

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.03.012

基于场路耦合法的高阻抗变压器设计与计算分析

王晓伟, 李 岩, 李龙女
(沈阳工业大学特种电机研究所, 沈阳 110870)

摘要: 针对短路电流过大引起的变压器损坏问题,文中基于一台220 kV三相三绕组有载调压变压器产品,提出了3种提高中—低压侧绕组短路阻抗的设计方案。首先,通过拆分中压绕组、调压绕组中置、高压绕组内置的方法增大中低绕组间的漏磁空道,实现了3种不同绕组结构的高阻抗变压器设计;然后,应用基于场路耦合的有限元法和漏磁阻法分别对不同设计方案的短路阻抗进行计算分析,得出将高压绕组内置的方案对提高短路阻抗最明显,提高了124.56%。同时,通过两种方法计算结果对比验证了计算的正确性;最后,对不同设计方案引起的油箱及夹件的涡流损耗及损耗密度分布进行计算,研究在实现变压器高阻抗过程中对结构件损耗产生的影响。文中对今后高阻抗变压器的设计提供了一些思路。

关键词: 高阻抗变压器; 短路阻抗; 场路耦合; 涡流损耗

Design and Calculation Analysis for High Impedance Transformer Based on Field-circuit Coupled Method

WANG Xiaowei, LI Yan, LI Longnü

(Research Institute of Special Machines, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: Aimed at transformer damage caused by large short-circuit current, this paper presents three kinds of design scheme improving medium-low winding short circuit impedance based on a 220 kV three-phase three winding load transformer product; First of all, through splitting the middle voltage winding, placing the regulating winding in the middle and the high voltage winding inside to increase the leakage magnetic gap between the low and middle windings, thus realizing the design of three kinds of high impedance transformer with different winding structure; Then, based on the field-circuit coupled finite element method and the flux leakage method, the short-circuit impedance of different design schemes are analyzed and calculated, and the results show that: the scheme of placing the high voltage winding inside is the most obvious improvement of short circuit impedance, which is improved by 124.56%. Meanwhile, the calculation results are verified by comparing the results of the two methods. Finally, the eddy current loss and loss density distribution of oil tank and clip caused by various schemes are calculated, and the effect of the loss of structure in the process of high impedance transformer is studied. This paper provides some ideas for the design of high impedance transformer.

Key words: high impedance transformer; short-circuit impedance; field-circuit coupled; eddy current loss

0 引言

随着电力系统容量的日益增长,短路电流越来越大。为降低短路电流对变压器及其他电力设备的危害,具有超强抗短路能力的高阻抗变压器得到

了广泛的应用。统计数据表明,近年来三绕组有载调压高阻抗变压器在电网中的应用越来越广泛。而现有的高阻抗变压器存在着制造成本高昂、损耗高、维护工作量大等问题^[1-2]。因此,研制经济、节约的高阻抗变压器具有重要的理论意义和工程实用

收稿日期:2018-08-14; 修回日期:2018-10-17

基金项目:国家自然科学基金项目(51177103)。

Project Supported by the National Natural Science Foundation of China(51177103)。

价值。就 110 kV、220 kV 三绕组变压器而言, 由于高压—中压侧主要起传输能量作用, 高、中绕组的短路阻抗(简称高中阻抗)不宜过大。一些三绕组变压器, 低压绕组容量小于 50%, 因而低压绕组线规截面小, 而标准短路阻抗均以 100% 容量为基准容量, 这都导致中压—低压抗短路能力降低。因此三绕组变压器主要是增大中压—低压短路阻抗(简称中低阻抗)来有效限制短路电流^[3-6]。实现变压器中低压之高阻抗有多种方法, 文[7]介绍了内置电抗器式高阻抗变压器的一些技术特点; 文[8]介绍了高阻抗变压器的结构特点以及对采用绕组拆分式高阻抗变压器和内置电抗器的高阻抗变压器进行了性能的比较。但是对于不同结构方案高阻抗变压器设计的系统性定量分析还很少见, 以及不同设计方案下对变压器结构件漏磁以及损耗的影响尚未涉略。

基于此, 文中以一台电压等级为 220 kV 三相三绕组有载调压变压器为研究对象, 通过对其绕组结构进行改变, 提出了 3 种提高变压器中低阻抗的方案(保持高中阻抗为普通阻抗), 增强了变压器抗短路能力, 并且建立了三维有限元计算模型, 分别应用场—路耦合有限元法以及漏磁阻法对各种方案的短路阻抗进行计算分析以及比较, 最后, 应用有限元法对各种方案引起的油箱及夹件的涡流损耗及损耗密度分布进行对比分析, 为高阻抗变压器的设计提供一些思路。

1 物理模型及高阻抗实现方案

1.1 场路耦合计算模型

以一台容量为 150 MVA 的三相三绕组有载调压电力变压器为研究对象, 文中建立了变压器场路耦合有限元模型见图 1, 该模型的绕组分布为: 铁心—低压—中压—高压—调压, 调压绕组由上下两部分组成。根据变压器结构的对称性, 对计算模型作如下简化与假设:

1) 变压器在结构上对称, 油箱关于三相绕组中心平面前后对称, 仿真时选取模型为整个变压器结构的 1/2;

2) 各绕组中电流在绕组所占的空间内均匀分布, 铁心和油箱按非线性材料处理;

3) 忽略铁心内涡流、绕组内环流和金属结构件材料的磁滞特性对漏磁场的影响;

4) 所有的场量均随时间作正弦变化, 不考虑高次谐波, 金属导体的电导率为常数, 忽略位移电流的影响。

1.2 高阻抗实现方案

由高阻抗变压器的特点可知, 中低阻抗增幅较

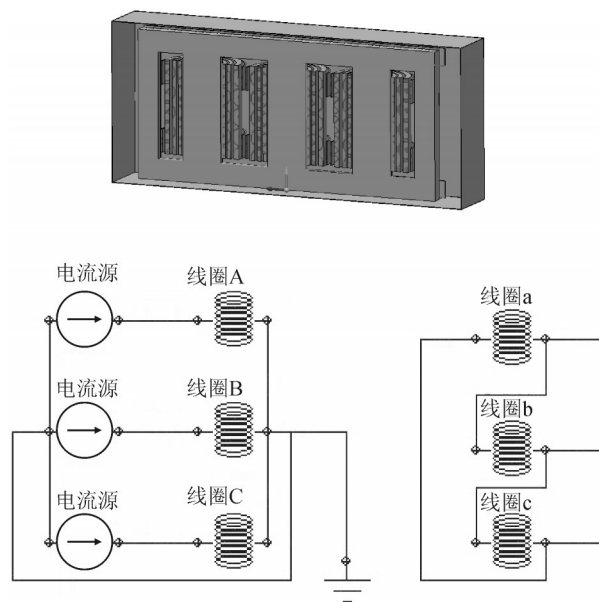


图1 场路耦合有限元模型

Fig. 1 Field-circuit coupled finite element model

大, 同时保证高中阻抗为普通阻抗, 文中将以此为切入点进行深入探讨。在铁心直径、电抗高度、磁密都确定的前提下, 增大阻抗最直接的办法即增大中低压绕组之间主漏磁空道的尺寸, 使中低阻抗达到要求值。与此同时, 保持高中阻抗为普通阻抗不变。

文中主要阐述实现变压器中低阻抗为高阻抗, 而与此同时能保持高中阻抗为普通阻抗的设计思路。基于此设计思路提出了 3 种改变绕组结构的设计方案: 方案 1 是将中压绕组拆分; 方案 2 是将调压绕组放在低压与中压绕组之间; 方案 3 是将高压绕组内置。以下是对 3 种方案的具体分析。

1.2.1 中压分裂

实现变压器高阻抗最常用的方法是将高压绕组或者中压绕组拆分, 通过将绕组拆分即可实现各种不同的高阻抗配合形式。但为满足绝缘的要求, 绕组拆分的匝数一般不可以超过基本匝数的 20%。这种方式对绕组的相对辐向位置改变不是很明显, 仅将中压绕组分裂, 其绕组排列方式见图 2。

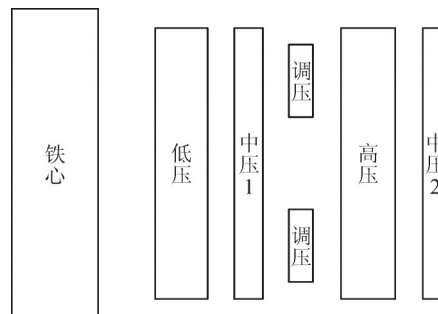


图2 变压器绕组之辐向排列

Fig. 2 Radial arrangement of transformer windings

绕组由内向外的排列顺序为: 铁心→低压→中

压1→调压→高压→中压2。这种绕组排列方式之所以能实现高阻抗在于,通过将中压绕组分裂,即将中压绕组的平均半径、中低空道的平均半径大幅增加,从而大幅增加中低绕组的等效漏磁面积,实现中低绕组阻抗的增加。由于高压绕组位于两串中压绕组之间,高压绕组和中压绕组漏磁组会被分为方向相反的两个漏磁组,从而等效漏磁面积大大降低,能从一定程度上平衡中压绕组平均半径增大带来的影响,从而保持高中阻抗为普通阻抗不变。

1.2.2 调压中置

将调压绕组放在中压和低压绕组之间,通过增大中低绕组之间主空道的距离,从而增加中低绕组的等效漏磁面积,实现中低阻抗值增加,由于调压绕组放在中低压绕组之间,并没有改变高压与中压之间的距离,因此,这种将调压绕组中置的方案能在保持高中阻抗为普通阻抗的同时,增大中低阻抗,其绕组排列方式见图3。

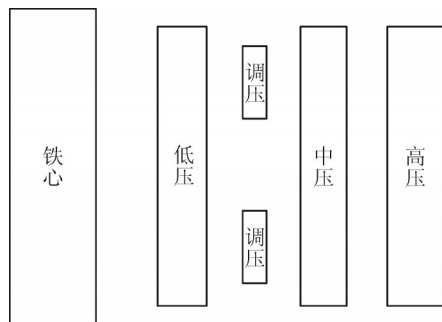


图3 变压器绕组之辐向排列

Fig. 3 Radial arrangement of transformer windings

1.2.3 高压内置

这是一种通过改变绕组辐向排列位置来实现高阻抗的方法,其绕组排列方式见图4。

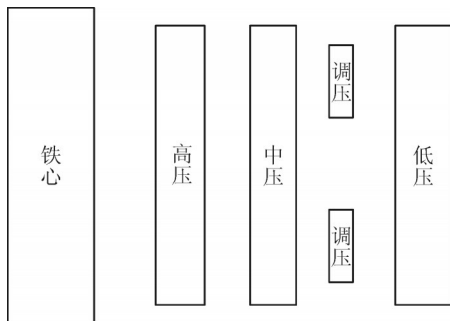


图4 变压器绕组之辐向排列

Fig. 4 Radial arrangement of transformer windings

这种方法是将高压绕组靠近铁心,向外依次为中压绕组、调压绕组、低压绕组。这种绕组排列结构的变压器能提高中低阻抗的原理是,通过增大中、低压绕组间主空道尺寸的方法,增大纵向漏磁

面积,从而达到提高阻抗的目的。该方法仅增大了中压及低压绕组间空道尺寸,因此在提高了高低阻抗、中低阻抗的同时,并不影响高中阻抗。并且由于将高压绕组内置,就可以大大减小了高压绕组直径,从而降低了高压绕组导线电阻,缩小了高压对中压绕组运行时的负载损耗。

2 短路阻抗计算

为了系统定量的研究3种方案提高阻抗的效果,文中分别应用漏磁阻法和有限元法计算变压器的短路阻抗,漏磁阻法计算变压器短路阻抗时,绕组轴向或幅向尺寸被油道分割成的部分均可视为线圈进行计算。中低压绕组运行方式下绕组尺寸和磁势分布见图5。

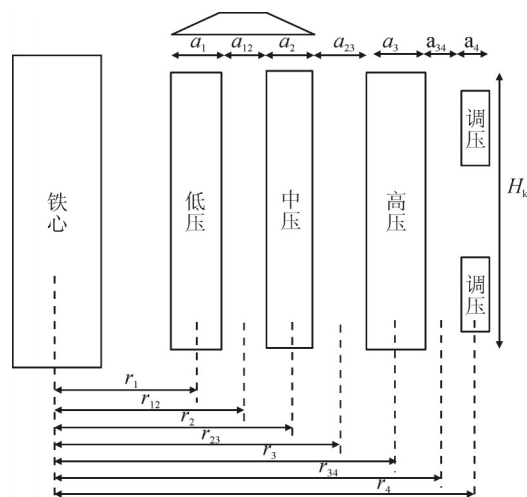


图5 中低压绕组运行时绕组尺寸和磁势图

Fig. 5 Winding dimensions and magnetic potential diagram when middle and low voltage winding operation

图5中: a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 分别为绕组幅向尺寸,cm; a_{12} 、 a_{23} 、 a_{34} 分别为绕组主空道尺寸,cm; r_1 、 r_2 、 r_3 、 r_4 分别为绕组平均半径,cm; r_{12} 、 r_{23} 、 r_{34} 分别为主空道平均半径,cm; H_k 为绕组电抗高度,cm。阻抗电压的计算公式 $U_k(\%)$ 可写为

$$U_k = \frac{49.6 f I_N W \sum D \rho K}{e_l H_k \times 10^6} \quad (1)$$

式(1)中: f 为频率; I_N 为相电流; W 为主分接时总匝数(I_N 、 W 为同一侧数据); $\sum D$ 为总漏磁面积; k 为附加电抗系数; e_l 为每匝电势; ρ 为洛式系数。

$$\rho = 1 - \frac{\lambda}{\pi H} \quad (2)$$

式(2)中, λ 为漏磁宽度,其为内线圈内半径到外线圈外半径之间的距离,文中只计算中低压之间的短路阻抗,因此:

$$\lambda = a_1 + a_{12} + a_2 \quad (3)$$

$$\sum D = \frac{1}{3}(a_1r_1 + a_2r_2) + a_{12}r_{12} \tag{4}$$

运用场路耦合有限元法计算短路阻抗时,必须先计算出变压器中储存的磁场能量,而变压器中的磁场能量是在磁场建立过程中由外源做功转换得到,由磁场分布就可以求出磁场储能,进一步即可计算出绕组的短路阻抗。当绕组中通入电流 I_N 时,其变压器的磁场能量为

$$W_m = \frac{1}{2}LI_N^2 \tag{5}$$

式(5)中: W_m 为磁场总能量, J; L 为绕组电感, H; I_N 为相电流, A。

漏电抗与磁场能量的关系可以表示为

$$X_k = \frac{4\pi f W_m}{I_N^2} \tag{6}$$

式(6)中, X_k 为漏电抗, Ω ; f 为电网实际频率, Hz。

当短路阻抗的电阻分量忽略不计时,漏电抗即为短路阻抗,因此,短路阻抗的百分数为式(7)^[9-12]

$$U_k = \frac{Z_k}{Z_N} = \frac{\omega LI_N}{U_N} = \frac{4\pi f W_m}{VA} \tag{7}$$

式(7)中: U_k 为短路阻抗的百分值; Z_k 为短路阻抗; VA 为变压器额定容量, kVA。

通过漏磁阻法和有限元法分别对改变绕组结构前后变压器中低阻抗进行计算和对比分析,有限元法计算的变压器漏磁分布见图6。分别应用上述两种计算方法针对原变压器以及3种高阻抗变压器设计方案模型计算其短路阻抗,结果对比分析见表1。

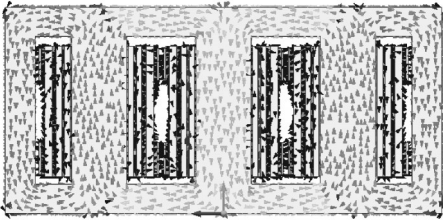


图6 漏磁分布

Fig. 6 Leakage magnetic field distribution

表1 两种计算方法短路阻抗计算结果对比

Table 1 Comparison of short-circuit impedance between original and optimized structure %

参数	有限元法	解析法	相对误差
原结构	7.94	7.71	2.9
方案1	8.83	9.09	2.9
方案2	15.37	15.15	1.4
方案3	17.83	17.84	0.1

从表1中计算结果可知,基于场路耦合的有限元法和漏磁阻法两种计算方法计算结果的相对误差小于3%,在工程允许的范围内,验证了文中短路

阻抗计算的正确性。

同时,从表1中可得出文中所提出的3种绕组的优化结构都能在一定程度上提高变压器的中低(高低)阻抗,为便于观察,具体3种优化方案与优化前中低短路阻抗的对比分析见表2。表2中第3种方案将高压绕组内置对变压器的短路阻抗提高最为明显,提高了124.56%。

表2 原结构与优化结构短路阻抗对比

Table 2 Comparison of short-circuit impedance between original and optimized structure %

方案	原结构	优化结构	提高值
1	7.94	8.83	11.21
2	7.94	15.37	93.58
3	7.94	17.83	124.56

3 结构件涡流损耗计算

如上所述可知,3种设计方案都是依靠变压器的漏磁达到了高阻抗的目的,而变压器的漏磁通在经过变压器油箱以及各种金属结构件时,会在其中产生很大的涡流损耗,这部分损耗在变压器中以发热的方式表现出来。当某些部位损耗密度过高,其热量又不能及时散发出去时,就会形成危险的局部过热,影响变压器的稳定运行^[13-17]。因此,文中针对4种不同的结构模型分别进行结构件涡流损耗的计算。计算模型见图1。

通过有限元计算得到,改变绕组结构前夹件和油箱的涡流损耗密度分布,分别见图7、8。



图7 夹件表面损耗密度分布

Fig. 7 Diagram of loss density distribution on surface of yoke clamp

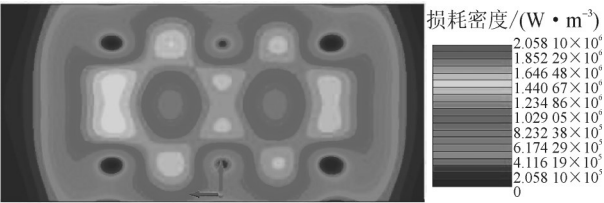


图8 油箱内表面损耗密度分布

Fig. 8 Diagram of loss density distribution on inner surface of tank wall

从图7、8中可以看出,在A、B、C三相绕组端部夹件的损耗较大,其最大值出现在A、C相绕组端部对应部位,由于下夹件距绕组的距离小于上夹件距

绕组的距离,进入下夹件的漏磁较多,因此损耗密度最大值出现在下夹件。

将高压绕组内置的方案对变压器中低短路阻抗提高最明显,漏磁最大,油箱和夹件的杂散损耗也必然增大,将高压绕组内置后夹件和油箱的损耗密度分布见图9、10。



图9 夹件表面损耗密度分布

Fig. 9 Diagram of loss density distribution on surface of yoke clamp

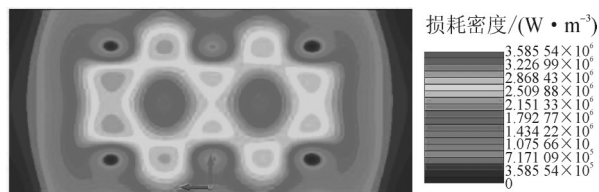


图10 油箱内表面损耗密度分布

Fig. 10 Diagram of loss density distribution on inner surface of tank wall

应用有限元求解可得到磁场强度,将得到的代入式(8)中,求解出每一个面的涡流损耗,将夹件和油箱各个面的涡流损耗值

相加,即可得到总的涡流损耗。

$$P = \sqrt{\frac{\omega \mu_0 \mu_r}{8\sigma}} \int_s H_t \cdot H_t^* ds \quad (8)$$

式(8)中: H_t 为沿阻抗边界条件上的切向分量; H_t^* 为其共轭; μ_0 为真空磁导率; μ_r 为材料的相对磁导率; σ 为材料的电导率; ω 为角频率^[18-21]。

由式(8)计算可得出,改变绕组结构前后1/2变压器模型中夹件和油箱的涡流损耗见表3。从表3中可以看出,高阻抗实现过程中结构件涡流损耗也有较大的增加。其中将高压绕组内置的方案3中涡流损耗增加最大,与初始结果相比增加了37 kW。损耗的增大给绝缘设计带来困难,因此,在提高短路阻抗的同时,必须做好绝缘工作。

表3 改变绕组前后结构件涡流损耗对比

Table 3 Comparison of eddy current losses in structure parts before and after changing the winding kW

部件	夹件	油箱	总损耗
初始结构	7.79	15.34	23.13
方案1	12.71	28.69	41.40
方案2	14.28	33.48	47.76
方案3	16.99	43.11	60.10

4 结论

文中通过改变绕组结构,提出了3种提高中低压侧绕组短路阻抗的方案,并应用基于场路耦合的有限元和漏磁阻法分别计算了3种优化结构的短路阻抗,得出结论:

1)计算结果表明3种方案都不同程度的提高了变压器的短路阻抗,其中将高压绕组内置的方案对提高短路阻抗最明显,提高了124.56%。其次,为调压中置的方案,提高了93.58%,提高最少的为中压分裂的方案,提高了11.21%。因此,3种方案都能在一定程度上抑制短路电流过大引起的变压器损坏问题。

2)3种设计方案都是依靠变压器的漏磁达到了高阻抗的目的,其中将高压绕组内置的方案对提高短路阻抗最有效,漏磁也最大,涡流损耗最大,与原结构相比涡流损耗增加了37 kW,可能引起局部过热,因此,在提高短路阻抗的同时,必须做好绝缘的工作。

参考文献:

- [1] 刘刚,黄华.高阻抗电力变压器的设计思路[J].变压器,2015,52(9):1-4.
LIU Gang, HUANG Hua. Design thought of high impedance power transformer[J]. Transformer, 2015, 52(9):1-4.
- [2] 董宏林,王勇,张立国,等.高阻抗变压器两种方案比较分析[J].变压器,2008,45(9):29-31.
DONG Honglin, WANG Yong, ZHANG Ligu, et al. Comparison and analysis of two projects for high impedance transformer[J]. Transformer, 2008, 45(9):29-31.
- [3] 李洪春.220 kV三绕组有载调压高阻抗变压器设计[J].变压器,2009,46(5):1-6.
LI Hongchun. Design of 220 kV on-load-tap-changing high impedance transformer with three windings[J]. Transformer, 2009, 46(5):1-6.
- [4] 周雨.一种220 kV高阻抗变压器工程设计新方法[D].保定:华北电力大学,2013.
ZHOU Yu. A new engineering design method of 220 kV high-impedance transformer[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2013.
- [5] 董景义,侯世勇.500 kV自耦变压器阻抗电压计算分析[J].变压器,2013,50(8):1-6.
DONG Jingyi, HOU Shiyong. Calculation and analysis of impedance voltage value for 500 kV auto-transformer[J]. Transformer, 2013, 50(8):1-6.
- [6] 武力.220 kV有载调压高阻抗变压器的设计[J].变压器,2001,38(4):6-11.

- WU Li. Design of 220 kV high impedance on-load tap-changing transformers[J]. Transformer, 2001, 38(4):6-11.
- [7] 张亚杰, 刘洪文, 周连发. 高阻抗变压器中内置式串联电抗器的仿真研究[J]. 变压器, 2014, 51(12):19-21.
- ZHANG Yajie, LIU Hongwen, ZHOU Lianfa. Simulation study on built-in series reactor in high impedance transformer[J]. Transformer, 2014, 51(12):19-21.
- [8] 刘东升. 高阻抗变压器的结构与应用[J]. 变压器, 2006, 43(10):9-11.
- LIU Dongsheng. Application and structure of high impedance transformer[J]. Transformer, 2006, 43(10):9-11.
- [9] LU Jiayu, YUAN Jiansheng, CHEN Li. Calculation of the short-circuit reactance of transformers by a line integral based on surface magnetic charges[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1998, 34 (5):3483-3486.
- [10] 邓海生, 陈东风, 林刚. 高-低-高-调排列双绕组有载调压变压器短路阻抗计算方法分析[J]. 变压器, 2010, 47(7):1-5.
- DENG Haisheng, CHEN Dongfeng, LIN Gang. Analysis of calculation methods for short circuit impedance of double-winding on-load-tap-changing transformer with arrangement of HV-LV-HV-voltage regulation windings[J]. Transformer, 2010, 47(7):1-5.
- [11] 王世山, 李彦明, 郭颖娜. “磁场-电路”耦合法计算变压器短路阻抗[J]. 变压器, 2006, 32(11):11-14.
- WANG Shishan, LI Yanming, GUO Yingna. Calculation of short-circuit impedance for power transformer with coupling FEM method of magnetic field and circuit[J]. Transformer, 2006, 32(11):11-14.
- [12] 刘军, 张安红. 150 MVA/220 kV 高阻抗变压器漏磁场分析[J]. 变压器, 2005, 42(9):1-7.
- LIU Jun, ZHANG Anhong. Leakage field analysis of 150 MVA/220 kV high impedance transformer[J]. Transformer, 2005, 42(9):1-7.
- [13] 韩芳旭, 李岩, 孙昕. 电力变压器漏磁场和短路阻抗计算[J]. 变压器, 2010, 47(10):9-12.
- HAN Fangxu, LI Yan, XUN Xin. Calculation of leakage magnetic field and short circuit impedance of power transformer[J]. Transformer, 2010, 47(10):9-12.
- [14] 侯义明, 黄英晓, 张亚杰, 等. 高阻抗变压器的附加损耗分析及仿真应用[J]. 变压器, 2013, 50(6):1-4.
- HOU Yiming, HUANG Yingxiao, ZHANG Yajie, et al. Analysis and simulation of auxiliary loss of high impedance transformer[J]. Transformer, 2013, 50(6):1-4.
- [15] 陈新华, 吉强, 杨春, 等. 大容量高阻抗变压器中降低铁心夹件损耗方法的工程研究[J]. 变压器, 2014, 51(4):34-36.
- CHEN Xinhua, JI Qiang, YANG Chun, et al. Engineering research on method of reducing losses of core clamps in large power and high-impedance transformer[J]. Transformer, 2014, 51(4):34-36.
- [16] SUSNJIC L, HAZNADAR Z, VALKOVIC Z. 3D finite-element determination of stray losses in power transformer[J]. Electric Power Systems Research, 2008, 78(10):1814-1818.
- [17] 耿荣林, 谢德鑫, 李洪友. 变压器箱体涡流损耗三维有限元分析[J]. 变压器, 2008, 45(2):1-4.
- GENG Yinglin, XIE Dexin, LI Hongyou. 3D finite element analysis of eddy current loss in transformer tank[J]. Transformer, 2008, 45(2):1-4.
- [18] PAVLIC D, JOHNSON D C, GIRGIS R S. Calculation and reduction of stray and eddy losses in core-form transformers using a highly accurate finite element modelling technique[J]. IEEE Trans. on Power Deliv., 1993, 8(1):239-245.
- [19] 尹克宁. 变压器设计原理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- YIN Kening. Transformer design principle[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2003.
- [20] EI HAYEK J. Short-circuit reactants of multi-secondaries concentric windings transformers[C]//IEEE International Electric Machines & Drives Conference. [S.l.]: IEEE, 2001: 462-465.
- [21] KAWASKI K, INAMI M, ISHIKAWA T. Theoretical considerations on eddy current losses in non-magnetic and magnetic pipes for power transmission systems[J]. IEEE Trans. on PAS, 1981, 100(2):474-484.
- 王晓伟(1989—), 男, 硕士研究生, 从事直流偏磁下高阻抗变压器的振动与噪声的研究工作。
- 李岩(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 从事变压器、永磁电机以及工程电磁场问题的研究工作。

版权声明:

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社在中国知网及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。该社著作权使用费与本刊稿酬一并支付。作者向本刊提交文章发表的行为即视为同意我编辑部上述声明。

《高压电器》编辑部