

# Analisis Kurva Magnetisasi dan Karakteristik *Inrush Current* Akibat Pengaruh Cara Pemotongan Inti Transformator

I Made Yulistya Negara<sup>1</sup>, Daniar Fahmi<sup>2</sup>, Feby Agung Pamuji<sup>3</sup>, Arief Budi Ksatria<sup>4</sup>

Jurusan Teknik Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)  
Surabaya, Indonesia

arief10@mhs.ee.its.ac.id<sup>1</sup>, yulistya@ee.its.ac.id<sup>2</sup>, agung\_pamuji\_elits@yahoo.co.id<sup>3</sup>

**Abstract**—Telah banyak dilakukan studi mengenai fenomena *inrush current*. *Inrush current* merupakan fenomena yang terjadi pada saat transformator pertama kali diberikan sumber tegangan. *Inrush current* dapat dianalisa menggunakan kurva magnetisasi pada inti transformator. Pada studi ini, dilakukan simulasi menggunakan perangkat lunak untuk mengetahui pengaruh cara pemotongan inti transformator terhadap kurva magnetisasi. Sedangkan perhitungan matematis dilakukan untuk mendapatkan nilai puncak dari *inrush current*.

**Keywords**—Cara pemotongan; *inrush current*; inti transformator; kurva magnetisasi.

## I. PENDAHULUAN

Pada sistem tenaga listrik, transformator merupakan komponen yang sangat penting. Transformator merupakan peralatan yang dapat menaikkan dan menurunkan level tegangan. Secara sederhana, transformator terdiri dari kumparan primer, kumparan sekunder dan inti transformator.

Prinsip kerjanya dari transformator adalah tegangan arus bolak-balik pada belitan primer, menghasilkan arus listrik bolak-balik pada belitan primer. Arus tersebut menghasilkan fluks magnetik bolak-balik pada inti berbahan magnetik. Fluks magnetik bolak-balik menginduksi tegangan pada setiap belitan sekunder.

Ada beberapa jenis fenomena yang perlu diperhatikan pada transformator, salah satunya adalah *inrush current*. Fenomena *inrush current* di transformator telah diketahui sejak lama, dan telah didiskusikan di beberapa studi [1]-[6]. Fenomena magnetisasi *inrush current* di transformator pada saat *energization* menjadi masalah dalam desain dan performa dari proteksi rele differensial yang digunakan di transmisi sistem tenaga dan sistem distribusi. Kondisi tunak arus magnetisasi pada transformator mungkin hanya 1-2% dari arus rating, tapi itu bisa mencapai 10-20 kali arus rating ketika transformator dihubungkan dengan sumber tegangan [7]. Hal tersebut memerlukan koordinasi pengaman yang harus memperhatikan nilai *inrush current*. Fenomena *inrush current* dapat dianalisa dengan melihat kurva B-H pada inti besi transformator [8]. Kondisi tunak dan transien gelombang elektromagnetik pada operasi transformator 3 fasa sangat berbeda dari transformator 1 fasa dikarenakan interaksi fluks pada banyak lengan dan struktur

inti yang tidak simetris [9]. Besarnya saturasi magnet juga dipengaruhi oleh jarak sela udara pada bagian-bagian inti transformator dan penyambungan antar lapisan inti transformator [14].

Masalah yang dibahas dalam studi ini adalah bagaimana pengaruh cara pemotongan inti transformator terhadap kurva magnetisasi dan *inrush current*. Untuk melihat hal tersebut, menggunakan bantuan perangkat lunak. Perangkat lunak tersebut menggunakan metode *Finite-Element Method* atau *Finite-Element Analysis*. Masalah dalam studi ini dibatasi pada cara pemotongan inti transformator.

Sedangkan tujuan yang ingin dicapai dalam studi ini adalah untuk mengetahui pengaruh cara pemotongan inti transformator terhadap kurva magnetisasi dan *inrush current*.

Metode penelitian yang akan dilakukan dalam studi ini, yang pertama adalah studi literatur dan pengumpulan data mengenai cara pemotongan inti transformator. Langkah selanjutnya adalah menentukan parameter-parameter yang akan digunakan untuk simulasi dan evaluasi. Parameter-parameter simulasi dalam studi ini, antara lain: ukuran dari inti transformator, cara pemotongan inti transformator, tegangan yang diberikan pada belitan primer, arus belitan primer, dan jumlah lilitan. Setelah melakukan studi literatur dan menentukan parameter-parameter tersebut, langkah selanjutnya adalah melakukan pemodelan inti transformator dan disimulasikan dengan menggunakan perangkat lunak. Simulasi dilakukan untuk mendapatkan kurva magnetisasi. Sedangkan untuk mendapatkan nilai puncak dari *inrush current* dengan menggunakan perhitungan matematis [12]. Langkah yang terakhir yaitu menentukan kesimpulan serta evaluasi dari hasil yang diperoleh.

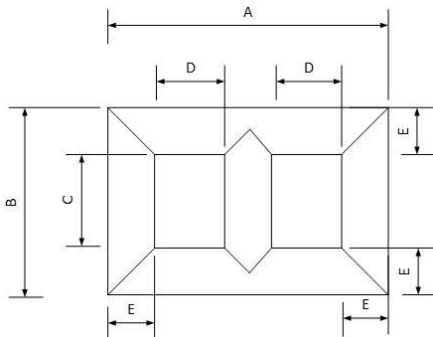
## II. PERMODELAN TRANSFORMATOR MENGGUNAKAN *FINITE-ELEMENT METHOD*

### A. Parameter-parameter transformator

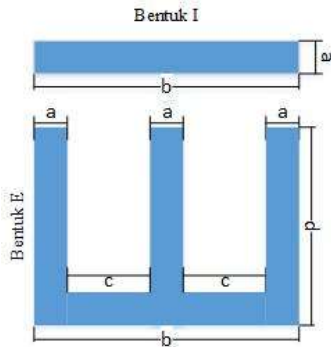
Pada studi ini, menggunakan transformator dengan spesifikasi pada tabel 1. Akan tetapi, transformator dengan spesifikasi tersebut dipotong dengan dua cara pemotongan yang berbeda. Inti transformator dengan cara potong A terdiri dari tiga komponen, yaitu yoke, leg dan center. Bentuk dan ukuran inti transformator dengan cara potong A dapat dilihat pada gambar

1 dan tabel 2. Sedangkan inti transformator dengan cara potong B terdiri dari dua komponen, yaitu bentuk E dan bentuk I. Bentuk dan ukuran inti transformator dengan cara potong B dapat dilihat pada gambar 2 dan tabel 3

|                         |                             |
|-------------------------|-----------------------------|
| Fasa                    | 3 Fasa                      |
| Daya Pada Trafo         | 100 KVA                     |
| Tegangan Primer         | 20.000 V                    |
| Tegangan Sekunder       | 400 V                       |
| Hubungan Belitan        | $\Delta / Y$                |
| Jumlah Belitan Primer   | 4763                        |
| Jumlah Belitan Sekunder | 50                          |
| Frekuensi               | 50 Hz                       |
| Dimensi slitter 1       | (616 x 545) cm <sup>2</sup> |
| Dimensi slitter 2       | (586 x 485) cm <sup>2</sup> |



Gambar 1. Inti transformator dengan cara potong A



Gambar 2. Inti transformator dengan cara potong B

Tabel 2 Ukuran inti transformator dengan cara potong A

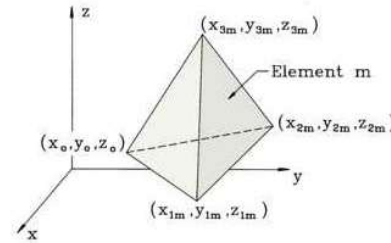
|   | Slitter 1 | Slitter 2 |
|---|-----------|-----------|
| A | 616 cm    | 586 cm    |
| B | 545 cm    | 485 cm    |
| C | 325 cm    | 325 cm    |
| D | 143 cm    | 173 cm    |
| E | 110 cm    | 80 cm     |

Tabel 3 Ukuran inti transformator dengan cara potong B

|   | Slitter 1 | Slitter 2 |
|---|-----------|-----------|
| A | 110 cm    | 80 cm     |
| B | 616 cm    | 586 cm    |
| C | 143 cm    | 173 cm    |
| D | 435 cm    | 405 cm    |

### B. Finite-Element Method

*Finite-Element Method* merupakan sebuah metode penyelesaian bilangan kontinu pada komputer. Hal tersebut disebabkan komputer tidak dapat menyelesaikan persamaan pada bilangan kontinu secara langsung. Sehingga suatu *volume* dibagi ke dalam bentuk *volume element / mesh* dalam jumlah yang banyak. Untuk mendapatkan sebuah kesatuan persamaan linear dalam jumlah besar yang dapat ditangani oleh komputer. Karena *volume* memiliki ukuran yang terbatas, maka disebut *finite-element method*. Ada beberapa macam bentuk *mesh* yang sering digunakan. Salah satunya adalah *tetrahedron*. *Tetrahedron mesh* merupakan sebuah bentuk tiga dimensi yang terdiri dari empat buah *vertex*. Masing-masing *volume* menghasilkan bentuk *tetrahedron* yang berbeda.

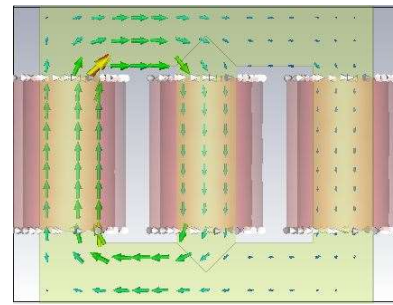


Gambar 3. Mesh yang disusun oleh tetrahedron

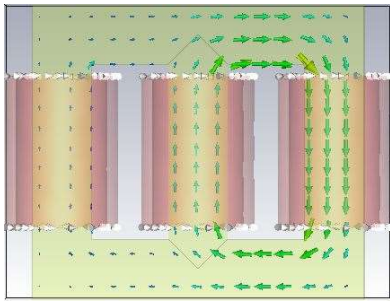
### III. KURVA MAGNETISASI DAN INRUSH CURRENT DI BEBERAPA TITIK INTI TRANSFORMATOR

#### A. Kurva Magnetisasi

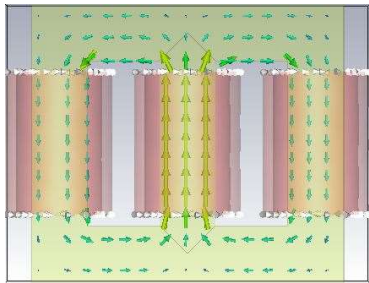
Studi ini membahas mengenai cara pemotongan inti transformator. Dengan menggunakan dua cara pemotongan yang berbeda akan dibandingkan hasil kurva magnetisasi pada titik yang sama.



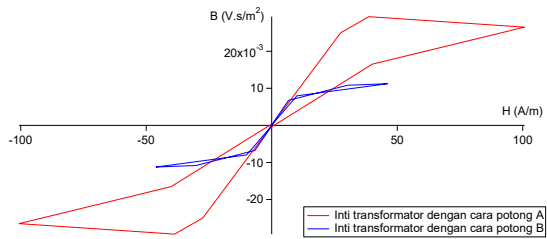
Gambar 4. Distribusi kerapatan fluks magnet 0°.



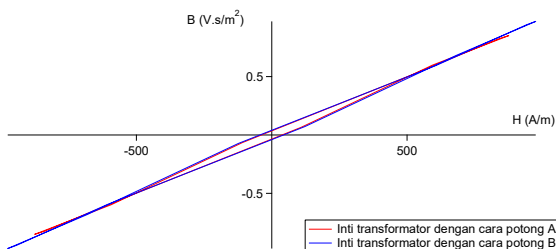
Gambar 5. Distribusi kerapatan fluks magnet 60°.



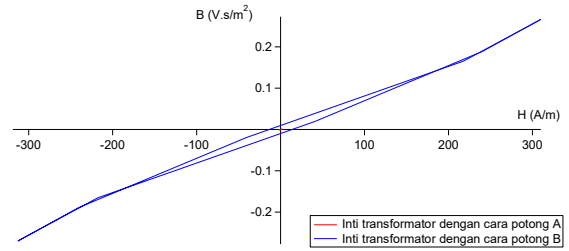
Gambar 6. Distribusi kerapatan fluks magnet 120°.



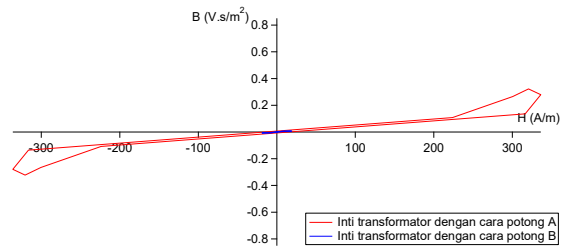
Gambar 7. Kurva magnetisasi pada titik A (-198; 162.5; 37.5)



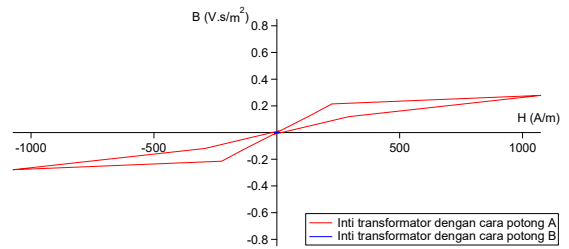
Gambar 8. Kurva magnetisasi pada titik B (-253; 217.5; 37.5).



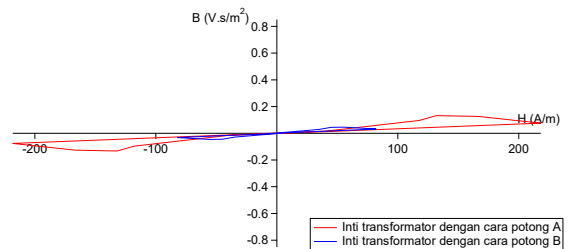
Gambar 9. Kurva magnetisasi pada titik C (-308; 272.5; 37.5).



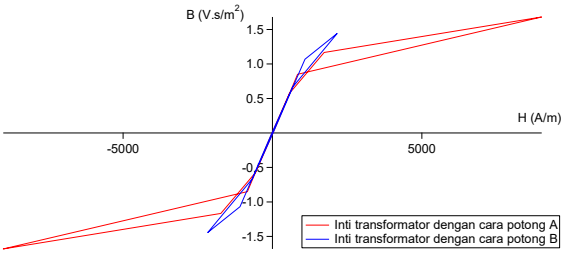
Gambar 10. Kurva magnetisasi pada titik D (0.0; 162.5; 37.5).



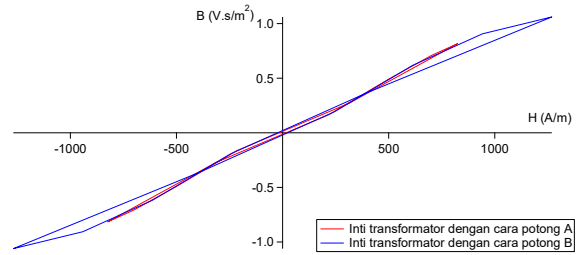
Gambar 11. Kurva magnetisasi pada titik E (40; 162.5; 37.5).



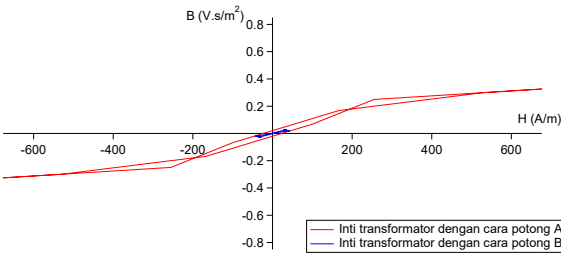
Gambar 12. Kurva magnetisasi pada titik F (4.233; 141.3; 37.5).



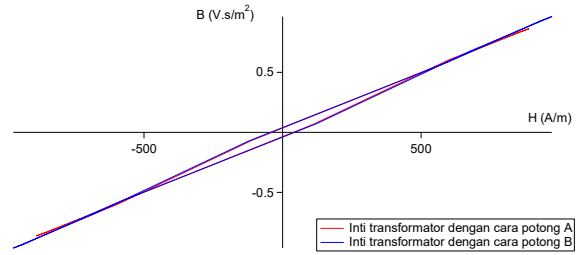
Gambar 13. Kurva magnetisasi pada titik G (55; -162.5; 37.5)



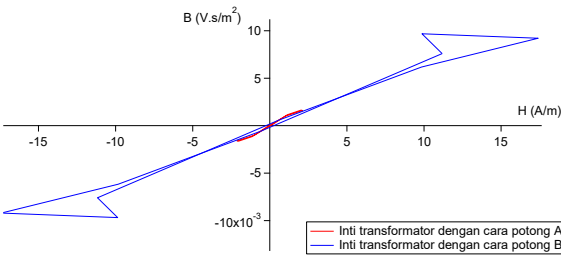
Gambar 17. Kurva magnetisasi pada titik K (253; 217.5; 37.5).



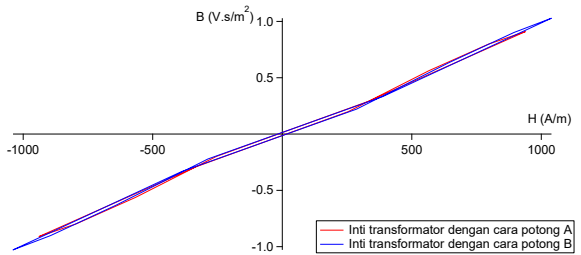
Gambar 14. Kurva magnetisasi pada titik H (-253; 162.5; 37.5).



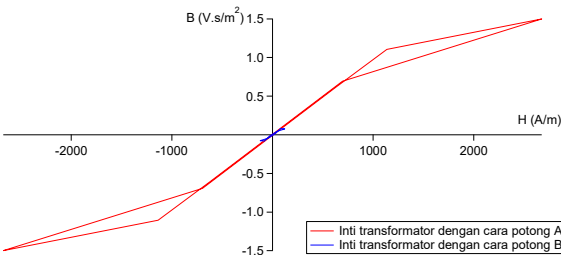
Gambar 18. Kurva magnetisasi pada titik L (-253; -217.5; 37.5).



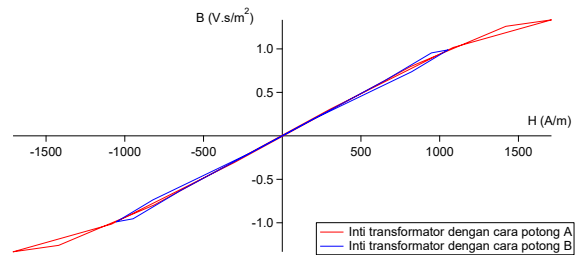
Gambar 15. Kurva magnetisasi pada titik I (-308; 162.5; 37.5).



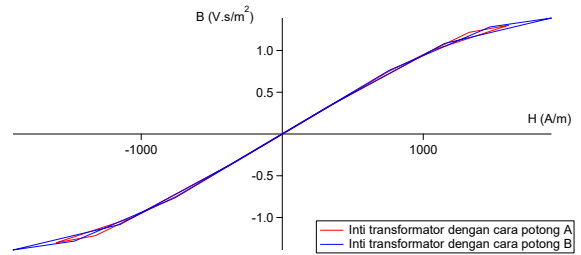
Gambar 19. Kurva magnetisasi pada titik M (253; -217.5; 37.5).



Gambar 16. Kurva magnetisasi pada titik J (198; 162.5; 37.5).



Gambar 20. Kurva magnetisasi pada titik N (0; 217.5; 37.5).



Gambar 21. Kurva magnetisasi pada titik O (0; -217.5; 37.5).

Tabel 4 Perbandingan nilai  $B_{max}$  (V.s/m<sup>2</sup>)

| Titik yang diamati     | Inti Transformator |               | Ideal   |
|------------------------|--------------------|---------------|---------|
|                        | Cara potong A      | Cara potong B |         |
| A (-198; 162.5; 37.5)  | 0.029              | 0.01123       | 0.03    |
| B (-253; 217.5; 37.5)  | 0.85               | 0.97          | 0.8     |
| C (-308; 272.5; 37.5)  | 0.00094            | 0.27          | 0.00022 |
| D (0.0; 162.5; 37.5)   | 0.322              | 0.00824       | 0.232   |
| E (40; 162.5; 37.5)    | 0.2785             | 0.0044        | 0.5     |
| F (4.233; 141.3; 37.5) | 0.1326             | 0.0458        | 0.126   |
| G (55; -162.5; 37.5)   | 1.68               | 1.4428        | 0.04    |
| H (-253; 162.5; 37.5)  | 0.326              | 0.0288        | 0.333   |
| I (-308; 162.5; 37.5)  | 0.00164            | 0.00968       | 0.0016  |
| J (198; 162.5; 37.5)   | 1.498              | 0.08          | 0.042   |
| K (253; 217.5; 37.5)   | 0.816              | 1.06          | 0.77    |
| L (-253; -217.5; 37.5) | 0.863              | 0.96          | 0.833   |
| M (253; -217.5; 37.5)  | 0.9                | 1.028         | 0.8     |
| N (0; 217.5; 37.5)     | 1.33               | 0.98          | 1.29    |
| O (0; -217.5; 37.5)    | 1.3                | 1.388         | 1.28    |
| P (150; 200; 37.5)     | 1.45               | 1.43          | 1.448   |
| Q (-150; 200; 37.5)    | 1.58               | 1.56          | 1.58    |
| R (150; -200; 37.5)    | 1.45               | 1.43          | 1.449   |
| S (-150; -200; 37.5)   | 1.58               | 1.6           | 1.568   |
| T (-55; 162.5; 37.5)   | 0.136              | 0.04356       | 0.48    |

Dari tabel 4, inti transformator dengan cara potong A memiliki nilai  $B_{max}$  pada titik G (55; -162.5; 0). Inti transformator dengan cara potong A memiliki nilai  $B_{max}$  sebesar 1.68 (V.s/m<sup>2</sup>). Sedangkan pada inti transformator dengan cara potong B memiliki nilai  $B_{max}$  pada titik S (-150; -200; 37.5) sebesar 1.6 (V.s/m<sup>2</sup>). Sehingga inti transformator dengan cara potong A lebih baik, karena dapat menghasilkan jumlah fluks yang lebih banyak.

Inti transformator dengan cara potong A, dapat menghasilkan jumlah fluks yang lebih banyak pada titik-titik berikut: A (-198; 162.5; 37.5), D (0.0; 162.5; 37.5), E (40; 162.5; 37.5), F (4.233; 141.3; 37.5), H (-253; 162.5; 37.5), J (198; 162.5; 37.5), N (0; 217.5; 37.5), P (150; 200; 37.5), Q (-150; 200; 37.5), R (150; -200; 37.5), T (-55; 162.5; 37.5).

Sedangkan pada inti transformator dengan cara potong B, dapat menghasilkan jumlah fluks yang lebih banyak pada titik-titik berikut: B (-253; 217.5; 37.5), C (-308; 272.5; 37.5), G (55; -162.5; 37.5), I (-308; 162.5; 37.5), K (253; 217.5; 37.5), L (-253; -217.5; 37.5), M (253; -217.5; 37.5), O (0; -217.5; 37.5), S (-150; -200; 37.5).

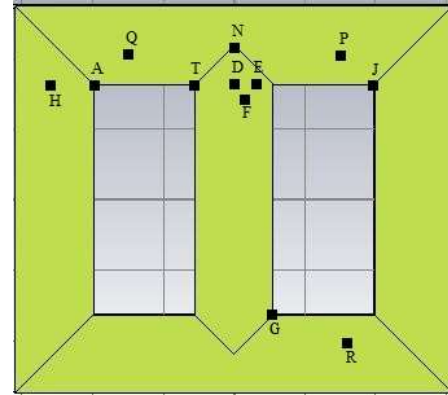
Nilai  $B_{max}$  pada inti transformator dengan cara potong A lebih mendekati nilai  $B_{max}$  pada inti transformator tanpa dipotong. Sehingga lebih baik menggunakan inti transformator dengan cara potong A.

**B. Inrush Current**

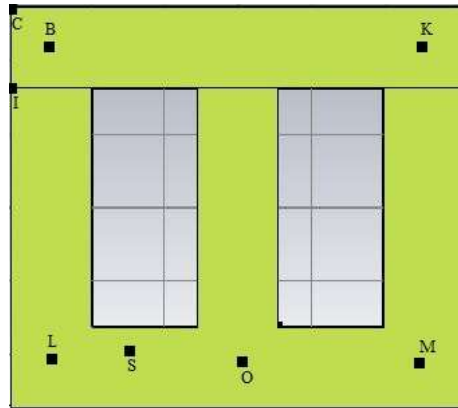
*Inrush Current* merupakan proses energize pada transformator saat pertama kali digunakan. Sehingga *inrush current* dapat dianalisa dengan menggunakan kurva magnetisasi

pada saat keadaan tanpa beban. Untuk mendesain sistem proteksi, besarnya nilai maksimal *inrush current* merupakan sebuah faktor penting. Maka nilai puncak dari *inrush current* dapat dilihat sesuai persamaan [12], yaitu:

$$i_{peak} = \frac{\sqrt{2}Vm}{\sqrt{(\omega.L)^2 + R^2}} \left( \frac{2.B_N + B_R - B_S}{B_N} \right) \quad (1)$$



Gambar 22. Letak titik pada inti transformator dengan cara potong A yang memiliki jumlah fluks lebih banyak



Gambar 23. Letak titik pada inti transformator dengan cara potong B yang memiliki jumlah fluks lebih banyak

Dimana  $Vm$  adalah tegangan maksimum yang terpasang,  $L$  adalah induktansi pada inti transformator,  $R$  adalah resistansi pada inti transformator,  $B_N$  adalah kerapatan fluks normal,  $B_R$  adalah kerapatan fluks sisa,  $B_S$  adalah kerapatan fluks pada saat saturasi. Nilai  $Vm$  dan impedansi didapatkan dari *open-circuit test*.

Dari tabel 5, pada inti transformator dengan cara potong A mengakibatkan nilai puncak dari *inrush current* yang terbesar berada pada titik N (0; 217.5; 37.5) yaitu sebesar 72.78 A. Sedangkan pada inti transformator dengan cara potong B mengakibatkan nilai puncak dari *inrush current* yang terbesar berada pada titik O (0; -217.5; 37.5) yaitu sebesar 77.77 A. Sehingga lebih baik menggunakan inti transformator dengan cara potong A. Karena menghasilkan nilai puncak dari *inrush current* yang lebih kecil.

Tabel 5 Perbandingan nilai puncak dari *inrush current*

| Titik yang diamati     | Inti Transformator |               | Ideal   |
|------------------------|--------------------|---------------|---------|
|                        | Cara potong A      | Cara potong B |         |
| A (-198; 162.5; 37.5)  | 0.34 A             | 0.138 A       | 0.22 A  |
| B (-253; 217.5; 37.5)  | 46.66 A            | 52.4 A        | 23.25 A |
| C (-308; 272.5; 37.5)  | 0.215 A            | 14.48 A       | 0.25 A  |
| D (0.0; 162.5; 37.5)   | 6.45 A             | 0.268 A       | 4.54 A  |
| E (40; 162.5; 37.5)    | 4.24 A             | 0.235 A       | 7.6 A   |
| F (4.233; 141.3; 37.5) | 3.65 A             | 1.11 A        | 1.359 A |
| G (55; -162.5; 37.5)   | 21.6 A             | 19.16 A       | 0.46 A  |
| H (-253; 162.5; 37.5)  | 6.6 A              | 0.3 A         | 6.34 A  |
| I (-308; 162.5; 37.5)  | 0.215 A            | 0.035 A       | 0.229 A |
| J (198; 162.5; 37.5)   | 4.49 A             | 0.046 A       | 0.04 A  |
| K (253; 217.5; 37.5)   | 1.7 A              | 2.48 A        | 22.87 A |
| L (-253; -217.5; 37.5) | 2.34 A             | 2.49 A        | 24.1 A  |
| M (253; -217.5; 37.5)  | 48.69 A            | 57.28 A       | 23.71 A |
| N (0; 217.5; 37.5)     | 72.78 A            | 55.21 A       | 38.97 A |
| O (0; -217.5; 37.5)    | 71.3 A             | 77.77 A       | 38.71 A |
| P (150; 200; 37.5)     | 42.87 A            | 43.4 A        | 29.48 A |
| Q (-150; 200; 37.5)    | 46.4 A             | 47.3 A        | 32.03 A |
| R (150; -200; 37.5)    | 42.868 A           | 43.4 A        | 29.47 A |
| S (-150; -200; 37.5)   | 46.4 A             | 48.48 A       | 31.66 A |
| T (-55; 162.5; 37.5)   | 1.79 A             | 0.4 A         | 6.6 A   |

#### IV. KESIMPULAN

Inti transformator dengan menggunakan cara potong A lebih baik daripada inti transformator dengan menggunakan cara potong B. Karena dengan menggunakan cara potong A, mampu menghasilkan jumlah fluks yang lebih banyak dan nilai puncak dari *inrush current* yang lebih kecil. Cara potong A mampu menghasilkan jumlah fluks yang mendekati jumlah fluks yang dihasilkan oleh inti transformator yang tanpa dipotong. Contohnya pada titik I (-308; 162.5; 37.5), dengan cara potong A menghasilkan fluks sebesar 0.00164 (V.s/m<sup>2</sup>). Sedangkan inti transformator yang tanpa dipotong menghasilkan fluks sebesar 0.0016 (V.s/m<sup>2</sup>). Sedangkan dengan cara potong B menghasilkan fluks sebesar 0.00968 (V.s/m<sup>2</sup>).

#### REFERENCES

- [1] C. E. Lin, C. L. Cheng, C. L. Huang, and J. C. Yeh, "Investigation of magnetizing inrush current in transformers. II. Harmonic analysis," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 8, no. 1, pp. 255-263, Jan. 1993.
- [2] C. E. Lin, C. L. Cheng, C. L. Huang, and J. C. Yeh, "Investigation of magnetizing inrush current in transformers. I. Numerical simulation," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 8, no. 1, pp. 246-254, Jan. 1993.
- [3] K. Yabe, "Power differential method for discrimination between fault and magnetizing inrush current in transformers," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 12, no. 3, pp. 1109-1118, Jul. 1997.
- [4] P. L. Mao and R. K. Aggarwal, "A novel approach to the classification of the transient phenomena in power transformers using combined wavelet transform and neural network," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 16, no. 4, pp. 654-660, Oct. 2001.
- [5] J. J. Rico, E. Acha, and M. Madrigal, "The study of inrush current phenomenon using operational matrices," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 16, no. 2, pp. 231-237, Apr. 2001.
- [6] A. A. Adly, "Computation of inrush current forces on transformer windings," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 37, no. 4, pp. 2855-2857, Jul. 2001.
- [7] PAUL C . Y. LING and AMITAVA BASAK, "Investigation of Magnetizing Inrush Current in a Single-phase Transformer," *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*. VOL 24. NO 6, NOVEMBER 1988.
- [8] Shin-Der Chen, Ray-Lee Lin, and Chih-Kun Cheng, "Magnetizing Inrush Model of Transformers Based on Structure Parameters," *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, VOL. 20, NO. 3, JULY 2005.
- [9] Paul S. Moses, Mohammad A. S. Masoum, and Moayed Moghbel, "Effects of Iron-Core Topology on Inrush Currents in Three-Phase Multi-Leg Power Transformers," *IEEE 978-1-4673-2729-9/12/\$31.00* ©2012.
- [10] Bhag S. Guru, and Hiiseyin R. Hiziroglu, "*Electric Machinery and Transformers*", Oxford University Press, New York, Third Edition, 2001.
- [11] William H. Hayt, Jr., and John A. Buck, "*Engineering Electromagnetics*", The McGraw-Hill Companies, Sixth Edition, 2001.
- [12] M. Jamali, M. Mirzaie, and S. Asghar Gholamian, "Calculation and Analysis of Transformer Inrush Current Based on Parameters of Transformer and Operating Conditions," ISSN 1392-1215 ©2011.
- [13] Stanley Humphries, Jr., "Finite-element Methods for Electromagnetics," New Mexico, January 2010.
- [14] M. Khelil, and M. Elleuch, "Modelling of the Air-Gaps of Overlapped Joints in Tree-Phase Transformer Iron core for using by FEM," 6<sup>th</sup> International Multi-Conference on Systems, Signal and Devices ©2009.