

DESAIN DAN UJI PERFORMA TRAFO TOROID SATU FASA PADA APLIKASI INVERTER BERBASIS EGS002

Slamet Nurhadi¹⁾, Masramdhani Saputra²⁾, Anang Dasa Nofvowan³⁾
Jurusan Teknik Elektro, Program Studi Teknik Listrik, Politeknik Negeri Malang
Jl. Soekarno-Hatta No. 9, Malang, Jawa Timur

¹⁾*slamet.nurhadi@polinema.ac.id*

²⁾*masramdhani@polinema.ac.id*

³⁾*anang.dasa@polinema.ac.id*

Abstrak

Inverter Satu-Fasa dengan trafo frekuensi rendah merupakan jenis topologi yang paling banyak digunakan pada saat ini. Berbagai aplikasi mulai dari bidang energi terbarukan hingga kalangan peminat power amplifier musik juga menggunakan topologi ini. Keunggulan topologi ini adalah jumlah komponen elektronika daya yang lebih sedikit dan rangkaian kendali yang cukup sederhana. Komponen utama pada topologi inverter ini adalah trafo frekuensi rendah. Pada topologi inverter ini, trafo berfungsi sebagai komponen utama untuk menaikkan dengan sinus 12 V menjadi 220 V rms. Permasalahan yang muncul adalah suhu trafo yang meningkat drastis akibat riak arus yang dihasilkan oleh rangkaian inverter. Penulis menemukan aplikasi di lapangan tidak memperhatikan faktor geometri trafo serta derating dari dayanya. Oleh karena itu, pada penelitian ini, diusulkan suatu metode pembuatan trafo toroid baru beserta uji performanya untuk memperbaiki kinerja dari topologi inverter satu fasa dengan trafo frekuensi rendah. Hasil penelitian telah diverifikasi dengan implementasi laboratorium. Uji dari transformator yang dirancang menggunakan inverter satu-fasa berbasis pengendali modul EGS002.

Kata Kunci: trafo, toroid, inverter.

1. PENDAHULUAN

Energi merupakan salah satu kebutuhan yang sangat penting bagi manusia untuk menunjang kehidupan sehari-hari khususnya bagi negara berkembang seperti Indonesia. Salah satu energi yang tidak dapat dipisahkan dalam kehidupan manusia yaitu energi listrik. Seiring berjalannya waktu perkembangan energi listrik didunia juga turut mengalami banyak perkembangan.

Energi terbarukan sebagaimana disebutkan dalam UU No.30 tahun 2007 ten-tang energi, merupakan energi yang berasal dari sumber-sumber terbarukan antara lain panas bumi, angin, bioenergi, sinar matahari, aliran dan terjunan air, serta gerakan dan perbedaan suhu lapisan laut. Energi terbarukan memanfaatkan energi ramah lingkungan yang tidak mencemari lingkungan dan tidak memberikan kontribusi terhadap perubahan iklim dan pemanasan global. Hal ini karena energi yang didapatkan berasal dari proses alam yang berkelanjutan, seperti sinar matahari, angin, air, biofuel, dan geothermal. Ini menegaskan bahwa sumber energi telah tersedia tidak merugikan lingkungan, dan menjadi alasan utama mengapa EBT sangat terkait dengan lingkungan dan ekologi. Indonesia memiliki potensi besar dalam mengembangkan energi terbarukan. Meskipun potensi energi ini sangat besar, pemanfaatannya di Indonesia masih terbatas.

Dari berbagai alat yang membutuhkan energi listrik terdapat sebuah elemen penting yaitu penyuply daya yang nantinya akan dikonversikan sesuai dengan kebutuhan peralatan yang akan

digunakan. Dalam hal ini sumber energi listrik ada beberapa macam salah satunya yaitu baterai. Perkembangan baterai dari dulunya hanya dapat berfungsi dalam satu pemakaian saja sekarang baterai bisa diisi ulang kembali dengan proses charging. Pada proses pengisian tersebut dibutuhkan se-buah komponen yang baik agar baterai tersebut tahan lama, serta aman pada saat proses pengisian maupun dalam keadaan berbeban. Untuk ini saya membahas mengenai salah satu komponen dari charger tersebut bisa bekerja dengan optimal sehingga pada saat proses charging tidak mempengaruhi kesehatan baterai dan mengamankan pengguna dari bahaya pada saat pengisian ataupun saat keadaan berbeban.

Jenis komponen ini adalah komponen yang dapat mengubah nilai tegangan tertentu ke tegangan yang lain sekaligus dapat menjadi isolasi yaitu Transformator. Dari jenis jenis transformator yang ada trafo toroid jarang sekali digunakan se-bagai komponen charger dan isolasi. Trafo toroid kini semakin banyak digunakan terutama pada aplikasi inverter 1 fasa frekuensi rendah. Piranti inverter sangat dibutuhkan pada aplikasi pemanfaatan energi terbarukan yakni jenis energi surya. Salah satu pendekatan dalam mendesain trafo satu fasa adalah dengan menggunakan metode geometri inti. Dengan metode tersebut, proses perhitungan analitik jauh lebih singkat dari pada pendekatan numerik. Hal ini sangat membantu pendesain untuk menghindari kerumitan perhitungan dan tuntutan alat komputasi mutakhir sebagaimana yang ditemui pada metode desain numerik. Namun, trafo toroid juga memiliki

salah satu kekurangan dalam hal desain adalah membutuhkan mesin khusus untuk proses pemasangan belitannya.

2. TRANSFORMATOR

A. Fluksi Magnet Trafo Toroid

Transformator merupakan peralatan mesin listrik statis yang bekerja secara induksi elektromagnetik, dimana rangkaian magnetik dan belitannya terdiri dari dua atau lebih belitan, dan berfungsi mentransformasikan daya (arus dan tegangan) sistem bolak balik (AC) pada sistem arus dan tegangan lainnya dalam frekuensi yang sama (IEC 60076. 1-2011). Transformator dapat digunakan secara luas, baik di dalam bidang tenaga listrik maupun elektronika, untuk memperoleh suatu transformator yang memiliki efisiensi yang tinggi maka diperlukan suatu perancangan.

Transformator menggunakan prinsip elektromagnetik yaitu hukum-hukum ampere dan induksi Faraday, yang dimana perubahan arus atau medan listrik dapat membangkitkan medan magnet dan juga perubahan pada medan magnet atau fluks medan magnet dapat membangkitkan tegangan induksi. Pada umumnya transformator terdiri atas sebuah inti, yang terbuat dari besi berlapis dan juga dua buah kumparan, yaitu kumparan primer dan kumparan sekunder. Biasanya kumparan-kumparan tersebut terbuat dari kawat tembaga yang dibelitkan disekitaran kaki-kaki inti pada transformator.

Suatu transformator memiliki prinsip dasar yaitu induksi bersama (mutual induction) antara dua rangkaian yang telah dihubungkan oleh fluks magnet. Pada bentuk yang sederhana, sebuah transformator terdiri dari dua buah kumparan induksi yang terhubung secara magnet oleh suatu path yang memiliki reaktansi rendah, tetapi kumparan tersebut tidak tersambung atau terpisah secara listrik. Kedua kumparan tersebut memiliki mutual induction yang tinggi maka dari itu jika salah satu kumparan dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik (AC), fluks bolak-balik timbul didalam inti besi yang terhubung dengan kumparan lain dan dapat menyebabkan atau menimbulkan GGL (Gaya Gerak Listrik) induksi (sesuai dengan induksi elektromagnet) dari hukum Faraday, bila arus bolak-balik mengalir pada induktor maka akan timbul GGL.

Adapun rumus-rumus yang digunakan pada Transformator Satu-Fasa Core-Type, yaitu sebagai berikut :

GGL induksi pada trafo :

$$E = 4,44 fN\Phi_m \text{ volts} \quad (2.1)$$

GGL per putaran

$$E_t = E/T = 4,4 f\Phi_m \text{ volts} \quad (2.2)$$

Ruang kosong pada transformator satu fasa berisi satu primer dan satu gulungan sekunder. Faktor ruang kosong K_w adalah perbandingan luas konduktor dalam ruang kosong dengan luas total ruang kosong :

$$K_w = \frac{\text{Conductor area in window}}{\text{Total area of window}} = \frac{A_c}{A_w} \quad (2.3)$$

Area konduktor pada ruang kosong

$$A_c = K_w A_w \quad (2.4)$$

Kepadatan arus sama di kedua belitan

$$\delta = \frac{I_p}{a_p} = \frac{I_s}{a_s} \quad (2.5)$$

Luas penampang konduktor primer

$$a_p = \frac{I_p}{\delta} \quad (2.6)$$

Luas penampang konduktor sekunder

$$a_s = \frac{I_s}{\delta} \quad (2.7)$$

Jika kita mengabaikan magnetisasi mmf maka lilitan ampere primer sama dengan lilitan ampere sekunder. Oleh karena itu ampere berubah,

$$AT = I_p T_p = I_s T_s \quad (2.8)$$

Total area tembaga di ruang kosong

A_c = Area tembaga dari gulungan primer + Area tembaga dari gulungan sekunder = (Jumlah lilitan primer x luas penampang primer konduktor) + (Jumlah lilitan sekunder x luas penampang - bagian konduktor sekunder)

$$= T_p a_p + T_s a_s = T_p \frac{I_p}{\delta} + T_s \frac{I_s}{\delta}$$

$$= \frac{1}{\delta} (T_p I_p + T_s I_s) = \frac{1}{\delta} (AT + AT)$$

$$= \frac{2AT}{\delta}$$

$$\left(\because a_p = \frac{I_p}{\delta} \text{ and } a_s = \frac{I_s}{\delta} \right) \quad (2.9)$$

$$\left(\because AT = I_p T_p = I_s T_s \right) \quad (2.10)$$

Dengan menyamakan persamaan di atas, kita peroleh,

$$K_w A_w = 2AT/\delta \quad (2.11)$$

Oleh karena itu maka persamaan Ampere nya adalah,

$$AT = \frac{1}{2} KwAw\delta \quad (2.12)$$

Rating kVA trafo satu fasa diberikan oleh,

$$\begin{aligned} kVA \text{ rating, } Q &= VpIp \times 10^{-3} \approx EpIp \times 10^{-3} \\ &= \frac{Ep}{Tp} TpIp \times 10^{-3} \\ &= Et At \times 10^{-3} \end{aligned}$$

$$(\because Ep \approx Vp) \quad (2.13)$$

$$(\because Et = \frac{Ep}{Tp} \text{ and } AT = TpIp) \quad (2.14)$$

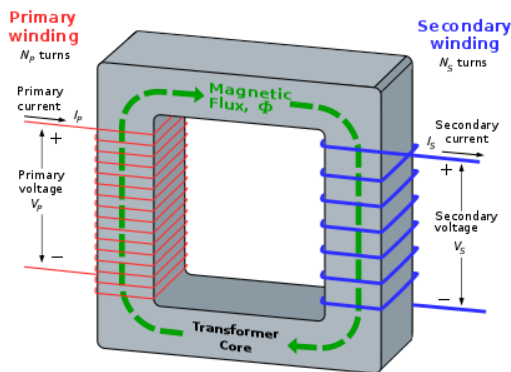
dengan mengganti E dan AT dari persamaan kita mendapatkan

$$\begin{aligned} Q &= 4.44 f\phi m \frac{KwAw\delta}{2} \times 10^{-3} \\ &= 2.22 f\phi m KwAw\delta \times 10^{-3} \\ &= 2.22 fBm AiKwAw\delta \times 10^{-3} \\ &(\because Bm = \frac{\phi m}{Ai}) \end{aligned} \quad (2.15)$$

Persamaan di atas adalah persamaan fluksi magnetik transformator satu fasa

B. Konstruksi Motor Induksi

Prinsip kerja suatu transformator adalah apabila kumparan primer dihubungkan dengan tegangan sumber, maka pada kumparan tersebut akan mengalir arus bolak-balik I_1 . Karena kumparan memiliki inti, maka arus I_1 akan menimbulkan fluks magnet yang juga akan berubah-ubah terhadap intinya.



Gambar 1. Magnetik flux pada shell type transformer

Pada kumparan primer biasanya akan timbul GGL induksi e_p yang diakibatkan adanya fluks magnet yang berubah-ubah, besarnya GGL induksi yang terdapat pada kumparan primer dapat dihitung atau dicari dengan menggunakan rumus berikut ini :

$$e_p = -N_p \frac{d\phi}{dt} \text{ volt} \quad (2.16)$$

Keterangan :

e_p = GGL induksi pada kumparan primer

N_p = Jumlah lilitan kumparan primer

$d\phi$ = Perubahan garis-garis gaya magnet dalam satuan weber

dt = Perubahan waktu dalam satuan detik

GGL induksi terinduksi oleh fluks magnet yang juga dialami oleh kumparan sekunder dikarenakan fluks Bersama (mutual fluks). Dengan itu maka fluks tersebut menginduksikan GGL induksi e_s terhadap kumparan sekunder transformator, besarnya GGL induksi yang terdapat pada kumparan sekunder dapat dihitung dengan menggunakan rumus berikut ini :

$$e_s = -N_s \frac{d\phi}{dt} \text{ volt} \quad (2.17)$$

Keterangan :

e_s = GGL induksi pada kumparan sekunder

N_s = Jumlah lilitan kumparan sekunder

Pada persamaan dari GGL induksi kumparan primer e_p dan GGL induksi kumparan sekunder e_s maka diperoleh perbandingan lilitan antara perbandingan GGL induksi diatas, yaitu sebagai berikut :

$$a = e_p/e_s = N_p/N_s \quad (2.18)$$

Keterangan :

a = Nilai perbandingan lilitan transformator (turn ratio)

Jika, $a > 1$, maka transformator digunakan untuk menurunkan tegangan (*step down*). Sedangkan jika $a < 1$, maka transformator digunakan untuk menaikkan tegangan (*step up*).



Gambar 3. Trafo Toroid

C. Kumparan Toroid

Kumparan transformator terdiri dari beberapa lilitan kawat berisolasi membentuk kumparan, kumparan tersebut diisolasi, baik terhadap inti besi maupun terhadap kumparan lain dengan menggunakan isolasi padat seperti karton, pertinax dan lain-lain . Jumlah lilitan kawat email nantinya akan digunakan untuk menentukan Transformator tersebut sebagai penaik dan penurunnya tegangan. Hal tersebut tergantung oleh lebih banyak lilitan antara sekunder dan primernya. Ukuran kawat email yang biasa digunakan pada lilitan primer selalu lebih kecil dengan jumlah lilitan yang lebih banyak

dibandingkan dengan jumlah lilitan sekunder. Karena pada prinsipnya ukuran lilitan kawat email yang digunakan yaitu berdasarkan jumlah arus yang melewatinya.

Pada lilitan trafo toroid untuk jumlah lilitan yang akan digunakan disebut sebagai GPV (Gulungan Per Volt). Jumlah GPV ini nilainya sangat penting untuk mendapatkan nilai tegangan *stepdown* yang diinginkan seperti perbandingan pada rumus sebelumnya yaitu dalam suatu transformator ideal tegangan di transformator berbanding lurus dengan jumlah lilitannya. Untuk arusnya adalah berbanding terbalik dengan jumlah lilitan sedangkan untuk impedansi bebannya adalah berbanding lurus dengan kuadrat jumlah lilitannya. Maka rumus yang digunakan adalah sebagai berikut :

$$GPV = \frac{f}{A} \quad (2.19)$$

Keterangan :

GPV = Jumlah gulungan tiap volt.

F = Frekuensi Hz.

A = Luas penampang *core* atau inti (cm²)

Selanjutnya dari rumus diatas nilai GPV belum bisa dicari jika nilai luas penampang belum diketahui. Untuk nilai tersebut bisa dicari dari rumus awal. Bila dilihat dari nilai daya. Namun untuk nilai luas yang lebih spesifik yang khusus pada trafo toroid maka digunakan rumus seperti berikut :

$$A = \left(\frac{R_2 - R_1}{2}\right) \times t \quad (2.20)$$

Dimana

A = Luas penampang (cm²)

R₂ = Jari-jari luar (cm)

R₁ = Jari-jari dalam (cm)

t = Tinggi (cm)

Dari rumus yang sudah didapatkan maka didapatkan nilai GPV. Nilai GPV ini kemudian akan digunakan untuk mencari nilai jumlah lilitan yang akan digunakan. Maka dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$N = GPV \times V \quad (2.21)$$

Keterangan:

N = Jumlah lilitan

GPV = Nilai gulungan per volt

V = Tegangan maupun disekunder dan primer

Nilai dari rumus-rumus diatas digunakan dalam sebuah perancangan transformator toroid pada penentuan jumlah lilitan yang akan digunakan. Pada umumnya nilai dari lilitan primer akan lebih besar daripada sekunder jika trafo tersebut adalah penurunan tegangan dan sebaliknya. Namun pada umumnya untuk nilai lilitan pada primer adalah

GPV dikalikan dengan tegangan PLN yaitu 220-230 Volt.

3. DESAIN TRAFU TOROID

A. Estimasi Efisiensi dan Rugi-Rugi

Agar transformator memiliki efisiensi terbaik 100% berarti idealnya transformator tersebut tidak memiliki rugi-rugi daya sama sekali. Tetapi pada kenyataannya trafo dengan efisiensi yang paling terbaik pun tidak bisa mencapai efisiensi tersebut. Adapun penyebabnya yaitu dari faktor-faktor tertentu seperti faktor inti dan faktor lilitan. Faktor rugi inti ini biasa disebut dengan core lose atau iron lose dan faktor rugi belitan biasanya disebut copper lose.

Efisiensi pada transformator merupakan perbandingan antara besarnya daya output dengan daya inputnya. Seperti yang dijelaskan tadi bahwa efisiensi terbaik adalah 100%.

1) Rugi Inti Transformator

Rugi daya inti transformator sering disebut juga dengan rugi tetap yaitu terdiri dari rugi histerisis P_h dan rugi arus pusar P_e, yang dimana rugi histerisis tersebut disebabkan oleh fluks bolak balik pada inti besi sedangkan rugi arus pusar timbul dikarenakan adanya arus yang arahnya berputar atau looping di dalam bahan inti.

Inti Transformator biasanya berbentuk sesuai jenis transformator yang diinginkan. Pada perancangan ini inti dari transformator yang digunakan adalah berbentuk toroid atau donat. Prinsip dari rugi inti pada transformator adalah sama pada setiap jenisnya. Namun yang membedakan adalah jenis atau bahan yang digunakan.

Pada inti besi sendiri dibuat sedemikian rupa agar menghindari kerugian histerisis yang disebabkan oleh gesekan molekul yang melawan aliran gaya magnet dalam inti besi. Gesekan pada molekul-molekul ini dapat menimbulkan panas, dan panas yang timbul ini akan menimbulkan kerugian energi. Inti trafo tersebut juga untuk menghindari eddy-current loss yang disebabkan oleh aliran sirkulasi arus yang menginduksi logam. Penyebabnya adalah aliran fluks magnet pada sekitar inti besi. Inti trafo yang terbuat dari bahan konduktor maka arus induksi terhadap inti besi dari eddy-currentnya akan semakin besar. Agar mengurangi eddy-current, inti dari trafo dibuat dengan inti yang berlapis-lapis. Tujuannya untuk memecah eddy-current dalam inti besi.

Rugi rugi inti pada transformator dapat dicari saat keadaan tanpa beban. Rugi-rugi besi itu sendiri meliputi :

- Rugi Histerisis, yaitu rugi yang disebabkan oleh fluks bolak balik pada inti besi

$$P_h = K_h \cdot f^2 \cdot B_{max}^n \quad (2.22)$$

Keterangan :

- P_h = Rugi histerisis (w/kg)
- K_h = Konstanta material inti
- f = Frekuensi (Hz)
- B_{max} = Nilai puncak medan magnet (T)
- n = Nilai eksponensial, tergantung material dan B_{max}

- Rugi eddy-current, yaitu rugi yang disebabkan oleh arus putar pada inti besi.

$$P_e = K_e \cdot f^2 \cdot t^2 B_{max}^2 \quad (2.23)$$

Dimana:

- P_e = Rugi arus pusar (w/kg)
- K_e = Konstanta material inti
- t = Ketebalan material (m)
- f = Frekuensi
- B_{max} = Nilai puncak medan magnet (T)

Dari persamaan yang digunakan tersebut maka untuk mencari nilai dari rugi inti bisa menggunakan rangkaian tanpa beban atau rangkaian transformator terbuka. Rugi daya yang digunakan adalah dalam satuan watt. Rangkaian terbuka tadi diukur pada posisi primer dengan mencari nilai dayanya yaitu W_0 (Rugi-rugi inti).

2) Rugi Tembaga

Rugi-rugi tembaga (C_U) ini juga biasa disebut dengan rugi lilitan, rugi lilitan pada transformator ini terdiri dari rugi lilitan primer dan rugi lilitan sekunder. Rugi-rugi tembaga ini biasanya terjadi karena disebabkan oleh pemanasan akibat arus yang mengalir, dan besarnya sebanding dengan kuadrat arus yang mengalir di dalam lilitan. Rugi-rugi ini juga rugi yang disebabkan oleh konduktor atau tembaga yang digunakan untuk bahan pembuatan konduktor. Rugi tembaga ini bisa juga diakibatkan karena adanya resistansi bahan.

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2.24)$$

Keterangan :

- R = Hambatan selenoida (Ω)
- ρ = Hambatan jenis bahan ($\Omega.m$)
- l = Panjang selenoida (m)

Kemudian untuk rumus umumnya yaitu sebagai berikut:

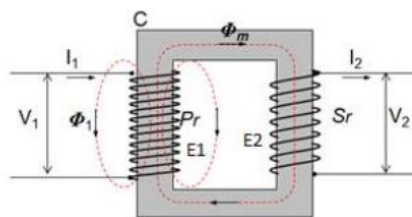
$$P_{cu} = I^2 \cdot R \quad (2.25)$$

Keterangan :

- P_{cu} = Rugi tembaga
- I^2 = Arus pada tembaga
- R = Hambatan pada tembaga (Ω)

B. Efisiensi

Efisiensi trafo adalah perbandingan antara nilai daya masukan dengan daya keluaran. Yaitu apabila daya masukan sama dengan daya keluaran maka nilai efisiensi dari trafo tersebut adalah yang terbaik, tetapi setiap peralatan listrik pasti memiliki rugi-rugi sehingga daya keluaran pasti akan lebih kecil dari pada daya masukannya. Pada hal ini sumber tegangan bolak-balik dari sisi primer energinya disimpan menjadi energi magnet di dalam inti, kemudian diubah lagi menjadi keluaran dalam bentuk tegangan bolak-balik di sisi sekunder



Gambar 4. Kumparan dan Inti pada Trafo

4. Daftar Pustaka

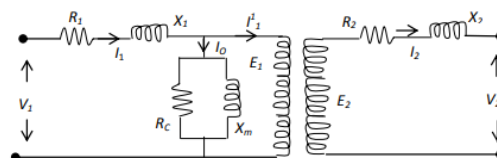
Maka dari itu hubungan kelistrikan dan kemagnetan berupa pembangkitan gaya gerak listrik atau GGL E di sisi primer maupun di sisi sekunder ditunjukkan pada rumus dibawah ini :

$$E = 4,44 f N \Phi_m \text{ volt} \quad (2.26)$$

Keterangan :

- Φ_m = Fluks maksimum pada inti (weber)
- F = Frekuensi sumber (Hz)
- N = Jumlah lilitan

Maka rangkaian ekivalen dari Gambar 4 adalah sebagai berikut :



Gambar 5. Rangkaian Ekivalen Trafo

Keterangan :

- V_1 = Tegangan sumber ke sisi primer
- I_1 = Arus masuk ke lilitan primer
- R_1 = Tahanan lilitan primer
- X_1 = Reaktansi lilitan primer
- R_c = Tahanan ekivalen inti besi
- X_m = Reaktansi ekivalen inti besi
- I_0 = Arus tanpa beban
- E_1 = GGL pada primer
- I_1^1 = Ekivalen arus sekunder pada primer
- E_2 = GGL pada sekunder
- R_2 = Tahanan lilitan sekunder
- X_2 = Reaktansi lilitan sekunder

I_2 = Arus masuk ke lilitan sekunder
 V_2 = Tegangan sekunder (ujung beban)

Oleh karena itu maka efisiensi trafo tersebut dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\eta = \frac{P_o}{P_o + \Sigma \text{ rugi}} \times 100\% \quad (2.27)$$

Keterangan :

P_o = Daya keluaran (W)

Σ = Rugi total (W)

Atau

$$\eta = (P_{out} / P_{in}) \times 100\% \quad (2.28)$$

Keterangan :

η = Efisiensi trafo

P_{out} = Daya listrik keluaran (*output*) atau daya pada kumparan sekunder

P_{in} = Daya listrik masukan (*input*) atau daya pada kumparan primer

Jika dilihat pada rumus diatas terdapat dua parameter yang harus dicari terlebih dahulu yaitu P_{out} dan P_{in} pada trafo. Dua parameter tersebut memiliki rumus yang sebanding. Perbandingan tersebut dilihat dari jumlah lilitan atau N pada daerah primer dan sekunder. Maka rumus tersebut yaitu sebagai berikut:

$$\begin{aligned} P_o &= V_o \times I_o \\ P_{in} &= V_{in} \times I_{in} \end{aligned} \quad (2.29)$$

Keterangan :

V_o = Tegangan sekunder (Volt)

V_{in} = Tegangan primer (Volt)

I_o = Arus sekunder (A)

I_{in} = Arus primer (A)

Lalu rumus tersebut didapatkan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$V_o = \frac{N_2}{N_1} V_{in} \text{ atau } V_{in} = \frac{N_1}{N_2} V_o$$

$$I_o = \frac{N_2}{N_1} I_{in} \text{ atau } I_{in} = \frac{N_1}{N_2} I_o \quad (2.30)$$

Rumus tersebut adalah rumus-rumus yang sebelumnya telah dibahas. Yaitu rumus perbandingan antara arus dan tegangan dengan jumlah lilitan pada bagian primer dan sekunder pada transformator. Dimana nilainya berbanding terbalik antara nilai arus dengan nilai jumlah lilitan sedangkan untuk nilai tegangan dengan jumlah lilitan berbanding lurus.

C. Perhitungan Inti dan Belitan Trafo Toroid

- Perhitungan untuk menentukan luas inti trafo toroid

$$CA = 1,152 \times \sqrt{P_{desain}} \quad (2.31)$$

$$CA = 1,152 \times \sqrt{P_{desain}}$$

$$= 1,152 \times \sqrt{1300}$$

$$= 41,53 = 42 \text{ cm}^2$$

Keterangan :

CA : Core Area/Luas inti trafo

P : Daya yang diinginkan

$$CA = \frac{(D_{out} - D_{in})}{2} \times t \quad (2.32)$$

$$CA = \frac{(D_{out} - D_{in})}{2} \times t$$

$$= \frac{(16 - 4,8)}{2} \times 7,5$$

$$= 42 \text{ cm}^2$$

Pada perhitungan diatas maka dihasilkan 42 cm^2 untuk luas inti trafo toroid yang akan dibutuhkan.

- Perhitungan jumlah gulungan per volt (GPV)

$$GPV = \frac{f}{A} \quad (2.33)$$

$$GPV = \frac{f}{A}$$

$$= \frac{50 \text{ Hz}}{42}$$

$$= 1,19 \text{ GPV}$$

Keterangan :

GPV = Gulungan Per Volt

F = Frekuensi (Hz)

V = Tegangan (Volt)

Hasil nilai GPV diatas tersebut akan digunakan untuk menghitung berapa banyak gulungan untuk menghasilkan nilai tegangan yang diinginkan pada transformator yang akan dibuat, yaitu seperti pada perhitungan berikut :

$$\text{Primer} = 220 \text{ V} \times 1,19$$

$$= 261,8 = 262$$

- Gulungan pada sisi primer trafo

$$\text{Sekunder} = 15 \text{ V} \times 1,19$$

$$= 17,85 = 18$$

- Gulungan pada sisi sekunder trafo

- Perhitungan jumlah kawat email

Sebelum menghitung jumlah kawat *email* yang dibutuhkan maka dari itu penting untuk menentukan panjang dari kawat *email* tersebut terlebih dahulu.

$$\text{Keliling inti} = (l + t) \times 2$$

$$= (3,75 + 7,5) \times 2$$

$$= 22,5 \text{ cm}$$

$$\begin{aligned} \text{Panjang Primer} &= 22,5 \times 262 \\ &= 5895\text{cm} = 59\text{m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Panjang Sekunder} &= 22,5 \times 18 \\ &= 405\text{cm} = 4,05\text{m} \end{aligned}$$

- Perhitungan berat kawat Email

$$\text{Berat} = \frac{\text{Volume (mm}^3\text{)} \times \text{berat jenis } \left(\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}\right)}{1000000}$$

$$\text{Berat kawat primer 0,5mm} = \frac{\left(\frac{3,14 \times 0,5^2}{4}\right) \times 5895 \times 8,93}{1000000} = 0,01\text{Kg} = 0,1\text{Ons}$$

$$\text{Berat kawat sekunder 1,5mm} = \frac{\left(\frac{3,14 \times 1,5^2}{4}\right) \times 22,5 \times 8,93}{1000000} = 0,0003\text{Kg} = 0,003\text{Ons}$$

5. ANALISIS DAN PEMBAHASAN

A. Proses Pembuatan Belitan

Desain trafo toroid yang diusulkan kemudian diimplementasikan di laboratorium. Gambar 6 menunjukkan hasil transformator yang diusulkan. Desain trafo didasarkan pada kebutuhan untuk aplikasi inverter satu fasa. Ukuran inverter 1 fasa yang umum di pasaran adalah berkisar 1000 W. Maka dari itu, ukuran trafo menyesuaikan level tegangan dan daya dari inverter. Spesifikasi inverter tersebut adalah :

- Input 12 Vdc
- Output 220 Vac
- Frekuensi 50 Hz
- Rated Power 1000 W



Gambar 6. Trafo yang sudah didesain

Dari spesifikasi diatas dapat disimpulkan bahwa tegangan 12 V baterai diubah terlebih dahulu oleh H-bridge inverter. Konversi 12 V dc oleh inverter menghasilkan tegangan skita 6-7 V rms AC. Maka dari itu, trafo toroid yang diusulkan mampu merubah tegangan dar 6-7 V menjadi 220 V.

B. Uji Karakteristik Trafo Toroid

Percobaan Uji karakteristik dari trafo yang didesain dilaksanakan di Laboratorium Elektronika Daya dan Kendali Motor Listrik. Terdapat 3 komponen yang dilaksanakan dalam uji karakteristik, yaitu uji beban-nol, hubung singkat dan DC test. Masing-masing komponen harus mampu menjawab spesifikasi desain yang telah direncanakan pada bab sebelumnya. berdasarkan data pada Tabel

1. Dapat diamati bahwa nilai rugi inti cukup kecil karena hasil dari percobaan uji beban nol, nilai daya aktif cukup kecil, dan dapat dipastikan bahwa angka 100 W didominasi oleh rugi-rugi belitan stator.

TABEL 1. HASIL UJI KARAKTERISTIK TOROID

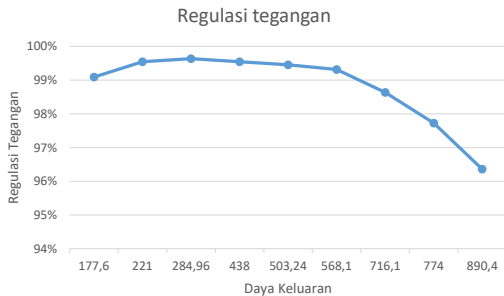
| | | |
|---------------------------|---|--------|
| No - Load Voltage (V) | = | 220 |
| No - Load Current (A) | = | 0,8 |
| No- Load Power (W) | = | 100 |
| Z | = | 275 |
| Active Power (VA) | = | 176 |
| Reactive Power (VAR) | = | 144,83 |
| Resistance | = | 156,25 |
| Reactance | = | 226,3 |
| Short-Circuit Test | | |
| Short-Circuit Voltage (V) | = | 42 |
| Short-Circuit Current (A) | = | 3,1 |
| Short-Circuit Power (W) | = | 100 |
| Z | = | 13,548 |
| Active Power (VA) | = | 130,2 |
| Reactive Power (VAR) | = | 83,38 |
| Resistance | = | 10,406 |
| Reactance | = | 8,6763 |
| DC Test | | |
| DC -Test Voltage (V) | = | 6,3 |
| DC - Test Current (A) | = | 0,5 |
| Resistance (ohm) | = | 6,3 |

C. Uji Efisiensi dan Regulasi Tegangan dengan Inverter EGS002

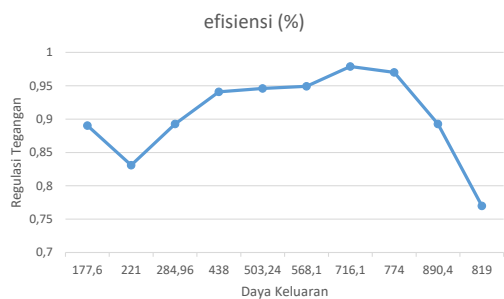
Uji pembebanan dilakukan dengan mengubungkan toroid dengan inverter satu fasa dengan pengendali EGS002. Pengendali tersebut bekerja berdasarkan IC SPWM EG8010. Spesifikasi yang diinginkan adalah dapat merubah tegangan dari kisaran 6-7 V AC menjadi 220 V AC. Hal tersebut hanya bisa dilakukan dengan menggunakan trafo. Hasil pengukuran regulasi tegangan, efisiensi dan bukti bahwa trafo dapat bekerja dengan baik pada sistem inverter, secara berturut-turut dapat diamati pada Gambar 7-9.

Berdasarkan performa regulasi tegangan, trafo yang didesain mampu memberikan regulasi tegangan yang cukup baik dimana dapat memenuhi standar PLN terkait nilai tegangan. Dari Gambar 7 dapat diamati bahwa seiring kenaikan beban maka tegangan output dari trafo menurun. Namun hal ini, masih terletak pada rentang nilai aman drop tegangan yakni tidak lebih dari 10 %. Kemudian nilai efisiensi dapat dilihat pada Gambar 8. Dapat diamati bahwa efisiensi terbaik dari trafo yang diusulkan terletak

pada nilai pembebanan sebesar 716 W. Hal tersebut salah satunya dipengaruhi dari keberadaan filter induktor. Karena semakin besar arus beban yang mengalir maka makin besar pula drop tegangan pada komponen induktor. Hal tersebut menyebabkan efisiensi dari trafo menurun bila beban lebih dari 716 W.



Gambar 7. Regulasi Tegangan dari trafo toroid



Gambar 8. Efisiensi dari trafo toroid



Gambar 9. Bukti Trafo Toroid dapat bekerja pada sistem inverter yang dimiliki

6. KESIMPULAN

Dari hasil desain dan implementasi trafo serta pembahasan diatas yang telah dilakukan, maka didapat kesimpulan sebagai berikut :

1. Pendekatan geometri inti dapat digunakan untuk mendesain trafo tanpa melibatkan alat komputasi yang canggih
2. Trafo toroid satu fasa yang diusulkan mampu diimplementasikan secara baik pada skala laboratorium
3. Berdasarkan hasil implementasi trafo toroid yang diusulkan maka dapat disimpulkan bahwa trafo dapat bekerja baik dengan bukti regulasi tegangan sesuai dengan standar, efisiensi puncak pada 716 W, serta mampu memberikan frekuensi 50 Hz pada keluaran inverter

Terima kasih atas dukungan baik material maupun moril dari UPT P2M polinema untuk dapat mewujudkan penelitian ini sebagai salah satu bentuk pengabdian penelitian pada bidang keilmuan terkait.

7. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Pranata. A, Joni. 2019. Analisis Efisiensi Trafo Toroid 5A Untuk Sistem Pengisi Baterai Pada Diameter Kawat Email Yang Berbeda
- [2] Hiroo Sekiya, et al., 2017, *Core Geometry Coefficient For Resonant Inductors*
- [3] Ekeke N., Et al., 2013, Practical Process In High Frequency Distribution Transformer Design
- [4] M Frivaldsky, et al, 2016, Design Methodology of a High-Frequency Transformers in Order to Increase Qualitative Indexes of Converters
- [5] A Plotkowski, et al., 2020, *Design and performance of an additively manufactured high-Si transformer core*
- [6] R. Pechánek1, L. Bouzek2. (2012). Analyzing of Two Types Water Cooling Electric Motors Using Computational Fluid Dynamics
- [7] Energy Efficiency in Electrical Utilities. (2004). Chapter 7, pg 135 - 151. 2004, from Bureau of Energy Efficiency, Ministry of Power, India
- [8] Installation, operation and maintenance manual. Squirrel cage motor WGM20. (2018). Brazil
- [9] Zuhail. (1991). Dasar Tenaga Listrik. ITB, Bandung. Hal : 68
- [10] Sumardjati, Prih. (2008). Teknik Pemanfaatan Tenaga Listrik Jilid 3. Hal : 408
- [11] Sumanto, Drs. (1993). Motor Listrik Arus Bolak-Balik. Yogyakarta.
- [12] Hanselman, Duane C. (2003). Brushless permanent magnet motor design 2nd ed : United States of America
- [13] Holdwell Generator Radiator. (2008). 120-669 120-672 for FG Wilson. United States of America
- [14] Remling John. (1981). Basics. John Willey & Son, Inc. New York.
- [15] Malcolm Barnes. (2003). Practical variable speed drives. Oxford, United Kingdom