

可控避雷器的静态电位分布计算方法

陈秀娟¹, 陈维江², 沈海滨¹, 贺子鸣¹, 陈立栋¹, 车文俊³, 宋继军³

(1. 中国电力科学研究院, 北京市海淀区 100192; 2. 国家电网公司, 北京市 西城区 100031;
3. 廊坊电科院东芝避雷器有限公司, 河北省 廊坊市 065001)

Calculation Method for Voltage Distribution of Controlled Metal Oxide Arresters

CHEN Xiujuan¹, CHEN Weijiang², SHEN Haibin¹, HE Ziming¹,
CHEN Lidong¹, CHE Wenjun³, SONG Jijun³

(1. China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China;

2. State Grid Corporation of China, Xicheng District, Beijing 100031, China;

3. Langfang EPRI Toshiba Lightning Arrester Company, Langfang 065001, Hebei Province, China)

ABSTRACT: Equivalent capacitances of thyristors of thyristor switch in the controlled metal oxide arrester (CMOA), C_T , changes with voltage, U_T . When the voltage distribution of CMOA is calculated, such characteristic should be fully considered. Combining field-circuit combination method and variation rule of C_T with U_T , a calculation program was put forward. Firstly, electromagnetic-field numerical calculation models of controlled component, fixed component and resistance of thyristor were established and an equivalent capacitance network was set up. Then the relation between C_T and U_T , was solved by test and curve fitting. Secondly, an equivalent circuit of CMOA was founded, the relation between C_T and U_T was substituted to the circuit, then the function between the electrode voltage, U_{Fi} , and the CMOA voltage, U_s , could be calculated by iterations. Finally, the function between U_{Fi} and U_s was substituted to the electromagnetic-field numerical calculation model, the variation rule of voltage distribution with U_s was solved. The calculation program was verified by tests. Results indicated that it is effective to calculate the voltage distribution of CMOA.

KEY WORDS: controlled metal oxide arrester (CMOA); thyristor switch; equivalent capacitance; field-circuit combination method; potential distribution

摘要: 可控避雷器的晶闸管开关中晶闸管的等效电容 C_T 随端电压 U_T 的变化而变化, 在计算可控避雷器静态电位分布时, 须考虑该特点。将“场路结合法”与 C_T 随 U_T 的变化规律相结合, 提出了可控避雷器静态电位分布计算方法, 即先

建立受控元件、固定元件和晶闸管均压电阻的电场数值计算模型, 求出等效杂散电容网络; 再通过试验检测和曲线拟合, 求出晶闸管 C_T 和 U_T 之间的函数关系; 然后建立可控避雷器等效电路模型, 将 C_T 和 U_T 之间的函数代入电路模型中, 通过反复迭代, 求得各电极电位 U_{Fi} 与避雷器端电压 U_s 之间的函数; 最后将 U_{Fi} 与 U_s 之间的函数代入电场数值计算模型中, 求出可控避雷器静态电位分布随 U_s 的变化规律。经试验验证, 该计算方法用于求解可控避雷器静态电位分布是有效的。

关键词: 可控避雷器; 晶闸管阀; 等效电容; 场路结合法; 电位分布

0 引言

目前, 理论计算已成为确定避雷器静态电位分布特性^[1]的主要手段, 计算方法的准确性和有效性也已得到实际工程的检验, 应用较多的主要有有限元法^[2-7]和模拟电荷法^[8-10]。模拟电荷法计算量大, 电荷的类型、个数和位置的确定一般要依靠经验确定, 很难有一般规律可循, 对工程技术人员比较困难; 有限元法比较适合于求解避雷器这种多介质电场问题。可控避雷器包含晶闸管开关^[11], 结构较复杂, 无法进行三维轴对称等效处理, 仅用有限元法计算量较大, 可采用有限元法和电路分析法相结合的“场路结合法”^[12-13], 即由电场计算得到电路分析参数, 再通过电路分析得到电场计算的边界条件, 进而求出避雷器的静态电位分布。此外, 可控避雷器晶闸管开关中晶闸管的等效电容 C_T 会随电压 U_T 的变化而变化^[14-15], 可控避雷器静态电位分布的求解过程和常规避雷器等固定参数设备不同,

基金项目: 国家自然科学基金项目(50737003)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50737003).

须将“场路结合法”和 C_T 随 U_T 的变化规律相结合来计算其电位分布。

本文以 110kV 电压等级可控避雷器模型为例，给出可控避雷器静态电位分布计算方法和计算流程，即将“场路结合法”和 C_T 随 U_T 的变化规律相结合，通过电场数值计算，得到受控元件 MOA1、固定元件 MOA2 和晶闸管均压电阻 MOR 的等效杂散电容参数，考虑晶闸管 C_T 和 U_T 之间的函数关系，通过迭代计算，最终得出可控避雷器的静态电位分布。并通过试验对该方法的有效性加以验证。

1 可控避雷器的结构特点

可控避雷器的结构如图 1 所示，主要由受控元件 MOA1、固定元件 MOA2(并联有均压电容 C_x)和晶闸管开关组成，MOA1 和晶闸管开关并联，晶闸管开关主要由晶闸管均压电阻 MOR、反并联晶闸管对 K 和限流电抗器 L 构成。

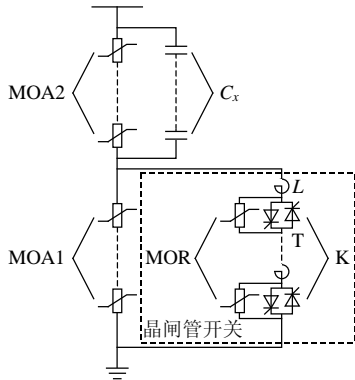


图 1 110kV 电压等级可控避雷器模型

Fig. 1 Model of 110kV controlled metal oxide arrester

正常运行时，施加在可控避雷器上的端电压 U_s 不大于其持续运行电压，可控避雷器工作在小电流区域，MOA1、MOA2、MOR 和 K 均可用电容等值，其中 MOA1、MOA2 和 MOR 的等值电容均不随 U_s 的变化而变化，K 中的晶闸管 T 是一种 4 层 PN 结构， U_s 不同时，T 所分担的电压 U_T 不同，PN 结电容不同^[14-15]，T 的等值电容 C_T 也不同， C_T 会随 U_T 和 U_s 的变化而变化，在研究可控避雷器静态电位分布时，须考虑这样的特点。

2 可控避雷器电位分布计算方法

2.1 计算方法

可控避雷器静态电位分布计算方法是“场路结合法”和 C_T 随 U_T 的变化规律相结合，先建立 MOA1、MOA2 和 MOR 的电场数值计算模型，求出等效杂散电容网络；再通过试验检测和曲线拟

合，求出晶闸管 C_T 和 U_T 之间的函数关系；然后建立可控避雷器等效电路模型，将 C_T 和 U_T 之间的函数代入电路模型中，通过反复迭代，求得各电极电位 U_{Fi} 与避雷器端电压 U_s 之间的函数；最后将 U_{Fi} 与 U_s 之间的函数代入电场数值计算模型中，求出可控避雷器静态电位分布随 U_s 的变化规律。

2.2 计算流程

以图 1 所示的 110kV 可控避雷器模型为例，具体说明可控避雷器静态电位分布的计算流程。

1) 建立 MOA1、MOA2 和 MOR 的电场数值计算模型，求出等效杂散电容网络。

MOA1、MOA2 和 MOR 的电场数值计算模型如图 2 所示。计算模型由避雷器、大地和人工定义求解区域组成，其中避雷器由电阻片、铝垫块、法兰、瓷套、填充气体等组成；F2、F1 和 F0 分别指顶端、节间和接地法兰(电极)，对大地做了简化； C_{11} 、 C_{22} 分别为 F1、F2 的自电容，其中包括电阻片电容、电阻片与避雷器瓷套间电容、对地杂散电容等^[16-19]； C_{12} 为 F1 和 F2 之间的互电容。

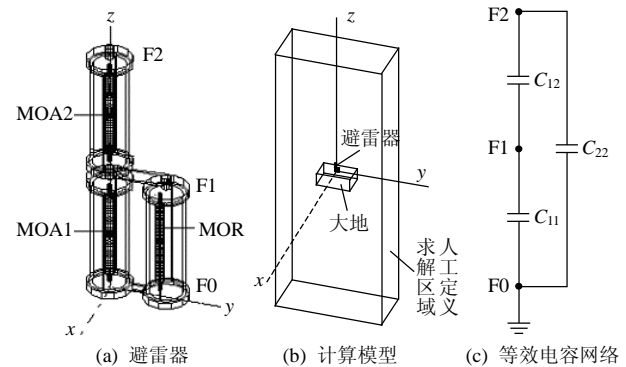


图 2 MOA1、MOA2 和 MOR 的电场数值计算模型和等效电容网络

Fig. 2 Electro-field numerical calculation model and equivalent capacitance network composed of MOA1, MOA2 and MOR

为解决开域场问题，人工定义了一求解区域，该区域尺寸比避雷器模型大，相对于避雷器而言，可认为是一无限开域，在该求解区域内，电位悬浮导体指铝垫块，模型所对应的微分方程和边界条件为

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0, & \text{在所有求解区域内} \\ U|_{F_0} = 0, U|_{F_2} = U_s, & F_0, F_2 \text{为已知电位边界} \\ U_1 = U_2, \varepsilon_1 \frac{\partial U_1}{\partial n} = \varepsilon_2 \frac{\partial U_2}{\partial n}, & \text{在介质分界面上} \\ \oiint_{S_i} \varepsilon \frac{\partial U}{\partial n} dS = 0, U|_{S_i} = U_i, & S_i \text{为电位悬浮导体表面} \end{cases} \quad (1)$$

电容网络所对应的矩阵方程为

$$\begin{cases} Q_1 = C_{11}U_{F1} + C_{12}(U_{F1} - U_{F2}) \\ Q_2 = C_{21}(U_{F2} - U_{F1}) + C_{22}U_{F2} \end{cases} \quad (2)$$

式中： Q_1 和 Q_2 代表各电极所带的电荷量； U_{Fi} 为各电极电位， $C_{21}=C_{12}$ 。

向电场数值计算模型施加假定边界条件，如假设 $U_{F1}=1\text{ kV}$ ， $U_{F2}=2\text{ kV}$ ，利用电场数值计算程序可计算出 C_{11} 、 C_{22} 和 C_{12} 。

2) 通过试验检测和曲线拟合，求出晶闸管 C_T 和 U_T 之间的函数关系。

晶闸管在不同电压 U_T 下的等值电容 C_T 可用西林电桥测得，以 110 kV 可控避雷器模型选用的3英寸晶闸管为例， C_T 随 U_T 的变化规律如表1所示。可以看出， U_T 越大， C_T 越小。

表1 晶闸管电容 C_T 随 U_T 的变化规律
Tab. 1 Variation rule of C_T with U_T

U_T (峰值)/kV	C_T /pF	U_T (峰值)/kV	C_T /pF
1.0	449	4.0	252
2.0	317	5.0	230
3.0	274	—	—

将表1中的数据用曲线拟合的方法，可求出 C_T 和 U_T 之间的函数关系，即

$$C_T = -0.0001U_T^2 - 0.0321U_T + 546 \quad (3)$$

3) 建立可控避雷器的等效电路模型，将 C_T 和 U_T 之间的函数代入电路模型中，通过反复迭代，求得各电极电位 U_{Fi} 与避雷器端电压 U_s 之间的函数。 110 kV 可控避雷器的等效电路模型如图3所示。

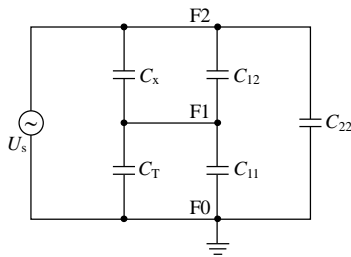


图3 110 kV 可控避雷器的等效电路模型
Fig. 3 Equivalent circuit of 110 kV controlled metal oxide arrester

图3中： C_x 为均压电容； C_k 为反并联晶闸管对的总电容，设单只晶闸管电容为 C_{Ti} ($i=1,2,\dots,n$)， n 为串联的晶闸管个数， C_k 的计算方法参见式(4)。设单只晶闸管电压为 U_{Ti} ($i=1,2,\dots,n$)， U_{F1} 和 U_{Ti} 之间的关系参见式(5)。 C_{Ti} 和 U_{Ti} 之间满足式(3)所示的函数关系。

$$C_k = 1 / \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{2C_{Ti}} \right) \quad (4)$$

$$U_{F1} = \sum_{i=1}^n U_{Ti} \quad (5)$$

将式(3)~(5)代入等效电路模型中，通过反复迭代，可求出不同 U_s 下的 U_{Fi} 值，用曲线拟合的方法可求出 U_{Fi} 与 U_s 之间的函数，即

$$\begin{cases} U_{F2} = U_s \\ U_{F1} = 0.001U_s^{11} - 0.0308U_s^{10} + 0.3386U_s^9 \\ U_{F0} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

4) 将 U_{Fi} 与 U_s 之间的函数关系代入可控避雷器电场数值计算模型中，求出静态电位分布随 U_s 的变化规律。

将式(6)作为边界条件，代入图2所示的电场数值计算模型中，即可求出避雷器在不同电压下的电场分布，利用式(7)和(8)即可计算出每个电阻片 x 所承受的电压 U_{MOVx} 和电压分担率 T_x 。

$$U_{MOVx} = \int_{Z_{x0}}^{Z_{x1}} E(x, y, z) dz, \quad x = 1, 2, \dots, m \quad (7)$$

式中： $E(x, y, z)$ 为求解区域内的电场强度； Z_{x0} 和 Z_{x1} 分别为电阻片 x 沿 z 轴方向的底坐标和顶坐标； m 为串联的电阻片个数。

$$T_x = U_{MOVx} / \left(\sum_{x=1}^m U_{MOVx} / m \right), \quad x = 1, 2, \dots, m \quad (8)$$

以 110 kV 可控避雷器 U_s 分别为 $16, 28, 42, 56$ 和 70 kV 为例，各电压下避雷器静态电位分布随 U_s 变化情况的计算结果如图4所示。

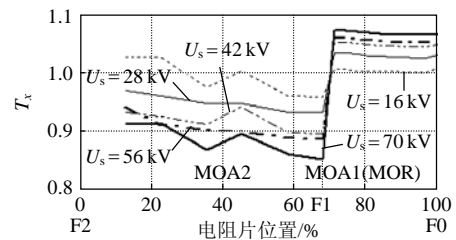


图4 110 kV 可控避雷器静态电位分布计算结果
Fig. 4 Calculation results of voltage distribution for 110 kV controlled metal oxide arrester

由图4可见，可控避雷器的静态电位分布随 U_s 的变化而变化， U_s 越高，MOA1(MOR)和MOA2的电压分担率偏差越大，这是因为 U_s 越高，晶闸管开关的等效电容越小，与开关并联的MOA1分担的电压越高，相应地，MOA2分担的电压越低，两者的电压分担率偏差越大。

3 可控避雷器电位分布计算方法的试验验证

为验证可控避雷器电位分布计算方法的有效

性, 本文设计了模拟试验, 采用光纤-电流法, 利用光纤超/特高压避雷器测量仪测量避雷器静态电位分布。测量仪由光发射机(探头)、光纤和光接收机组成。探头和电阻片串联安装, 避雷器加压后, 泄漏电流从探头内部的采样电阻上流过, 产生一定的压降, 探头将该电压信号转换成光信号后, 经光纤上传到光接收机。光接收机将光信号重新转换成电压信号, 上传到 DF1024 等录波仪上。将电压除以采样电阻值可得泄漏电流值, 各探头的泄漏电流值和泄漏电流均值相比, 即可得该探头处电阻片的电流分担率。由于电阻片在小电流区域可等效为电容, 泄漏电流的有功部分小, 电流大, 电压就大, 电流分担率基本等于电压分担率。

以 110kV 可控避雷器为例, 静态电位分布测试的模拟试验电路如图 5 所示, 电源为工频试验电压源。可控避雷器中共需放置 20 个探头, 其中 MOA1 中放置 4 个, MOA2 中放置 6 个, K 中放置 10 个。\$U_s\$ 分别为 16, 28, 42, 56 和 70kV 时, 可控避雷器静态电位分布测试结果如图 6 所示。

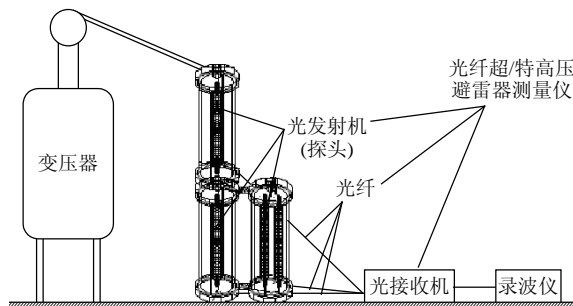


图 5 110kV 可控避雷器静态电位分布试验回路
Fig. 5 Test circuit of 110kV controlled metal oxide arrester for voltage distribution measurement

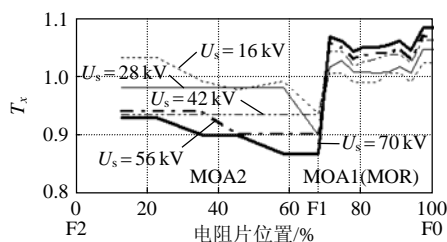


图 6 110kV 可控避雷器静态电位分布试验结果
Fig. 6 Test results of voltage distribution for 110kV controlled metal oxide arrester

比较图 4 和图 6 可以看出, 110kV 可控避雷器静态电位分布的计算结果和试验结果基本一致, 可控避雷器电位分布计算方法的计算精度满足要求。

为进一步验证计算方法的有效性, 本文又在改变可控避雷器安装高度、MOA1 和 K 安装位置等情况下, 对可控避雷器静态电位分布进行了仿真计算

和模拟试验, 计算和试验结果均基本一致。因此, 可控避雷器静态电位分布计算方法用于求解可控避雷器电位分布是有效而准确的。

4 结论

1) 可控避雷器主要由受控元件 MOA1、固定元件 MOA2 和晶闸管开关 K 组成, K 中晶闸管的等效电容 \$C_T\$ 会随端电压 \$U_T\$ 的变化而变化, 可控避雷器静态电位分布计算时应考虑这一特点。

2) 110kV 可控避雷器静态电位分布的仿真计算结果和模拟试验结果基本一致, 表明本文提出的可控避雷器静态电位分布计算方法是有效的。

参考文献

- [1] 吴维韩, 何金良, 高玉明. 金属氧化物非线性电阻特性和应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998: 194-222.
Wu Weihang, He Jinliang, Gao Yuming. Nonlinear resistor characteristics of metal oxide and its applications[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1998: 194-222 (in Chinese).
- [2] 韩社教, 戴栋, 马西奎, 等. 应用有限元法计算氧化锌避雷器的电位分布[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(12): 105-108, 114.
Han Shejiao, Dai Dong, Ma Xikui, et al. Calculation of potential distribution for zinc-oxide surge arrester by finite element method[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(12): 105-108, 114 (in Chinese).
- [3] Csendes Z J, Hamann J R. Surge arrester voltage distribution analysis by the finite element method[J]. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, 1981, 100(4): 1806-1813.
- [4] Oyama M, Ohshima I, Honda M, et al. Analytical and experimental approach to the voltage distribution on gapless zinc-oxide surge arresters[J]. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, 1981, 100(4): 4621-4627.
- [5] Han S J, Zou J, Gu S Q, et al. Calculation of the potential distribution of high voltage metal oxide arrester by using an improved semi-analytic finite element method[J]. IEEE Trans. on Magnetics, 2005, 41(5): 1392-1395.
- [6] Haddad A, Naylor P. Finite-element computation of capacitance networks in multiple-electrode systems: application to ZnO surge arresters[J]. IEE Proceedings: Science, Measurement and Technology, 1998, 145(4): 129-135.
- [7] 王世山, 李彦明, 李建成. 金属氧化物避雷器均压电容器的选择计算[J]. 电瓷避雷器, 2002(6): 33-38.
Wang Shishan, Li Yanming, Li Jiancheng. Selection and calculation of equalizing capacitance for metal oxide arrester[J]. Insulators and Surge Arresters, 2002(6): 33-38(in Chinese).
- [8] He Jinliang, Zeng Rong, Chen Shuiming, et al. Potential distribution analysis of suspended-type metal-oxide surge arresters[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2003, 18(4): 1214-1220.
- [9] 王世山, 李彦明. 500kV 无间隙 MOA 电位分布分析及其均压化措施[J]. 电瓷避雷器, 2004(4): 30-36.
Wang Shishan, Li Yanming. Analysis on electric stress along 500kV gapless MOA and its evening measurement[J]. Insulators and Surge Arresters, 2004(4): 30-36(in Chinese).
- [10] 赵子玉, 邹积岩, 李学思, 等. 500kV 线路 ZnO 避雷器静态电位

- 分布计算与试验分析[J]. 高电压技术, 1999, 25(1): 84-87.
- Zhao Ziyu, Zou Jiyan, Li Xuesi, et al. Electric field and potential distribution calculation of ZnO surge arrester on 500 kV transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 1999, 25(1): 84-87(in Chinese).
- [11] 陈秀娟, 陈维江, 沈海滨, 等. 特高压输电系统操作过电压柔性限制方法[J]. 高电压技术, 2007, 33(11): 1-5.
- Chen Xiujuan, Chen Weijiang, Shen Haibin, et al. Flexible measures to depress switching overvoltage in UHV transmission system[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(11): 1-5(in Chinese).
- [12] 韩社教, 谷山强, 何金良, 等. 冲击电压下 $\pm 500\text{kV}$ 直流线路分压器电位分布数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(12): 139-143.
- Han Shejiao, Gu Shanqiang, He Jinliang, et al. Numerical simulation of voltage distribution of a $\pm 500\text{kV}$ DC power transmission line divider subjected to an impulse voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(12): 139-143(in Chinese).
- [13] He J L, Gu S Q, Zhang B, et al. Analysis and improvement of potential distribution of 1000-kV metal oxide arrester by combining 3D FEM and circuit analysis method[C]. The 12th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC 2006), Miami, Florida, 2006.
- [14] 林辉, 王辉. 电力电子技术[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2002: 3.
- Lin Hui, Wang Hui. Power electronic technology[M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2002: 3(in Chinese).
- [15] 朱庆学. 半导体器件基础和电子电路基础[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1992: 7.
- Zhu Qingxue. Fundamentals of semiconductor devices and electronic circuit[M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 1992: 7(in Chinese).
- [16] 盛剑霓, 倪光正, 钱秀英, 等. 电磁场数值分析[M]. 北京: 科学出版社, 1984: 1.
- Sheng Jianni, Ni Guangzheng, Qian Xiuying, et al. Numerical analysis of electromagnetic[M]. Beijing: Science Press, 1984: 1(in Chinese).
- [17] 冯慈章. 电磁场[M]. 北京: 高等教育出版社, 1979: 1.
- Feng Cizhang. Electromagnetic field[M]. Beijing: Higher Education Press, 1979: 1(in Chinese).
- [18] 崔翔. 应用有限元方法计算含有电位悬浮导体的电场分布[J]. 华北电力学院学报, 1995, 22(2): 1-7.
- Cui Xiang. Calculation of potential distribution for a system with floating electrodes by finite element method[J]. Journal of North China Institute of Electric Power, 1995, 22(2): 1-7(in Chinese).
- [19] 张国强, 张元录, 崔翔. 高压套管均压球电极形状优化的研究[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(11): 37-40.
- Zhang Guoqiang, Zhang Yuanlu, Cui Xiang. Optimal design of the shielding of high voltage bushing[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(11): 37-40(in Chinese).



陈秀娟

收稿日期: 2010-02-23。

作者简介:

陈秀娟(1975), 女, 博士, 研究方向为电力系统过电压与绝缘配合和避雷器等, xjchen@epri.sgcc.com.cn;

陈维江(1958), 男, 教授级高级工程师, 博士生导师, 研究方向为电力系统过电压保护、绝缘配合和电磁环境等。

(责任编辑 马晓华)