

GIS铝合金材质壳体交流感应电化学腐蚀现象研究

张 猛, 吴雪峰, 王建西

(西安西电开关电气有限公司, 西安 710077)

摘要: 近年来,陆续发现运行过程中GIS铝合金壳体发生比较严重的腐蚀现象,笔者针对两起典型GIS不同部位铝合金外壳腐蚀事件开展研究分析,认为母线铝壳体上形成的环流和腐蚀部位积水即感应电位是诱导形成电化学腐蚀的主要原因,腐蚀缺陷处的环流电流密度决定腐蚀速率和腐蚀程度,通过阐述铝壳体电化学腐蚀产生的条件和机理,证明运行过程中的GIS铝合金壳体在一定条件下会发生交流腐蚀,并依此研探提出防范措施。

关键词: GIS铝合金壳体; 交流电化学腐蚀; 交流感应; 环流; 感应电位; 积水; 临界腐蚀电流密度

中图分类号: TM595

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2014)09-0001-05

Investigation into AC Induction Electrochemical Corrosion of GIS Aluminum Alloy Housing

ZHANG Meng, WU Xuefeng, WANG Jianxi

(XD Switchgear Electric Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

Abstract: Aiming at serious corrosion of GIS aluminum alloy housings during operation in recent years, the authors analyze two typical corrosion accidents at different positions of two GIS aluminum alloy housings. It is found that the electrochemical corrosion due to the circular current generated on bus's aluminum housing and the accumulated water at corrosion position (i.e. inductive potential) is the main cause of the accidents. The rate and degree of corrosion depends on the circulation current density at corrosion defect. The authors describe the conditions and principle of generating electrochemical corrosion of the aluminum alloy housing, prove that AC electrochemical corrosion of GIS aluminum alloy housing will occur during operation in certain conditions, and provide some countermeasures against the corrosion.

Key words: GIS aluminum alloy housing; AC electrochemical corrosion; AC induction; circulation current; inductive potential; accumulated water; critical corrosion current density

0 引言

金属材料由于交流感应产生电化学腐蚀现象常见于埋地油气管道工程,当埋地油气管路穿越高压输电线或与其近距离并行时,因在油气管路上可通过电容耦合、电阻耦合和电磁感应耦合3种方式使管道上耦合出交流电压,并会在油气管路外防护层缺陷处与大地形成通路,产生交流腐蚀,一般造成金属材料坑蚀^[1-2]。

随着气体绝缘金属封闭开关设备(GIS)广泛应用中国电力系统各电压等级变电站中,目前在国内

也陆续发现了数起GIS铝合金外壳因交流感应造成的电化学腐蚀事件,而至今在国内外鲜有相关研究报道。为了探明GIS铝合金外壳发生交流感应电化学腐蚀机理,使得GIS产品在设计、制造及安装施工过程中能够事先采取科学的预防措施,笔者针对两起GIS不同部位铝合金外壳腐蚀事件开展分析探讨,以期能为GIS设备长期安全带电运行提供该方面理论参考。

1 腐蚀现场分析

图1、2是一起550 kV GIS穿墙分支母线铝合金

外壳腐蚀现场图片,共发现C、B两相在相同壳体外侧部位处发生腐蚀,其中C相被腐蚀面积较大(约50 mm×80 mm),腐蚀深度较浅,约为1~2 mm,B相出现的腐蚀区域面积较小,约(ϕ 30~40) mm,但腐蚀比较严重,最深处约在(3~4) mm之间,两相铝壳体腐蚀特征是均为坑蚀。另一起发生在550 kV GIS主变压器上方伸缩滑动组件壳体交汇密封处,参见图3:腐蚀处有大量灰白色胶状腐蚀产物形成,连接母线壳体内壁沿密封环面的腐蚀处有多处连续线状坑蚀,使密封面失效造成SF₆气体泄漏。两起铝合金壳体腐蚀事件的共同特点是壳体腐蚀处曾经或一直处于积水中。



图1 C相穿墙母线腐蚀位置和外观

Fig. 1 Corrosion position and appearance of C phase bus bar

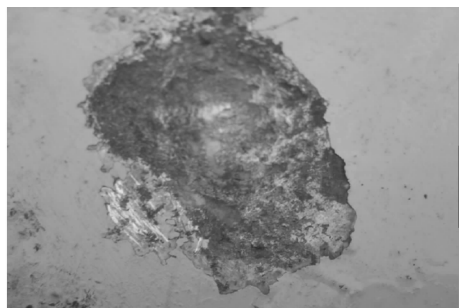


图2 B相穿墙母线腐蚀处外观

Fig. 2 Corrosion position and appearance of B phase bus bar



图3 伸缩滑动组件腐蚀位置和外观

Fig. 3 Corrosion position and appearance of flexible and sliding component

与其他金属相比由于铝合金材料在自然条件下表面会形成一层保护性氧化膜,故在大气中有较好的耐蚀性,铝合金长时间在中性溶液中局部一般会发生轻微点蚀,但点蚀孔的腐蚀量达到一个极限值后最终可能停止发展。目前GIS生产厂家壳体材料一般均使用铝镁系合金或铝硅镁系铸铝合金,而这类铝合金耐点蚀性能相对其他系铝合金好,在许多天然淡水中是耐蚀的^[3-4],因此积水长时间作用亦很难会造成如此大面积腐蚀,由此判断上述两起铝壳体腐蚀事件有可能是由于GIS交流感应产生的感应电流参与所造成的电化学腐蚀。

2 GIS感应电流和电压

在GIS系统中,母线封装于金属外壳中,母线与金属外壳之间存在电磁耦合,当母线有电流流过时,金属外壳上会产生感应电压。高电压等级的GIS外壳大多采用全连式多点接地方式连接,在GIS设备正常运行时,外壳上感应形成环流和涡流。多点接地的优点是:外部磁通少,感应过电压低,由于GIS外壳有2点以上的接地点,可靠性及安全性较高^[5-6],文中所分析的两起铝壳体腐蚀事件所涉及的550 kV GIS设备均采用该接地方式。GIS稳态运行时,各部位壳体上产生的环流电流值会不尽相同,但感应电压很低。GIS在开关操作和故障引起的快速暂态过程会在GIS内部经过折返射形成快速暂态过电压(VFTO),耦合到外壳上形成暂态地电位升高(TGPR)。DL/T 5352—2006《高压配电装置设计技术规程》规定,外壳和支架上的感应电压,正常运行条件下不应大于24 V,故障条件下不应大于100 V^[7]。

文[8]通过对溪洛渡550 kV GIS进行了仿真计算,在工作电流为4 000 A时,三相外壳与壳体短接铜排及接地铜排形成的回路之间在GIS设备两端的环流值最大,即接主变压器侧和连接出线套管一侧,此处外壳接地点的感应电流约在130~470 A之间,其中A、C两相感应电流值基本相近,B相较小,GIS外壳相间形成的感应电流在3 400 A左右。文中两起腐蚀事件一起发生在出线穿墙母线壳体处,另一起在连接主变压器附近一侧,恰是壳体母线环流值最大部位。

3 铝合金交流电化学腐蚀条件和机理

金属处于电解质体系中在交流电作用下可以诱导产生交流电化学腐蚀,交流腐蚀是在大小和方向变化的电场作用下进行的电化学反应,这个外施电场比起自然极化过程的内电场,在强度上要大的

多。在电介质中的金属结构,电流流入的部位,是阴极,不受腐蚀;在电流流出的部位是阳极,要遭受腐蚀。

交流腐蚀的必要条件是:①必须有不同电极电位的两电极;②两电极必须有导线连接;③两电极必须存在于同一电解质体系中;④电极上带有交流电位^[9-10]。

在电解质中的铝合金表面缺陷部位,当交流电处于正半周波时,缺陷处为阳极,处于缺电子状态,由于在电解质溶液形成浓差极化,去极化作用使得金属铝原子失去电子形成阳离子进入溶液,溶液中的阴离子如氢氧根离子、氯离子等会向缺陷表面处富集,而铝离子会与氢氧根离子结合形成胶体状的氢氧化铝即水合氧化铝,参见图4。

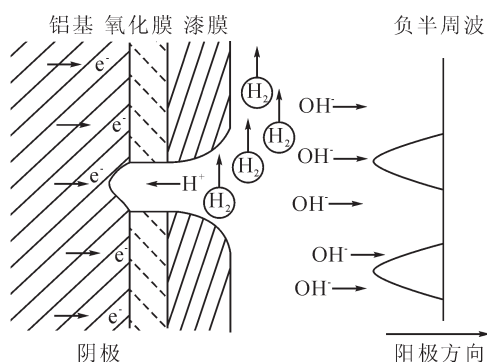


图4 缺陷部位处在交流半波为阳极时示意图

Fig. 4 Schematic diagram of defect place when semiwave is at anode position

当交流电处于负半周波时,缺陷处为阴极,处于富电子极,溶液中的阳离子向金属表面移动,由于铝离子已与氢氧根离子结合成水合氧化铝,大部分铝离子难以返回金属表面重新得到电子还原为铝原子,而溶液中带正电荷的氢离子在电场作用下迁移至金属表面富集并得到电子生成氢气,参见图5。

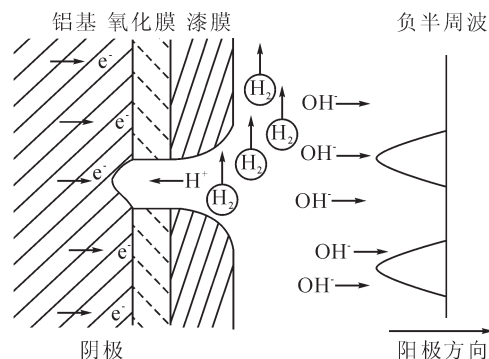


图5 缺陷部位处在交流半波为阴极时示意图

Fig. 5 Schematic diagram of defect place when semiwave is at cathode position

电极反应如下:

半波为正(阳)极时, $\text{Al} - 3\text{e} = \text{Al}^{3+}$;

半波为负(阴)极时, $2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e} = \text{H}_2 \uparrow + 2\text{OH}^-$ 。

一个交流周波在电极上两种反应交替进行,逐渐造成铝基上铝原子的损失,宏观上表象为铝基体的腐蚀。随着交流电化学腐蚀进程,溶液中铝离子和氢氧根离子浓度逐渐增加,氢氧根离子浓度会使铝基腐蚀电位下降及腐蚀区域附近氧化铝钝化膜的破坏,增大腐蚀区,同时在腐蚀表面会形成灰白色氢氧化铝水合物的沉积物。

通过模拟试验可以证实上述交流腐蚀机理,在自来水(电导率约为 $400 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)中插入带有漆膜缺陷的铝合金试片作为电极一端,缺陷直径约为 $\phi 0.5 \text{ mm}$,同时插入石墨棒为另一电极,两电极距离约为 15 mm ,在两极上引入交流电流,水中加入酚酞试剂,调节两电极上的交流电压并测量实验回路的电流,当电压升至 10 V ,电流达到 0.1 mA 时,可以明显观察到缺陷处有连续小气泡生成,同时缺陷处周围溶液开始微微变红,表明有气体生成及缺陷处pH值增大,参见图6。

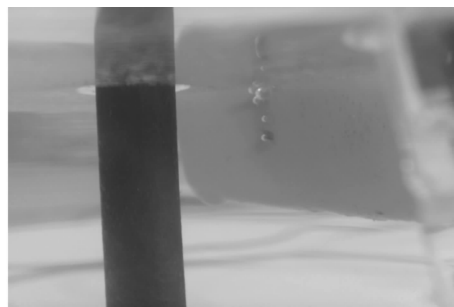


图6 铝壳体漆膜缺陷交流腐蚀模拟试验

Fig. 6 AC corrosion simulation test of aluminum housing painting defect

在同等条件下金属交流电腐蚀程度比直流电腐蚀要小,铝合金在同等条件下交流腐蚀程度约是直流腐蚀的40%以下^[11]流经腐蚀部位的交流电流密度、频率及波形都会影响交流腐蚀速率。文[12]通过试验证实铝合金1 000 h腐蚀失重拐点是 $0.077 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$,即腐蚀区域达到该临界电流密度时,1 000 h后可以明显观察到腐蚀失重,质量损失可达到 $1 \text{ mg} \cdot \text{in}^{-2}$ ($0.155 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$),该临界值与铝合金的种类牌号基本无关联。

4 现场铝壳体腐蚀原因分析

4.1 穿墙母线腐蚀

穿墙母线腐蚀部位示意图见图7,发生铝壳体腐蚀的三相穿墙母线所生成环流示意图见图8。从图7、8可以看出,腐蚀处母线壳体不仅受母线电流磁场作用,架空母线所产生的电磁场亦会对壳体有

感应作用,母线壳体上感应电流应比理论计算为之复杂。从等效电路示意图9可以看出,B相腐蚀处相当于在回流电路中通过电阻 R_6 、C相腐蚀处通过电阻 R_7 接地,该位置电阻值的大小由此处积液的电导率和壳体腐蚀处与铝制盖板之间最短距离以及缺陷面积决定,一般远远大于母线壳体电阻 R_1-R_5 。

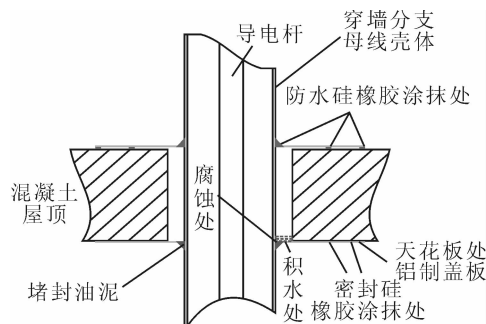


图7 穿墙母线腐蚀部位示意图

Fig. 7 Bus bar corrosion position schematic diagram

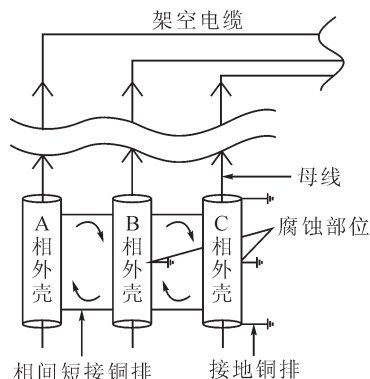


图8 穿墙母线腐蚀部位感应电流示意图

Fig. 8 Induction current schematic diagram of bus bar corrosion position

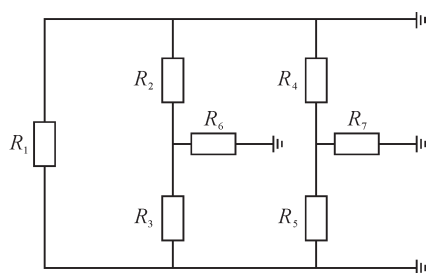


图9 穿墙母线交流感应电化学腐蚀等效电路图

Fig. 9 Equivalent circuit diagram of bus bar AC induction electrochemical corrosion

按照文中的腐蚀模拟实验方式,将涂覆有完好漆膜的试片置于自来水中施加交流电压至30 V,即使经过一周时间,回路中也无电流产生。说明即使壳体外部漆膜局部接触积水,在安全电压之下短时间内不会发生漆膜破坏形成交流腐蚀。现场铝壳体涂覆漆膜破坏有两种可能因素,一是漆膜破坏处用

油泥封堵盖板缝隙,油泥中的油脂对漆膜有溶胀软化作用,在积水浸泡的作用下,有水分子及溶液中离子穿透漆膜与基材接触导致壳体与铝盖板之间形成接地通道。另一种可能是GIS正常或故障状态下分合操作,在壳体上产生暂态过电压,将处于积水部位的漆膜击穿形成缺陷,造成电流通道。

假设漆膜缺陷面积为 S ,缺陷处与另一电极距离为 L ,积水电导率为 k ,则缺陷通道的电阻 R 为

$$R = \frac{L}{k \times S} \quad (1)$$

如果壳体上的感应电压为 U ,则流经缺陷处的电流密度 J 为

$$J = \frac{I}{S} = \frac{U}{R \times S} = \frac{U \times k}{L} \quad (2)$$

通过式(2)可以看出,腐蚀电流密度只与感应电压、电解质的电导率及电极距离相关,与缺陷面积大小无关,而温度会因影响电解质中离子迁移速度而改变溶液电导率,壳体感应电压高低与感应电流的大小及整个回路电阻和接地电阻值相关,感应电流较大的壳体区域感应电压也应相应比较高。

如果积水电导率为 $400 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$,母线壳体通过积水到达铝盖板的距离为1.5 cm,壳体上感应电压为1 V,则计算得知流经缺陷处的电流密度为 $0.267 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$,已是最小临界腐蚀电流密度的3倍,如果积水内污物较多使得水中电解质成分含量增大,则腐蚀电流密度还会增高。

4.2 滑动组件的腐蚀

原本受腐蚀部位滑动单元与母线壳体交汇处的密封圈起着绝缘作用,正常时此部位是开路,母线壳体和滑动单元上形成的感应电流是通过法兰之间的4根导流铜排和连接螺杆进行导流,但因为此处防尘套进水后造成积水,使得壳体上的感应电流可以经此处形成分流通路,参见示意图10、11。

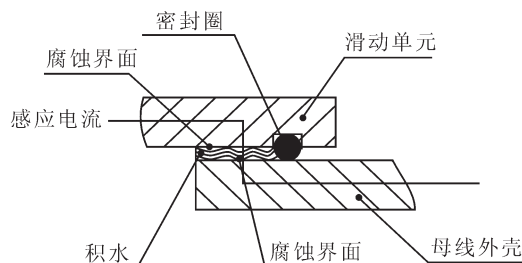


图10 滑动组件腐蚀部位示意图

Fig. 10 Sliding component corrosion position schematic diagram

积水的电阻 $R_2 \gg$ 导流排电阻 R_1 ,滑动单元上形成的感应电流大部分还是经导流铜排流走。假设此处积液电导率仍为 $400 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$,滑动单元与母线壳

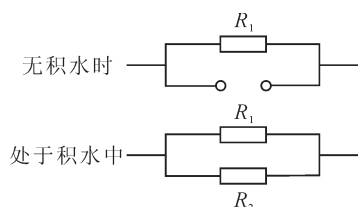


图 11 滑动组件腐蚀处等效电路图

Fig. 11 Equivalent circuit diagram of sliding component corrosion position

体之间实际最小距离约为1 mm左右,根据式(2)要达到最临界腐蚀电流密度的电位差理论上应在0.019 V之上。但考虑到腐蚀部位处在变压器出线端,此处回流电流也很大,腐蚀处两壳体之间的电位之差亦很容易达到该值使得该处发生电化学腐蚀。

5 结论

通过模拟试验和论证分析可以得到以下结论:

①GIS设备在运行过程中铝壳体存在交流感应电化学腐蚀的风险。GIS本身布局方式会在运行时在壳体之间产生交流感应形成环流,此刻在环流回路中某处存有积水,并且通过积水形成的回路中存有一定的电位差,就极有可能发生由交流感应引发铝壳体的电化学腐蚀;②交流感应电化学腐蚀速率与腐蚀区域流经的电流密度大小有关,电流密度一旦超过铝合金交流腐蚀电流密度临界点,腐蚀就会发生,而电流密度则主要取决于积水的电导率、电流由壳体通过积水两端的电位差和距离;③GIS电气设备壳体交流感应电化学腐蚀的特征是腐蚀面积和程度一般较大,会产生严重的坑蚀现象,同时腐蚀区域会伴有大量灰白色氢氧化铝水合物;④由于GIS电气设备结构和运行环境的限定,无法避免铝壳体环流的产生,故要防止设备壳体电化学腐蚀事件的发生,只有采取预防措施,防止在GIS设备外壳周边处生成积水,形成导流通道;⑤超高压和特高压的GIS、HGIS及GIL等产品,因现场布局相与相之间距离增大,特别是在三相负载不平衡时都会在母线壳体上产生较高的感应电流,并造成壳体上电势相对较高,增加了此类产品外壳在运行过程中的电化学腐蚀风险;⑥在壳体上形成的暂态过电压虽然幅值较高,可是频率亦较高,且持续时间非常短,不易造成壳体电化学腐蚀,但有可能是造成积水处壳体漆膜破损缺陷的主要原因。

综上所述,要避免GIS铝壳体因感应电位造成的电化学腐蚀,首先应防止整个产品的所有壳体部位周边不能有积水存在,产品在安装设计时,应根

据当地地理气候条件,充分考虑雨水排畅,凝露结水等因素,做好GIS产品预防积水的设计,同时合理布置母线回流导流排的位置,防止局部有较高的感应电位,在GIS设备安装过程中也应有意识注意有可能造成壳体周围积水的因素并采取相应预防应对措施,以确保GIS产品安全运行。

参考文献:

- [1] 董 亮,路民旭. 埋地管道交流腐蚀的研究进展[J]. 中国腐蚀与防护学报,2011,31(3):173-178.
DONG Liang,LU Minxu. Investigation progress of alternation current corrosion on buried pipelines[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection,2011,31(3):173-178.
- [2] 李自力,孙云峰. 埋地油气管道交流干扰腐蚀及防护研究进展[J]. 腐蚀科学与防护技术,2011,23(5):376-380.
LI Zili,SUN Yunfeng. Research progress of AC interference corrosion and protection of buried oil and gas pipelines[J]. Corrosion Science and Protection Technology,2011,23(5):376-380.
- [3] 朱祖芳. 铝合金阳极氧化与表面处理技术[M]. 北京:化学工业出版社,2004.
ZHU Zufang. Anodizing and surface treatment technology of aluminum alloy[M]. Beijing:Chemical Industry Press,2004.
- [4] 黄建中,左 禹. 材料的耐蚀性和腐蚀数据[M]. 北京:化学工业出版社,2003.
HUANG Jianzhong,ZUO Yu. The material's data of corrosion and anti-corrosion properties[M]. Beijing:Chemical Industry Press,2003.
- [5] 魏春林,王 勇. 220 kV GIS外壳感应电流和相关发热故障处理[J]. 电工技术,2010,161(4):61-62.
WEI Chunlin,WANG Yong. 220 kV GIS housing induced current and heat generation handling[J]. Electric Engineering,2010,161 (4):61-62.
- [6] 施 围,张亚婷,吕 鸿,等. GIS母线外壳环流与暂态地电位升高现象研究[J]. 陕西电力,2008,36(1):11-14.
SHI Wei,ZHANG Yating,LYU Hong,et al. Circulating current and transient ground potential rise phenomenon GIS enclosure[J]. Shaanxi Electric Power,2008,36(1):11-14.
- [7] 庞亚东,倪 敏. 1 000 kV GIS(HGIS)接地设计方案[J]. 电力建设,2010,31(1):49-52.
PANG Yadong,NI Min. Study on 1 000 kV GIS(HGIS) grounding design[J]. Electric Power Construction,2010,31 (1):49-52.
- [8] 郭 磊,范 冕,姚裕安. 550 kV GIS外壳感应环流特性的仿真分析[J]. 湖北工业大学学报,2012,27(1):74-78.
GUO Lei,FAN Mian,YAO Yu'an. Simulation analysis on the circulating current in bus enclosure of the 550 kV GIS[J].

(下转第 11 页)

- Voltage Engineering, 2011, 37(7):1719-1727.
- [8] 齐波, 李成榕, 郝震, 等. GIS 绝缘子表面固定金属颗粒沿面局部放电发展的现象及特征[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(1):101-108.
- QI Bo, LI Chengrong, HAO Zhen, et al. Evolution phenomena and features of surface partial discharge initiated by immobilized metal particles on GIS insulators[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(1):101-108.
- [9] REID A J, JUDD M D, STEWART B G, et al. Identification of multiple defects in solid insulation using combined RF and IEC 60270 PD measurement[C]//Proc. 9th IEEE International Conference on Solid Dielectrics. Winchester, UK: IEEE, 2007:585-588.
- [10] CLEARY G P, JUDD M D. UHF and current pulse measurements of partial discharge activity in mineral oil[J]. IEE Proceedings Science, Measurement and Technology, 2006, 153(2):47-54.
- [11] REID A J, JUDD M D, FOURACRE R A. Identification of simultaneously active partial discharge sources using combined radio frequency and IEC 60270 measurement[J]. IEE Proc. Science, Measurement and Technology, 2011, 158(5):102-108.
- [12] YOSHIDA M, KOJIMA H, HAYAKAWA N, et al. Evaluation of UHF method for partial discharge measurement by simultaneous observation of UHF signal[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, 18(2):425-431.
- [13] HOSHINO T, MARUYAMA S, NOJIMA K, et al. A unique sensitivity verification combined with real-time partial-discharge identification method[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(3):1890-1896.
- [14] HOSHINO T, KOYAMA H, MARUYAMA S, et al. Comparison of sensitivity between UHF method and IEC 60270 for onsite calibration in various GIS[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(4):1948-1953.
- [15] HIKITA M, OHTSUKA S, WADA J, et al. Propagation properties of PD-induced electromagnetic wave in 66 kV GIS model tank with L branch structure[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, 18(5):1678-1685.

丁登伟(1985—), 男, 博士, 工程师, 主要从事电力设备在线监测研究工作。

高文胜(1968—), 男, 副教授, 博士生导师, 从事电力设备在线检测和故障诊断方面的研究工作。

刘卫东(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 从事电力设备在线检测和故障诊断方面的研究工作。

(上接第 5 页)

- Journal of Hubei University of Technology, 2012, 27(1):74-78.
- [9] 李晓. 交流干扰对埋地管线钢腐蚀研究的影响[D]. 青岛:中国科学院海洋研究所, 2012.
- LI Xiao. Research on the influence of AC interference to the corrosion of buried pipeline steel[D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2012.
- [10] 丁清苗. 电化学方法研究交流干扰对埋地管线的影响[D]. 北京:中国石油大学, 2010.
- DING Qingmiao. Electrochemical study on the impact of the AC to buried pipeline[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2010.
- [11] 李自力, 杨燕. 金属材料交流腐蚀机理、影响因素及风险评价[J]. 化工学报, 2011, 62(7):1790-1799.
- LI Zili, YANG Yan. Mechanism, influence factors and risk evaluation of metal alternating current corrosion[J]. CIESC Journal, 2011, 62(7):1790-1799.
- [12] WILLIAM H. Alternating current corrosion of aluminum[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1973, PAS-92(6):2053-2062.
- 张猛(1963—), 男, 正高工, 硕士, 主要从事高压开关设备的研发设计。
- 吴雪峰(1961—), 男, 高工, 主要从事高压电器试验技术研究。
- 王建西(1963—), 男, 正高工, 主要从事高压开关设备的研发设计。