

PENGARUH HARMONISA PADA TRANSFORMATOR DAYA

Syafruddin Hasan, Ali Hanfiah Rambe, Ferry R.A.Bukit, Alfian, Meutia Nurfahasdi

Staf Pengajar Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik USU

HP: 082364879588

syafruddin7@usu.ac.id; ali3@usu.ac.id; ferrybukit@usu.ac.id; meutia.nurfahasdi@usu.ac.id

Abstrak

Transformator daya adalah bagian integral dari hampir semua jaringan penyaluran daya listrik mulai dari pembangkitan sampai ke pengguna energi listrik (jaringan transmisi dan distribusi). Pelayanan yang baik merupakan hal yang sangat penting dalam suplai daya listrik. Ada sejumlah faktor yang mengganggu operasi sebuah transformator, diantaranya adalah keberadaan harmonisa listrik dalam sistem tenaga listrik. Perkembangan penggunaan beban-beban listrik non linear yang sejalan dengan perkembangan penggunaan komponen dan peralatan berbasis pada konverter daya. Tulisan ini memberikan kajian pengaruh harmonisa terhadap unjuk kerja dari sebuah transformator dengan adanya harmonisa yang dikhususkan atas adanya DC bias. Analisis dilakukan lewat Simulasi menggunakan software MATLAB dan verifikasi dilakukan lewat data eksperimental. Hasil menunjukkan keluaran simulasi bersesuaian dengan data pengujian langsung. DC bias mengakibatkan pola harmonisa orde genap juga menjadi lebih signifikan.

Kata Kunci : Transformator, DC Bias, Saturasi Setengah Siklus, MATLAB, Harmonisa

I. PENDAHULUAN

Transformator daya adalah bagian integral dari hampir semua jaringan penyaluran daya listrik mulai dari pembangkitan sampai ke pengguna energi listrik (jaringan transmisi dan distribusi). Pelayanan yang baik merupakan hal yang sangat penting dalam sulai daya listrik. Ada sejumlah faktor yang mengganggu operasi sebuah transformator diantaranya adalah keberadaan harmonisa listrik dalam sistem tenaga listrik. Perkembangan penggunaan beban-beban listrik non linear yang sejalan dengan perkembangan penggunaan komponen dan peralatan berbasis pada konverter elektronika daya merupakan sumbangan terbesar bagi harmonisa listrik.

Saturasi (kejenuhan) dari inti trafo diantaranya disebabkan operasi dari inti pada level medan magnetik diatas lutut (knee) dari kurva magnetisasi. Ketika arus searah (DC) diinjeksikan pada belitan trafo, maka medan magnetik DC terbentuk didalam inti. Gabungan medan magnetik DC dan AC dapat menggeser titik operasi trafo kekawasan di atas lutut menuju ke kawasan saturasi dari kurva magnetisasi tersebut.

Arus DC juga dapat diakibatkan oleh operasi peralatan elektronika daya baik dalam keadaan normal ataupun tidak normal seperti pensaklaran divais yang tidak sempurna [1]. Bergantung kepada level dan lamanya injeksi DC, kemungkinan efek terburuk dapat menyebabkan kejenuhan inti selama setengah siklus dengan arah saturasi sesuai arah arus searah tersebut[2]. Sebagai akibat adalah arus magnetisasi akan kaya dengan harmonisa yang selanjutnya meningkatkan konsumsi daya reaktif dan meningkatnya rugi-rugi inti bersamaan arus eddy yang juga bertambah dikarenakan fluksi bocor yg meningkat [3]-[4].

Beberapa permasalahan lain muncul seperti halnya pemanasan berlebih setempat (local

overheating), getaran (*vibrasi*), derau (*noise*), korosi pada peralatan pentanahan, kesalahan alat ukur (metering) serta kesalahn kerja dari peralatan proteksi [5]-[6].

II. TINJAUAN PUSTAKA

Transformator (transformer, trafo) adalah sebuah mesin arus bolak-balik statis (*ac static machine*) yang berfungsi untuk (i) mentransfer energi listrik bolak-balik dari satu atau lebih rangkaian yang diam ke satu atau lebih rangkaian listrik diam lainnya, (ii) bekerja tanpa merubah nilai frekuensi, (iii) bekerja dengan prinsip induksi elektromagnetik (hukum Faraday), (iv) memiliki rangkaian listrik yang dihubungkan oleh rangkaian magnetik bersama (*common coupling*), (v) energi yang ditransfer biasanya berlangsung dengan perubahan level tegangan, meskipun hal ini tidak selalu diharuskan dan (vi) tidak merubah daya.[7]

Harmonisa (juga dikenal dengan sebutan harmonik) adalah gangguan (distorsi) bentuk gelombang tegangan atau bentuk gelombang arus sehingga bentuk gelombangnya tidak lagi berbentuk sinusoida murni. Distorsi ini umumnya disebabkan oleh adanya beban non-linier. Pada dasarnya, harmonik adalah gejala pembentukan gelombang-gelombang dengan frekuensi berbeda yang merupakan perkalian bilangan bulat (integer) dengan frekuensi dasarnya (fundamental frequency). Pada umumnya frekuensi dasar adalah 50 atau 60 Hz. Frekuensi dari harmonisa ke h adalah hf Hz. Sebagai contoh: dengan frekuensi dasar ($h = 1$) 50 Hz, maka untuk $h = 2$ (harmonisa orde ke 2), frekuensinya adalah $2 \times 50 = 100$ Hz. Untuk $h = 3$ (harmonisa orde ke 3), frekuensi adalah $3 \times 50 = 150$ Hz, dan seterusnya untuk orde harmonisa yang lain.[8]

Harmonisa selalu ada dalam sistem tenaga listrik. Harmonisa tidak berbahaya (harmless) selama levelnya masih dibawah nilai yang diperbolehkan (standar). Jadi harmonisa bukanlah suatu fenomena yang ditakutkan.

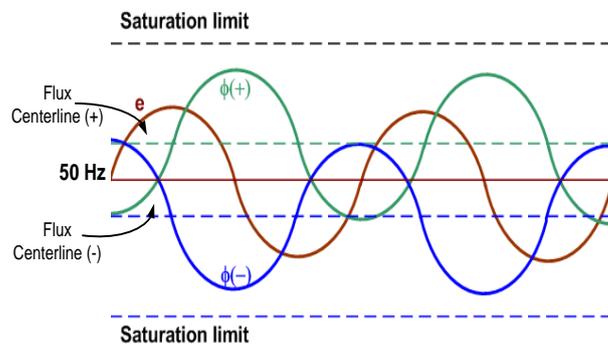
Beberapa hal yang berdampak dari kualitas daya yang buruk (poor power quality) yang salah satu diantaranya adalah harmonisa listrik terhadap transformator daya adalah diantaranya [9]:

- a) kejenuhan inti trafo dengan merubah titik operasinya pada kurva λ -i (kurva B-H atau kurva hysteresis atau kurva magnetisasi) yang kekawasan yang tidak linear,
- b) meningkatnya rugi-rugi inti (*hysteresis* dan *eddy current*) dan memungkinkan kegagalan (kerusakan) bagi trafo yang disebabkan oleh rugi-rugi yang tinggi dalam hubungannya dengan bintik panas (*hot spot*),
- c) Meningkatnya rugi-rugi tembaga (*copper losses*) baik fundamental maupun harmonisa,
- d) menimbulkan saturasi setengah-siklus (*half-cycle saturation*) dengan adanya bias DC (DC offset) yang cenderung menambah harmonisa baik harmonisa ganjil dan genap,
- e) kesalahan fungsi dari rele-rele proteksi transformer,
- f) penuaan (aging) dan berkurangnya jangka hayat (*lifetime*),
- g) menurunnya daya guna (efisiensi),
- h) pengurangan daya mampu (*derating*) dari transformer,
- i) menurunnya faktor daya,
- j) (j) menimbulkan resonansi paralel (harmonisa) dan keadaan ferroresonance, serta
- k) memburuknya isolasi didekat terminal akibat tekanan tinggi yang disebabkan sambaran kilat serta converter-konverter modulasi lebar pulsa (pulse width modulation, PWM).

2.1 Transformer With DC Bias

Ketika sekunder dari sebuah trafo dihubungkan sebuah beban simetrikal murni, maka fluks magnet yang dihasilkan dalam belitan sekunder akan dilawan oleh fluks magnet berlawanan yang dihasilkan oleh belitan primer sebagai komponen tambahan dari arus primer. Oleh karena itu, fluks bersama relatif tidak berubah. Namun akan berbeda fenomenanya ketika arus beban yang melalui transformer tersebut tidak benar-benar simetrikal, dengan kata lain transformer mensuplai arus sekunder yang mengandung suatu komponen DC, maka fluksi satu kutub (unipolar flux) akan terbentuk dalam inti.

Fluks satu kutub ini tidak diimbangi oleh fluksi yang dibangkitkan dari komponen tambahandari arus primer. Ini akan menambah fluksi bersama dalam inti dan mendorong fluksi total dalam inti menuju saturasi. Konsekwensinya, inti menjadi jenuh selama setengah siklus dalam arah sesuai dengah arah arus bias [2]. Gambar 1 menunjukkan fenomena tersebut.



Gambar 1. Bentuk gelombang fluksi akibat adanya DC bias

2.2 Harmonisa

Umumnya, bentuk gelombang nonsinusoidal priodik dapat diformulasikan dalam suku-suku dalam Deret Fourier. Setiap suku dalam deret Fourier melambangkan komponen harmonisa dari bentuk gelombang terdistorsi.

$$f(t) = A_0 + \sum_{h=1}^{\infty} [A_h \cos(h\omega_0 t) + B_h \sin(h\omega_0 t)]$$

$$= A_0 + \sum_{h=1}^{\infty} C_h \sin(h\omega_0 t + \psi_h) \tag{1}$$

Dimana f(t) adalah sebuah fungsi periodik dengan frekuensi f_0 .

Koefisien-koefisien deret Fourier diberikan oleh

$$A_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(x) dx, \text{ where } x = \omega_0 t$$

$$A_h = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(h\omega_0 t) dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \cos(hx) dx$$

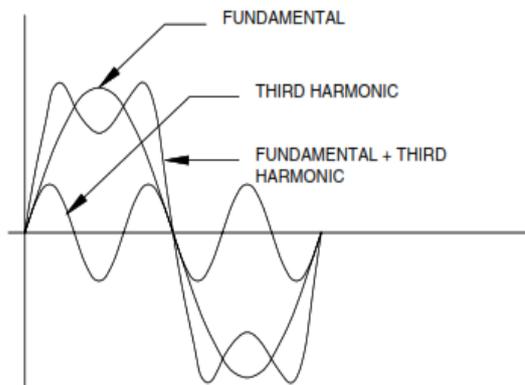
$$B_h = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(h\omega_0 t) dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \sin(hx) dx$$

$$C_h = \sqrt{A_h^2 + B_h^2}$$

$$\psi_h = \tan^{-1} \left(\frac{A_h}{B_h} \right).$$

(2)

Contoh pembentukan bentuk gelombang dengan penggabungan bentuk gelombang dasar dan gelombang harmonisa ke tiga ditujukan pada Gambar 2.



Gambar 2. Pembentukan bentuk gelombang

2.3 Indeks-Indeks Harmonisa Umum

Dalam tulisan ini hanya dibicarakan beberapa indeks harmonisa (*harmonic indices*) yang umum, diantaranya adalah:

- Crest Factor (CF) adalah rasio nilai puncak dari sebuah bentuk gelombang terhadap nilai efektifnya. Per-definisi sebuah gelombang tegangan atau arus sinusoidal murni akan memiliki crest factor sama dengan $\sqrt{2}$ atau 1.414. Untuk gelombang segiempat, CF nya adalah 1 [3].
- Distorsi Harmonisa Individual (Individual harmonic distortion , IHD) atau disebut juga sebagai faktor harmonisa (harmonic factor, HF) adalah perbandingan (rasio) antara nilai efektif (root mean square, rms) dari harmonisa individual dan nilai efektif dari nilai fundamental (atau harmonisa orde-1). Dalam bentuk persamaan dapat dituliskan sebagai

$$IHD_h = \frac{I_h}{I_{1rms}} \quad (3)$$

dengan

IHD_h = harmonisa orde ke-h

I_h = nilai rms harmonisa orde ke-h

- Distorsi Harmonisa Total (Total harmonic distortion, THD).
- Dalam hubungannya dengan bentuk gelombang tegangan/arus, indeks harmonisa yang paling umum adalah distorsi harmonisa total (*Total Harmonic Distortion, THD*)
- Distorsi harmonisa total (THD) adalah suatu istilah yang dipergunakan untuk menjelaskan deviasi total (*net deviation*) dari sebuah gelombang nonlinear dari karakteristik bentuk gelombang sinusoidal ideal.
- Distorsi harmonisa total (THD) adalah perbandingan antara nilai rms dari harmonisa dan nilai rms dari fundamental. Nilai rms dari harmonisa tegangan adalah

$$V_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{h=\infty} V_{h,rms}^2} \quad (4)$$

Hal serupa juga untuk nilai rms dari harmonisa arus.

Distorsi harmonisa total (THD) untuk tegangan:

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h=\infty} V_{h,rms}^2}}{V_{f,rms}} \quad (5)$$

dimana $V_{f,rms}$ atau V_{1rms} adalah tegangan pada frekuensi dasar (*fundamental*).

Hal serupa juga untuk nilai THD dari harmonisa arus.

III. SIMULASI MATLAB

Dalam tulisan ini program prediksi bentuk gelombang arus magnetisasi (eksitasi) diperoleh menggunakan MATLAB software. Konsep dari program ini adalah dengan mengembalikan pendekatan grafikal dari hubungan B-H ketika sebuah karakteristik magnetisasi inti trafo diketahui dan level DC bias tertentu diasumsikan. Untuk merealisasikan konsep ini, maka magnetisasi dari sebuah trafo pada keadaan tanpa beban harus diketahui. Setelah plot didapatkan, dilanjutkan dengan pendekatan piecewise linear untuk tempat kedudukan titik tengah dibuat. Selanjutnya ditambahkan level DC bias tertentu ke dalam program. Fluks bias resultan dalam kuater pertama dari kurva B-H dapat dihitung dengan

$$\phi = \phi_{ac} + \phi_{dc} = \phi_{max} \sin \omega t + \phi_{dc} \quad (5)$$

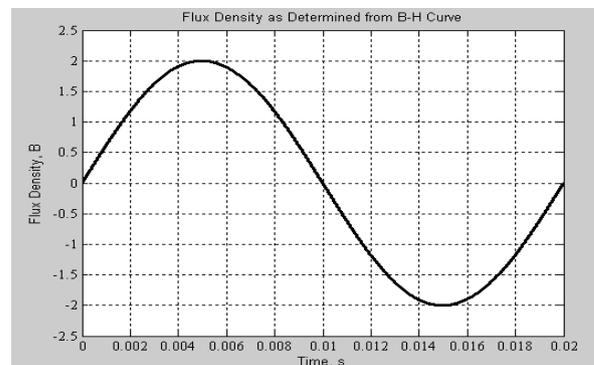
Rapat fluks magnetik B diberikan oleh formula

$$B = \frac{\phi}{A} \quad (6)$$

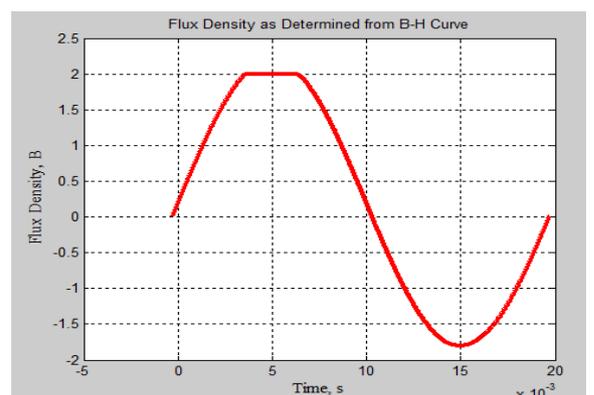
Dimana A adalah luas penampang dari inti yang bernilai konstant. Oleh karena itu,

$$B \sim \phi \quad (7)$$

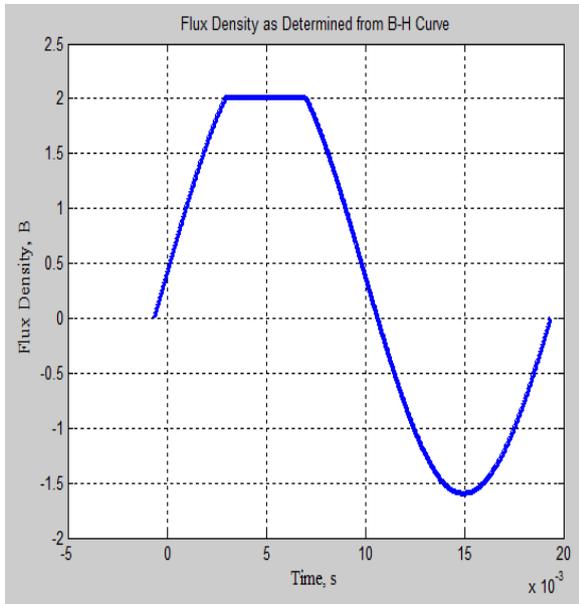
Gambar 3, Gambar 4 dan Gambar 5 memperlihatkan plot dari arus magnetisasi tanpa dan dengan injeksi DC bias menggunakan simulasi MATLAB.



Gambar 3. Karakteristik rapat fluks magnetik vs waktutanpa DC bias

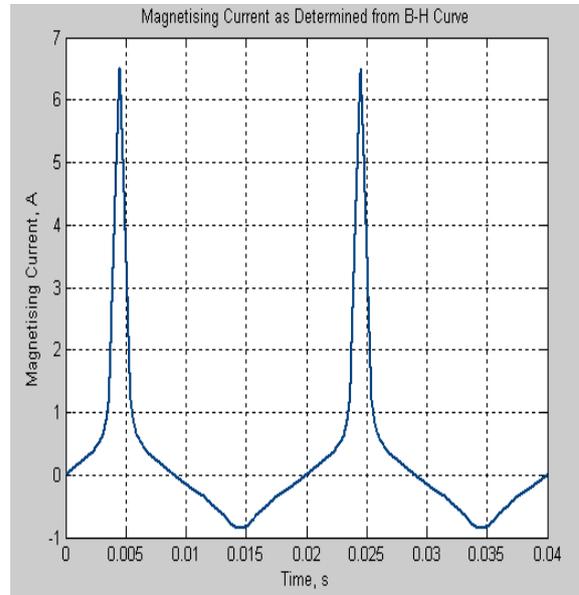


a) 0.2 Tesla



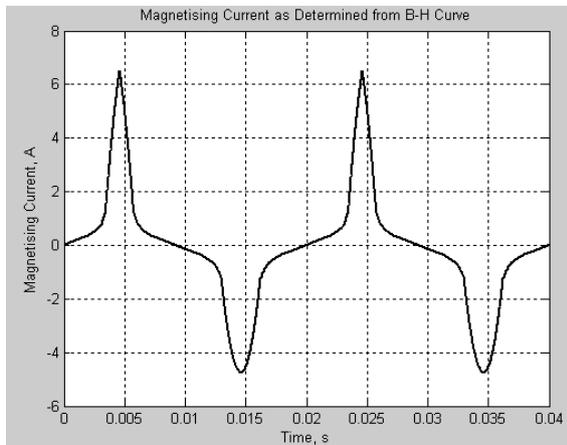
b) 0.4 Tesla

Gambar 4. Karakteristik rapat fluks magnetik vs waktu dengan DC bias berbeda

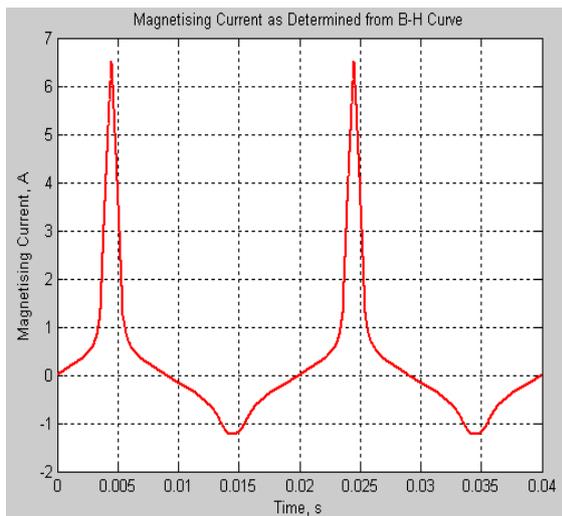


b) dengan 50% of DC Bias

Gambar 5. Arus magnetisasi vs waktu tanpa dan dengan DC Bias



a) tanpa DC bias

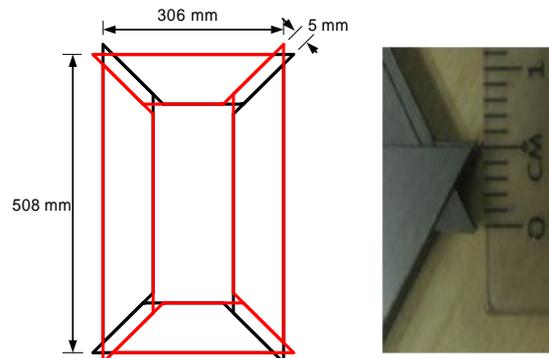


b) dengan 20% of DC Bias

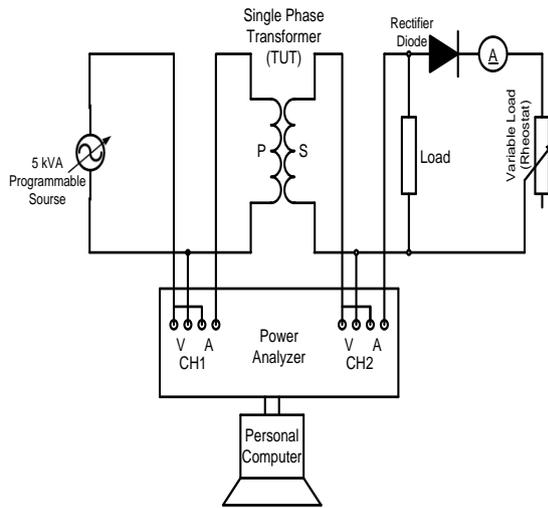
IV. EKSPERIMENTAL

Tranformer uji memiliki spesifikasi sebagai tranformer daya satu fasa dengan belitan primer 220 lilitan dan belitan sekunder juga 220 lilitan. Dimensi dari inti tranformer adalah 308 mm x 306 mm dengan lebar yoke dan limb 100 mm. Inti mempunyai ketebalan laminasi 0.27 mm dari bahan tipe M5 grain-oriented silicon iron (CGO) yang terdiri dari 19 lapisan dengan konfigurasi corner overlap length 5 cm (diperlihatkan dalam Gbr 6).

Susunan set-up peralatan yang dipergunakan dalam kerja riset adalah seperti ditunjukkan dalam Gbr 7. Arus masukan ke harmonic analyzer (PM 300) dihubungkan ke suplai ac variable voltage variable frequency (VVVF) dan tegangannya datang dari sisi skunder tranformer uji. (rasio belitan tranformer 1 : 1). Pengujian dilakukan pada rapat fluks magnetik yang tidak berubah dengan mengatur tegangan masukan dan frekuensi yang tetap.



Gambar 6. Konfigurasi inti tranformer



Gambar 7. Susunan set-up untuk pengukuran

Filosofi perencanaan perubahan rapat fluks magnetik yang diadopsi disini diturunkan langsung dari hukum Faraday. Persamaan 8) memperlihatkan bahwa perhitungan tegangan primer yang diperlukan untuk mendapatkan rapat fluks magnet yang telah ditetapkan sebelumnya pada frekuensi tertentu,

$$E_1 = 4.44 N f B_{max} A \quad (8)$$

dimana N adalah jumlah lilitan, f adalah frekuensi (Hz), B_{max} adalah rapat fluks magnetik dalam inti (Tesla) dan A is luas efektif inti (m^2). Dikarenakan A adalah konstan (dapat ditentukan dari konfigurasi inti),

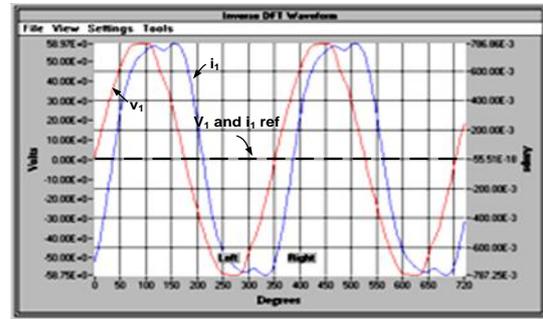
$$A = n \times w \times t \quad (9)$$

dimana n = jumlah lapisan laminasi inti
 w = lebar laminasi inti (m)
 t = tebal laminasi inti (m)

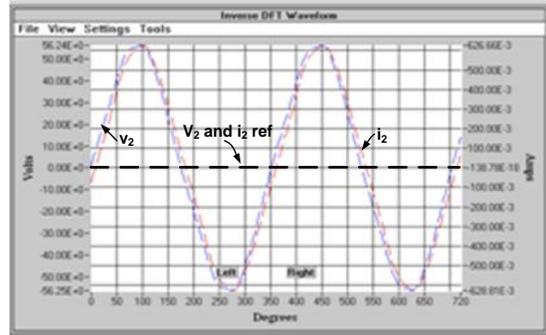
dan dengan andaian bahwa tegangan masukan sama dengan emf induksi primer, maka rapat fluks magnetik dapat diubah dengan mengubah tegangan masukan sementara frekuensi dijaga konstan.

V. HASIL DAN DISKUSI

Selama proses eksperimental, rapat fluks magnetik dijaga konstan pada nilai 1.5 Tesla. Bentuk gelombang direkam untuk operasi dua siklus (720 derajat). Gbr.8 memperlihatkan dari bentuk gelombang tegangan/ arus primer dan skunder tanpa DC bias. Dalam investigasi ini penyearah dan amperemeter DC dilepas, sehingga belitan sekunder dibebani langsung dengan beban resistor murni.



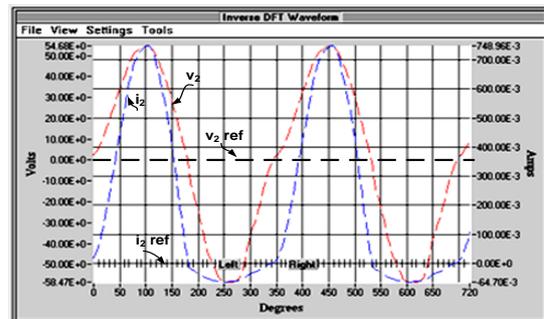
a) Primer



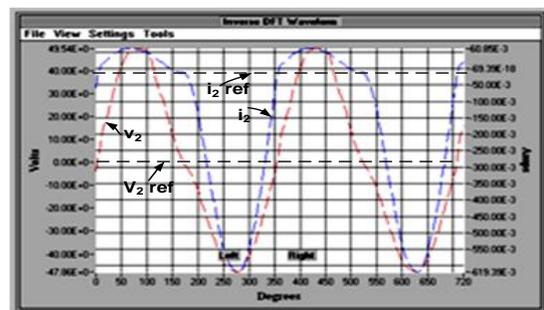
a) Sekunder

Gambar 8. Bentuk gelombang tegangan/ arus primer tanpa DC bias

Sementara itu, bentuk gelombang tegangan/ arus sekunder dengan arus DC 0,02 A dalam arah positif dan negatif ditunjukkan pada Gambar 9 dan Gambar 10.



Gambar 9. Bentuk gelombang tegangan dan arus sekunder dengan DC bias 0.02 A dalam arah positif.



Gambar 10. Bentuk gelombang tegangan dan arus sekunder dengan DC bias 0.02 A dalam arah negatif

Merujuk kepada Gambar 8, Gambar 9 dan Gambar 10, maka Tabel 1 menampilkan perbedaan amplitudo puncak dari siklus positif dan siklus negatif dari sekunder trafo tanpa dan dengan DC bias.

Tabel 1. Nilai puncak arus sekunder trafo tanpa dan dengan DC bias.

Rapat fluks magnet (T)	Ipuncak (A)		
	Tanpa DC bias	Arah positif	Arah negatif
1.5	+0.626	+0.749	+ 0.061
	and -0.626	and -0.065	and -0.647

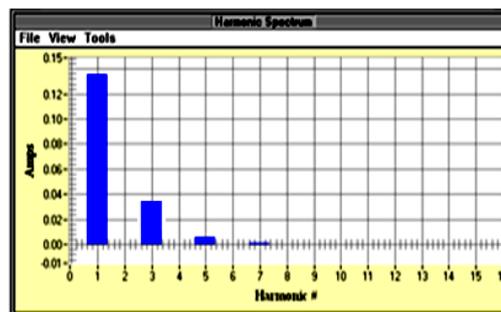
Gambar 8.a. memperlihatkan bentuk gelombang tegangan dan arus input (primer) tanpa DC bias dengan rapat fluksi magnet inti 1.5 Tesla. Bentuk gelombang tegangan adalah simetris. Juga diperlihatkan bahwa bentuk gelombang arus input masih simetris terhadap sumbu koordinat, meskipun ada sedikit perbedaan pada nilai puncaknya (+0.706A and -0.707A, rujuk ke Gambar 8 a).

Gambar 9 memperlihatkan bentuk gelombang tegangan dan arus skunder dari trafo uji ketika arus DC sebesar 0.02 A diinjeksikan kedalam belitan sekunder trafo dalam arah positif. Gambar juga memperlihatkan arus sekunder yang sangat terdistorsi. Terdapat suatu perbedaan nilai puncak yang besar dari arus sekunder trafo dalam satu arah (siklus positif) dengan siklus lainnya (siklus negatif), yaitu +0.749A and -0.065 A. Adanya fluks DC bias menuju sisi positif.

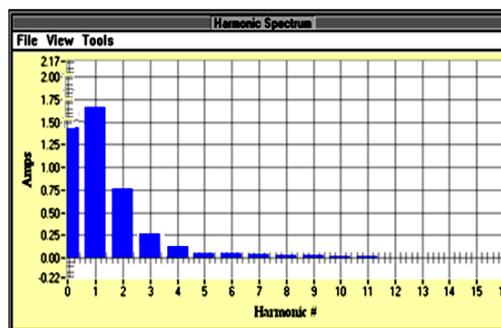
Sementara itu, Gambar 10 memperlihatkan bentuk gelombang tegangan dan arus skunder dari trafo uji ketika arus DC sebesar 0.02 A diinjeksikan kedalam belitan sekunder trafo dalam arah negatif. Perbedaan nilai puncak adalah hanya 0.061 dalam arah positif dan 0.647 A dalam arah lainnya. yang besar dari arus sekunder trafo dalam satu arah (siklus positif) dengan siklus lainnya (siklus negatif), yaitu +0.749 A and -0.065 A. Adanya fluks DC bias menuju sisi positif. Bila trafo dioperasikan dekat dengan titik lutut (knee point) dari kurva magnetisasi, maka sekarang ditekan kedalam wilayah kejenuhan dengan adanya tambahan fluksi DC. Keberadaan fluksi bias DC dalam arah negatif telah menggeser siklus positif menjauh dari titik saturasi positifnya menuju sisi negatif.

Hasil-hasil yang didapatkan ini adalah bersesuaian dengan hasil simulasi MATLAB.

Dalam hubungannya dengan distribusi harmonisa individual untuk kondisi tanpa dan dengan adanya DC bias adalah seperti ditunjukkan dalam Gambar 11.



a). Tanpa DC bias



b) Dengan DC bias

Gambar 11. Distribusi harmonisa individual tanpa dan dengan DC bias

Dari gambar patron distribusi harmonisa individual yang diperlihatkan pada Gambar 11 adalah jelas dari keberadaan harmonisa urutan nol yang menjadi pertanda adanya DC bias. Tambahan, harmonisa genap disamping harmonisa ganjil juga menjadi lebih kelihatan (signifikan) dengan adanya kandungan komponen DC dalam arus magnetisasi.

VI. KESIMPULAN

Hasil-hasil investigasi ini diharapkan bermanfaat dalam memahami fenomena bentuk gelombang tegangan dan arus dari sebuah transformator tanpa dan dengan adanya DC bias.

Komputasi dari bentuk gelombang arus magnetisasi dalam transformator satu fasa dibawah pengaruh DC bias dengan software MATLAB memerlukan data kurva B-H dari material inti dan selanjutnya dilakukan pendekatan piecewise linear bagi peletakan titik tengah (mid point locus).

Hasil-hasil investigasi memperlihatkan bahwa bentuk gelombang arus dalam transformer adalah tidak simetris (unsymmetrical) dan mengandung banyak harmonisa. Bentuk gelombang pulsasi mendorong kearah kejenuhan setengah siklus (half-cycle saturation) dengan arah sesuai dengan arah dari arus DC (arah positif atau negatif). Dalam hubungannya dengan patron distribusi harmonisa, hal ini akan ditunjukkan oleh harmonisa orde nol. Nilai puncak dari arus meningkat dengan bertambahnya arus DC. Kandungan harmonisa genap menjadi sangat signifikan ketika adanya komponen DC didalam arus magnetisasi.

V. UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Lembaga Penelitian Universitas Sumatera utara untuk dukungannya pada pendanaan pelitian Talenta 2022 dengan No.:351/UN5.2.3.1/KPM/2022

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A.Ahfock and A.J.Hewitt, 2005, *DC Magnetization of Transformers*, IEE Proceeding Electric Power Applications
- [2] O.Biro, S.AuBerhofer, G.Buchgraber, K.Preis and W.Seitlinger, "Prediction of magnetising current waveform in a single-phase power transformer under DC bias", *IET Science Measurement Technology*, pp. 2-5, 2007, I. (1),
- [3] Y.You, E.F.Fuchs, and P.R.Barnes, "Reactive Power Demand of Transformer with DC Bias", *Industry Application Society Magazine*, Vol. 2, No. 4, pp.45-52,July/August 1996.
- [4] Philip R.Price, "Geomagnetically Induced Current Effects on Transformer", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.17, No.4, pp. 1002-1008, October 2002.
- [5] Yinghui Chen, Tiebing Lu, and Zhibin Zhao, "Study on the Electromagnetic Influence of DC Bias on the Power Transformer", *Electric Power Science and Engineering*, .pp 10-13, 2009, 25(3).
- [6] Shu Lu, Yilu Liu, and Jaime De La Ree, "Harmonic Generated from a DC Biased Transformer", *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol.8, No.2, pp. 725-731, April 1993
- [7] Theraja B. L. and Theraja A. K., *A Textbook of Electrical Technology in S.I. Units, Volume II : AC & DC Machines*, S.Chand & Company Ltd., New Delhi, 2008, p.1147
- [8] Sankaran, C. *Power quality*. CRC press, 2017
- [9] Fuchs, Ewald, and Mohammad AS Masoum. "*Power quality in power systems and electrical machines*".Academic press, 2011.