

基于有限元分析的零序滤波器 漏电抗仿真研究

零序滤波器因其绕组采用曲折形联结，零序漏电抗是影响零序滤波器滤波效果的关键参数。采用有限元分析软件ANSYS对100 kV·A零序滤波器的其中一相进行二维漏磁场仿真与分析，通过前处理、加载求解及后处理获得了工况下零序滤波器的铁心内部磁场分布、铁心与绕组间的漏磁场分布和内外绕组间的漏磁场分布，并利用磁场能量法计算出零序漏电抗，为降低零序滤波器的短路阻抗，提高滤波效果提供一种新思路，可以达到缩短其设计周期及节约设计成本的目的。

杨 永 黄道文/广东电网有限责任公司茂名供电局

0 引言

随着电网中非线性负荷的比重不断增加，无可避免地给电网带来频次更加丰富的谐波，谐波产生的附加损耗会降低设备运行效率，尤其会影响对电能质量要求很高的负载的正常运行^[1-2]。3次谐波会通过输电线路和中性线形成回路，使中性线电流甚至超过相电流，严重时会造成中性线的断线。谐波还会影响电力系统电能质量及干扰通信系统，使数据传输失真^[3-6]。

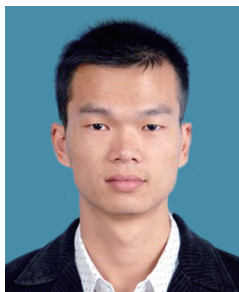
三相零序谐波电流是3个幅值相等，相位相同的3次及3的倍数次谐波电流^[7]。零序滤波器是绕组采用曲折形联结的滤波电抗器，对零序电流呈低阻特性，从而使零序电流主要流经零序滤波器，而不通过中性线。相比于无源滤波器，其滤波特性不受系统参数影响，不易出现

过负荷、失谐等现象；与有源滤波器相比，结构简单，无复杂控制策略，成本较低。

零序滤波器的滤波效果与其零序漏电抗大小密切相关，零序漏电抗值是工程设计中的重要参数^[8]，但零序磁通因与空气接触形成回路，不固定的磁路利用常规公式很难精确计算出零序漏电抗值^[9]，给工程设计带来困难。因零序滤波器的铁心结构空间对称，本文对100 kV·A的零序滤波器的其中一相磁路进行分析，采用ANSYS有限元分析软件对铁心及绕组进行二维漏磁场仿真。考虑实际铁心的磁饱和情况，获得了工况下零序滤波器的铁心内部磁场分布、铁心与绕组间的漏磁场分布和内外绕组间的漏磁场分布，并利用磁场能量法计算出零序漏电抗。通过对零序滤波器漏磁场的仿真与分析，直观描述了其磁场在铁心与绕组中的分布，并提供一种较为准确的计算零序漏电抗的方法。

1 零序滤波器的结构与原理

新型磁通补偿型零序滤波器绕组的接线方式如图1所示。 Ψ_{A0} 、 Ψ_{a0} 分别为A相铁心柱上半绕组和下半绕组的零序励磁磁通； Ψ_{B0} 、 Ψ_{b0} 分别为B相铁心柱上半绕组和下半绕组的零序励磁磁通； Ψ_{C0} 、 Ψ_{c0} 分别为C相铁心柱上半绕组和下半绕组的零序励磁磁通。每相绕组分为两部分，分别位于两个不同的心柱上，即将一个心柱的上半绕组与另一个心柱的下半绕组反串起来，组成一相。每个铁心



杨 永/工程师

关键词/Keywords

零序滤波器 ·
零序漏电抗 ·
ANSYS ·
漏磁场分布 ·

中国南方电网有限责任公司“新型磁通补偿型低压配电网零序滤波器研发与应用”科技项目 (GDKJQQ20152067)。

柱的上下绕组匝数相等，下半绕组作为磁通补偿绕组，绕组采用曲折形联结，不同相之间的绕组匝数也相等。A、B和C三相电流从每相的上半绕组中流入，同时将3个下半绕组接在一起后接到电网的中性线N上。

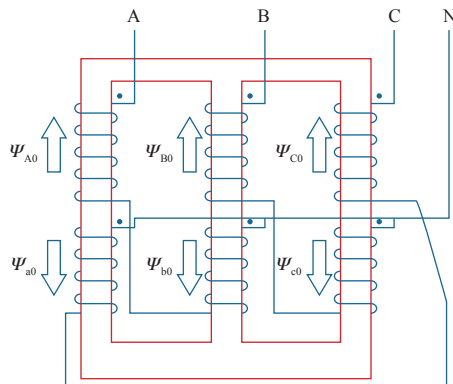


图1 零序滤波器接线原理

由于各相绕组匝数相等，采用曲折形联结后同一个铁心柱的上下绕组产生的零序励磁磁通等大反向，即满足

$$\begin{cases} \psi_{A0} = -\psi_{a0} \\ \psi_{B0} = -\psi_{b0} \\ \psi_{C0} = -\psi_{c0} \end{cases} \quad (1)$$

由式（1）可知，如果流经滤波器的三相电流相等，则同一铁心柱上的零序励磁磁通将会相互抵消，使每相串联绕组呈现低阻抗，而具有此特性的电流正是零序谐波电流，而对于正负序电流，因正负序磁通不能相互抵消，其励磁磁阻很大，将不会通过零序滤波器。

2 零序漏磁场分析

零序滤波器的立体式铁心结构如图2所示，三相铁心柱 W_1 、 W_2 和 W_3 在空间完全对称，空间位置角互差 120° ，上下铁轭 Y_1 、 Y_2 为圆形。因为零序滤波器采用三相完全对称的结构，三相漏磁通的磁路完全对称，因此对其中一相磁场进行分析。

零序漏磁通主要通过周围空气以及所邻近的部分铁心柱闭合。图3为零序漏磁势分布图，其中 C_1 和 C_2 是缠绕在一个铁心柱上的两个半绕组，其按由内向外排列时纵截面的轮廓线。 a_1 、 a_2 为绕组的

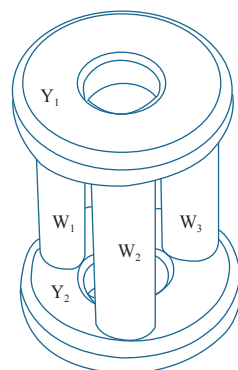


图2 零序滤波器铁心结构

截面厚度， r_1 、 r_2 以及 r_{12} 分别为内绕组、外绕组和中间空道的平均半径。因为铁心柱的磁阻很小，而漏磁面积很大，因此可以认为在铁心柱中以及线圈高度以外的磁位降为零。磁势分布曲线以内绕组线圈内侧的延长线与基准线的交点为起点绘制，若磁势增大则磁势曲线斜向上，磁势减小则斜向下延伸。滤波器内绕组中沿内径向外磁势正比例增加，故曲线绘制为斜向上的一条斜直线。按同样的绘制方法画出外绕组的磁势分布线，由于电流方向相反，故斜线的方向也与内绕组相反，见图3中的阴影部分，可见零序滤波器的漏磁势为一个梯形漏磁组。

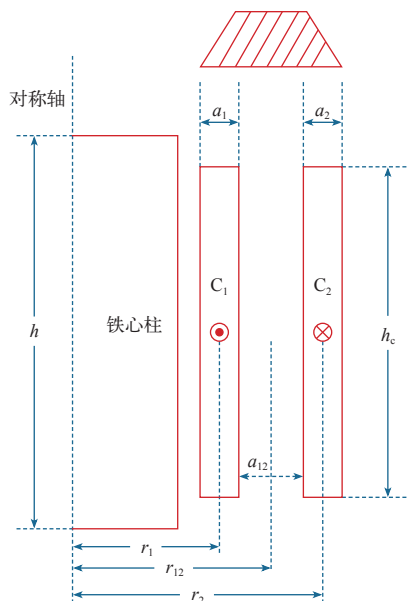


图3 零序漏磁势分布

为了得到较为准确的零序滤波器漏电感，采

用磁场能量法计算漏电抗。能量法是利用漏磁场空间范围内的平均磁场能量计算漏电抗,相比于漏磁链法忽略了横向漏磁,能量法更适用于绕组连接方式复杂的漏电抗计算,根据磁场能量表达式可以得到电感表达式为

$$L_k = \frac{1}{I_N^2} \int_V BH dV \quad (2)$$

式中, L_k 为漏电感; I_N 为额定电流; B 为漏磁通密度; H 为磁场强度; V 为漏磁场分布空间。

式(2)中的 B 、 H 可以通过 ANSYS 仿真及旋度计算得到, B 、 H 的空间分布确定后,通过积分得到整个空间的漏磁场总能量。由于仿真模型为轴对称模型,漏电抗的计算公式为

$$X = \frac{4\pi f W_m}{I_k^2} \quad (3)$$

式中, W_m 为轴对称模型的漏磁场总能量; f 为系统频率; I_k 为工作电流。

3 仿真与分析

麦克斯韦方程组是 ANSYS 电磁场分析的理论基础,利用有限元方法计算出自由度(未知量)。主要求解的自由度是磁位、磁通、磁密、磁场强度和能量损耗等,其他物理量可以由磁位和磁通导出^[10]。ANSYS 对电磁场的求解方法主要有三种:磁标量位法、磁矢量位法和棱边单元法^[11]。对于零序滤波器的二维漏磁场仿真,本次采用磁矢量位法。采用磁矢量位法使每个节点的 X 、 Y 和 Z 方向分别具有磁矢量位 AX 、 AY 和 AZ 。除此之外,当载荷是电压降或在电路耦合分析中还引入了电流(CURR)、电压降(EMF)和电压(VOLT)三个自由度。ANSYS 的求解分为3个步骤:前处理、求解和后处理^[12]。

3.1 前处理

前处理完成建模前的单元、材料的选取及各种属性的设置,按照零序滤波器的实际尺寸搭建模型,并对其进行网络划分。以 100 kV·A 的零序滤波器样机为例,ANSYS 模型参数如下:铁心柱半径为 6.75 cm,高 h 为 120 cm;实际线圈采用双

筒、多匝并绕方式,对其中一相磁路进行分析并如下简化:不考虑绕组之间的绝缘材料;将内外绕组作为块状导体,令块状导体厚度 a_1 、 a_2 为 0.8 cm、高 h_c 为 98 cm,内外绕组间距离 a_{12} 为 1.2 cm。零序滤波器的二维轴对称模型如图4所示。内外绕组和空气的相对磁导率取 1,铁心的相对磁导率初设为 3 000。由于仿真目的是对漏磁场的分析,所以对铁心与内绕组之间、内外绕组之间的网格划分较细。同时为了体现主磁通的分布及其确切值,也将铁心的网格加密。

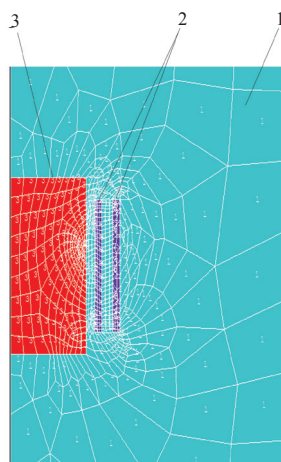


图4 零序滤波器二维轴对称模型

1—空气 2—内外绕组 3—铁心

3.2 求解

对空气的外边界施加磁通量平行的边界条件,以此模拟磁场无限远处的情况,由于零序滤波器单相的内外绕组电流所产生零序磁通相互抵消,所以对内外绕组分别施加等大反向的电流密度载荷。

3.3 后处理

使用时间通用后处理器,可以得到漏磁场在铁心、绕组和空气中的分布情况、仿真结束时刻的磁通密度以及磁场强度大小等参数。当给内外绕组加上零序电流后,磁场会穿过线圈,与铁心及空气形成闭合磁场,大部分磁力线会穿过铁心,形成滤波器的主磁通,其余通过空气形成的闭合磁场称为漏磁。图5为零序滤波器二维轴对称模型的磁场分布图。

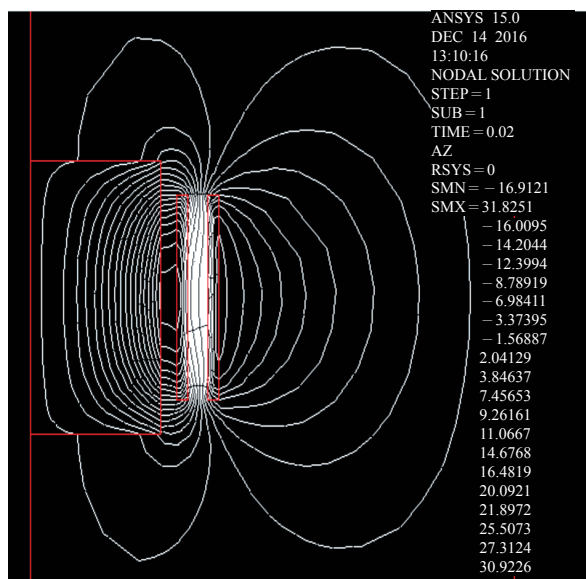


图5 磁力线分布

从图5中可以看出漏磁通的磁力线基本与对称轴平行，形成纵向漏磁，漏磁在两个绕组之间分布最密集，在两绕组端部磁力线通过空气闭合，渐呈水平分布，形成横向漏磁，其所占比例较小，漏磁通主要以沿对称轴分布的纵向漏磁为主。

沿内绕组 C_1 的左边界到外绕组 C_2 的右边界设置一水平路径，将磁通密度映射到该水平路径上，得到该路径下的漏磁势分布，如图6所示。

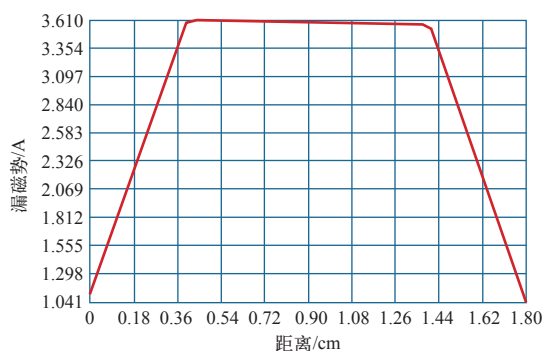


图6 绕组间漏磁势分布

从图6中可以看出内外绕组中以及二者之间的漏磁势近似呈梯形分布，两绕组之间的漏磁势基本不变。

由于铁心的磁导率不是线性的，铁心存在一定的磁阻，随着铁心内磁场的变化会产生一定损

耗，选取DQ147-30取向冷轧片作为铁心材料，则其实际 $B-H$ 曲线如图7所示， $B-H$ 曲线采用数字式毫特仪测量。

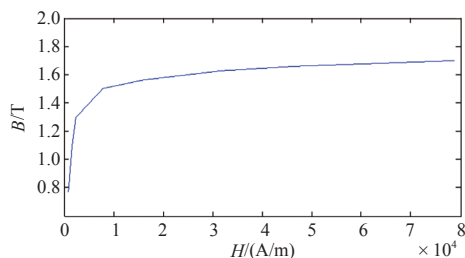


图7 铁心 $B-H$ 曲线

加入 $B-H$ 曲线后， B 在1.7 T左右达到饱和，抑制了铁心内磁场的增加，使得铁心内磁场没有磁导率为定值时的磁通密度大，从而也增加了铁心内的磁场能量，下表为加入 $B-H$ 曲线前后铁心、空气以及绕组的磁场能量。

表 模型漏磁能量

	铁心	空气	绕组	总计
加入 $B-H$ 前能量/J	0.031	16.942	9.714	26.687
加入 $B-H$ 后能量/J	3.795	16.911	9.716	30.422

由上表可知，漏磁能量主要集中在空气与绕组中，将总的漏磁能量带入式(3)，得到加入 $B-H$ 曲线前后的漏电抗分别为0.726 Ω 和0.828 Ω 。

4 结束语

利用ANSYS对零序滤波器的漏磁场进行二维仿真，获得了工况下零序滤波器的铁心内部磁场分布、铁心与绕组间的漏磁场分布和内外绕组间的漏磁场分布，考虑到铁心的磁饱和特性，加入 $B-H$ 磁化曲线，通过磁场能量法计算出零序漏电抗。借助ANSYS仿真软件，实现了零序滤波器漏磁场的可视化，为其优化设计提供参考，提高了节约制造成本，缩短设计周期的可能性。

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.
- [2] Joseph S, Subjak J R, John S Mcquilkin.

- Harmonics-causes, effects, measurements and analysis [J]. IEEE Transactions on IA, 1990, 26 (6): 1034-1402.
- [3] Mahesh G, Ganesan R, et al. Effects of power harmonics and its control techniques [C]. Proceedings of International Conference on Electromagnetic Information and Compatibility, 1999: 400-405.
- [4] 王葵, 李建超, 蒋丽, 等. 谐波电流对低压配电网的影响分析 [J]. 继电器, 2008, 36 (7): 24-28.
- [5] Larico H R E, Barbi I. Three-phase push-pull DC-DC converter: analysis, design and experimentation [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59 (12): 4629-4636.
- [6] 吕强, 徐晔, 王金全, 等. 低压配电系统零序谐波电流特性研究 [J]. 建筑电气, 2013, 32 (4): 56-62.
- [7] Emanuel A E. On the assessment of harmonic pollution [J]. IEEE Transactions Power Delivery, 1995, 10 (3): 1693-1698.
- [8] 王彬. 基于磁通补偿原理的零序滤波器的研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
- [9] 徐绍麟. 城市电网10kV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.
- [10] 谢龙汉, 耿煜, 邱婉. ANSYS电磁场分析 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.
- [11] 冯静. 基于ANSYS的漏感变压器仿真计算 [J]. 现代电子技术, 2011, 34 (6): 181-184.
- [12] 张倩, 胡仁喜, 康士廷. ANSYS12.0电磁学有限元分析从入门到精通 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.

(收稿日期: 2017-07-08) **EA**

(上接第20页)

冲电流的形式沿着先导、尖端物体迅速向大地泄放。这就是避雷针的防雷原理。

4 结束语

由于地表面的复杂多样性, 空间电场在分布上并不是均匀的, 特别是在地面附近。位置较高、电阻率较低的物体容易堆积电荷, 也会产生较强的电场。因此在防雷设计时, 雷闪数学模型并不是唯一的参照依据, 还要考虑保护对象本身的属性, 以及其周边地质环境。当位于山区时, 要注意周边山丘的高度与地面土壤电阻率对雷闪的影响; 当位于空旷平原时, 物体本身的属性也会增加被雷击的可能, 这时要更加重视其防雷安全措施。

参考文献

- [1] 中国机械工业联合会. GB 50057—2010建筑物防雷设计规范 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2011.
- [2] 中国航空工业规划设计研究院. 工业与民用配电设计手册 [M]. 4版. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [3] Vladimir A Rakov, Martin A Uman. 雷电 [M]. 张云峰, 吴建兰, 译. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- [4] 刘丙江. 实用接地技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [5] 牛中奇, 朱满座, 等. 电磁场理论基础 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2001.
- [6] 周希朗. 电磁场理论与微波技术基础 [M]. 南京: 东南大学出版社, 2010.

(收稿日期: 2017-08-10) **EA**