

ANÁLISE EXPERIMENTAL EM TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS ASSIMETRICAMENTE MAGNETIZADOS

Luís C. O. de Oliveira José C. Rossi Júlio B. de Souza

Francisca A. C. Pires

Departamento de Engenharia Elétrica
Faculdade de Engenharia Elétrica - UNESP
Av. Brasil 56, Ilha Solteira, S.P.
E-mail: ORIGA@FEIS.UNESP.BR

Depto de Sistemas e Controle de Energia
Faculdade de Engenharia e Computação -
UNICAMP
E-mail: chica@dsce.fee.unicamp.br

Resumo - Neste trabalho são realizadas investigações experimentais em transformadores trifásicos do tipo, banco trifásico constituídos de unidades monofásicas e de núcleo envolvido, quando submetidos a excitações simultâneas em corrente alternada e corrente contínua, e considerando diferentes conexões dos seus enrolamentos. As análises e os resultados são baseados na determinação do conteúdo harmônico das correntes de excitação para diferentes níveis de saturação CC.

Palavras-chave - Magnetização Assimétrica; Transformadores

Abstract - In this paper are shown the results of the experimental investigations for no-load three-phase transformers bank and 3-phase core type under simultaneous alternating current and direct current excitations, and considering several connections of the windings. The results and analysis are based on the harmonic calculation of the exciting currents for the different dc saturation levels.

Keywords: Asymmetrical Magnetization; Transformers

1. INTRODUÇÃO

De um modo geral, não é uma prática comum considerar o transformador de potência como fonte harmônica em estudos de penetração harmônica. Existem entretanto, situações operativas onde os transformadores ficam sujeitos a excitações simultâneas em corrente alternada e corrente contínua, o que pode provocar a saturação assimétrica do meio magnético e alterar drasticamente sua corrente magnetizante. Sob estas condições operativas, estas correntes normalmente apresentam elevados valores de pico além de um substancial aumento do conteúdo harmônico [04].

Vários trabalhos tem abordado este assunto dando especial destaque à questão da geração de harmônicas com vistas a sua propagação pelo sistema alimentador.

Os transformadores trifásicos derivados de arranjos de unidades monofásicas foram parcialmente abordados em trabalhos anteriores. Devido a sua natureza construtiva, pode-se garantir uma total independência magnética entre as fases A, B, e C. Desta forma, apenas a conexão trifásica dos enrolamentos afeta os resultados da operação magneticamente assimétrica dos bancos de transformadores monofásicos. As correntes de excitação dos arranjos trifásicos são então obtidas,

apenas, pela composição das correntes de excitação de cada uma das unidades monofásicas, respeitando-se, naturalmente, o tipo de conexão empregada [03].

Nos sistemas elétricos de potência, sobretudo por razões econômicas, os transformadores são normalmente constituídos por unidades trifásicas com núcleos de três colunas. Embora os resultados obtidos para os bancos de monofásicos forneçam uma boa indicação do comportamento dos transformadores trifásicos sob dupla excitação c.a. e c.c., as situações magnéticas específicas encontradas com diferentes arranjos magnéticos devem ser individualmente considerado. Neste contexto, as publicações são escassas e em geral não focalizam especificamente o fenômeno da dupla excitação.

2. FENÔMENO DA MAGNETIZAÇÃO ASSIMÉTRICA

Quando ocorre um desbalanceamento magnético, motivado pela existência de um nível médio de fluxo superposto ao fluxo c.a. no núcleo, a característica de magnetização passa a ser tratada de forma assimétrica e a corrente de magnetização apresenta-se sensivelmente alterada.

A citada assimetria magnética ocorre, por exemplo, quando os transformadores alimentam

cargas cujas correntes de alimentação possuem níveis médios diferentes de zero. Nestas condições operativas, devido a impossibilidade física de se transferir sinais contínuos de corrente do secundário para o primário, ocorrem saturações assimétricas, resultantes da composição do fluxo convencional c.a. com um fluxo residual c.c.

3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os ensaios experimentais foram direcionados no sentido de se obter a forma de onda das correntes de excitação c.a., dos transformadores teste, para níveis de injeção de corrente contínua variando de 0 até 15% da corrente nominal. Este procedimento é aplicado para as diferentes conexões dos seus enrolamentos.

O experimento é conduzido com a ajuda de um sistema de aquisição de dados constituído de uma placa conversora A/D de 12 Bit e 100 kHz. O Software usado para a aquisição e análise dos sinais é o DasyLab 4.0.

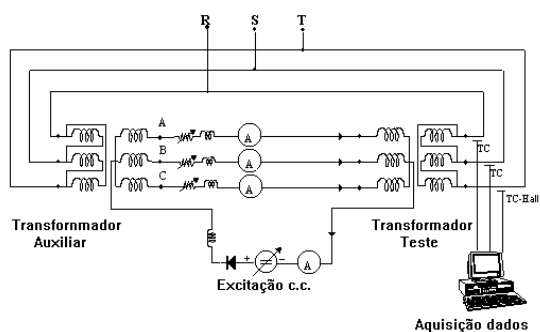


Fig. 1 - Arranjo experimental

No arranjo da figura 1, o lado dos enrolamentos primário dos dois transformadores foram conectados em paralelo e submetido a uma mesma excitação c.a. nominal, enquanto os lados secundários foram conectados entre si de forma a anular a tensão induzida c.a.. A fonte c.c. foi inserida no lado do enrolamento secundário entre os pontos de neutro para as conexões em estrela aterrada e na fase C para as conexões não aterradas.

Neste trabalho, procurou-se representar os casos típicos de injeção c.c. no qual os transformadores de potência podem ficar submetidos. No desenvolvimento a seguir, são então analisados três casos básicos de ocorrência de dupla excitação, para diferentes conexões dos enrolamentos do transformador.

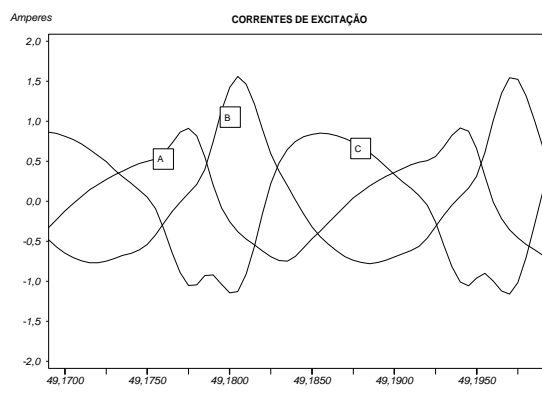
Caso A : Neste ensaio, admitiu-se um padrão de injeção de componente contínuas compatível com a operação não idealizada de instalações conversoras ou compensadoras estáticas do tipo reator controlado a tiristores. Nesta situação, por se tratarem de cargas isoladas, a soma das correntes

contínuas provenientes de operações assimétricas destes equipamentos é nula.

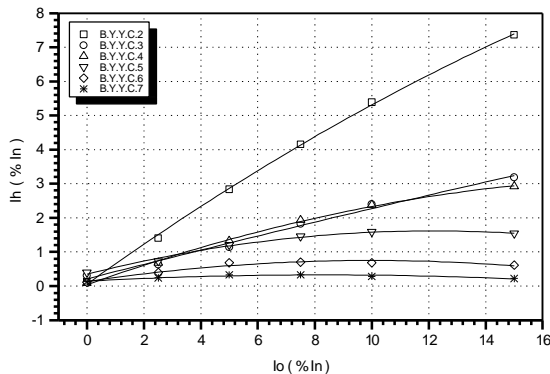
Considerando pois o exposto, foi adotado como base para o ensaio apresentado a seguir, os seguintes níveis de injeção c.c. (I_o), $I_{a0} = 30\% I_o$; $I_{b0} = 70\% I_o$; $I_{c0} = -100,0\% I_o$, na linhas A, B e C respectivamente, com I_o variando de 0 a 15% da corrente nominal do transformador.

Nos casos ilustrados a seguir, apresenta-se graficamente apenas as formas de onda das correntes de excitação nas linhas para o caso particular de $I_o = 10\% I_n$.

Conexão Y/Y: Para o banco trifásico, com esta conexão, e sem excitação c.c. ($I_o = 0$), as correntes harmônicas de excitação de seqüência zero são suprimidas pelo neutro isolado [02]. As correntes de excitação conterão somente as componentes harmônicas de ordens diferente de $3m+3$ ($m=0,1,2,3,\dots$) ou seja, de seqüência positiva e negativa.



(a) Correntes de Excitação-Banco Trifásico



(b) Amplitudes das harmônicas da corrente de excitação da fase C em função da variação excitação c.c.

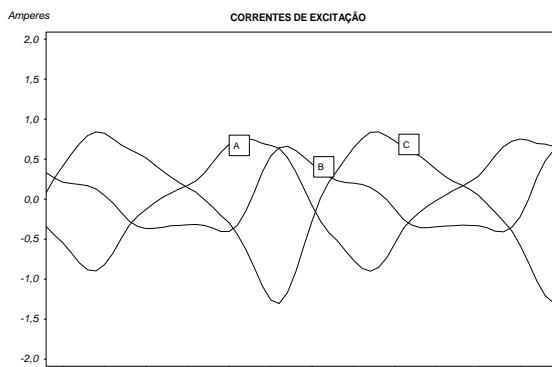
Fig. 2 - Caso A - Banco trifásico - conexão: Y/Y

Na figura 2 (a) são ilustradas as formas de onda das correntes de excitação quando o transformador é submetido a uma excitação c.c. com $I_o = 10\% I_n$. Pode ser observada uma forte distorção na forma de onda das correntes de excitação em virtude do aparecimento e predominância das harmônicas de ordens pares bem como a

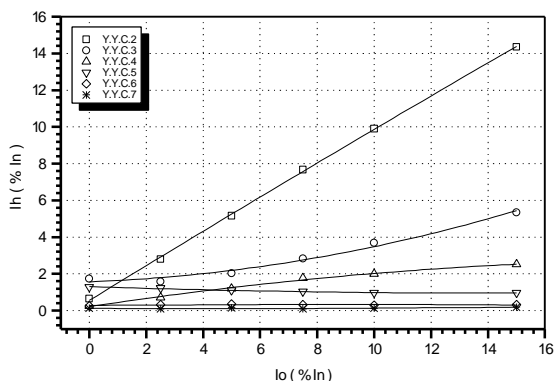
amplificação das harmônicas de ordens ímpares.

A figura 2 (b) mostra o comportamento das amplitudes harmônicas em função da variação da excitação c.c.. Percebe-se claramente que a influência sobre as harmônicas de ordens pares é mais acentuada, e que as harmônicas de ordens superiores apresentam um pequeno decaimento a medida que a excitação c.c. é aumentada.

Para o transformador trifásico de núcleo envolvido, pode ser observado na figura 3 (a), que há uma forte distorção nas correntes de excitação devido ao aparecimento das harmônicas de ordens pares e uma amplificação nas de ordens ímpares. A figura 3 (b) ilustra a variação das amplitudes das ordens harmônicas em função da excitação c.c.



(a) Correntes de Excitação



(b) Amplitudes harmônicas da corrente de excitação da fase C em função da variação da excitação c.c. - conexão Y/Y

Fig.3 - Caso A - núcleo envolvido - conexão: Y/Y

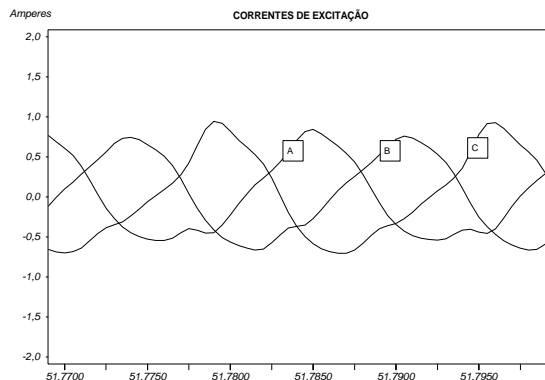
Caso B: Injeção de correntes contínuas provenientes de retorno por terra de sistemas de transmissão em corrente contínua ou induções geomagnéticas. Devido a natureza deste padrão de excitação c.c., este caso somente se aplica a transformadores que possuem pelo menos um dos seus enrolamentos em estrela aterrada.

Devido ao desbalanceamento das fases nas redes elétricas não é comum ter-se uma distribuição equitativa das correntes contínuas. Com o objetivo de reproduzir estas características, procurou-se

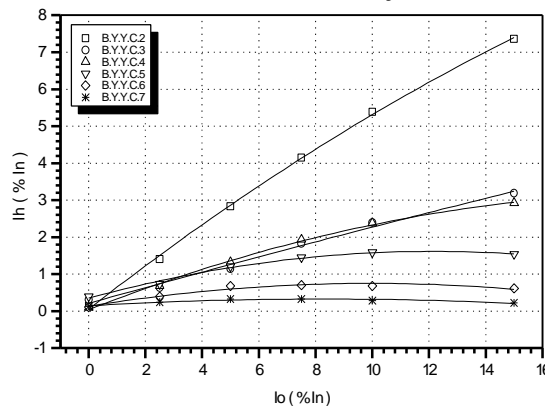
analisar o comportamento dos transformadores operando sob duas condições distintas, sendo a primeira realizada com uma distribuição desbalanceada das correntes contínuas entre as fases e a segunda com uma distribuição idêntica nas três fases.

B.1 - Injeção Desbalanceada - Neste ensaio, adotou-se os seguintes níveis de correntes contínuas : $I_{a_0} = 30\% I_0$; $I_{b_0} = 20\% I_0$ e $I_{c_0} = 50\% I_0$, nas fases A, B e C respectivamente. Neste caso adotou-se corrente pelo condutor neutro, I_0 variando entre 0 e 15% I_n . A exemplo dos ensaios anteriores, apresenta-se as formas de onda das correntes nas linhas e seus respectivos conteúdos harmônicos para o caso particular quando $I_0 = 10\%$ de I_n .

Conexão $\Upsilon\Upsilon_1$: Para esta conexão dos enrolamentos do banco trifásico de transformadores constituídos por unidades monofásicas, os resultados experimentais são ilustrados nas figuras 4 (a) e (b).



(a) Correntes de Excitação



(b) Amplitudes harmônicas da corrente de excitação da fase C em função da variação das excitação c.c.

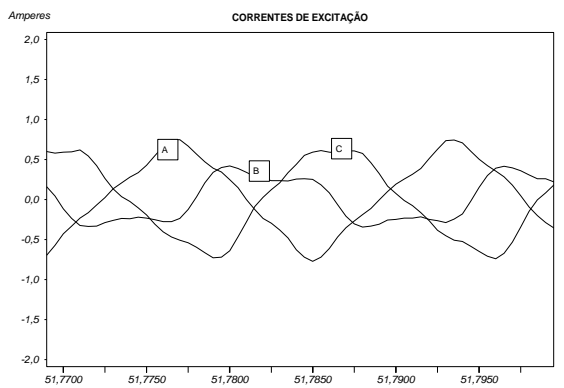
Fig.4 - Caso B1 -banco trifásico- conexão: $\Upsilon\Upsilon_1$

Na figura 4(b) pode ser observado que, o comportamento das ordens harmônicas em relação a variação dos níveis de injeção c.c, apresenta uma relação aproximadamente linear para as harmônicas de baixa ordem , enquanto as de ordem superior praticamente permanecem constantes apresentado

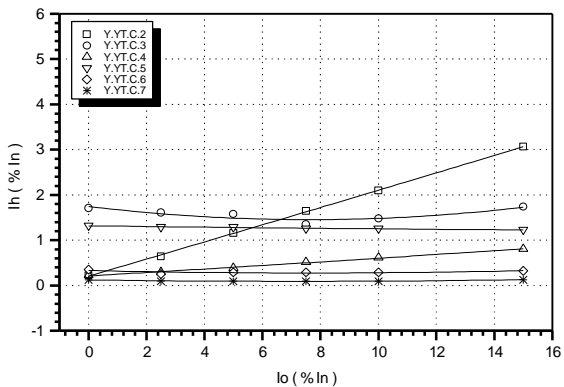
um pequeno decaimento, isto tudo dentro da faixa de injeção c.c. praticada.

A figura 5 (a) ilustra o comportamento das correntes de excitação do transformador trifásico de núcleo envolvido para o caso B1, ou seja, para uma injeção c.c. desequilibrada.

A figura 5 (b), mostra as amplitudes das harmônicas da corrente de excitação em função da variação de corrente contínua injetada. Pode ser observado que, o comportamento das ordens harmônicas em relação a variação dos níveis de injeção c.c., apresenta aspectos característicos bem distintos. A terceira e a quinta ordens harmônicas permanecem praticamente constantes, enquanto a segunda ordem harmônica apresenta um crescimento linear.



(a) Correntes de Excitação



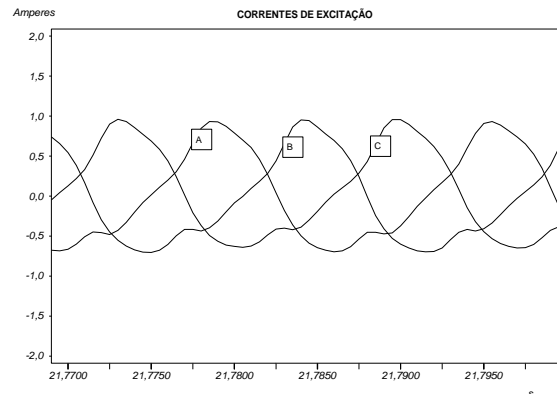
(b) Variação das Amplitudes harmônicas da corrente de excitação da fase C em função da variação excitação c.c.

Fig.5 - Caso B1 -núcleo envolvido - conexão: $\Upsilon\Upsilon_1$

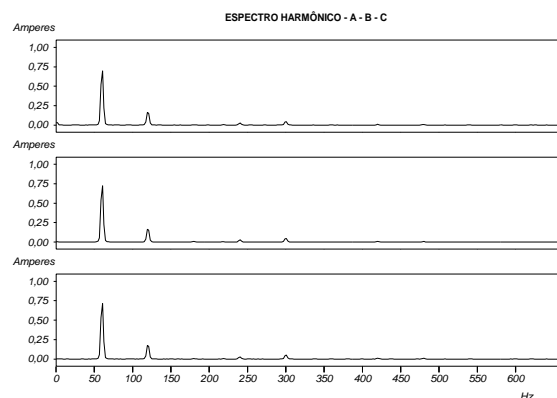
B.2 - Injeção Idêntica nas Três Fases - Neste caso, admitiu-se níveis de corrente contínua de 5% de In em cada fase. Ressalta-se que para este padrão particular de excitação c.c., as componentes harmônicas múltiplas de três apresentam apenas uma componente seqüencial, ou seja, seqüência zero.

As figuras 6 (a) e 6 (b), ilustram a forma de onda das correntes de excitação e respectivo espectro harmônico para injeção equilibrada de

corrente contínua para o banco trifásico, enquanto as figuras 7 (a) e 7 (b), ilustram o comportamento do transformador trifásico de núcleo envolvido.



(a) - Correntes de Excitação - Banco Trifásico



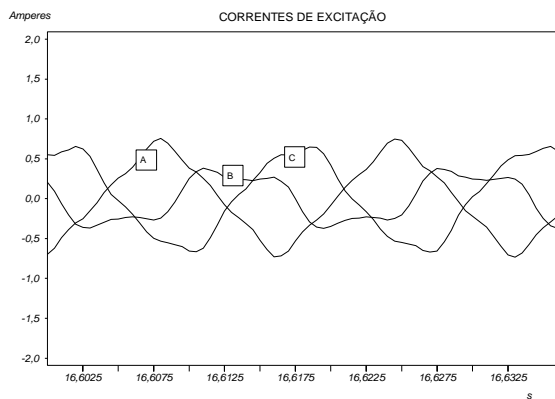
(b)-Espectro Harmônico Correntes Excitação

Fig.6 - Caso B2 - banco trifásico - conexão $\Upsilon\Upsilon_1$

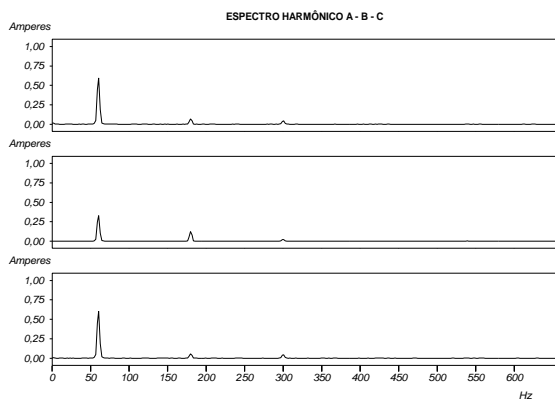
É importante salientar que os bancos de transformadores, para este caso, possui um comportamento fundamentalmente diferente dos transformadores trifásicos com núcleo de três colunas.

Nos transformadores trifásicos com núcleo de três colunas a distribuição equitativa das componentes contínuas entre as fases praticamente não provoca a saturação c.c., uma vez que, o fluxo total c.c. fica significativamente atenuado devido aos caminhos de alta relutância a ser percorrido. Como consequência haverá alteração do conteúdo harmônico das correntes de excitação.

Para os transformadores do tipo banco de monofásicos, como não há acoplamento magnético entre as unidades, os efeitos das injeções equilibradas passa a ter um caráter parecido com os casos anteriores, ou seja, a corrente de excitação em cada unidade transformadora apresenta-se fortemente deformada apresentando um elevado conteúdo harmônico.



(a)-Correntes de excitação-núcleo envolvido



(b)-Espectro Harmônico das Correntes Excitação

Fig.7 - Caso B2 -núcleo envolvido conexão - $Y\bar{Y}$

4. CONCLUSÕES

Foram realizados vários ensaios experimentais para o banco trifásico e para o transformador trifásico de núcleo envolvido sob magnetização assimétrica, variando-se a injeção c.c. desde 0 até 15 % da corrente nominal, para diferentes conexões dos enrolamentos. Dos resultados obtidos, verificou-se a dependência praticamente linear das harmônicas de baixas ordens da corrente de excitação com a variação da injeção c.c., enquanto as harmônicas de ordens superiores praticamente se mantiveram constantes ou apresentaram um leve decaimento, dependendo do transformador e do tipo da conexão empregada. Sob efeito da dupla excitação, as correntes de excitação apresentam altos valores de pico e encontram-se fortemente deformadas. No transformador trifásico com núcleo de três colunas, constatou-se que para uma injeção equilibrada de corrente contínua nas três fases, o mesmo mostrou-se imune ao fenômeno da magnetização assimétrica, visto que, nesta situação, as componentes contínuas das correntes secundárias produzem fluxos com amplitudes e direções iguais, e o transformador não sofre a influência da saturação assimétrica. Logo, as correntes de excitação não

possuem valor médio e seu conteúdo harmônico fica inalterado.

5. REFERÊNCIAS

- [01] Rossi, J.C., "Saturação Assimétrica em Transformadores Trifásicos", Tese de Doutorado, FEEC - UNICAMP, Campinas, Dezembro de 1996.
- [02] Baghzouz, Y.; Gong, X.D.- "Analysis of Three-Phase Transformer No-load Characteristics", IEEE Transaction on Power Systems, Vol.10, No. 1, Feb., 1995.
- [03] De Oliveira, L.C.O.- "Transformadores de Potência Sob Dupla Excitação C.A/C.C: Testes Esperimentais e Efeitos da Magnetização Assimétrica". In: INDUSCON 92, São Paulo, Junho, 1992.
- [04] Oliveira J.C.; De Oliveira, L.C.O., "Physical Considerations and Modelling of the AC/DC Double Excitation in Power Transformers", In: Fourth International Conference on Harmonics in Power Systems, IEEE-ICHIPS/90, Budapest, Hungria, 1990.

SIMBOLOGIA

- B.Y.Y.i.n. - Banco trifásico - estrela isolada /estrela isolada
- B.Yt.Yt.i.n -Banco trifásico - estrela aterrada / estrela aterrada
- Y.Y.i.n - Trifásico núcleo envolvido estrela isolada / estrela isolada
- i - fases A-B-C
- n - ordem harmônica - $n = 2,3,4,5,6,7$
- Io - Corrente contínua injetada
- In - Corrente nominal do transformador