

文章编号: 1001-1609(2006)03-0179-04

10kV 空心电抗器周围工频磁场的简化计算及影响范围

杜淑文¹, 宋春燕², 祝春捷², 陈国琦², 傅正财¹

(1. 上海交通大学电气工程系, 上海 200030; 2. 杭州市电力局, 浙江 杭州 310009)

Simplified Calculation and Coverage of Power Frequency Magnetic Field Around 10kV Air-core Reactors

DU Shu-wen¹, SONG Chun-yan², ZHU Chun-jie², CHEN Guo-qi², FU Zheng-cai¹

(1. Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China;

2. Hangzhou Municipal Electric Power Bureau, Hangzhou 310009, China)

摘要: 10 kV 空心电抗器是 110 kV 和 35 kV 变电所中重要的工频磁场源。现有的空心电抗器周围工频磁场的计算方法需要电抗器的详细设计数据, 而这些数据通常是制造商的技术秘密。笔者采用只需电抗器的铭牌参数和外形尺寸的简化方法分析 10 kV 空心电抗器周围的工频磁场分布。并用该方法分析电抗器的设计、布置等对周围磁场水平的影响。根据相关标准限值对这种电抗器的工频磁场暴露和干扰影响范围给出了定量的评价, 可供变电所设计时参考。

关键词: 空心电抗器; 工频磁场; 变电所设计; 磁场干扰
中图分类号: TM471, TM153 文献标识码: A

Abstract: The power frequency magnetic field of 10 kV air-core reactor is an important interference source in 110 kV and 35 kV substations. A simplified magnetic field evaluation method, which needs only the parameters on nameplate and the outer dimension of the reactor, is proposed in this paper. Based on this method, the impact of reactor design and layout on magnetic field distribution is analysed. The exposure-permission and interference range of such reactor is also estimated. The results can be applied in substation design.

Key words: air-core reactor; power frequency magnetic field; substation design; magnetic field interference

1 引言

10 kV 空心限流电抗器周围产生很强的工频磁场, 是 110 kV 和 35 kV 变电所中最主要的工频磁场源之一。由于这些变电所深入负荷中心, 其周围的工频磁场很受公众和环保部门的关注。在电力系统内部, 也常发生 10 kV 空心电抗器磁场干扰变电所内的敏感电子设备特别是计算机显示器的问题。因此在变电所的设计阶段, 迫切需要能便捷地计算 10 kV 空心电抗器周围工频磁场的实用方法, 以控制或预

测变电所内外的工频磁场分布。

文[1-3]给出空心电抗器周围工频磁场的计算的可用方法。但已有的计算方法都需要电抗器的详细设计数据, 如, 线圈的包封数、气道宽度、各包封的轴并数、辐并数、匝数、具体线径、匝绝缘厚度、绕线高度和电流密度等。而这些详细的设计数据通常是电抗器制造商的技术秘密。电力系统的设计运行部门很难得到这些详细的数据。

笔者基于现有的单包封空心电抗器周围工频磁场的计算方法, 证明实际的多包封电抗器可以用近似等效的简化单包封模型分析其周围的磁场分布, 其精度足以满足工程计算要求。该方法只需要电抗器的铭牌参数和外形尺寸, 并在多个变电所中验证过。笔者也采用这种方法对电抗器的外形设计和布置对周围磁场的影响进行了分析; 还对照有关标准和敏感设备的抗扰度调查, 对电抗器的工频磁场暴露允许范围和干扰影响范围等进行了定量的分析。

2 多包封三相空心电抗器周围的磁场

2.1 单相单包封电抗器的磁场模型

单相单包封的开心电抗器为空心圆柱线圈结构。参见图 1, 由于电抗器结构对称, 在柱坐标系中, 空间任一点 $P(r, \theta, z)$ 上的磁场只有平行于轴的纵向分量 B_z 和垂直于 z 轴的径向分量 B_r , 且在空间上轴对称分布。基于毕奥-沙伐定律, 可用微元积分方法推导出周围磁场的积分形式的解。经过参数归算和多重积分等进一步推导可得^[4]:

$$B = \sqrt{B_r^2 + B_z^2} \quad (1)$$

其中: $B =$

$$\frac{\mu_0 W I [F(A_1, Z_1) - F(A_1, Z_2) - F(A_2, Z_1) + F(A_2, Z_2)]}{2(z_2 - z_1)(a_2 - a_1)}$$

收稿日期: 2005-12-16; 修回日期: 2006-01-16

作者简介: 杜淑文(1974-), 女, 硕士研究生, 主要从事电力系统电磁环境方面的研究工作。

$$B_z = \frac{\mu_0 W I [F_z(A_1, Z_1) - F_z(A_1, Z_2) - F_z(A_2, Z_1) + F_z(A_2, Z_2)]}{2 (z_2 - z_1) (a_2 - a_1)}$$

式中: W 为电抗器的匝数; I 为电流; $z = z_1 - z_2$; $A = a_1 - a_2$; $A_1 = a_1$; $A_2 = a_2$; $Z = z$; $Z_1 = z_1$; $Z_2 = z_2$; $R = (1 + A^2 + Z^2 - 2A \cos \theta)^{1/2}$, θ 为用于推导的电抗器线圈截面上的任一点 $Q(\rho, \varphi, z)$ 的坐标。其它参数见图 1。

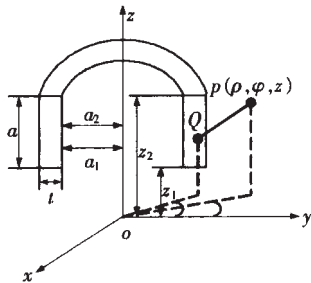


图 1 单相空心电抗器的磁场模型

函数 $F(A, Z)$ 是关于 Z 的偶函数, 函数 $F_z(A, Z)$ 是关于 Z 的奇函数。

$$F = \int_0^\pi [R + \cos \theta \ln(R + A - \cos \theta)] \cos \theta d\theta \quad (2)$$

$$F_z = \int_0^\pi [Z \ln(R + A - \cos \theta)] + \frac{\cos \theta}{2} \ln \left(\frac{R - Z}{R + Z} \right) - \sin \theta \cdot \tan^{-1} \left[\frac{Z(A - \cos \theta)}{R \sin \theta} \right] d\theta \quad (3)$$

当 $\theta = 0$ 时, P 点在轴线上, 此时磁场只有轴向分量: $B = B_z$

$$\frac{\mu_0 W I}{2(z_2 - z_1)(a_2 - a_1)} \cdot \left[\left(\frac{a_2}{2} - Z \right) \ln \frac{a_2 + \sqrt{a_2^2 + (a/2 - Z)^2}}{a_1 + \sqrt{a_1^2 + (a/2 - Z)^2}} + \left(\frac{a_1}{2} - Z \right) \ln \frac{a_1 + \sqrt{a_1^2 + (a/2 - Z)^2}}{a_2 + \sqrt{a_2^2 + (a/2 - Z)^2}} \right] \quad (4)$$

根据式(1)~式(4)可编制电抗器周围磁场的计算程序。

2.2 三相多包封电抗器的计算

实际的三相空心电抗器出于散热、工艺等多方面的设计考虑, 多为多包封结构, 见图 2。由于工程实际所关心的是距三相电抗器一定距离外的磁场, 可忽略线圈之间的邻近效应和端部效应, 应用叠加原理计算三相电抗器在空间产生的磁场。据式(1)~式(4)编制程序计算各包封的磁场贡献, 然后按叠加原理计算单相和三相电抗器周围的磁场。

图 2(a) 为某实际的 2400 kVar, 额定电抗率为 6% 的三相电抗器, 根据其线圈的包封数、气道宽度、以及各包封的轴并数、辐并数、匝数、具体线径、匝绝缘厚度、绕线高度和电流密度等, 建立的计算模型见图 2(b), (c)。经计算, 单相(电抗器中心高度处)和三相电抗器(中间相电抗器的中心高度处, 中间相反绕)周围的磁场分布见图 3。对图 3 所示的电抗器外围 1 m 外的磁场分布进行曲线拟合分析, 单相电抗器外的磁场按接近于 $1/r^3$ 的速度衰减。而三相电抗器外的磁场衰减要慢一些, 但衰减的速度也大于 $1/r^2$,

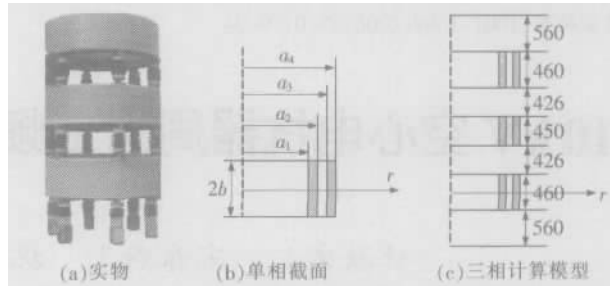


图 2 某三相空心电抗器的实物图和截面示意图

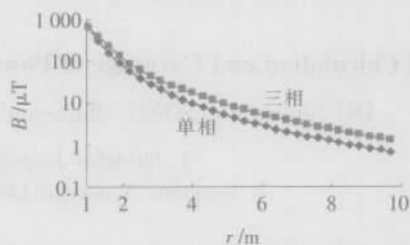


图 3 单相和三相电抗器周围磁场的径向分布

对该例约按 $1/r^{2.8}$ 衰减。

3 简化的实用计算方法

空心电抗器公开的额定参数包括额定电压, 额定容量(配补偿电容器的容量), 电抗率, 额定电流, 外形参数等。在不能获得电抗器的详细设计资料的情况下, 应用单包封电抗器的电感近似估算方法和电抗器的外形尺寸, 建立简化的近似等效单包封电抗器模型, 从而采用上节介绍的方法估算电抗器周围的磁场分布, 以满足工程设计中磁场控制和预测的需要。近似等效单包封电抗器模型建立的方法如下:

(1) 等效单包封线圈的截面参数根据电抗器的外形参数确定。可查厂家的产品手册, 对已有电抗器也可实测。不论线圈的包封设计, 等效线圈的内外径 a_1 和 a_2 均取电抗器的实际内外径。

(2) 线圈的额定电抗或设计电感量查产品手册或铭牌, 也可由额定电压、额定容量和电抗率计算。

(3) 按等效单包封线圈的截面尺寸和电感量计算线圈的等效匝数, 应用单包封电抗器的电感近似估算经验公式^[4]:

$$N_{eq} = \sqrt{\frac{4 L}{\mu_0 D_a T}}$$

式中: $D_a = a_1 + a_2$ 为等效单包封线圈的平均直径; 经验

参数: $T = \frac{1}{A + Bu + Cv}$; $u = \frac{a_2 - a_1}{a_2 + a_1} = \frac{a_2 - a_1}{D_a}$; $v = \frac{2b}{a_2 + a_1} = \frac{2b}{D_a}$ 。A, B, C 根据 u, v 的数值范围查表 1。

(4) 根据额定电流、等效匝数和截面尺寸计算等

表 1 参数 A, B, C 的取值^[4]

u	v	A	B	C
0~0.5	0~0.8	0.038	0.1204	0.118
0~0.5	0.8~1.6	0.036	0.1465	0.111
0.5~1.0	0~0.8	0.040	0.1065	0.136
0.5~1.0	0.8~1.6	0.019	0.1260	0.140

效单包封线圈的电流密度: $J=NI/2b(a_2+a_1)$ 。建立了近似等效的单包封电抗器模型以后, 电抗器周围的磁场分布即可按上节介绍的方法计算。

用这种简化的等效单包封方法对多种电抗器周围的磁场进行了计算, 结果表明, 与采用详细的设计参数计算相比, 该方法对距电抗器 1 m 以外空间上的磁场计算偏差小于 5%。对图 2 所示的这种实际三相电抗器, 用该简化方法计算和用详细的实际双包封设计数据计算得到的中间相中心高度上的磁场分布比较于图 4。在距电抗器 1 m 外, 简化计算结果和根据详细设计资料计算得到的结果差异小于 3%。对于工程应用, 该方法的估算准确度已足够。

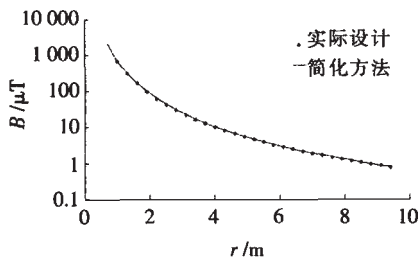


图 4 按简化模型和实际设计计算的磁场比较

为进一步验证这种方法的实用性, 在某电力局所属的 4 个 110/10 kV 的变电所也进行了实测和计算对比。结果表明, 实测磁感应强度和这种简化计算结果之间的偏差在 5%~15% 范围内。表 2 是某变电所中的电抗器周围磁场测量和计算结果。电抗器三相叠置安装于 2 楼 10 kV 电容器室, 1 楼为控制室 (楼层高 4.5 m)。各测量/计算点距电抗器中心轴线的水平距离如表中所示。点 1~5 位于 2 楼, 高度距楼面 1 m。点 6~7 位于 1 楼, 高度为距地面 1 m。偏差比较大的原因主要是因为现场测量点的定位误差影响较大。运行现场的准确定位比较困难, 而由于磁场随距离的衰减很快, 近距离内的定位误差易造成较大的测量值偏差。另外, 运行中的变电所周围的其它磁场源对测量结果也有一定的影响。但测量结果表明, 用该简化方法估算电抗器周围的磁场以控制和评估其影响范围仍是可行的。

4 应用与讨论

这种简化的近似等效单包封电抗器周围磁

表 2 某变电所的电抗器周围测量数据和计算值的比较

测量/计算点编号	距电抗器中心轴线水平距离/m	计算值/μT	测量值/μT
1	1.8	131.80	147.20
2	2.2	171.60	151.40
3	2.0	171.60	149.20
4	4.0	19.80	16.90
5	9.5	1.57	1.36
6	9.5	1.41	1.22
7	6.6	4.25	3.71

场计算方法可用于变电所的电抗器设计选型。布置分析、磁场分布预测或磁场影响范围分析等。

4.1 电抗器的设计对周围磁场的影响

电气额定参数(电感量、额定电流等)相同的电抗器, 因为设计不同, 周围磁场的分布可能差异很大。实际电抗器设计中, 电流密度等参数的选择余地较小, 选择范围较大的包封和绕线设计等都会体现在电抗器的外形尺寸上。以单相电抗器为例, 比较两个电气参数相同但外尺寸不同的电抗器, 见图 5, $a_1=350$ mm, $a_2=409.3$ mm, $2b=460$ mm。 $a_1=150$ mm, $a_2=250$ mm, $2b=300$ mm; 在此分别称为大外径和小外径电抗器。两者周围的磁场分布见图 6。可见小外径设计的电抗器周围磁场较小。这种反映在电抗器外尺寸上的电抗器对周围磁场的影响可供变电所设计选型时参考。

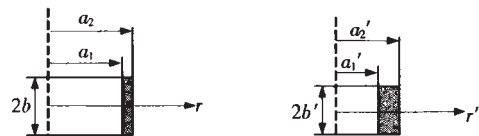


图 5 大外径设计和小外径设计电抗器线圈的外形图

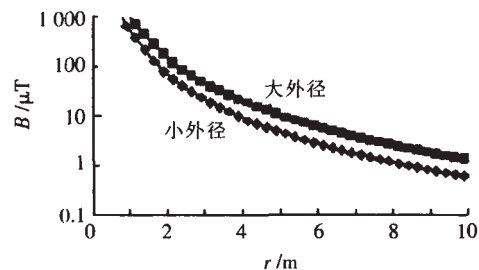


图 6 两种电抗器中心高度处径向 1 m 外的磁场比较

4.2 电抗器的布置对周围磁场的影响

对于三相电抗器, 除了设计影响外, 三相的安装布置对周围磁场也有影响。3 种常见的三相电抗器布置方式有: 三相迭置、水平一字形和水平三角形三种布置方式, 见图 7。图 8 是 3 种布置方式下周围磁场的径向分布 (三相叠置室为中间相电抗器中心高度上, 平布时为电抗器中心高度上)。可见三角布置时虽占地面积大, 但磁场减小。水平一字形布置时, 布置方向和其垂直方向相比, 垂直方向磁场要小得多。当变电所内有对工频磁场敏感的设备需要考虑时, 这些结果可供变电所布置设计时参考。

4.3 空心电抗器磁场影响的范围

对变电所的工频磁场分布, 系统内外关心的主要是对公众的暴露问题和对敏感设备的干扰问题。按照目前的环保标准 HJ/T24-1998, 工频磁场的公众暴露限值为 100 μT^[5]。而根据国标 GB/T17626.8-1998 I 类敏感电子设备的工频磁场抗扰度试验要求为 1.26 μT^[6]。实际变电所中, 反映发生干扰问题较多的是属于 I 类敏感电子设备的计算机 CRT 显示器。实际调查表明, 该显示器一般具有 1 μT

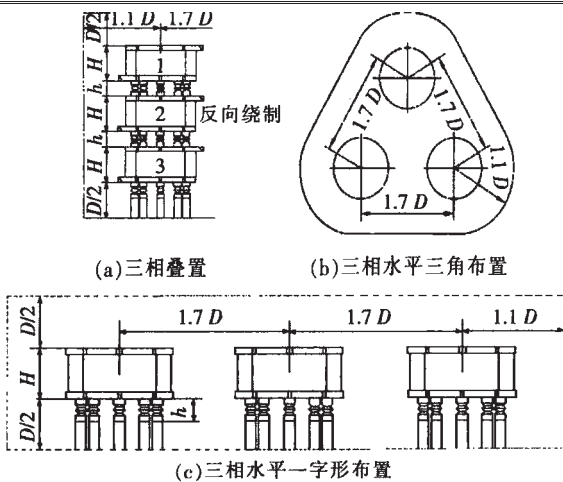


图 7 三相电抗器的 3 种典型布置方式

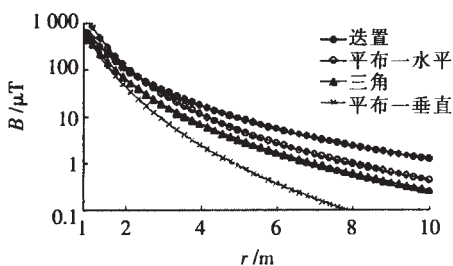


图 8 三相电抗器 3 种布置方式下周围的磁场

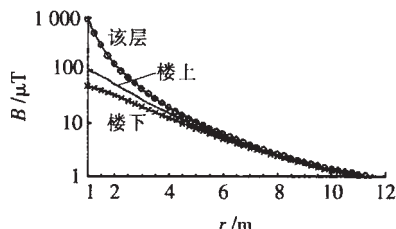


图 9 三相电抗器在本层、楼上、楼下各层距楼面 1.2 m 高处的径向磁场分布

的工频磁场抗扰度能力^[7]。考虑电磁兼容性的裕度配合,可按 1 μT 作为讨论电抗器磁场干扰影响范围的临界值。

变电所的设计中应考虑空心电抗器对同层的周围空间以及楼上和楼下的干扰影响。以常见的三相叠置布置的 2 400 kVar, 电抗率为 6% 的电抗器为例 (参见图 2), 采用上述近似等效单包封方法计算的本层、楼上和楼下各层距楼面 1.2m (敏感电子设备放置的常见高度) 处, 电抗器产生的磁场见图 9。在本层和上下楼层中, 距电抗器约 11 m 工频磁场均已经衰减到 1 μT。可见在距该电抗器的水平距离 11 m 内, 都有发生工频磁场干扰的危险。而按工频磁场的公众暴露限值 100 μT 考虑, 距空心电抗器 2 m 外即能满足限值要求, 这在变电所设计布置中是不难做到的。因此主要还是干扰影响问题。这些结果也可供变电所布置设计时参考。

5 结语

(1) 实际多包封设计的 10 kV 空心电抗器周围

的工频磁场分布可以用简化的近似等效单包封模型计算。在距电抗器 1 m 外, 计算的精度可达 5%。该方法无需电抗器的详细设计资料, 只需电抗器的铭牌参数和外形尺寸, 可实用于工程设计中预测和控制电抗器周围的磁场分布。

(2) 对于电气参数相同的电抗器, 小外径设计的电抗器周围磁场较低。三相电抗器的布置对周围磁场也有明显的影响。

(3) 考虑工频磁场的公众暴露限值和敏感电子设备的工频磁场抗扰度要求, 对于目前变电所中常见的 2 400 kVar 三相叠置式 10 kV 电抗器, 距离 2 m 以外即可满足工频磁场公众暴露限值要求, 但要满足不干扰敏感电子设备的要求, 则要距电抗器约 11 m 以外。

这些结果可供使用 10 kV 空心电抗器的变电所设计布置与运行时参考。

参考文献:

- [1] YU Q, Sebo S A. Simplified Magnetic Field Modelling and Calculation of Large Air-core Reactor Coils [J]. IEEE Trans. Magnetics, 1996, 32(5): 4 281-4 283.
- [2] YU Q, Sebo S A. Accurate Evaluation of the Magnetic Field Strength of Large Substation Air-core Reactor Coils [J]. IEEE Trans. Power Delivery, 1998, 13(4): 1 114-1 119.
- [3] 魏新芳, 麻 森. 多层并联空心电力电抗器磁场的解析计算方法[J]. 变压器, 1993, 30(2): 12-15.
- [4] 雷银照. 轴对称线圈磁场计算 [M]. 北京: 中国计量出版社, 1991.
- [5] HJ/T24-1998. 环境保护行业标准 500 kV 超高压送变电工程电磁辐射环境影响评价技术规范 [S]. 北京: 国家环境保护总局, 1998.
- [6] GB/T17626.8-1998. 电磁兼容 试验和测量技术 工频磁场抗扰度试验[S]. 北京: 中国标准出版社, 1998.
- [7] 傅正财, 杜亚平, Burnett J. 视频显示器的极低频磁场敏感度和辐射测量[J]. 电视技术, 2001(6): 96-102.

简 讯

中国高压电器网 2006 年度全体网员大会于 4 月 17 日 -19 日在西安召开。会议由中国高压电器网和西安高压电器研究所主办。会议的主要内容有: ①中国高压电器网 2005 年度工作总结及 2006 年度工作计划安排; ②新改版的中国高压电器网网站特性演示介绍; ③专题报告及讨论。

主要议题为: 国家电网规划和特高压发展情况; 2005 年高压开关设备运行状况; 中压开关设备的现状与发展; 我国研制的 550 kV 单断口 SF₆ 高压断路器及其在更高电压等级中的应用; 高压电器型式试验; 中压开关企业产品质量检验经验介绍; 行业相关标准的讲解。