

空心电抗器磁场分布和防护体架设研究

季娟¹, 俞集辉¹, 袁一飞², 杨光¹, 何健¹

(1. 重庆大学 电气工程学院输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400030;

2. 重庆电力公司长寿供电局, 重庆 401220)

摘要: 变电站投运的空心电抗器产生的强磁场是变电站磁场污染的主要来源之一。建立了计及涡流影响的空心电抗器磁场有限元模型, 仿真计算了其磁场分布, 并与实测数据进行比较。从职业暴露安全的角度考虑, 提出了对电抗器架设防护体以改善职业暴露区磁场分布的措施。通过比较不同材料、尺寸、位置等多种情形下防护体对电抗器磁感应强度分布的影响, 最终提出防护体的最优架设方案。

关键词: 空心电抗器; 有限元; 磁场职业暴露; 改善措施

中图分类号: O441.4

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2009)06-0061-04

Research of the Magnetic Field Distribution and Protection Body Setting for Air-core Reactor

Ji Juan¹, Yu Ji-hui¹, Yuan Yi-fei², Yang Guang¹, He Jian¹

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400030, China; 2. Chongqing Electric Power Corp Changshou Power Supply Bureau, Chongqing 401220, China)

Abstract: The strong magnetic field generated by air-core reactors is one of the main sources of magnetic contamination in substations. A magnetic field finite element model of air-core reactor, which considering the effect of eddy current, was proposed, the magnetic field distribution was calculated and compared with measured data in the paper. In considering of occupational exposure security, measurements to improve the magnetic field distribution in occupational exposure areas with setting protection body were put forward. Then the magnetic field distributions with different protection bodies were calculated and comparisons between different materials, sizes, locations and other cases of protection bodies were made. The results indicate that the optimal measure meet the occupational exposure limit.

Key words: air-core reactor; finite element; magnetic field occupational exposure; improvement measures

0 引言

变电站的瞬态和稳态电磁环境问题是近些年来电磁兼容领域的重要研究项目。国内外对变电站的计算和测试结果表明, 变电站的工频磁场污染主要来源于电抗器^[1,2]。而干式空心电抗器(以下简称空心电抗器)因其起始电压分布均匀、线性度好、损耗小、噪音低、安装方便、维护简单等优点, 在电力系统中得到了广泛应用。由于无闭合磁回路, 空心电抗器磁场发散严重, 具有较强的穿透力, 不但对周围其他电气设备产生影响, 而且对职业暴露构成潜在的危害^[3,4]。目前针对空心电抗器周围磁场分布的研究方

法主要集中在解析计算, 实地测试及危害方面, 对于如何改善其磁场分布的研究则几乎没有。

笔者建立了空心电抗器磁场的有限元模型, 并将计算结果与现场测试结果进行比较。然后研究分析了改善职业暴露区磁场分布的措施, 提出了架设防护体的方法, 利用防护体中涡流产生的磁场削弱原磁场。并根据防护体的材料、尺寸、架设高度、水平位置等因素对磁场改善效果的影响进行分析, 在此基础上提出了防护体的最优架设方案。

1 磁场有限元模型

在讨论空心电抗器周围磁场分布的问题时, 同时考虑了电抗器绕组和防护体的涡流效应。该并联

收稿日期: 2009-06-26; 修回日期: 2009-08-10

作者简介: 季娟(1984), 女, 硕士研究生, 主要从事电力系统电磁兼容研究。

多导体的涡流问题见图 1。

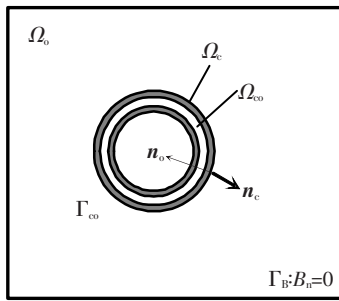


图 1 并联导体的涡流示意图

图 1 中, Ω_c 为涡流区(导体区), Ω_{co} 为导体间的多连通孔洞区域, Ω_0 为外部非涡流区。 Γ_{co} 为导体区与非导体区分界面, Γ_B 为计算场域外边界, 满足诺依曼边界条件, n_c 为涡流区外法向单位矢量。 n_0 为非涡流区外法向单位矢量, 则有: $n_0 = -n_c$ 。

工频情况下可忽略位移电流, 并且假定激励源和常量按正弦规律变化, 不考虑谐波分量的影响^[5] 情况下, 涡流场所满足的麦克斯韦方程为

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_s + \sigma \mathbf{E} \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -j\omega\mu\mathbf{H} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (3)$$

式(1)、(2)、(3)中, \mathbf{E} 、 \mathbf{H} 、 \mathbf{B} 、 \mathbf{J}_s 分别为电场强度, 磁场强度, 磁感应强度和源电流体密度。

在计算变量的选择上, 涡流区以 \mathbf{H} 作为计算变量, 非涡流区引入磁标量位 ψ , 以避免计算资源的浪费^[6,7]。而在多连通孔洞区域, 以 ψ 为变量处理会遇到困难, 所以同样以 \mathbf{H} 作为变量。 \mathbf{H} 和 ψ 根据边界条件进行耦合。

总的磁场强度可以看成两部分的叠加, 一部分由源电流产生, 以 \mathbf{H}_s 表示, $\nabla \times \mathbf{H}_s = \mathbf{J}_s$; 另一部分由涡流作用产生, 以 \mathbf{H}_0 表示。在非涡流区 Ω_0 中, $\nabla \times \mathbf{H}_0 = 0$, 引入磁标量位 ψ , 即 $\mathbf{H}_0 = -\nabla\psi$, 则有: $\mathbf{H} = \mathbf{H}_s - \nabla\psi$ 。在 \mathbf{J}_s 分布已知的情况下, 可由毕奥萨伐定律解析求出 \mathbf{H}_s 。

由以上各式得到涡流场边值问题

$$\nabla \times \frac{1}{\sigma} [\nabla \times (\mathbf{H} - \mathbf{H}_s)] = -j\omega\mu\mathbf{H} \quad \Omega_c \quad (4-1)$$

$$\nabla \cdot \mu_0\mathbf{H} = 0 \quad \Omega_{co} \quad (4-2)$$

$$\nabla \cdot \mu_0(\mathbf{H}_s - \nabla\psi) = 0 \quad \Omega_0 \quad (4-3)$$

$$\mu\mathbf{H} \cdot \mathbf{n}_c = -\mu_0(\mathbf{H}_s - \nabla\psi) \cdot \mathbf{n}_0 \quad \Gamma_{co} \quad (4-4)$$

$$(\mathbf{H}_s - \nabla\psi) \cdot \mathbf{n}_0 = 0 \quad \Gamma_B \quad (4-5)$$

Ω_{co} 与 Ω_0 的界面条件与 Ω_c 和 Ω_0 的界面条件相同, Ω_{co} 区的边界条件与 Ω_c 区相同。

鉴于空心电抗器的特殊结构, 采用棱边与节点有限元耦合的方法进行计算。即在涡流区及导体间

的多连通孔洞区域以 \mathbf{H} 为变量, 采用棱单元离散, 剖分为 m_1 个四面体单元, 单元内的插值公式^[8]为

$$\tilde{\mathbf{A}} = \sum_{i=1}^6 W_i A_i \quad (5)$$

外部非涡流区以 ψ 为变量, 采用节点元离散, 剖分为 m_2 个四面体单元, 单元内的插值函数为

$$\tilde{\mathbf{A}} = \sum_{i=1}^4 N_i A_i \quad (6)$$

由迦辽金法获得有限元方程^[9]

$$\sum_{e=1}^{m_1} \int_{\Omega_e} \mathbf{W}_m \cdot [\nabla \times \frac{1}{\sigma} \nabla \times (\mathbf{H} - \mathbf{H}_s) + j\omega\mu\mathbf{H}] d\Omega = 0 \quad m=1, 2, 3, 4, 5, 6 \quad (7)$$

$$\sum_{e=1}^{m_2} \int_{\Omega_e} N_j \nabla \cdot \mu_0(\mathbf{H}_s - \nabla\psi) d\Omega = 0 \quad j=1, 2, 3, 4 \quad (8)$$

2 空心电抗器的磁场分布

2.1 计算模型及实际测量

研究的对象为某 500 kV 变电站的 35 kV 干式空心并联电抗器组, 型号为 BKDCKL-15000/35, 额定电流 753 A, 实测时电流为 731 A。电抗器线圈内直径: 1805 mm, 外直径: 2668 mm, 线圈高度: 1860 mm, 线圈离地高度: 3591 mm。且已知各包封尺寸和电流量。电抗器组排列方式见图 2。对该电抗器组的尺寸及磁场分布进行了现场测量, 测试高度参照电力行业标准《高压架空送电线路、变电站工频电场和磁场测量方法》, 为距地 1.5 m。

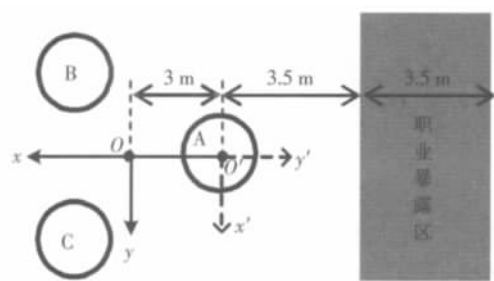


图 2 排列示意图

建立空心电抗器模型时, 做如下简化: 忽略端部绝缘厚度, 将电抗器简化为纯导线绕制的线圈^[10];

在忽略包封外绝缘的前提下, 视各包封为通有相同源电流密度的整体; 忽略大地磁导率的影响^[11]。

2.2 磁场分布仿真分析

仿真计算电抗器组的磁场分布, 将结果与测量结果绘制在三维图中进行对比, 见图 3。结果显示, 计算值与测量值比较吻合, 验证了有限元模型的准确性。

距离 A 相电抗器中心 3.5~7 m 处为一条沿 y 轴走向的通道,该通道是工作人员巡检的必经之路,从职业暴露安全的角度考虑,将该区域作为磁场防护对象区域,见图 2。为进一步说明职业暴露区的磁场分布情况,绘制三相及单相电抗器沿 x 轴,离地 1.5 m 的磁感应强度对比图,见图 4。

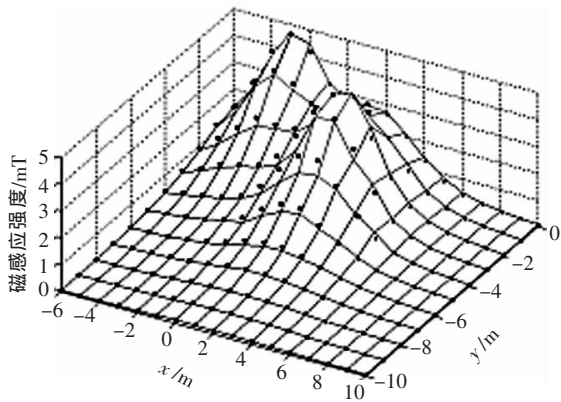


图3 仿真结果与测试数据对比图

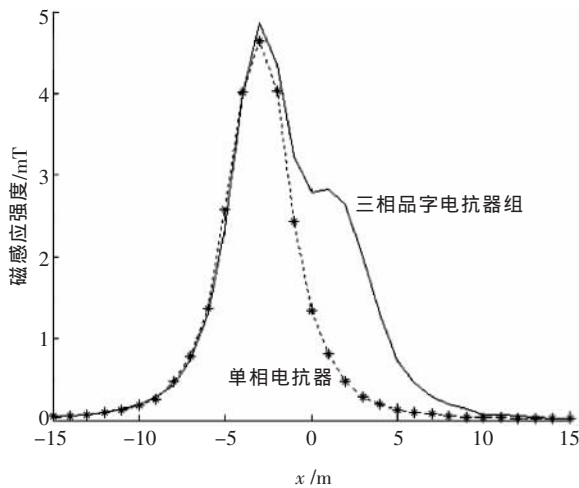


图4 $y=0$ 时单相和电抗器组磁感应强度对比图

在 A 相远离 B、C 相一侧的区域 (x 方向 -15~ -3 m) 内,三相电抗器与 A 相电抗器单独布置时的磁感应强度值相差不大。A 相靠近 B、C 相一侧区域 (x 方向 -3~10 m), 三相的磁感应强度较单相有所增加,这是各相电抗器磁场叠加的结果。

从图中还可以看出,在 x 方向 -10~-8 m 内,磁感应强度低于 0.5 mT,而 -8~-6.5 m 内,磁感应强度高于 0.5 mT,不满足职业暴露限值^[12]。

3 职业暴露区磁场改善的措施

针对职业暴露区磁感应强度过大的问题,提出两种改善措施,一种是在 A 相下方架设防护板,另一种是在 A 相靠职业暴露区一侧架设防护板。利用防护板的涡流产生的磁场局部削弱电抗器原磁场,

使该区的磁感应强度满足标准限值。而防护板的材料、放置位置、尺寸等参数对磁场改善效果会有不同程度的影响。下面分别对不同情况下的磁感应强度分布情况进行仿真。为方便理解,设置相对坐标系(见图 2),该坐标系下职业暴露区为沿方向 3.5~7 m 的范围。

3.1 电抗器下方水平架设防护板

分别将材料和尺寸不同的防护板水平架设于距 A 相电抗器底部 0.8 m 处,厚度均取 5 mm。防护板材料尺寸参数见表 1。表中 R 表示圆板半径, l 表示方形板的边长。

表 1 材料尺寸参数

材料	μ	$\sigma/(S \cdot m^{-1})$	R/m	l/m
铝	1.000 021 μ_0	3.8e ⁷	1	1.77
			1.3	
铁	4 000 μ_0	1.03e ⁷	1	-

图 5 为距地 1.5 m,沿 y' 轴磁感应强度分布曲线。铝对低频磁场的屏蔽依赖于涡流的屏蔽作用;而铁的屏蔽主要依赖于铁材料所具有的高磁导率起磁分路作用,使磁力线限制在屏蔽体内部,防治扩散到屏蔽的空间去。屏蔽体的磁导率越高,壁层越厚,则磁分路作用愈明显,磁屏蔽效果愈好。在图 5 所示的尺寸和位置下,铁的效果不如铝,若要改善磁屏蔽效果,则需要增加尺寸、厚度或选用磁导率更高的磁屏蔽材料。从节约成本、降低架设难度的角度考虑,应选择铝作为电抗器磁场的屏蔽材料。

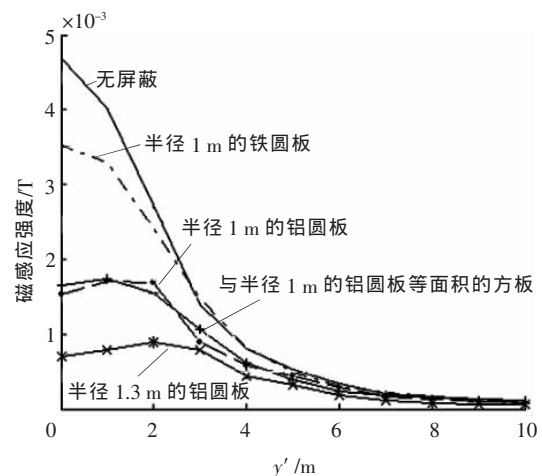


图5 不同材料尺寸的磁感应强度分布曲线

等面积的铝圆板和方板对磁场的改善效果差不多,从电抗器的实际情况考虑,在电抗器下方架设圆盘形防护板更美观方便。铝板的半径尺寸对磁场改善效果的影响非常大,半径越大,抑制效果越好,A 相电抗器靠近职业暴露区一侧(图 5 中方向 0~4 m

范围内)的磁感应强度明显降低。

图 6 是将半径为 1.3 m,厚度为 5 mm 的铝板分别置于 A 相下方 0.3、0.5、0.8、1.4 m 位置时,沿 y' 轴磁感应强度分布曲线。可明显看出,距离电抗器越远,铝板对磁场的改善效果越差。距离为 0.3、0.5 m 时,职业暴露区的磁感应强度值已基本低于 0.5 mT,距离为 0.8 m 时,4~7 m 内磁感应强度值低于 0.5 mT。

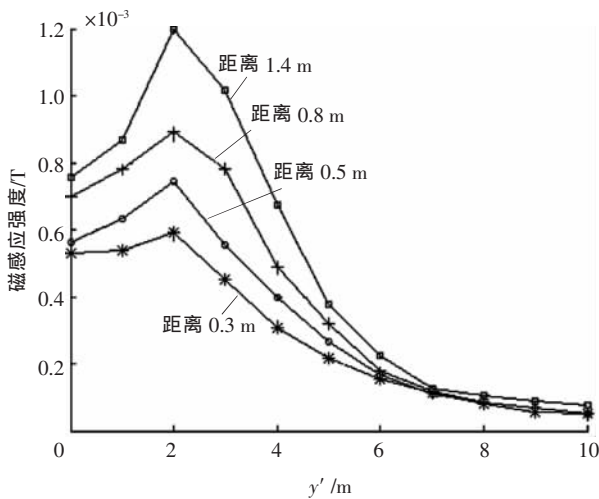


图 6 不同位置的磁感应强度分布曲线

笔者还对半径为 1.3 m,距离电抗器底端 0.5 m,厚度分别为 2.5、10、20 mm 的铝板分别做了仿真计算。2.5 mm 厚度时,由于该尺寸与电抗器模型尺寸倍数比太小,导致仿真曲线振荡不平滑。5、10、20 mm 的仿真结果数值相差不大。

综上所述,防护板的材料及面积尺寸参数对职业暴露区磁场的改善效果影响最为显著。防护板距离电抗器的距离及厚度尺寸对磁场改善效果的影响没有上面两个因素明显。而防护板距离电抗器距离太远,尺寸太大,则会带来涡流损耗增加及电抗器温升等问题。在综合考虑下,对于改善职业暴露区磁场分布,推荐选取半径为 1.3 m,厚度为 5 mm 的铝圆盘,并放置于电抗器下方 0.8 m 处,该种防护板对职业暴露区磁场的改善效果见图 6。

3.2 职业暴露区一侧垂直架设防护板

在 A 相电抗器靠被屏蔽区一侧架设矩形铝板,厚度为 5 mm,距离 A 相电抗器外包封水平距离为 0.8 m。对不同尺寸及架设高度情况下的磁感应强度分布进行仿真,结果见图 7。

从图 7 可看出,垂直架设的铝板尺寸参数及垂直高度对磁场改善效果影响很大。尺寸从 3 m×2.5 m 增大到 3 m×3.5 m 时,在距离电抗器中心 2~6 m 范围内,磁感应强度下降幅度较大。尺寸为 3 m×3.5 m,在高度垂直为 0 时放置,职业暴露区的磁感应强度

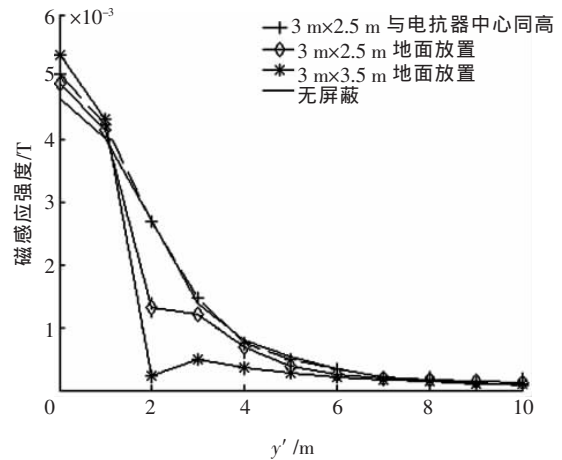


图 7 垂直架设下尺寸、架设高度对磁场改善效果的影响

值均满足标准限值。图 7 中,垂直高度过高的铝板对离地 1.5 m 高度的磁感应强度几乎没有影响,这是电抗器线圈本身离地高度较高的缘故。

垂直架设不同水平距离以及不同厚度的铝板对磁场改善效果的影响与在电抗器下方水平架设的情况基本相同,不再赘述。

虽然在电抗器外侧垂直架设防护板较在电抗器下方水平架设的施工技术难度小,但是垂直架设防护板比较突出的一个问题,即 A 相电抗器内部(y' 方向 0~1.33 m 内)磁感应强度较未架设时非但没有降低反而有所升高的问题不容忽视。诸多考虑下,推荐选取在电抗器下方水平架设防护板的改善措施。

4 结论

(1)建立了空心电抗器的有限元模型,仿真计算了其磁场分布,并与实测数据进行对比,验证了模型的准确性。

(2)针对变电站电抗器附近职业暴露区磁感应强度过大的情况,利用导体涡流磁场局部削弱电抗器原磁场的原理,提出了两种对电抗器架设防护板以改善职业暴露区磁场分布的措施。

(3)分析比较了不同材料、尺寸、位置等多种因素对磁场改善效果的影响,最终提出在电抗器下方水平架设防护板的措施,为变电站职工安全作业提供保障。

参考文献:

[1] 桑 绮.输变电设备电场、磁场分布和距离防护研究[D].浙江:浙江大学,2006.

[2] 饶章权,郭启贵.500 kV 变电站工频电磁场分布测量[J].高电压技术,2004,30(9):41-43.

(下转第 68 页)

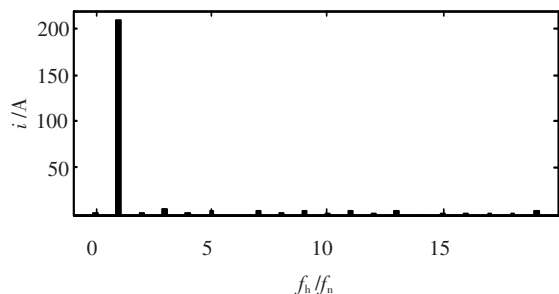


图 8 加入平衡措施后逆变器并网电流频谱

5 结论

从实验结果可将该控制方法做如下几点总结:

(1) 这种基于矢量切换方式的中性点电位平衡控制策略对三电平逆变器具有通用性;

(2) 通过这种控制方法可实现两直流电容电压偏差在允许范围内稳定工作;

(3) 由逆变电流的波形可知, 这种控制策略可有效地避免因中性点电压不平衡造成的逆变失败现象, 提高系统工作的可靠性。

(上接第 60 页)

再利用彩色图像分割法进行目标提取, 阈值选择会比较困难, 提取效果相应变差。而灰度图像分割法不受颜色限制, 因此受设备运行时间影响很小, 具有一般性。

参考文献:

- [1] 程明. 无人值守变电站监控技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
- [2] 唐慧明, 张健. 变电站远程图像监控系统设计[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(7): 56-58.
- [3] 岳嵩, 戴礼荣, 宋彦. 基于单片 DSP 的嵌入式视频监控终端及系统的实现[J]. 计算机辅助工程, 2005, 13(3): 47-51.
- [4] 王继业. 推动电力信息化应重视的几个问题[J]. 中国电力, 2002, 35

(上接第 64 页)

- [3] GAO Y G, ZHANG S H. Electromagnetic Radiation Biology Effect[J]. Safety & EMC, 2002(6): 49-52.
- [4] U.S. Department of Energy. National Institute of Environmental Health Sciences (NIEHS) and National Institutes of Health [R]. Assessment of Health Effects from Exposure to Power-line Frequency Electric and Magnetic Fields, EMF Working Group (EMF RAPID Program) Report, 1999.
- [5] 林鹤云. 三维涡流场的一种迭代解法[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(11): 72-75.
- [6] 刘国强, 赵凌志. Ansoft 工程电磁场有限元分析[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [7] RUAN J J, CHEN X Z, ZHOU K D. 3D Transient Eddy Current Calculation by the Hybrid FE-BE Method Using

参考文献:

- [1] CELANOVIC N, BOROYEVICH D. A Comprehensive Study of Neutral-point Voltage Balancing Problem in Three-level neutral-point-clamped Voltage Source PWM Inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electron, 2000(15): 242-249.
- [2] NABAE A, TAKAHASHI I, AKAGI H. A New Neutral Point Clamped PWM Inverter[J]. IEEE Trans on IA, 1981, 17(5): 518-523.
- [3] 宋文祥, 陈国呈, 丁肖宇, 等. 基于两类脉宽调制方式本质联系的三电平逆变器中点电压平衡控制的研究[J]. 电工技术学报, 2006, 21(9): 76-80.
- [4] YO-HAN LEE, BUM-SEOK SUH, CHANG-HO CHOI, et al. A New Neutral Point Current Control for a 3-level Converter/inverter Pair System[J]. IEEE Ind. Electron, 1999(3): 1528-1534.
- [5] 林磊, 邹云屏, 钟和清, 等. 二极管箝位型三电平逆变器控制系统研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(15): 33-39.
- [6] WANG F. Coordinated Control of Regenerative Three-level Neutral Point Clamped PWM Voltage Source Inverter [J]. Industry Applications Conference, 2002. 37th IAS Annual Meeting, 2002(1): 537-543.
- [7] 姚文熙, 吕征宇, 费万民, 等. 一种新的三电平中点电位滞环控制法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(7): 92-96.

(1): 64-67.

- [5] 赵书涛, 李宝树, 崔桂彦, 等. 基于计算机视觉的远程变电站状态监测与诊断新策略[J]. 电网技术, 2005, 29(6): 63.
 - [6] 吕文阁, 刘建群, 陈泽宇. 应用数字图像处理技术的物位测控系统的研究[J]. 机床与液压, 2005(11): 106-107.
 - [7] 四维科技, 胡小锋, 赵辉. 图像处理与识别实用案例精选[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2004.
 - [8] 张健, 唐慧明. 变电站远程图像监控系统[J]. 数字化技术, 2001(1): 18.
 - [9] 崔屹. 图像处理与分析—数学形态学方法及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
 - [10] SERRA J. Image Analysis and Mathematical Morphology [M]. London: Academic Press, 1982.
- Magnetic Field Intensity H[J]. IEEE Trans. on Mag., 1995, 31(3): 1408-1411.
- [8] 张秀敏, 苑津莎, 程志光, 等. 电磁场数值分析中棱单元矢量插值函数的研究[J]. 电工技术学报, 2003, 18(2): 62-67.
 - [9] 张秀敏, 苑津莎, 崔翔, 等. 用棱边与节点有限元耦合的 $E-E-\psi$ 法计算涡流场[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(5): 70-74.
 - [10] 冯利君. 电抗器工频干扰磁场屏蔽研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2007.
 - [11] 张波, 崔翔. 计及导体互感的复杂接地网的频域分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 4(23): 77-80.
 - [12] 国际非离子辐射防护委员会. 限制时变电场、磁场和电磁场(300 GHz 以下)暴露的导则[S]. 1998.