

## PERHITUNGAN DAN ANALISIS INRUSH CURRENT PADA TRANSFORMATOR BERBASIS PARAMETER TRANSFORMATOR

Ir. Mohammad Arief, MT,  
Dosen STT. Yuppentek Tangerang  
e-mail: ariefjdisk659@yahoo.com

### Abstrak

*Inrush current adalah arus transient dengan amplitude tinggi yang terjadi pada saat transformator daya diberikan power (dienergized). Besar amplitudonya bisa 5.6 kali arus normalnya., waktu transient ini kurang dari 60 ms. Lonjakan arus masuk pada saat transformator daya energized dapat menyebabkan gangguan dan kerusakan pada komponen sistem lainnya. Makalah ini menjelaskan metode analisis yang akurat yang dapat digunakan untuk menemukan lonjakan arus masuk arus dalam transformator 3 fasa yang umum digunakan. Metode ini merupakan perpanjangan dari yang sebelumnya dijelaskan untuk menghitung lonjakan arus dalam transformator fasa tunggal. Metode ini sangat kuat karena arus dan pembusukannya dapat dihitung selama banyak siklus, bukan hanya puncak pertama, seperti yang dimungkinkan oleh metode lainnya. Perbandingan dilakukan antara koneksi transformator yang berbeda dan diilustrasikan dengan contoh numerik. Ini menunjukkan, misalnya, bahwa hambatan pada netral dari transformator yang terhubung dengan bintang memiliki sedikit efek dibandingkan dengan menggunakan hambatan yang sama secara seri dengan gulungan berenergi.*

**Kata kunci :** *Inrush current, Transformer, Effect derajat (sudut) switching , Effect fluks remanen, Effect resistansi sumber.*

### Pendahuluan.

Magnetisasi lonjakan arus didalam transformer adalah hasil dari setiap perubahan mendadak dari tegangan magnetisasi. Lonjakan arus dalam transformator ini missal saat pemberian energy kembali transformator setelah terjadinya pelepasan beban saat terjadinya gangguan eksternal, pemulihan tegangan setelah membebaskan gangguan eksternal dan keluarnya tegangan dari sinkronisasi generator terhubung [1-2]. Karena amplitudo lonjakan arus masuk ini bisa setinggi gangguan short circuit . Analisis rinci tentang magnetisasi lonjakan arus masuk dalam berbagai kondisi diperlukan untuk melakukan setting proteksi transformator. Dalam hal ini, beberapa metode numerik dan analitis sudah ada dalam literatur. Dalam persamaan [3], mengungkapkan perhitungan analitis untuk fluks magnetik transformator tiga fase tanpa beban yang bisa digunakan melakukan perhitungan lonjakan arus an. Dalam persamaan [4], adalah solusi analitis dari dua persamaan diferensial yang mengatur perilaku transformator, fluks magnetik dan lonjakan arus masuk dapat ditentukan.

Untuk pemodelan inti transformator termasuk histeresis, [5] digunakan Teori Jiles-Atherton dan menyajikan algoritma baru pada contoh transformator . Dalam persamaan [6], menyajikan formula analitis untuk menghitung puncak lonjakan arus masuk, arus induktor nonlinier dengan resistor seri. Dalam rumusan ke [7], sebuah model sederhana periode lonjakan arus masuk arus transien. Model ini dikembangkan dari parameter struktural transformator. Untuk menghindari malfungsi dari sistem proteksi di bawah magnetizing arus masuk saat ini, banyak penelitian dilakukan untuk diskriminasi arus masuk arus dari kesalahan internal arus. Misalnya, pada [8-10], arus masuk sekarang adalah didiskriminasi dari arus sesar internal pada posisi kedua kriteria harmonis Untuk diskriminasi arus ini, [11] menggunakan jumlah daya aktif yang mengalir ke transformator dari setiap terminal Dalam [12], sebuah kriteria fungsi dalam hal perbedaan amplitudo atau wavelet koefisien didefinisikan. Kemudian dengan menggunakan kriteria ini berfungsi selama tiga fase, gangguan internal internal dibedakan dengan terjadinya lonjakan arus star.. Dalam tulisan ini, pertama, dasar arus masuk arus masuk dan rumus yang digunakan untuk perhitungan itu, adalah disajikan. Kemudian transformator satu fasa disimulasikan MATLAB dan efek variasi sudut switching,

### Teori dasar Inrush current.

Kita diketahui bahwa transformator akan mengalami lonjakan arus (inrush) magnetisasi saat energized. Inrush current ini terjadi pada transformator kapan jika fluks sisa (residu) tidak sama dengan nilai sesaat dari fluks steady-state yang biasanya diperlukan untuk titik tertentu pada bentuk gelombang tegangan di mana sirkuit ditutup [13] Untuk penjelasan tentang mekanisme yang menyebabkan lonjakan arus dalam gulungan utama

transformator saat terhubung ke sumber tegangan AC, kami mempertimbangkan (1), di mana  $\lambda$  dan  $v$  adalah fluks sesaat di inti transformator dan jatuh tegangan pada gulungan primer, masing-masing

$$v = \frac{d\lambda}{dt} \quad (1)$$

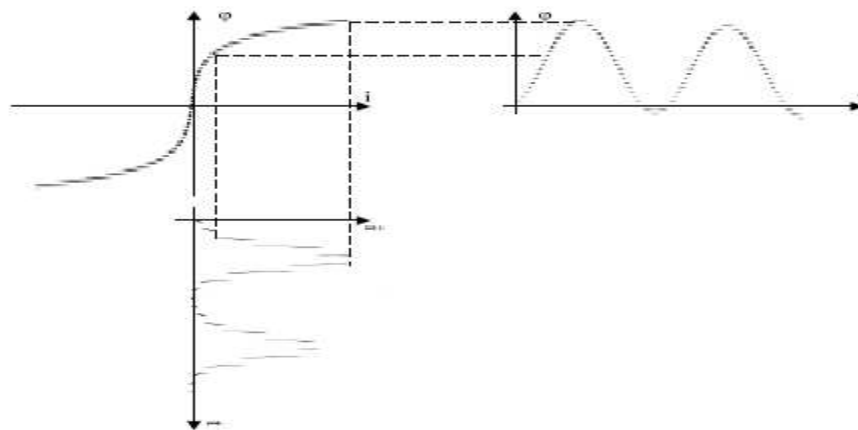
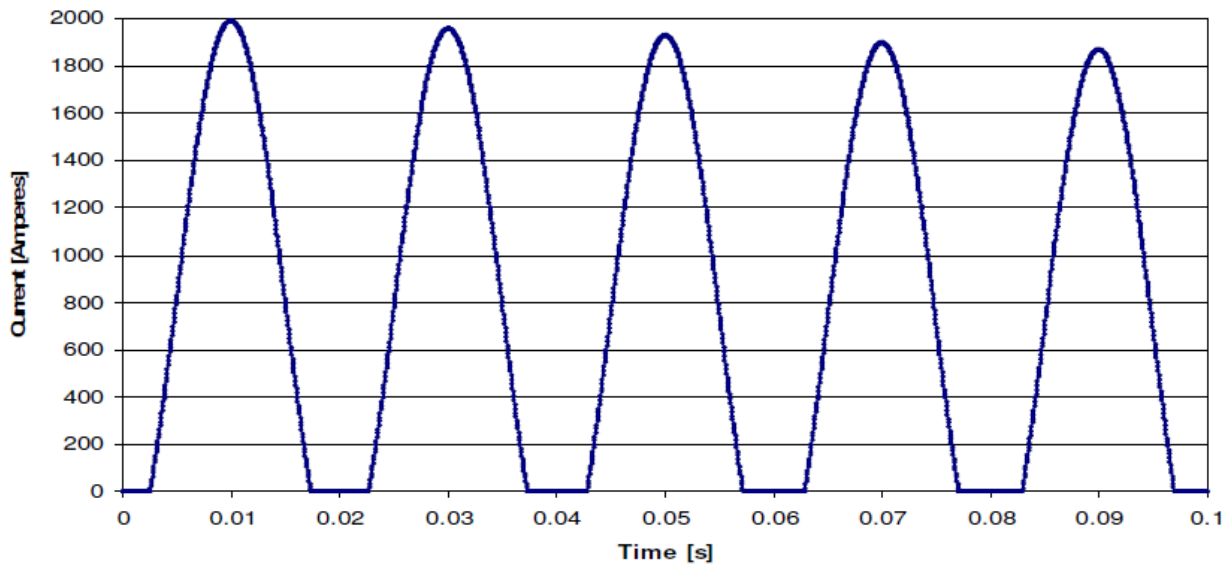
Seperti yang kita lihat dari persamaan (1), tingkat perubahan Fluks sesaat didalam inti transformator sebanding dengan penurunan tegangan sesaat pada gulungan primer atau dari sisi lain dimana bentuk gelombang flux adalah integral dari bentuk gelombang tegangan. Pada transformator yang beroperasi kontinyu, kedua bentuk gelombang ini digeser  $90^\circ$ .



Gambar 1. Transformator 20/0.4 KV, 50 Hz, 800 KVA oil immersed,

Ada perbedaannya sangat signifikan antara transformator yang telah beroperasi kontinyu dengan mode pada saat energized. Selama transformator beroperasi kontinyu, tingkat fluks berada pada puncak negatifnya saat tegangannya berada pada titik nol, tapi selama energized fluks harus mulai dari nol. Jadi, untuk naik tegangan baru mulai dari nol, fluks magnetik akan mencapai kira-kira dua kali lipatnya. Puncak normal karena menyatukan area di bawah tegangan setengah siklus gelombang pertama.

Jumlah fluks ini, karena dari karakteristik nonlinier dari kurva magnetisasi, menyebabkan kejenuhan transformator. Selama kejenuhan, jumlah mmf yang tidak proporsional dibutuhkan untuk menghasilkan fluks magnet. Ini berarti arus yang berkelok-kelok, yang mana menciptakan mmf untuk menyebabkan fluks di inti, akan secara tidak proporsional naik ke nilai dengan mudah melebihi dua kali lipatnya puncak normal. Gambar 2 menunjukkan generasi arus masuk arus dalam transformator. Seperti yang terlihat dari gambar, melebihi fluks 18 dari titik lutut, menghasilkan arus magnetisasi besar bahwa dalam beberapa keadaan bisa sepuluh kali nilai arus dalam transformator.



Gambar 2. Lonjakan arus masuk dalam transformator

Persamaan umum yang memberikan amplitude Arus masuk saat ini sebagai fungsi waktu dapat dinyatakan sebagai (2)

$$i(t) = \frac{\sqrt{2} V_m}{Z_t} * K_w * K_s * \left( \sin(\omega t - \varphi) - e^{-\frac{(t-t_0)}{\tau}} \cdot \sin \alpha \right), \quad (2)$$

dimana :  $V_m$  = adalah tegangan maksimum

$Z_t$  = impedansi total pada saat inrush ;  $\varphi$  = sudut energized;  $t$  = waktu;  $t_0$  = waktu pada saat inti jenuh;  $\tau$  = konstanta waktu transformator berkelok-kelok di bawah kondisi inrush;  $\alpha$  = fungsi dari  $t_0$ ;  $K_w$  = menyumbang koneksi lilitan 3 fasa;  $K_s$  = konstanta untuk hubungan arus pendek jaringan.

Untuk tujuan merancang sistem pelindung untuk transformator, nilai puncak lonjakan arus masuk adalah faktor penting. Dalam kasus ini, persamaan yang disederhanakan bisa digunakan untuk menghitung nilai puncak dari siklus pertama arus masuk sekarang Persamaan ini adalah sebagai berikut

$$i_{peak} = \frac{\sqrt{2} V_m}{\sqrt{(\omega \cdot L)^2 + R^2}} \left( \frac{2 \cdot B_N + B_R - B_S}{B_N} \right), \quad (3)$$

$V_m$  = tegangan yang digunakan, Volts

$L$  = inductance udara pada inti transformer, dalam Henry

$R$  = Total resistance dc pada belitan transformator, dalam Ohms

$B_R$  = Kerapatan fluk remanent flux inti transformator, dalam Tesla

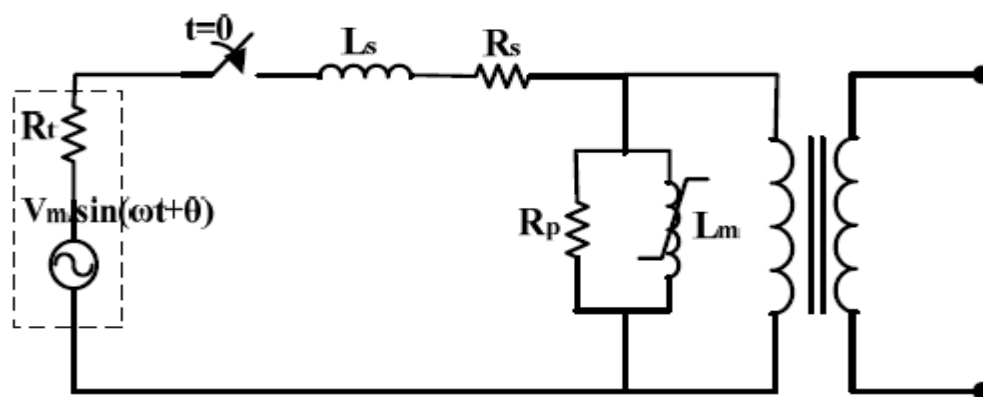
$B_S$  = Kerapatan fluks material inti transformator pada kondisi jenuh, dalam Tesla

$B_N$  = Kerapatan fluks inti transformator pada kondisi normal, dalam Tesla

Hasil simulasi

Bila transformator diberi energi tanpa beban atau Kondisi ringan, arus masuk arus dapat mengalir di sirkuit utama Dalam situasi ini, rangkaian ekuivalen dari transformator dapat ditunjukkan pada Gambar 3 dimana  $R_s$ ,  $L_s$ ,  $R_p$ ,  $L_m$  dan  $R_t$  adalah resistansi seri, induktansi seri, kerugian inti resistansi, induktansi magnetisasi dan resistansi sumber masing-masing.

Untuk mengetahui efek beberapa parameter dari transformator atau jaringan pada arus masuk arus yang khas transformator, transformator 120 VA, 60 Hz, (220/120) V dengan parameter tersebut disajikan pada [4], dipilih. Itu parameter rangkaian ekuivalen transformator ini mengacu pada gulungan 220V ditunjukkan pada Tabel 1.



Gambar 3. Rangkaian ekivalen transformator pada keadaan tanpa beban

**Table 1. Parameters of the simulated transformer**

Parameter	$R_s$ ( $\Omega$ )	$L_s$ (mH)	$R_p$ ( $\Omega$ )
Value	15.476	12	7260

Juga, kurva magnetisasi transformator adalah diberikan di (4) di mana  $i$  dan  $\lambda$  adalah magnetisasi arus dan fluks masing-masing

$$i(\lambda) = (63.084 \times 10^{-3}) \sinh(2.43\lambda). \quad (4)$$

Perlu dicatat bahwa persamaan (5) - (8) digunakan untuk hitung harmonik fundamental dan kedua komponen arus masuk arus, dimana  $N$ ,  $T$  dan  $f$  adalah bilangan sampel pada setiap siklus, periode dan frekuensi sistem tenaga listrik, masing-masing. Juga,  $m$  menunjukkan fundamental dan komponen kedua dengan angka 1 dan 2, masing-masing. Tingkat sampling 30 kHz telah digunakan di Indonesia kertas ini:

$$a_m = \sum_{n=1}^N \frac{2}{T} \left( \int_{t_n}^{t_{n+1}} i_n \cdot \cos(m \cdot 2\pi f \cdot x) dx \right), \quad (5)$$

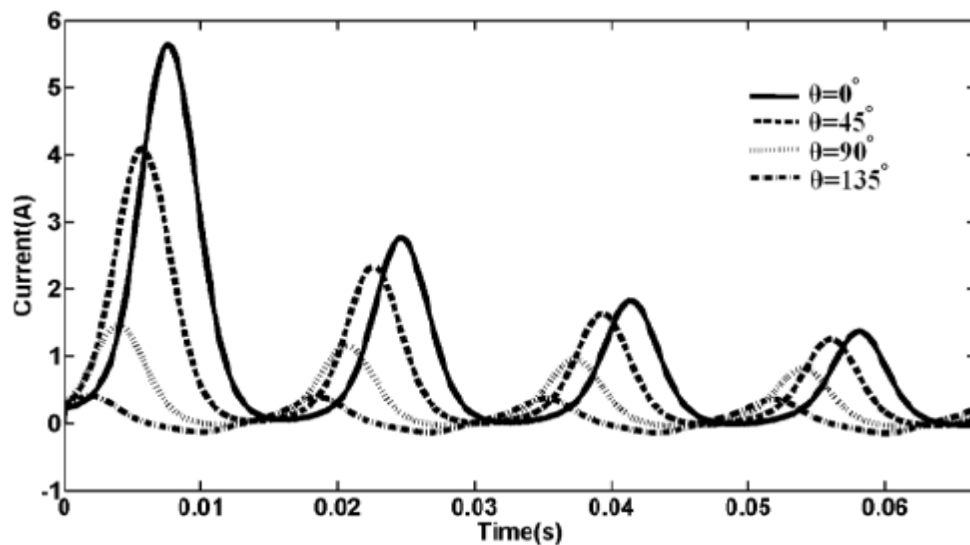
$$b_m = \sum_{n=1}^N \frac{2}{T} \left( \int_{t_n}^{t_{n+1}} i_n \cdot \sin(m \cdot 2\pi f \cdot x) dx \right), \quad (6)$$

$$c_m = \sqrt{a_m^2 + b_m^2}, \quad (7)$$

$$\%2ndHarmonic = \frac{c_2}{c_1} \times 100. \quad (8)$$

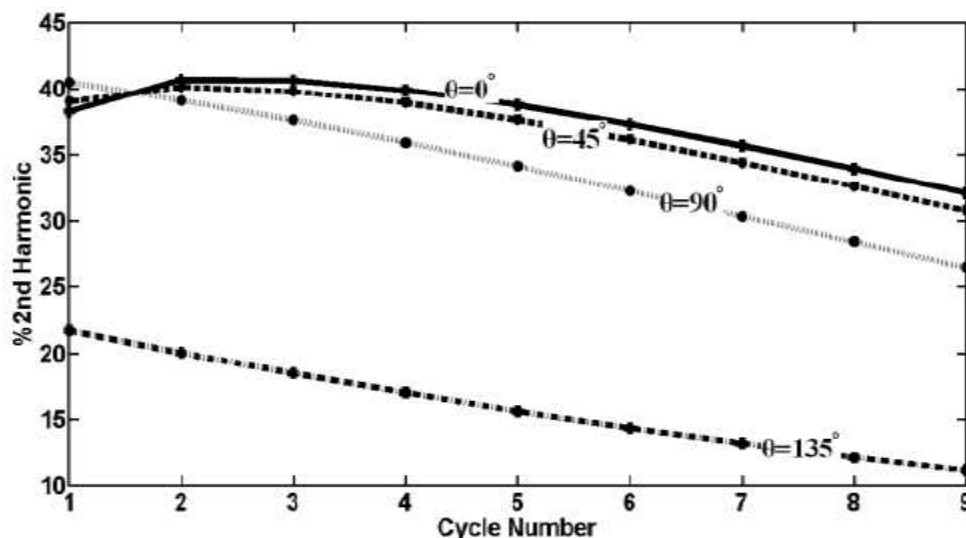
### Efek derajat (sudut) switching

Pada bagian ini, efek variasi sudut switching pada karakteristik arus masuk sekarang telah diselidiki. Fluks remanen (Br) untuk semua switching sudutnya adalah 0,826 Wb-coil. Resistansi sumbernya dianggap nol. Gambar 4 menunjukkan efek dari sudut switching yang berbeda ( $\theta$ ) pada amplitudo arus masuk arus. Seperti yang terlihat dari gambar, amplitudo tertinggi arus masuk arus masuk pada  $0^\circ$  yaitu 5,52A. Selain itu, bisa dilihat, Peningkatan sudut switching akan menurun amplitudo arus masuk saat ini.



Gambar 4. Pengaruh variasi sudut perpindahan pada amplitudo

Lonjakan arus masuk terdapat kandungan harmonis kedua dari arus masuk saat ini adalah ditunjukkan pada Gambar 5. Seperti yang terlihat dari gambar ini, peningkatan sudut switching menyebabkan penurunan persentase harmonik kedua.

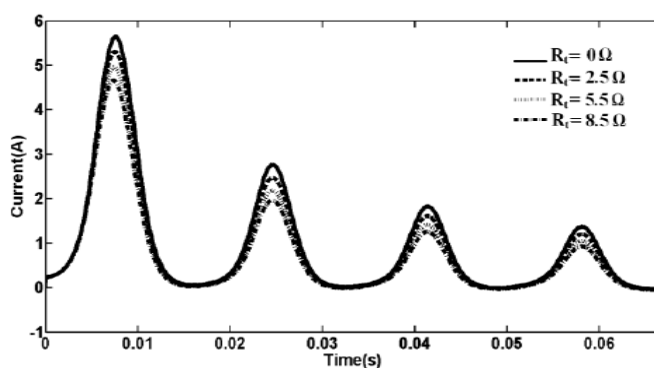


Gambar 5. Pengaruh perpindahan sudut dalam persentase detik

Harmonis Perlu dicatat bahwa, meskipun, tertinggi Amplitudo arus masuk arus muncul pada siklus pertama dan kemudian meluruh, tapi persentase tertinggi kedua harmonis tidak selalu muncul pada siklus pertama. Untuk misalnya seperti yang terlihat dari Gambar 3 dan Gambar 4, pada  $\theta = 90^\circ$ , keduanya amplitudo dan persentase harmonisa kedua telah menurun dengan siklus yang meningkat, namun pada  $\theta = 0^\circ$ , walaupun amplitudo arus masuk saat ini telah menurun, namun harmonik kedua pertama meningkat dan kemudian menurun. Ini penting saat menggunakan konten harmonik kedua Kendalikan operasi relay selama magneting inrush kondisi.

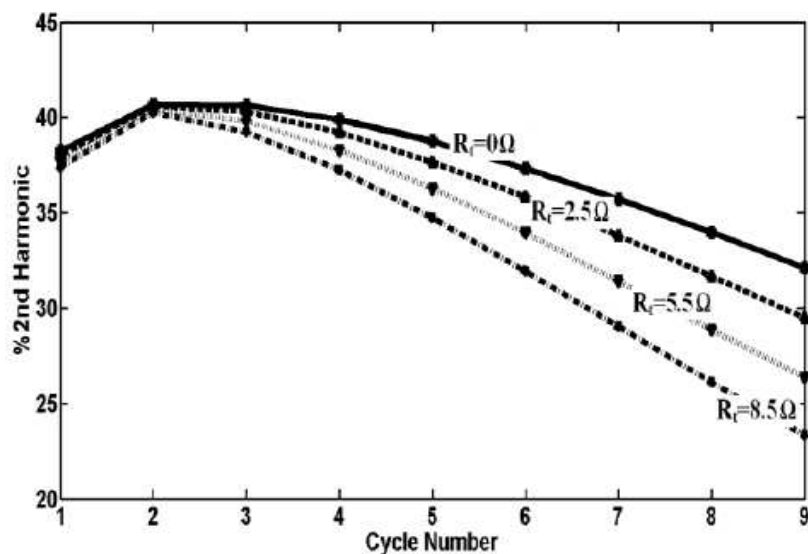
#### Efek dari resistansi sumber

Dalam kasus ini, sudut switching ( $\theta$ ) adalah  $0^\circ$ . Juga Fluks remanen ( $B_r$ ) sama dengan bagian sebelumnya. Efek dari resistansi sumber itu telah dipertimbangkan oleh meningkatkan  $R_t$ . Gambar 6 menunjukkan efek resistansi sumber pada amplitudo arus masuk saat ini. Seperti yang terlihat dari gambar, Peningkatan resistansi sumber akan menurunkan amplitudo arus masuk sekarang Juga, hal itu menyebabkan pembusukan lebih cepat dalam amplitudo dari arus masuk saat ini Karena itu, bisa dikatakan begitu transformator terletak dekat dengan tampilan pembangkit jumlah arus masuk yang lebih tinggi yang bertahan lebih lama dari pada transformator terpasang secara elektrik dari generator.



Gambar 6. Pengaruh resistansi sumber terhadap amplitudo inrush Arus

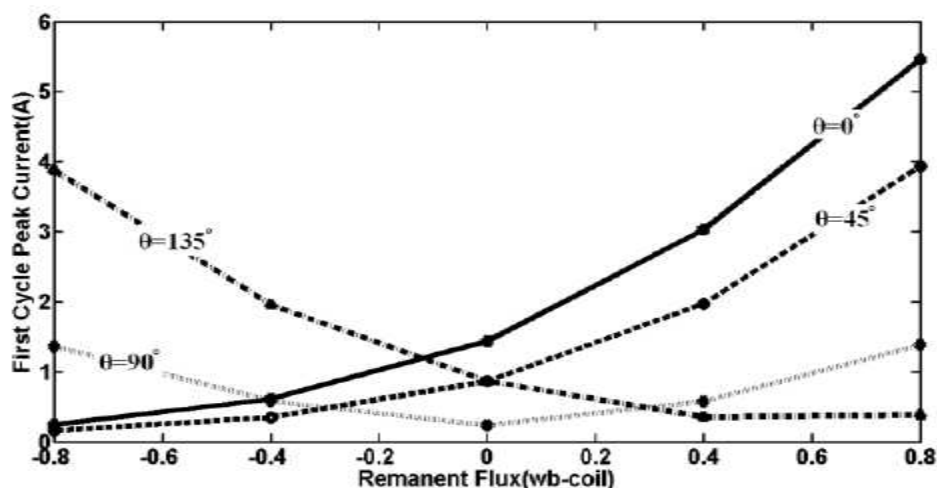
Pengaruh resistansi sumber dalam persentase harmonik kedua telah ditunjukkan pada Gambar 7. Hasilnya Tunjukkan bahwa jumlah persentase harmonik kedua akan berkurang dengan meningkatkan resistansi sumber.



Gambar 7. Pengaruh resistansi sumber dalam persentase harmonic ke dua

#### Efek dari fluks remanen

Efek fluks remanen pada puncak siklus pertama arus pada sudut switching yang berbeda ditunjukkan pada Gambar 8. As Dilihat dari gambar, arus puncak siklus pertama sudah besar berubah saat fluks remanen bervariasi. Juga hasilnya menunjukkan bahwa peralihan pada  $\theta = 90^\circ$  atau  $Br = 0$  mungkin tidak tentu mengurangi besarnya arus masuk arus masuk. Jadi untuk mengurangi arus masuk arus masuk, sudut switching yang sesuai dengan Mengingat fluks remanen harus dipilih. Kesimpulan dalam tulisan ini, pengaruh beberapa parameter terhadap karakteristik arus inrush dihitung dan disimulasikan dengan MATLAB Simulink.



Gambar 8. Pengaruh fluks remanen pada arus puncak siklus pertama

Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan sudut switching pada sebuah fluks remanen positif atau resistansi sumber akan menurunkan amplitudo arus inrush. Telah ditunjukkan itu terjadinya harmonik kedua terbesar mungkin belum tentu muncul pada siklus pertama. Pengaruh fluks remanen terhadap Siklus puncak pertama saat ini menunjukkan bahwa ia memiliki perubahan besar Saat fluks remanen bervariasi. Juga, sudah disimpulkan bahwa untuk mengurangi arus masuk arus masuk, switching yang tepat sudut dengan mempertimbangkan fluks remanen, harus dipilih.

Dari perhitungan rumusan diatas, maka arus inrush yang terjadi pada trafo 800 KVA, jika diberikan tegangan antar phasanya 20000 Volt, adalah sebesar  $5.6 \times 23.094 = 129.3$  Amper pada 0.01 detik pertama, pada detik

0.025 besarnya lonjakan arus turun menjadi  $3 \times 23.094 = 69.3$  Amper, kemudian turun lagi pada detik ke 0.04 menjadi  $1.8 \times 23.094 = 41.5$  A, kemudian turtun lagi pada detik ke 0.06 menjadi  $1 \times 23.094 = 23,94$  Amper, jadi pada detik ke 0.06 ini arus sudah dalam keadaan steady.

Dari analisa diatas maka perlu diperhitungkan setting proteksi pada incoming transformator daya 800 KVA ini sbb:

$(5.6 + 3 + 1.8 + 1)/4 = 2.84$  kali arus nominalnya, dengan waktu kurang dari 0.06 detik, atau secara mudahnya dilapangan dilakukan setting high set  $3 \times I_n$ , dengan waktu 0.1 detik.

#### Daftar Pustaka

**M. Jamali, M. Mirzaie, S. Asghar Gholamian**

*Department of Electrical and Computer Engineering, Babol University of Technology,*

*P. O. Box. 484, Shariaty Ave., Babol, Iran, calculation and analysis of transformer Inrush current based on parameters of transformer and operation condition.*

**Blume L. F.** Transformer Engineering. – New York: Wiley & Sons, 1951.

**Karsai K., Kerenyi D. and Kiss L.** Large power transformers. – New York: Elsevier, 1987.

**L. Andriušienė, P. Kostrauskas, D. Mikalajūnas.** *Determination of the Magnetic Fluxes of No-Load Three-Phase Power Transformer // Electronics and Electrical Engineering.* – Kaunas: Technologija, 2003. – No. 2(44). – P.43–47.

**Vanti M. G., Bertoli S. L.** *Semianalytic solution for a simple model of inrush currents in transformers // IEEE Trans. Magnetics.* – June, 2008. – Vol. 44. – No. 6. – P. 1270–1273.

**Vahidi B., Tavakoli M. R. B.** *An algorithm for evaluating inrush current in transformers using Jiles–Atherton theory offerromagnetic hysteresis // IEEE Conf. Tencon, Hong Kong.* – November, 2006. – P. 1–4.

**Wang Y., Abdulsalam S. G., Xu W.** *Analytical formula to estimate the maximum inrush current // IEEE Trans. Power Delivery.* – April, 2008. – Vol. 23. – No. 2. – P. 1266–1268.

**Chen S. D., Lin R. L.** *Magnetizing inrush model of transformers based on structure parameters // IEEE Trans. Power Delivery.* – July, 2005. – Vol. 20. – No. 3. – P. 1947–1954.

**Sykes J. A., Morrison I. F.** *A proposed method of harmonic restraint differential protecting of transformers by digital computer // IEEE Trans. Power App. Systems.* – May, 1972. – Vol. PAS-91. – No. 3. – P. 1266–1272.

**Kasztenny B., Kulidjian A.** *An improved transformer inrush restraint algorithm increases security while maintaining fault response performance // 53rd Annual Conference for Protective Relay Engineers.* – April, 2000. – P. 1–27.