

500 kV 双回直线转角塔电场仿真分析

张佰庆, 谢伟, 康宇斌, 童维占, 仲彬
(江苏省电力公司检修分公司, 江苏 徐州 221000)

摘要:为研究输电线路下方工频电场分布,文中以一典型 500 kV 同塔双回直线转角塔为研究对象,采用三维 CAD 软件 SolidWorks 建立铁塔精细化计算模型,分别对绝缘子串、均压环、联板等部件按实际尺寸进行等比例建模,运用有限元软件参数化建立导线模型,实现混合网格划分,获得了线路周围的三维电场分布。分析同相序、逆相序及异相序 3 种不同导线布置方式下的电场差异,结果表明,同塔双回线路在同相序布置时地面场强最大,采用逆相序排列可明显改善线路下方电场环境。计算结果可为超高压输电线路设计提供参考。

关键词:有限元法;双回直线转角塔;3 维工频电场;参数化计算;线路走廊

中图分类号:TM723

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2015)04-0063-04

随着我国特高压交直流输电工程的建设与投运,电网规模不断扩大,输电线路穿越城镇的情况不可避免,而原本多处在野外的 500 kV 线路跨越民居的现象也时有发生。社会和公众的环保意识日益增强,输电工程对现代社会所产生的特有电磁污染,对职业人员及周边居民的人身健康影响,对通信和电子设备的无线电干扰影响等等,逐步成为当今高压直流输电工程的研究热点和公众关心重点。电磁环境问题已成为影响线路设计和电网发展的重要因素。对于输电线路周围的工频电场分布问题,国内外学者进行了大量研究,常见的数值计算方法有模拟电荷法^[1-3]、镜像法^[4,5]、矩量法^[6,7]、有限元法^[8,9]等。文献[2]基于模拟电荷法建立了考虑杆塔以及导线弧垂的输电线路模型并计算其电场分布。文献[6]提出一种基于矩量法的铁塔电场频域计算方法,并采用 CDEGS 软件进行仿真验证。文献[8]应用有限元法计算了 330 kV 线路复合绝缘子的电场分布,模型考虑了杆塔和导线,但忽略相间的影响。文献[10]采用二维模型分析了复合绝缘子附近的电场分布,提出均压环优化方案,但忽略铁塔和相间的影响。

实际输电线路中,铁塔、金具等部件结构复杂,影响电场分布的因素较多,采用 3 维模型比 2 维模型更为全面和准确,铁塔、导线和相间因素均可能对周围电场分布存在影响,计算时应加以考虑。

1 计算方法

有限元法是当前电磁场数值计算中应用最广泛的一种数值算法。以变分原理和插值函数为基础,适宜于计算区域内场量变化较为剧烈的情况,特别是对于求解多介质、结构及边界条件复杂的场域问题具有独特优势^[11]。输电线路的工频电场可视为准静电场进行计算^[12],其电位分布需满足电场能量最小化要求,故待求

电场问题可转化为泛函极值问题。利用网格剖分和插值函数将计算域剖分为有限网格单元,以二维情形为例,单个网格单元的电场能量表达式为:

$$W_e(\varphi) \approx W_e(\varphi^e) = \int_e \int \frac{\epsilon_e}{2} \left[\left(\frac{\partial \varphi^e}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi^e}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy \quad (1)$$

于是场域内电场总能量为:

$$W(\varphi) \approx \sum_{e=1}^n W_e(\varphi) \quad (2)$$

式(1,2)中: $\varphi(x,y)$ 为电位函数; W_e 为与电位相关的电场能量函数。电场总能量 W 为最小值时,相应的 $\varphi(x,y)$ 即为所求的电位分布。

输电线路的电场计算属于第一类边值问题,静电场的求解和泛函极值可等价为:

$$\begin{cases} W(\varphi) = \int_D \left\{ \frac{\epsilon}{2} \left[\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2 \right] - \rho \varphi \right\} dx dy = \min \\ \varphi_{Li} = u_i \quad (i=1, 2, \dots, n) \end{cases} \quad (3)$$

在单元上与节点相关的线性插值函数为:

$$\varphi_e = \sum_{i=1}^n k_i^e \varphi_i^e \quad (4)$$

根据泛函极值理论,最终得到待求的有限元方程:

$$K\Phi = 0 \quad (5)$$

式(5)中: K 为总电场能系数矩阵; Φ 为内节点电位列向量。解式(5)方程得到各节点的 φ_i ,即可得到场域各节点电位分布。

2 计算模型

5E1-SZJ 鼓形双回直线转角塔计算模型如图 5 所示。铁塔整体高度 57.5 m,呼高 27 m,右侧为 V 形瓷绝缘子串局部放大图。导线采用垂直排列方式,采用 4×LGJ630/45 型钢芯铝绞线,导线直径 33.6 mm,分裂间距 450 mm,线长 56 m。模型主要考虑了绝缘子串、均压环、屏蔽环、联板等部件,忽略均压屏蔽环的连接件,忽略架

空避雷线的影响。瓷绝缘子采用 210 kN 耐污盘形悬式绝缘子,公称直径 280 mm,结构高度 170 mm。



图 1 5E1-SZJ 双回直线转角塔三维模型

由于模型内各部件尺度相差悬殊,考虑到模型剖分难度和计算效率,对计算模型做如下简化:

- (1) 忽略导线弧垂,即认为导线对地高度不变,为相互平行的长直圆柱导体;
- (2) 忽略悬垂线夹、挂环等尺寸过小的结构件,可减小剖分单元量,同时对计算结果影响很小;
- (3) 采用人工截断边界模拟无穷远边界,空气域尺寸为 $180\text{ m} \times 60\text{ m} \times 60\text{ m}$ 。

输电线路的工频电场为准静电场,本文将电压分为实部、虚部两部分同时加载求解,根据相量法,A相、B相和C相的相电压为:

$$\begin{cases} \dot{U}_a = U_m \cos(\theta) + jU_m \sin(\theta) \\ \dot{U}_b = U_m \cos(\theta - 120^\circ) + jU_m \sin(\theta - 120^\circ) \\ \dot{U}_c = U_m \cos(\theta + 120^\circ) + jU_m \sin(\theta + 120^\circ) \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中: θ 为初相角,取 60° 作为计算条件,考虑系统最高运行电压, $U_m = 1.1\sqrt{2}U/\sqrt{3}$, U 为线电压有效值。

A相、B相、C相加载电压分别为: $U_a = 224.5 + j388.8\text{ kV}$; $U_b = 224.5 - j388.8\text{ kV}$; $U_c = -449\text{ kV}$ 。

3 电场计算与结果

3.1 工频电场分布

实体模型导入有限元分析软件 ANSYS,对导线进行参数化建模。由于线路存在一定转角,转角塔的电场计算需对整个模型进行求解,无法再采用对称的 1/2 模型。采用四面体单元 SOLID123 和六面体单元 SOLID122 对模型划分网格。加载求解得到模型的电位及电场分布,500 kV 同塔双回直线转角塔电位及电场分布如图 2 所示。

从图 2 可以看出,计算域内电位分布、电场分布连续性好,梯度变化层次分明。由于铁塔接地,加载电位为零电位,其塔身的屏蔽作用使得两侧相间电场的相互影响较小。因横担的屏蔽效果,两侧各相电场离铁塔距离愈近,电场强度愈小,同侧相间电场的相互影响较大。

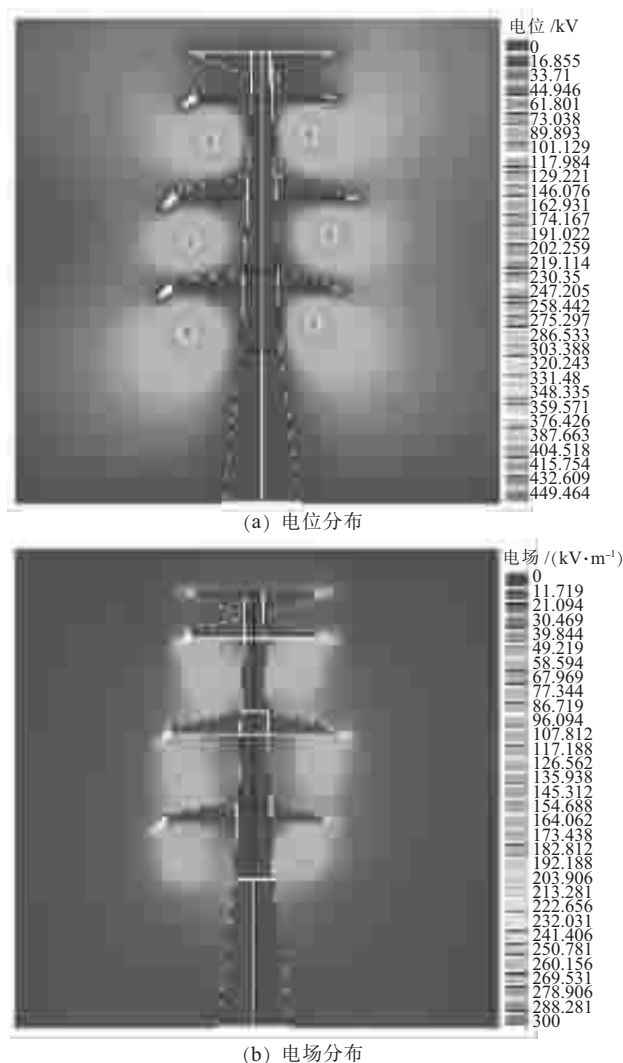
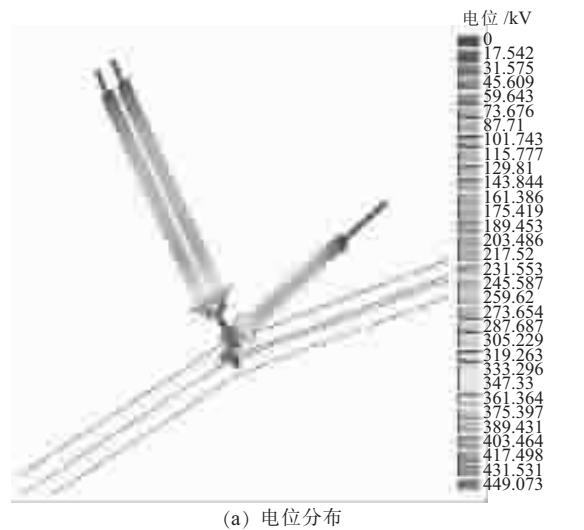


图 2 500 kV 同塔双回直线转角塔电位及电场分布

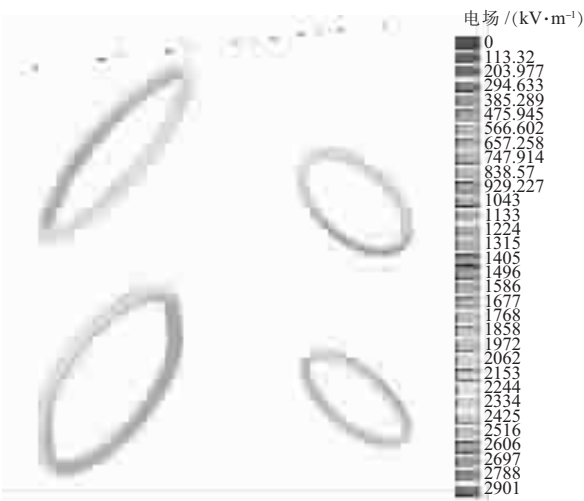
上相悬垂串电位与电场分布如图 3 所示。由图 3(a)可见,绝缘子串上电位计算结果与实际情况相一致,分裂导线、联板及连接金具上为电位峰值 U_m ,由高压端到低压端,沿绝缘子串电位逐渐降低,绝缘子串与铁塔的联接金具为零电位。绝缘子串电位分布呈非线性递减规律,这导致绝缘子串上的电场分布不均,在高压端和低压端出现较高的场强。计算域最大电场强度出现在均压环外侧表面,这是由于强制均压效果,均压环将分裂导线及绝缘子串的高场强区域转移到均压环外侧表面附近,图 3(b)从不同角度观察均压环表面电场分布,场强最大值为 2901 kV/m 。

考虑导线 3 种不同布置方式。同相序下,双回路导线排列顺序为 ABCA'B'C';异相序布置时为 ABCB'C'A'排列;逆相序时为 ABCC'B'A'排列。加载及边界条件均保持一致,3 种排列方式下,地面 1.5 m 高度处观察面上电场分布如图 4 所示。

为进一步分析,对比 3 种导线布置方式线路下方同一路径上的场强差异,在距离铁塔 60 m 处,沿垂直线路方向每隔 0.5 m 提取地面上方 1.5 m 处场强值,3 种导

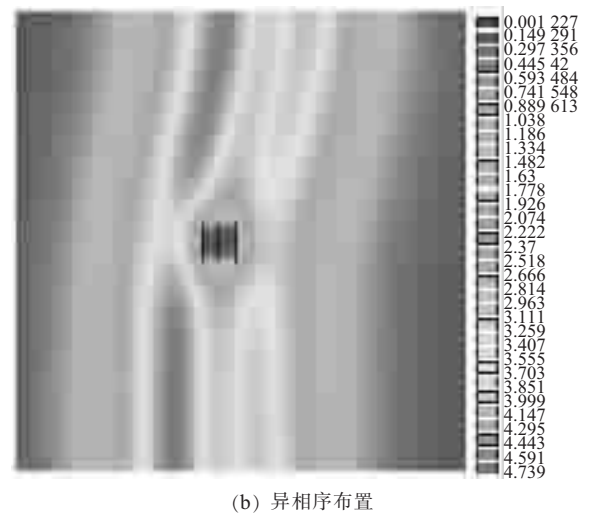


(a) 电位分布

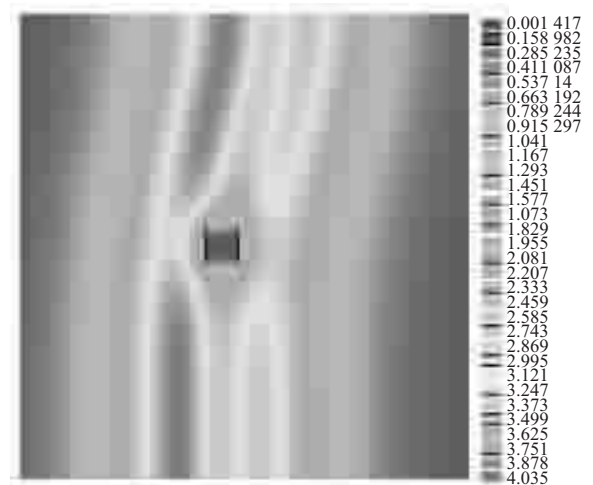


(b) 电场分布

图3 上相悬垂串电位与电场分布

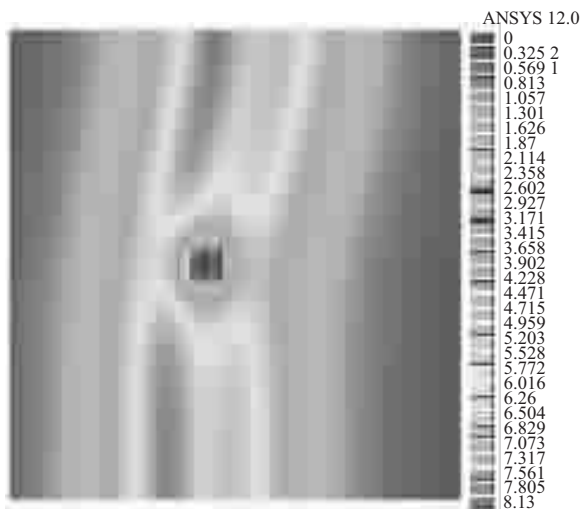


(b) 异相序布置



(c) 逆相序布置

图4 地面 1.5 m 高度电场强度分布



(a) 同相序布置

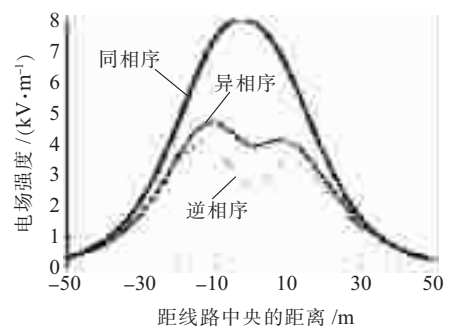


图5 线路下方工频电场分布曲线

线排列方式下的电场分布如图 5 所示。

由图 4 可见,导线在同相序布置、异相序布置、逆相序布置时,观察面上电场关于线路中心大致呈对称分布,最大电场强度 E_{\max} 分别为 8.13 kV/m,4.74 kV/m,4.04 kV/m。结合图 5 的电场分布云图可以看出,场强最大值出现的位置从线路中央逐渐向外侧偏移,

在远离线路中央的低场强范围,电场迅速衰减且分布渐趋于一致。同相序布置下,云图可得峰值最大,出现在线路中央正下方。异相序布置与逆相序布置的电场分布规律相似,均呈双峰型分布,其中异相序布置下最大场强出现在边相导线对地投影点处,离线路中心约为 11 m。

逆相序布置下,电场峰值最小,出现在边相导线对地投影点外侧,离线路中心约 13 m。此时线路中心投影处场强仅约为 2.58 kV/m,相比异相序下降了 1.34 kV/m,这说明逆相序排列方式下的工频电场对周围环境影响最小。

3.2 与工频电场限值的比较

输电线路的工频电场限值方面,我国电力行业设计规范^[13]中,对被跨越的非长期住人建筑和邻近民房,要求控制离地 1.5 m 处未畸变电场不超过 4 kV/m。相关技术规范^[14]与国际非电离辐射防护委员会(ICNIRP)中的推荐值^[15]保持一致,以 4 kV/m 作为居民区工频电场评价标准。按线路走廊边缘场强小于 4 kV/m 的标准确定走廊宽度。此外,从环境保护出发,对于线路跨越的一般地区,如公众容易接近的地区、跨越公路处,场强限值取 7 kV/m;跨越农田时,场强限值取 10 kV/m。

3 种导线布置方式下地面的最大电场强度、高场强区域的分布与范围比较如表 1 所示。

表 1 3 种导线排列方式下地面 1.5 m 处场强对比

排列方式	同相序	异相序	逆相序
最大场强/(kV·m ⁻¹)	8.13	4.74	4.04
高于 4 kV/m 的宽度/m	40.5	23	2.5
高于 3 kV/m 的宽度/m	47	41	28

从表 1 可知,在最高运行电压下,3 种导线排列方式线路下方最大场强均小于 10 kV/m^[16,17]。同相序布置时线路下方场强超过 4 kV/m 的宽度为 40.5 m,在边相导线对地投影点外侧 13 m 处满足该限值要求。与同相序排列相比较,由于换位后的相位矢量差,后 2 种排列方式的电场强度整体大幅降低,高场强区的宽度明显减小,最大场强分别减小约 42% 和 50%,且逆相序排列下最大场强为 4.04 kV/m。电场超过 3 kV/m 的宽度,异相序排列减小了 15%,逆相序减小了 40%。

在本文所考虑的 3 种导线布置中,后 2 种布置方式下的电场强度较同相序布置降低显著,特别是逆相序排列。对于大部分区域处于野外的线路,3 种导线布置方式下地面场强均满足相关标准中小于 10 kV/m 的规定,但同相序下地面最大场强大于 7 kV/m,超出了相关标准中规定的限值,因此对于途经居民区的双回线路,推荐采取逆相序排列以改善线路周围电磁环境,此外采用逆相序布置还可节省线路走廊,适量降低导线设计高度可节约工程造价。

4 结束语

(1) 按实际尺寸建立典型 500 kV 直线转角杆塔同塔双回线路 1:1 精细化模型,采用有限元软件参数化建立导线模型,进行混合网格划分以节省单元量,获得线路周围三维电场分布,铁塔对各相电场存在屏蔽作用,其附近地面的场强有所减小。

(2) 导线对地高度等条件不变时,双回路采用同相序布置时地面场强最大,异相序次之,逆相序最小。同相序布置线路下方场强超过 4 kV/m 的宽度为 40.5 m。后 2 种布置下最大场强分别减小约 42% 和 50%。

(3) 相比于同相序,采用逆相序布置有利于线路跨越民居时电磁环境改善,节省线路走廊,降低工程造价。

参考文献:

- [1] 卢铁兵,肖 刊,张 波,等.超高压输电线路铁塔附近的三维工频电场计算[J].高电压技术,2001,27(3):24-26.
- [2] 彭 迎,阮江军.模拟电荷法计算特高压架空线路 3 维工频电场[J].高电压技术,2006,32(12):69-73.
- [3] 俞集辉,周 超.复杂地势下超高压输电线路的工频电场[J].高电压技术,2006,32(1):18-20.
- [4] 曾庆禹.特高压输电线路地面最大工频电场强度和导线最大弧垂特性[J].电网技术,2008,32(6):1-7.
- [5] 韦 钢,李海峰.同杆并架多回线下方的电场强度和感应电压[J].中国电力,1999,32(3):37-40.
- [6] 张家利,姜 震,王德忠.高压架空输电线下工频电场的数学模型[J].高电压技术,2001,27(6):20-21.
- [7] 张 波,崔 翔,卢铁兵,等.超高压输电线路铁塔附近三维电场的数值计算[J].电网技术,2003,27(7):5-8.
- [8] 袁小娟,陈俊武,周志成,等.330 kV 线路复合绝缘子电位和电场分布的有限元计算[J].电瓷避雷器,2006,212(4):9-12.
- [9] 黄道春,阮江军,余世峰,等.特高压紧凑型输电线路工频电场强度计算[J].高电压技术,2006,32(7):69-71.
- [10] 罗永芬,韦加雄,何立柱,等.内电极和均压环配置法优化复合绝缘子的沿面电场和电位分布[J].电瓷避雷器,2009,227(1):7-11.
- [11] 倪正光,杨仕友,钱秀英.工程电磁场数值计算[M].北京:机械工业出版社,2004:47-53.
- [12] ROBERT G O, PAUL S.W. Characteristics of Low Frequency Electric and Magnetic Fields in the Vicinity of Electric Power Lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1992, 07 (4): 2046-2055.
- [13] GB 50545—2010,110~750 kV 架空输电线路设计规范[S].北京:人民出版社,2010:23-27.
- [14] HJ/T 24—1998,500 kV 超高压送变电工程电磁辐射环境影响评价技术规范[S].
- [15] 国家电力公司东北电力设计院.电力工程高压送电线路设计手册[M].北京:中国电力出版社,2003:27-33.
- [16] 邵方殷.我国特高压输电线路的相导线布置和工频电磁环境[J].电网技术,2005,29(8):1-7.
- [17] 张 伟,张佰庆,邵长一,等.带电更换 500 kV 直线转角塔绝缘子通用工具的研制[J].江苏电机工程,2014,33(6):58-60,64.

作者简介:

- 张佰庆(1978),男,江苏沛县人,高级工程师,从事输变电设备运行检修管理工作;
- 谢 伟(1985),男,湖北麻城人,助理工程师,从事输电运行检修管理工作;
- 康宇斌(1978),男,四川冕宁人,高级工程师,从事输电运行检修管理工作;
- 童维占(1982),男,湖北鄂州人,工程师,从事输电运行检修管理工作;
- 仲 彬(1987),男,江苏睢宁人,助理工程师,从事输电运行检修管理工作。

- (3) 轴瓦两侧的垫块间隙调整至标准值。
- (4) 调整高压缸动静部件同心度。
- (5) 将 1 号轴瓦的标高向上调整 0.09 mm。

4 机组修后情况

1 号机组 A 级检修后于 2014 年 2 月 11 日冲转至 3000 r/min, 目前机组负荷最大已达到 1030 MW, 各道轴瓦的轴振最大不超过 55 μm , 瓦振最大不超过 5.0 mm/s, 且振动情况非常稳定。同时根据修后 1 号轴瓦振动频谱的分析, 修前 1 号轴瓦一直存在的 25 Hz 分量, 现也基本消失。根据目前的机组运行情况, 可以认定 1 号机组 1 号轴瓦异常振动问题已得到圆满解决。

5 结束语

(1) 通过机组停运后揭瓦检查的情况, 确认了轴承安装缺陷、轴承承载较轻稳定性裕度不足、高压转子动静碰摩等 3 个方面因素是引起 1 号轴瓦振动异常的主要原因。但轴承承载较轻稳定性裕度不足、高压转子动静碰摩只应该引起轴瓦的轴振异常, 而不应该造成轴瓦的瓦振波动。在本次轴瓦振动异常过程中, 轴承承载较轻稳定性裕度不足、高压转子动静碰摩只是诱因, 轴承安装缺陷是造成轴瓦瓦振突然升高、机组跳闸的主因。这就要求在以后的轴瓦安装、检修过程中加强对

轴承安装质量的验收监督工作。

(2) 在问题的分析过程中, 公司技术人员通过多种方式进行验证, 确认在轴瓦异常振动时出现的高次谐波(见图 3)是真实的。这点与当前的主流观点(即轴瓦振动不应该出现 200 Hz 以上的高次谐波)相左。这就要求在需要将高频振动分量滤除前, 要确认其是否为虚假信号。

(3) 西门子技术 1000 MW 超超临界机组的高压缸缸体跑偏问题并非个案, 据了解在同类型机组上多次出现。其产生的原因以及对机组运行的影响还需要进一步地研究, 积累相关经验。

参考文献:

- [1] 张学延, 张卫军, 葛祥, 等. 西门子技术 1000 MW 超超临界机组轴系振动问题[J]. 中国电力, 2012, 45(5): 68-72.
- [2] 张学延. 汽轮发电机组振动诊断[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008: 1-89.
- [3] 施维新, 石静波. 汽轮发电机组振动及事故[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008: 19-53.

作者简介:

韩有阳(1965), 男, 江苏连云港人, 工程师, 从事火电厂汽轮发电机组生产技术管理工作;

陈思宁(1977), 男, 江苏连云港人, 工程师, 从事火电厂汽机专业技术管理工作。

Analysis and Solution of Bush Vibration Anomalies in One 1000 MW Steam Turbine Unit

HAN Youyang, CHEN Sining

(Jiangsu Xinhai Power Generation Co. Ltd., Liangyungang 222000, China)

Abstract: Vibration anomalies occurred on No. 1 bearing bush of one 1000 MW power unit after the unit was put into operation. Preliminary analysis, carried out during operation periods and combined with the bearing bush inspection after the unit was shut down, confirmed that the defects of bearing installation, the lack of bearing stability and the static and dynamic components rubbing of the high-pressure rotor were the main reasons for the bush vibration anomalies. Through analyzing the problems, corresponding solution measures were proposed. After implementing these measures, the bush vibration anomalies on No. 1 bearing bush were finally solved.

Key words: 1000 MW power unit; bearing bush; vibration

(上接第 66 页)

Electric Field Simulation Analysis on 500 kV Double-line Suspension Angle Tower

ZHANG Baiqing, XIE Wei, KANG Yubin, TONG Weizhan, ZHONG Bin

(Maintenance Branch of Jiangsu Electric Power Company, Xuzhou 221000, China)

Abstract: In this paper, a typical 500 kV double-line suspension angle tower is taken as the target for the analysis of magnetic field under transmission line. Three-dimensional refined model of tower is established in SolidWorks. The equal ratio modeling of insulation strings, grading ring and link plate are provided. Using finite element software the parameters of transmission lines are obtained. Through hybrid mesh generation the three dimension distribution of magnetic field around transmission lines is acquired. The magnetic field distribution analysis of transmission lines with 3 kinds of schemes, namely uniform phase order, inconsistent phase order and various phase order, are provided. The analysis results show that the magnetic field of transmission with uniform phase order has the maximum ground field strength while the inconsistent phase order has minimum ground field strength.

Key words: finite element method; double-line suspension angle tower; three-dimensional magnetic field; parameterized calculation; line corridor