

文章编号: 1000-582X(2013)01-092-06

变电站构架对接地网腐蚀诊断影响分析

刘渝根¹, 冷迪¹, 肖磊石², 田金虎³

(1. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400030; 2. 广东电网公司电力科学研究院, 广州 510000; 3. 重庆市电力公司检修分公司, 重庆 400039)

摘要: 接地网腐蚀诊断时的测量数据往往会受到站内钢型构架的影响, 从而影响诊断结果的准确性。基于接地网腐蚀诊断理论, 通过建立仿真模型分析站内构架数量、长度、布置位置、阻值对接地网腐蚀诊断结果的影响特征。结果显示: 无论构架数目、布置方式和跨距长度如何, 构架的存在会降低其附近故障支路的诊断灵敏度, 使诊断出的腐蚀支路腐蚀程度比无构架时降低, 但对远离构架的腐蚀支路的诊断结果基本无影响; 当连接于地网的构架等值电阻越大时, 对诊断结果干扰越小; 增加构架附近增大倍数不明显的支路作为开挖对象, 可提高诊断的准确率。

关键词: 变电站; 接地网; 腐蚀; 诊断; 构架

中图分类号: TM862

文献标志码: A

Analysis on the effect of substation structure on grounding grid corrosion diagnosis

LIU Yugen¹, LENG Di¹, XIAO Leishi², TIAN Jinhui³

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Corporation, Guangzhou 510000, China; 3. Maintenance Branch Company, Chongqing Electric Power Corporation, Chongqing 400039, China)

Abstract: The measured data of grounding grid corrosion diagnosis are often influenced by steel structural frames, and thus the diagnosis is inaccurate. Based on grounding grid corrosion diagnosis theory, the characteristics of structure frames number, length, layout location and resistance of the influence on the diagnosis result are analyzed by establishing the simulation model. The results show that regardless of the structural frames' number, layout location and span length, the existence of structural frames reduces the diagnosis sensitivity of fault branch which is near structural frames, making the extent of diagnosed branch corrosion is lower than that without framing. However, the diagnosed corrosion of the branch which is away from the structural frames won't be influenced. The bigger the resistance of the structural frames connected to grounding grid, the smaller the diagnosis result of interference. Choose the grounding grid branch which has no obvious increase multiples near structural frames as excavation object can improve the diagnostic accuracy.

Key words: transformer substations; grounding grids; corrosion; diagnosis; structural frames

收稿日期: 2012-08-15

基金项目: 国家创新研究群体基金资助项目(51021005)

作者简介: 刘渝根(1963-), 男, 重庆大学副教授, 主要从事高电压工程、电力系统过电压与接地技术的研究;
(E-mail)cd_yugen_liu@yahoo.com.cn.

发电厂、变电站接地网的好坏直接关系到站内设备和人身的安全^[1-3]。一般接地网是由埋于地下均压导体构成,由于施工时的焊接不良、接地短路电流动力、土壤多年的严重腐蚀使得均压导体之间出现电气连接不良,降低接地网接地性能。当发生接地短路时,可能使地电位异常升高或分布不均、破坏二次设备的绝缘等故障,造成严重的经济损失和社会影响。因此对接地网的腐蚀情况进行检测,及时发现并排除故障隐患显得尤为重要^[4-5]。

相关学者对接地网的腐蚀诊断做了大量理论研究。文献[6-7]通过探测地面磁场判断接地网导体支路故障情况;文献[8]基于分块诊断思想,采用节点撕裂的方法建立诊断方程,将粒子群优化算法与最小二乘法相结合求解诊断方程;文献[9-10]通过大量仿真计算对大中型接地网腐蚀优化诊断进行了研究;文献[11]对地网故障的可测性做了分析;文献[12]将接地网腐蚀诊断方法应用于变电站现场。

目前考虑到变电站构架的安全性、经济性、施工快捷性,在 220 kV 及以上等级的变电站中成钢结构构架的应用情况日益普遍^[13]。由于站内构架连于接地网的具体支路和节点并不明确,对其电阻也没有进行过计算与测量,使之难以直接考虑为地网拓扑结构的一部分来进行整体分析,以往接地网腐蚀诊断时均忽略了变电站内构架对地网腐蚀诊断的影响^[14]。因此有必要研究变电站内构架对接地网腐蚀诊断的影响特征,为接地网腐蚀诊断的工程实用化提供参考。笔者基于接地网故障诊断理论,建立构架和地网模型来研究站内构架对诊断结果的影响,并结合仿真结论设计现场试验对实际地网进行腐蚀诊断和开挖。

1 接地网故障诊断理论

忽略土壤、温度、湿度等因素的影响,将接地网视为纯电阻网络。根据接地网拓扑结构图建立诊断方程,通过比较接地网腐蚀前后支路电阻的变化量来判断接地网腐蚀情况。

假设接地网有 $n+1$ 个节点, b 条支路, m 条接地引下线,如图 1 所示。

设 \mathbf{A} 为选定一个参考节点后网络的关联矩阵; \mathbf{Y}_b 为支路导纳矩阵; \mathbf{Y}_n 为节点导纳矩阵; \mathbf{I}_b 为支路电流矩阵; \mathbf{U}_n 为节点电压列向量; \mathbf{I}_n 为节点的电流源列向量。

根据电网络理论建立如下方程^[11]:

$$\mathbf{Y}_n = \mathbf{A}\mathbf{Y}_b\mathbf{A}^T, \quad (1)$$

$$\mathbf{A}\mathbf{I}_b = 0, \quad (2)$$

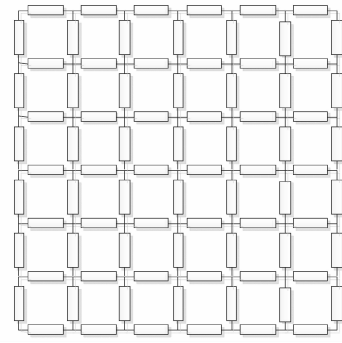


图 1 地网等效图

$$\mathbf{Y}_n\mathbf{U}_n = \mathbf{I}_n. \quad (3)$$

当网络支路 k 发生腐蚀时,其支路电阻 R_k 变为 R'_k ,即

$$\Delta R_k = R'_k - R_k. \quad (4)$$

此时网络的端口电阻 R_{ij} 变为 R'_{ij} ,即

$$\Delta R_{ij} = R'_{ij} - R_{ij}. \quad (5)$$

推导出端口电阻变化值和支路电阻变化值的关系为

$$\begin{cases} \Delta R_{ij(1)} = \frac{\sum_{k=1}^b \Delta R_k I'_{k(1)} I_{k(1)}}{I_0^2}, \\ \Delta R_{ij(2)} = \frac{\sum_{k=1}^b \Delta R_k I'_{k(2)} I_{k(2)}}{I_0^2}, \\ \dots \\ \Delta R_{ij(m)} = \frac{\sum_{k=1}^b \Delta R_k I'_{k(m)} I_{k(m)}}{I_0^2}. \end{cases} \quad (6)$$

2 构架对接地网腐蚀诊断的影响

变电站内构架通过接地引下线连于主网,相当于在地网拓扑图上增加了一条支路,但由于变电站内构架接于地网的具体支路和节点并不明确,使之不能直接作为地网拓扑结构的一部分进行诊断计算。因此,笔者在分析构架对诊断结果的影响时,保持接地网拓扑结构不变,仅考虑构架对端口电阻的影响。

通过在变电站实测得到 1 m 长接地网导体电阻为 0.67 m Ω ,建立 10 \times 10 接地网模型,如图 2 所示,假设各支路长度为 8 m,则支路导体的标称电阻值为 $R=5.36$ m Ω 。

在图 2 所示 10 \times 10 的地网图中,假设支路 45 (25-26 节点对)、50(30-31 节点对)、151(81-82 节点对)、155(85-86 节点对)4 条支路腐蚀,图中★所示,

其电阻增大值依次为 $10R$ 、 $5R$ 、 $5R$ 、 $10R$ 。

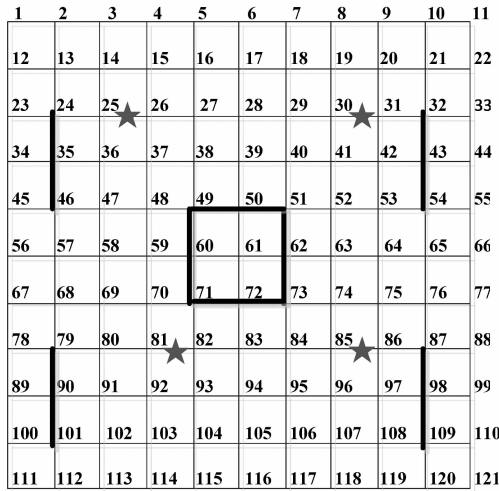


图 2 分布腐蚀支路位置示意图

采用不动点结合小分块大跨距测量原则进行诊断^[15],得到无构架影响时诊断结果如表 1 所示。由表 1 可见,尽管最终诊断出的电阻支路增大倍数与设定值有一定误差,但相比其他支路的电阻变化情况,4 条设定的腐蚀支路电阻增大倍数相对明显,即能准确诊断出腐蚀支路。

表 1 无构架影响时诊断结果

腐蚀支路	45	50	151	155
设定值	$10R$	$5R$	$5R$	$10R$
计算值	$7.5R$	$3.9R$	$3.3R$	$6.4R$
误差/%	25	22	34	36

2.1 单一构架对诊断结果的影响

假设构架长度两段支路长度,电阻值为其等长地网导体电阻值的 $1/2$ 。假设构架分别接于 24-46、79-101、32-54、87-109、49-51、49-71、51-73、71-73 节点对(如图 2 中粗实线所示),通过腐蚀诊断得到几种情况下的诊断结果如表 2 所示。

由表 2 可以看出,加入单一构架后,仍可以诊断出真实腐蚀支路,但距离构架最近的腐蚀支路电阻增大倍数明显降低,距离构架较远的腐蚀支路与无构架时的诊断结果基本一致,如 24-46、32-54、79-101、87-109 分别靠近腐蚀支路 45、50、151、155,各支路诊断结果分别比无构架时降低了 29.33%、33.33%、23.29%、23.44%。构架分别位于中间 4 处时,对附近腐蚀支路诊断倍数降低规律与前一致。

可见构架的存在降低了其附近腐蚀支路的诊断灵敏度,但对远处的腐蚀支路影响较小。

表 2 构架位于不同位置时诊断结果

构架位置	故障支路			
	45	50	151	155
无构架	$7.5R$	$3.9R$	$3.3R$	$6.4R$
24-46	$5.3R$	$3.8R$	$3.6R$	$6.1R$
32-54	$7.9R$	$2.6R$	$3.4R$	$6.2R$
79-101	$7.8R$	$3.9R$	$2.6R$	$6.4R$
87-109	$7.5R$	$3.9R$	$3.2R$	$4.9R$
49-51	$6.4R$	$3.2R$	$3.0R$	$5.8R$
49-71	$5.2R$	$3.6R$	$2.4R$	$6.0R$
51-73	$7.2R$	$3.2R$	$3.0R$	$5.5R$
71-73	$7.4R$	$3.7R$	$2.7R$	$5.4R$

2.2 多构架对诊断结果的影响

单一构架接于地网时对构架附近支路影响明显,为进一步验证,下面考虑多个构架存在时对故障支路诊断结果的影响情况。分别用①、②、③、④来分别代表构架接于 24-46、79-101、32-54、87-109 个位置。分别考虑地网中存在 2、3、4 个构架时诊断结果如表 3 所示。

表 3 多个构架存在时的诊断结果

构架位置	故障支路			
	45	50	151	155
无构架	$7.5R$	$3.9R$	$3.3R$	$6.4R$
①②	$5.3R$	$3.8R$	$1.9R$	$6.2R$
①③	$5.2R$	$2.6R$	$3.0R$	$6.2R$
①④	$5.3R$	$3.8R$	$3.3R$	$4.0R$
②③	$7.7R$	$2.6R$	$2.0R$	$6.3R$
②④	$7.8R$	$3.8R$	$2.0R$	$5.7R$
③④	$7.8R$	$2.6R$	$3.3R$	$5.5R$
①②③	$5.4R$	$2.6R$	$1.8R$	$6.3R$
①②④	$5.3R$	$3.8R$	$1.8R$	$5.7R$
②③④	$7.8R$	$2.7R$	$2.0R$	$5.6R$
①③④	$5.3R$	$2.6R$	$3.0R$	$5.5R$
①②③④	$5.3R$	$2.6R$	$1.7R$	$5.6R$

由表 3 可以看出:无论构架何种方式布置和数量多少,腐蚀支路附近有构架时,降低了该腐蚀支路

的诊断灵敏度,即诊断值小于无构架时的诊断结果,然而远处构架对该支路的诊断结果影响较小。可见,不考虑构架影响时往往忽略了诊断结果中增大倍数较小的支路,从而遗漏真实故障支路。因此,对于构架附近出现的增大倍数较小的支路也要考虑是否存在严重腐蚀的可能。

2.3 构架离腐蚀支路距离对诊断结果的影响

为研究构架对不同距离处腐蚀支路诊断结果的影响特征,设腐蚀区域为地网中间 61-62、61-72、72-73、62-734 条支路,电阻均增大倍数 10 倍,如图 3 所示,其中★表示的是腐蚀支路。

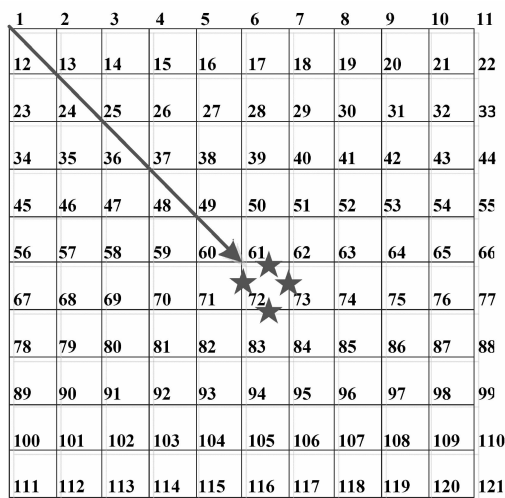


图 3 腐蚀支路位置示意图

构架位置分别为 1-23、13-35、25-47、37-59、49-71、61-83、50-727 个位置(图 3 中箭头方向离腐蚀区域由远至近)时诊断结果如表 4 所示。表中 D 为地网小网格对角线长度,构架位于此 7 个位置分别离故障区域的距离为 $5D, 4D, 3D, 2D, 1D, 0, 0$ 。

表 4 构架离腐蚀支路不同距离诊断结果

距离	故障支路			
	111	121	122	132
无构架	8.4R	9.3R	7.5R	8.1R
5D	8.2R	9.3R	7.7R	8.1R
4D	8.0R	9.4R	8.1R	8.1R
3D	7.0R	7.5R	8.2R	8.2R
2D	8.8R	8.3R	3.7R	0
D	9.3R	0.6R	4.4R	4.8R
0(61-83)	3.4R	1.7R	0	10R
0(50-72)	10R	0.3R	0	0.3R

由表 4 可见当构架离腐蚀区域较远时($5D$ 和 $4D$)对诊断结果基本没有影响,诊断结果与无构架时近似。随着构架逐渐接近腐蚀区域,当两者距离为 $3D$ 时故障支路 111、121 诊断倍数降低,但仍能诊断出腐蚀支路;当两者距离减小到 $2D$ 以内时不但个别支路的诊断结果严重偏小,而且 122、132 支路无法被诊断出,可见此时对诊断结果的影响最大。

因此,构架离腐蚀支路由远至近时对诊断结果的影响是一个渐变的过程,距离为 $4D$ 以上时基本无影响,当距离为 $3D$ 时显著降低了腐蚀支路的诊断灵敏度但仍能诊断出故障支路,当距离小于 $2D$ 时已不能完全诊断出所有腐蚀支路,而且距离越近腐蚀支路诊断灵敏度越低。

2.4 不同构架等值电阻对诊断结果的影响

构架长度不同、电压等级不同时,构架的等值电阻也有区别,假设选择构架接于 49-71 节点上,其等值电阻值分别取为与其等长地网支路电阻值的 0.25, 0.5, 0.75, 1, 1.5 倍,腐蚀区域为地网中间 61-62、61-72、72-73、62-734 条支路时,诊断结果如图 4 所示。

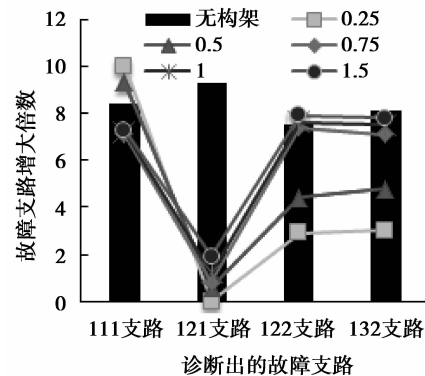


图 4 构架等值电阻故障支路诊断结果的影响

从图 4 可以看出,不同构架等值电阻计算出的增大倍数不一致,当构架电阻取值越大,各支路诊断结果越接近无构架时的诊断结果。这是由于接于地网的构架等值电阻相当于与地网导体等值电阻并联,其值越大时对地网导体等值电阻影响越小。因此当不考虑构架对地网拓扑结构的影响时,构架等值电阻越大对诊断结果的影响越小。

2.5 大跨距构架对诊断结果的影响

220 kV 以上的大型变电站占地较大,其进出线构架和母线构架也比较长,往往横跨五六个地网网格。假设在 24-90、32-98、26-92 节点有 3 条构架(分别用⑤、⑥、⑦表示),构架电阻取为与其等长地网支路电阻的 $1/2$,为 $16.08 \text{ m}\Omega$ 。对图 3 所示腐蚀支路,在有大大跨距构架时的诊断结果如表 5 所示。

表 5 大跨距构架存在时的诊断结果

故障支路	111	121	122	132
无构架	8.4R	9.3R	7.5R	8.1R
⑤⑥	10.0R	5.5R	3.4R	5.5R
⑤⑥⑦	4.4R	5.2R	3.4R	4.8R
⑦	8.0R	5.0R	8.2R	6.8R

由表 5 可以看出当大跨距构架接于地网时,预设腐蚀支路的诊断结果相对于无构架时普遍减小(仅个别支路在某种情况下偏大),其中当大跨距构架位于⑤⑥⑦时,支路 122 减小程度降低最大,仅为无构架时的 45%。可见大跨距构架同样对腐蚀诊断结果有较大影响,大跨距构架越多,诊断结果中故障支路降低的幅度就越大,受影响的故障支路就越多。

3 现场试验

结合前文研究结果,在某新建 220 kV 电站进行现场试验。变电站站内采用钢结构门型构架,图 5 为 110 kV 侧主要构架布置图,其中包括大跨距出线构架和小跨距门型构架。变电站接地网及接地引下线均采用直径为 20 mm 的圆钢,地网埋深 0.8 m。

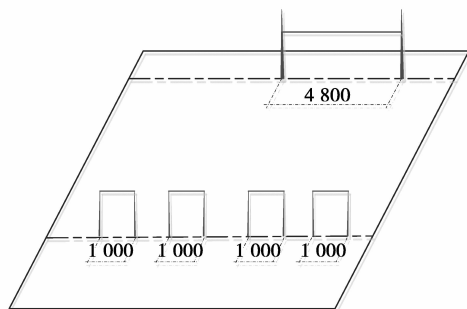


图 5 某 220 kV 变电站 110 kV 侧构架布置图

该站地网布置如图 6 所示,试验前预先人为制造两处腐蚀,其中一处是位于门型构架(图中虚线所示)附近 18 号支路(导体仅有 1/6 连接),另外一处为远离构架的 57 支路(导体锯断)。

腐蚀诊断时,采用不含构架的地网拓扑图建立诊断方程,现场测量得到端口电阻如表 6 所示,其诊断结果如图 7 所示。

由图 7 可以看出 57 支路增大倍数为 9.2,可以直接判定该支路有严重腐蚀。然而观察数据 13、17、18、52、54、68 号支路增大倍数不明显。当不考

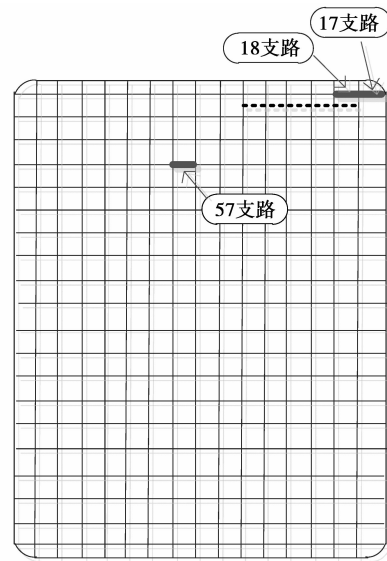


图 6 变电站地网图

虑构架的影响时可被忽略或判断为轻微腐蚀而不进行开挖排查。但是考虑构架影响后,由于 17、18 两条支路位于门型构架附近,极有可能为严重腐蚀支路但受到附近构架的影响而降低了诊断灵敏度。因此现场对 57、17、18、3 条支路进行开挖,找出了预设的 57、18 号故障支路,如图 8 所示。

表 6 现场测量的端口电阻值

节点对	电阻/mΩ	节点对	电阻/mΩ
46-42	3.457	44-43	4.075
46-43	3.843	44-45	3.570
46-44	3.826	44-46	3.826
46-45	3.109	44-41	4.137
46-41	3.103	11-51	4.746
46-13	3.676	11-46	4.608
46-12	5.531	11-45	4.577
44-16	3.220	11-44	5.127
44-14	3.580	11-43	4.989
44-42	3.871		

现场试验时考虑了构架会降低附近腐蚀导体诊断灵敏度这一因素,增加构架附近增大倍数不明显的支路作为开挖对象,可以提高诊断的准确率,一定程度弥补采用无构架的地网拓扑图带来的诊断误差。

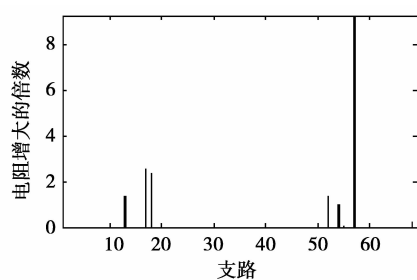
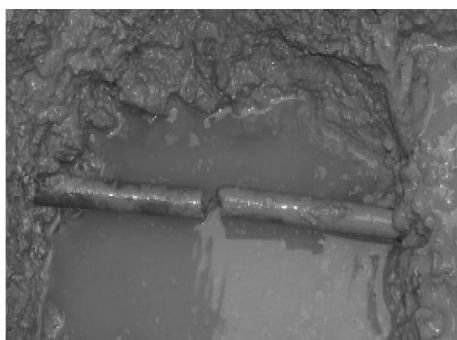


图 7 程序诊断结果



(a) 57号支路



(b) 18号支路

图 8 现场开挖图

4 结 论

1) 无论钢型构架数目、布置方式和跨距长度如何,构架的存在会降低其附近故障支路的诊断灵敏度,使诊断出的腐蚀支路腐蚀程度比无构架时降低,但对远离构架的腐蚀支路的诊断结果基本无影响。当构架和腐蚀支路区域距离减小到 $2D$ 以内时,会使诊断出的正确腐蚀支路数减少。

2) 当连接于地网的构架等值电阻越大时,对诊断结果越小。

3) 现场试验诊断时,增加构架附近增大倍数不明显的支路作为开挖对象,可提高诊断的准确率,一定程度弥补采用无构架的地网拓扑图带来的诊断误差。

参考文献:

- [1] 陈先禄,刘渝根,黄勇. 接地[M]. 重庆:重庆大学出版社,2002.
- [2] Colominas I, Navarrina F, Casteleiro M. Numerical simulation of transferred potentials in earthing grids considering layered soil models[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007,22(3):1514-1522.
- [3] Parise G, Lucheroni M. Measurements of touch and step voltages adopting current auxiliary electrodes at reduced distance[C]// Proceedings of the 2005 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Technical, May 8-12, 2005, Saratoga Springs, NY. Piscataway: IEEE Press, 2005:191-198.
- [4] 刘渝根,滕永禧,陈先禄,等. 接地网腐蚀的诊断方法研究[J]. 高电压技术,2004,30(6):19-21.
LIU Yugen, TENG Yongxi, CHEN Xianlu. A method for corrosion diagnosis of grounding grid[J]. High Voltage Engineering, 2004,30(6):19-21.
- [5] Hu J, Zeng R, He J L, et al. Novel method of corrosion diagnosis for grounding grid [C] // Proceedings of the International Conference on Power System Technology, December 4-7, 2000, Perth, WA. Piscataway: IEEE Press, 2000,3:1365-1370.
- [6] Zhang B, Zhao Z B, Cui X, et al. Diagnosis of breaks in substation's grounding grid by using the electromagnetic method [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2002, 38(2):473-476.
- [7] 刘洋,崔翔,赵志斌,等. 基于电磁感应原理的变电站接地网腐蚀诊断方法[J]. 中国电机工程学报,2009,29(4):97-103.
LIU Yang, CUI Xiang, ZHAO Zhibin, et al. Method of corrosion diagnosis of substations' grounding grids based on electromagnetic induction theory [J]. Proceedings of the CSEE, 2009,29(4):97-103.
- [8] 刘利强,罗先觉,王森,等. 接地网腐蚀分块诊断的混合优化算法[J]. 中国电机工程学报,2009,29(7):33-38.
LIU Liqiang, LUO Xianjue, WANG Sen, et al. Hybrid optimal algorithm for corrosion diagnosis for grounding grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2009,29(7):33-38.
- [9] 王硕,刘渝根,游建川,等. 大型接地网腐蚀优化诊断[J]. 重庆大学学报:自然科学版,2006,29(8):33-35,65.
WANG Shuo, LIU Yugen, YOU Jianchuan, et al. Erosion optimized diagnosis of brand grounding grid[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2006, 29(8):33-35,65.

(下转第 109 页)

- containing coal[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(4): 528-532.
- [13] 姜耀东, 祝捷, 赵毅鑫, 等. 基于混合物理理论的含瓦斯煤本构方程[J]. 煤炭学报, 2007, 32(11): 1132-1137.
JIANG Yaodong, ZHU Jie, ZHAO Yixing, et al. Constitutive equations of coal containing methane based on mixture theory[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(11): 1132-1137.
- [14] 谈庆明, 俞善炳, 朱怀球, 等. 含瓦斯煤在突然卸压下的开裂破坏[J]. 煤炭学报, 1997, 22(5): 514-518.
TAN Qingming, YU Shanbing, HU Huaiqiu, et al. Fracture of coal containing pressurized gas by sudden relieving[J]. Journal of China Coal Society, 1997, 22(5): 514-518.
- [15] 梁冰, 王泳嘉, 章梦涛. 含瓦斯煤的内时本构关系及其参数的实验研究[J]. 固体力学学报, 1996, 17(3): 229-234.
LIANG Bing, WANG Yongjia, ZHANG Mengtao. The study of endochronic constitutive equations of coal effected by gas and the determining of parameters by experiment[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 1996, 17(3): 229-234.

(编辑 郑洁)

~~~~~

(上接第 97 页)

- [10] Liu Y G, Xiao L S, Tian J H. Optimized corrosion diagnosis of large-scale grounding grid [C] // Proceedings of the 2010 IEEE Power and Energy Society General Meeting, July 25-29, 2010, Minneapolis, MN. Piscataway: IEEE Press, 2010: 1-6.
- [11] Liu J, Wang S Q, Ni Y F, et al. A new approach of testability evaluation for grounding grid corrosion diagnosis[C]// Proceedings of the Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, April, 2008, Nanjing, China. Piscataway: IEEE Press, 2008: 804-808.
- [12] 刘渝根, 吴立香, 王硕, 等. 大中型接地网腐蚀优化诊断实用化分析[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2008, 31(4): 417-420.  
LIU Yugen, WU Lixiang, WANG Shuo, et al. Practicality analysis for optimized erosion diagnosis of large and grid medium-scale grounding grid[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2008, 31(4): 417-420.
- [13] 狄乐夫. 钢结构变电构架设计[J]. 内蒙古石油化工, 2010, 36(24): 106-107.  
DI Lefu. Design of substation structural frames for steel[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2010, 36(24): 106-107.
- [14] 刘渝根, 徐峰, 刘小二, 等. 拓扑结构改变对接地网故障诊断的影响分析[J]. 高压电器, 2010, 46(12): 59-62.  
LIU Yugen, XU Feng, LIU Xiaoe, et al. Analysis on the influence of change of topology on the erosion diagnosis of grounding grids [J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(12): 59-62.
- [15] 刘渝根, 王硕, 田金虎, 等. 接地网腐蚀诊断优化测量方法[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2008, 31(11): 1303-1306.  
LIU Yugen, WANG Shuo, TIAN Jinhu, et al. A corrosion diagnosis method for optimized measurement of grounding grids [J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2008, 31(11): 1303-1306.

(编辑 王维朗)