangan arus di tiap fasanya seperti yang ditunjukkan pada gambar (5).



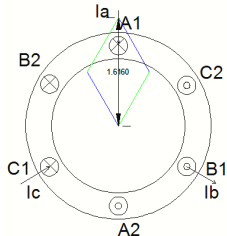
Gambar 5. Sumber arus tiga fasa tidak seimbang yang mengalir pada stator

Gambar di atas merupakan contoh arus tiga fasa tidak seimbang yang menyuplai motor induksi tiga fasa. Dari gambar arus stator tiga fasa tidak seimbang di atas dapat diketahui medan putar dibangkitkan saat t_0 , t_1 dan t_2 seperti pada gambar (6) berikut ini.



Gambar 6. Ilustrasi pembentukan medan putar pada stator

Untuk pembentukan medan putar pada stator saat kondisi seimbang saat t_0 adalah seperti pada gambar (7) berikut ini.



Gambar 7. Ilustrasi pembentukan medan putar pada stator kondisi seimbang saat t_0

Pada saat t_0 , pada fasa A tidak ada arus yang mengalir, pada fasa B mengalir arus negatif dan pada fasa C mengalir arus positif. Untuk kondisi saat t_0 , C1 dan B2 merupakan kutub utara sedangkan C2 dan B1 merupakan kutub selatan. Fluks fasa C (F_{SC}) meninggalkan kutub utara C1 memasuki kutub selatan pasangannya yaitu C2 dan fluks fasa B (F_{SB}) juga meninggalkan kutub utara B2 menuju kutub utara B1. Resultan keduanya

menghasilkan medan putar stator (F_S) yang akan memotong kumparan rotor. Medan putar stator saat tidak seimbang sebesar 1,0474 dan saat seimbang sebesar 1,616.

Dibandingkan dengan medan magnet pada keadaan seimbang, medan magnet yang dihasilkan saat t_0 yang sama pada kondisi suplai tidak seimbang relatif lebih kecil magnitudnya. Dari hasil fluks resultan atau medan putar stator saat t_0 terlihat terjadi sedikit pergeseran sudut fasa medan putar stator sebesar 20° searah jarum jam dari keadaan seimbang. Proses pembentukan medan putar stator pada saat t_0 ini digambarkan pada gambar (6)(a) di atas.

Mengikuti analisis yang sama dengan medan putar stator pada saat t_0 , medan putar stator yang dihasilkan saat t_1 dapat dilihat pada gambar (6)(b). Medan putar stator yang dihasilkan memiliki magnitud sebesar 1,616. Besar medan putar stator ini sama dengan medan putar stator yang dihasilkan saat suplai seimbang. Hal ini disebabkan tidak adanya arus fasa C yang mengalir saat t_1 . Hasil penggambaran medan putar stator pada saat t_1 , terjadi perubahan sudut fasa medan putar stator, namun hanya sekitar 40° searah jarum jam dari medan putar stator saat t_0 .

Sama seperti analisis saat t_0 , besar medan putar stator pada saat t_2 adalah 1,0474. Besar medan putar stator pada saat ini berkurang drastis dari kondisi sebelumnya, yaitu setingkat dengan besar medan putar stator saat t_0 dan medan putar stator kembali berputar dengan penambahan fasa 40° searah jarum jam dari medan putar stator saat t_1 . Hal ini ditunjukkan pada gambar (6)(c).

Dari penjelasan tersebut ketika motor dioperasikan pada sistem tidak

seimbang maka akan mengalir arus negatif yang menyebabkan ketidakseimbangan arus akan menyebabkan besar dari medan putar stator putar tidak sama untuk setiap waktu dan putarannya pun tidak konstan. Hal tersebut akan mempengaruhi torsi dan kecepatan putaran yang dihasilkan. Adanya ketidakseimbangan arus juga dapat memberikan kontribusi panas pada kumparan motor dan meningkatkan rugi-rugi kumparan dan akhirnya akan menurunkan efisiensi motor.

Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Besarnya persentase ketidakseimbangan tegangan menurut standar NEMA MG-1 2003 pada saat *unbalance under voltage* (UBUV) masing-masing 1,103% dan 0,223%. Pada saat *unbalance over voltage* (UBOV) masing-masing 1,026% dan 0,293%. Besarnya persentase ketidakseimbangan pada kondisi UBUV dan UBOV masing-masing sebesar 1,103% dan 1,026% akan menyebabkan motor tidak dapat dioperasikan secara normal pada kapasitas ratingnya.
2. Besarnya persentase ketidakseimbangan tegangan yang terjadi dapat menimbulkan ketidakseimbangan arus yang berlipat-lipat. Pada motor induksi tiga fasa 0,5 HP saat kondisi UBUV dengan persentase ketidakseimbangan 1,103% terjadi ketidakseimbangan arus 6,1%. Pada kondisi UBUV dengan persentase ketidakseimbangan 1,026% terjadi ketidakseimbangan arus 5,65%.
3. Besarnya ketidakseimbangan tegangan kondisi UBUV 1,103%

menyebabkan kenaikan rugi-rugi daya sebesar 6,22% dan penurunan efisiensi sebesar 3,19% dari keadaan normalnya. Sedangkan pada kondisi UBOV 1,026% menyebabkan kenaikan rugi-rugi daya sebesar 22,82% dan penurunan efisiensi sebesar 2,96% dari keadaan normalnya. Hal ini dikarenakan adanya panas pada kumparan akibat adanya ketidakseimbangan arus yang menyebabkan rugi-rugi kumparan meningkat akibatnya efisiensi menurun.

4. Terjadinya ketidakseimbangan tegangan menyebabkan besarnya torsi dan kecepatan putaran motor berubah-ubah. Pada kondisi UBUV 1,103% menyebabkan penurunan torsi dan kecepatan putaran motor masing-masing sebesar 7,53% dan 0,386% dari kondisi normalnya. Penurunan ini dikarenakan pengaruh adanya komponen urutan negatif yang mengakibatkan besar medan putar stator yang dihasilkan tidak sama tiap waktunya dan putarannya tidak konstan. Pada kondisi UBOV 1,026% menyebabkan kenaikan torsi dan kecepatan putaran motor masing-masing sebesar 8,01% dan 0,165% dari kondisi normalnya. Pengaruh ini dikarenakan adanya keadaan *over voltage*.

Daftar pustaka

- Efendi. 2008. *Pengujian Alat Proteksi Motor Induksi Tiga Fasa Akibat Ketidakseimbangan Tegangan Sumber*. Padang : Politeknik Negeri Padang.
- Gosbell, V.J. 2002. *Voltage Unbalance, Technical Note No. 6*. Australia : Integral Energy Power Quality Centre.
- Kusuma, Rafli Yanuar Ardian. 2011. *Analisis dan Mitigasi Pengaruh*

Suplai Sistem Tegangan Tiga Fasa Tidak Seimbang Terhadap Torsi Motor Induksi Tiga Fasa pada saat Steady State. Purbalingga : Universitas Jenderal Soedirman.

Rosslyn, VA. 2004. *NEMA Standards Publication ANSI/NEMA MG 1-2003, Revision 1-2004.* http://www.4shared.com/office/JG-oGF8T/ANSI-NEMA_MG_1-2003_Revision_1.html, diakses pukul 08.40 WIB tanggal 11 Januari 2012.

Sandhu, Kanwarjit Singh, Chaudari, Vinet. 2008. *Simulations of Three- Phase Induction Motor Operating with Voltage Unbalance.* India : Institute of Technology Kurukshetra.