

直流支柱绝缘子电场影响因素分析

许安¹, 何大猛², 刘守豹¹

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院 四川 成都 610072;

2. 西安交通大学电气学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 直流支柱绝缘子是换流站支撑、固定高压设备, 保证电气外绝缘的重要设备。为对直流支柱绝缘子特性影响因素进行分析, 针对 ±500 kV 德阳换流站支柱绝缘子放电故障, 使用有限元分析软件并结合现场实际, 用 2D 直流场计算雨水、污秽和消防水管对直流支柱绝缘子电场分布的影响情况。结果显示: (1) 污秽的存在使得场强增大 1.20 倍; (2) 雨滴的存在使得场强增大 1.71 倍; (3) 消防管道、污秽和雨滴共同存在使得场强增大 2.42 倍, 并且消防管道的对应位置场强增大 5 倍。电场的增大容易引起放电故障的发生, 这对今后直流换流站相关设备的外绝缘优化设计、结构优化、运行维护和故障分析具有重要理论参考意义。

关键词: 直流支柱绝缘子; 电场强度; 有限元法; 直流电场

Abstract: The DC post insulator is an important equipment to support and fix high-voltage equipment, and ensure the electric external insulation in converter station. In order to analyze the influencing factors of DC post insulator characteristics and aiming at the discharge fault of post insulator in Deyang Converter Station, the finite element analysis software is used and combined with the actual situation, the influences of raindrop, grime and fire main on the electric field distribution of DC post insulator are calculated with 2D DC field. The research results show that the electric field increases by 1.20 times when it grimed, and increases by 1.71 times when raining. It increases by 2.42 times when there are grim, raindrop and fire main, and the electric field increases by 5 times in the place corresponding to the fire main. The discharge phenomenon is more likely to be occurred when the electric field increases. The research data and conclusions provide a theoretical reference for the future optimal design of external insulation, the structural optimization, the operation maintenance and the fault analysis of the relevant equipment in DC converter station.

Key words: DC post insulator; electric field intensity; finite element method; DC field

中图分类号: TM861 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)02-0056-06

0 引言

高压直流输变电工程由于具有输送容量大、输送距离远等优点, 在中国得到了迅速发展, 其设备的绝缘可靠性十分重要。在特高压直流输电中大量使用支柱绝缘子, 在很大程度上决定系统的绝缘水平和安全可靠性。然而近几年来, 由于高压直流支柱瓷绝缘子的设计、制造质量、安装和运行检修等原因, 导致电力系统频繁发生支柱绝缘子断裂和污闪严重事故, 其绝缘结构设计成为生产、设计中的重点和难点之一^[1-4]。因此, 开展支柱绝缘子外绝缘特性分析意义重大。

2013 年 6 月 29 日夜间德阳地区大暴雨, 23:50 换流站极 I (正极运行) 支柱绝缘子发生放电现象

为: 极 I 直流极母线 1 号支撑绝缘子瓷瓶底部与支撑构架结合处有放电迹象(支撑绝缘子由 4 节瓷瓶组成, 总长 8.4 m) 底部瓷瓶已形成放电圈, 与平行的消防管道形成间歇性的贯穿放电通道。

次日 2 时, 站内下雨情况稍小, 1 号支撑绝缘子上部出现沿瓷瓶表面间断性闪络放电迹象(闪络长度达 1.5 节瓷瓶), 一次闪络放电持续时间约 1.5 s。4 时站内雨势转为中雨, 1 号支撑绝缘子上部(大约 1.5 节瓷瓶范围) 沿支柱瓷瓶表面有零星放电闪络出现, 进行视频记录, 底部瓷瓶未见放电圈及放电通道, 上部瓷瓶仍有零星放电点。4:30 现场放电现象已消失, 如图 1 所示。

针对放电故障情况, 应用有限元分析软件分析计算了暴雨、污秽、下端消防水管等对电场分布的影响, 为直流支柱绝缘子的绝缘设计、结构优化、运行

维护和故障分析提供可靠的理论参考数据。



图 1 支柱绝缘子放电后的图片

1 计算原理

直流场因其周围空间存在带电粒子,一般应按照直流离子场计算,但由于所分析的故障时刻,支柱绝缘子处于大风、大雨环境,粒子流的影响可基本消除,所以通过分析直流支柱绝缘子的运行条件可知,在正常工作时,其均压环和管母部分电场为直流传导电场,其余部分电场为静电场,满足静电场条件。电位函数 $\varphi(x, y, z)$ 都满足 Laplace 方程,对应的边值问题为

$$\begin{cases} \nabla^2 \varphi = 0 \\ \varphi_{\text{高电位}} = U \quad \varphi_{\text{低电位}} = 0 \\ \varphi|_{\text{边界}} = 0 \end{cases}$$

式中 U 为电极上施加的电压。

在不同绝缘材料和导电媒质的分界面满足的衔接条件分别为

$$\begin{cases} \varphi_1 = \varphi_2 \\ \varepsilon_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial n} = \varepsilon_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial n} \end{cases} \quad \begin{cases} \varphi_1 = \varphi_2 \\ \gamma_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial n} = \gamma_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial n} \end{cases}$$

式中 ε 为绝缘材料的介电常数; γ 为导电媒质的电导率。分别采用直流场和静电场分析方法,可以得到直流支柱绝缘子的电场特性。

三维静电场 Laplace 方程式的等价变分问题可以描述为

$$\begin{cases} F(\varphi) = \int \frac{\varepsilon}{2} \left[\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial z} \right)^2 \right] dx dy dz = \min \\ \varphi|_k = U_k \end{cases}$$

应用有限元技术将计算场域剖分为若干个子域后,其泛函极值可以表示为

$$F(\varphi) = \sum_{e=1}^{Ne} F_e(\varphi) = \sum_{e=1}^{Ne} \int_{ve} \frac{\varepsilon}{2} \left[\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial z} \right)^2 \right] dx dy dz = \min$$

其中 Ne 为剖分单元总数。对每个单元应用数学变换,并最终整理为一个统一的矩阵方程为

$$[K][\varphi] = 0$$

其中, $[K]$ 为系数矩阵; $[\varphi]$ 为剖分单元节点的待求电位矩阵。求得电位值后,单元内的场强可由电位的导数获得为

$$E = -\nabla \varphi \quad \text{即} \quad \begin{cases} E_x = -\frac{\partial \varphi}{\partial x} = -\sum_{i=1}^m \frac{\partial \psi_i}{\partial x} \varphi_i \\ E_y = -\frac{\partial \varphi}{\partial y} = -\sum_{i=1}^m \frac{\partial \psi_i}{\partial y} \varphi_i \\ E_z = -\frac{\partial \varphi}{\partial z} = -\sum_{i=1}^m \frac{\partial \psi_i}{\partial z} \varphi_i \end{cases}$$

其中 ψ_i 为形状函数; m 为单元节点数。将以上方程中的介电常数 ε 换为电导率 γ 就得到直流电场有限元方程,采用直流场计算外界因素对场强分布的影响。

2 支柱绝缘子表面电场影响分析

2.1 基准验算模型介绍

由于使用 3-D 建模结构复杂,计算量巨大,故使用简化的轴对称模型进行定性分析。在故障发生时德阳换流站为暴雨天气,因此需要用 2-D 直流传导电场进一步计算降雨、污秽层和消防管道等因素对电场分布的影响。

根据四川地区污秽等级分布图可知德阳换流站的污秽等级为 D 级,结合《电力系统污区分级与外绝缘选择标准》,可以得到其污秽的电导率,并实测德阳雨水的电导率,认为陶瓷和空气的导电性极差,则电导率取极小的数值,各材质的电导率如表 1 所示。2-D 轴对称模型如图 2 所示。

表 1 各材质的电导率 $/(s \cdot m^{-1})$

空气	陶瓷	水滴	污秽层	不锈钢
$1e-9$	$1e-8$	0.01	0.05	1 100 000

上金具的电位为 1 V,下金具的电位为 0 V,从图 7 计算结果可以看出,金具的棱角部分及金具与电介质结合的部分是场强较大区域,进行场强控制应该重点关注这些区域。

2.2 雨水对电场分布的影响

在图 2 的基础上,建立降雨的改进模型,如图 4

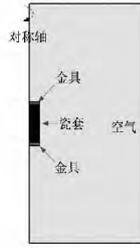


图 2 基准计算模型

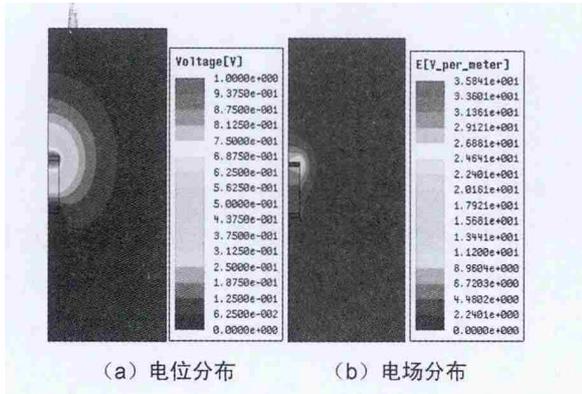


图 3 基准模型电位、电场分布云图

所示,其中空气区域部分的圆点表示水滴,用以模拟降雨。

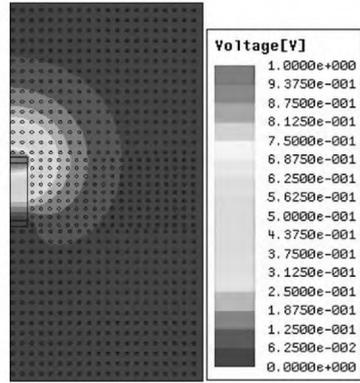


图 4 降雨模型及其剖分

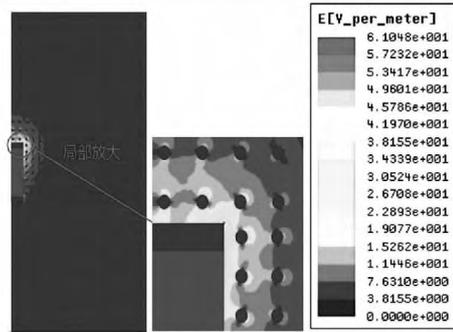
从图 5 可知,雨滴的存在改变了空间电导率和介质的分布,使电场最大值由 35.84 V/m 增大至 61.05 V/m,比无雨滴情况增大 1.71 倍。

若空气质量较差,则雨水的电导率就会增大。进一步考虑雨水电导率变为 1 s/m 时对电场的影响,如图 6 所示。对比图 5 发现,雨水电导率从 0.05 增大到 1 s/m,电场从 61.05 V/m 增大到 61.06 V/m,变化极小,说明雨水电导率达到一定数值后,在增大电导率对电场的影响不明显。

2.3 污秽层对电场分布的影响

在图 2 的基础上,建立污秽改进模型,如图 7 所示,其中瓷套和金具右侧矩形带表示导电膜,用以模

(a) 电位分布



(b) 电场分布

图 5 有雨滴情况下电位、电场分布云图

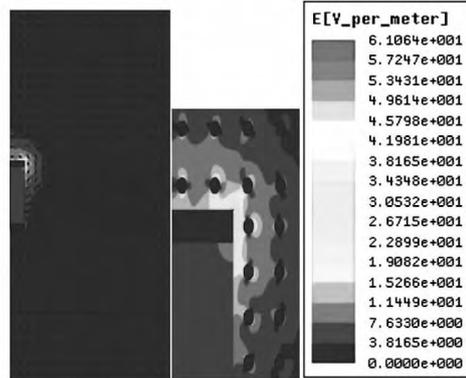


图 6 雨水电导率为 1 s/m 时电场分布云图
拟污秽层。

从图 8 可知,污秽的存在改变了空间电导率的分布,使得电场最大值由 35.84 V/m 增大至 42.98 V/m,比无污秽情况下增大 1.20 倍。

对比图 8 的结果,可以知道当污秽的电导率增大到 1 s/m 时,电场强度增大到 48.72 V/m,增大了 13.36%,这说明污秽电导率变化对电场分布有一定的影响。

2.4 雨水和污秽层共同对电场分布的影响

结合图 4 和图 7,建立降雨和污秽层共同存在的改进模型,如图 10 所示。

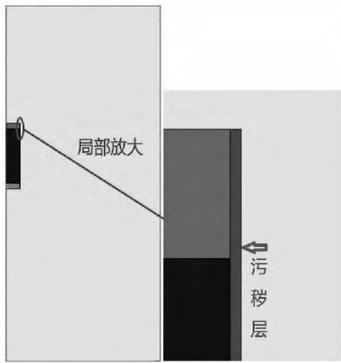


图 7 污秽改进模型图

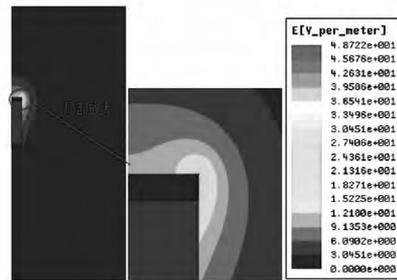
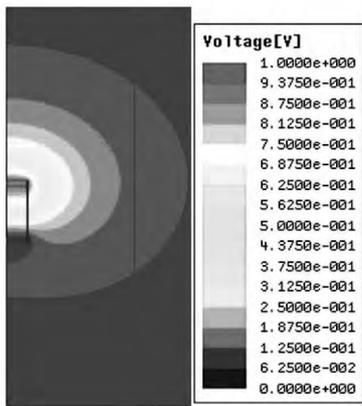
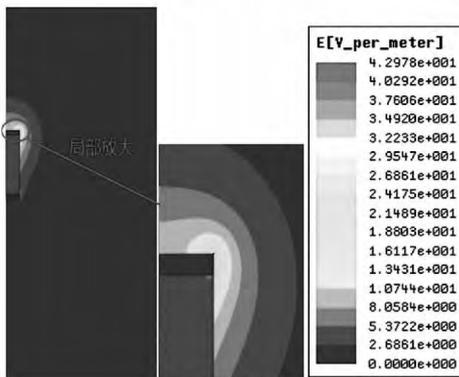


图 9 污秽电导率增大时, 电场分布云图



(a) 电位分布



(b) 电场分布

图 8 有污秽情况下电位、电场分布云图

从图 11 可知, 雨滴和污秽共同的存在改变了空间介电常数和电导率的分布, 使得电场最大值由 35.84 V/m 增大至 75.40 V/m, 比基本模型情况下增大 2.10 倍, 由此说明雨滴和污秽共同存在会使得电场分布明显畸变。此外, 污秽膜存在, 底端电场有增大现象, 且随着污秽电导率的增大场强也明显变大, 这样底端容易形成电荷累积。

2.5 消防水管存在对电场分布的影响

德阳换流站实际运行时, 高压电抗器支柱绝缘

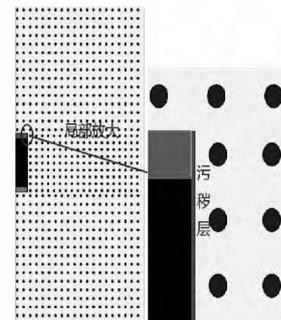
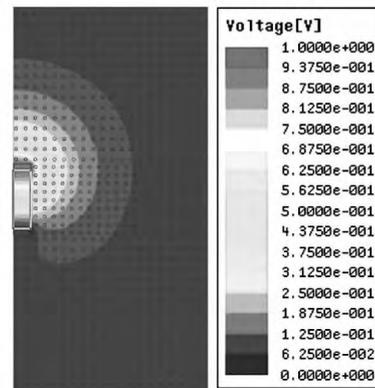
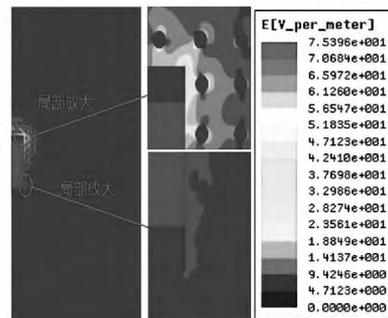


图 10 污秽和雨滴共存的改进模型图



(a) 电位分布



(b) 电场分布

图 11 污秽和雨滴共存情况下电位、电场分布云图
子最下端瓷瓶旁边有消防水管通过, 且消防管道处于零电位, 如图 12 所示。

从图 13 可知, 消防管道的存在使得低电位抬高, 改变了空间电场分布, 使得电场最大值由 35.84

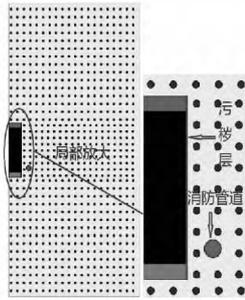
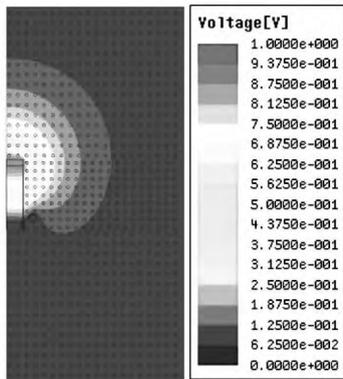
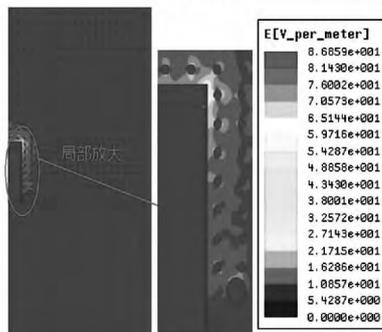


图 12 消防管道影响改进模型图



(a) 电位分布



(b) 电场分布

图 13 消防管道存在情况下电位、电场分布云图
V/m 增大至 86.86 V/m, 比基本模型情况下增大 2.42 倍, 此外, 计算了如果仅仅是消防管道的影响, 电场只比基准模型增大 1.45 倍。

表 2 各种情况下消防管道及相应位置电场最大值
/($v \cdot m^{-1}$)

计算项目	管道对应位置电场	计算项目	管道表面电场
基本	1.15	基本 + 管道	7.98
污秽	1.8	污秽 + 管道	12.1
雨水	2.3	雨水 + 管道	13.15
污秽 + 雨水	3.12	污秽 + 雨水 + 管道	15.68

从表 2 可以看出, 在各种情况下, 消防管道的存在都明显地影响电场分布, 使得管道所在位置电场

发生急剧变化, 尤其是在污秽和雨水共同存在情况下, 最大电场可以增大到 15.68 V/m, 比同样天气没有消防管道情况增大 5 倍, 比干燥无污染情况增大 2 倍, 比干燥、无污染且没有消防管道时对应位置的场强增大了 13.6 倍。

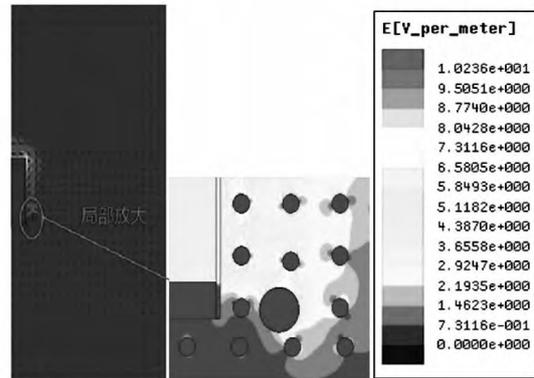


图 14 消防管道高度降低后电场分布云图

如果把消防水管降低到下法兰水平高度以下, 那么消防水管表面电场强度将降低到 8.04 V/m, 降低了接近 2 倍, 改善效果非常明显, 如图 14 所示。

3 结论与建议

①场计算结果从理论上解释了暴雨和污秽情况下支柱绝缘子表面电场剧增的原因, 其结果为: 暴雨使得电场强度增大 1.71 倍, 污秽使得场强增大 1.20 倍, 雨水和污秽共同存在时使得场强增大了 2.42 倍, 这样就增大了直流支柱绝缘子在暴雨和污秽严重天气情况下发生放电的概率。

②消防管道的存在, 使得地电位抬高, 影响空间电场分布, 尤其是在暴雨和污秽严重的天气情况, 消防管道表面电场急剧增大, 且明显高于周围场强, 容易引起瓷套对其放电。

③为防止类似故障发生, 尤其是保证运行方式改变情况下极 II 不发生类似故障, 建议对极 I 和极 II 高压电抗器支柱绝缘子采取在适当位置加装大伞裙的方式进行调爬处理, 其大伞尺寸大, 能挡住雨水溅落到下面伞裙, 从而减小了雨水对电场分布的影响。为防止高压电抗器支柱绝缘子下端放电, 相关接地管道和部件若靠近瓷瓶, 则应布置在支架水平高度以下。

参考文献

[1] 关志成, 高海峰, 周军, 等. 高海拔地区 750 kV 线路防污

闪、防雨闪措施研究[J]. 中国电力, 2005, 38(12): 24 - 28.

[2] 王锦. 直流悬式系列瓷绝缘子设计性能及应用[J]. 电瓷避雷器, 2010(1): 13 - 18.

[3] 国家电网公司. 特高压直流换流站支柱绝缘子设计[R]. 北京: 国家电网公司, 2007.

[4] 赵峰, 张福增, 杨皓麟, 等. 复合支柱绝缘子在高海拔区直流污闪与污雨闪性能[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2009, 49(10): 1581 - 1584.

[5] 周泽存. 高电压技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.

[6] 冯慈璋. 工程电磁场导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.

[7] 施围. 高电压工程基础[M]. 北京: 机械出版社, 2006.

[8] 盛剑霓. 工程电磁场数值分析[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1991.

[9] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004: 236 - 239.

[10] 卢明, 杨庆, 阎东, 等. 复合绝缘子伞型结构对电场分布的影响[J]. 电瓷避雷器, 2011(1): 1 - 5.

[11] 李名加. 10 kV 合成绝缘子沿面电场分布计算及其憎

水性变化因素分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2002.

[12] 王黎明, 张楚岩, 任贵清, 等. 特高压交流复合绝缘子伞裙结构的优化设计[J]. 高电压技术, 2009, 35(10): 2335 - 2339.

[13] 乐波, 马为民, 郑劲. 特高压直流场外绝缘方案的研究[J]. 电力建设, 2006, 1(1): 1 - 5.

[14] 刘振亚. 特高压直流输电技术研究成果专辑[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.

[15] 中国南方电网公司. ± 800 kV 直流输电技术研究[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.

[16] 中华人民共和国国家技术监督局. GB/T 16927. 1 - 1997, 高电压试验技术[S]. 北京: 中国标准出版社, 1997.

作者简介:

许安(1958), 高级工程师, 从事电力系统过电压防护的研究;

何大猛(1988), 硕士研究生, 研究方向为电气设备电磁分析与电力系统过电压防护。

(收稿日期: 2013 - 10 - 24)

(上接第 21 页)

针对光伏电站出力不稳定的问题, 现在已经有了大量的研究和试验工作进行光功率预测, 目的是为了经济调度, 确保电网的安全稳定运行。但在电气化铁路接入后, 仅仅进行光功率的预测是不够的。所以在平时电网调度运行过程中, 应加强光伏电站、电网、铁路三个部门的相互协调与合作, 将光功率预测结果与电气化铁路的列车运行图结合起来, 综合考虑这两方面因素对电网进行调度, 从而确保电网的安全稳定运行。

参考文献

[1] 张晓薇, 李振国. 电气化铁路接入电力系统 220 kV 和 110 kV 供电电压等级的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(17): 13 - 16.

[2] 王厂贵. 并网光伏发电系统综述(上)[J]. 太阳能, 2008(2): 14 - 17.

[3] 姚金雄, 张涛. 牵引供电系统负序电流和谐波对电力系统的影响及其补偿措施[J]. 电网技术, 2008, 32

(9): 61 - 65.

[4] 方廷, 韩郁, 张岚. 一种多逆变器太阳能光伏并网发电系统的组群控制方法[J]. 电网与清洁能源, 2009, 25(7): 57 - 60.

[5] 熊丽霞. 浙赣电气化铁路牵引负荷特性分析[J]. 江西电力, 2009, 33(2): 27 - 29.

[6] 韦钢, 吴伟力. 分布式电源及其并网时对电网的影响[J]. 高电压技术, 2007, 33(1): 36 - 40.

[7] 韩柳, 谈顺涛. 电气化铁路对电网的影响及对策[J]. 江苏电机工程, 2005(3): 8 - 11.

[8] 周小涵. 电气化铁路谐波在公用电网的渗透研究[J]. 四川电力技术, 2009, 32(4): 41 - 43.

[9] 卢志海, 厉吉文, 周剑. 电气化铁路对电力系统的影响[J]. 继电器, 2006, 32(11): 33 - 36.

[10] 粟时平, 刘贵英. 静止无功功率补偿技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006: 69 - 93.

作者简介:

胡仁祥(1987), 硕士, 从事电网调度运行。

(收稿日期: 2013 - 10 - 24)