

DOI: 10.7667/PSPC201703

大型空心电抗器对直流系统影响的测试与仿真

温才权¹, 赵世林², 周凯², 全杰雄¹, 吴志宇¹

(1. 南方电网超高压输电公司梧州局, 广西 梧州 543002; 2. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 变电站中大功率空心电抗器导致电磁兼容问题(EMC)日益严重。现实测某变电站 110 V 直流系统的最大干扰已达 52 V, 严重影响了厂站的安全稳定运行。为了研究其干扰特征, 对现场干扰的幅值特性、频率特性和分布特性进行了实测, 并对电抗器、地网和直流系统建立三维等比例模型, 对模型的等效性进行验证。在此基础上, 提出了提高电抗器的高度和在电抗器底部敷设屏蔽材料的措施, 对其效果进行评估。从仿真结果可以看出, 共模干扰电压以三次谐波为主, 通过所提出的抗干扰方式能够有效减小空心电抗器对直流系统的影响。

关键词: 空心电抗器; 电磁兼容(EMC); COMSOL; 抗干扰; 直流系统

Measurement and simulation for the impact on DC system in large-scale air-core reactors

WEN Caiquan¹, ZHAO Shilin², ZHOU Kai², QUAN Jiexiong¹, WU Zhiyu¹

(1. Wuzhou Electric Power Bureau, CSG EHV Power Transmission Company, Wuzhou 543002, China;
2. School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: The electromagnetic compatibility (EMC) problem caused by large-scale air-core reactors in substation is increasingly serious. The measured maximum interference of 110 V DC system in a substation has amounted to 52 V, which seriously affects the safe and stable operation of substations. In order to research the interference characteristics, the interference's amplitude, frequency, distribution characteristic are measured, and three-dimensional scale models of the reactor, ground network, and DC system are established and their equivalence is verified. On this basis, this paper presents the ways to improving the height of the reactor and laying shielding material under the reactor, and evaluates the measures' effects. From the simulation results, the common-mode interference voltage gives priority to three harmonics. The anti-interference method proposed can effectively reduce the influence of air-core reactor on DC system.

Key words: air-core reactor; electromagnetic compatibility (EMC); COMSOL; anti-interference; DC system

0 引言

目前国内各变电站内广泛采用静止无功补偿装置(SVC)作为调节系统无功和改善电能质量的主要设备, 其中 TCR 回路中的补偿电感通常为空心电抗器, 但空心电抗器的空间磁场比较发散, 在正常运行时存在较强的磁场泄漏, 因此其周围空间磁场能量较大, 能够对周围环境产生强烈的电磁污染^[1]。如能有效降低大型空心电抗器对厂站直流系统的电磁污染, 这对于变电站及电力系统的稳定运行具有重要意义^[2]。

针对大型空心电抗器对直流系统干扰的解决方案, 国内外研究者对其进行了大量研究。文献[3]报

道了共模干扰导致电厂发电机组冷却机构输出信号异常, 并采取了隔离干扰的措施。文献[4-5]则分别使用不同的仿真软件进行工频干扰屏蔽措施的分析, 并采用修正后的混合有限元方法对空心电抗器磁场分布进行计算。文献[6]结合电力牵引变电所基本电磁环境的特点, 通过链形等效网络和等效阻抗简化电路模型, 计算出牵引变电所两端接地屏蔽电缆共模干扰的数值。以上研究对空心电抗器磁场分布与电磁感应机理进行了详细的阐述。然而在实际变电站中, 对于直流系统在强磁场中受到的干扰特性以及更直接的抗干扰方法仍然缺乏更深入的研究。

为此, 本文对某 500 kV 变电站 SVC 附近的直流系统干扰情况进行测试, 并对大型空心电抗器、接地网和直流系统建立仿真模型, 计算模型中直流系统的干扰程度, 结合现场数据, 对抬高电抗器高度和

在电抗器底部敷设屏蔽材料的措施进行了仿真测试。

1 干扰源的现状

500 kV 梧州变电站加装的 SVC(Static Var Compensator)装置包括挂接在#1 主变 35 kV 侧的一组晶闸管控制电抗器(简称 TCR), 四组滤波电容器组(FC), 即 3 次、5 次、7 次和 11 次各一组, 以及控制保护系统, 该装置额定容量为 210 Mvar。如图 1 所示。

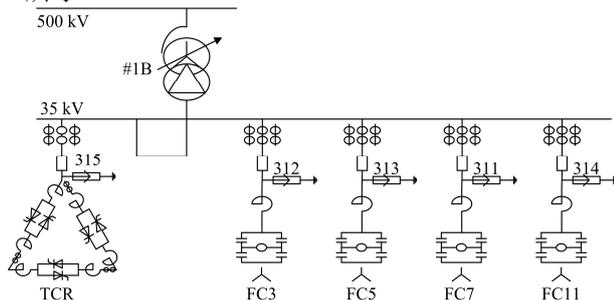


图 1 SVC 系统的组成结构图

Fig. 1 Structure of SVC

1.1 干扰源的变化特性

电抗器正常运行时电流为额定值 2000 A, 但在电网故障时刻, 为支撑系统电压, 电抗器电流将急速减少, 导致干扰降低。因此测试正常时刻的干扰具有一定的代表性。

在正常运行时, 三相磁场相互抵消; 当系统单相故障时, 虽然故障相的电抗器产生的磁场减弱, 但二次设备受到的干扰可能进一步扩大。

1.2 干扰源的频率特性

TCR 的基本结构是两个反并联的晶闸管和电抗器串联。晶闸管在电源电压的正负半周轮流工作, 当晶闸管的控制角 α 在 $90^\circ \sim 180^\circ$ 时, 晶闸管受控导通(控制角为 90° 时完全导通, 180° 时完全截止)。在电网电压基本不变的前提下, 增大控制角将减小 TCR 电流, 减小装置向系统感性无功功率的输出; 反之减小控制角将增大 TCR 电流, 增加装置向系统感性无功的输出。由于流过电抗器的电流并非标准的正弦波, 受晶闸管的影响存在较大的谐波^[7]。经计算, 额定容量 210 Mvar, 额定电压 36.75 kV, 最小触发角 116° 的 TCR 产生的谐波电流以基波电流为主, 其他次谐波电流的占比如表 1 所示。

表 1 电抗器谐波电流大小

Table 1 Harmonic current in reactor

谐波次数	1	3	5	7	11
电流/A	2000	123.2	266.1	149.3	65.8
谐波次数	13	17	19	23	25
电流/A	44.8	28.38	21.2	15.4	12.4

2 直流系统的干扰现状

2.1 直流系统的结构

直流系统由蓄电池、平衡电阻、母线和支路组成, 其结构如图 2 所示。该站的直流系统的额定电压为 110 V, 平衡电阻设计值为 $100 \text{ k}\Omega$, 其中的支路 1 和支路 2 离电抗器较近, 支路 n 离电抗器较远。图中的 A 点在主控楼的继电保护小室, 离电抗器较远, B 点为 SVC 二次设备的直流馈线屏, 安装在电抗器附近的 SVC 小室, C 点为电抗器附近的二次电缆, D 点为远离电抗器的 500 kV 设备的二次电缆。

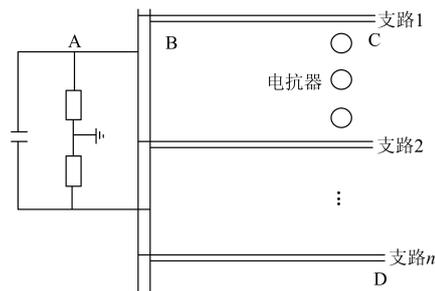


图 2 直流系统的组成结构图

Fig. 2 Structure of DC system

2.2 直流系统的干扰特点

直流系统的干扰可分为共模干扰和差模干扰两种类型。差模干扰为幅度相等、相位相反的干扰, 即直流系统正负极性间干扰, 差模干扰能够直接对负载供电造成影响。而共模干扰为幅度相等、相位相同的干扰, 即电源对地的电压, 主要影响负载对地的绝缘。

为了解空心电抗器对直流系统的影响, 对某变电站现场展开实地测量, 在 SVC 设备附近的直流馈线屏测得的干扰如图 3 所示, 其中红色通道为正极对地的干扰, 蓝色通道为负极对地的干扰。

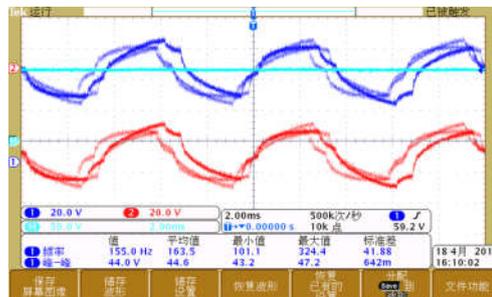


图 3 直流系统的干扰波形图

Fig. 3 Waveform diagram of the interference in DC system

从图 3 中可知, 正负对地的干扰的幅值相同, 相位也相同。即直流系统的干扰以共模干扰为主, 其峰峰值达 44 V(最高可达 56 V), 占直流系统额定

电压的 40%(最高可达 50.1%), 差模干扰较小, 基本可以忽略。

由于直流系统的所有二次回路的正负极基本均在一根电缆内, 其距离非常近, 且采用换位措施, 电缆为屏蔽电缆, 因此可以分析得到空间磁场产生的差模干扰几乎为零。

2.3 直流系统干扰分布情况

实测中发现, 直流系统在变电站各个位置并且不同位置的干扰电压有所不同, 为了进一步摸清直流系统的分布情况, 分别在直流系统的 A、B、C、D 点测试直流系统的干扰, 如表 2 所示。

表 2 直流系统干扰情况

Table 2 DC system interference

测试点	A 点蓄电池	B 点 SVC 小室馈线屏	C 点现场端子箱	D 点 500 kV 设备区
共模干扰	2.71	12.67	9.22	2.9
差模干扰	约为 0	约为 0	约为 0	0

测得其干扰主要以共模干扰为主, 其在直流线路起点处为最低, 距电抗器较近的 SVC 保护小室馈线屏处最高, 远离 SVC 小室的电缆共模干扰较小。

2.4 直流系统干扰频率特性

在 SVC 小室的直流系统二段母线馈线屏处测得的干扰的频率特性如图 4 所示。

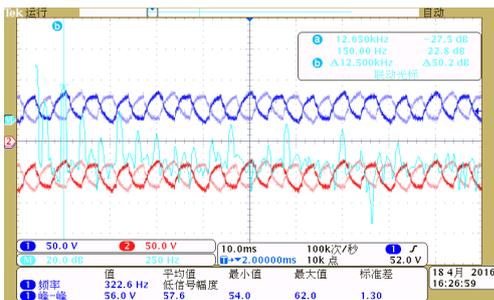


图 4 直流系统的干扰的频率特性

Fig. 4 Frequency characteristic of DC system

对测量得到的干扰信号进行傅立叶变换, 能够观察到干扰的频率成分如图 5 所示。

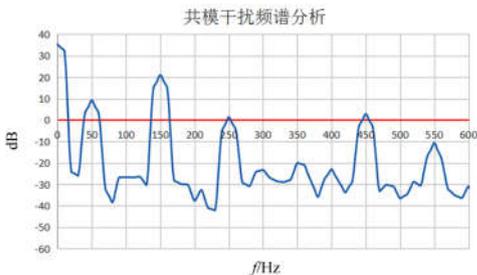


图 5 直流系统的干扰的频谱分析

Fig. 5 Frequency analysis of the interference in DC system

可以发现, 直流系统受到空心电抗器的干扰以 3 次谐波 150 Hz 为主, 基波 50 Hz 的成分较低, 其次存在少量的 5 次和 11 次谐波成分。

3 三维磁场仿真模型建立

3.1 电抗器模型的搭建

为研究变电站中三相空心电抗器运行时对直流系统干扰的影响, 建立了 1:1 等效磁场模型^[8], 如图 6 所示。由文献[9]可知, 该模型能够较好地反映现场的磁场分布情况。

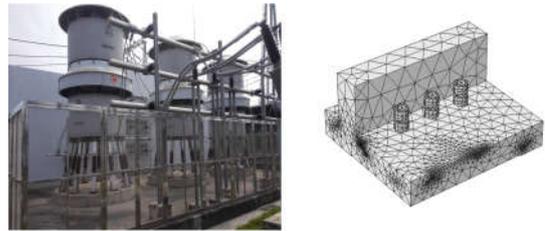


图 6 三维物理模型的建立

Fig. 6 Establishment of 3-d physical model

3.2 地网及直流系统模型的搭建

直流系统线路的走向和磁场源的位置对直流系统共模干扰影响较大, 现场开挖勘察直流电缆的相对位置并结合变电站设计图纸确定电抗器的尺寸和分布, 建立等比例模型, 其中二次电缆的走向和电抗器位置布置图如图 7 所示。

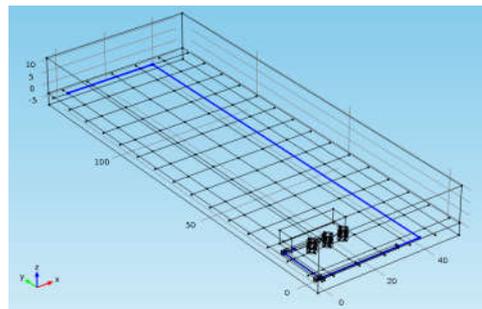


图 7 SVC 二次电缆的走向

Fig. 7 Course of the secondary cable for SVC

3.3 直流系统共模干扰的仿真

下面是仿真中感应电势的计算方法, 将接地网建立在一个平面上, 以式(1)计算互感系数^[10]。

$$M = \oint B \cdot ndS / I \quad (1)$$

式中: B 为耦合区域的磁感应强度; n 为耦合线圈匝数; I 为电抗器工作电流; S 为耦合区域即闭环回路面积。

对各相电抗器单独产生激励, 分别算得三相电抗器对闭环线路的互感系数 M_{L1} 、 M_{L2} 、 M_{L3} , 然后以式(2)计算闭环线路的磁通量和感应电势^[11]。

$$\begin{cases} \Psi_d = M_{L1} I_0 e^{j\omega_0 t} + M_{L2} I_0 e^{j(\omega_0 t + 2\pi/3)} + M_{L3} I_0 e^{j(\omega_0 t - 2\pi/3)} \\ e = -\frac{\partial \Psi_d}{\partial t} \end{cases} \quad (2)$$

式中: Ψ_d 为三相电抗器工作时对闭环线路感应出的合成相磁通量; 电抗器额定工作电流 $I_0 = 2000$ A; 电流角频率 $\omega_0 = 2\pi f$; e 为合成感应电势。

在 COMSOL Multiphysics 软件中, 通过定义完整的求解器序列可以在一次计算中实现多种不同的求解。根据实际情况, 对模型输入 2000 A 电流, 并给予带有相角信息的交流激励, 在求解模型中选择频域模型^[7]。三相电流将会在空间中产生三相叠加磁场, 将软件模拟的磁场与 SVC 现场磁场大小作为比较来确定仿真的正确性, 仿真效果如表 3 所示。

表 3 共模干扰的实测值与仿真值

Table 3 Measured value and simulation value of common-mode interference

位置	保护小室共模干扰/V	315 汇控柜共模干扰/V
实测值	14.53	9.22
仿真值	14.60	11.88

实测结果发现, 315 汇控柜距主控楼更远, 然而实际情况中, 其干扰电压比保护小室测控屏更小。经过现场考证发现, 二次电缆沿电缆走向铺设, 先经过 315 汇控柜再进入保护小室, 最终又通过相同线路从保护小室出来接至汇控柜上, 在仿真模型中按照该线路进行布局, 仿真结果如表 3, 其结果与实测结果较为接近, 再次证明仿真结果的正确性。

4 抗干扰措施效果评估

4.1 提升 SVC 电抗器高度的仿真结果

如图 8 和图 9 所示, 电抗器在不同的高度下,

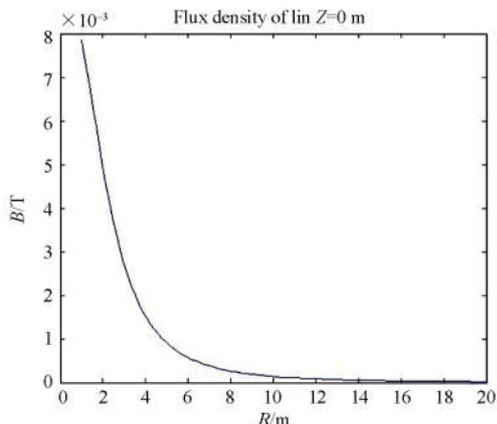


图 8 支架高 1578 mm, 离地高 0 m 的磁场分布曲线

Fig. 8 Magnetic field distribution on the ground when the height of the bracket is 1578 mm

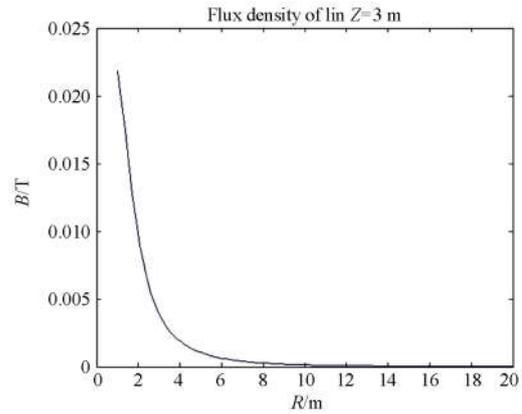


图 9 支架高 3578 mm, 离地高 3 m 的磁场分布曲线

Fig. 9 Magnetic field distribution of 3 m above the ground when the height of the bracket is 3578 mm

磁场分布差别较大。随着电抗器与地面距离增加, 地面及以下场强将大幅减弱^[12]。为了研究其减弱的幅度, 在 COMSOL Multiphysics 软件中, 在电抗器不同的高度下, 仿真测试直流系统的干扰, 屏蔽电缆的环流。其结果如表 4 所示。

表 4 电抗器高度与干扰的关系

Table 4 Relationship of reactor height and interference

电抗器高度/m	二次电缆感应电流/A	主接地网感应电流/A	保护小室共模干扰/V	315 汇控柜共模干扰/V
0	12.15	599.13	14.60	11.88
1	6.55	291.48	11.65	8.07
2	3.60	202.85	10.02	6.74
3	2.26	136.20	8.39	5.66
4	1.27	92.73	6.85	4.96

由表 4 可知, 将电抗器的高度抬高 4 m 后, 二次电缆屏蔽层环流可以下降 89.5%, 315 汇控柜的共模干扰幅值可下降 53%, SVC 小室的共模干扰电压可下降 58.2%。

4.2 SVC 电抗器底部敷设屏蔽材料效果仿真

由于共模干扰主要为空间磁场在地网与二次回路之间构成的环产生感应电压导致。如果在电抗器底部敷设屏蔽材料, 则有可能有效降低二次回路的共模干扰。为了研究测试其可行性, 在 COMSOL Multiphysics 中, 在如下红色区域部分敷设不同的屏蔽材料, 铝、硅钢片和铁, 测试其效果。电抗器底下敷设屏蔽材料的面积如图 10 所示。

铺设硅钢片措施会造成增加电抗器参数的影响, 其原理是对空心电抗器底部敷设硅钢片后, 相当于给电抗器配置了少量铁心, 进入电抗器底部的磁力线被约束而变得密集, 即电抗器内部的相对磁

导率变大,使得电感值变大。铝板屏蔽采用涡流消除原理,即涡流屏蔽,是利用高电导率的屏蔽材料在时变磁场下在屏蔽体内形成涡流,从而引发与入射场相反的磁场,抵消部分原磁场,导致电抗器电感降低^[13]。由于铁板的磁导率比硅钢片小,又远大于铝板,但同时其电导率远大于硅钢片,小于铝板,因此其均衡了铝板和硅钢片的优点。电抗器底部敷设屏蔽材料后的磁场强度如图 11 所示。

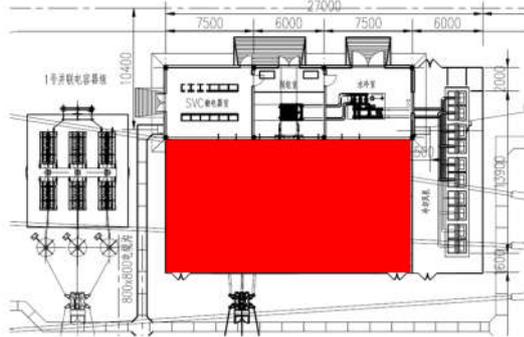


图 10 电抗器底部敷设屏蔽材料的面积

Fig. 10 Area of laying shielding material under reactors

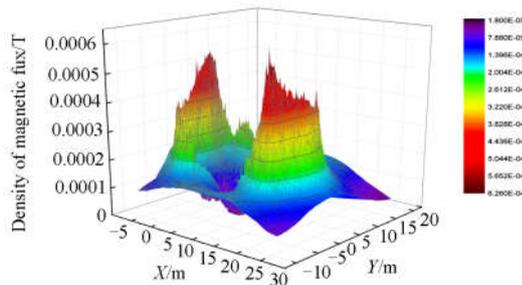


图 11 电抗器底部敷设屏蔽材料后的磁场强度示意图

Fig. 11 Magnetic field intensity after laying shielding materials under reactors

由表 5 可知,敷设屏蔽材料后,普遍可使共模干扰降低。效果最大的为铝板,其保护小室的共模干扰可下降 52.4%,315 汇控柜的共模干扰可下降 61.2%。但同时其温升也最大,可达 20℃。导致电抗器的电感值变化也最大,达 3.5%,但依然在规程和实际工程的允许范围内^[14]。

表 5 屏蔽材料与共模干扰的关系

Table 5 Relationship of shielding materials and common-mode interference

屏蔽材料	保护小室共模干扰/V	315 汇控柜共模干扰/V	电抗器的电感	温升/℃
原始值	14.60	11.88	28.2	—
硅钢片	7.31	13.80	28.7	7.1
铝	6.95	4.49	27.2	20
铁	7.11	4.61	27.6	14

5 结论

本文研究了 SVC 系统中大电流空心电抗器对变电站直流系统的影响,经过现场实测和仿真,并对多个抗干扰措施进行了仿真,得出如下结论:

1) 大型空心电抗器对直流系统产生的干扰以共模干扰为主,干扰信号以 3 次谐波为主。

2) 共模干扰的幅值与电缆的走向和位置密切相关,直流系统各处位置的干扰存在较大的区别,离电抗器更近的电缆干扰更大。

3) 抬高电抗器的高度,可有效降低直流系统的共模干扰。在电抗器底部敷设屏蔽材料可有效降低直流系统的共模干扰,其中敷设铝片或者铁片的效果最佳。

参考文献

- [1] 杨海芳,赵海翔. 干式空心电抗器三相磁场的解析计算[J]. 变压器, 1998, 35(9): 5-9.
YANG Haifang, ZHAO Haixiang. Analytical calculation of dry-type air-core reactor in three-phase magnetic field[J]. Transformer, 1998, 35(9): 5-9.
- [2] 李晓朋,裘愉涛,钱建国,等. 智能变电站二次设备互换性探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(14): 76-81.
LI Xiaopeng, QIU Yutao, QIAN Jianguo, et al. Discussion on interchangeability of secondary devices in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(14): 76-81.
- [3] 刘珂,王琦. 共模干扰对模拟量输出控制模块输出回路的影响分析及其解决方法[J]. 广东电力, 2005, 18(4): 29-31.
LIU Ke, WANG Qi. Influence of common mode disturbance on output circuit of analogue output[J]. Guangdong Electric Power, 2005, 18(4): 29-31.
- [4] 杨雷娟. 空心电抗器工频磁场干扰屏蔽措施的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2009.
YANG Leijuan. Power frequency magnetic field shielding measures analysis of air-core reactor[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2009.
- [5] 李永明,徐禄文,俞集辉,等. 35 kV 干式空心电抗器下工频磁场抑制[J]. 高电压技术, 2010, 36(12): 2960-2965.
LI Yongming, XU Luwen, YU Jihui, et al. Intensity control of power frequency magnetic field under 35 kV dry-type air-core reactor[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(12): 2960-2965.
- [6] 杨炳成. 电力牵引变电所二次电缆共模干扰的数值算法[J]. 继电器, 1999, 27(6): 24-26.

- YANG Yecheng. The application of measuring-frequency technique based on software in automatic synchronize closing apparatus[J]. Relay, 1999, 27(6): 24-26.
- [7] 陈晓宇, 郑建勇, 梅军. 基于 LC 振荡频率变化量的电容器组早期故障在线智能预警方法及其实现[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 144-149.
- CHEN Xiaoyu, ZHENG Jianyong, MEI Jun. Power capacitor banks failure warning method based online intelligence LC oscillation frequency variation and its implementation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 144-149.
- [8] 王燕, 皇甫成, 杜志叶, 等. 覆冰情况下输电线路有限元计算及其结构优化[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8): 99-106.
- WANG Yan, HUANGFU Cheng, DU Zhiye, et al. Finite element calculation and structural optimization method for the high voltage transmission line under icing condition[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 99-106.
- [9] 温才权, 宋永佳, 赵世林, 等. 大型 SVC 中空心电抗器电磁兼容评估及减小地网的感应电流的研究[J]. 南方电网技术, 2015, 9(9): 76-80.
- WEN Caiquan, SONG Yongjia, ZHAO Shilin, et al. Simulation of electromagnetic compatibility of air-core reactor in large scale SVC and measure of reducing induced current in substation grounding grid[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(9): 76-80.
- [10] 宫攀. 基于缩比实验法的空心电抗器空间磁场研究[D]. 济南: 山东大学, 2013.
- GONG Pan. Study of magnetic field of air-core reactors using small-scale experimental technique[D]. Jinan: Shandong University, 2013.
- [11] 夏天伟, 曹云东, 闫英敏. 三相干式空心电抗器组等效感抗的计算[J]. 电工技术学报, 1999, 14(3): 62-65.
- XIA Tianwei, CAO Yundong, YAN Yingmin. The calculations of three-phase dry air core reactor group equivalent inductive reactance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1999, 14(3): 62-65.
- [12] 杜华珠, 文习山, 鲁海亮, 等. 35 kV 三相空心电抗器组的磁场分布[J]. 高电压技术, 2012, 38(11): 2858-2862.
- DU Huazhu, WEN Xishan, LU Hailiang, et al. Magnetic field distribution around 35 kV three-phase air-core reactors[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(11): 2858-2862.
- [13] 汪泉弟, 张艳, 李永明, 等. 干式空心电抗器周围工频磁场分布[J]. 电工技术学报, 2009, 24(1): 8-13.
- WANG Quandi, ZHANG Yan, LI Yongming, et al. The power frequency magnetic field distribution around dry-type air-core reactor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(1): 8-13.
- [14] 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.
- 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.

收稿日期: 2016-12-23; 修回日期: 2017-05-17

作者简介:

温才权(1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为变电运行维护; E-mail: csgwcq@139.com

赵世林(1993—), 男, 通信作者, 硕士生, 主要研究方向为工频电磁兼容与设备故障诊断; E-mail: freak_big@163.com

周凯(1975—), 男, 博士, 博导, 研究方向为高电压与绝缘技术. E-mail: zhokai_scu@163.com

(编辑 魏小丽)