

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.01.019

40.5 kV穿墙套管电场分析及屏蔽优化

韩筛根¹, 曹彬², 黄强³, 马宗雄⁴

(1. 中国电力科学研究院, 北京 海淀 100192; 2. 华鹏变压器有限公司, 江苏 溧阳 213300;

3. 北京慧智神光科技有限公司, 北京 100142; 4. 厦门华电开关有限公司, 福建 厦门 361006)

摘要:文中针对40.5 kV开关柜母线穿墙套管容易发生局部老化导致绝缘能力不足的问题,采用Ansys Workbench软件对穿墙套管进行电场分析查找电场集中位置,提出使用单个地电位屏蔽环或高电位和地电位屏蔽环组合方式解决穿墙套管局部电场集中问题的方法,分析了高、地电位屏蔽环的尺寸以及尺寸变化对穿墙套管电场分布的影响,计算了各个情况下的空气域最大电场值并绘制出曲线,并通过对大量的仿真验证和数据筛选,选择了 $a=7\text{mm}$, $b=15\text{mm}$, $c=27.6\text{mm}$, $d=17\text{mm}$, $e=25\text{mm}$,在工频耐压下,穿墙套管周围空气域电场场强为 $E=2.61\times 10^6\text{ V/m}$ 。设计出成本较低、电场较好的较为优化的带高、地电位屏蔽的穿墙套管,有效的改善穿墙套管周围的电场分布,提升了穿墙套管的绝缘水平,有效解决了开关柜母线绝缘套管局部绝缘能力不足的问题,提高了设备运行可靠性。

关键词:穿墙套管;屏蔽;电场仿真;优化设计;Ansys Workbench

Electric Field Analysis and Shielding Optimization of 40.5 kV Wall Bushing

HAN Shaigen¹, CAO Bin², HUANG Qiang³, MA Zongxiong⁴

(1. Chinese Electric Power Research Institute, Haidian Beijing 100192, China; 2. JSHP, Transformer, Jiangsu Liyang 213300, China; 3. Wisest Power, Beijing 100142, China; 4. HuaTech, Fujian Xiamen 361006, China)

Abstract: This paper is aimed at the problem that the busbar bushing of 40.5 kV switchgear is prone to local aging, the Ansys Workbench software is used to analyze the electric field of the wall bushing and find the concentrated position of the electric field. The method of using a single potential shield loop or high potential and ground potential shield ring combination to solve the local electric field concentration problem of the wall bushing is proposed in this paper. Also the effects of the size and size of the shield ring on the electric field distribution of the wall bushing are analyzed. In this paper, $b=15\text{ mm}$, $c=27.6\text{ mm}$, $d=17\text{ mm}$, $e=25\text{ mm}$, and the maximum electric field value of the air field in each case is calculated and the curve is plotted. Through a lot of simulation verification and data screening, under the power frequency withstand voltage, the field strength of the air around the casing wall is $E=2.61\times 10^6\text{ V/m}$. The design of the lower cost, the electric field is better optimized with high, ground potential shielding of the wall bushing, effectively improve the wall around the casing wall electric field distribution, improve the insulation level of the wall bushing, effectively solve the problem of insufficient insulation capability of the busbar insulation sleeve of switchgear, and improve the reliability of equipment operation.

Key words: wall bushing; shielding ring; electric field simulation; optimization design; Ansys Workbench

0 引言

交流金属封闭开关设备和控制设备(alternating-current metal-enclosed switchgear and controlgear for rated voltages)简称开关柜,在电力系统中承担着受

电、馈电及保护的作用。其性能的好坏对电网的安全生产和可靠运行起着决定性作用。但40.5 kV的穿墙套管常因绝缘材料老化、局放增大而造成绝缘下降及各种放电现象产生绝缘故障^[1-3]。

为了保障40.5 kV开关柜安全稳定运行,主要的解决途径是通过屏蔽的方式。但对于屏蔽环的数量、安装

位置、尺寸设计等没有较为安全可靠且经济的参考^[4,20]。

文中以穿墙套管为研究对象,以空气域电场不大于最大耐击穿场强为标准,采用单个地电位屏蔽环或高电位和地电位屏蔽环组合的方案解决穿墙套管局部电场集中的问题,利用 Ansys Workbench 软件对穿墙套管各种方案进行电场分析,最终确定高、地电位屏蔽环组合的方案来改善穿墙套管周围空气域的电场分布。深入分析了各个尺寸的屏蔽环对穿墙套管周围空气域的影响,并对不同尺寸的屏蔽环电场进行仿真分析,优化了传统的带屏蔽环的穿墙套管设计结构,使其电场分布更加均匀,通过大量的仿真分析和数据的筛选,选取出一个最优的带高、地电位屏蔽结构的穿墙套管设计尺寸,为穿墙套管设计提供了参考。

1 40.5 kV 穿墙套管模型介绍

穿墙套管最优化时的完整模型见图 1。包括穿墙套管本体、安装板、母线导体、高电位屏蔽环、地电位屏蔽环。穿墙套管内部和外部均填充空气。母线导体施加峰值工频电压,即 $95 \text{ kV} \times \sqrt{2} = 134.33 \text{ kV} = 1.34 \times 10^5 \text{ V}$ (文中电压单位为 V)。穿墙套管采用环氧树脂材料,最大击穿场强为 30 MV/m ,为空气域的 10 倍。静电场分析时,电位集中在导体表面,故在仿真分析时,只需将导体表面保留,实体部分删除,简化仿真模型。文中是以穿墙套管的对称轴将三维模型一分为二,取其中 1 个三维模型进行分析。以该剖视图为正视图,获取仿真分析云图。

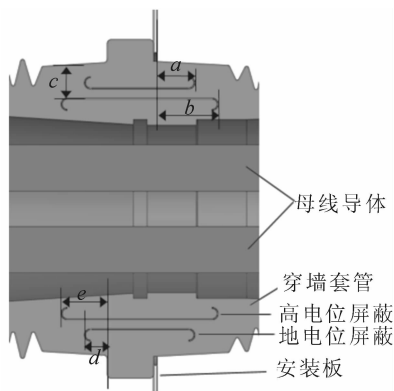


图 1 穿墙套管最优化时的完整模型

Fig. 1 A complete model about the optimal of the wall bushing

2 无屏蔽穿墙套管电场分析

无屏蔽穿墙套管,即穿墙套管最优化时的完整模型中,不包含高电位、地电位屏蔽环,只保留穿墙套管本体、安装板、母线导体。图 1 中的穿墙套管为最优化后的模型,图 2 的穿墙套管为优化前原始模型。

由于穿墙套管安装板的厚度在 2 mm 左右,高电位的母线导体从地电位的安装板内穿过,地电位在安装板的圆孔处聚集,使此处的电场过度集中,远超出空气最大击穿场强,容易出现局放现象;长期运行,使局部环氧材质老化,穿墙套管绝缘性能下降,最终导致母线与金属柜体放电而导致事故。电场仿真结果见图 2。图 2(b)为无屏蔽穿墙套管等电位云图,仿真电压为 $1.34 \times 10^5 \text{ V}$;右图为无屏蔽穿墙套管电场分布云图。由仿真分析可知,最大场强为 8.1 MV/m ,超出空气最大耐击穿场强 3 MV/m ,最大场强集中在安装板圆孔与穿墙套管外径之间的空气域。图 2(c)下图为最大场强局部放大图。

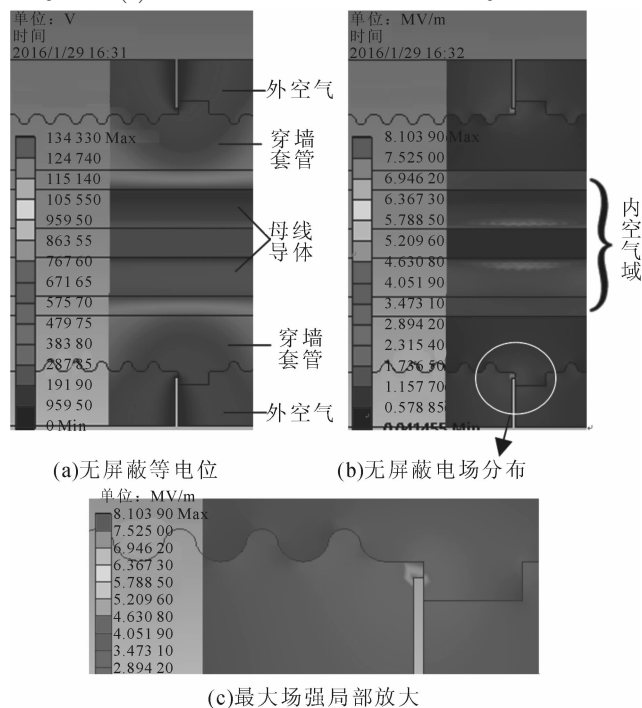


图 2 无屏蔽穿墙套管仿真分析

Fig. 2 Analysis result about no shielding ring of the wall bushing

3 带地电位屏蔽穿墙套管电场分析

无屏蔽穿墙套管,即图 1 的穿墙套管最优化时的完整模型中,不包含高电位屏蔽环,只保留穿墙套管本体、安装板、母线导体及地电位屏蔽。

带地电位屏蔽的穿墙套管能够将地电位均匀化,使安装板圆孔与穿墙套管外径之间的空气域场强大大降低,解决了局部电场过度集中的问题。然而,地电位屏蔽缩短了高电位母线与地电位之间的绝缘距离,增加了穿墙套管内部与母线导体之间的空气域场强。电场仿真结果见图 3。图 3(a)为地电位屏蔽穿墙套管等电位云图,仿真电压为 $1.34 \times 10^5 \text{ V}$;图 3(a)为地电位屏蔽穿墙套管电场分布云图,由仿真分析可知,最大场强为 11.38 MV/m ,集中在穿墙

套管内部与母线导体之间的空气域场强, 远超出空气能耐受的 3 MV/m 最大耐击穿场强。图 3(c) 为穿墙套管内、外空气域电场分布云图。

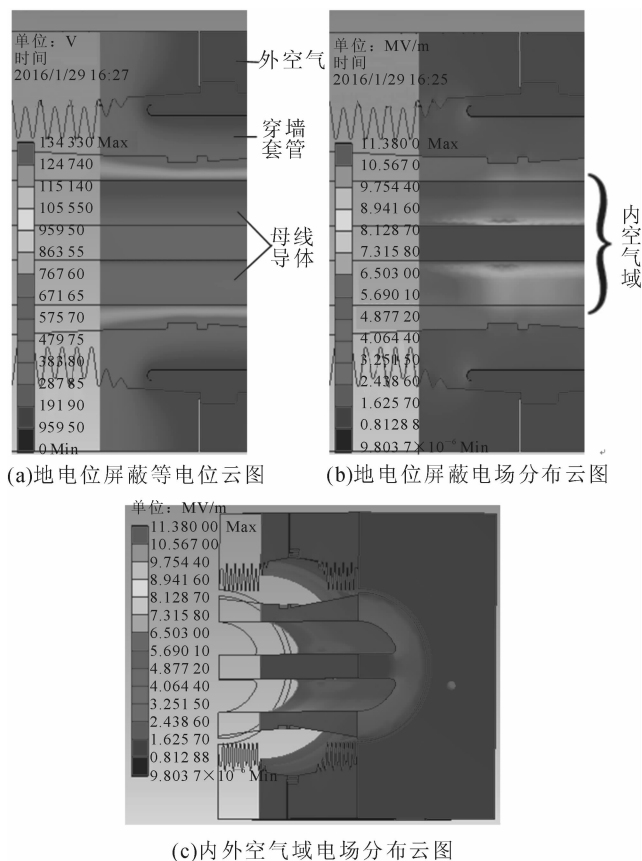


图 3 带地电位屏蔽穿墙套管仿真分析

Fig. 3 Analysis result about zero potential shielding of the wall bushing

4 带电、地电位屏蔽穿墙套管电场分析及屏蔽优化

4.1 高、地电位屏蔽环参数优化

由于穿墙套管不带屏蔽或只带地电位屏蔽时的场强均超出空气域最大耐击穿场强, 因此需要添加高电位屏蔽网, 进一步优化电场分布。

图 1 中: a 为地电位屏蔽与安装板的最大距离; b 为高电位屏蔽与安装板的最大距离; c 为高电位屏蔽与环氧面最小距离, 即环氧包裹高电位屏蔽最薄厚度; d 为地电位屏蔽与穿墙套管凸台的最大距离; e 为高电位屏蔽与穿墙套管凸台的最大距离。

为确定高、地电位屏蔽网的尺寸、穿墙套管包裹屏蔽网的环氧材料的厚度、宽度以及场强处于空气临界场强时的最佳值, 即确定图 1 中 a 、 b 、 c 、 d 、 e 等的较优化尺寸。这些参数分组如下: ①参数 c 。该参数主要确定穿墙套管外壁与高电位屏蔽环的最小距离, 间接确定了穿墙套管厚度; ②参数 a 、 b 为 1 组。这 2 个参数主要确定了高、地电位屏蔽环一端的安

装位置, 间接确定了穿墙套管包裹高、地电位屏蔽的厚度; ③参数 d 、 e 为 1 组。这 2 个参数主要确定了高、地电位屏蔽另一端的安装位置, 间接确定了穿墙套管包裹高、地电位屏蔽的厚度; ④参数 a 、 d 决定地电位屏蔽的尺寸, 参数 b 、 e 决定高电位屏蔽的尺寸。

文中预先给予这些参数初始值, 对每组参数进行修改, 通过仿真分析获取对应的电场分布云图及电场强度值, 并绘制数据曲线图。通过数据曲线图可以直观地发现最优或较优值, 从而确定参数值。

考虑到实际运行恶劣环境的影响, 因此将空气临界场强按照空气最大耐击穿场强理论值的 90% 计算, 取 2.7 MV/m。

4.2 穿墙套管外壁与高电位屏蔽的最小距离

该情况下简易模型的电场仿真分析云图见图 4。图 4(a) 为等电位云图, 仿真电压为 1.34 MV; 图 4(b) 为电场分布云图; 图 4(c) 为整体仿真模型电场分布云图的局部视图, 最大场强集中在高、地电位屏蔽之间的, 值为 23.54 MV/m, 未达到穿墙套管最大耐击穿场强 30 MV/m。该模型简化了伞群和穿墙套管凸台, 以便确定环氧外层与高电位屏蔽的最小距离。

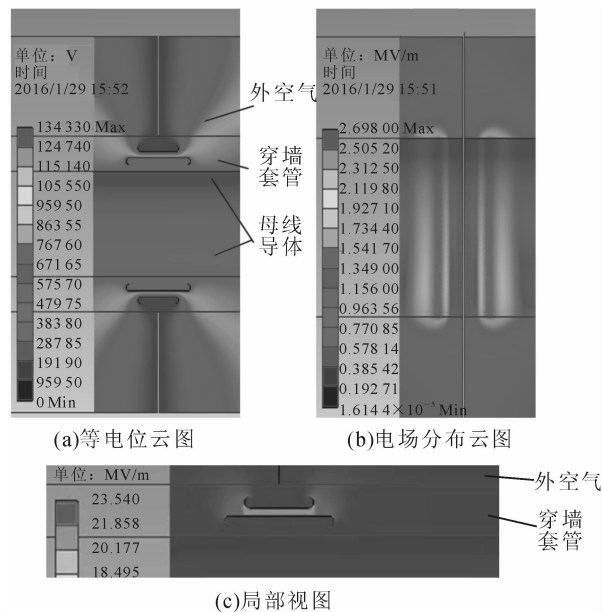


图 4 穿墙套管外壁与高电位屏蔽的最小距离 27.6 mm 仿真分析

Fig. 4 Analysis result about the minimum thickness (27.6 mm) between the face of the wall bushing and the high potential shielding

由于高电位屏蔽环长度大于地电位屏蔽环, 多出部分的高电位屏蔽环平行于简化的穿墙套管外表面, 故在图 4(b) 的电场分布云图中形成 2 条集中的电场带。

通过多次模型修改及仿真分析, 发现了穿墙套管外空气域最大场强 E 随环氧外层与高电位屏蔽的最

小距离 c 的变化规律,绘制场强值变化曲线,见图5。当 $c=25.8$ mm 时, $E=3.007$ MV/m。取 $c=27.6$ mm 时,穿墙套管周围的空气域最大场强 $E=2.698$ MV/m。

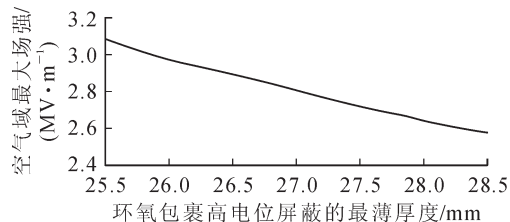


图5 穿墙套管外空气域最大场强随壁厚变化曲线

Fig. 5 The curve about the maximum electric field of the air which around the wall bushing when the thickness changed

4.3 高、地电位屏蔽与安装板的较优化距离

高、地电位屏蔽与安装板距离优化的电场仿真分析云图见图6。图6(a)为等电位云图,仿真电压为 1.34×10^5 V;图6(b)为穿墙套管内、外电场分布云图。图6(c)为整体仿真模型电场分布云图的局部视图,最大场强集中在高、地电位屏蔽之间的,值为 16.152 MV/m,未达到穿墙套管最大击穿场强。此时,高电位屏蔽与安装板距离 $b=15$ mm,地电位屏蔽与安装板距离 $a=7$ mm,穿墙套管周围的空气域最大场强为 2.646 MV/m。

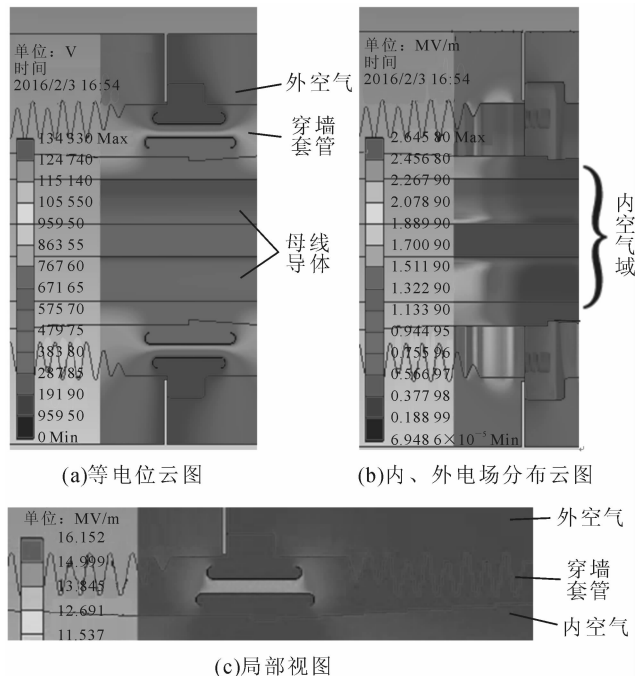


图6 高电位屏蔽与安装板距离 $b=15$ mm
地电位屏蔽与安装板距离 $a=7$ mm

Fig. 6 Analysis result when the $b=15$ mm which between the high potential shielding and the plate and $a=7$ mm which between the zero potential shielding and the plate

高、地电位屏蔽与安装板距离变化时,穿墙套管周围的空气域最大场强变化曲线见图7。表1为

图7中 b 取某一固定值,空气域最大场强变化曲线处于谷底时, a 的取值。

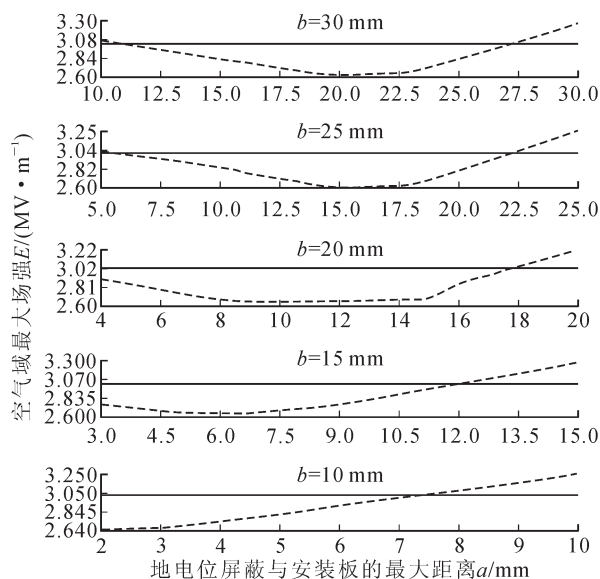


图7 空气域最大场强随 b, a 变化曲线

Fig. 7 The curve about the maximum electric field of the air which around the wall bushing when the variable b and a changed

表1 当图7中各曲线最小时的 b, a 值

Table 1 The value of b and a when each curve at the bottom in the fig.7

距离/mm	场强/(MV·m ⁻¹)
$b=30, a=20$	$E=2.61$
$b=25, a=15$	$E=2.61$
$b=20, a=10$	$E=2.66$
$b=15, a=7; b=10, a=2$	$E=2.65, E=2.65$

由图7的曲线变化可知,高、地电位屏蔽与安装板的距离并非相等就是最优的。

对比图7和表1的统计数据可知,设计高、地电位屏蔽时,欲使空气域场强较优或最优, a 的值可选择范围是在 $b/2$ 与 $(b-10)$ mm 之间。对照图7,该范围内的空气域场强均不高于空气域最大击穿场强 3 MV/m。文中取较优值 $b=15$ mm、 $a=7$ mm 时,穿墙套管用料最少,成本较低,此时穿墙套管周围的空气域最大场强 $E=2.65$ MV/m。

4.4 高、地电位与穿墙套管凸台的较优化距离

为进一步确定 d (地电位屏蔽与穿墙套管凸台的最大距离)、 e (高电位屏蔽与穿墙套管凸台的最大距离)的取值,继续进行仿真优化研究。

高、地电位屏蔽与穿墙套管凸台距离优化的电场仿真分析云图见图8。图8(a)为等电位云图,仿真电压为 1.34×10^5 V;图8(b)为电场分布云图;图8(c)为整体仿真模型电场分布云图的局部视图,最大场

强集中在高、地电位屏蔽之间的, 值为 16.222 MV/m, 未达到穿墙套管最大击穿场强。此时, 高电位屏蔽与穿墙套管凸台的最大距离 $e=25$ mm, 地电位屏蔽与穿墙套管凸台的最大距离 $d=17$ mm, 穿墙套管周围的空气域最大场强为 $E=2.609$ MV/m。

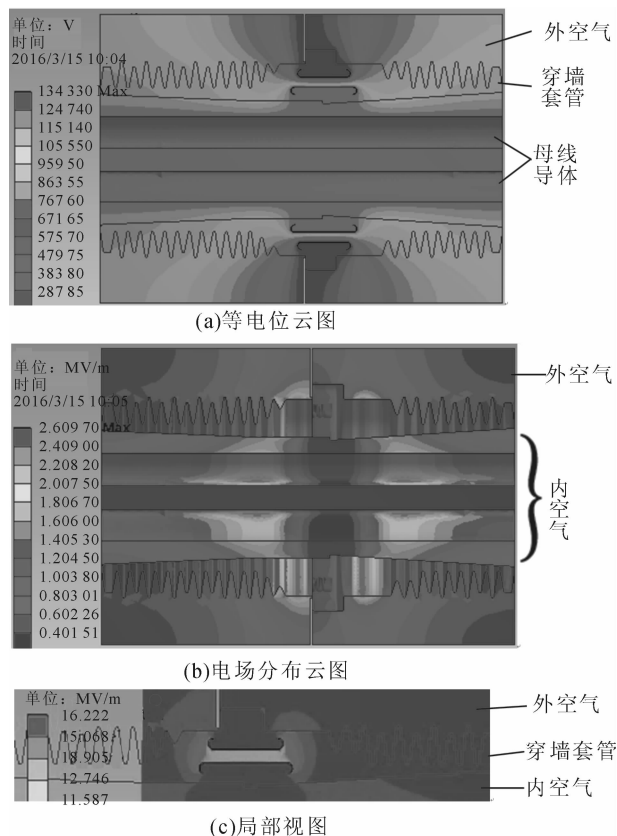


图 8 高电位屏蔽与穿墙套管凸台距离 $e=25$ mm
地电位屏蔽与穿墙套管凸台距离 $d=17$ mm

Fig. 8 Analysis result when the $e=25$ mm which between the high potential shielding and the convex and $d=17$ mm which between the zero potential shielding and the convex

高、地电位屏蔽与穿墙套管凸台距离变化时, 穿墙套管周围的空气域最大场强变化曲线见图 9。表 2 为图 9 中 e 取某一固定值, 空气域最大场强变化曲线处于谷底时, d 的取值。

有穿墙套管凸台的存在, 改变了高、地电位屏蔽与安装板之间电位及电场分布, e 、 d 的变化对空气域电场的影响与 b 、 a 的变化产生的影响大有不同。对比图 9 和表 2 的统计数据可知, 设计高、地电位屏蔽时, 预使空气域场强较优或最优, d 的值可选择范围是在 $(e-6)$ mm 至 $(e-9)$ mm 之间。

对照图 9, 该范围内的空气域场强均不高于空气域最大击穿场强 3 MV/m。因此优选值为: $e=25$ mm、 $d=17$ mm, 穿墙套管周围的空气域最大场强 $E=2.609$ MV/m。

4.5 小结

由以上仿真分析结论可得, 带高、地电位屏蔽

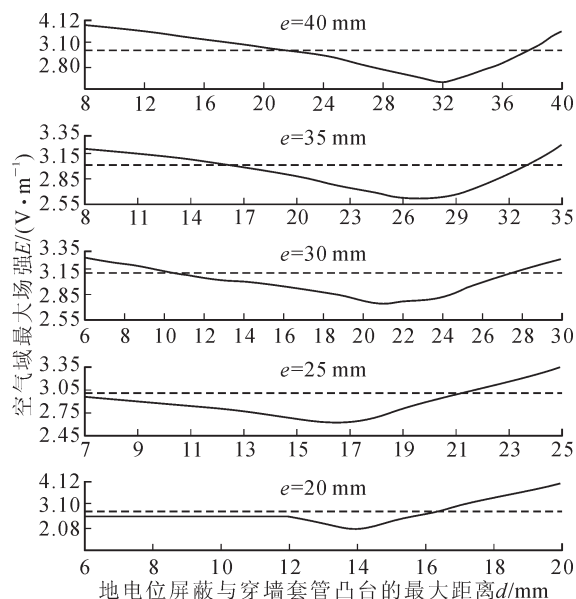


图 9 空气域最大场强随 e 、 d 变化曲线

Fig. 9 The curve about the maximum electric field of the air which around the wall bushing when the variable e and d changed

表 2 当图 9 中各曲线最小时的 e 、 d 值

Table 2 The value of e and d when each curve at the bottom in the fig.9

距离/mm	场强/(MV·m ⁻¹)
$e=40$ $d=32$	$E=2.610$
$e=35$ $d=26$	$E=2.620$
$e=30$ $d=21$	$E=2.620$
$e=25$ $d=17$	$E=2.609$
$e=20$ $d=14$	$E=2.790$

的 40.5 kV 穿墙套管电场较优化、较低成本设计的模型尺寸为: $a=7$ mm, $b=15$ mm, $c=27.6$ mm, $d=17$ mm, $e=25$ mm。在工频耐压下, 此时穿墙套管周围空气域电场场强为 $E=2.61$ MV/m, 效果最佳。

5 结语

文中根据 40.5 kV 开关柜母线穿墙套管运行工况, 运用 Ansys Workbench 软件建立了穿墙套管三维模型, 并进行了有限元计算和仿真分析, 得到了穿墙套管电位和电场分布图, 找出穿墙套管长期运行出现环氧老化击穿原因。

通过不断调整高、地电位屏蔽环的尺寸, 发现了穿墙套管电场分布的规律, 并获得了最优的电场分布所对应的电位屏蔽环尺寸, 优化了绝缘结构, 绘制了穿墙套管周围空气域电场强度随屏蔽环尺寸变化的曲线, 综合考虑了材料成本、电场强度等因素对穿墙套管设计的影响, 为选择穿墙套管及其屏蔽环的设计提供了理论依据。

参考文献:

- [1] 钱家骊,袁大陆,杨丽华,等. 高压开关柜——结构、计算、运行、发展[M]. 北京:中国电力出版社,2008:153-157.
QIAN Jiali, YUAN Dalu, YANG Lihua, et al. High voltage switch cabinet-structure、calculate、function、develop[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2008: 153-157.
- [2] 潘长明,刘刚,熊炬,等. 高压开关柜绝缘事故的分析及防范措施[J]. 高压电器,2011,47(7):90-93.
PAN Changming, LIU Gang, XIONG Ju, et al. High voltage switchgear insulation accident's analysis and countermeasures[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(7): 90-93.
- [3] 徐国浩. 高压开关柜绝缘事故的分析及防范对策[J]. 中国科技信息,2006(14):94-95.
XU Guohao. High voltage switchgear insulation accident's analysis and countermeasures[J]. China Science and Technology Information, 2006(14): 94-95.
- [4] 李开泰. 有限元方法及应用[M]. 北京:科学出版社. 2006.22-23.
LI Kaitai. Finite element method and its utilization[M]. Beijing: Science Press, 2006: 22-23.
- [5] 樊杰,赵秩,徐清浩. 有限元法的一般思想[J]. 科技情报开发与经济,2008,18(3):157-158.
FAN Jie, ZHAO Yi, XU Qinghao. General thought of finite element method[J]. SCI-TECH Information Development & Economy, 2008, 18(3): 157-158.
- [6] 于亚婷,杜平安,王振伟. 有限元方法的应用现状研究[J]. 机械设计,2005,22(3):6-10.
YU Yating, DU Pingan, WANG Zhenwei. Finite element method and its present utilization research[J]. Journal of Machine Design, 2005, 22(3): 6-10.
- [7] 张晋红,吴凤林. 有限元法及其应用现状[J]. 建材技术与应用,2007(4):9-10.
ZHANG Jinhong, WU Fenglin. Finite element method and its present utilization[J]. Research & Application of Building Materials, 2007(4): 9-10.
- [8] 鲁建霞,苟惠芳. 有限元法的基本思想与发展过程[J]. 机械管理开发. 2009,24(2):74-75.
LU Jianxia, GOU Huifang. Basic idea and development process of finite element Method[J]. Mechanical Management and Development, 2009, 24(2): 74-75.
- [9] 邓虎,彭彦卿,游一民,等. 穿墙套管的屏蔽仿真及优化设计[J]. 厦门理工学院学报,2015(5):41-45.
DENG Hu, PENG Yanqing, YOU Yimin, et al. Simulation and design optimization of the shielding wall bushing[J]. Journal of Fujiang University, 2015(5): 41-45.
- [10] 刘玉春,郎福成,谭东现,等. 40.5 kV 穿墙套管事故分析及其结构优化[J]. 电瓷避雷器,2015(6):39-42.
LIU Yuchun, LANG Fucheng, TAN Dongxian, et al. 40.5 kV switchgear epoxy resin casting wall bushing insulation failure analysis[J]. Insulators and Surge Arresters, 2015(6): 39-42.
- [11] 郑丽,王思润. 穿墙套管绝缘结构的优化设计分析[J]. 天水师范学院学报,2015,35(2):75-77.
ZHENG Li, WANG Sirun. Simulation and design optimization of the wall bushing[J]. Journal of Tianshui Normal University, 2015, 35(2): 75-77.
- [12] 彭晶,王科,谭向宇,等. 开关柜内环氧树脂浇注穿墙套管绝缘分析[J]. 云南电力技术,2015,43(6):24-28.
PENG Jing, WANG Ke, TAN Xiangyu, et al. 40.5 kV switchgear epoxy resin casting wall bushing insulation failure analysis[J]. Yunnan Electric Power, 2015, 43(6): 24-28.
- [13] 彭晶,赵现平,王科,等. 有限元分析 40.5 kV 穿墙瓷套管绝缘故障研究[J]. 云南电力技术,2014,42(3):39-42.
PENG Jing, ZHAO Xianping, WANG Ke, et al. Research of 40.5 kV ceramic wall bushings insulation fault based on finite element analysis[J]. Yunnan Electric Power, 2014, 42(3): 39-42.
- [14] 方春华,汤世祥,潘明龙. 10 kV 电缆中间接头典型缺陷仿真分析[J]. 三峡大学学报(自然科学版),2016,38(2):55-59.
FANG Chunhua, TANG Shixiang, PAN Minglong. Simulation analysis of typical defects in 10 kV cable joints[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2016, 38(2): 55-59.
- [15] 欧阳振国. 基于有限元分析的开关设备产品仿真与优化[D]. 厦门:厦门理工学院,2015.
OUYANG Zhengguo. Simulation and optimization of switchgear based on finite element method[D]. Xiamen: Xiamen University of Technology, 2015.
- [16] 刘国利,肖登明. 套管局放分析及电场仿真[J]. 电气技术,2014(9):1-4.
LIU Guoli, XIAO Dengming. Bushing PD analysis and electric field simulation[J]. Electrical Engineering, 2014(9): 1-4.
- [17] 王文峰,张清杰,蒋立齐. 40.5 kV 开关柜穿墙套管电场分析与优化设计[J]. 华电技术,2011,33(2):20-21.
WANG Wenfeng, ZHANG Qingjie, JIANG Liqi. Analysis on electric field of wall bushing for 40.5 kV switch cabinet and optimized design[J]. Water Conservancy & Electric Power Machinery, 2011, 33(2): 20-21.
- [18] 岳文忠. 变电站 10 kV 穿墙套管击穿的分析[J]. 农村电工,2010,18(1):32.
YUE Wenzhong. The analysis of substation 10 kV bushing breakdown[J]. Rural Electrician, 2010, 18(1): 32.
- [19] 颜群. 一种固体绝缘开关柜绝缘结构的设计与分析[J]. 机械研究与应用,2009(5):77-80.
YAN Qun. Design and analysis of insulation structure of solid insulation switchgear[J]. Mechanical Research & Application, 2009(5): 77-80.
- [20] 宁慧英. 高压开关柜中三维电场的计算与分析[D]. 沈阳:沈阳工业大学电机与电器系,2007.
NING Huiying. Calculation and analysis of three dimensional electric field in high voltage switchgear[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2007.

韩筛根(1967—),男,硕士,高级工程师,长期从事配电设备研发与质量监督测试工作。