

PREVISÃO DAS CORRENTES DO NÚCLEO DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

MARCO ANTONIO FERREIRA FINOCCHIO^{1*}; JULIA LOPES DE OLIVEIRA²; THALE MENDES BARBOSA³; MÁRCIO MENDONÇA⁴

¹Me. LABSIEE, UTFPR, Cornélio Procópio-PR, mafinocchio@utfpr.edu.br

²Graduanda em Engenharia Elétrica, UTFPR, Cornélio Procópio-PR, oliveira@hotmail.com

³Graduando em Engenharia Elétrica, UTFPR, Cornélio Procópio-PR, thales.mb@hotmail.com

⁴Dr. Pesquisador, UTFPR, mendonca@utfpr.edu.br

Apresentado no
Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC'2016
29 de agosto a 2 de setembro de 2016 – Foz do Iguaçu, Brasil

RESUMO: Este trabalho apresenta uma análise empírica aplicada às correntes do núcleo de transformadores. Verificando a possibilidade de determinar estas correntes por meio de equações padrões. Este estudo teve como base a medição das correntes de excitação, magnetização e do ferro que foram analisadas comparadas com valores obtidos diretamente por métodos de ensaio. Através da comparação dos resultados foi possível validar as equações devido aos baixos erros apresentados.

PALAVRAS-CHAVE: Correntes do núcleo, Excitação, Magnetização, Ferro, Transformadores.

ESTIMATED CURRENT POWER TRANSFORMER CORE

ABSTRACT: This paper presents an empirical analysis applied to current core transformers. Checking the possibility of determining these chains through standards equations. This study was based on measuring the excitation current, magnetization and iron were analyzed compared with values obtained directly from test methods. By comparing the results it was possible to validate the equations due to low presented errors.

KEYWORDS: Current core, Excitement, magnetization, Iron, Transformers.

INTRODUÇÃO

O transformador é um instrumento usado para registrar ou mudar a energia elétrica de um nível de tensão para outro, seja superior ou inferior, mantendo a frequência constante, por meio da ação de um campo magnético (CHAPMAN, 2012).

Este equipamento é constituído por duas ou mais bobinas, as quais também podem ser chamadas de enrolamentos, e por um circuito magnético responsável pelo acoplamento dessas bobinas. Esse circuito magnético é denominado de núcleo, sendo este composto por um material ferromagnético, que possui a função de produzir um caminho de baixa relutância para o fluxo gerado.

O núcleo possui várias características, entre estão as correntes de excitação, magnetização e do ferro. A corrente de excitação é responsável por suprir as perdas do núcleo e por produzir o fluxo magnético, sendo este fluxo mantido pela circulação constante da corrente de magnetização. Essas propriedades serão analisadas por meio de um estudo estatístico para o desenvolvimento de um método simples e prático para que as mesmas possam ser determinadas sem a necessidade da realização de ensaios, de modo que possa ser gerando uma economia para as empresas e indústrias, uma vez que cada ensaio tem um custo de cerca de R\$1000,00. Informação disponibilizada pelas empresas de transformadores, que forneceram os dados de 100 transformadores para cada uma das 15 potências.

Com certeza um profissional da área elétrica se depara com um transformador elétrico. Por conta disto são comuns situações, às vezes emergenciais, na qual é necessário realizar ensaios para obter os valores das características do núcleo. Porém, tais ensaios são dispendiosos e levam tempo.

Pelo fato do núcleo representar características do transformador, como as suas correntes. Torna-se necessário formular uma maneira prática de se determinar estes valores.

Uma forma de resolver este problema é desenvolver equações, que possibilitem a previsão destas correntes do transformador de forma empírica, porém precisas.

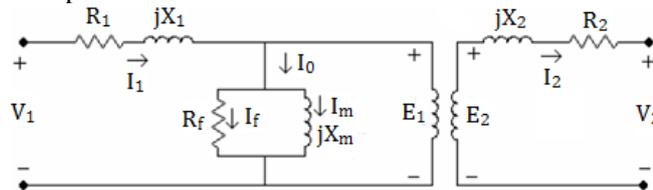
FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O transformador funciona com base nos princípios eletromagnéticos da Lei de Faraday e da Lei de Lenz. Segundo a Lei de Faraday, sempre que uma tensão alternada for aplicada ao enrolamento primário, um fluxo alternado no circuito magnético será produzido, o qual irá induzir uma tensão no enrolamento secundário. Para esta situação, a Lei de Lenz determina que a força eletromotriz e a corrente induzida no secundário são tais que as linhas de força geradas contrariam o fluxo magnético estabelecido pelo primário (FITZGERALD, KINGSLEY, UMANS, 2006).

É possível construir um circuito equivalente que leve em consideração todas as principais imperfeições existentes em um transformador real. Cada imperfeição deve ser considerada separadamente e seus efeitos são incluídos no modelo do mesmo.

O circuito equivalente completo é representado na Figura 1 (NASAR, 1998).

Figura 1. Circuito equivalente completo do transformador.



A corrente de excitação, também conhecida como corrente em vazio I_0 , tem a função de suprir as perdas do núcleo e de produzir o fluxo magnético mútuo. Considerando estes aspectos, esta corrente divide-se em duas outras, a corrente no ferro I_f e a corrente magnetizante I_m , e I_f é a responsável pelas perdas no núcleo e está em fase com a tensão aplicada sobre o transformador primário V_1 , enquanto que I_m é responsável pela criação do fluxo mútuo e se encontra 90° atrasada em relação a tensão aplicada ao primário (LISITA, 2000).

O núcleo de grão orientado é o mais utilizado na fabricação de transformadores. Atualmente, as chapas possuem um teor de silício de 2,2% a 3,2%, sendo que as chapas são fabricadas com espessuras de no máximo 0,35mm, com o tamanho médio do grão sendo 0,5mm de diâmetro, ou seja, há apenas um grão na espessura da chapa. Esse tipo de aço é o mais utilizado nos transformadores por privilegiar uma direção preferencial de magnetização (LANDGRAF, 2012).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente deve-se determinar, para que se possam analisar as correntes de excitação e magnetização que circulam pelo núcleo (as perdas). Estas perdas são determinadas pelo ensaio a vazio. Neste ensaio, a queda de tensão na impedância de dispersão, gerada pela corrente de excitação, é desprezível (DEL TORO, 1999).

A estatística consiste na ciência que se preocupa com a coleta, organização, análise e interpretação de dados, visando à tomada de decisões (LARSON, FARBER, 2009).

Quanto ao erro relativo, ele permite a comparação entre uma estimativa e um valor real como uma porcentagem do valor real. Para isso, faz-se uso da Equação (1).

$$E_{\%} = \frac{|I_m - I_r|}{I_r} \cdot 100\% \quad (1)$$

Onde $E_{\%}$ é o Erro relativo percentual da grandeza, e I_m vem a ser valor da corrente estimado ou medido, e I_r é o valor da corrente real ou exato.

Pela característica da população, optou-se trabalhar com um grupo amostral de 1500 transformadores. A classe de transformadores a óleo que foi utilizada para a coleta de dados possui potências de 15kVA a 3MVA. Por motivos de objetividade, não será mostrado o resultado passo a passo de todo o estudo estatístico, e sim, o resultado final, que mostra o valor médio das correntes dos transformadores, e o erro relativo. A Tabela 1 são apresentados os valores, sendo a primeira coluna a potência, nas colunas 2, 4, 5 e 6, os valores médios das correntes nominais, de excitação, magnetização e do ferro, respectivamente e, na coluna 3, a porcentagem da corrente de excitação em relação à corrente nominal. Para os transformadores com potência de 30kVA, por exemplo, tem-se os valores de aproximadamente 2,95A para a corrente de excitação, 1,56A para a corrente de magnetização e 1,39A para a correntes do ferro.

Tabela 1. Valores médios das correntes obtidas por análise estatística.

P [kVA]	I_n [A]	$I_n\%$	I_o [A]	I_m [A]	I_f [A]
15	39,36479	11,12409	4,378974	2,142326	2,236647
30	78,72958	3,746946	2,949955	1,556794	1,39316
45	118,0944	1,982585	2,341321	1,291587	1,049734
75	196,824	0,899102	1,749965	1,020799	0,729166
112,5	295,2359	0,470442	1,388913	0,846901	0,542012
150	393,6479	0,299478	1,178887	0,741798	0,437089
225	590,4719	0,15846	0,93566	0,615429	0,320231
300	787,2958	0,100874	0,794173	0,539053	0,255121
500	1312,16	0,045237	0,593586	0,426037	0,167549
750	1968,24	0,023936	0,471118	0,35346	0,117658
1000	2624,319	0,015237	0,399877	0,309595	0,090283
1500	3936,479	0,008062	0,317375	0,256854	0,060521
2000	5248,639	0,005132	0,269383	0,224977	0,044405
2500	6560,799	0,003616	0,237214	0,203003	0,034211
3000	7872,958	0,002716	0,213804	0,186651	0,027152

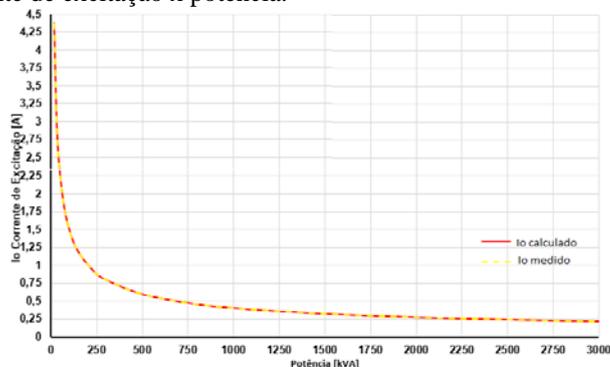
A Tabela 2 representam os valores das correntes e das potências coletados por ensaios.

Tabela 2. Valores médios das correntes obtidas por meio do ensaio.

P [kVA]	I_n [A]	$I_n\%$	I_o [A]	I_m [A]	I_f [A]
15,06	39,52225	11,05459	4,369022	2,138391	2,230632
30,54	80,14671	3,643461	2,920114	1,544054	1,37606
45,27	118,8029	1,964053	2,333352	1,288033	1,04532
75,23	197,4275	0,884838	1,746914	1,01936	0,727554
112,58	295,1834	0,470573	1,389053	0,84697	0,542083
150,17	394,094	0,298946	1,178127	0,741411	0,436716
225,23	591,0755	0,158206	0,935115	0,61514	0,319976
300,45	788,4768	0,100636	0,793495	0,538681	0,254815
501,02	1314,837	0,045093	0,592897	0,425638	0,167259
750,31	1969,053	0,02392	0,471007	0,353393	0,117614
1001,12	2627,259	0,015211	0,399622	0,309435	0,090187
1500,86	3938,736	0,008055	0,317271	0,256786	0,060485
2000,43	5249,767	0,005131	0,26935	0,224955	0,044395
2501,85	6565,654	0,003611	0,237114	0,202934	0,034181
3000,17	7873,404	0,002715	0,213797	0,186647	0,02715

Neste caso, os valores medidos para os transformadores de 30kVA são de aproximadamente, 2,92A para a corrente de excitação, 1,54A para a corrente de magnetização e 1,38A para a corrente do ferro. Ao observar estas tabelas é possível notar que os valores obtidos pelos dois métodos são próximos. Essa análise está disposta por meio das Figuras de 2 a 5, plotados no Excel. A Figura 2 refere-se às correntes de excitação.

Figura 2. Valores da corrente de excitação x potência.



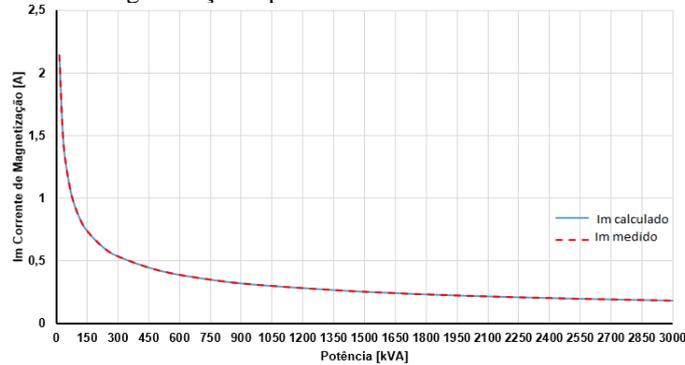
Como os valores obtidos estatisticamente e os obtidos por meio do ensaio são semelhantes, dificulta a distinção das curvas, por este motivo, fez-se uso do tracejado para as curvas que representam os valores medidos. Por meio da curva referente ao valor calculado é possível obter a Equação (2), que assim como as Equações (3) e (4), foram obtidas pelo do programa Excel.

$$I_o = 20,494 \cdot S^{-0,57} \quad (2)$$

Onde I_o é a corrente de excitação em [A] e S representa a potência em [kVA].

A Figura 3 é referente às correntes de magnetização e, assim como na figura anterior, os valores são próximos o suficiente para que se observe praticamente apenas uma curva.

Figura 3. Valores da corrente de magnetização x potência.



A Equação (3) obtida mediante este gráfico é:

$$I_m = 7,4575 \cdot S^{-0,461} \quad (3)$$

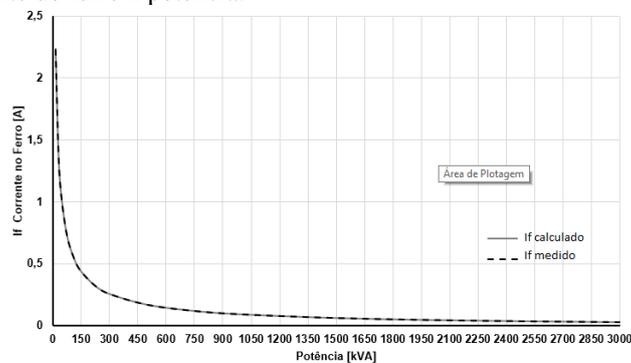
Onde I_m é a corrente de magnetização em [A] e S representa a potência em [kVA].

Na Figura 4, novamente, tem-se uma aproximação entre os valores obtidos. Sendo assim, os valores são próximos o bastante para que se possa fazer uso da Equação (4).

$$I_f = 25,262 \cdot S^{-0,827} \quad (4)$$

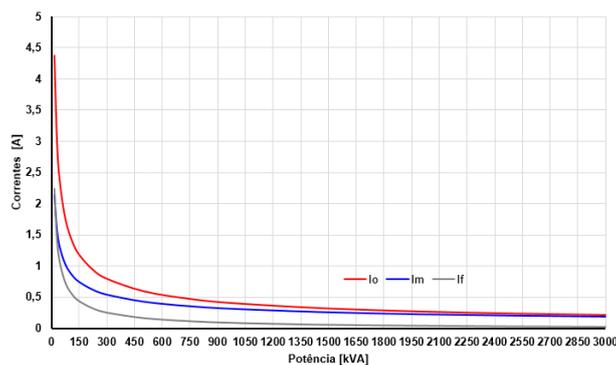
Onde I_f é a corrente do ferro em [A] e S representa a potência em [kVA].

Figura 4. Valores da corrente do ferro x potência.



Na Figura 5 têm-se as três correntes: de excitação, de magnetização e do ferro pelo método estatístico.

Figura 5. Valores das correntes do núcleo x potência.



As equações foram geradas a partir dos valores analisados estatisticamente. Sendo válidas para o grupo de transformadores, que o aço do núcleo é da Acesita, com um fluxo magnético de 1,5 a 1,8T.

Em relação ao erro relativo, este mostra mais uma comparação entre os valores estimados empiricamente e os medidos, o qual está exposto na Tabela 3.

Tabela 3. Erro relativo.

P[kVA]	E _{Io} %	E _{Im} %	E _{If} %
15	0,227764	0,184042	0,269679
30	1,021883	0,825092	1,242699
45	0,3415	0,275914	0,422314
75	0,174654	0,141134	0,221619
112,5	0,04052	0,032747	0,052667
150	0,064573	0,052185	0,085603
225	0,058244	0,047071	0,079723
300	0,085457	0,069062	0,120117
501	0,116209	0,093911	0,172952
750	0,023554	0,019036	0,037128
1000	0,063813	0,051572	0,105815
1500	0,03267	0,026404	0,059275
2000	0,012252	0,009902	0,02416
2500	0,042166	0,034078	0,090187
3000	0,003229	0,00261	0,007487

Os valores de todos os erros relativos são calculados pelas Equações (5), (6) e (7):

$$E_{Io}\% = \frac{|I_{om} - I_{or}|}{I_{or}} \cdot 100\% \quad (5)$$

$$E_{Im}\% = \frac{|I_{mm} - I_{mr}|}{I_{mr}} \cdot 100\% \quad (6)$$

$$E_{If}\% = \frac{|I_{fm} - I_{fr}|}{I_{fr}} \cdot 100\% \quad (7)$$

Observa-se que os valores são considerados insignificantes, pois a maior diferença percentual é de aproximadamente 1,24%, valor da corrente no ferro. Para as correntes de excitação e magnetização, os maiores erros registrados foram de 1,02% e 0,82%. Como observado na Tabela 3, esses valores são dos transformadores de 30kVA. Quanto aos outros transformadores os erros relativos foram inferiores a 0,3%.

CONCLUSÃO

Quanto aos transformadores elétricos, inúmeros ensaios são efetuados para comparar, conferir, determinar e analisar suas características. Este trabalho possibilitou reduzir a realização de ensaios para determinação das correntes do núcleo de forma rápida, para os supervisores de produção. As equações gerais tornaram possível calcular os valores das três correntes de interesse do núcleo, sem a necessidade de ensaios.

Os erros relativos das correntes apresentaram-se para todos os transformadores dentro de valores aceitáveis. Desse modo, para a finalidade de determinação dessas correntes do núcleo, é possível substituir os ensaios dispendiosos economicamente e cronologicamente, pelo uso de tais equações.

REFERÊNCIAS

- Chapman, S. J.. Fundamentals of electric machines. 5ª ed. Nova York: McGraw-Hill, 2012.
- Del Toro, V. Fundamentos de Máquinas Elétricas. 1ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 1999.
- Fitzgerald, A. E.; Kingsley Jr., Charles; Umans, Stephen D. Máquinas Elétricas: com introdução a Eletrônica de Potência. 6ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.
- Landgraf, Fernando J. G., Propriedades Magnéticas de Aços para fins Elétricos. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 2012.
- Larson, R.; FARBER, B. Estatística aplicada. 4a ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.
- Lisita, Luiz R., Conversão eletromecânica de energia. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia, 2000.
- Nasar, Syed A. Electric Machines & Electromechanic. 2ª ed ed. Nova York: McGraw-Hill, 1998.