

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.03.022

500 kV 辐向分裂变压器关键绝缘结构优化分析

赵勇进, 谢庆峰, 张良县

(西安西电变压器有限责任公司, 西安 710077)

摘要: 分裂变压器能够有效地限制低压侧的短路电流, 所以发电厂启备变大多采用低压分裂式变压器。为了保证 500 kV 辐向分裂变压器绝缘结构的可靠性设计, 笔者采用有限元方法对该变压器的高压线圈端部绝缘、高压出线装置的电场分布进行计算分析, 并对关键部位结构进行优化, 将高压线圈上端的静电环改为复合静电环结构, 改进了高压出线弹簧压紧装置上边缘棱角屏蔽结构, 使得辐向分裂变压器主绝缘结构满足绝缘裕度要求。研究结果可为其运行可靠性分析提供理论依据, 并对 500 kV 以上电压等级分裂变压器的绝缘结构设计提供参考。

关键词: 变压器; 绝缘结构; 辐向分裂; 结构优化

Optimization and Analysis on the Key Insulation Structure of 500 kV Radial Split Transformer

ZHAO Yongjin, XIE Qingfeng, ZHANG Liangxian

(Xi'an XD Transformer Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

Abstract: The split transformer can limit the short circuit current at LV side efficiently, so this LV split type transformer is widely applied to starting-up standby transformer in power station. In order to ensure the reliability of the insulation structure in 500 kV radial split transformer, FEM is used to analyze the electric field distribution of end insulation in HV winding, lead insulation and outlets insulation of HV winding. The insulation structure optimization of key parts in transformer is done. The static ring structure of the high voltage winding is changed to composite insulation structure, and the shielding structure on the edge of the spring-loaded device corners of HV lead insulation is improved. All these measures make the main insulation structure of split transformer meet the margin requirements. The results in this paper can provide a theoretical basis for operational reliability analysis, and provide references for the insulation design of split transformer above 500 kV voltage level.

Key words: transformer; insulation structure; radial split; structural optimization

0 引言

目前, 在中国 500 kV 线路已成为骨干网架, 500 kV 分裂变压器可以实现直接从 500 kV 线路取电供发电厂使用。500 kV 分裂变压器与同容量的双绕组变压器相比, 由于其低压分裂绕组间具有较大的分裂阻抗, 可有效降低发电厂厂用电系统的短路电流和短路容量, 因此在火力发电厂的设计技术规程中规定, 200~600 MW 机组的高压厂用工作电源必须采用分裂变压器。虽然分裂变压器容量不大, 但运行位

置十分重要, 任何一次事故不但会影响发电机的正常出力, 还会影响整个电厂设备的正常供电, 因此在设计时要求分裂变压器具有较高的电气强度和机械强度^[1-3]。

分裂变压器按绕组分裂方式的不同可以分为轴向分裂变压器与辐向分裂变压器两种。与轴向分裂变压器相比, 辐向分裂变压器由于其各绕组的高度基本一致, 可以避免单一分裂绕组发生短路时出现的磁势不平衡现象, 提高整个变压器绕组的抗短路能力, 有利于变压器的安全可靠运行, 因此在发电厂用高厂变及启备变设计时采用辐向分裂变压器已成

收稿日期: 2015-10-19; 修回日期: 2015-11-21

为流行趋势^[4-6]。要完成 500 kV 辐向分裂变压器的研制,其难点在于高压绕组端部及出线绝缘结构设计,该结构设计的优劣不仅决定了分裂变压器的可靠性及经济性,而且在一定条件下直接决定了设计方案可行性。

笔者采用经过二次开发的有限元电磁场仿真计算软件^[7-9],对 500 kV 辐向分裂变压器的高压绕组端部及出线绝缘结构进行优化分析,为其运行的可靠性分析提供理论依据,并为更高电压等级分裂变压器绝缘结构的开发提供参考。

1 500 kV 辐向分裂变压器的整体绝缘布置

500 kV 分裂变压器的主要参见表 1。该变压器采用辐向分裂,为满足两个低压线圈对高压线圈的半穿越阻抗相同或接近,线圈排列从铁心柱向外排列依次为:平衡线圈—低压线圈 I—调压线圈—高压线圈—低压线圈 II,各线圈均从端部出线。各线圈的绝缘水平见表 2。

表 1 500 kV 分裂变压器的主要参数

Table 1 The main parameters of 500 kV split transformer

参数	数值
额定容量/MVA	63/35-35
相数	3
频率/Hz	50
冷却方式	ONAN/ONAF
安装位置	户外式
连接组	YN,yn0-yn0,(+d)
高压额定电压/kV	(525±8)×1.25%
低压额定电压/kV	6.3
半穿越阻抗/%	12

表 2 各线圈绝缘水平

Table 2 The insulation level of each coil kV

线圈及端子	雷电冲击全波/截波	1 min 工频
高压线圈线路端子	1 550/1 675	680
高压线圈中性点端子	200/220	85
低压线圈线路端子	60/-	25
低压线圈中性点端子	60/-	25
平衡线圈线路端子	60/-	25

变压器油在工频电压下的耐受值随着受应力油容积(或油隙宽度)的增加会呈指数规律下降。文[10-11]中通过对试验数据进行处理得到了适用于变压器绝缘设计的许用场强曲线,这就是著名的魏德曼曲线,具体形式见图 1,该曲线现已被各大变压器制造单位普遍采用。为了提高变压器油的耐压强度,在实际油浸电力变压器中可采用绝缘纸筒和撑条相结合的结构对绕组间的油隙进行分割和角环对绕组

的端部的油隙进行分割,形成普通交流电力变压器主绝缘结构的基本形式,即薄纸筒小油隙结构^[12]。

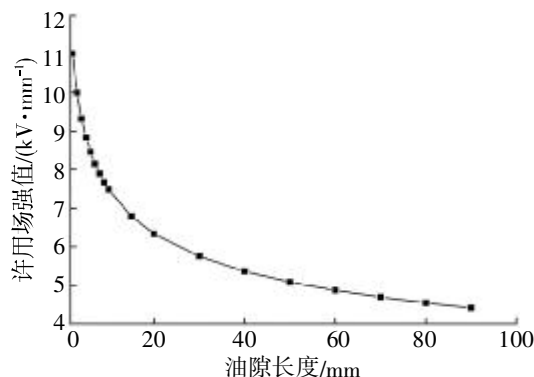


图 1 魏德曼曲线

Fig. 1 The Weidmann curves

依据该理论,并考虑到该变压器绝缘水平及阻抗要求,初步设计的 500 kV 辐向分裂变压器的主绝缘结构见图 2。图 2 中最关键的是高压绕组端部及出线绝缘结构的设计,在文中的后续章节中将对这两个关键绝缘结构进行优化分析。

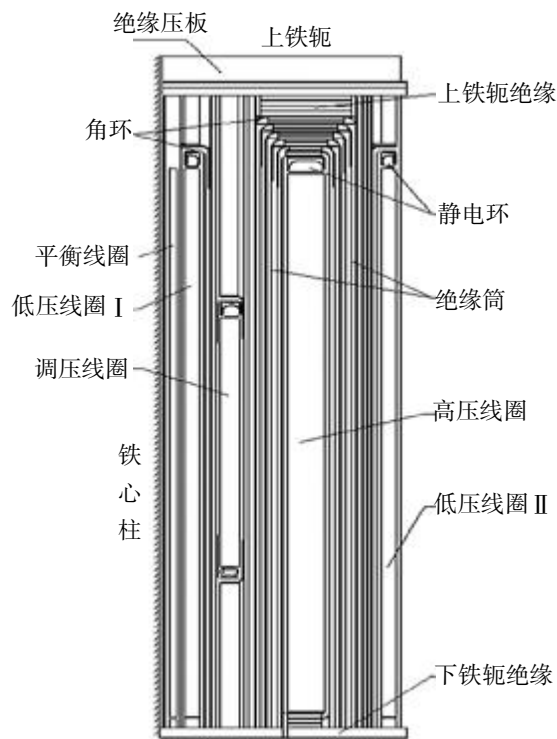


图 2 500 kV 辐向分裂变压器的主绝缘结构示意图

Fig. 2 The main insulation structure diagram of 500 kV split transformer

2 高压线圈端部绝缘结构优化分析

变压器线圈端部电场为不均匀电场,在设计端部绝缘结构时不仅需要考虑铁轭对线圈端部的影响,还要考虑相邻线圈端部间的相互影响。传统的变压器主绝缘可靠性评价方法为解析法,该方法将主

绝缘中的纸板厚度按电容率的反比折合成等效宽度的油隙,这样可以得到主绝缘系统中的等值油隙,进而可计算得到高低压电极间的平均场强值,其值再与油隙的许用值场强曲线相比得到其的安全裕度。这种方法只适用于结构简单且电场分布较均匀的主绝缘结构,如高低压绕组间油隙的绝缘裕度分析。对于像绕组端部这类结构复杂、电场分布极不均匀的绝缘结构,已不再适用解析法,需要采用基于数值计算的可靠性分析方法^[13-14]。

文中采用基于有限元数值分析方法对高压线圈的端部绝缘结构进行电场分析,并对线圈端部的最大场强值及油隙的绝缘裕度进行校核,在分析时以工频耐压试验为模拟工况,即高压线圈首端加压,低压线圈首末端接地,铁心、油箱处设为零电位^[15]。由于纸板在长度、宽度上的尺寸较大,而在厚度方向上的尺寸较小,因此对纸板的剖分是一个难点。为了保证其网格的质量,在剖分时选用四边形网格单元进行剖分。剖分时先对纸板在厚度方向上的轮廓线进行分段,再采用映射方法进行网格剖分,这样生成的层压板网格整齐规一,与周围区域的过渡性也很好,这样能保证计算结果的正确性。计算得到的 500 kV 辐向分裂变压器高压线圈端部电场分布云图见图 3,其中静电板倒角半径为 15 mm。从图 3 中可看出,高压线圈端部场强最大值位于线圈上端静电环外侧的电极表面绝缘纸中,最大场强值为 7.869 kV/mm,其值远小于油浸绝缘纸的许用值(20 kV/mm),满足安全运行要求。除了要对绝缘纸的可靠性校核之外,还要对静电环表面的第 1 个油隙的绝缘裕度进行分析,计算结果表明,第 1 个油隙中场强最大值为 7.628 kV/mm,大于其许用值 7.48 kV/mm,因此需要对端部结构进行优化,提高其绝缘裕度。参考以往电力变压器的设计经验,采用复合静电环(即在静电环电场集中的电极表面增加一层厚的绝缘覆盖)来代替原先的普通静电环,可以有效降低静电环表面油隙中的场强,提高油隙的绝缘裕度。将高压线圈上端的普通静电环都改为复合静电环后的电场分布云图见图 4。从图 4 中可以看出:采用复合静电环后,第 1 个油隙中场强最大值下降至 7.017 kV/mm,小于其许用值,满足了变压器可靠性设计要求。

3 高压出线结构研究

高压出线结构位于变压器内高压绕组引线与高压套管相接的部位,其作用是保证高压引线与线圈端部、铁心夹件、油箱、高压升高座等部件组具有良好的电气绝缘性能。高压出线结构是变压器内部最

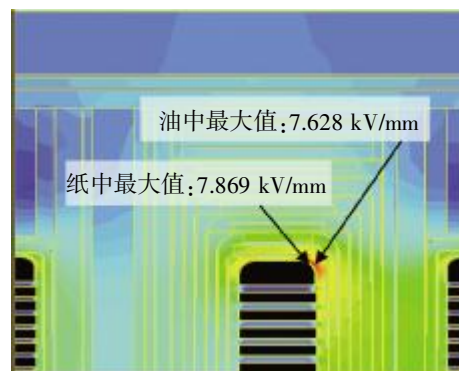


图 3 高压线圈端部电场分布云图

Fig. 3 The electric field of high voltage coil ends

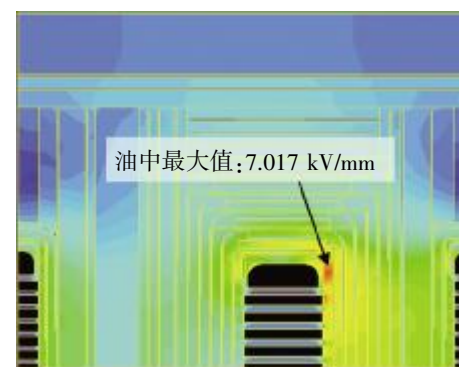


图 4 采用复合静电环后高压线圈端部电场分布云图

Fig. 4 The electric field of high voltage coil ends with composite static ring

复杂,同时也是最重要的绝缘结构之一^[16-18]。由于文中所研究的 500 kV 辐向变压器容量较小,线圈端部空间狭小,高压引线到夹件的绝缘距离较短,在设计时要同时考虑高压出线与线圈端部结构、套管尾部结构、夹件和压钉的配合。

3.1 高压出线与线圈端部结构的配合

在设计高压出线结构时要考虑其与线圈端部配合,重点要分析高压出线与绕组端部静电环的配合以及静电环表面覆盖与线圈端部异型角环的配合。文中在设计 500 kV 辐向分裂变压器的端部结构时,参考了 500 kV 普通电力变压器绝缘成型件布置及油隙分割方案,高压线圈端部角环与出线装置均压管表面的成型件进行相互对插配合,以此来保证对接处的爬电距离满足设计要求。

该变压器高压线圈端部出线部位电场分布云图见图 5。从图 5 中可以看出,模型中的场强最大值位于在低压线圈 II 上端第 1 个线饼内侧,这是由于高压引线均压管在穿出压圈压板的部位后开始向低压线圈 II 弯曲,使这两者之间的绝缘距离变小,在低压线圈 II 上端的静电环位置处形成电场集中。该场强最大值为 8.228 kV/mm,处于绝缘纸中,低于绝缘纸的许用值;同时,静电环内表面油中场强最大值为 7.218 kV/mm,该油隙沿最大场强处电力线的平均场

强为 7.172 kV/mm, 而该处的平均电场许用值为 8.057 kV/mm, 安全裕度为 1.123。综上所述, 该结构满足设计要求的绝缘裕度。

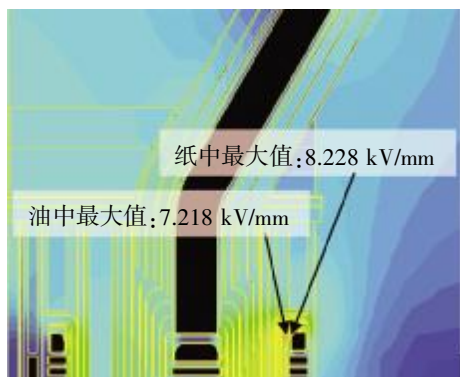


图5 高压出线部位电场分布云图

Fig. 5 The electric field of high voltage outlets insulation structure

3.2 高压出线与套管尾部结构的配合

在设计高压出线与套管尾部配合时需要考虑均压管与套管均压球的配合、均压管与穿过箱盖部分的配合、套管与高压升高座桶壁的配合等^[19]。在计算时, 为使得计算结果更加接近工程实际, 对套管中的电容心子进行了简化处理, 既将首屏下端和末屏下端之间的连线等效为电容屏轮廓, 并考虑为一个电位连续线性变化的直线段, 这样就可以确定整个模型电位分布, 这种近似方法可以大大减少模型的工作量。经实际计算比较, 这种近似后的计算结果与实际将每一层电容屏的具体形状、位置逐一确定后再进行计算的结果上没有太大的差别, 该方法满足工程计算分析的要求。在实际结构中, 套管的均压球外表面涂了一层防电晕漆, 升高座内表面的底漆也具有绝缘性能, 但由于这些涂层的厚度均非常薄, 远小于 1 mm, 对电场的分布影响很小, 所以在电场计算中不考虑涂层的作用。高压出线与套管配合处电场分布云图见图 6, 其中屏蔽环上端倒角半径为内侧 5 mm, 外侧 15 mm。从图 6 中可以看出, 该部位的场强最大值为 5.898 kV/mm, 位于均压球表面第 1 个油隙上端, 该部位油隙为 6~8 mm, 电场许用值为 7.89 kV/mm, 因此, 该部位的绝缘裕度满足设计要求。

3.3 高压出线与与夹件、压钉的配合

为提高辐向分裂变压器的抗短路能力, 需采用弹簧压紧装置对器身进行压紧。弹簧压紧装置不受绝缘收缩的影响, 可为器身提供持续的压紧力。由于该变压器容量较小, 线圈端部空间狭小, 高压引出线均压管与铁心夹件及夹件上的压钉等区域绝缘间距较小, 需要对出线与夹件、压钉的配合进行

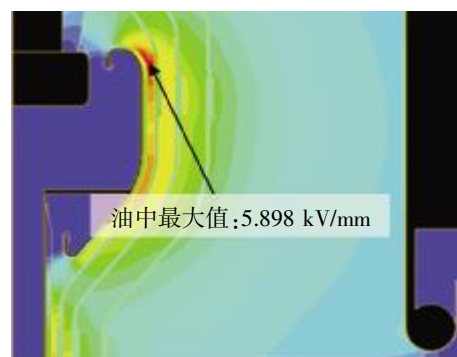


图6 高压出线与套管配合处电场分布云图

Fig. 6 The electric field of joint between high voltage outlets and bushing

分析和优化。文中根据出线装置、升高座屏蔽环、压钉的尺寸建立模型, 并对该模型进行电场分析, 计算得到的电场分布见图 7, 其中压钉下端倒角半径为 15 mm。从图 7 中可看出, 绝缘纸与油界面的最大值为 4.245 kV/mm, 小于许用值, 满足设计要求的绝缘裕度; 但是压钉表面裸金属与油界面的场强最大值达到 2.37 kV/mm, 超过了裸金属表面许用值 2 kV/mm, 因此需要对此处的结构进行优化。

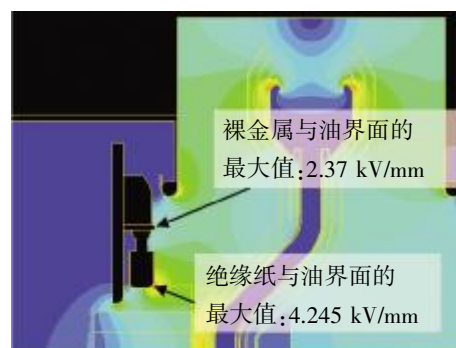


图7 弹簧压紧装置处的电场云图

Fig. 7 The electric field of spring-loaded device

由于弹簧压紧装置的上边缘处的曲率半径很小, 且该处又无法安装绝缘护套, 为改善弹簧压紧装置的上边缘处的电场分布, 预防局部放电, 在弹簧压紧装置外部设置 3 道均压环, 均压环的半径为 5 mm, 均压环表面用绝缘皱纸进行覆盖。采取该屏蔽措施后, 模型的电场分布计算结果见图 8。从图 8 中可以看出, 采取该屏蔽措施后, 压钉表面裸金属与油界面的场强最大值降到了 0.200 kV/mm, 远小于 2 kV/mm, 满足控制要求。

4 结论

笔者采用经过二次开发的有限元电磁场仿真计算软件, 对一台 500 kV 辐向分裂变压器高压绕组端部及出线绝缘结构优化分析, 得出以下结论:

1) 对相邻线圈的端部绝缘结构进行了电场分析,

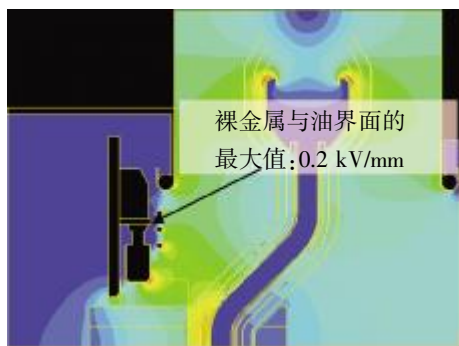


图 8 增加屏蔽后弹簧压紧装置处的电场云图

Fig. 8 The electric field of spring-loaded device with shielding structure

并对相邻线圈端部的最大电场及电场集中处油隙的绝缘裕度进行了校核。通过将高压线圈上端的静电环由普通静电环改为复合静电环结构,使得高压线圈端部场强最大值下降,从而满足线圈端部静电环表面油隙的绝缘裕度要求。

2)在分析高压出线与套管尾部结构的配合时,为使得计算结果更加接近工程实际,可以对套管中的电容心子进行了简化处理,既将首屏下端和末屏下端之间的连线等效为电容屏轮廓,并考虑为一个电位连续线性变化的直线段,这样就可以确定整个模型电位分布,这种近似方法可以大大减少计算模型的工作量。

3)为改善弹簧压紧装置的上边缘处的电场分布,预防局部放电,在弹簧压紧装置外部设置3道均压环,可以屏蔽弹簧压紧装置的上边缘棱角的电场,使其满足绝缘裕度控制要求。

参考文献:

- [1] KUMBHAR G, KULKARNI S. Analysis of short-circuit performance of split-winding transformer using coupled field-circuit approach[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(2): 936-943.
- [2] 徐曙光, 周广宇, 苏宝国. 轴向双分裂变压器的电场计算和漏磁计算[J]. 变压器, 2010, 47(6): 5-9.
XU Shuguang, ZHOU Guangyu, SU Baoguo. The electric field and magnetic flux leakage calculation of axial double split transformer[J]. Transformer, 2010, 47(6): 5-9.
- [3] 赵鲁, 李耀华, 葛琼璇, 等. 单相整流变压器场路耦合分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(s1): 223-229.
ZHAO Lu, LI Yaohua, GE Qiongjuan, et al. Analysis of single-phase rectifier transformer field-circuit coupled[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(s1): 223-229.
- [4] 王世荣. 分裂变压器的特点及运行[J]. 四川电力技术, 2001, 28(6): 53-55.
WONG Shirong. Features and operation of split transformer[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2001, 28(6): 53-55.
- [5] 田小静, 李金辉. 厂用分裂变压器的特点及设计注意事项[J]. 电气制造, 2012, 28(3): 55-58.
TIAN Xiaojing, LI Jinhui. Features and design considerations of split transformer using in plant[J]. Electrical Manufacturing, 2012, 28(3): 55-58.
- [6] YUN Q T, JING Q Q, ZI H X. Numerical calculation of short circuit electromagnetic forces on the transformer winding [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1990, 26(2): 1039-1041.
- [7] 张波, 盛和太. ANSYS 有限元数值分析原理与工程应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
ZHANG Bo, SHENG Hetai. ANSYS finite element numerical analysis principle and engineering application[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.
- [8] 伊飞鸿. 有限元基本原理及应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.
YI Feihong. Basic principle and application of finite element[M]. Beijing: Higher Education Press, 2010.
- [9] 龚曙光. ANSYS 基础应用及范例解析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
GONG Shuguang. ANSYS based applications and examples[M]. Beijing: China Machine Press, 2003.
- [10] 尹克宁. 变压器设计原理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
YIN Kening. Transformer design principles[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2003.
- [11] 谢毓城. 电力变压器手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [12] 路长柏. 电力变压器理论与计算[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2007.
- [13] KULKARNI S V, KHAPARDE S. Transformer engineering: design and practice[M]. New York: CRC Press, 2004.
- [14] 韩晓东, 翟亚东. 高压直流输电用换流变压器[J]. 高压电器, 2002, 38(3): 5-6.
HAN Xiaodong, ZHAI Yadong. Converter transformer used for hvdc transmission[J]. High Voltage Apparatus, 2002, 38(3): 5-6.
- [15] 胡启凡. 变压器试验技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [16] 宓传龙, 谢庆峰, 孟丽坤. 超、特高压交流变压器出线绝缘结构的设计和应用[J]. 高电压技术, 2010, 36(1): 122-128.
MI Chuanlong, XIE Qingfeng, MENG Likun. Design and application of outlets insulation structure for EHV and uhv ac transformers[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(1): 122-128.
- [17] 蒋蓁. 换流变压器出线装置的绝缘结构分析[J]. 高压电器, 2011, 47(3): 69-71.
JIANG Zhen. Analysis on insulation structure of barrier system of converter transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(3): 69-71.

(下转第 146 页)

- [5] JEC 207—1979 架空送电用架线金具[S].1979.
JEC 207—1979 Hardware of overhead transmission lines[S].1979.
- [6] 陈维江,孙昭英,王献丽. 35 kV 架空送电线路防雷用并联间隙研究[J]. 电网技术,2007,31(2):61-65.
CHEN Weijiang,SUN Zhaoying,WANG Xianli. Study on shunt gap lightning protection for 35 kV overhead transmission lines [J]. Power System Technology,2007,31(2): 61-65.
- [7] 孙渭清,陈龙元. 招弧角设计介绍[J]. 电力金具,1991(1):1-5.
SUN Weiqing,CHEN Longyuan. Introduction of the design of the arcing horn [J]. Journal of electric power fittings, 1991(1):1-5.
- [8] 程应镗. 招弧角的尺寸和间隙[J]. 电力金具,1993(1):2-5.
CHENG Yingtang. Size and gap of the arcing horn [J]. Journal of Electric Power Fittings,1993(1):2-5.
- [9] 谢广润. 电力系统过电压[M]. 北京: 水利电力出版社, 1983.
- [10] 宋云东,苑舜,赵春芳. 配电网同杆并架线路接地故障中性点电压计算分析[J]. 高压电器,2009,45(3):40-43.
SONG Yundong,YUAN Shun,ZHAO Chunfang. Calculation and analysis on ground-fault neutral point voltage of distribution lines on same pole in distribution network[J]. High Voltage Apparatus,2009,45(3):40-43.
- [11] 高新智,仇炜,韩爱芝,等. 针对某 35 kV 配电线路防雷问题的探讨[J]. 高压电器,2010,46(4):69-73.
GAO Xinzhi,QIU Wei,HAN Aizhi,et al. Study on the Lightning Protection Problem of 35 kV Transmission and Distribution Line[J]. High Voltage Apparatus,2010,46(4): 69-73.
- [12] 李庆玲,程济兵,王晓燕,等. 输电线路氧化锌避雷器应用研究[J]. 高压电器,2010,46(4):77-80.
LI Qingling,CHENG Jibin,WANG Xiaoyan,et al. The research of MOA application in transmission line [J]. High Voltage Apparatus,2010,46(4):77-80.
- [13] 耿翠英,陈守聚,刘莘昱,等. 降雨对空气间隙工频闪络电压影响的试验研究[J]. 高压电器 2009,45(1): 36-39.
GENG Cuiying,CHEN Shouju,LIU Xinyu,et al. Experimental study of the raining effect on frequency breakdown voltage of air-gap[J]. High Voltage Apparatus,2009,45(1):36-39.
- [14] 陈维贤. 电网过电压教程[M]. 北京: 中国电力出版社, 1995.
- [15] 潘如政,孙广生,严萍,等. 沿面闪络开关研究进展[J]. 高压电器,2009,45(4):111-114.
PAN Ruzheng,SUN Guangsheng,YAN Ping,et al. Progress in the research of surface flashover switch [J]. High Voltage Apparatus,2009,45(4):111-114.
- [16] 黄清社,徐奔,彭利强,等. 10 kV 架空绝缘导线防雷保护的措施研究[J]. 高压电器,2010,46(12): 32-35.
HUANG Qingshe,XU Ben,PENG Liqiang,et al. Research on lightning protection of 10 kV overhead insulated distribution lines[J]. High Voltage Apparatus,2010,46(12):32-35.
- [17] 白庆,王大兴,祝嘉喜. 35 kV 线路避雷器在电网中的防雷应用[J]. 电瓷避雷器,2012(1):82-85.
BAI Qing,WANG Daxing,ZHU Jiaxi. Lightning protection applications of the 35 kV line surge arrester in the power system[J]. Insulators and Surge Arresters,2012(1):82-85.
- [18] 陈云林,葛维标,闫文奕. 配电线路防雷措施研究及新型线路避雷器的运用[J]. 电瓷避雷器,2012(6):76-80.
CHEN Yunlin,GE Weibiao,YAN Wenyi. The research of distribution line lightning protection measures and the application of new line arrester[J]. Insulators and Surge Arresters,2012(6):76-80.
- [19] 赵紫辉,吴广宁,曹晓斌. 计及冲击电晕的输电线路雷电过电压影响因素研究[J]. 电瓷避雷器,2013(2):109-118.
ZHAO Zihui,WU Guangning,CAO Xiaobin. Influence factors research on lightning overvoltage of transmission lines considering the effect of impulse corona[J]. Insulators and Surge Arresters,2013(2):109-118.
- [20] 曹斌,韩磊,白全新. 一种新型防雷配电变压器的研究[J]. 变压器,2013,50(2):10-12.
CAO Bin,HAN Lei,BAI Quanxin. Research on new lightning protection distribution transformer [J]. Transformer, 2013,50(2):10-12.
- 林盛强(1985—),男,硕士研究生,工程师,主要从事电力系统过电压保护及电气设备试验工作。

(上接第 141 页)

- [18] 张启民,张良县,陈模生.特高压换流变压器阀侧出线装置直流电场计算与分析[J]. 高压电器,2014,50(9): 66-70.
ZHANG Qimin,ZHANG Liangxian,CHEN Mosheng.The DC electric field analysis and analysis of valve side outlet device in UHV converter transformer [J]. High Voltage Apparatus,2014,50(9):66-70.
- [19] 王仲奕,童军心,赵彦珍.高压交直流电容式套管内部电场的分析比较及改进[J]. 高压电器,2003,39(3):9-12.
WANG Zhongyi,TONG Junxin,ZHAO Yanzhen. The internal electric field comparison analysis and improvement of AC/DC high voltage condenser bushing[J]. High Voltage Apparatus,2003,39(3):9-12.
- 赵勇进(1978—),男,工程师,主要从事变压器设计研发工作。