

DOI: 10.7652/xjtuxb201412006

110 kV 变电站高压裸线扩径增强绝缘护套研究

金阳¹, 刘海峰², 郑晓泉¹, 段志国², 何瑞东², 成鹏飞³

(1. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 710049, 西安;

2. 国家电网河北省电力公司, 050022, 石家庄; 3. 西安工程大学理学院, 710048, 西安)

摘要: 为了减小 110 kV 变电站带电作业或改造施工时,人和施工车辆与高压裸线安全距离不够导致放电事故的概率,研究了 3 种用于减小 110 kV 变电站高压裸线最小放电距离的扩径增强绝缘护套,即带薄层绝缘金属扩径护套、非接触式带内半导体涂层的环氧筒护套和接触式带内半导体涂层环氧筒护套。估算了 3 种护套的最小放电距离及其与半导体层半径和扩径的关系,获得了扩径绝缘结构最佳尺寸,并得出了变电站高压裸线扩径增强绝缘的一般准则。研究中,以装有金属扩径护套的 110 kV 裸导线为例,进行了电场分布的有限元分析。理论计算和有限元分析表明:带薄层绝缘金属扩径护套的效果最佳,最小放电距离与高压裸线相比减小了 60%;接触式带内半导体涂层环氧筒护套防护效果与金属扩径护套相近,但只能短期使用;非接触式带内半导体涂层环氧筒护套不能起到防护作用。

关键词: 安全距离;增强绝缘;扩径护套;最小放电距离;有限元法

中图分类号: TM85 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)12-0034-07

Diameter Expanding and Reinforced Insulation Jacket for High Voltage Bare Conductor in 110 kV Substation

JIN Yang¹, LIU Haifeng², ZHENG Xiaoquan¹, DUAN Zhiguo²,

HE Ruidong², CHENG Pengfei³

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Hebei Electric Power Company, Shijiazhuang 050022, China;

3. School of Science, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

Abstract: To reduce the probability of discharge between workers or vehicles and bare conductors in 110 kV substation, three new types of reinforced insulation jackets are designed and contrasted, including metal diameter expanding jacket, suspended epoxy insulation jacket, and electrically-contacted epoxy insulation jacket. The minimal discharge distance of those three types and its relationship with the diameter of semi-conducting coating and the expanded diameter is estimated theoretically to find the best size of expanded structure and general standard of diameter expanding jacket. Then a model of 110 kV bare conductor installing metal diameter expanding jackets is constructed to figure out the electric field distribution with finite element method. It is found that the metal diameter expanding jacket serves as the best choice, whose minimal discharge distance decreases by 60% compared with bare conductors, and the electrically-contacted epoxy insulation jacket has nearly the same effect in a short service period, while the

收稿日期: 2014-04-24。 作者简介: 金阳(1989—),男,博士生;郑晓泉(通信作者),男,教授。 基金项目: 国家电网公司科技项目(TC13E460)。

网络出版时间: 2014-07-28

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20140728.1036.004.html>

suspended epoxy insulation jacket has no effect on the minimal discharge distance.

Keywords: safe distance; reinforced insulation; diameter expanding jacket; minimal discharge distance; finite element method

近年来随着城市用地面积日益紧张,110 kV 变电站的占地面积也在减小,人或施工车辆与设备安全距离不足的问题日益严重^[1]。尤其在变电站带电作业和改造施工时,施工人员经常由于电气常识不足或安全意识薄弱,导致与高压裸线距离小于最小放电距离而产生放电,严重时产生击穿导致人员伤亡。国内对这一问题的研究,主要集中在带电作业事故防范和带电作业方式探索等人为主动预防方面^[2-4]。使用绝缘性能好的检测工具、提高安全意识、穿戴防护服和严格遵守带电作业规范都可以减小由于安全距离不足导致的放电事故^[5-7]。但是,穿屏蔽服和防护服多适用于超高压输电线路带电作业,一般变电站由于缺乏防护用具和带电作业技术培训等,很难达到以上要求。采用新型的带电作业机器人来代替人工检测也是一个研究重点^[8-9],它可以使作业人员与高压电场完全隔离,但是该种设备体积大,并且机器人与高压设备之间依然存在放电的可能。如果从变电站设备的角度出发,当变电站高压裸线的半径增大时,其最小放电距离会减小^[10],相应的安全裕度则会提高。在现有变电站高压裸线不拆卸更换的条件下,在某些危险区域安装导线扩径护套以减小这一危险区域的最小放电距离是一个有效的方法,而目前国内关于这种被动预防方法的研究很少。

基于以上背景,本文以 110 kV 变电站高压裸线为例,研究了 3 种用以减小最小放电距离的扩径增强绝缘护套,即带薄层绝缘的金属扩径护套、非接触式带内半导体涂层环氧筒扩径护套、接触式带内半导体涂层环氧筒扩径护套。首先估算出了 3 种护套的最小放电距离,得出了最佳结构尺寸;然后综合评价了不同结构护套的防护效果、优缺点、经济性和实用性;最后,建立了 110 kV 变电站高压裸线安装带薄层绝缘金属扩径护套的仿真模型,采用有限元法分析了电场分布,验证了所设计护套的有效性。

1 扩径增强绝缘护套放电距离估算

1.1 高压裸线最小放电距离估算

最小放电距离即导体表面电场强度达到空气击穿场强开始放电时导体与接地体的距离。在高压裸线最小放电距离估算中,将高压裸线近似等效为圆

柱导体,导线下方为无限大接地面,电势为 0,如图 1 所示。实际高压裸线是钢芯铝绞线,由单股小曲率半径导体绞成,其最小放电距离会更大。

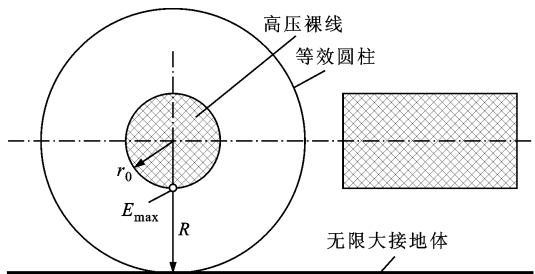


图 1 裸导线电场估算示意图

在进行最小放电距离估算时,将无限大接地面等效为一个圆柱面,估算出的最大电场只适用于高压裸线与无限大接地体距离最近的外表面,如图中箭头所示。导线表面的最大电场强度估算式为^[10]

$$E_{\max} = \frac{U}{r_0 \ln(R/r_0)} \quad (1)$$

式中: r_0 为高压裸线半径; R 为导线轴心至无限大接地体的距离; U 为裸线的运行电压。

对于 110 kV 高压裸线,相电压 $U = 64$ kV,空气的击穿电场强度有效值 $E_b = 2\ 120$ V/mm,取导体半径 $r_0 = 10$ mm,则导体表面最大电场达到空气击穿场强 $E_{\max} = E_b$ 时, R 即为最小放电距离 R_d ,解得当导线为理想光滑圆柱体时与地面的最小放电距离 $R_d = 205$ mm。考虑到单根导体曲率以及导体表面缺陷的影响,裸导体的实际最小放电距离 $R_{da} > R_d$ (205 mm)。相线之间电压为线电压,类似可算得线间导线最小放电距离 $R_{dl} > 267$ mm。

1.2 带薄层绝缘铝合金扩径护套

在进行扩径增强绝缘护套结构设计时,实现导线扩径的有效方法是采用金属圆柱包裹原导线以增加等效半径。由于铝合金材料质地轻、成本低、加工方便等优点,它已成为优先考虑的扩径材料,并且在金属扩径外表面涂覆一层绝缘层以达到增强绝缘效果。

图 2 所示为带薄层绝缘铝合金扩径护套结构示意图,铝合金层外部是一个典型的双层同轴圆柱体结构,将铝合金圆柱内部挖空以减小其对裸线的附加质量,圆柱两端与导线电气接触并有球状电晕屏蔽结构。此时,最大电场存在于绝缘薄层外表面,其

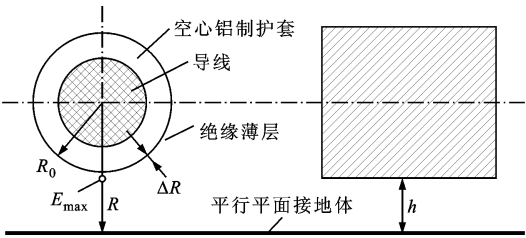


图 2 扩径铝制绝缘护套结构

估算式为

$$E_{\max } = \frac{U}{\left(R_0+\Delta R\right) \epsilon_{\text {air }}} / \left(\frac{1}{\epsilon_1} \ln \frac{R_0+\Delta R}{R_0}+\frac{1}{\epsilon_{\text {air }}} \ln \frac{R}{R_0+\Delta R}\right) \quad (2)$$

式中： R_0 为铝合金圆柱半径； ΔR 为绝缘薄层的厚度； ϵ_{air} 为空气的相对介电常数； ϵ_1 为绝缘层的相对介电常数。固体绝缘材料的耐电强度大于空气一个数量级以上^[11]，由于 ΔR 很小，至多为几百微米级，可以近似认为 $\Delta R \rightarrow 0$ 。取绝缘薄层的相对介电常数 $\epsilon_1=3.5, \epsilon_{\text{air}}=1$ 。对于 $R_0=25\text{ mm}$ 的扩径导体，当护套外绝缘表面达到空气击穿场强时，解得扩径绝缘表面起始放电时导线轴心与大地的最小放电距离 $R_d=83.468\text{ mm}$ ，相比光滑裸导线最小放电距离理论值 205 mm 大大减小，仅为后者的 41% 。考虑到原裸线单导体曲率和突起缺陷，本扩径结构对附近接地体的距离容忍度几乎为裸线的 40% 以下，效果显著。从扩径绝缘表面算起，与接地体距离 $h=83.468-15\approx 68.5\text{ (mm)}$ ，即使表面绝缘老化脱落，依然能保证上述最小放电距离。

1.3 非接触式带内半导体涂层环氧筒护套

1.3.1 最小放电距离估算 上述铝合金扩径护套绝缘层很薄，如果将绝缘层增厚，可用绝缘性能好并且成本低的环氧筒代替，同时在环氧筒内部涂覆半导体涂层以达到扩径效果。由于环氧筒与原裸线之间是空气间隙，环氧筒两端处与原裸线支撑可以采取两种解决方案：如果两端为绝缘支撑件，即为非接触式；如果两端为金属支撑件，则为接触式。图 3 所示为非接触式带内半导体涂层环氧筒护套，裸线与扩径半导体层无电气接触。裸线外部是一个典型的 3 层同轴圆柱体结构，内导体表面最易发生放电，理想圆柱体裸线表面的最大电场强度为

$$E_{\max } = \frac{U}{r_0 \epsilon_{\text {air }}} / \left(\frac{1}{\epsilon_{\text {air }}} \ln \frac{R_0}{r_0}+\frac{1}{\epsilon_1} \ln \frac{R_0+\Delta R}{R_0}+\frac{1}{\epsilon_{\text {air }}} \ln \frac{R}{R_0+\Delta R}\right) \quad (3)$$

当最大电场强度 $E_{\max}$ 达到空气击穿场强 E_b 时，

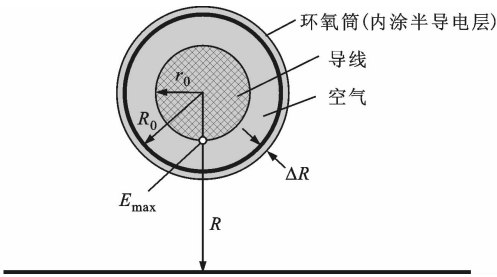


图 3 非接触式带内半导体涂层环氧筒护套结构

可以解得裸线内导体表面的最小放电距离

$$R_d = \left(R_0+\Delta R\right) \exp \left(\frac{U}{r_0 E_b}-\ln \frac{R_0}{r_0}-\frac{\epsilon_{\text {air }}}{\epsilon_1} \ln \frac{R_0+\Delta R}{R_0}\right) \quad (4)$$

当导线运行在 110 kV 电压下，且 $r_0=10\text{ mm}$ 、绝缘套筒厚度 $\Delta R=2\text{ mm}$ 时，可算出最小放电距离 R_d 与半导体涂层半径 R_0 的关系，见表 1。

表 1 半导体涂层半径与最小放电距离的关系

R_0/mm	R_d/mm
10	240.32
12	233.41
15	226.97
20	220.93
25	217.49
30	215.26
35	213.71
40	212.56

计算结果表明，随半导体层直径增加，最小放电距离有所下降，即使半导体涂层处的半径达到 40 mm ，仍然大于纯裸线的最小放电距离。这是因为在非接触式的连接方式下导线表面放电更加严重，导线表面放电属于小能量局部放电，不会立即导致线对地或线间空气击穿，但环氧内部放电却会造成有机绝缘放电腐蚀，导致固体绝缘失效。

1.3.2 绝缘薄弱处位置分析 当裸线与半导体体无电气接触时，护套两端采用的是聚合物支撑件，此时存在绝缘薄弱的位置。护套两端结构如图 4 所示，环氧筒由聚合物支撑件与裸线连接，并用尼龙螺钉固定，在环氧筒内表面涂半导体漆。由于内外导体间不是等位体，环氧筒内聚合物支撑连接件径向表面处电场线与聚合物表面平行，因而存在最不利的电场。此种表面的电气强度一般仅有空气的 $1/2$ ，即有效值大约为 $1\,060\text{ V/mm}$ ^[11]，将其带入式 (4)，可以解得最小放电距离为 251 mm ，超出高压裸线

最小放电距离达 22.4%。

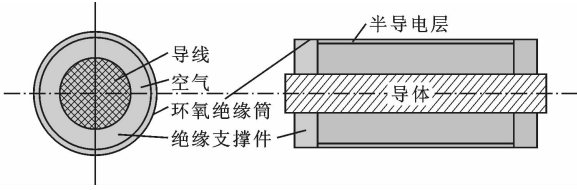


图 4 环氧筒绝缘支撑件护套结构

空气污秽对环氧筒内绝缘支撑件径向表面击穿强度产生影响,当有接地体靠近时,该位置的爬电或闪络在短时间就会导致结构损毁。

1.4 接触式带内半导体涂层环氧筒扩径护套

将非接触式带内半导体涂层环氧筒护套两端聚合物支撑件替换为铝制支撑件,即为接触式带内半导体涂层环氧筒扩径护套,在半导体层和裸线之间存在电气接触,如图 5 所示。

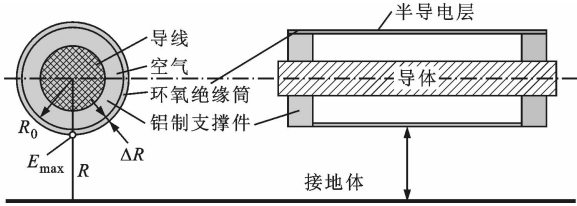


图 5 环氧筒铝制支撑件护套结构

此时,内导体表面绝缘弱点被屏蔽消失。由于空气击穿强度小于固体绝缘材料约 1 个数量级以上^[11],危险电场即为环氧筒表面最大电场 $E_{\max}$,其估算与式(2)相同

$$E_{\max} = \frac{U}{(R_0 + \Delta R)\epsilon_{\text{air}}} \left/ \left(\frac{1}{\epsilon_1} \ln \frac{R_0 + \Delta R}{R_0} + \frac{1}{\epsilon_{\text{air}}} \ln \frac{R}{R_0 + \Delta R} \right) \right. \quad (5)$$

可以解得

$$R_d = (R_0 + \Delta R) \exp \left[\left(\frac{U}{E_b (R_0 + \Delta R)} - \frac{\epsilon_{\text{air}}}{\epsilon_1} \ln \frac{R_0 + \Delta R}{R_0} \right) \right] \quad (6)$$

假定外绝缘尺寸与铝制扩径绝缘结构一致,厚度 $\Delta R = 2 \text{ mm}$,选用 $R_0 = 23 \text{ mm}$ 环氧筒。当外绝缘表面最大电场达到空气击穿场强,即 $E_{\max} = 2 \text{ 120 V/mm}$ 时,解得外绝缘表面起始放电时导线轴心与平面接地体的最小放电距离 $R_d = 83.3 \text{ mm}$,与铝制扩径绝缘最小放电距离相近。

2 最小放电距离与扩径关系

综合考虑了不同结构绝缘护套的最小放电距离

及其优缺点之后发现,带薄层绝缘铝合金扩径护套和环氧筒铝制支撑件护套均具有减小最小放电距离的作用,其防护效果与扩径半径和绝缘厚度相关。以带薄层绝缘铝合金扩径护套为例,根据式(2),可以近似得出 110 kV 裸线最小放电距离与扩径半径 R_0 的关系如下。

(1)当无外层绝缘,即 $\Delta R = 0, \epsilon_1 = 1$ 时,有

$$R_d \approx (R_0 + \Delta R) \exp \left[\frac{U}{E_b (R_0 + \Delta R)} \right] \approx R_0 \exp \frac{30.2}{R_0} \quad (7)$$

(2)当外绝缘厚度很小时,忽略最外层绝缘厚度,即假定 $(R_0 + \Delta R)/R_0 \approx 1$,有

$$R_d \approx (R_0 + \Delta R) \exp \left[\frac{U}{E_b (R_0 + \Delta R)} \right] \approx (R_0 + \Delta R) \exp \frac{30.1888}{R_0 + \Delta R} \quad (8)$$

(3)当外绝缘厚度达到一定值时,可以得到完整估算式

$$R_d = (R_0 + \Delta R) \exp \left[\frac{U}{E_b (R_0 + \Delta R)} - \frac{\epsilon_{\text{air}}}{\epsilon_1} \ln \frac{R_0 + \Delta R}{R_0} \right] \approx (R_0 + \Delta R) \exp \left[\frac{30.2}{R_0 + \Delta R} - \frac{1}{3.5} \ln \frac{R_0 + \Delta R}{R_0} \right] \quad (9)$$

根据式(9),当扩径导体半径 R_0 相同时,最小放电距离 R_d 随着绝缘板厚度 ΔR 的变化如图 6 所示。当扩径绝缘外径 $R_0 + \Delta R$ 相同时,最小放电距离 R_d 随着绝缘板厚度 ΔR 的变化如图 7 所示。同样地,可以得出另外两种结构扩径绝缘外径与最小放电距离的关系,其对比关系如图 8 所示。

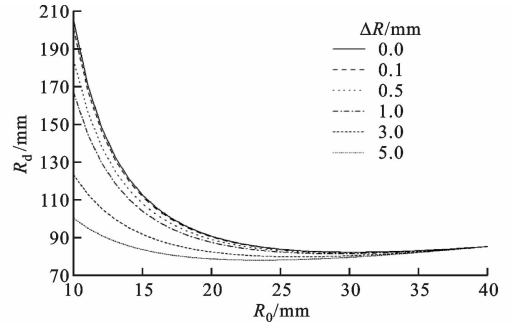


图 6 扩径导体半径相同时的最小放电距离

由图 6~图 8 可以得到以下结论。

(1)由图 8 可以看出,由于半导体层与裸导线无电气接触,非接触式带内半导体涂层环氧筒护套放电出现在导线表面,导致最小放电距离大于接触式带内半导体涂层环氧筒护套的最小放电距离。

(2)由图 6 可以看出,当扩径导体表面存在固体

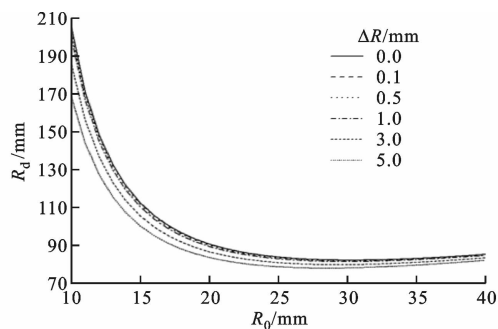


图7 扩径绝缘外径相同时绝缘表面最小放电距离

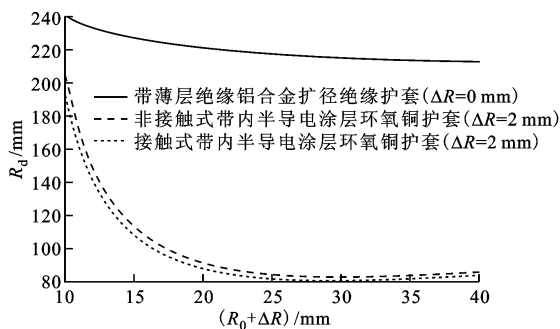


图8 最小放电距离与扩径绝缘外径的关系

绝缘时,随着固体绝缘厚度增加,最小放电距离下降,但下降并不显著。以扩径 25 mm 为例,绝缘厚度由 0.1 mm 增加到 3 mm,最小放电距离仅减小 3 mm 左右,这表明最小放电距离降低主要是扩径导体的贡献。

(3)由图 7 可以看出,随着扩径绝缘外径增加,最小放电距离迅速下降到 25 mm 左右时达到最小值附近,减小幅度达 60.8%,而最小放电距离下降速率衰减是由最小放电距离与扩径绝缘外径的对数规律所决定,其后再增加扩径绝缘外径,最小放电距离反而略有上升。

3 最佳扩径导体半径选择

通过分析图 6 可以发现,最小放电距离 R_d 与扩径导体半径 R_0 存在密切的关系。针对不同直径的裸导线,如果扩径导体半径 R_0 选取合适,则可以使最小放电距离 R_d 达到一个最小值 $R_{d,\min}$,此时的防护效果最佳,为最佳结构。根据式(9),求 R_d 对 R_0 的导数

$$\frac{dR_d}{dR_0} = d \left[(R_0 + \Delta R) \exp \left(\frac{U}{E_b (R_0 + \Delta R)} - \frac{1}{\epsilon_1} \ln \frac{R_0 + \Delta R}{R_0} \right) \right] / dR_0 \quad (10)$$

令 $dR_d/dR_0 = 0$,当 $R_0 \approx U/E_b - \Delta R$ 时, $R_{d,\min}$ 获得极小值,代入式(5),得

$$R_{d,\min} \approx \frac{U}{E_b} \exp \left(1 - \frac{1}{\epsilon_1} \ln \frac{1}{1 - E_b U^{-1} \Delta R} \right) \quad (11)$$

最小放电距离 $R_{d,\min}$ 与绝缘层厚度 ΔR 以及扩径导体半径 R_0 的关系如图 9 所示。

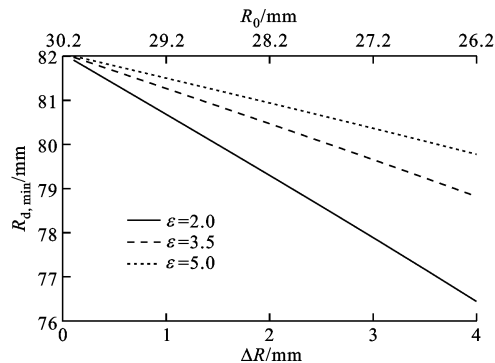


图9 最小放电距离的最小值与扩径导体半径的关系

综合分析,可将式 $R_0 \approx U/E_b - \Delta R$ 作为架空裸线扩径增强绝缘的一般准则。对于 110 kV 线路,扩径 R_0 为 25~30 mm 较为合理,由于 $R_{d,\min}$ 与 R_0 关系曲线在极小值处较为平坦,为减小总体尺寸,可定为下限 $R_0 = 25$ mm。由图 9 可以看出,在选择扩径导线固体绝缘时,介电常数越小,最小放电距离也越小,可作为选择裸线增强绝缘的第二个准则,但由于该项实际上对减小最小放电距离的效果不显著,当绝缘厚度增加到 4 mm 时, $R_{d,\min}$ 只减小了 7%,所以在选择增强绝缘厚度时,可以不考虑其对最小放电距离的影响。

4 有限元计算

4.1 有限元模型建立

为了验证金属扩径护套的防护效果,本文采用 Ansoft Maxwell 14.0 电磁场仿真软件进行建模和电场计算^[12-13],分别建立了接地球靠近裸导线和金属扩径护套两种模型。模型中扩径护套外径为 50 mm,裸线外径为 20 mm(参照 LG-240 导线),裸线长度为 50 m,接地球的半径为 35 mm。模型处在介电常数为 1 的空气当中,求解区域尺寸为 50 m×50 m×50 m,导线施加电压为 110 kV 三相电压。

4.2 电场计算结果与分析

扩径导体与裸线为电气连接,因此二者之间在任何情况下均为等位体。当无接地球靠近时,扩径导体结构外表面电场近似轴对称分布。当有接地球靠近时,扩径结构表面电场开始发生畸变,与接地球距离最近的外表面电场强度最大,且随接地球的靠近,电场畸变程度加重。图 10 表示了当接地球靠近时扩径金属护套和裸线表面电场对比分析结果。

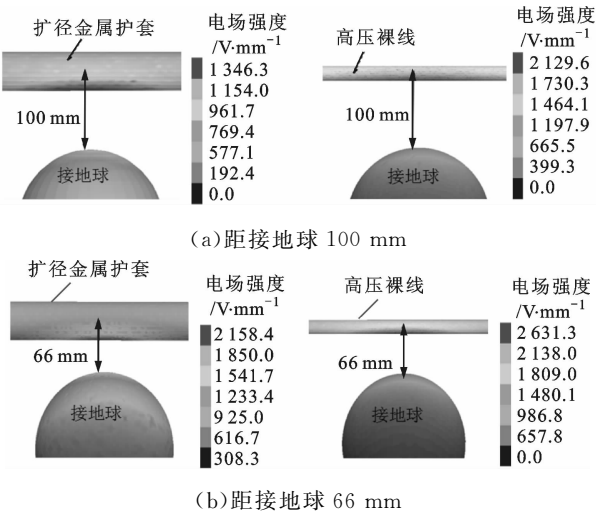


图 10 接地球靠近时扩径护套和裸导线表面电场分布情况

从图 10 可以看出,当扩径金属护套和裸线轴心与接地球表面的距离均为 100 mm 时,扩径金属护套表面最大电场强度仅为 1 350 V/mm,而裸线表面最大电场强度已达到 2 130 V/mm,超过了空气击穿场 2 120 V/mm,开始产生放电。此时,扩径金属护套表面最大电场强度仅为裸线表面的 63%。

当扩径金属护套和裸线轴心距离接地球表面的距离设为 66 mm,扩径金属护套表面的最大电场强度已达到 2 160 V/mm,超过了空气的电气强度,此时裸导线表面的最大电场强度为 2 630 V/mm,为护套表面最大电场强度的 1.2 倍。

通过有限元计算可以得出,当接地球不断靠近时,扩径金属护套和裸线表面最大电场强度随接地球距离变化的对比关系曲线如图 11 所示。从中可以看出,在与接地球距离不断缩小的过程中,扩径金属护套表面的最大电场强度均小于裸线表面的最大电场强度。裸线的最小放电距离为 100 mm,扩径金属护套的最小放电距离为 66 mm,相比裸线减小了 34%,可见扩径金属护套起到了很好的均衡电场

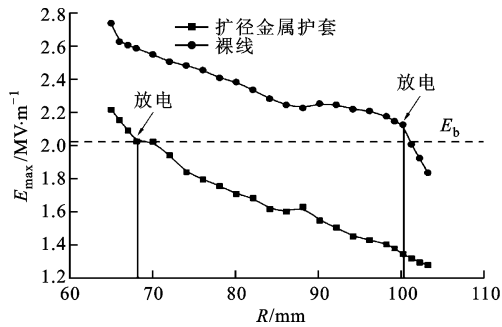


图 11 最大电场强度和到接地体表面距离的关系

效果,验证了前述的估算规律。

5 结 论

(1)最佳结构时的导体扩径半径 R_0 计算公式可作为变电站裸线最佳扩径结构选择的一般准则,此时 $R_{d,\min}$ 计算如下

$$R_0 \approx U/E_b - \Delta R$$
$$R_{d,\min} \approx \frac{U}{E_b} \exp\left(1 - \frac{1}{\epsilon_1} \ln \frac{1}{1 - E_b U^{-1} \Delta R}\right)$$

并且选择介电常数较小的有机材料作为增强绝缘为优。

(2)非接触式带内半导体涂层环氧筒护套的最小放电距离比裸线还高,所产生的绝缘弱点会造成腔内局部放电,甚至造成闪络,是一种不合理结构。若将环氧套筒内半导体层与裸线电气相连,最小放电距离会减小,但只能短期应用。

(3)带薄层绝缘铝合金扩径护套能够大幅减小变电站裸线的最小放电距离。扩径导体半径为 25 mm 时,最小放电距离仅为 80 mm 左右,比裸线减少达 60% 以上,是较为合理的长寿命结构。

参考文献:

[1] 郭日彩, 许子智, 徐鑫乾. 220 kV 和 110 kV 变电站典型设计研究与应用 [J]. 电网技术, 2007, 31(6): 23-31.

GUO Ricai, XU Zizhi, XU Xiqian. Research and application of typical design for 220 kV and 110 kV substations [J]. Power System Technology, 2007, 31(6): 23-31.

[2] 李强有, 葛秦岭, 陈家斌. 电力架空线路运行维护与带电作业 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2011: 103-119.

[3] 国家电网公司人力资源部. 电力安全工作规程: 变电部分 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2009: 27-37.

[4] 国家电网公司人力资源部. 带电作业基础知识 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2010: 58-73.

[5] 刘洪正, 刘凯, 孟海磊, 等. ± 660 kV 直流输电带电作业安全距离的试验研究 [J]. 电网技术, 2011, 35(11): 183-189.

LIU Hongzheng, LIU Kai, MENG Hailei, et al. Experimental research on safety distance for live-line working carried out on ± 660 kV DC power transmission line [J]. Power System Technology, 2011, 35(11): 183-189.

[6] 胡毅, 王力农, 邵瑰玮, 等. 紧凑型输电线路带电作业方式及安全防护 [J]. 电网技术, 2007, 31(23): 6-

10.
HU Yi, WANG Linong, SHAO Guiwei, et al. Live working ways for compact transmission lines and relevant safety protection [J]. Power System Technology, 2007, 31(23): 6-10.
- [7] 胡涛, 胡毅, 李景禄, 等. 输电线路带电作业的安全防护 [J]. 高电压技术, 2006, 32(5): 22-25.
HU Tao, HU Yi, LI Jinglu, et al. Safety protection for live working on transmission line [J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(5): 22-25.
- [8] 鲁守银, 马培荪, 戚晖, 等. 高压带电作业机器人的研制 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27(17): 56-58.
LU Shouyin, MA Peisun, QI Hui, et al. Research on high voltage electric power live line working robot [J]. Automation of Electric Power System, 2003, 27(17): 56-58.
- [9] 戚晖, 厉秉强, 顾载新. 高压带电作业机器人绝缘防护技术研究 [J]. 高电压技术, 2003, 29(5): 19-20.
QI Hui, LI Bingqiang, GU Zhaixin. The research on insulation technology for HV hot line robot [J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(5): 19-20.
- [10] 刘其昶. 电气绝缘结构设计原理: 中 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2009: 6-24.
- [11] 金维芳. 电介质物理 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2009: 125-142.
- [12] 毛凤麟, 王雪松. 复合绝缘子均压环对电场分布的影响 [J]. 高电压技术, 2000, 26(4): 40-42.
MAO Fenglin, WANG Xuesong. Effects of grading ring of polymer insulator on the field distribution [J]. High Voltage Engineering, 2000, 26(4): 40-42.
- [13] 赵博. Ansoft 12 在工程电磁场中的应用 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010: 243-254.

(编辑 杜秀杰)

(上接第 33 页)

参考文献:

- [1] PANG B T, LI J, LIU H, et al. A simulation study on optimal oil spraying mode for high-speed rolling bearing [J]. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 2008, 31(2): 553-557.
- [2] AKAMATSU Y, MORI M. Minimizing lubricant supply in an air-oil lubrication system [J]. NTN Technical Review, 2004, 72: 12-19.
- [3] OH I S, KIM D, HONG S W, et al. Three-dimensional air flow patterns within a rotating ball bearing [J]. Advanced Science Letters, 2013, 19: 2180-2183.
- [4] CUI M M. Investigation of the gas flow in the rolling element bearing assembly of a centrifugal compressor [C] // Proceedings of the ASME Turbo Expo. New York, USA: American Society of Mechanical Engineers, 2005: 1273-1280.
- [5] 翟强, 朱永生, 闫柯, 等. 高速角接触轴承油气润滑两相流动特性数值研究 [J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(6): 86-90.
ZHAI Qiang, ZHU Yongsheng, YAN Ke, et al. Numerical investigation of two-phase flow for the oil-air lubrication inside on angular contact ball bearing [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(6): 86-90.
- [6] GLAHN A, WITTING S. Two-phase air/oil flow in aero engine bearing chambers: characterization of oil film flows [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1996, 118(3): 578-583.
- [7] GLAHN A, KURRECK M, WILLMANN M, et al. Feasibility study on oil droplet flow investigations inside aero engine bearing chambers-PDPA techniques in combination with numerical approaches [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1996, 118(4): 749-755.
- [8] BATCHELOR GK. An introduction to fluid dynamics [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2000: 139-140.
- [9] HARRIS T A, KOTZALAS R M. Rolling bearing analysis [M]. 5th ed. London, UK: Taylor and Francis Press, 2006: 47-54.

(编辑 武红江)