

Identifikasi Dampak Gangguan Harmonisa dan Ketidak Seimbangan Magnitude Tegangan Serta Sudut Phasa Pada Performa Motor Induksi

Purwoharjono

Staf Pengajar, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik
Universitas Tanjungpura Pontianak
e-mail: purwoharjono@gmail.com

Abstract– The quality of supply system is found to be very effective in deteriorating the performance of three phase induction motors, a class of electrical machines which is widely used in industrial power systems. This paper presents an attempt to identify the impacts of harmonics and unbalance on induction motor performance. The presence of voltage magnitude and/or phase angle unbalance in the supply system is considered as well as harmonics distortion. Computer simulations of a VFD fed induction motor under different quality conditions of supply system are implemented using Powersim (PSIM). Six scenarios of harmonics contained supply system are tested, i.e. scenario 1 : balanced voltage magnitude, balanced phase angle and balanced transformer; scenario 2 : balanced voltage magnitude, balanced phase angle and unbalanced transformer; scenario 3 : unbalanced voltage magnitude, balanced phase angle and balanced transformer; scenario 4 : unbalanced voltage magnitude, balanced phase angle and unbalanced transformer; scenario 5 : balanced voltage magnitude, unbalanced phase angle and balanced transformer, and scenario 6 : balanced voltage magnitude, unbalanced phase angle and unbalanced transformer. The test results indicate that the quality of supply system has significant impacts on the speed and mechanical torque of three phase induction motor operating with harmonics contained and unbalanced supply system.

Keywords– harmonics, unbalance, voltage magnitude, phase angle, induction motor.

1. Pendahuluan

Masalah kualitas daya listrik pada sistem kelistrikan industri merupakan hal yang penting untuk diketahui. Sebab pada sebuah industri, masalah kualitas daya listrik ini memegang peranan penting dalam menentukan keberadaan industri.

Motor listrik merupakan tenaga penggerak yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik dan sering kali digunakan oleh industri dalam mendukung kelancaran kegiatan produksi. Motor listrik yang sering digunakan oleh industri diantaranya adalah motor induksi, karena motor induksi lebih ekonomis dan handal dalam pengoperasiannya meskipun ditinjau dari aspek pengendaliannya relatif lebih kompleks. Disamping itu, pemeliharaan motor induksi juga relatif lebih mudah. [1], [4].

Industri memerlukan daya listrik yang kontinu, besar dan dalam proses produksinya, industri banyak menggunakan peralatan-peralatan elektronik yang sensitif terhadap gangguan yang ada. Sehingga dalam

mendukung kegiatan dalam proses produksi industri tersebut memerlukan suplay daya listrik yang besar dan kualitas daya listrik yang baik untuk mengoperasikan semua peralatan yang ada [1], [2].

Dalam pemakaiannya, motor harus mendapatkan tegangan yang konstan atau seimbang, bila tegangan listrik tidak seimbang, maka akan menimbulkan dampak merugikan terhadap berbagai peralatan kelistrikan, salah satunya yaitu motor induksi. [1], [2].

Masalah ketidakseimbangan tegangan merupakan masalah yang sering terjadi pada industri. Seringkali hal ini terjadi disebabkan oleh pembagian beban satu fasa yang tak seimbang. Adanya ketidakseimbangan tegangan ini menyebabkan berbagai permasalahan, diantaranya pada industri dapat menyebabkan overheating pada motor induksi yang menyebabkan sistim pengaman bekerja berakibat pada kerugian produksi.[5], [6], [7].

Disamping itu masalah yang sering muncul pada industri adalah masalah harmonisa. Harmonisa adalah pembentukan gelombang non-sinusoidal dengan frekuensi yang merupakan perkalian bilangan bulat dari frekuensi dasarnya. Gelombang harmonisa kemudian menumpang pada gelombang sinusoidal murni sehingga terbentuk gelombang cacat [5], [6], [7].

Dalam riset ini akan dilakukan suatu investigasi atau pengamatan terhadap performa motor induksi untuk mengetahui identifikasi dampak-dampak dari ketidakseimbangan yang disebabkan oleh magnitude tegangan yang tidak seimbang dan sudut phasa yang tidak seimbang.

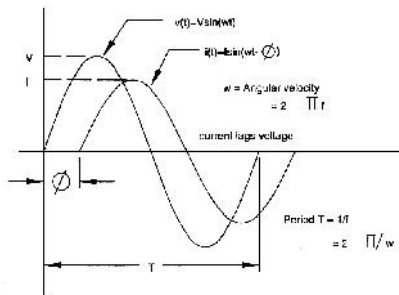
2. Harmonisa

Dalam sistem tenaga listrik yang ideal, bentuk gelombang tegangan yang disalurkan ke peralatan konsumen dan bentuk gelombang arus yang dihasilkan adalah gelombang sinus murni.

Harmonisa adalah suatu fenomena yang terjadi akibat dioperasikannya beban listrik non-linier di mana terbentuk gelombang pada frekuensi-frekuensi tinggi (merupakan kelipatan dari frekuensi fundamentalnya 50 Hz, seperti 100 Hz, 150 Hz, 200 Hz, 250 Hz, 300 Hz, dan seterusnya) yang dapat mengganggu arus dan tegangan pada sistem jaringan listrik di frekuensi fundamentalnya 50 Hz, sehingga bentuk gelombang arus dan tegangan yang idealnya adalah sinusoidal murni

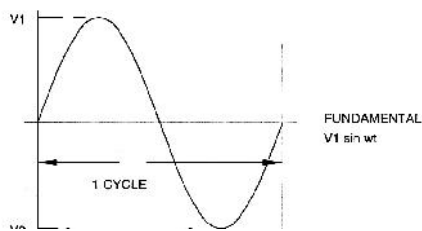
akan menjadi cacat akibat distorsi harmonisa yang terjadi.

Harmonisa bisa muncul akibat adanya beban – beban non linier yang terhubung ke sistem distribusi. Beban non linier ini umumnya adalah peralatan elektronik yang di dalamnya banyak terdapat komponen semi konduktor, yang dalam proses kerjanya berlaku sebagai saklar yang bekerja pada setiap siklus gelombang dari sumber tegangan. Beberapa contoh beban non linier antara lain : *variable speed drive*, komputer, printer, lampu *fluorescent* yang menggunakan elektronik ballast.

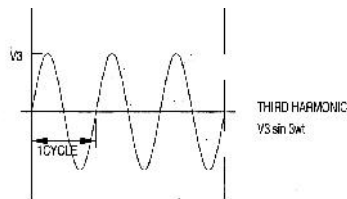


Gambar 1. Gelombang Sinus Arus dan Tegangan

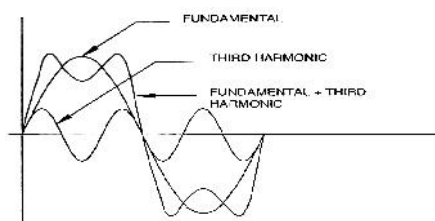
Gelombang nonsinusoidal ini dapat terbentuk dengan cara menjumlahkan gelombang-gelombang sinusoidal, seperti terlihat pada gambar 2.



Gambar 2. Gelombang Fundamental



Gambar 3. Gelombang Harmonik Ketiga



Gambar 4. Gelombang Hasil Penjumlahannya
Individual Harmonic Distortion (IHD) adalah rasio antara nilai RMS dari harmonisa individual dan nilai RMS dari fundamental.

$$IHD = \sqrt{\left(\frac{I_{sh}}{I_{s1}}\right)^2} \times 100\% \quad (1)$$

Dimana :

IHD = Individual Harmonisa Distortion (%)

I_{sh} = Arus harmonisa pada orde ke-h (A)

I_{s1} = Arus fundamental (Irms) dalam A

Total Harmonic Distortion (THD) adalah rasio antara nilai RMS dari komponen harmonisa dan nilai RMS dari fundamental. Hubungan antara THD dengan IHD dapat dilihat dari persamaan berikut : [5], [6], [7].

$$THD = \sqrt{\sum_{h \neq 1} \left(\frac{I_{sh}}{I_{s1}}\right)^2} \times 100\% \quad (2)$$

Dimana :

THD = Total Harmonisa Distortion (%)

I_{sh} = Arus harmonisa pada orde ke-h (A)

I_{s1} = Arus fundamental (Irms) dalam A

Pengaruh harmonisa total untuk tegangan dapat dihitung, dengan mengganti notasi I menjadi V. Hasil perhitungan sebaiknya tidak melebihi atau sama dengan nilai yang ditetapkan oleh standar yang berlaku. Bila hasilnya lebih maka tingkat harmonisa sistem membahayakan komponen - komponen sistem dan sebaiknya harus dipikirkan cara mengurangnya. Ada dua kriteria yang digunakan dalam analisa distorsi harmonisa, limitasi untuk distorsi arus harmonisa dan limitasi untuk distorsi tegangan harmonisa. Standar yang dipakai untuk limitasi tegangan harmonisa adalah IEEE 519. Untuk standard harmonisa arus, ditentukan oleh rasio I_{sc}/I_L (arus hubung singkat dibagi dengan arus beban) seperti Tabel 1.

Tabel 1. Standard Harmonisa Arus

I_{sc}/I_{Load}	Harmonic Order					THD
	<11	11-16	17-22	23-24	>35	
<20	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

dimana:

I_{sc} = arus hubung singkat pada PCC (*Point of Common Coupling*)

I_{load} = arus beban fundamental nominal

THD = Total Harmonic Distortion dalam %

ISC adalah arus hubung singkat yang ada pada PCC (*Point of Common Coupling*) (Dugan, 2003: 6), IL adalah arus beban fundamental nominal. Sedangkan untuk standard harmonisa tegangan ditentukan oleh tegangan sistem yang dipakai seperti Tabel 2.

Tabel 2. Standard Harmonisa Tegangan

Maximum Distortion (in %)	System Voltage		
	Below 69 kV	69 138 kV	> 138 kV
Individual Harmonic	3.0	1.5	1.0
Total Harmonic	5.0	2.5	1.5

3. Ketidakseimbangan

3.1 Ketidakseimbangan Tegangan

Masalah ketidakseimbangan tegangan ini merupakan masalah yang sering terjadi pada jaringan tingkat distribusi sistem tenaga listrik. Seringkali hal ini terjadi disebabkan oleh pembagian beban satu fasa yang tak seimbang. Adanya ketidakseimbangan tegangan ini menyebabkan berbagai permasalahan diantaranya adalah pada industri dapat menyebabkan *overheating* pada motor induksi yang menyebabkan sistem pengaman bekerja berakibat pada kerugian produksi.

Tegangan sistem dapat menjadi tidak seimbang disebabkan oleh beberapa alasan. Pengertian ketidakseimbangan mencakup besar tegangan yang tidak seimbang pada sistem frekuensi dasar (*under-voltage* dan *over-voltage*), besar sudut deviasi fasa dasar, dan level harmonisa yang tidak seimbang antar fasa. Penyebab terbesar dari tegangan tidak seimbang adalah pembagian distribusi beban satu fasa yang tidak seimbang, yang jika berkelanjutan dapat mempengaruhi sistem distribusi tiga fasa. Hal lain yang timbul akibat sistem distribusi dengan tegangan tak seimbang adalah impedansi lilitan trafo yang tidak simetris, transformer bank open wye dan open delta, fuse terbakar pada kapasitor bank tiga fasa, dan impedansi transmisi yang tidak simetris yang mungkin disebabkan oleh *transposition* yang tidak lengkap dari jaringan transmisi. Pada *user facility*, ketidakseimbangan tegangan dapat disebabkan oleh peralatan yang tidak seimbang dan *overloaded* dan juga koneksi dengan impedansi tinggi (contohnya kontak yang buruk atau longgar). Untuk mengatasi masalah ketidakseimbangan ini cukup sulit mengingat ketidakseimbangan berubah-ubah berdasarkan perubahan beban.

3.2 Ketidak seimbangan Tegangan pada Transformator

Ketidakseimbangan dari tegangan transformator primer menghasilkan ketidakseimbangan dari tegangan-tegangan sekunder dan penambahan rugi-rugi daya tanpa beban. Transformator modern dikonstruksi sebagai piranti tiga fasa simetris. sehingga, ketidakseimbangan arus dari beban-beban tak seimbang dan tegangan-tegangan tidak seimbang akan mempengaruhi transformator. Dampak negatif dari ketidakseimbangan tegangan dan arus tergantung pada konfigurasi transformator; sehingga, harus diberikan perhatian secara lebih detail pada susunan lilitan transformator.

3.3 Ketidakseimbangan Tegangan pada Motor Induksi

Dampak terbesar dari tegangan tak seimbang adalah pada motor induksi tiga fasa. Motor induksi tiga fasa adalah salah satu dari beban yang umum terdapat pada jaringan dan memiliki jumlah yang banyak terutama pada lingkungan industri. Pada saat motor induksi tiga fasa disuplai oleh suatu sistem tak seimbang, arus yang dihasilkan menunjukkan tingkat ketidakseimbangan sampai beberapa kali lipat dibandingkan ketidakseimbangan tegangan. Hal ini dapat dijelaskan dengan mengacu pada dua medan putar saling berlawanan yang terjadi jika motor dihubungkan dengan tegangan tak seimbang. Dalam kaitan dengan susunan tegangan-tegangan urutan positif, jika slip motor:

$$s_1 = \frac{N_s - N_r}{N_s} \quad (3)$$

Dimana :

N_s = Kecepatan sinkron

N_r = Kecepatan rotor

slip yang terjadi akibat tegangan urutan negatif adalah:

$$s_2 = \frac{-N_s - N_r}{-N_s}$$

Jika slip s_2 diekspresikan pada slip s_1 , maka:

$$s_2 = \frac{-N_s - N_r}{-N_s} = (2 - s_1) \quad (4)$$

Jika slip urutan positif s_1 sangat kecil (mendekati nol), slip urutan negatif s_2 menjadi sangat besar (mendekati 2). Dari teori dasar motor induksi, impedansi dari motor induksi sangat tergantung pada slip dimana untuk slip yang tinggi (misalnya pada saat start atau kondisi motor terkunci) nilainya kecil dan sebaliknya jika slipnya rendah nilainya sangat besar. Sehingga secara pendekatan dapat dinyatakan [3] bahwa perbandingan antar impedansi urutan positif dan urutan negatif adalah:

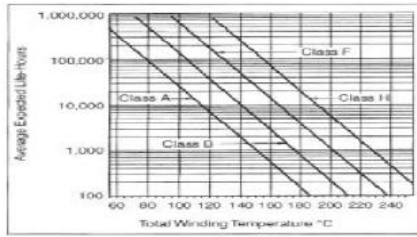
$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{I_{start}}{I_{running}} \quad (5)$$

Dengan diketahuinya arus urutan positif $I_1 = \frac{V_1}{Z_1}$ dan

arus urutan negatif $I_2 = \frac{V_2}{Z_2}$ didapatkan:

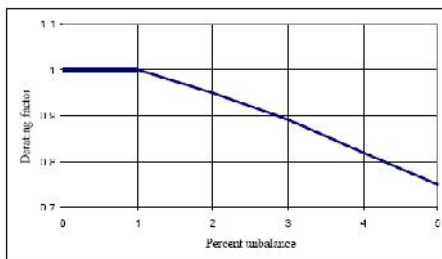
$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{V_2}{V_1} \times \frac{I_{start}}{I_{running}}$$

Jika motor terbeban penuh, beberapa lilitan fasa stator dan rotor akan membawa arus lebih dari yang diijinkan yang menyebabkan kerugian motor ekstra. Hal ini akan menyebabkan penurunan efisiensi motor dan juga mengurangi usia dari isolasi disebabkan panas berlebihan. Penting untuk dicatat bahwa perkiraan usia rata-rata dari isolasi turun setengahnya untuk tiap 100 C seperti ditunjukkan pada gambar 5.



Gambar 5. Variasi usia isolasi dengan temperatur

Menyadari bahwa ketidakseimbangan tegangan menyebabkan kerugian ekstra, dalam rangka menjaga motor kelebihan beban NEMA telah menemukan derating curve [2] seperti yang terlihat pada gambar 6. Kurva ini mengasumsikan bahwa motor telah mengirimkan beban yang telah ditetapkan. Mengacu pada kurva ini, dibutuhkan bahwa tiap motor harus dibuat untuk mengatasi 1% ketidakseimbangan dan sesudah itu harus dirating bergantung pada tingkat ketidakseimbangan.



Gambar 6. NEMA induction motor derating curve

Meskipun kurva pada gambar 6 tampaknya dapat dipakai secara universal, studi akhir-akhir ini menunjukkan bahwa tingkat dari derating dapat digunakan pada suatu motor tergantung pada ukurannya atau desainnya.

4. Hasil dan Pembahasan

4.1. Parameter yang digunakan

Parameter transformator delta-why yang seimbang digunakan dalam pengamatan ini adalah sebagai berikut :

No	Parameter TF_3DY1	Nilai
1	Rp (primary)	0.001
2	Rs (secondary)	0.001
3	Lp (pri. Leakage)	1E-005
4	Ls (sec. leakage)	1E-005
5	Lm (magnetizing)	0.5

Parameter transformator delta-why yang tidak seimbang digunakan dalam pengamatan ini adalah sebagai berikut :

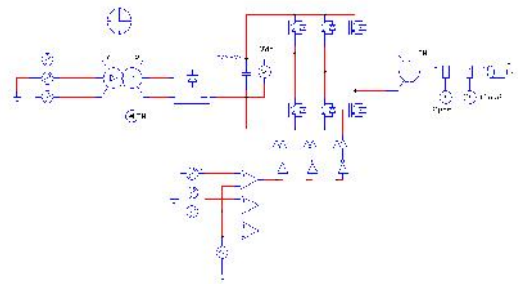
No	Parameter TF_3DY1	Nilai
1	Rp (primary)	0.001
2	Rs (secondary)	0.0001
3	Lp (pri. Leakage)	1E-005
4	Ls (sec. leakage)	1E-006
5	Lm (magnetizing)	0.5

Parameter motor induksi yang digunakan dalam pengamatan ini adalah sebagai berikut :

No	Parameter IM	Nilai
1	Rs (stator)	0.294
2	Ls (stator)	0.00139
3	Rr (rotor)	0.156
4	Lr (rotor)	0.00074
5	Lm (magnetizing)	0.041
6	No. Of Poles P	6
7	Moment of Inertia	0.4

4.2. Pengujian dan Analisis

Pengujian yang dilakukan menggunakan rangkaian model simulasi seperti pada gambar 7.

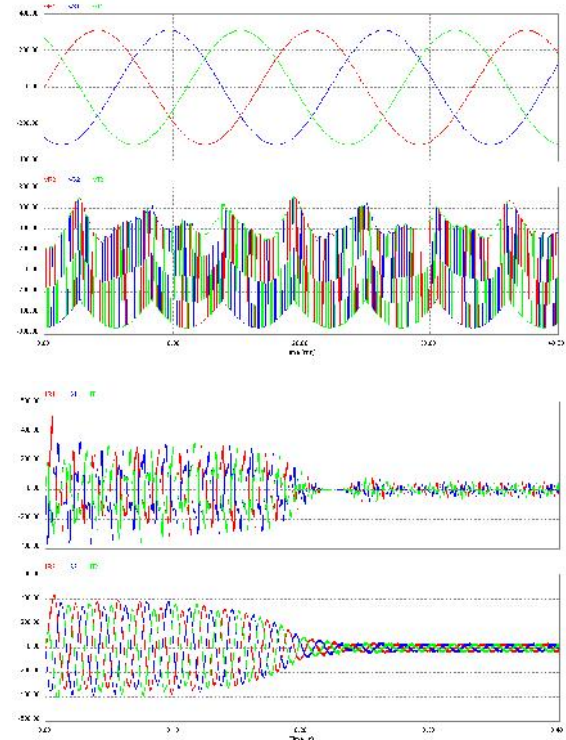


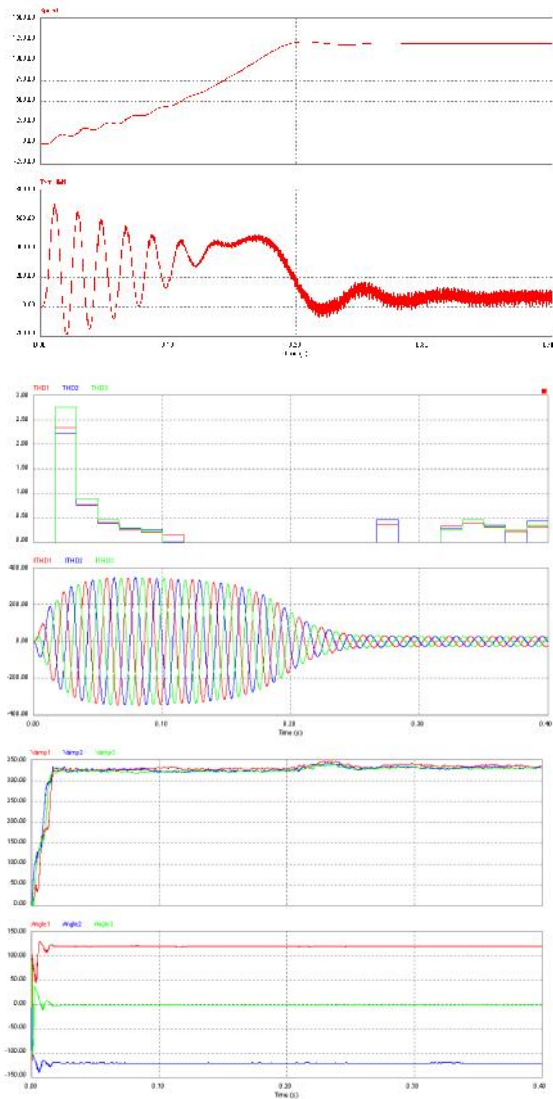
Gambar 7. Rangkaian model simulasi

Pengujian dilakukan pada 6 model simulasi, meliputi sebagai berikut :

- Model Simulasi-1

Model simulasi-1 ini di skenarioikan menggunakan simulasi magnitudo tegangan seimbang, sudut fasa seimbang dan transformator seimbang pada beban motor. Hasil keluaran gelombang dari rangkaian model simulasi-1 ini seperti pada gambar 8.



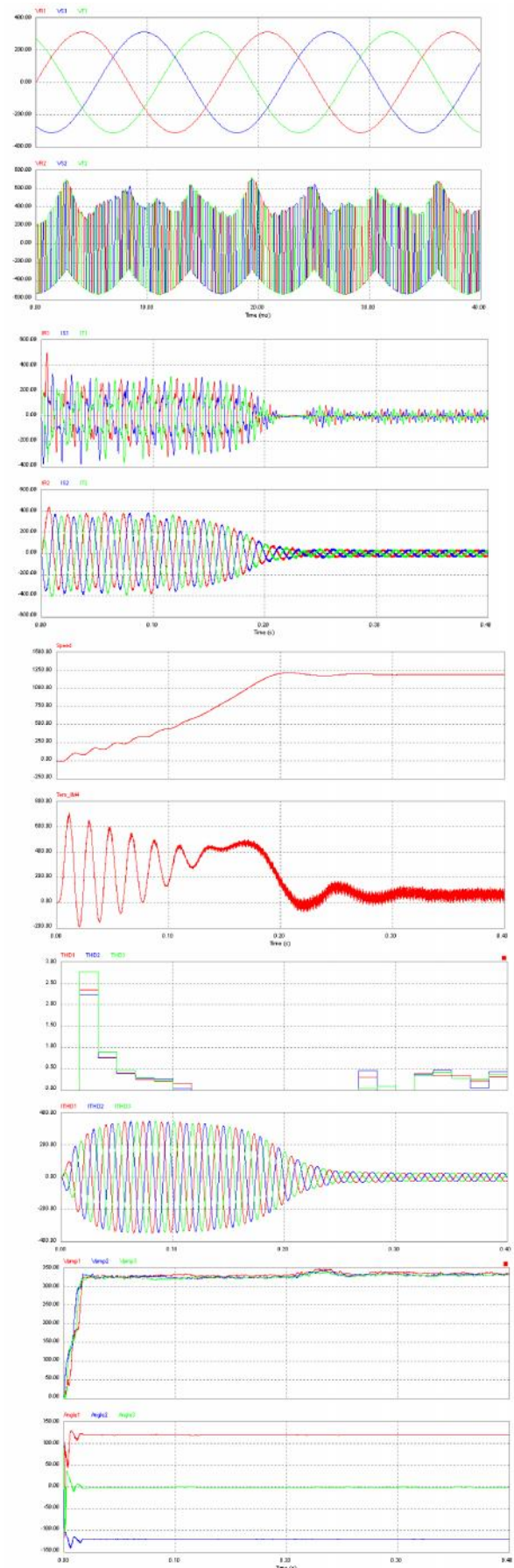


Gambar 8. Bentuk gelombang keluaran dari simulasi-1

Pada gambar 8 ini terlihat bahwa bentuk gelombang tegangan pada sisi input baik dan arus pada sisi input terjadi osilasi. Sedangkan tegangan pada sisi outputnya terjadi osilasi dan arus pada sisi outputnya baik. Kecepatan motor induksinya cenderung meningkat sampai pada kondisi tertentu kecepatannya konstan, sebaliknya dengan torsi mekanik beban cenderung menurun sampai pada kondisi tertentu kecepatannya konstan. Pada kondisi performa kecepatan motor dan torsi mekaniknya ideal untuk operasi motor induksi.

- Model Simulasi-2

Model simulasi-2 ini di skenarioikan menggunakan simulasi magnitude tegangan seimbang, sudut fasa seimbang dan transformator tidak seimbang pada beban motor. Hasil keluaran dari rangkaian model simulasi-2 ini seperti pada gambar 9.

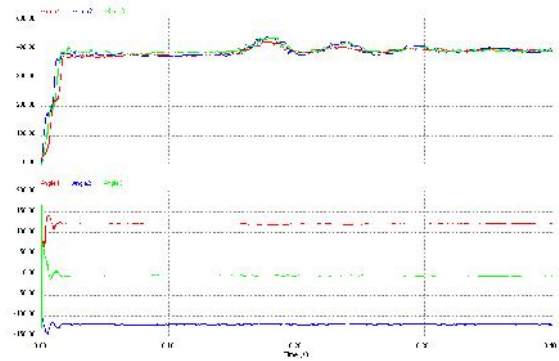
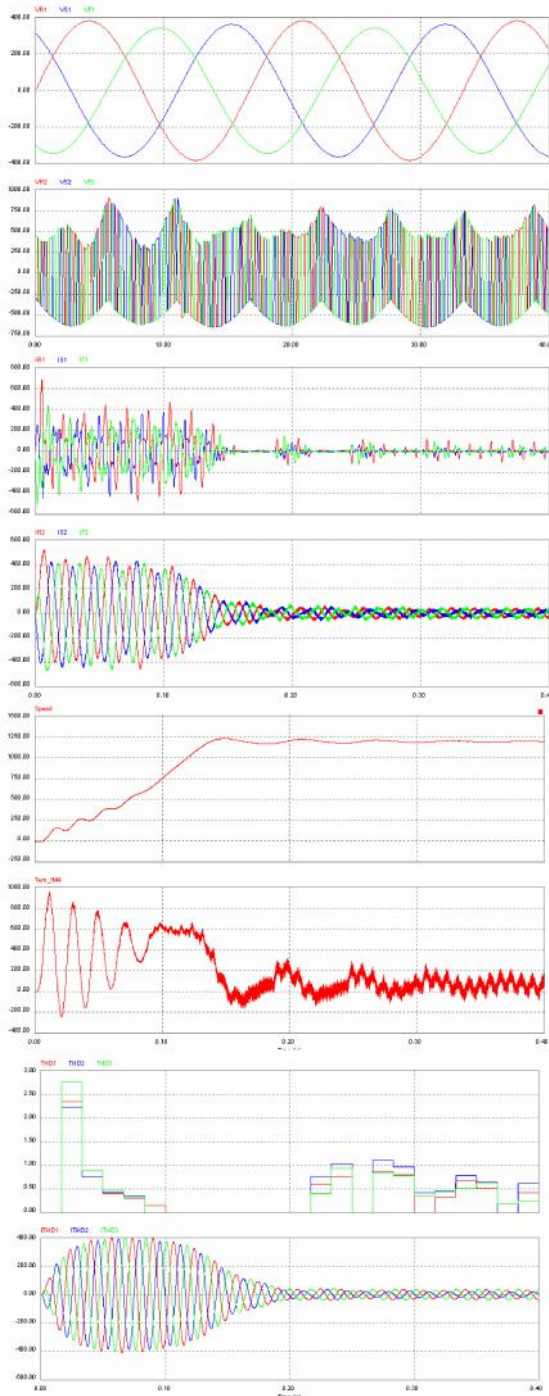


Gambar 9. Bentuk gelombang keluaran dari simulasi-2

Pada gambar 9 ini terlihat bahwa bentuk gelombang tegangan pada sisi input baik dan arus pada sisi input terjadi osilasi. Sedangkan tegangan pada sisi outputnya terjadi osilasi dan arus pada sisi outputnya baik. Kecepatan motor induksinya cenderung meningkat sampai pada kondisi tertentu kecepatannya konstan, sebaliknya dengan torsi mekanik beban cenderung menurun sampai pada kondisi tertentu kecepatannya konstan. Pada kondisi performa kecepatan motor dan torsi mekaniknya ideal untuk operasi motor induksi.

- Model Simulasi-3

Model simulasi-3 ini di skenario menggunakan simulasi magnitude tegangan tidak seimbang, sudut phasa seimbang dan transformator seimbang pada beban motor. Hasil keluaran dari rangkaian model simulasi-3 ini seperti pada gambar 10.

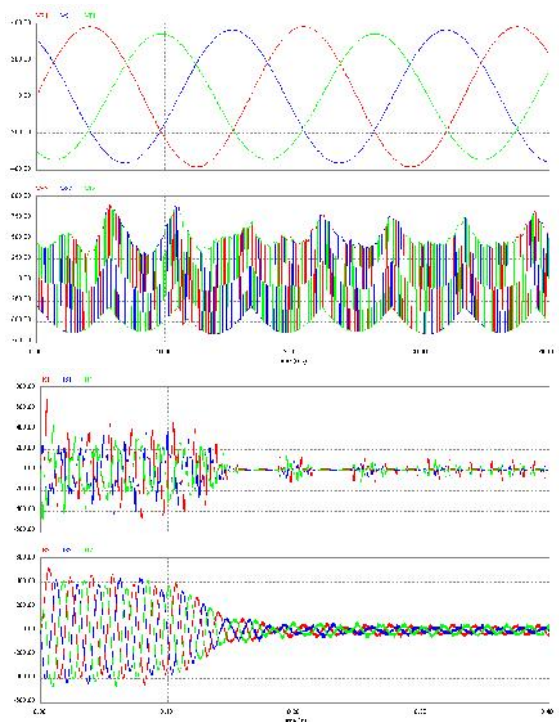


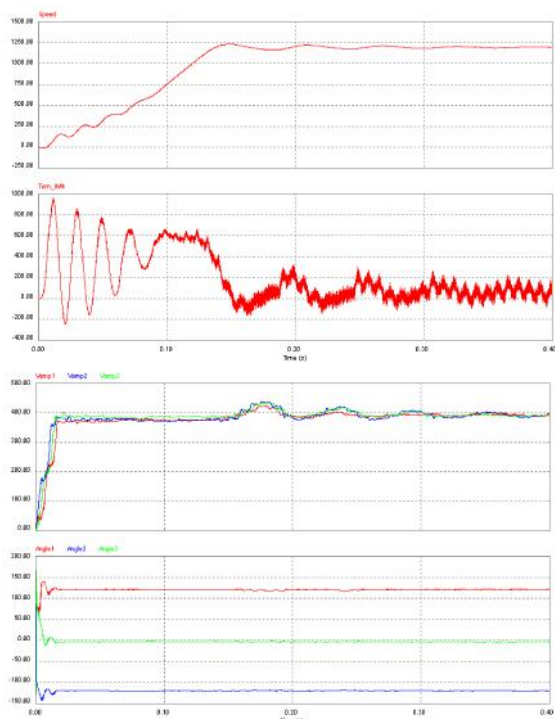
Gambar 10. Bentuk gelombang keluaran dari simulasi-3

Pada gambar 10 ini terlihat bahwa bentuk gelombang tegangan pada sisi input baik dan arus pada sisi input terjadi osilasi. Sedangkan tegangan pada sisi outputnya terjadi osilasi dan arus pada sisi outputnya baik. Kecepatan motor induksinya cenderung meningkat sampai pada kondisi tertentu kecepatannya konstan, sebaliknya dengan torsi mekanik beban cenderung menurun sampai pada kondisi tertentu kecepatannya konstan, namun pada kondisi ini terjadi osilasi lebih besar dari simulasi-2. Pada kondisi performa kecepatan motor ideal, namun torsi mekaniknya tidak baik untuk operasi motor induksi. Jika kondisi ini berlangsung dalam waktu yang relatif lama, maka motor tidak dapat lagi dioperasikan pada kapasitas normalnya, apalagi untuk pengoperasian motor-motor yang terus menerus (kontinue) sehingga pada akhirnya efisiensi motor akan berkurang dan menyebabkan keandalan dari motor induksi ini juga akan turun.

- Model Simulasi-4

Model simulasi-4 ini di skenario menggunakan simulasi magnitude tegangan tidak seimbang, sudut phasa seimbang dan transformator tidak seimbang pada beban motor. Hasil keluaran dari rangkaian model simulasi-4 ini seperti pada gambar 11.





Gambar 11. Bentuk gelombang keluaran dari simulasi-4

Pada gambar 11 ini terlihat bahwa bentuk gelombang tegangan pada sisi input baik dan arus pada sisi input terjadi osilasi. Sedangkan tegangan pada sisi outputnya terjadi osilasi dan arus pada sisi outputnya baik. Kecepatan motor induksinya cenderung meningkat sampai pada kondisi tertentu kecepatannya konstan, sebaliknya dengan torsi mekanik beban cenderung menurun sampai pada kondisi tertentu kecepatannya konstan, namun pada kondisi ini terjadi osilasi lebih besar dari simulasi-3. Pada kondisi performa kecepatan motor ideal, namun torsi mekaniknya tidak baik untuk operasi motor induksi. Jika kondisi ini berlangsung dalam waktu yang relatif lama, maka motor tidak dapat lagi dioperasikan pada kapasitas normalnya, apalagi untuk pengoperasian motor-motor yang terus menerus (kontinue) sehingga pada akhirnya efisiensi motor akan berkurang dan menyebabkan keandalan dari motor induksi ini juga akan turun.

5. Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini adalah keseimbangan dari magnitude tegangan sudut fasa dan transformator diperlukan dalam mendapatkan performa yang baik dari operasi motor induksi. Ketidakseimbangan dari magnitude tegangan ternyata berdampak tidak baik, yang dapat mempengaruhi performa tidak baik dari motor induksi. Ketidakseimbangan dari sudut fasa ternyata mempunyai dampak negatif yang paling besar dibandingkan dengan model simulasi yang lain terhadap performa motor induksi.

Referensi

- [1] Efendi, Pengujian alat proteksi Motor Induksi Tiga Fasa Terhadap Ketidakseimbangan Tegangan Sumber, Percikan : Vol. 91 Edisi Agustus 2008, ISBN : 0854-8986.
- [2] Sudaryatno Sudirham, Dr., Pengaruh Ketidakseimbangan Arus Terhadap Susut Daya pada Saluran, Bandung : ITB, Tim Pelaksana Kerjasama PLN-ITB, 1991.
- [3] Penangsang Ontoseno, Analisis dan Simulasi Peningkatan Kualitas Energi Listrik serta Pengaruhnya Terhadap Penghematan Pemakaian Energi Pada Komponen Utama Beban Industri Surabaya : Laporan Penelitian Maching Grant, Lembaga Penelitian ITS, 1997.
- [4] Istanto W. Djatmiko, Kustono, Performansi Parameter Motor Induksi Tiga Fasa dengan Sumber Tegangan dan Frekuensi Variabel, Jurnal Edukasi, Vol. 5 No. 1, Maret 2009.
- [5] W. Mielcczarski, G.J. Anders, M.F. Conlon, W.B. Lawrence, H. Khalsa, G. Michalik, Quality of Electricity Supply & Management of Network Losses, Puma Press, 1997.
- [6] Roger C. Dugan, Mark F. McGranaghan, H. Wayne Beaty, Electrical Power Systems Quality, McGraw Hill, 1996.
- [7] Wilson E. Kazibwe, Musoke H. Sendaula, Electric Power Quality Control Techniques, Van Nostrand Reinhold, 1993.

Biografi

Purwoharjono was born in Pontianak, Indonesia, on January 02, 1972. He received the B.Eng from University of Tanjungpura (Untan), Pontianak, Indonesia, 1997 and M.Eng from Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), Surabaya, Indonesia, 2001 and Dr.Eng from Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), Surabaya, Indonesia, 2014. Since 1998, He has been a Lecturer in the Department of the Electrical Engineering, University of Tanjungpura, and Indonesia. His current research interests include power system analysis, power system operation and control, power quality, computational intelligence application on power system and forecasting.

