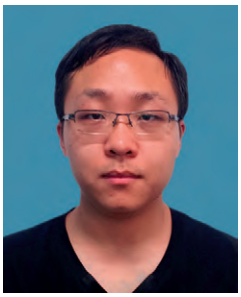
基于实验的变压器直流偏磁特性分析

针对直流偏磁的负荷侧模型和电源侧模型进行了实验研究。在此基础上考虑变压器的漏磁和磁滞效应，提出了改进的电路－磁路耦合模型，以准确体现偏磁电流上下半波、左右半波不对称的畸变情形，计算并分析了某单相变压器在直流偏磁下的空载励磁特性，实验结果证明所提方法的正确性，为变压器励磁特性研究提供了方法和思路。

胡　阳　李慧奇/华北电力大学电气与电子工程学院



胡　阳/硕士研究生

关键词/Keywords
变压器·
直流偏磁·
磁滞特性·
电路－磁路耦合·

在特高压直流输电系统中，线路采用单极－大地回路方式或极不平衡方式运行时，直流电流将以大地作为回路，经电力变压器的接地极中性点进入变压器绕组，引发直流偏磁现象。太阳风暴引起的地磁感应电流流入变压器，也会在变压器内部产生直流偏磁效应，各种偏磁产生方式虽然不同，但都会使变压器绕组励磁特性和硅钢材料磁化特性发生改变，产生大量谐波，不仅增加了变压器的功率损耗，而且可能引起继电保护装置误动作、变压器噪声增大、振动加剧和温升增加等问题，对电网的安全运行造成危害[1-2]。如江苏上河变电所500 kV、750 MV·A主变压器异常[3]，陈青恒等人对惠州某台500 kV变压器的实验表明，直流偏磁时油箱振动频率出现500～1 400 Hz范围内的高次谐波。加拿大学者Picher等人对某台370 MV·A，735 kV单相自耦变压器的实验表明，持续注入75 A的直流电流1 h，变压器拉板端部与顶层油温差值达到52 K。这些现象充分说明直流偏磁问题对电力系统的正常运行已构成巨大威胁，因此，国内外相关电力部门、科研院所针对变压器直流偏磁的一系列问题，近年来开展了大量研究，并取得了一些成果[4-7]。

本文针对变压器直流偏磁现象的两种产生方式，建立了相应的实验模型，分析变压器的直流偏磁效应对励磁特性的影响，在此基础上，计及磁滞效应和漏磁，建立了改进的电路－磁路耦合计算模型，分析了某单相三柱双绕组变压器在直流偏磁条件下的空载励磁特性，并以实验验证该方法的准确性。

变压器直流偏磁问题实验研究

直流偏磁现象在工程实际中的体现如图1所示。

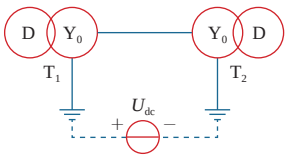


图1　直流偏磁现象示意图

图1中，U_{dc}为两台中性点接地变压器T_1、T_2之间的地电位差。该系统特点：①地电位差U_{dc}受接地土壤电阻率和两变压器接地方式的影响；②两接地点间距离较长；③变压器T_1、T_2在结构和型号等方面不同。

针对直流偏磁在实际生产过程中的两种典型产生方式，即直流量从负荷侧注入或从电源侧注入，本文提出两种模型：负荷侧模型和电源侧模型。

1. 负荷侧模型实验研究

负荷侧模型是指交流源与直流源异侧，该模型模拟图1中变压器T_1的直流偏磁问题，直流量从变压器二次侧注入，通过电磁耦合对一次侧产生影响。

选用两台相同型号的变压器（JMB－

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

500）进行实验，实验中变压器一、二次电压接头取380/36 V，一次侧经三相自耦调压器与交流电源（380 V，50 Hz）相接，二次侧经由开关与直流电流源连接。理想情况下二次侧回路里的交流量应当为零，这在后续实验结果中得到验证。实验时，交流输入经调压器调整至380 V，直流偏置量依次调整为0倍、1倍、2倍和3倍空载励磁电流（折合到二次侧），用示波器记录下各个测量值对应时刻的u_1、u_2，经编程处理后，得到各激励下的励磁电流和直流偏置磁滞回线。图2为无直流偏磁和有直流偏磁（为空载励磁电流3倍）时的励磁电流。

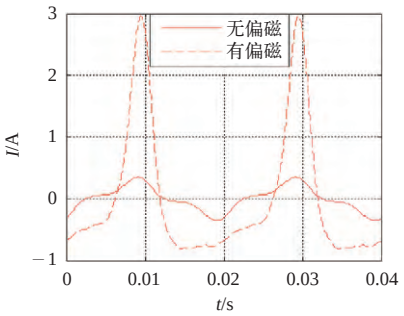


图2　负荷侧模型励磁电流

相比较纯交流激励情况，直流偏磁条件下，励磁电流波形呈现正负半周不对称的形状，随着偏置电流的增加，正半周出现愈加明显的尖峰，且其峰值比无偏置磁场作用时大很多，而负半周则趋于平缓，但也随偏置电流的增加而增大。这种现象的根源在于，变压器在直流偏磁工作条件下，直流磁通和交流磁通相叠加形成了偏磁总磁通，铁心磁滞回线发生偏置，与直流偏磁方向一致的1/2周期，铁心饱和程度大大增加。

伴随二次偏置电流的增加，如表1所示，变压器一次端部电压升高，励磁电流有效值近似呈线性增长。

表1　各参数随偏置电流变化情况

参考值	$0.5\times I_0$	$1.0\times I_0$	$2.0\times I_0$	$3.0\times I_0$
I_{dc}/A	0.002 1	0.003 8	0.000 3	0.003 3
$I_{_rms}$/A	0.256 3	0.385 6	0.726 6	1.094 6
$U_{_rms}$/V	380.592 4	384.679 2	388.730 1	388.850 6

如图3所示，奇、偶次谐波幅值均有增大，基波增长最快，但直流分量几乎为零，这是由于交流磁通与直流磁通的叠加，虽然改变了变压器内部硅钢叠片的磁化特性，但直流磁通为常数，由电磁感应定律可知，直流磁通并不能在一次侧感应出直流电流。另外，通过测量两台变压器二次侧的两个36 V端子之间的电压差和二次回路电流，可以发现，380 V激励时，计算得到两端子电压差约为0.02 V。由于0.02 V/36 V＜0.000 1，可见二次侧交流量非常小，对直流电流源没有影响；计算所得直流电流有效值2.098 2 A≈2.1 A，与直流电流源所加电流2.1 A吻合，表明二次侧回路里主要是直流量。

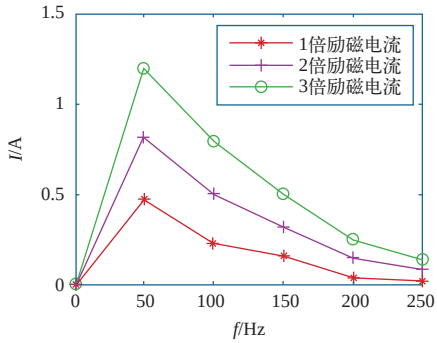


图3　励磁电流谐波分析

2. 电源侧模型实验研究

负荷侧模型是指交流源与直流源同侧，该模型模拟图1中变压器T_2的直流偏磁问题，直流量从变压器一次侧注入，实验时，测量方法同负荷侧模型基本相同。得到各激励下的励磁电流如图4所示。

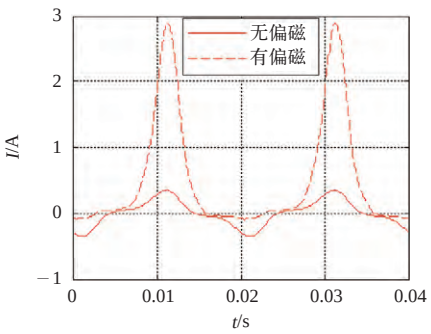


图4　电源侧模型励磁电流

如图4和表2所示，随着直流偏置量的增加，交直流同侧的电源侧模型反映出的直流偏磁现象，总体上与负荷侧模型相近；电流有效值、电压有效值近似线性增长。

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表2 各参数随偏置电流变化情况

参考值	$1.0\times I_0$	$2.0\times I_0$	$3.0\times I_0$
I_{dc}/A	0.160 0	0.320 6	0.512 5
$I_{_rms}$/A	0.348 4	0.630 3	1.009 5
$U_{_rms}$/V	384.679 2	388.730 1	388.850 6

如图5所示，由电流频谱分析与表2中所测得的电流直流分量可知，电源侧模型的励磁电流里不仅包含各次谐波分量，而且含有直流分量。

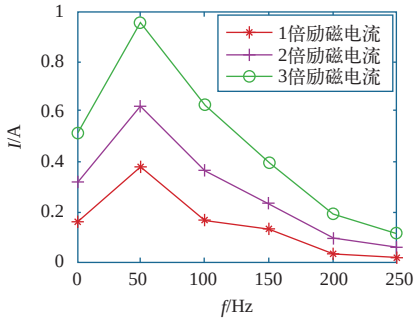


图5 励磁电流频谱分析

上述实验结果均得到了变压器在直流偏磁条件下励磁电流畸变，产生谐波，峰值迅速升高的结论。此外，实验中发现，电源侧模型测量得到的磁滞回线相较于负荷侧模型要更窄一些，且随着直流偏置量的增加，回线越来越窄，表明在电源侧模型磁滞回线图里原点附近的磁导率较大，铁心材料更快接近饱和，这使得偏磁电流幅值在上升沿迅速增大。

计及漏磁和磁滞效应的电路－磁路耦合算法

本节考虑漏磁和磁滞效应的影响，应用磁场能量法，经过推导得到变压器一次、二次绕组间的漏磁场，整个绕组的漏感L_σ为

$$L_\sigma=\frac{2W_{\mathrm{m}}}{i_1^2}=\frac{\mu_0 n_1^2\pi D}{h}k_\rho\left(a+\frac{b+c}{3}\right) \tag{1}$$

式中，k_ρ为Rogowski因数，$k_\rho=1-\left(1-\mathrm{e}^{-\frac{\pi}{\tau}h}\right)/\left(\frac{\pi}{\tau}h\right)$；其他变压器参数可通过测量得到。

根据某单相三柱双绕组变压器实际参数及关注的物理量，经过合理的化简，得到其空载电路模型，如图6所示。

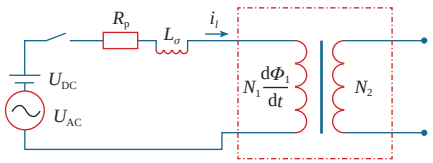


图6 直流偏磁电路示意图

图6中，U_{AC}为交流电源；U_{DC}为直流电源；R_p为一次线圈电阻；L_σ为变压器漏电感；N_1、N_2为一次、二次线圈匝数；$\mathrm{d}\Phi_1$为主磁通，二次侧开路；i_1为空载励磁电流。该电路图的方程为

$$U_{\mathrm{AC}}=i_1R_{\mathrm{p}}+L_\sigma\frac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t}+N_1\frac{\mathrm{d}(\Phi_3-\Phi_1-\Phi_2)}{\mathrm{d}t}-U_{\mathrm{DC}} \tag{2}$$

对于该形式变压器，其磁路结构如图7所示，图7中，R_c为变压器心柱磁阻；R_y为上下铁轭磁阻；R_s为变压器旁轭磁阻；R_a为漏磁支路磁阻；Φ_1、Φ_2和Φ_3分别为三个回路里的磁通，由于二次侧空载，只有一次电流产生磁动势F。

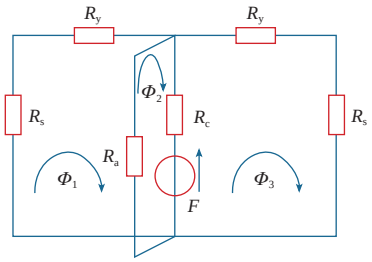


图7 单相三柱双绕组变压器磁路结构

应用磁路的Kirchhoff定理，该变压器磁路模型可以描述为

$$[R(\Phi)][\Phi]=[N][i] \tag{3}$$

其中

$$[R(\Phi)]=\begin{pmatrix}R_c+R_y+R_s & -R_c & -R_c\\ -R_c & R_c+R_a & -R_c\\ -R_c & -R_c & R_c+R_y+R_s\end{pmatrix} \tag{4}$$

$$[\Phi]=\begin{pmatrix}\Phi_1\\ \Phi_2\\ \Phi_3\end{pmatrix} \tag{5}$$

$$[N]=\begin{pmatrix}-N_1\\ -N_1\\ N_1\end{pmatrix} \tag{6}$$

$$[i]=i_1 \tag{7}$$

将式（2）和式（3）联立，即可得到电路－

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

磁路耦合方程组为

$$\left(R\left[\Phi(t+\Delta t)\right]+\frac{1}{L_\sigma}[N][N]^{\mathrm{T}}\right)\left[\Phi(t+\Delta t)\right]-\frac{1}{L_\sigma}M=0 \quad (8)$$

$$i_1(t+\Delta t)-\frac{1}{L_\sigma}\left[M-N\Phi_1(t+\Delta t)\right]=0 \quad (9)$$

$$M=(U_{\mathrm{AC}}-i_1R_{\mathrm{p}})\Delta t+L_\sigma i_1(t)+N_1\Phi_1(t)+U_{\mathrm{DC}}\Delta t \quad (10)$$

由于磁阻随时间而变化，因而该方程组为非线性微分方程组，在磁阻$R=1/(\mu S)$的处理上，本文考虑到变压器叠片铁心的磁滞效应，使用测量得到的磁滞回线，依据对应的离散$B-H$数据对（H为零时取近似非零值），求取对应时刻的磁导率μ，进而得到对应于各时刻的准确磁阻值。

对于非线性方程式（8）的求解，应用Newton-Raphson迭代法，经过有限步次运算即可得到各时刻对应值，再依据式（9）即可得到励磁电流值。

算法的验证

以变压器JMB－500为例，验证上述算法的正确性，在计算中，设置$\mathrm{d}t=5\times10^{-5}$ s，$U_{\mathrm{AC}}=120$ V，$I_{\mathrm{dc}}=4$ A，此时该变压器的磁滞回线如图8所示。

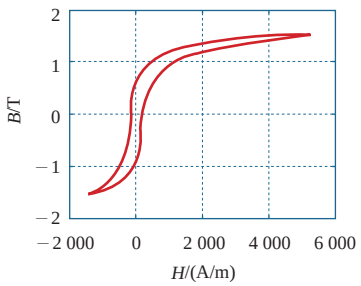


图8　直流偏置磁滞回线

将直流偏磁下空载励磁电流的测量值与计算值比较，如图9所示，可以看出，计算值与测量值基本吻合，波形趋势一致，只是在波峰和波谷有微小的偏差，这可能是由于变压器绕组阻值测量的偏差等造成。实验说明计算方法准确。

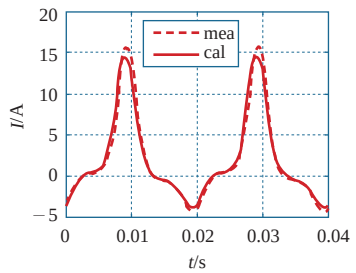


图9　测量值与计算值比较

结束语

首先依据实际产生方式，本文将变压器直流偏磁问题等效为电源侧模型和负荷侧模型，并分别予以实验分析。结果均直观表明，直流偏磁条件下，励磁电流发生畸变，波形呈现正负半周、左右半周不对称的形状，随着偏置电流的增加，负半周则趋于平缓，峰值迅速增大。究其原因在偏磁条件下硅钢叠片的磁化特性发生改变，磁通容易达到饱和。

其次，考虑到变压器的漏磁和磁滞效应，对于单相三柱双绕组变压器所建立的改进电路－磁路耦合模型，准确体现出直流偏磁条件下变压器空载励磁电流的畸变情形。

最后对JMB－500变压器的实验结果验证了本文方法的正确性与实用性，为变压器励磁特性研究提供了方法和思路。

参考文献

[1] 苑舜，王天施．电力变压器直流偏磁研究综述 [J]．高压电器，2010 (3)：83-87．

[2] 蒋伟，吴广宁，黄震，等．特高压直流输电的地中电流对变压器的影响及其计算 [J]．高压电器，2008 (6)：534-536，540．

[3] 刘林玉，谢学武．500 kV主变压器异常声音分析 [J]．高电压技术，2005，31 (4)：85-87．

[4] 王祥晰，徐伯雄．变压器的偏磁问题 [J]．变压器，1992，29 (8)：11-14．

[5] 朱艺颖，蒋卫平，曾昭华，等．抑制变压器中性点直流电流的措施研究 [J]．中国电机工程学报，2005，25 (13)：1-7．

[6] 李慧奇，崔翔，候永亮，等．直流偏磁下变压器励磁电流的实验研究及计算 [J]．华北电力大学学报，2007，34 (4)：1-6．

[7] 赵小军，李琳，程志光，等．应用谐波平衡有限元法的变压器直流偏磁现象分析 [J]．中国电机工程学报，2010，30 (21)：103-108．

（收稿日期：2014－07－08）EA

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net