

[仿真分析]

500 kV紧凑型同塔双回输电线路场强水平和感应电压仿真分析

文/国网湖南省电力有限公司建设公司 邓庆红 李容嵩
国网湖南省电力有限公司 陈卫 曹刚强
国网湖南省电力有限公司输电检修分公司 蒋智鹏

分析了工频电磁场下物体导电率对感应电的影响，采用适合用于输电线路电场分布简化分析的理论模型对输电线路电场分布进行分析推导线导体耦合的静电场解析公式，编制MATLAB求解程序，开展相关的计算分析工作，得出不同塔型杆塔的场强水平和感应电压水平。

500 kV紧凑型同塔双回（垂直排列）输电线路具有布置紧凑、单位走廊面积输送容量大等优点，在国内外电网中广泛使用。与常规线路相比，杆塔带电作业空间狭小（导线间距较常规塔近70%）、感应电压高（可达运行电压12%以上）。开展带电作业主要面临两大难题：一是杆塔结构极为紧凑，感应电压（电流）、体表场强以及不同工况检修时安全防护技术不明确；二是杆塔窗口狭小、多组合间隙，传统方法及工具难以满足作业要求。因此，亟须开展关于500 kV垂直排列型同塔双回输电线路电场和感应电压方面的研究。

输电线路电磁场和数值计算模型

1. 工频电磁场下物体导电率对感应电的影响

人们常认为导电率越高的物体在线路附近带的电越多，而绝缘物体可能不带电。实际上，在交变电场中，物体内部的电荷因周期性往复运动产生的交变电流大小仅与该物体的形状和电场大小有关，在很大程度上与物体的导电率无关。也就是说，只要不是导电率特别小的物体（如某些类型的橡胶），交流输电线路附近的一般物体，如生物体、大地和房屋等均可视为导体。

当电磁场随时间变化缓慢，在保证计算准确度

的前提下，可以忽略因电场变化产生的磁场和磁场变化产生的电场，场的滞后效应消失，此时描述电场和磁场的方程不需联立求解，输电线路产生的电磁场就属于这一情况。因此，可采用求解静态电磁场的方法求解输电线路电磁场，区别仅在于准静态电磁场计算中的场量是时间的函数。

2. 输电线路电磁场的模型推导

基于静电场的方法，输电线路电磁场基本理论模型示意图如图1所示。模型的主要求解步骤如下：

1) 完成模型输入部分，主要有输电线路的导线参数、杆塔的导体参数、线路的运行电压参数和避雷线的接地参数。其余对计算结果不太影响的参数可以忽略，如绝缘子的参数。模型几何参数输入后，将模型区分为有限长线形状的导体，并取得导体运行相量电压列向量 $\mathbf{V}$ 。

2) 通过静电场模型，实现导体运行电压列向量 $\mathbf{V}$ 与导体带电荷量列向量 $\mathbf{Q}$ 的求解

$$\mathbf{RQ}=\mathbf{V} \quad (1)$$

式中， $\mathbf{R}$ 为模型线导体之间的静电场耦合矩阵。

3) 求解式（1），得到带电导体携带的电荷列向量 $\mathbf{Q}$ 。

4) 根据每个带电导体携带的电荷求解空间的电位和电场分布。

5) 检核检修人员的人身安全, 提出相关的保护措施。

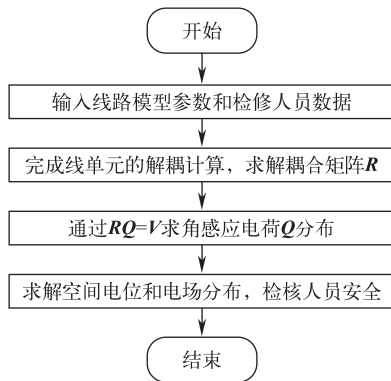


图1 输电线路的静电场计算模型求解流程图

3. 静电场耦合矩阵的求解

图1中, 模型线导体之间的静电场耦合矩阵 $\mathbf{R}$ 是需要解决的核心问题。 $\mathbf{R}$ 对角线上的元素表示导体段对自身的电位耦合, 非对角线元素表示不同导体段之间的定位耦合。很明显, $\mathbf{R}$ 是对称矩阵。

对于 $\mathbf{R}$ 对角线上的元素 $R_{i,i}$, 等于处于导体段轴线的细线段与处于导体表面的细线段之间的互感, 计算表达式为

$$R_{i,i} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \int_{l_i} \int_{l_i} \frac{1}{r} dl_i dl'_i = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{a} - 1 \right) \quad (2)$$

式中, a 为导体的等效半径; l 为导体段的长度; ϵ 为空气的介电常数; r 为导体表面到导体轴线之间的距离。

如果导线为分裂导线, a 的求解公式为

$$a = \sqrt[n]{a_0 \prod_{i=2}^n 2r_0 \sin \frac{2\pi}{n}} \quad (3)$$

式中, r_0 为分裂导线外接圆的半径; n 为导线的分裂数; a_0 为分裂子导线的半径。

对于 $\mathbf{R}$ 非对角线上的元素 $R_{i,j}$, 根据电磁场理论, 互感 $R_{i,j}$ 的表达式为

$$\begin{aligned} R_{i,j} &= \frac{1}{4\pi\epsilon} \int_{l_i} \int_{l_j} \frac{1}{D(\vec{dl}_i, \vec{dl}_j)} d\vec{l}_i \cdot d\vec{l}_j \\ &= \frac{\cos \theta_{i,j}}{4\pi\epsilon} \int_{l_i} \int_{l_j} \frac{1}{D(\vec{dl}_i, \vec{dl}_j)} dl_i dl_j \end{aligned} \quad (4)$$

式中, $\theta_{i,j}$ 为导体 i 和 j 之间的夹角, 表示两导体微段 dl_i 和 dl_j 间的距离。

可以看出要求导体之间的静电场耦合矩阵, 关键是求一个二重积分。二重积分的求解, 令

$$M = \int_{l_i} \int_{l_j} \frac{1}{D(\vec{dl}_i, \vec{dl}_j)} dl_i dl_j \quad (5)$$

两平行导体棒如图2所示。

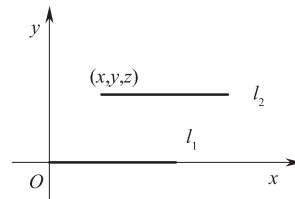


图2 两平行导体棒

M 的解析公式为

$$\begin{aligned} M &= L_1 \ln \left(\frac{\sqrt{(x+L_2-L_1)^2 + w^2} + x + L_2 - L_1}{\sqrt{(x-L_1)^2 + w^2} + x - L_1} \right) - \sqrt{(x-L_1)^2 + w^2} + \\ &\quad (x+L_2) \ln \left(\frac{\sqrt{(x+L_2-L_1)^2 + w^2} - (x+L_2-L_1)}{\sqrt{(x+L_2)^2 + w^2} - (x+L_2)} \right) + \sqrt{x^2 + w^2} - \\ &\quad x \ln \left(\frac{\sqrt{(x-L_1)^2 + w^2} - (x-L_1)}{\sqrt{x^2 + w^2} - x} \right) + \sqrt{(x+L_2-L_1)^2 + w^2} - \\ &\quad \sqrt{(x+L_2)^2 + w^2} \end{aligned} \quad (6)$$

两垂直棒导体如图3所示。

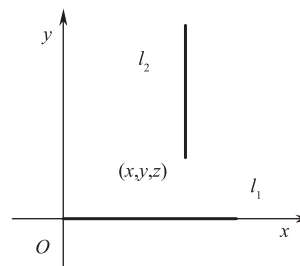


图3 两垂直棒导体

带电检修作业时的场强水平计算结果

本章主要针对该线路杆塔, 选取作业过程中地电位、中间电位和等电位作业的典型作业位置, 分别测量作业人员头顶、指尖、胸前和脚下等易发生电场畸变部位的电场强度以及屏蔽服外表面各部位的电场强度。

1. 测试算例

主要的仿真对象有5SCZ1直线塔、5SCJ2转角塔和5SCDJ1终端塔。5SCZ1直线塔的杆塔建模示意图如图6所示。模型采用的是比较准确的杆塔轮廓, 其余不发生最大场强的地方均使用线形导体网格进行

等效。项目模型与其他研究使用有限元方法把杆塔看成是多个板状导体拼装的结构不同，项目的模型更为精细和准确。

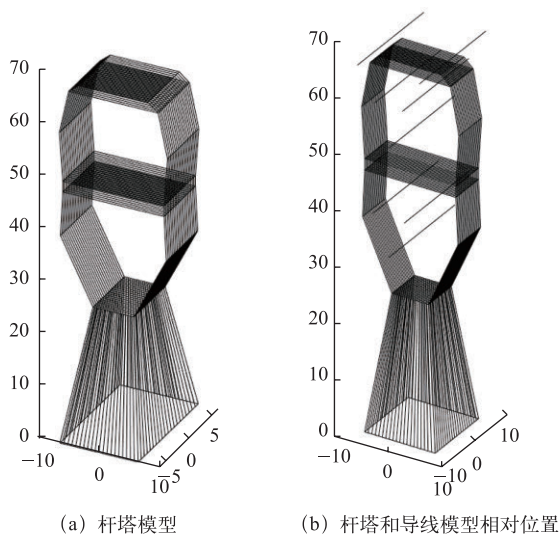


图6 5SCZ1直线塔的杆塔和导线模型示意图

带电检修作业的场强水平计算，双回导线假设是同相位运行，线电压A相的电压参数为

$$U_A(t) = 550\sqrt{\frac{2}{3}} \cos(100\pi t) \quad (17)$$

计算垂直沿线路方向杆塔中心截面的空间电位分布图，结果如图7所示。计算垂直沿线路方向杆塔中心截面的空间电场分布图，结果如图8所示。

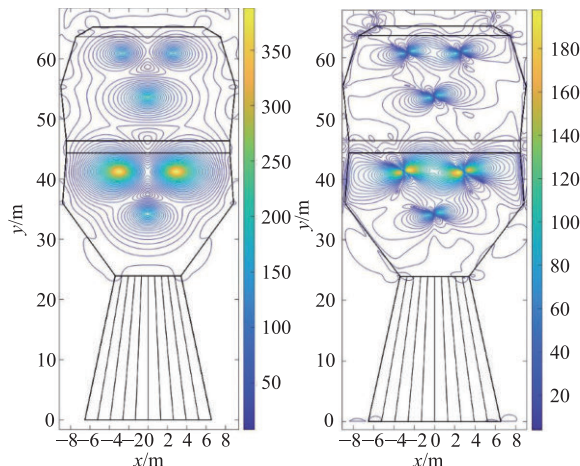


图7 5SCZ1直线塔的空间电位等位线

图8 5SCZ1直线塔空间电场

图8的计算结果表明，空间中场强的最大值位于下回的输电线路A相和B相导线附近（具体位置为A相和B相间内侧），而上回的输电线路由于靠近地线、下回线路的影响以及本线路三相导线之间相互

影响等因素，上回导线附近的场强不及下回线路。

计算沿线路方向杆塔中心截面的空间电位分布图，结果如图9所示。然后计算沿线路方向杆塔中心截面的空间电场分布图，结果如图10所示。

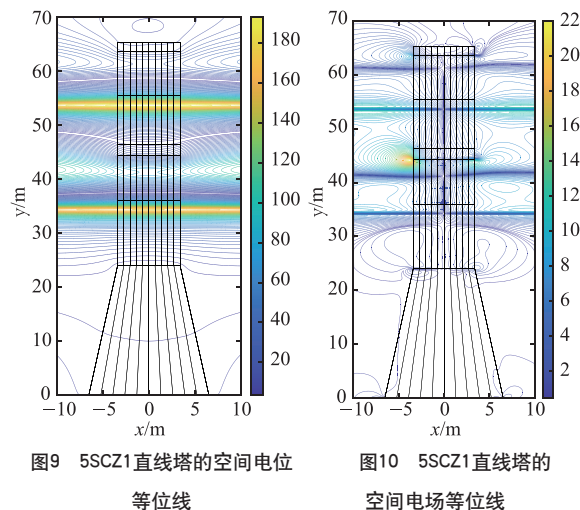


图9 5SCZ1直线塔的空间电位等位线

图10 5SCZ1直线塔的空间电场等位线

可以发现，最大场强发生在垂直于线路方向的杆塔塔头内部，比线路平行截面的电场强度大约一个数量级。

在上述具体数值模型中，由于每个带电导体携带的电荷量 Q 已经求解得到，所以导体表面场强等于导体的携带电荷除以其表面积。以前面的例子计算，导体上场强分布的计算结果如图11所示。计算结果表明有部分导体的表面场强可以超过100 kV/m，但都是在240 kV/m的允许范围内。

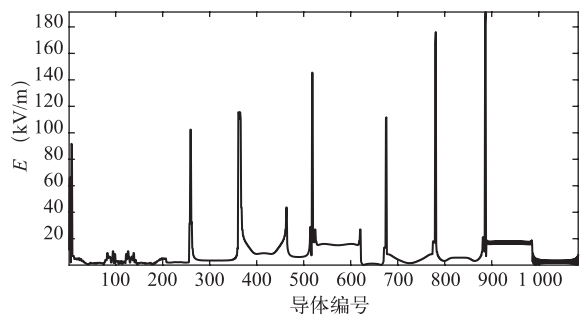


图11 5SCZ1直线塔导体表面场强分布（不包括地线和导线）

下面主要计算作业人员头顶、指尖、胸前和脚下等易发生电场畸变部位的电场强度以及屏蔽服外表面各部位的电场强度。

2. 计算条件

线路带电的条件设置为550 kV。人体穿着屏蔽服后近似为等位体，模拟人体条件为几何尺寸近似，参数见表1。

表1 模拟人体的基本参数

部位	近似几何体	长轴/cm	短轴/cm
头部	球体	20	20
手臂	椭球体	70	4
颈部	椭球体	7	8
腰部	椭球体	65	16
腿部	椭球体	80	6.5

3. 等电位作业和中间电位作业的情况

检修人员在等电位作业与杆塔的具体参数关系不大,选取5SCZ1直线塔,报告假设人直接站在导线上,计算人体不同部位的体表最大场强,结果见表2。

表2 人体不同部位的体表最大场强

部位	体表最大场强/(kV/m)
头顶	386
指尖	193
胸前	48.3
脚下	118.8

头顶最大场强达到了386 kV/m,超过了规程240 kV/m的限值,同时为了将屏蔽服内的场强限制在15 kV/m,要求屏蔽服的屏蔽效率达到29分贝或以上。

检修人员在中间电位作业与杆塔的具体参数关系不大,选取5SCZ1直线塔,报告假设研究人员距离导线的最小距离为3.2 m,根据图9的计算结果,体表最大场强为140.3 kV/m,在规程240 kV/m的限值以内。为了将屏蔽服内的场强限制在15 kV/m,要求屏蔽服的屏蔽效率达到20分贝或以上。

下面分不同杆塔的情况来分析带电检修作业时的场强水平。

仿真计算结果

1. 场强强度计算结果

(1) 5SCZ1直线塔

5SCZ1直线塔的基本参数见表3。

表3 5SCZ1直线塔的基本参数

铁塔全高/m	铁塔呼称高/m	钢材重量/kg	基础正面根开a/mm	基础侧面根开b/mm
66.8	36.0	76 038	13 060	13 060
69.8	39.0	81 150	13 960	13 960
72.8	42.0	83 361	14 860	14 860
78.8	48.0	92 157	16 660	16 660

计算两回线路同时带电和一回检修情况下,地

电位作业情况下的最大场强,计算结果见表4。

表4 地电位作业情况下的最大场强

H/m	a/m	双回带电/(kV/m)	上回带电/(kV/m)	下回带电/(kV/m)
36.0	13.060	192.162	66.594 3	118.429
39.0	13.960	192.195	66.368 6	118.506
42.0	14.860	192.723	66.120 8	117.091
48.0	16.660	192.815	65.743 5	118.653

从表4可以看出,最大场强与呼称高和根开的关系不大。在双回带电的情况下,带电检修作业时的场强水平最高,约为192 kV/m,在规程240 kV/m的限值以内。为了将屏蔽服内的场强限制在15 kV/m,要求屏蔽服的屏蔽效率达到22分贝或以上。下回线路停电上回线路带电的最大场强较小,而下回带电上回停电的场强较大,但都小于双回带电的情况。从计算结果可以看出,地电位作业人体的最大场强发生在塔头下回线路的A相和B相导线的上方处。

为了减少工作量,后面均不核算单回输电线路停电情况下的最大场强。

(2) 5SCJ1转角塔

5SCJ1直线塔的基本参见如表5。

表5 5SCJ1直线塔的基本参数

铁塔全高/m	铁塔呼称高/m	钢材重量/kg	基础正面根开a/mm	基础侧面根开b/mm
60.2	27.0	61 978	12 510	12 510
63.2	30.0	64 235	13 410	13 410
66.2	33.0	67 488	14 310	14 310

计算两回线路同时带电的情况下,地电位作业情况下的最大场强,计算结果见表6。计算结果与5SCZ1直线塔相似,不再展开分析。

表6 地电位作业情况下的最大场强

H/m	a/m	双回带电/(kV/m)
27.0	12.51	159.946
30.0	13.41	159.971
33.0	14.31	159.986

(3) 5SCDJ1终端塔

5SCDJ1直线塔的基本参数见表7。

表7 5SCZ1直线塔的基本参数

铁塔全高/m	铁塔呼称高/m	钢材重量/kg	基础正面根开a/mm	基础侧面根开b/mm
60.2	27.0	103 484	15 100	15 100
63.2	30.0	109 761	16 180	16 180
66.2	33.0	116 879	17 260	17 260

计算两回线路同时带电的情况下，地电位作业情况下的最大场强，计算结果见表8。计算结果与5SCZ1直线塔相似，不再展开分析。

表8 地电位作业情况下的最大场强

H/m	a/m	双回带电/(kV/m)
27.0	15.10	156.483
30.0	16.18	156.507
33.0	17.26	156.519

2. 感应电压计算结果

(1) 5SCZ1直线塔

5SCZ1直线塔单回停电状态下停电线路的感应电压计算结果见表9。

表9 单回停电状态下停电线路的感应电压

H/m	a/m	上带电下感应电压/kV	下带电上感应电压/kV
36.0	13.060	34.448 3 (A相)	49.604 7 (A相)
		34.447 7 (B相)	49.602 9 (B相)
		24.099 6 (C相)	78.501 1 (C相)
39.0	13.960	34.720 1 (A相)	49.615 3 (A相)
		34.719 6 (B相)	49.613 5 (B相)
		24.452 1 (C相)	78.500 1 (C相)
42.0	14.860	34.959 3 (A相)	49.623 2 (A相)
		34.958 7 (B相)	49.621 3 (B相)
		24.760 0 (C相)	78.498 2 (C相)
48.0	16.660	35.359 5 (A相)	49.633 6 (A相)
		35.359 0 (B相)	49.631 7 (B相)
		25.271 3 (C相)	78.492 7 (C相)

在下回停电上回带电的情况下，最大的感应电压出现在位置靠近带电线路的A相和B相的停电线路上。类似的，在上回停电下回线路带电的情况下，最大的感应电压出现在位置靠近带电线路的C相的停电线路上。而且下回带电上回停电的情况下，C相的感应电压可以达到78.5 kV。远高于上回带电下回线路停电的35.4 kV。

两回带电时地线支架处感应电压值计算结果见表10，两回带电时地线支架处感应电压值为32 kV。

表10 两回带电时地线支架处感应电压值

H/m	a/m	感应电压/kV
30.0	11.260	31.970 0
36.0	13.060	31.991 7
42.0	14.860	32.008 1
48.0	16.660	32.029 7

(2) 5SCJ1转角塔

5SCJ1直线塔单回停电状态下停电线路的感应电压计算结果见表11。

表11 单回停电状态下停电线路的感应电压

H/m	a/m	上带电下感应电压/kV	下带电上感应电压/kV
27.0	12.51	28.706 9 (A相)	41.337 3 (A相)
		28.706 4 (B相)	41.335 8 (B相)
		20.083 0 (C相)	65.417 6 (C相)
30.0	13.41	28.933 4 (A相)	41.346 1 (A相)
		28.933 0 (B相)	41.344 6 (B相)
		20.376 8 (C相)	65.416 8 (C相)
33.0	14.31	29.132 8 (A相)	41.352 7 (A相)
		29.132 3 (B相)	41.351 1 (B相)
		20.633 3 (C相)	65.415 2 (C相)

在下回停电上回带电的情况下，最大的感应电压出现在位置靠近带电线路的A相和B相的停电线路上。类似的，在上回停电下回线路带电的情况下，最大的感应电压出现在位置靠近带电线路的C相的停电线路上。而且下回带电上回停电的情况下，C相的感应电压可以达到65.4 kV。远高于上回带电下回线路停电的29.1 kV。

两回带电时地线支架处感应电压值计算结果见表12，两回带电时地线支架处感应电压值为17.2 kV。

表12 两回带电时地线支架处感应电压值

H/m	a/m	感应电压/kV
27.0	12.51	17.194 6
30.0	13.41	17.200 3
33.0	14.31	17.205 7

(3) 5SCDJ1终端塔

5SCDJ1直线塔单回停电状态下停电线路的感应电压计算结果见表13。

表13 单回停电状态下停电线路的感应电压

H/m	a/m	上带电下感应电压/kV	下带电上感应电压/kV
27.0	15.10	29.152 3 (A相)	41.286 7 (A相)
		29.152 9 (B相)	41.286 8 (B相)
		20.644 7 (C相)	65.463 9 (C相)
30.0	16.18	29.516 5 (A相)	41.317 3 (A相)
		29.516 7 (B相)	41.317 4 (B相)
		21.125 0 (C相)	65.413 4 (C相)
33.0	17.26	29.786 5 (A相)	41.329 8 (A相)
		29.786 8 (B相)	41.329 9 (B相)
		21.459 0 (C相)	65.561 3 (C相)

在下回停电上回带电的情况下，最大的感应电压出现在位置靠近带电线路的A相和B相的停电线路上。类似的，在上回停电下回线路带电的情况下，最大的感应电压出现在位置靠近带电线路的C相的停电线路上。而且下回带电上回停电的情况下，C相的感应电压可以达到65.6 kV。远高于上回带电下回线路停电的29.8 kV。

(下转第70页)

且电动机轴承温度升高。经维修人员验看后，否认润滑原因，认为轴负载异常或支承轴功率超负荷，电动机瞬时功率后，振动幅值迅速下降，异常振动与电动机磁力有密切的关系，分析中心称其根本原因是电动机磁场异常。

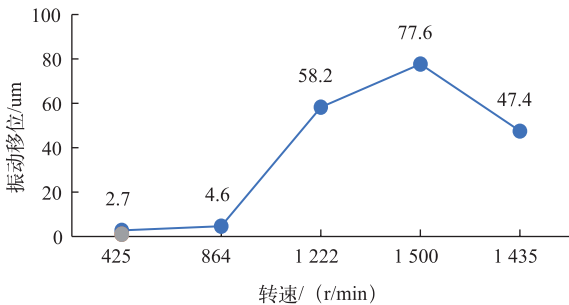


图3 自由端振动

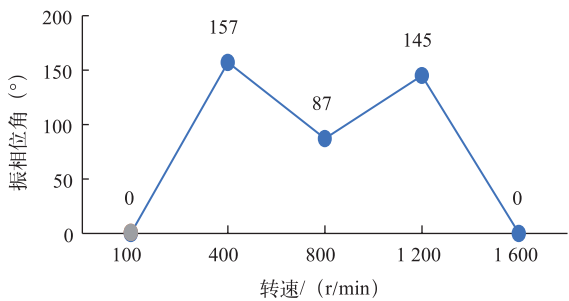


图4 振动相位

3. 故障处理

维修人员现场拆开电动机，执行转子铁心试验，发现定子铁心超标11 mm。在端盖内上轴承，垫片5 mm，可促使转子向下位移5 mm，促使转子和定子的铁心轴保持对称一致。在试验台试运行2 h后，测试后发现：电动机两端轴承振幅低于7/μm，上轴承温度在31 ℃左右。在泵座上单独测试电动机2 h，电动机两端轴承振幅均低于28/μm，振动状态良好。检查电动机和凝水泵副轮，测试重负荷，电动机轴承两端振幅在30/μm以下，自由端轴承温度在34 ℃，无异常。

结束语

本次检修中，以逐个排查法最终确定故障原因为电动机转子和磁场中心异常，并采取对应的检修方式，电动机异常振动得到有效修复。通过本次凝结水泵电动机振动故障的诊断和处理，为处理相关立式电动机振动故障奠定了基础，可合理节省维修成本，提高机组运行安全稳定性。虽然本次采用的方法可能具有一定个例性，但不失为一种处理电动机振动故障的检修思路，为电动机振动处理提供一些操作经验。EA

(收稿日期：2021.08.20)

(上接第38页)

两回带电时地线支架处感应电压值计算结果见表14，两回带电时地线支架处感应电压值为17.9 kV。

表14 两回带电时地线支架处感应电压值

H/m	a/m	感应电压/kV
27.0	15.10	17.884 9
30.0	16.18	17.872 8
33.0	17.26	17.863 0

结束语

针对500 kV紧凑型同塔双回垂直排列输电线路带电检修作业场强与感应电，开展了相关的理论分析和数值计算的工作，目前取得成果和结论总结如下：

1) 等电位带电作业的场强最为严重，头顶最大场强达到了386 kV/m，超过了规程240 kV/m的限值，同时为了将屏蔽服内的场强限制在15 kV/m，要求屏蔽服的屏蔽效率达到29分贝或以上。

2) 检修人员在中间电位作业与杆塔的具体参数

关系不大，选取5SCZ1直线塔，假设研究人员距离导线的最小距离为3.2 m，体表最大场强计算结果为140.3 kV/m，在规程240 kV/m的限值以内。为了将屏蔽服内的场强限制在15 kV/m，要求屏蔽服的屏蔽效率达到20分贝或以上。

3) 地电位作业人体的最大场强发生在塔头下回线路的A相和B相导线的上方处。在不同杆塔塔型的情况下，地电位作业最大场强均小于200 kV/m，直线塔的情况比转角塔的情况严重，但仍在规程240 kV/m的限值以内。为了将屏蔽服内的场强限制在15 kV/m，要求屏蔽服的屏蔽效率达到23分贝或以上。

4) 在下回停电上回带电的情况下，最大的感应电压出现在位置靠近带电线路的A相和B相的停电线路上。类似的，在上回停电下回线路带电的情况下，最大的感应电压出现在位置靠近带电线路的C相的停电线路上。EA

(收稿日期：2021-04-27)