

DOI: 10.7667/PSPC151208

零序滤波器立体结构设计及阻抗计算

尹忠东, 王彬

(华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206)

摘要: 针对配电网零序电流的特点提出一种三角形立体式结构的零序滤波器。立体式结构中铁芯柱在空间呈三角形对称分布, 相较于传统的平面式结构具有三相对称磁路, 解决了三相不平衡问题, 并且使得三相零序磁通大小一致, 提高了滤波效果。零序阻抗值是零序滤波器设计的一个重要参数, 直接影响到滤波效果。在对零序磁通分布理论分析的基础上, 给出立体结构零序滤波器在ANSYS中的二维简化模型, 并采用能量法对零序阻抗进行数值计算。最后通过实验验证了该方法的正确性, 为立体结构的零序阻抗计算提供了一种有效的工程应用的方法。

关键词: 配电网; 零序滤波器; 对称磁路; 能量法; ANSYS; 阻抗计算

Stereoscopic structural design and impedance calculation of zero sequence filter

YIN Zhongdong, WANG Bin

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources
(North China Electric Power University), Beijing 102206, China)

Abstract: According to the characteristics of the zero-sequence current in the distribution system, a stereoscopic zero sequence filter structure is proposed. The iron cores are symmetrically arranged in a triangular space. Compared to the conventional planar reactor, the triangular structure has a symmetrical magnetic circuit which can solve the problem of the three-phase imbalance and enable three-phase zero sequence flux to be consistent. In the zero-sequence filter, the value of the zero sequence impedance is an important parameter which has a direct impact on the filtering effect. In order to obtain an accurate zero sequence impedance for the structural design, the distribution of the zero-sequence flux is theoretically analyzed, and a simplified symmetric model in ANSYS is given. Then the zero-sequence impedance is calculated using the energy method based on the ANSYS software. Finally an experiment is carried out. The result of the experiment verifies the correctness of the calculation. It provides an effective engineering method for the zero sequence impedance design of the stereoscopic zero-sequence filter.

Key words: distribution system; zero sequence filter; symmetrical magnetic circuit; energy method; ANSYS; impedance calculation

0 引言

随着变频设备等电力电子装置的大量使用, 配电网中引入了大量的谐波, 影响电网安全经济运行^[1]。其中的零序谐波具有三相大小相等方向相同的特点, 并在系统的中性线上叠加, 使系统出现不同程度的过电压情况, 导致电气设备的损坏, 严重时甚至造成中性线电流过大被烧断的危险^[2-3]。

零序滤波器是一种绕组经特定方式连接的滤波电抗器^[4]。其采用曲折移相的接线方式, 构建零序电流的低阻通道, 从而滤除中性线上的零序谐波。相较于传统的谐振滤波器, 零序滤波器没有电容,

不会造成无功功率的过补偿^[5]; 同时电抗耐过载能力强, 可靠性高。零序滤波器的结构与接地变压器^[6]相似, 多采用传统的平面三相三柱式结构。但这种平面结构具有三相磁路不对称的缺点, 会造成三相不平衡^[7], 降低了对零序电流的滤波效果。同时零序滤波器零序阻抗值是工程设计的一个重要参数, 直接关系到滤波效果。因此工程设计时需要准确获得零序阻抗值。但零序磁通磁路不固定^[8]很难准确计算零序阻抗的大小, 给工程设计带来困难。

为此本文设计了一种三角形对称结构的零序滤波器, 以解决传统平面式结构的三相不平衡问题。并且利用 ANSYS 软件强大的电磁计算能力, 采用

能量法对零序滤波器的零序阻抗数值进行了准确计算,为工程计算给出依据。最后对一台容量为 10 kVA 的零序滤波器的样机进行实验验证。

1 结构分析

设计的立体结构零序滤波器如图 1 所示。其三个铁芯柱在空间上互差 120° 呈三角形对称排列,上下铁轭呈三角环形。铁芯柱采用硅钢片叠压的形式。每个芯柱上的两个绕组呈同心式排列。铁芯柱和铁轭间可通过全斜切方式、对接方式或者直接方式紧密连接在一起。

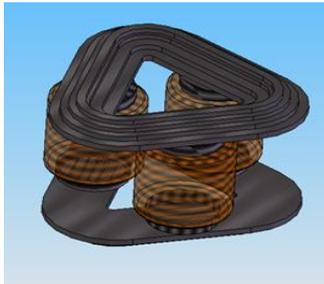


图 1 滤波器三维结构示意图

Fig. 1 Structure of 3D zero-sequence filter

图 2 是传统平面三相三柱式变压器的磁路路径,可以明显看到中间芯柱的磁路最短,两个边柱磁路较长,磁路越长磁阻越大。

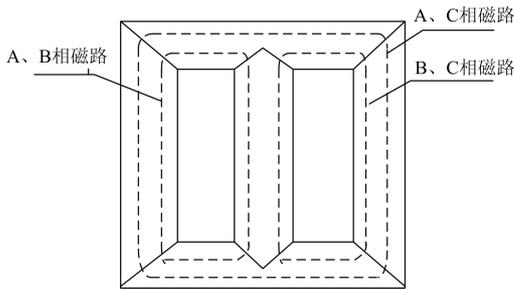


图 2 平面式三相变压器磁路

Fig. 2 Magnetic circuit of flat three-phase transformer

在三相电压对称也就是三相磁通对称的条件下,由于三相磁路不相同,由式(1)可知流过三个芯柱中的电流大小并不相等。因此平面式结构本身会产生一定的不平衡电流。

$$I = \frac{\phi l}{N\mu S} \quad (1)$$

式中: I 为电流; Φ 为磁通; l 为磁路的长度; N 为线圈匝数; μ 为磁导率; S 为磁路的截面积。

零序滤波器的零序电抗越小滤波效果越好,而零序电抗的大小由零序磁通决定。如果采用平面式结构,即使三相流过的零序电流具有幅值相等的特

点,但由于三相磁路的不对称,系统本身存在的不平衡电流会使流过同一个铁芯柱的两个绕组电流产生的零序激磁磁通不能完全抵消,从而在一定程度上增大了零序电抗。而在三角形结构中,三个铁芯柱互差 120° 对称排列,零序激磁磁路完全对称使得同一个芯柱上两个绕组的零序激磁磁通可以完全抵消,零序电抗完全由零序漏磁通决定,所以降低了零序电抗的大小,提高了滤波效果。同时文献[9]指出在工作时,传统平面结构变压器铁轭的 4 个直角边上的磁通密度很低,铁磁材料的利用效率不高。新型结构采用三角形铁轭不仅使三相磁路最短,同时也省去了传统结构的 4 个边角,优化了铁轭结构,减轻了滤波电抗器的重量。

2 滤波原理分析

零序滤波器采用曲折移相^[10]的接线方式如图 3 所示,每相绕组分成两半,分别位于两个不同的芯柱上。将一个芯柱的上半绕组与另一个芯柱的下半绕组反串起来,组成一相。电流从每相的上半绕组中流入,同时将三个下半绕组接在一起后接到电网的中性线上。根据零序电流大小相等的特点,零序滤波器每一相上半绕组与下半绕组的匝数相等,且不同相之间的绕组匝数也相等。

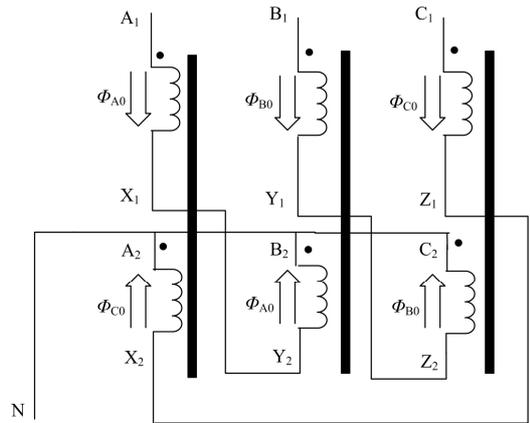


图 3 零序滤波器接线原理图

Fig. 3 Zero sequence filter wiring

在曲折接线的方下,零序滤波器同一个铁芯柱上两个同芯式绕组产生的零序激磁磁通大小相等方向相反,各铁芯柱中零序激磁磁通满足:

$$\Phi_{A0}(t) = \Phi_{B0}(t) = \Phi_{C0}(t) \quad (2)$$

式(2)表明,同一铁芯柱中零序激磁磁通相互抵消,因此零序电抗完全由零序漏电抗构成。所以零序滤波器对零序电流只具有很小的零序漏阻抗并且

该阻抗远远小于系统自身的零序阻抗。而对于正序电流根据曲折移相的磁路关系,正序磁通不能抵消,因此表现出极大的正序激磁阻抗。零序滤波器接在相线与零线之间,利用装置自身零序阻抗小的特点,使系统中的零序电流通过零序滤波器形成回路,从而大大减小了中性线上零序电流,并且对正常情况下的三相对称电流没有影响。

3 零序阻抗分析与计算

3.1 零序阻抗分布的理论分析

由前面的分析可知,零序滤波器的零序阻抗主要由零序漏磁通产生。对于零序滤波器,线圈产生的零序漏磁通主要通过周围空气以及所邻近的部分铁芯柱闭合。根据磁路的安培环路定理可以做出线圈周围的漏磁分布。考虑到铁芯柱的磁阻很小以及线圈高度以外的磁路面积很大,所以可以认为在铁芯柱中以及线圈高度以外的磁位降为零^[11]。基于以上两点简化,根据磁路法^[12]可以做出零序漏磁通的磁势分布如图4中的阴影所示。图中的D1、D2分别表示同一芯柱上的内、外线圈。

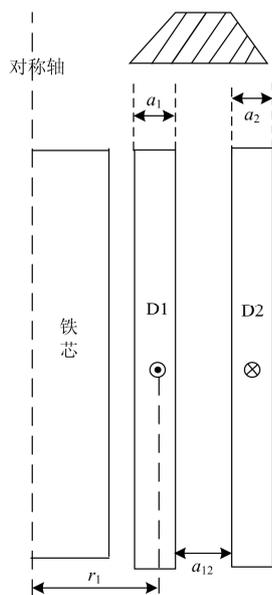


图4 零序漏磁势分布

Fig. 4 Distribution of zero sequence leakage reactance magnetic potential

由图4可见,零序漏磁势呈梯形分布,在内外绕组间漏磁势达到最大值,而在铁芯以及线圈高度以外的部分漏磁势基本为零。

图4中 r_1 表示线圈D1的平均半径; a_1 、 a_2 分别表示线圈D1、D2的厚度; a_{12} 表示线圈间距。这些参数的具体数值将在后面仿真计算时给出。

3.2 零序阻抗的 ANSYS 仿真

零序滤波器的漏磁场呈三维空间分布,但在 ANSYS 环境下对整个零序滤波器建立三维立体模型,则必然产生大量待处理数据并导致计算时间的增大,对计算机性能要求很高。本文设计的零序滤波器采用三相完全对称的结构,三相零序漏电抗的磁路完全对称。因此可以采用简化的二维建模的方法,对其中一相磁路进行分析。建立考虑滤波器线圈和铁芯结构的二维磁场模型,忽略其他结构件,这种简化满足工程分析的要求^[13]。建模前,对零序滤波器模型提出如下两个简化:

(1) 不考虑导线之间的绝缘材料,将导线作为块状导体处理。

(2) 为减少计算的节点数,没有对三角形铁轭建模。

以文中容量为 10 kVA 的样机为例,ANSYS 模型参数如下:铁芯柱半径为 3.5 cm、高 18 cm;实际线圈为多匝并绕方式,根据前面的简化方法,仿真时以块状导体表示,块状导体厚度为 0.4 cm、高 12 cm。建立好的零序滤波器在 ANSYS 中的二维轴对称模型如图5所示。其中 A1 代表铁芯,A2、A3 分别为该铁芯柱上内、外两个绕组,A4 为空气。 L_a 为对称轴, L_b 为空气的外边界。

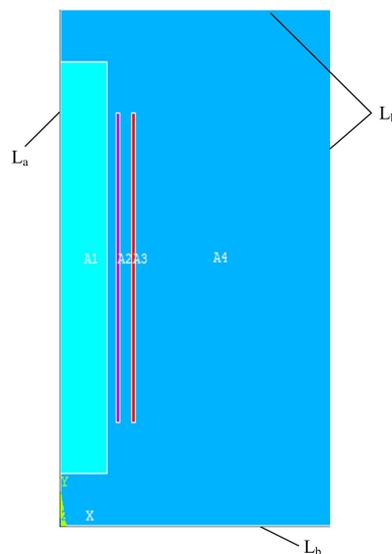


图5 二维轴对称模型

Fig. 5 2D axisymmetric model

内外绕组和空气的相对磁导率取 1,铁芯相对磁导率设为 3 000,单元类型选择具有 8 节点的二维单元 PLANE53,自由度(DOF)为矢量磁位 A。采用自适应网络剖分求解,对外边界设磁通量平行的边界条件,即满足第一类边界条件,求解后在通用后处

理器中观察零序漏磁通的磁力线分布如图 6。

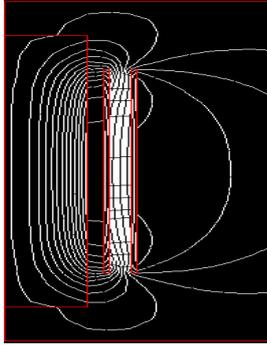


图 6 漏磁通磁力线分布

Fig. 6 Distribution of leakage flux magnetic field lines

从图 6 中可以看出，漏磁通的磁力线基本上平行于对称轴分布，形成纵向漏磁，并且在两个线圈绕组之间分布最密集。在线圈端部磁力线渐渐呈水平分布，并且在远处空气形成闭合，形成横向漏磁。故零序滤波器的漏磁通主要以沿轴分布的纵向漏磁为主，横向漏磁只在铁芯端部出现，所占比例较小。漏磁通主要路径为非铁磁性的线圈以及周围空气。

为进一步观察漏磁势在绕组以及空气中的分布，在模型高度一半处沿内绕组 A1 的左边界到外绕组 A2 的右边界设置一水平路径，绘制出在该水平路径上漏磁势分布如图 7 所示。路径上的漏磁势从左到右整体呈梯形分布，形成一个漏磁组。在内外线圈之间，漏磁势最大并且大小不发生变化。

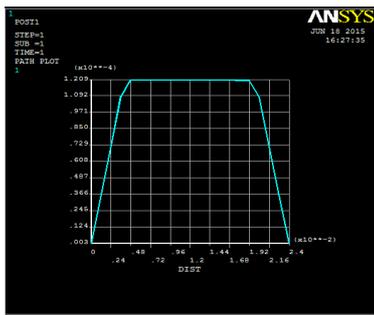


图 7 水平路径上漏磁分布

Fig. 7 Distribution of magnetic flux leakage on horizontal path

对比图 7 和图 4 可以发现，仿真数据绘制的漏磁分布与理论分析的结果一致。由此可见，这种二维对称简化建模方法不仅可以大大减少计算量，同时也具有较高的准确性。

3.3 零序阻抗的计算

由前文分析可知，该三角形零序滤波器的零序阻抗由零序漏磁通产生。但由于零序漏磁通的磁路不确定，漏电抗很难准确计算。漏电抗的计算方法主要有相对漏磁链法、能量法和解析法等^[14]。文献

[15]指出相对漏磁链法无法对横向漏磁准确计算，当线圈半径与高度之比较大时采用相对漏磁链法可能会造成一定的误差。而能量法是利用滤波器漏磁场中磁场储能平均值与电感的关系计算漏电抗，可用于复杂结构的漏电抗计算^[16]。因此本文采用能量法并结合 ANSYS 软件对零序漏电抗进行计算。

计算采用的零序滤波器简化的二维轴对称模型同图 5 所示。在柱坐标系下，零序滤波器的漏磁场分布可以用如下泊松方程边值问题描述^[17]。

$$\begin{cases} \Omega: \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial A_\theta}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial A_\theta}{\partial z} \right) = -J_\theta \\ S1: A_\theta = 0 \quad (L_a \text{ 和 } L_b) \end{cases} \quad (3)$$

式中： A_θ 为矢量磁位的周向分量； μ 为磁导率； J_θ 为绕组的电流密度。

由文献[18]可知磁场储存能量可以表达为

$$W_m = \frac{1}{2} \int_V B \cdot H \, dv \quad (4)$$

式中： B 为空间中漏磁场的磁感应强度，T； H 为空间漏磁场强度，A/m； v 为漏磁场的分布空间， m^3 ； W_m 为漏磁场的能量，J。

其中 B 、 H 在 ANSYS 软件下利用有限元法求解方程(3)以及进行旋度计算得到。求出 B 、 H 的空间分布之后，采用积分的方法求出整个空间漏磁场的总能量。最终利用式(5)表示的漏磁场的总能量与漏电抗的关系求出漏电抗的大小。

$$X = \frac{4\pi f W_m}{I_k^2} \quad (5)$$

式中： X 为漏电抗值， Ω ； f 为电源频率，Hz； I_k 为工作电流，A。

本文中零序滤波器样机容量为 10 kVA，额定电压为 380 V。结合图 4 给出实验样机计算的具体计算参数： r 为 4.5 cm， a_1 为 0.4 cm， a_{12} 为 0.8 cm， a_2 为 0.4 cm。采用静态分析的方法，内外线圈分别施加方向相反的单位电流密度，外边界设置磁通平行的边界条件，即满足第一类边界条件。仿真计算完毕后在通用后处理器中整理得到空气、线圈以及铁芯中的能量如表 1 所示。

表 1 模型各部分漏磁能量

Table 1 Leakage magnetic energy of model

单元	铁芯	空气	线圈	总计
能量				
$W_m / (J \times 10^{-3})$	0.000 155 71	0.516	0.136 323	0.653

由表 1 可以看出，漏磁场能量的绝大部分都集中在空气和线圈中，并且空气中的漏磁能量要远大于线圈。将总的漏磁场能量 $0.653 \times 10^{-3} J$ 代入公式

(5), 其中 I_k 为单位电流, 计算出漏电抗为 0.41Ω 。

4 实验验证

首先对文中 10 kVA 样机三相对称度以及滤波效果进行实验测试。利用隔离变压器在实验室中建立三相四线制的供电系统, 采用三个带大电容滤波的单相不控整流电路来模拟负载谐波源来产生各奇次谐波电流^[19]。使用电能质量分析仪 CA8335 记录实验数据与波形, 其中电流互感器变比为 $200:1$ 。

在空载运行时记录实验样机的三相励磁电流如图 8 所示。可以看到, 由于芯柱的对称排列, 三相磁路完全对称, 所以三相励磁电流大小完全相等, 没有平面式结构的三相不平衡缺点。

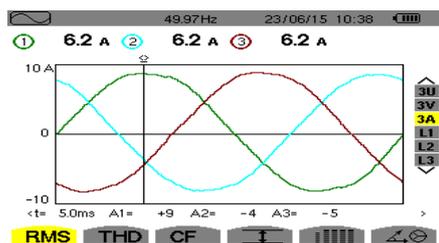


图 8 三相励磁电流波形

Fig. 8 Three-phase excitation current

接入带大电容滤波的负载后, 记录滤波前后电源侧中性线上的电流如图 9、图 10 所示。从实验结果上可以看到中性线上的电流从 83.1 A 降到 5.2 A , 下降幅度超过 90% , 可见零序滤波器起到了很好的滤波效果。

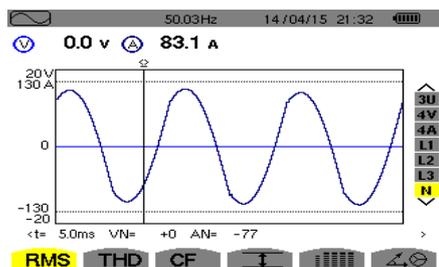


图 9 滤波前中性线电流

Fig. 9 Neutral current before filtering

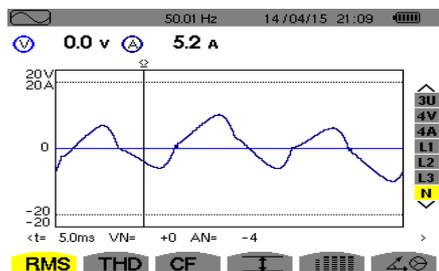


图 10 滤波后中性线电流

Fig. 10 Neutral current after filtering

断开谐波负载, 将图 3 中零序滤波器三个进线端 A_1 、 B_1 、 C_1 短接。然后在 A_1 与 N 之间加单相交流电压, 对实验样品进行零序阻抗测量。由于零序阻抗很小, 为防止线路上零序电流过大, 事先在出线端 N 上串联一个负载电阻。测试记录零序滤波器两端的电压以及流过绕组的电流, 从而计算零序阻抗的大小。测量结果显示该台样机零序阻抗为 0.585Ω 。考虑到导线电阻的存在, 实验结果数据与利用能量法计算得到的 0.41Ω 的数值相差不大。

5 结论

本文设计的一种立体式结构零序滤波器能完全消除传统平面结构三相磁路不对称的缺点; 同时三角型的铁轭形状使三相磁路最短, 在一定程度上减少了铁磁材料的使用, 减轻了滤波器的重量。针对零序滤波器漏磁通的特点, 文中采用一定的简化方法建立了二维模型, 并根据能量法对零序漏电抗进行数值计算。与实验数据进行对比, 说明了计算方法的正确性, 从而为立体结构的零序滤波器零序阻抗的工程设计和计算提供了一种有效的方法。

参考文献

- [1] 冯兴田, 孙添添, 马文忠. 配电网电能质量调节装置集散配置策略[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(24): 33-39.
FENG Xingtian, SUN Tiantian, MA Wenzhong. Centralized and dispersed allocation strategy of power quality regulating devices in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(24): 33-39.
- [2] 傅军栋, 喻勇, 黄来福. 不平衡负载的一种更加经济的补偿方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 126-132.
FU Jundong, YU Yong, HUANG Laifu. A more economical compensation method for unbalanced load[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 126-132.
- [3] 雍静, 周浩. 基于谐波的低压配电干线中性线断线检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(19): 49-57.
YONG Jing, ZHOU Hao. A harmonic-based approach for open-neutral fault detection in low voltage systems[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(19): 49-57.
- [4] 宋祺鹏, 尹忠东, 单任仲, 等. 移相型零序滤波器的仿真与实验[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(17): 75-78.
SONG Qipeng, YIN Zhongdong, SHAN Renzhong, et al. Simulation and experimental of phase shifting zero-

sequence filter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(17): 75-78.

[5] 李罗, 雷颖, 魏玲燕, 等. 配电用复合无功功率补偿装置原理分析及试验方法研究[J]. 高压电器, 2014, 50(1): 107-111.
LI Luo, LEI Ying, WEI Lingyan, et al. Principle analyze and test method of complex reactive power compensation equipment for power distribution system[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(1): 107-111.

[6] 徐绍麟. 城市电网 10 kV 低阻接地系统中接地变压器零序保护接线方案[J]. 继电器, 2003, 31(9): 35-39.
XU Shaolin. Grounding transformer zero sequence protection in 10 kV low resistance grounding system[J]. Relay, 2003, 31(9): 35-39.

[7] LIAO C, RUAN J, LIU C, et al. 3-D coupled electromagnetic-fluid-thermal analysis of oil-immersed triangular wound core transformer[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2014, 50(11): 1-4.

[8] 何源, 李新, 罗建. 利用磁滞回线辨识变压器励磁电感研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(14): 19-24.
HE Yuan, LI Xin, LUO Jian. Distinguishing magnetizing inductance of power transformer based on hysteresis loop[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(14): 19-24.

[9] 冯静. 基于 ANSYS 的漏感变压器的仿真计算[D]. 成都: 电子科技大学, 2011.
FENG Jing. Simulation and calculation of the leakage inductance transformer based on ANSYS[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2011.

[10] 李发海, 朱东起. 电机学[M]. 北京: 科学出版社, 2007.

[11] 周雨. 一种 220 kV 高阻抗变压器工程设计新方法[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.
ZHOU Yu. New method of 220 kV high impedance transformer engineering design[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013.

[12] 崔立君. 特种变压器理论设计[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1996.

[13] 王雪, 王增平. 基于有限元法的变压器电感参数计算方法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(24): 11-14, 35.
WANG Xue, WANG Zengping. An investigation on transformer inductance calculation based on finite element method[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(24): 11-14, 35.

[14] 李岩, 李龙女, 井永腾, 等. 轴向双分裂发电机变压器漏磁场及穿越短路阻抗计算与分析[J]. 高电压技术, 2014, 40(6): 1623-1629.
LI Yan, LI Longnü, JING Yongteng, et al. Calculation and analysis of leakage magnetic field and short-circuit impedance in axial[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(6): 1623-1629.

[15] 潘东海. DSBC 树脂浇注式变压器电场和磁场计算[D]. 北京: 华北电力大学, 2011.
PAN Donghai. Electric and magnetic fields calculation of DSBC cast resin transformers[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2011.

[16] 李锦彪. 曲折形联结变压器短路阻抗计算的能量法[J]. 电工技术学报, 2013, 31(增刊 2): 127-133.
LI Jinbiao. Calculation of zigzag transformer impedance using energy method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 31(S2): 127-133.

[17] 李锦彪, 周重芝. 变压器铁心拉板损耗的计算与分析[J]. 变压器, 1995, 32(6): 17-20.
LI Jinbiao, ZHOU Chongzhi. Loss calculation and analysis of transformer core pull plate[J]. Transformer, 1995, 32(6): 17-20.

[18] 李英. 用能量法计算电抗的实例[J]. 变压器, 2004, 41(2): 18-21.
LI Ying. Examples of calculation reactance using energy method[J]. Transformer, 2004, 41(2): 18-21.

[19] 张航, 毛欣, 王佳佳, 等. 单相整流负荷谐波功率需求建模分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(20): 8-14.
ZHANG Hang, MAO Xin, WANG Jiajia, et al. Modeling and analysis for harmonic power demand of single-phase rectification loads[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(20): 8-14.

收稿日期: 2015-07-13; 修回日期: 2015-08-16
作者简介:

尹忠东(1968-), 男, 博士, 教授, 研究方向为 FACTS, 电能质量及可控电抗器; E-mail: yzd@ncepu.edu.cn
王彬(1990-), 男, 硕士研究生, 研究方向为柔性供电与电能质量. E-mail: 1127124953@qq.com

(编辑 魏小丽)