

ANALISIS KARAKTERISTIK HARMONIK GANJIL MOTOR INDUKSI DENGAN MODEL DAN EKSPERIMEN

Dwici Saputra Nur Iman¹, Wawan Gunawan², Nurul Huluq³,

^{1,2,3}Program Studi Teknik Elektro – Fakultas Teknik – Universitas Pamulang
^{1,2,3}Jl.Raya Puspatek, Buaran, Ke. Pamulang, Kota Tangerang Selatan, Banten 15310

¹dwicisaputranuriman@gmail.com

²dosen00187@unpam.ac.id

³dosen00928@unpam.ac.id

INFORMASI ARTIKEL

diajukan : 01 Nov 2023
revisi : 08 Nov 2023
diterima : 15 Nov 2023
dipublish : 22 Nov 2023

ABSTRAK

Motor induksi tiga fasa dengan prinsip induksi elektromagnetik mengubah energi listrik menjadi energi mekanik sehingga memiliki sifat saturasi. Pada kondisi ini arus listrik yang dihasilkan tidak lagi sebanding dengan tegangan yang diberikan. Dalam analisis motor induksi dimodelkan dengan rangkaian ekuivalen. Dari model yang dibangun, ditentukan total harmonik distorsi ganjil untuk tegangan, arus, daya dan torsi. Hasil yang diperoleh dengan membandingkan gelombang sinus, simetris dan asimetris disetiap harmonik ganjil 1,3, 5 dan 7 terdapat perbedaan.

Kata kunci : Motor Induksi, Harmonik Daya, Harmonik Torsi.

ABSTRACT

Analysis of Odd Harmonic Characteristics of Induction Motor Through Model and Experimental. Three-phase induction motors, with the principle of electromagnetic induction, convert electrical energy into mechanical energy so that they have saturation properties. In this condition, the electric current produced is no longer proportional to the voltage applied. The equivalent circuit is a circuit made with functions to facilitate the analysis of electric motors. The circuit in an electric motor has two equivalent circuits, namely the stator equivalent circuit and the rotor equivalent circuit. Harmonics is a disturbance that occurs in the electrical power distribution system due to the distortion of current and voltage waves. Other effects of this harmonic are the emergence of day and harmonic torque, which, together with fundamental torque, produce vibrations and noise, which have a significant influence on the operation of three-phase induction motors.

Keywords : Induction Motor, Power Harmonics, Torque Harmonics

PENDAHULUAN

Motor listrik tiga fasa merupakan motor yang bekerja dengan perbedaan fasa pada sumber untuk menimbulkan putaran pada bagian rotor. Motor 3 fasa memiliki dua bagian pokok, yakni stator dan rotor bagian tersebut dipisahkan oleh celah udara yang sempit dan

biasa disebut dengan air gap. Jarak antara stator dan rotor yang terpisah oleh air gap memiliki jarak sekitar 0,4 – 4 mm.

Motor induksi tiga fasa adalah suatu mesin listrik yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik berupa putaran motor dengan prinsip – prinsip induksi elektromagnetik. Prinsip – prinsip induksi elektromagnetik ini membuat motor induksi mempunyai sifat saturasi atau kejenuhan, yaitu suatu keadaan di mana pada titik tertentu, arus listrik yang dihasilkan tidak sebanding dengan kenaikan tegangan yang diberikan pada motor, dan bahkan akan cenderung tetap. Karena sifat kejenuhan tersebut, motor induksi dikelompokkan ke dalam jenis beban tak linier (Abidin, 2015; Assaffat, 2010; Berlianti & Multi, 2016; Bukit, 2018) .

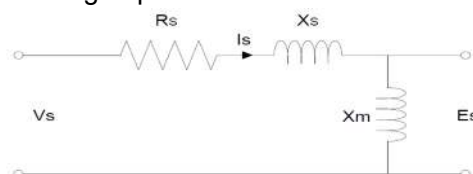
TEORI

Rangkaian ekivalen merupakan sebuah rangkaian yang dibuat dengan fungsi untuk mempermudah dalam melakukan analisa motor listrik. Rangkaian pada motor listrik memiliki dua rangkaian ekivalen yaitu rangkaian ekivalen stator dan rangkaian ekivalen rotor (Juhana & Rozak, 2022; Marzuki & Ramli, 2019)

. Beberapa variabel dalam rangkaian ekivalen stator sebagai berikut,

1. R_s merupakan tahanan stator
2. X_s merupakan reaktansi induktif
3. I_s merupakan arus pada stator
4. X_M merupakan raktansi magnetisasi
5. V_s merupakan tegangan pada stator

Rangkaian ekivalen stator dengan parameter di atas diberikan pada Gambar 1.

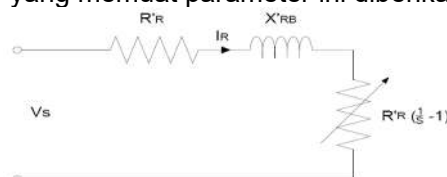


Gambar 1. Rangkaian ekivalen stator.

Untuk rangkaian ekivalen rotor variabelnya sebagai berikut,

1. R'_R merupakan rsistansi rotor
2. X'_{RB} merupakan raktansi rotor
3. I_R merupakan arus pada rotor
4. S merupakan slip

Rangkaian ekivalen rotor yang memuat parameter ini diberika pada Gambar 2.



Gambar 2. Rangkaian ekivalen rotor.

A. HARMONIK

Harmonik adalah gangguan yang terjadi pada sistem distribusi tenaga listrik akibat terjadinya distorsi gelombang arus dan tegangan (Sugiato, 2013; Sumarno & Bakhri, 2016).

Pada dasarnya, harmonik adalah gejala pembentukan gelombang-gelombang dengan frekuensi berbeda yang merupakan perkalian bilangan bulat dengan frekuensi dasarnya. Hal ini disebut frekuensi harmonik yang timbul pada bentuk gelombang aslinya sedangkan bilangan bulat pengali frekuensi dasar disebut angka urutan harmonik. Misalnya, frekuensi dasar suatu sistem tenaga listrik adalah 50 Hz, maka harmonik keduanya adalah gelombang dengan frekuensi sebesar 100 Hz, harmonik ketiga adalah gelombang dengan frekuensi sebesar 150 Hz dan seterusnya. Gelombang-ini kemudian menumpang pada gelombang murni/aslinya sehingga terbentuk gelombang cacat yang merupakan jumlah antara gelombang murni sesaat dengan gelombang harmoniknya. Polaritas dari komponen harmonik diberikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Polaritas Dari Komponen Harmonik

Harmonik	Frekuensi (Hz)	Urutan
1	50	+
2	100	-
3	150	+
4	200	-
5	250	+
6	300	-
7	350	+
8	400	-
9	450	+

B. INDEKS CACAT GELOMBANG

Indeks cacat gelombang merupakan metode untuk mengukur kandungan pada cacat gelombang. Indeks cacat gelombang dapat disajikan dalam bentuk persen, ada beberapa macam indeks pada pengukuran besaran cacat gelombang yaitu (Rohi, Utomo & Penangsang, 2009; Monteagudo, dkk, 2012):

- 1 *Total Harmonic Distortion* (THD)
- 2 *Total Harmonic Ratio* (THR)
- 3 *Total Demand Distortion* (TDD)

Total Harmonic Distortion (THD) merupakan metode pengukuran indeks cacat gelombang yang sering kali digunakan diberbagai macam Negara Asia maupun Amerika. Metode *Total Harmonic Ratio* (THR) merupakan metode pengukuran indeks cacat gelombang yang sering kali digunakan di Negara Eropa. Metode *Total Demand Distortion* (TDD) merupakan metode yang dikembangkan oleh IEEE dan hanya digunakan untuk pengukuran cacat arus dan untuk THD dan THR digunakan untuk pengukuran tegangan atau arus. *Total Harmonic Distortion* (THD) merupakan nilai prosentase antara total komponen harmonisa dengan komponen fundamentalnya. Semakin besar prosentase THD semakin besarnya resiko kerusakan pada peralatan akibat harmonisa yang terjadi pada arus maupun tegangan. Nilai THD yang diizinkan secara internasional maksimal yaitu 5% dari tegangan atau arus frekuensi fundamentalnya. Menghitung indeks THD memerlukan data harmonisa yang sesungguhnya pada komponen distorsi ataupun komponen yang dapat menyebabkan cacat gelombang.

Komponen fundamental merupakan komponen yang harus digunakan pada suatu tegangan dan arus.

Gelombang periodik yang mengandung harmonisa dinyatakan pada *Total Harmonic Distortion* tegangan

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \quad (1)$$

di mana :

V_n = Nilai tegangan harmonisa

V_1 = Nilai fundamental

n = Komponen harmonisa maksimum yang diamati

sedangkan arusnya dirumuskan dengan,

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (2)$$

di mana :

I_n = Nilai tegangan harmonisa

I_1 = Nilai fundamental

n = Komponen harmonisa maksimum yang diamati

C. GELOMBANG SINUS

Gelombang sinus memiliki fungsi mempertahankan bentuk ketika adanya penambahan kepada gelombang sinus berfrekuensi yang sama walaupun fasanya berbeda-beda maka dari itu gelombang sinus memiliki peran yang penting dalam bidang fisika. Gelombang ini merupakan satu satunya fungsi periodik yang memiliki sifat menjadikan gelombang bagian penting pada analisa fourier. Bentuk sederhana pada gelombang sinus sebagai fungsi waktu (t) dituliskan sebagai,

$$y(t) = A \cdot \sin(\omega t) \quad (3)$$

di mana :

A = Amplitudo

ω = Frekuensi sudut

D. GELOMBANG SIMETRIS DAN ASIMETRIS

Perencanaan gelombang simetris memiliki tujuan untuk mencari sebuah karakteristik dibidang geometri, persamaan dan objek lain, berikut adalah beberapa sifat sifat simetri sebagai berikut :

$$\begin{aligned} V_R &= \sin(\omega t) \\ V_S &= \sin(\omega t - 120^\circ) \\ V_T &= \sin(\omega t - 240^\circ) \end{aligned} \quad (4)$$

Tegangan asimetris adalah sebuah rasio dari suatu komponen urutan negatif, nol dan komponen urutan positif. Arus dan tegangan asimetris dalam suatu jaringan suplai listrik dapat dikarakteristikan dengan suatu indeks dengan cara analisa kuantitatif asimetris serta awal dalam rekomendasi dan dengan standar hingga ambang batas tingkat asimetris.

$$\begin{aligned}V_R &= \sqrt{2} \frac{A_1}{2} \sin(\omega t) \\V_S &= \sqrt{2} \frac{A_1}{2} \sin(\omega t - 120^\circ) \\V_T &= \sqrt{2} \frac{A_1}{2} \sin(\omega t - 240^\circ)\end{aligned}\tag{5}$$

E. DAYA DAN TORSI

Daya adalah kecepatan melakukan kerja. Daya sama dengan jumlah energi yang dihabiskan per satuan waktu. Dalam sistem SI (Satuan Internasional), satuan daya adalah joule per detik (J/s), atau W (watt).

$$\begin{aligned}Pg &= 3 \cdot I_1^2 \cdot rf \\Pdes &= (1 - s) \cdot Pg \\Mdes &= \frac{Pg}{ws}\end{aligned}\tag{6}$$

Torsi yaitu puntir yang terjadi pada batang lurus apabila batang tersebut dibebani momen yang menghasilkan rotasi terhadap sumbu longitudinal batang tersebut.

$$T_{eh} = \frac{1}{w_{sh} \left(R_{sTH} + \frac{R'_{r}}{s_h} \right)^2 + (h\omega_1)^2 (L_{sITH} + L'_{rI})^2} q_1 v_{shTH}^2 \frac{R'_{r}}{s_h}\tag{7}$$

di mana :

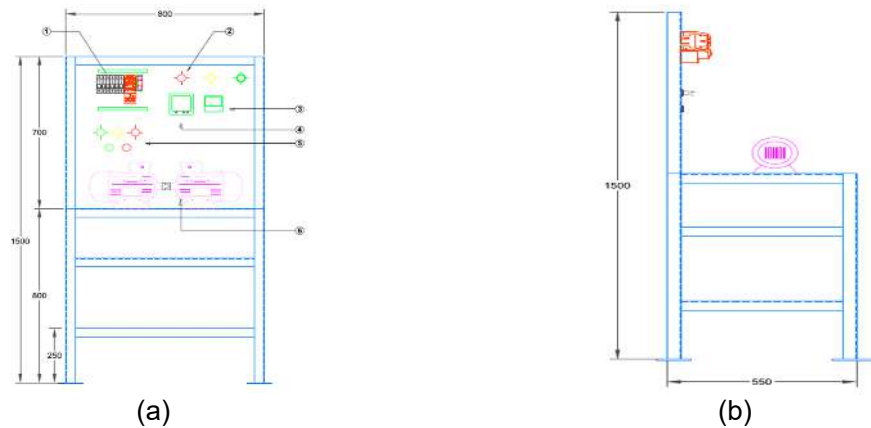
q = jumlah fasa

h = urutan harmonik

ω_1 = kecepatan sudut elektrik ($\omega_1 = 2\pi f_1$)

METODOLOGI

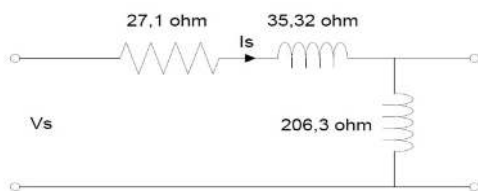
Dalam proses penelitian ini dilakukan beberapa kegiatan yaitu menganalisa motor listrik induksi, membuat perbandingan dengan gelombang sinus baik simetris, dan asimetris, kemudian mensimulasikan setiap gelombang harmonik menggunakan aplikasi *spreadsheet*. Layout dari pemodelan motor induksi untuk pengukuran harmonik beserta dimensinya diberikan pada Gambar 3. Komponen yang digunakan seperti motor listrik tiga fasa, kontrol motor, *power quality analyzer*, ampere meter, volt meter, cos phi meter dan *slide regulator*. Pengukuran dilakukan terhap tegangan dan arus baik dengan dan tanpa beban. Kemudian simulasi gelombang sinus harmonik dengan gelombang simetris dan asimetris. Selanjutnya dibandingkan juga untuk parameter tegangan, arus, daya dan torsi.



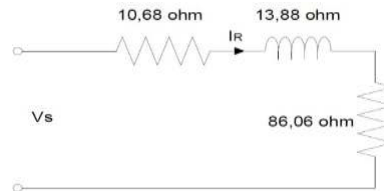
Gambar 3. Modela rangkaian simulasi pengukuran harmonik pada motor induksi. (a) tampak depan, dan (b) tampak samping.

HASIL DAN PEMBAHASAN

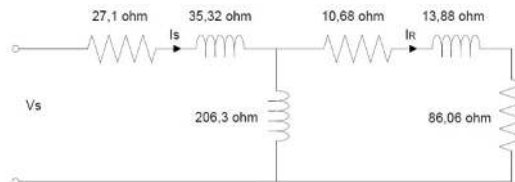
Rangkaian ekivalen memiliki tujuan untuk mempermudah dalam melakukan analisa motor listrik, Rotor belitan pada motor listrik asinkron dengan konstruksi rotor sangkar, dan rotor motor asinkron dibuat dengan alur-alur untuk meletakkan belitan yang sama dengan belitan stator maka mempunyai mesin asinkron pada belitan rotor. Terminal belitan rotor dapat dihubungkan dengan cincin geser dan dan melalui cincin geser dapat dihubungkan dengan resistor untuk keperluan perputaran motor. Nilai komponen yang diperoleh dari pengujian untuk rangkaian ekivalen stator diberikan pada Gambar 4 dan untuk rangkaian ekivalen rotor diberikan pada Gambar 5. Rangkaian ekivalen motor induksi diperoleh dengan menggabungkan rangkaian ekivalen stator dan rotor, yang diberikan pada Gambar 6.



Gambar 4. Rangkaian ekivalen stator beserta nilai komponennya.

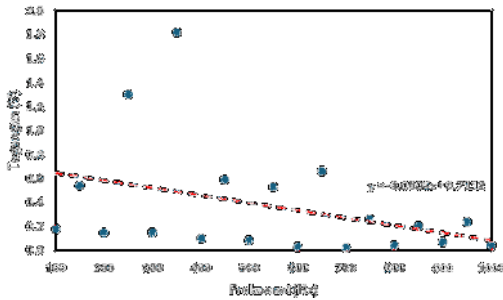


Gambar 5. Rangkaian ekivalen rotor beserta nilai komponennya

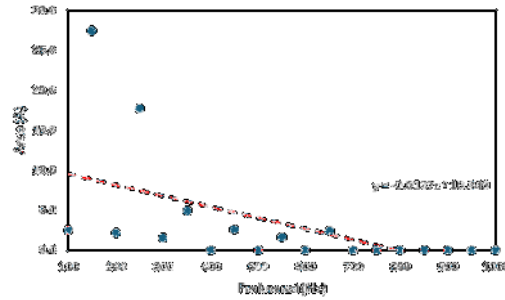


Gambar 6. Rangkaian ekivalen motor induksi beserta nilai komponennya.

Dari rangkaian ini diperoleh pengujian tegangan untuk total distorsi harmonik tanpa beban menggunakan *power quality analyzer* diberikan pada Gambar 7. Dengan alat sama diperoleh juga arusnya diberikan pada Gambar 8.

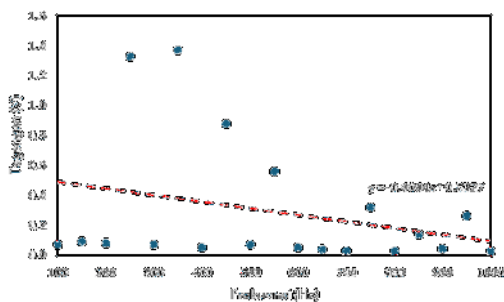


Gambar 7. Pengujian tegangan untuk total distorsi harmonik tanpa beban.

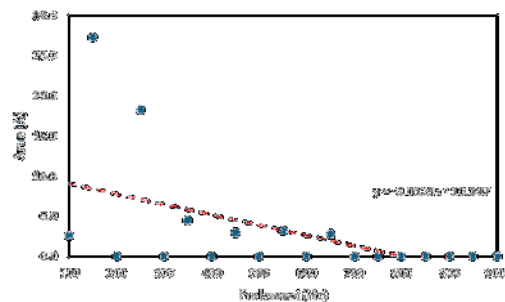


Gambar 8. Pengujian arus untuk total distorsi harmonik tanpa beban.

Terlihat seiring dengan meningkatnya frekuensi tegangan yang dihasilkan semakin kecil. Meskipun pada frekuensi 350 Hz dihasilkan tegangan yang tertinggi hingga 1,82 V. Kecenderungan yang sama dengan tegangannya, seiring meningkatnya frekuensi cenderung semakin kecil nilai arus yang dihasilkan. Pada frekuensi 150 Hz dihasilkan arus listrik tertinggi sebesar 27,5 A. Pengujian selanjutnya motor diberi beban sebesar 35,7 VDC tegangan dan arus untuk total distorsi harmoniknya berturut-turut diberikan pada Gambar 9 dan 10. Trend yang dibentuk serupa dengan perolehan tegangan dan arus tanpa beban. Perubahan perolehan tegangan dan arus tidak signifikan untuk frekuensi yang sama.



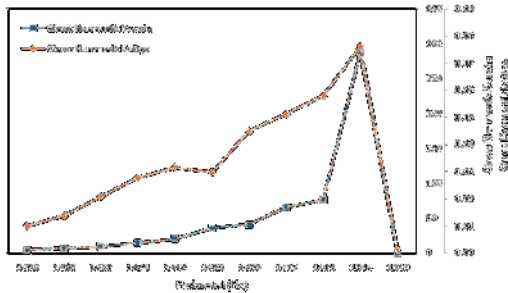
Gambar 9. Pengujian tegangan untuk total harmonik distorsi dengan beban 35,7 VDC.



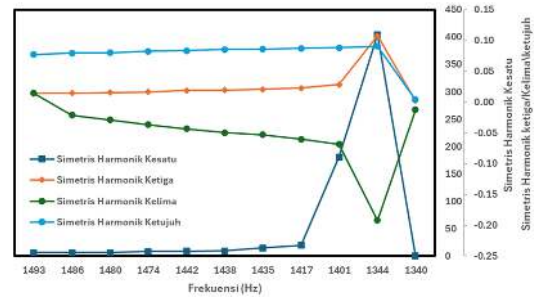
Gambar 10. Pengujian arus untuk total harmonik distorsi dengan beban 35,7 VDC.

Dari hasil perbandingan setiap harmonik ganjil (kesatu dan ketiga) dalam bentuk gelombang yang diberikan pada Gambar 11, untuk posisi awal dan maksimal gelombang sinus pada harmonik kesatu mendapatkan nilai yang besar yaitu 4,20 sampai 286,96, untuk nilai awal dan maksimal gelombang sinus harmonik ketiga mendapatkan nilai terendah yaitu 0,01 sampai 0,0762. Dari Gambar 12, hasil perbandingan posisi awal dan maksimal gelombang simetris harmonik kesatu mendapatkan nilai yang besar yaitu 5,98 sampai 404,62, untuk nilai awal dan maksimal gelombang simetris harmonik kelima mendapatkan nilai terendah yaitu 0,0144 sampai -0,1921. Sedangkan dari Gambar 13 untuk posisi awal dan maksimal gelombang asimetris harmonik kesatu mendapatkan nilai yang besar yaitu

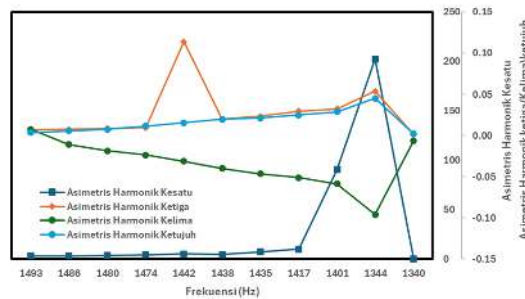
2,96 sampai 202,30, untuk nilai awal dan maksimal gelombang asimetris harmonik kelima mendapatkan nilai terendah yaitu 0,0073 sampai -0,0961.



Gambar 11. Perbandingan gelombang sinus harmonik ganjil.

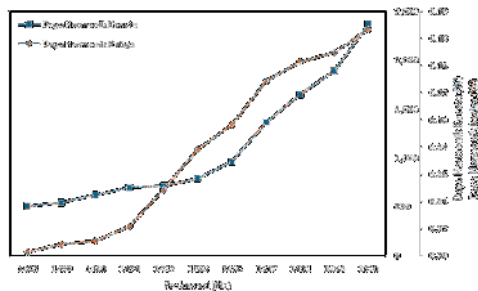


Gambar 12. Perbandingan gelombang simetris harmonik ganjil.

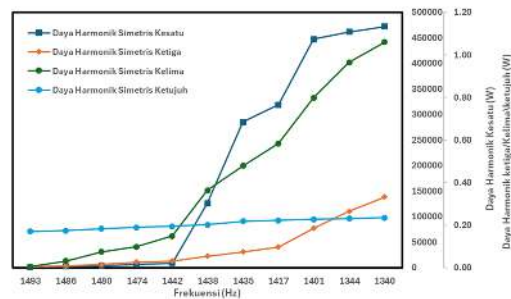


Gambar 13. Pengujian gelombang asimetris harmonik ganjil

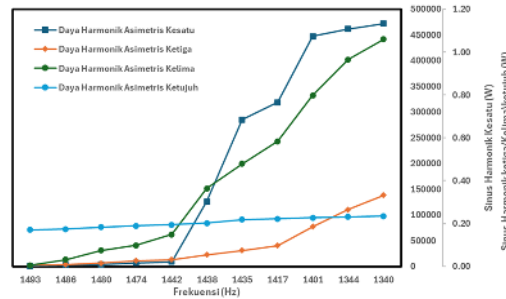
Dari hasil perbandingan setiap daya harmonik ganjil dalam bentuk gelombang pada Gambar 14, untuk posisi awal dan maksimal harmonik ketiga mendapatkan nilai yang besar yaitu 508,66 W sampai 2274,35 W, untuk nilai awal dan maksimal harmonik kesatu mendapatkan nilai terendah yaitu 0,00027 W sampai 0,167 W. Untuk Gambar 15, menunjukkan hasil perbandingan setiap daya harmonik ganjil dalam bentuk gelombang, untuk posisi awal dan maksimal harmonik kesatu mendapatkan nilai yang besar yaitu 1031,18 W sampai 472093,66 W, untuk nilai awal dan maksimal harmonik ketujuh mendapatkan nilai terendah yaitu 0,171 W sampai 0,235 W.



Gambar 14. Perbandingan daya gelombang harmonik ganjil.

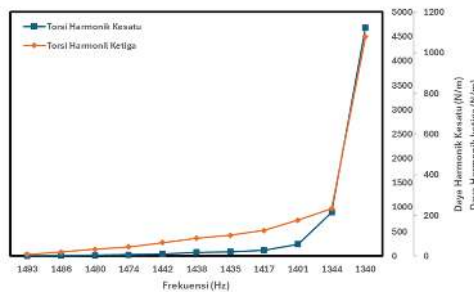


Gambar 15. Perbandingan daya gelombang simetris harmonik ganjil.

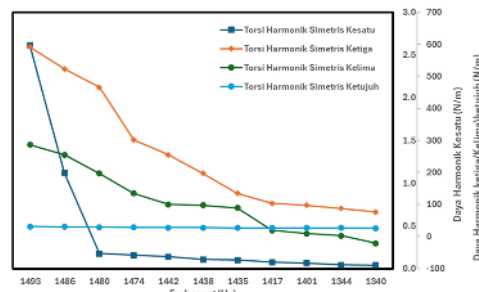


Gambar 16. Pengujian daya gelombang asimetris harmonik ganjil.

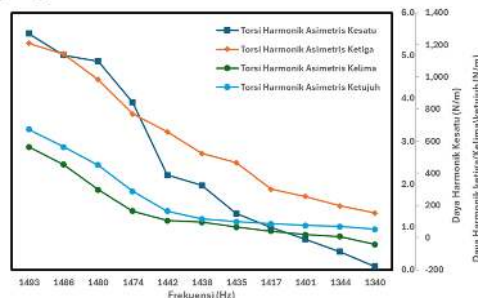
Dari hasil yang diperoleh pada Gambar 16, perbandingan setiap daya harmonik ganjil dalam bentuk gelombang, untuk posisi awal dan maksimal harmonik kesatu mendapatkan nilai yang besar yaitu 250,74 W sampai 118011,86 W, untuk nilai awal dan maksimal harmonik ketujuh mendapatkan nilai terendah yaitu 35,17 W sampai 0,058 W.



Gambar 17. Perbandingan torsi gelombang harmonik ganjil.



Gambar 18. Perbandingan torsi gelombang simetris harmonik ganjil.



Gambar 19. Pengujian torsi gelombang asimetris harmonik ganjil.

Perbandingan setiap torsi harmonik ganjil dalam bentuk gelombang pada Gambar 17, untuk posisi awal dan maksimal harmonik kesatu mendapatkan nilai yang besar yaitu 3,75 N/m sampai 4686,05 N/m, untuk nilai awal dan maksimal harmonik kesatu mendapatkan nilai terendah yaitu 8,22 N/m sampai 1078,59 N/m. Untuk perbandingan setiap torsi harmonik ganjil dalam bentuk gelombang Pada Gambar 18, untuk posisi awal dan maksimal harmonik ketiga mendapatkan nilai yang besar yaitu 591,36 N/m sampai 76,28 N/m, untuk nilai awal dan maksimal harmonik kelima mendapatkan nilai terendah yaitu 286,09 sampai -21,44 N/m. Dari Gambar 19, perbandingan setiap torsi harmonik ganjil dalam bentuk gelombang, untuk

posisi awal dan maksimal harmonik ketiga mendapatkan nilai yang besar yaitu 1208,82 N/m sampai 153,07 N/m, untuk nilai awal dan maksimal harmonik kelima mendapatkan nilai terendah yaitu 564,38 N/m sampai -42,87 N/m.

KESIMPULAN

Karakteristik harmonisa ganjil pada motor induksi dari eksperimen harmonisa ganjil 1, 3, 5, dan 7 terlihat nilai perbedaan tegangan, arus, daya dan torsi disetiap harmonik yang dibandingkan antara gelombang sinus, gelombang simetris, maupun gelombang asimetris.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kami ucapkan kepada semua rekan teknik elektro Unpam yang telah banyak membantu sehingga kegiatan penelitian ini dapat terlaksana dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Abidin, J. F. (2015). Analisis unjuk kerja harmonik di instalasi listrik industri dan upaya penanggulangannya. *Jurnal Teknologi Elektro*, 6(3), 143493.
- Assaffat, L. (2010, January). Analisa faktor-faktor yang mempengaruhi tingkat harmonisa pada motor induksi tiga fasa tipe rotor sangkar tupai. In *PROSIDING SEMINAR NASIONAL & INTERNASIONAL* (Vol. 3, No. 1).
- Berlianti, R., & Multi, A. (2016). Motor Induksi Fasa Tiga Tipe Rotor Sangkar Sebagai Generator Induksi Dengan Variasi Hubungan Kapasitor Untuk Eksitasi. *Sainstech: Jurnal Penelitian Dan Pengkajian Sains Dan Teknologi*, 26(2).
- Bukit, F. R. A. (2018). Analisa harmonisa pada karakteristik motor induksi tiga phasa. *JUITECH: Jurnal Ilmiah Fakultas Teknik Universitas Quality*, 1(2).
- Juhana & Rozak, O. A. (2022). Reduksi Harmonik pada Inverter Fasa Tiga dengan Filter Pasif. *EPIC Journal of Electrical Power Instrumentation and Control*, 5(1), 89–98.
- Marzuki, A., & Ramli, R. (2019). Perancangan dan Penggunaan Low Pass Filter pada Beban Non Linier. *Vokasi: Jurnal Publikasi Ilmiah*, 14(1), 9-15.
- Monteagudo, F. E. L., Carralero, L. R., Telles, A. B., Rivas, C. R., Elías, M. E. G., Varela, R. V., ... & Hernández, R. F. I. (2012). Incidence of harmonic in asynchronous three-phase motors. *Procedia Engineering*, 35, 14-21.
- Rohi, D., Utomo, D. D., & Penangsang, O. (2009). Distorsi Harmonisa Pada Pelanggan Domestik Dengan Daya 250 VA < daya < 2200 VA. *Jurnal EECCIS (Electrics, Electronics, Communications, Controls, Informatics, Systems)*, 3(1), 1-5.
- Sugiarto, H. (2013). Kajian Harmonisa Arus Dan Tegangan Listrik di Gedung Administrasi Politeknik Negeri Pontianak.
- Sumarno, E., & Bakhri, S. (2016). Analisis Pengaruh Beban Tak Seimbang Terhadap Harmonisa Pada Variable Speed Drive Fasa Tiga. *SIGMA EPSILON-Buletin Ilmiah Teknologi Keselamatan Reaktor Nuklir*, 18(3-4).