

独立接地极改造为共用接地极方案研究

孔志达

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

摘要: 为解决直流输电工程接地极选址困难的问题及减少对环境的影响, 建议具备条件下优先考虑将已建独立接地极改造为共用接地极。对已建独立接地极要对其跨步电压、腐蚀寿命、最大温升、导体载流量等性能指标进行校核, 并根据校核结果确定相应的改造项目, 同时要重新评估接地极对交流电网、油气管道以及铁路设施的影响。

关键词: 独立接地极; 共用接地极; 改造; 性能指标; 环境影响

中图分类号: TM773

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2015)03-0112-06

Research on the Plan of Independent Earth Electrode Reconstructed to Common Earth Electrode

KONG Zhida

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: In order to solve the difficulties of earth electrode site selection and environment problems in DC transmission engineering, the proposed solution is to reconstruct independent earth electrode to common earth electrode. The main performance such as step voltage, corrosion life, maximum temperature rise, conductor capacity must be verified during the transformation period, and according to the verification results to determine the corresponding transformation project. At the same time, the effect of earth electrode on AC power network, oil and gas pipeline, railway facilities should be reviewed.

Key words: independent earth electrode; common earth electrode; reconstruct; main performance; environmental effect

单极大地回路方式是直流输电工程一种重要的运行方式, 需设置专用的直流接地极。但在电网规模逐渐增大而土地资源日益稀少的情况下, 接地极极址选择十分困难。且当几千安培直流电流在单极大地回路方式下以大地为返回通道时, 将对接地极周边环境造成一定影响。尤其对于广东、华东等电网规模庞大、土地资源稀缺且已有多回直流落点的地区来说, 以上问题更加尖锐突出, 是当前接地极工程中的难点。

一种有效的解决方法就是充分利用已建的直流接地极, 采用多回直流共用接地极^[1]或采用广域接地极^[2]的方式, 解决选址困难的问题并减少对环境的影响。目前, 广东、华东地区已建直流接地极中

部分初期已按共用接地极进行设计, 另一部分则按独立接地极进行设计。新建直流接地极如需与已建的独立接地极进行共用, 需对独立接地极的性能指标进行校核, 并根据校核结果确定相应改造项目, 同时也要重新评估接地极对周围环境的影响。

1 校核接地极性能指标

独立接地极改为共用接地极后, 其最大入地电流增大, 原独立接地极的部分性能指标可能不再满足要求, 需重新进行校核。独立接地极主要的性能指标包括: 跨步电压、腐蚀寿命、最大温升和导体载流量。

1.1 跨步电压

当入地电流自接地极向周围土壤流散时, 人在接地极附近行走将产生跨步电压。接地极最大允许跨步电压^[3]可表示为:

$$U_{pm} = 7.42 + 0.0318p_s \quad (1)$$

式中: U_{pm} ——最大允许跨步电压, V/m;

p_s ——表层土壤等效电阻率, $\Omega \cdot m$ 。

最大允许跨步电压只与表层土壤等效电阻率有关, 而与入地电流无关。因此无论是独立接地极还是共用接地极, 其跨步电压的限值是不变的。

接地极任意点跨步电压^[4]可表示为:

$$E_{xk} = \frac{\rho_m}{4\pi} \sum_{j=1}^f I_j S_{xj} \quad (2)$$

$$E_{yk} = \frac{\rho_m}{4\pi} \sum_{j=1}^f I_j S_{yj} \quad (3)$$

$$E_k = \sqrt{E_{xk}^2 + E_{yk}^2} \quad (4)$$

式中: E_{xk} 、 E_{yk} 、 E_k ——分别是任意点跨步电压在 x 、 y 方向的分量和模值, V/m;

p_m ——任意点所在层土壤电阻率, $\Omega \cdot m$;

I_j ——任意点离散电流, A;

S_{xj} 、 S_{yj} ——分别是任意点电场系数在 x 、 y 方向的分量, 它与接地极外形尺寸相关, m^{-2} 。

可知任意点跨步电压的计算值与入地电流、土壤电阻率、接地极外形尺寸均有关。最大跨步电压一般出现在接地极溢流密度最大地段处附近。

独立接地极改为共用接地极后, 随着入地电流增大而土壤电阻率、接地极外形尺寸均保持不变, 其跨步电压必然增大。如最大跨步电压高于限值要求则接地极必须进行改造。

1.2 腐蚀寿命

每个接地极在规定的运行年限里, 以阳极运行的总安时数^[4]可表示为:

$$F_y = F_1 + F_{2g} + F_{2j} + F_2 \quad (5)$$

式中: F_y ——总运行安时数, Ah;

F_1 ——单极运行时的安时数, Ah;

F_{2g} ——极强迫停运时的安时数, Ah;

F_{2j} ——极计划停运时的安时数, Ah;

F_2 ——双极运行时不平衡电流的安时数, Ah。

独立接地极改为共用接地极后, 以阳极运行的总安时数变为:

$$F_y = F_{y0} + F_{y1} \quad (6)$$

式中: F_y ——共用接地极的总运行安时数, Ah;

F_{y0} ——原接地极的总运行安时数, Ah;

F_{y1} ——新建接地极的总运行安时数, Ah。

直流接地极以阳极运行时, 接地极馈电棒会逐渐腐蚀损失。馈电棒截面选择除考虑正常载流外还应考虑在运行年限内的腐蚀损失部分。接地极馈电

棒可用运行安时数为:

$$F_{by} = \frac{W_i - W_z}{\nu} \times 8760 \quad (7)$$

式中: F_{by} ——馈电棒可用运行安时数, Ah;

W_i ——馈电棒总重量, kg;

W_z ——保证载流的馈电棒残余重量, kg;

ν ——馈电棒年腐蚀率, $kg/(A \cdot y)$ 。

当独立接地极改为共用接地极后, 如 $F_{by} < F_y$, 即原接地极馈电棒可供腐蚀的重量小于共用接地极以阳极运行时馈电棒需腐蚀的重量, 则接地极必须进行改造。

1.3 最大升温

当强大的直流电流持续地通过接地极注入大地后, 极址土壤的温度将缓慢上升。接地极附近任意点土壤温度^[5]可表示为:

$$\theta(t) = \theta_s (1 - e^{-k\frac{t}{T}}) + \theta_c \quad (8)$$

式中: $\theta(t)$ ——任意时间 t 的土壤温度, $^{\circ}C$;

θ_s ——接地极土壤稳态最高温度, $^{\circ}C$;

θ_c ——环境温度 ($t=0$), $^{\circ}C$;

T ——接地极热时间参数, s, $T = \frac{c}{2\lambda} \left(\frac{R_e A}{\rho}\right)^2$;

C 、 λ 、 ρ 、 R_e 、 A 分别代表土壤热容率、热导率、电阻率、接地电阻、接地极表面积;

k ——配合系数, s, $0 < k \leq 1$ 。

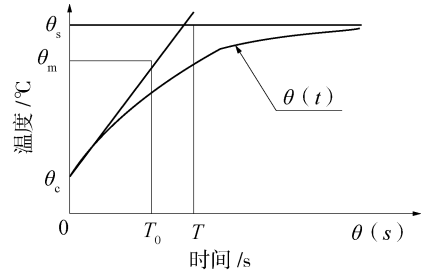


图1 接地极温升特性示意图

Fig. 1 Earth Electrode Temperature Rise Characteristic Diagram

任意时间的土壤温度均不应超过土壤稳态最高温度, 当土壤温度等于土壤稳态最高温度时, 接地极极限运行时间为:

$$t = -\ln \frac{\theta_c}{\theta_s} \times \frac{T}{k} \quad (9)$$

在接地极允许电位升不变的情况下, 接地极接地电阻与入地电流成反比关系。独立接地极改为共用接地极后, 其最大入地电流增大导致接地电阻减小, 而土壤电阻率、热容率、热导率、接地极表面

积等保持不变,则接地极热时间参数相应减小,从而导致接地极极限运行时间减小。如极限运行时间小于双回直流同时同极性单极大地回路运行的时间,则土壤温度将超过土壤稳态最高温度,接地极必须进行改造。否则需限制双回直流的运行方式,避免同时同极性单极大地回路运行或尽量缩短同时运行时间。

1.4 导体载流量

接地极导流线可采用架空线或地下电缆,为减少占用土地资源,目前导流线一般采用地下电缆。导流电缆的布置应与电极形状配合,以获得较好的电流分配特性。

导流电缆的载流量可表示为:

$$I_N = K_d \times K_t \times \frac{I_{max}}{n_1 \times n_2 \times n_3 \times k_1 \times k_2 \times k_3} \quad (10)$$

式中: I_N ——导流电缆载流量, A; I_{max} ——接地极最大入地电流, A; K_d ——考虑电流分配不平衡的系数,可取 1.1; K_t ——考虑一段电极停用的系数, $K_t = n_1 n_2 / (n_1 n_2 - 1)$; n_1 、 n_2 、 n_3 ——分别代表电极环数、每环电极分段数、每段电极电缆并联数; k_1 、 k_2 、 k_3 ——分别代表环境温度校正系数、土壤热阻校正系数、并行敷设校正系数。

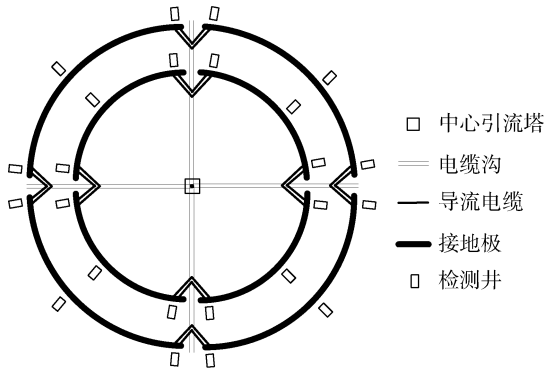


图2 导流电缆布置示意图

Fig. 2 Layout Diagram of Diversion Cable

独立接地极改为共用接地极后,其最大入地电流由原来的单回直流最大暂态电流增大至双回直流最大额定电流之和^[5]。如共用接地极导流电缆的计算载流量大于原独立接地极导流电缆的额定载流量,则接地极必须进行改造。

2 确定接地极改造项目

对独立接地极的主要性能指标进行校核后,不满足共用接地极技术要求的要对接地极本体进行相

应改造。具体的改造内容包括:极环改造、馈电棒改造、焦炭截面改造、导流电缆改造及中心汇流装置改造。

2.1 极环改造

对于采用共用接地极后最大跨步电压高于限值要求的情况,应对接地极极环进行改造。

根据式(2)~(4),随着入地电流增大而土壤电阻率保持不变,要保证跨步电压不超限值,则必须改变接地极极环的外形尺寸。在尽量不改动原接地极极环的前提下,改造可通过在原极环内部、外部增加极环或采用垂直接地极^[6]的方式来实现。

在内部新增极环可不占用新的土地资源,但要考虑极环间的电流分配不平衡。尤其是原接地极已是多环结构时,再增加内环效果并不明显。此时可以考虑在外环上加装电阻器,以均衡外环与内环之间的接地电阻差异,在总电流不变的情况下,部分原先流往外环的电流会流入内环,降低了外环的电流大小,从而降低接地极的最大跨步电压。

原接地极周围如有可供利用的土地,可在此再敷设一个极环并用导流线与原接地极极环进行连接。新旧两极环间距离应尽量拉大以减少相互间的屏蔽作用。

如原独立接地极已是多环结构且周围没有空余的土地,可考虑采用水平圆环接地极与垂直接地极混合的型式,在原接地极的外环处敷设垂直接地极并用导流电缆进行连接。垂直接地极的数量和深度根据极址地质情况经计算后确定。

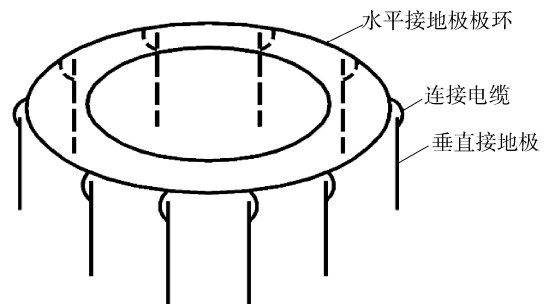


图3 垂直接地极布置示意图

Fig. 3 Layout Diagram of Vertical Earth Electrode

2.2 馈电棒改造

对于采用共用接地极后馈电棒的可用运行安时数小于共用接地极的总运行安时数,应改造原馈电

棒, 选择截面更大的馈电棒进行替换, 保证满足 $F_{by} > F_y$ 要求。但其施工停电时间较长且改造费用较高。

目前, 为减少接地极入地电流对周围环境的影响, 通过缩短直流工程投运初期单极运行时间、一极计划或故障停运时采用单极金属回线运行等方式, 接地极的总运行安时数大幅减少。同时, 设计方考虑接地极施工对馈电棒的机械强度要求, 馈电棒截面在考虑载流和腐蚀的因素后, 都会留有一定的裕度。因此, 独立接地极即使改造为共用接地极, 馈电棒一般也不需更换。

2.3 焦炭截面改造

接地极极限运行时间小于双回直流同时同极性单极大地回路运行的时间, 将使土壤温度超过稳态最高温度 (100°C), 土壤中的水分将被蒸发驱散, 容易导致接地极发生故障。

从式(9)可知, 为使接地极极限运行时间增大, 应增大接地极的热时间常数, 而热时间常数与包裹馈电棒的焦炭的表面积成正比关系。因此, 要解决接地极的温升过高问题应对焦炭截面进行改造, 通过增大焦炭的截面进而增大焦炭的表面积。

焦炭截面改造和馈电棒改造一样, 施工停电时间较长且改造费用较高, 而目前工程中单极大地回路运行时间又大幅减少, 因此一般不考虑改造焦炭截面。可通过调整运行方式避免双回直流同时同极性单极大地运行或缩短同时运行时间。

2.4 导流电缆改造

独立接地极改造为共用接地极后, 重新计算的导流电缆载流量如大于已敷设电缆的载流量, 则必须进行改造。对于与新建极环或垂直接地极连接的导流电缆, 可采用更大截面的电缆; 对于与原极环连接的导流电缆, 为不浪费已敷设的电缆, 可采用增加每段极环并联电缆根数的方法进行改造。改造时不用触及原有已敷设的电缆, 只需在原电缆通道旁将新增电缆直埋敷设即可。

2.5 中心汇流装置改造

独立接地极改造为共用接地极后, 接地极侧需安装隔离开关, 以便在其中一条接地极线路发生故障时能够进行隔离并便于维护, 同时确保另一条接地极线路的正常运行不受影响。改造时需要在极址中心汇流装置区域进行扩建, 新增构架及隔离开关操作平台, 增加部分永久占地。同时为保证人身安全, 施工期间需要限制已接入直流工程的单极大地

回路运行方式。

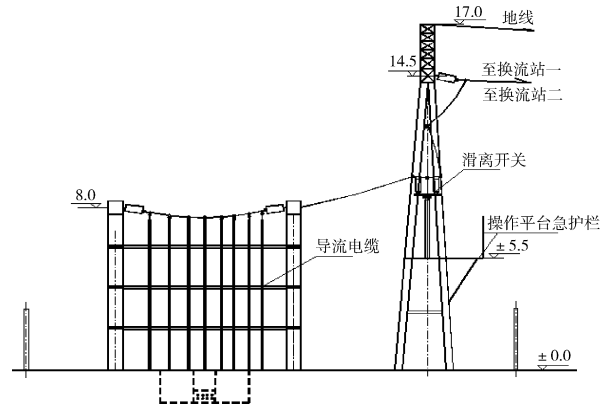


图4 共用接地极中心汇流装置断面图

Fig. 4 Cross Section of Center Confluence Device of Common Earth Electrode

3 重新评估环境影响

完成接地极改造后, 由于最大入地电流增大, 需重新评估接地极对附近环境的影响。主要包括: 接地极对交流电网的影响^[7]; 接地极对油气管道设施的影响; 接地极对铁路设施的影响^[8]。

3.1 接地极对交流电网的影响

当直流输电系统采用单极大地回路方式运行时, 其附近地表都会存在一定的直流电位, 处于接地极周围不同位置的交流变电站, 由于其所在位置的电位大小不同, 处在同一网络结构中电气相连接的不同变压器的中性点会流过直流电流, 相当于分流了部分直流输送电流, 这是交流变压器中性点直流偏磁电流的来源。

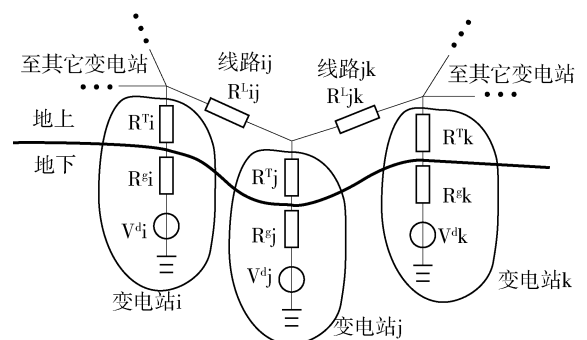


图5 交流系统直流分布的电路模型

Fig. 5 Circuit of DC Current Distribution Model in AC System

利用软件计算出接地极改造后周围区域的地电位分布, 对于电位升高于 3V 的变电站和与其在电气上相连接的其它变电站纳入计算范围^[5], 从而计

算出流经变压器中性点的直流电流。如计算值超出变压器允许的直流耐受电流(单相式取额定电流的0.3%;三相五柱式取0.5%;三相式取0.7%^[3]),则必须采取抑制措施。目前较为主流的抑制措施是在变压器中性点加装电容隔直装置^[9]。

3.2 接地极对油气管道设施的影响

接地极对周围油气管道的影响主要体现在以下三个方面:(1)对管道沿线人身安全的影响;(2)对管道设备安全的影响;(3)对管道的腐蚀影响。

1)对管道沿线人身安全的影响

仿真计算中,假定管道仅在末端接地,管道涂层完全绝缘,并未考虑在管道中间位置接地的情况,从管地电位差的角度,这是最保守的计算工况。

在接地极改造后的最大入地电流作用下,计算出管道沿线的管地电位差,将其幅值与直流安全电压的限值(潮湿环境下为35 V,干燥环境下为70 V^[10])进行比较,如超出限值要求则应采取防护措施。

2)对管道设备安全的影响

油气管道每隔一定距离设有线路截断阀室,阀室内主要设备是线路截断阀和旁通管线及附属仪表。截断阀及旁通管线与主管道相连,之间没有安装绝缘接头。阀室内部引压管与主管道通过绝缘垫片、卡套等组件进行绝缘。该绝缘组件的绝缘耐受水平一般为10 V。

计算出阀室所在位置的管地电位差,将其与绝缘接头的绝缘水平进行比较,如绝缘水平不满足要求则应采取加强绝缘的措施。

3)对管道的腐蚀影响

油气管道均设有PE防腐层,该防腐层的表面电阻率为 $10^5 \Omega \cdot \text{m}$,可认为管道对地绝缘,同时管道也采取了阴极保护措施。因此应按对地绝缘且已施加阴极保护的管道进行腐蚀影响评估。

按照文献[5]与文献[11]中的规定,要对管道进行腐蚀影响评估,需要计算管道的极化电位。而软件计算的管地电位并不是管道极化电位,它是由管道极化电位和土壤中的IR降^[12]组成的。实际的管道极化电位是指管道外覆盖层破损处与周围土壤形成的双电层电容电位。因此,只有从管地电位中消除土壤中的IR降,才能正确评价管道的腐蚀影响。而土壤中的IR降是土壤电阻率、涂层缺陷尺寸和流入涂层缺陷的电流密度等变量的函数,需要经过现场测试确定。

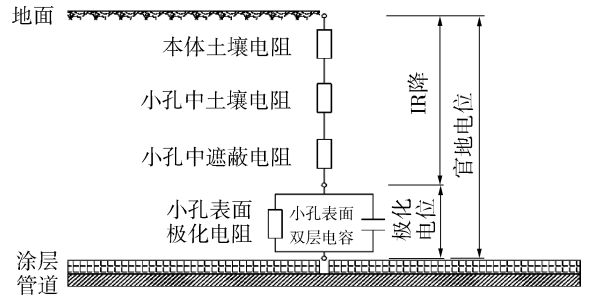


图6 管地电位等效电路

Fig. 6 Pipe to Earth Potential Equivalent Circuit

目前,管道极化电位的计算仍处于研究阶段,且计算精度不高,建模方式复杂,需要建立在一定的现场实测数据的基础之上。因此,对于管道极化电位仍需以实测数据为准。

将接地极改造后的管道极化电位的实测值与管道阴极保护准则要求($-0.85 \text{ V} \sim -1.20 \text{ V}$, CSE)进行比较,看是否在其范围内,如超出范围则表明接地极对管道的干扰程度为不可接受,管道应采取直流排流保护措施。

3.3 接地极对铁路设施的影响

接地极改造后应对附近铁路设施进行人身安全、通信信号电缆、信号系统、供电变压器以及金属物体腐蚀等项目的影响分析,具体内容见表1。对表中计算评估值超出限值要求的项目应采取相应的防护措施。

表1 接地极对铁路设施的影响分析

Table 1 Effect of Earth Electrode on railway facilities

序号	项目	限值要求	计算评估
1	对人身安全的影响	铁轨跨步电压满足: $U_s = 7.42 + 0.0159\rho_s$ $+ 0.0159\rho_r$ ρ_s : 地面电阻率 ρ_r : 铁轨电阻率	计算离接地极最近的铁轨处的地电位升
2	对通信及信号电缆的影响	1. 转移电压不应超过60 V; 2. 芯线对地电压不大于1800 V (1min)	1. 计算电缆接地点的地电位升; 2. 计算暂态电流作用下电缆沿线的地电位分布,取最大值
3	对信号系统的影响	两轨间的干扰电压不得大于5 V	计算暂态电流作用下两轨间的电位差
4	对供电变压器的影响	直流耐受电流: 单相式取额定电流的0.3%;三相式取0.7%	计算流过变压器的直流电流
5	对金属物体腐蚀的影响	泄漏电流密度小于 $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$	计算离接地极最近的铁轨处的泄漏电流密度

4 结论

为解决接地极选址困难问题, 减少接地极的环境影响范围, 推荐充分利用已有接地极, 采取共用接地极的方式。

对于已建的独立接地极, 要对其跨步电压、腐蚀寿命、最大温升、导体载流量等性能指标按共用接地极的要求进行校核。并根据性能指标校核结果, 对不满足共用接地极要求的相关部分进行改造。改造内容包括: 改变极环的外形尺寸、更换大截面的馈电棒、增大焦炭的截面积、更换大截面导流电缆或增加并联电缆根数、中心汇流装置增加构架及隔离开关操作平台等。

接地极改造后应重新评估对其周围环境的影响。主要包括: 接地极对交流电网的影响; 接地极对油气管道设施的影响; 接地极对铁路设施的影响。如不满足要求则应采取相关的抑制或防护措施。

参考文献:

- [1] 孙帮新, 陈辉祥. 高压直流输电共用接地极技术研究 [J]. 高电压技术, 2006, 32(12): 150-153.

SUN Bangxing, CHEN Huixiang. Common Grounding Technique Used in the HVDC [J]. High Voltage Engineering, 2006, 2(12): 150-153.

- [2] 王建武, 张劲松, 李岩, 等. 广域接地极方案初步研究 [J]. 高压电器, 2010, 46(12): 25-28.
WANG Jianwu, ZHANG Jingsong, LI Yan, et al. Primary Research on HVDC WAN Grounding Electrode [J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(12): 25-28.
- [3] DL/T 437—2012, 高压直流接地极技术导则 [S].
- [4] 赵晚君. 高压直流输电工程技术 [M]. 2版. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [5] DL/T 5224—2014, 高压直流输电大地返回系统设计技术规范 [S].
- [6] 王建武, 杜忠东, 李家源, 等. UHVDC 垂直接地极技术经济性分析 [J]. 高电压技术, 2006, 32(9): 59-61.
- [7] 曾嵘, 张波, 赵杰, 等. HVDC 地中直流对交流系统的影响及规律分析 [J]. 高电压技术, 2009, 35(3): 678-682.
- [8] 郭剑. 直接地极对电气化铁路的电磁影响 [J]. 高电压技术, 2013, 39(1): 241-250.
- [9] 曾嵘, 赵杰, 尚春, 等. HVDC 地中直流对交流系统影响的防范措施 [J]. 高电压技术, 2009, 35(4): 919-925.
- [10] GB/T 3805—2008, 特低电压(ELV)限值 [S].
- [11] GB 50991—2014, 埋地钢管管道直流干扰防护技术标准 [S].
- [12] 翁永基, 李相怡. 埋地管道阴极保护电位 IR 降评估方法的研究 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 2004, 16(6): 360-362.

(责任编辑 郑文棠)

(上接第 111 页 Continued from Page 111)

自从该工程在 2012 年 9 月通过 720 h 试运行投产至今, 机组运行稳定, 汽轮机各项指标满足要求。该工程汽轮机选型方案的顺利实施为后续 200 MW 等级汽轮机的选型多提供了一种方案选择, 也为后续同类项目的实施提供了参考。

参考文献:

- [1] GB 50660—2011, 大中型火力发电厂设计规范 [S].
- [2] GB/T 754—2007, 发电用汽轮机参数系列 [S].
- [3] 周菁, 段学友. 汽轮机启动方式特点研究与探讨 [J]. 电站系统工程, 2008, 25(6): 34-36.
ZHOU Jing, DUAN Xueyou. Research and Discussion on Turbine unit Start-up mode and Characteristics [J]. Power System Engineering, 2008, 25(6): 34-36.
- [4] 李跃奇, 杨剑永. 国产亚临界 350 MW 汽轮机经济性分析 [J]. 东北电力技术, 2008(6): 20-22.
LI Yueqi, YANG Jianyong. Economic Analysis on Home-made Subcritical 350 MW Steam Turbine [J]. Northeast Electric Power Technology, 2008(6): 20-22.
- [5] 陈显辉, 李曦滨, 吴其林, 等. 东方第八代 300 MW 汽轮机通流改造及性能评价 [J]. 东方汽轮机, 2010(3): 11-14.
CHEN Xianhui, LI Xibin, Wu Qilin, et al. The Reform of

Steam Path and Rating of Merit for Dongfang VIII 300 MW Steam Turbine [J]. Dong Fang Turbine, 2010(3): 11-14.

- [6] 胡光明, 徐仿优, 刘光耀, 等. 沙角 A 电厂 300 MW 机组节能诊断分析 [J]. 热力发电, 2010, 39(6): 5-10.
HU Guangming, XU Fangyou, LIU Guangyao, et al. Diagnosis and Analysis of Energy Saving for 300 MW unit in Shao Jiao A Power Plant [J]. Thermal Power Generation, 2010, 39(6): 5-10.
- [7] 邵峰, 周胜男. 典型热力系统节能诊断分析 [J]. 热力发电, 2011, 40(7): 59-61.
SHAO Feng, ZHOU Shengnan. Diagnosis and Analysis of Energy Saving in Typical Thermodynamic System [J]. Thermal Power Generation, 2010, 40(7): 59-61.
- [8] 缪国钧, 葛晓霞. 典汽轮机轴封系统漏汽对机组经济性的影响 [J]. 汽轮机技术, 2007, 49(4): 305-307.
MIAO Guojun, GE Xiaoxia. Steam Turbine Shaft Gland System Leakage Steam Effect on unit Economic [J]. Turbine Technology, 2007, 49(4): 305-307.
- [9] 查冰峰. 200 MW 汽轮机通流部分改造及效果分析 [J]. 华中电力, 2008, 21(5): 40-43.
ZHA Bingfeng. The Reconstruction of the 200 MW Turbine flow Section and its Effect [J]. Central China Electric Power, 2008, 21(5): 40-43.

(责任编辑 林希平)