

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2015.09.009

## 基于千安级冲击电流的 GIS 电接触特性状态评估研究

李 雷<sup>1</sup>, 罗容波<sup>1</sup>, 王俊波<sup>1</sup>, 苗银银<sup>1</sup>, 鲁铁成<sup>2</sup>, 张 博<sup>2</sup>

(1. 广东电网公司佛山供电局, 广东 佛山 528000; 2. 武汉大学电气工程学院, 武汉 430072)

**摘要:** 为了准确测量并评估 GIS 导电连接件的电接触状态, 针对基于超级电容器产生的千安级冲击电流测量导电连接件回路电阻的测试方法, 提出依据回路电阻随测试电流增长的变化率大小来判断 GIS 触头电接触状态是否良好的评估判据。利用该方法对多种典型标准的 GIS 导电杆进行多触头串联验证试验以及 GIS 变电站现场验证试验。试验结果表明, 基于千安级冲击电流的 GIS 电接触状态的评估方法具有可行性和有效性, 比传统直流压降法更能反应导电连接件触头的电接触特性。

**关键词:** 导电连接件; 回路电阻; 超级电容器; 冲击电流; 电接触; 状态评估

### Assessment of GIS Electrical Contact State by Means of Kiloampere Grade Impact Current

LI Lei<sup>1</sup>, LUO Rongbo<sup>1</sup>, WANG Junbo<sup>1</sup>, MIAO Yinyin<sup>1</sup>, LU Tiecheng<sup>2</sup>, ZHANG Bo<sup>2</sup>

(1. Foshan Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Company, Guangdong Foshan 528000, China;

2. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** To accurately measure and assess the electrical contact state of GIS conductive connected component, the method for measuring the loop resistance of conductive connected component by means of kiloampere grade impact current generated by super capacitors was employed. It was proposed that the change rate of the loop resistance with increasing current can be taken as a criterion for the assessment of electrical contact state of GIS. Verification tests were conducted for some typical standard GIS conductive rods and GIS substations. The results show that the assessment method of GIS electrical contact state by means of kiloampere grade impact current is feasible and effective, and it can better reflect the electrical contact properties of conductive connected component compared to conventional DC voltage drop method.

**Key words:** conductive connected component; loop resistance; super capacitor; impact current; electrical contact; state assessment

## 0 引言

随着电力系统快速发展, 高电压大容量导电连接件被广泛使用, 最为典型的是 GIS 系统中的导电杆、高压断路器和隔离开关的动静触头等。导电连接件是电力系统中电气连接的关键, 直接影响着电网的供电可靠性, 保障其正常运行在电网可靠性和安全性等方面具有重要意义。

近年来, 虽然 GIS 导电连接件的制造工艺有了很大的改进, 但在 GIS 实际安装和运行过程中, 由于

内部导电杆插入深度不够, 断路器触头表面产生的氧化膜和毛刺以及隔离开关触头间压力不足等, 导致电网事故时有发生<sup>[1-3]</sup>。这些故障共同特征就是导电回路电阻偏大。

目前在工程中, 对于 GIS 导电连接件回路电阻的测量基本都是采用直流压降法, 通过开关电路等将 220 V 电压源转换为 100~500 A 的恒流电流源, 用做测量电流<sup>[4-5]</sup>。因测量电流较小, 不足以暴露出导电连接件触头的缺陷。从国内外的研究来看, 采用大电流测试更能准确地测量的导电杆的回路电阻以及判断其接触状态<sup>[6-7]</sup>。文中通过分析利用超级电容器产生的千安级冲击电流测量导电连接件回路电阻的方法, 研究相应电接触状态的评估方法和评估判

收稿日期: 2015-03-20; 修回日期: 2015-04-24

基金项目: 广东电网公司科技项目(K-GD2012-149)。

Project Supported by Science and Technology Project of Guangdong Grid Company(K-GD2012-149).

据,以期及时发现 GIS 系统的内部故障,避免导电连接件带病投入运行,确保 GIS 设备以最优化状态工作。

## 1 千安级冲击电流回路电阻测试方法分析

### 1.1 GIS 导电连接件回路电阻机理分析

GIS 导电连接件的回路电阻由连接件的接触电阻和连接电阻组成<sup>[8-14]</sup>。由于接触电阻远远大于连接电阻,因此导电回路电阻主要由接触电阻决定,而接触电阻由表面膜电阻和收缩电阻两部分组成。表面膜电阻是由接触点上导体表面氧化膜、硫化膜、油膜以及尘埃等形成,当接触处有足够压力和通过较大电流时,膜电阻将趋于零,这样导电连接件的接触电阻就由收缩电阻组成。收缩电阻形成见图 1,当两金属表面互相接触时,只有少数凸出的点发生了真正的接触,如当电流通过这些很小的导电斑点时,电流必然在连接处发生收缩现象。

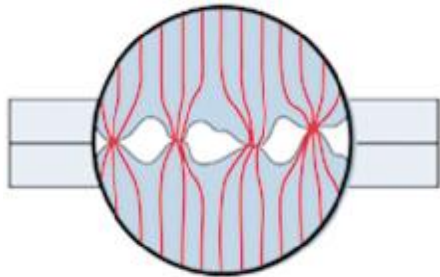


图 1 导体电阻与接触面接触情况示意图

Fig. 1 The contact situation of conductor resistance and the contact surface

当导电连接件正常连接时,接触处的接触点数足够多,其呈现的接触电阻很小,通过额定及以下电流时,接触电阻变化不大,能满足设计要求其温升不超过允许值;当导电连接件连接出现故障(连接不良)时,接触处的接触点数会大幅度下降,其呈现的接触电阻将增大,当连接处通过小电流时,这时接触点数的变化还影响不大,而当连接处通过较大而接近额定电流时,接触处的接触点将通过较大电流,由于温度升高会导致接触点变软,降低导电性能,使接触处的接触点数进一步减少,引起导电连接件的接触电阻会进一步增大,甚至导致故障发生。传统回路电阻仪的直流压降法因测试电流较小,并不能完全检测出这种缺陷,表 1 为弹簧触头在插入 48 mm 时(完全插入为 68 mm),通过 100 A 直流电流下,接触电阻及温度随电流持续时间不同的变化。从表 1 分析可知,即使通过长时间电流,导电连接件在较低温度下即达到热平衡,对接触点影响较小。因此为更准确检测导电连接件的真正连接状态,有必要提高测量电流,使其达到与导电连接件额定电流同一数量级。

表 1 接触电阻随电流持续时间不同的变化

Table 1 The different contact resistance with the change of current duration

持续时间/s	温度/°C	接触电阻/ $\mu\Omega$
10	22.0	14.22
100	22.2	14.23
550	22.3	14.23
1 050	22.3	14.25
1 710	23.3	14.28

### 1.2 千安级冲击电流的回路电阻测试基本原理

基于千安级冲击电流的回路电阻测量方法,是以超级电容器为基础的一种新型测量方法<sup>[15]</sup>。其等效电路图见图 2。

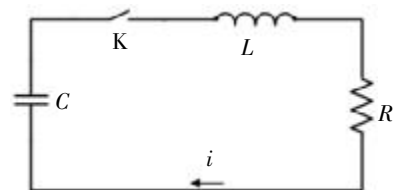


图 2 路电阻测量主放电回路等效电路

Fig. 2 Measurement the equivalent circuit of the main discharge loop based on loop resistant of ultracapacitors

图 2 中,超级电容器的电容量  $C$  很大,可达到数百法<sup>[16-21]</sup>,测量时,充满电荷的超级电容器对测量回路放电,产生高达数千安的冲击电流,这时由于回路中电感  $L$  极小,整个放电回路中的电阻主要取决超级电容器的等效内阻,其数量级为毫欧级,因此超级电容器的回路中的放电电流为非振荡的冲击电流。电容器电压从初始电压单调地衰减到零,一直处于放电状态,放电过程中回路电压公式为

$$L \frac{di}{dt} + ir = U_{c0} \quad (1)$$

对于电感的电压降,当  $\frac{di}{dt} = 0$  时,  $U_L = L \frac{di}{dt} = 0$ ,此时 GIS 导电杆的感性压降为零,导电杆回路的电压降信号为纯电阻压降,此电阻的大小将主要反映导电杆触头接触状况。冲击电流峰值  $I_m$ ,电流峰值时刻  $t_m$  对应的 GIS 导电杆的电压降为  $U_{tm}$ ,则被测 GIS 导电杆的回路电阻  $r$  可由式(2)计算得:

$$r = \frac{U_{tm}}{I_m} \quad (2)$$

## 2 千安级冲击电流的 GIS 触头电接触状态评估方法分析

### 2.1 状态评估方法的提出

通过对 GIS 导电连接件回路电阻机理以及大量的试验分析,表明其回路电阻随着放电电流的增加

有增大趋势,且接触状态越差回路电阻变化越明显。因此,可以根据回路电阻随着作用电流增长的变化率  $k$  的大小来判断 GIS 触头的接触状态。通过选取超级电容器在充电电压为 15、20、25 V (或 10、15、20 V) 所产生的冲击电流幅值下测量回路电阻,然后由测量的差值来计算出  $k$  值。由于冲击电流测量回路电阻为微欧级,而电流为千安级,两者数值差异较大,因此需将数据预先进行归一化处理。 $k$  值定义为

$$k = \frac{\overline{\Delta R}}{\overline{\Delta I}} \quad (3)$$

式(3)中: $\overline{\Delta R}$ 是归一化后两次测量的接触电阻差值; $\overline{\Delta I}$ 是归一化后两次测量的作用电流差值。电流电压的归一化方法采用式(4)。

$$y(k) = \frac{x(k) - \min[x(n)]}{\max[x(n)] - \min[x(n)]} \quad k=1,2,3 \quad (4)$$

式(4)中: $\min[x(n)]$ 表示样本数据  $x(n)$  的最小值; $\max[x(n)]$ 表示样本数据  $x(n)$  的最大值。

### 2.2 状态评估方法的可行性研究

选取弹簧触头在直流 300、400、500 A 以及超级电容器在充电电压为 15、20、25 V 所产生的冲击电流作用下,将触头 3 种接触状态情况下测量数据进行对比分析,计算回路电阻随着作用电流增长的变化率  $k$ ,其计算结果见表 2。其中直流电流为 10 s 内测得的数据,电流稳定,超级电容器释放的冲击电流持续时间约 1 s。

表 2 不同类型电流下,弹簧触头  $k$  值计算结果

Table 2 The  $k$  values of spring contact under different types of current

测试方法	弹簧触头接触状态	$k$ 值
千安级冲击电流法	完全插入	1.208
	插入深度 48 mm	1.451
	插入深度 28 mm	1.507
常规直流法	完全插入	0
	插入深度 48 mm	0
	插入深度 28 mm	1

由表 2 可知,由于直流电流的幅值远小于设备工作电流(千安级电流),其收缩电阻对电流的反应不灵敏,导致弹簧触头在完全插入和插入深度 48 mm 时接触电阻随电流增长时基本没有变化,即  $k$  为 0。在弹簧触头插入深度 28 mm 时,由于接触状态十分差, $k$  值才有所变化。而对于冲击电流,当触头接触良好时(完全插入)随着电流增长, $k$  值变化不大;当触头接触不良时(插入 48、28 mm)随着电流的增加,触头的收缩电阻变化很大,即  $k$  变化明显。因此,用  $k$  值反应触头的接触状态是可行的,冲击电流测试

方法较常规直流测试方法更容易发现触头接触不良的问题。

为了找出  $k$  的阈值以判断导电连接件接触状态,选用超级电容器在充电电压为 15、20、25 V 所产生的冲击电流作用下,对典型 GIS 设备标准导电杆触头以及高压隔离开关进行测量试验,计算得到的  $k$  值,见表 3。

表 3 冲击电流下,各触头  $k$  值计算结果

Table 3 The  $k$  values of spring contact under impact current

触头接触状态	$k$ 值	
完全插入	1.208	
弹簧触头	插入深度 48 mm	1.451
	插入深度 38 mm	1.529
	插入深度 28 mm	1.507
梅花触头	完全插入	1.383
	插入深度 40 mm	1.491
	插入深度 25 mm	1.538
自力触头	完全插入	1.205
	插入 20 mm	1.841
高压隔离开关	接触良好、无氧化膜	1.042
	松弹簧(轻)	1.112
	松弹簧(固定端完全松,刀口端未完全松)	1.856
	松弹簧(两端松)	1.917

由表 3 分析可知,通过对典型触头以及高压隔离开关在各种接触状态下的  $k$  值计算,当  $k$  值小于 1.4 时,表明触头接触状态良好;当  $k$  值大于 1.4 时,表明触头接触不良。基于千安级冲击电流回路电阻评估方法流程图见图 3。

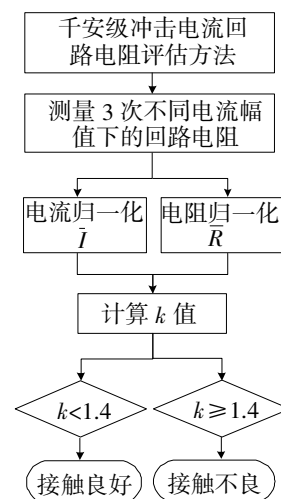


图 3 千安级冲击电流回路电阻评估方法流程图  
Fig. 3 Flow chart for assessment method of loop resistance based on impact current of kA class

### 3 千安级冲击电流 GIS 触头电接触状态评估方法的试验验证

为了验证  $k$  值反映GIS 触头接触状态的评估方法的可行性和有效性,进行了以下验证试验。

1)将多个触头串联起来,测量多个串联触头的接触电阻。串联连接时连接导线的接触电阻大于触头本身的接触电阻,研究能否通过  $k$  值反映典型 GIS 设备标准导电杆接触良好和接触不良时,相对微小回路电阻变化。

2)测量变电站实际运行的 110 kV GIS 回路电阻,验证基于千安级冲击电流的 GIS 触头接触状态评估方法在现场测量的可行性。

#### 3.1 多触头串联实验室验证试验

由于实际 GIS 中是由多个触头连接组成的,将 3 对典型 GIS 标准导电杆触头包括弹簧型触头(已经损坏)、自力触头型和梅花型触头两两组合,测量其串联组合的接触电阻,并通过 3 次电流法计算  $k$  值来判断触头的接触状态。冲击电流的充电电压为 10、15、20 V,弹簧触头和自力触头测量计算结果见表 4,弹簧触头和梅花触头测量计算结果见表 5,梅花触头和自力触头测量计算结果见表 6。自力触头和梅花触头串联试验接线图见图 4。

表 4 弹簧触头和自力触头测量计算结果

Table 4 Calculate result according to measurement of spring contact and self-contact

串联组合		充电电压			$k$ 值
		10 V	15 V	20 V	
1(x)+2(√)	I/A	837.262	1 306.471	1 535.746	1.429 7
	R/μΩ	1 169.50	1 209.76	1 211.42	
1(x)+2(x)	I/A	815.793	1 331.284	1 543.613	2.910 2
	R/μΩ	1 149.87	1 155.02	1 183.98	

表 5 弹簧触头和梅花触头测量计算结果

Table 5 Calculate result according to measurement of spring contact and plum contact

串联组合		充电电压			$k$ 值
		10 V	15 V	20 V	
1(x)+3(√)	I/A	817.342	1 275.517	1 540.536	1.430 3
	R/μΩ	1 002.20	1 024.26	1 048.56	
1(x)+3(x)	I/A	861.592	1 365.573	1 854.151	1.591 7
	R/μΩ	971.272	1 033.810	1 048.650	

表 4-6 情况类似,以表 6 为例,当梅花触头和自力触头组合测量时,由测量结果可知:当两个触头都接触良好时,两个触头总的回路电阻为 1 830 μΩ 左右,分别测量两个触头的接触电阻,梅花触头的接

表 6 自力触头和梅花触头测量计算结果

Table 6 Calculate result according to measurement of plum contact and self-contact

串联组合		充电电压			$k$ 值
		10 V	15 V	20 V	
3(√)+2(√)	I/A	645.660	758.424	944.348	1.349 9
	R/μΩ	1 834.620	1 835.580	1 840.630	
3(√)+2(x)	I/A	600.198	769.154	921.361	1.517 1
	R/μΩ	1 823.04	1 845.16	1 901.75	
3(x)+2(√)	I/A	589.586	749.078	889.454	1.715 0
	R/μΩ	1 942.640	1 950.810	1 984.080	
3(x)+2(x)	I/A	582.406	743.804	889.342	1.992 4
	R/μΩ	1 916.290	1 917.460	1 937.460	

注:表 4-6 中√表示触头接触良好,x表示触头接触不良;1 表示弹簧触头;2 表示自力触头;3 表示梅花触头。

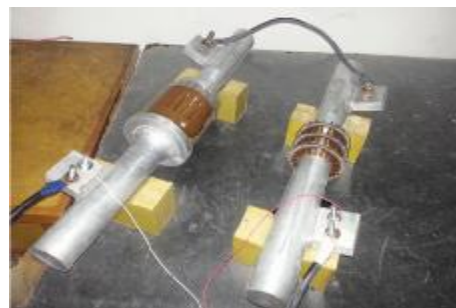


图 4 自力触头和梅花触头串联试验图

Fig. 4 Series connection of self-contact and plum contact 触电阻为 15 μΩ 左右,自力触头的接触电阻为 90 μΩ 左右,其连接导线以接触面的接触电阻为 1 700 μΩ 左右,其触头的接触电阻相对连接导线电阻时很微小的。当只有一个触头接触不良时,两个触头总的回路电阻为 1 900 μΩ 左右,其连接导线以接触面的接触电阻在 1 700 μΩ 左右保持不变。当两个触头均接触不良时,两个触头总的回路电阻为 1 910 μΩ 左右,分别测量两个触头的接触电阻,梅花触头的接触电阻为 20 μΩ 左右,自力触头的接触电阻为 170 μΩ 左右,其连接导线以接触面的接触电阻为 1 700 μΩ 左右也是不变的。因此  $k$  值能够反映典型 GIS 设备标准导电杆接触不良时,相对连接导线电阻微小的接触电阻变化。

由以上 3 组触头连接的接触电阻以及  $k$  值可知,当两对触头都是接触良好的情况时,接触电阻随着电流增长的变化率  $k$  值小于 1.4;当其中一对触头接触不良或者两对触头都接触不良时,接触电阻随着电流增长的变化率  $k$  值均大于 1.4。由此可知, $k$  值能够反映典型 GIS 设备标准导电杆接触不良时,相对连接导线电阻微小的接触电阻变化。

#### 3.2 现场验证试验

为了进一步验证该评估方法在现场测量的有效

性, 对某 110 kV 变电站新扩建的 110 kV GIS 回路电阻进行现场测试。利用冲击电流测量 GIS 中 A 相的接触电阻, 并通过三次电流法计算  $k$  值来判断 GIS 中触头的接触状态, 现场测试图见图 5, 计算结果见表 7, 表 7 中的  $k$  值为 1.013。



图 5 现场测试图

Fig. 5 Practical test site

表 7 现场测量计算结果

Table 7 Calculate result according to practical measurement

充电电压/V	冲击电流/A	回路电阻/ $\mu\Omega$
15	958.08	237.75
20	1 541.44	244.26
25	2 145.92	251.18

GIS 中 A 相的出厂值为  $230 \mu\Omega$  (允许范围为  $180\sim 285 \mu\Omega$ ), 通过直流 100 A 测量的回路电阻值为  $234.4 \mu\Omega$ , 通过直流 500 A 测量的回路电阻值为  $236.4 \mu\Omega$ , 随着作用电流的增大略有增大。通过冲击电流测量的回路电阻值为  $237.75\sim 251.18 \mu\Omega$ , 随着作用电流的增大也有增大, 而两次试验间的作用电流差达 600 A 左右, 最大电流峰值超过了 2 000 A。两种方法测量结果基本一致, 均能够准确测量出回路电阻的大小。根据文中提出的  $k$  值概念, 对该间隔测量得到的接触比为 1.013, 其值远小于 1.4, 可判断该间隔的接触状态为良好。该评估结果与实际情况一致。

#### 4 结语

通过理论分析、实验室试验验证以及现场试验验证等研究方法, 系统研究了基于千安级冲击电流的 GIS 电接触状态的测试方法和评估判据。利用 3 次增长测试电流的试验方法, 通过计算导电连接件回路电阻随测试电流增长的变化率来判定 GIS 系统的电接触状态, 以期发现 GIS 系统的内部故障, 避免导电连接件带病投入运行。分析和试验结果表明, 该方法具有可行性和有效性, 相比传统回路电阻仪更具优越性, 能更好地发现 GIS 导电连接件的故障, 是一种值得推广应用的方法。

#### 参考文献:

- [1] 林其雄, 曾志强. GIS 安装调试点滴谈[J]. 高压电器, 2001, 37(5):57-58.  
LIN Qixiong, ZENG Zhiqiang. Hints for installment and debugging of GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2001, 37(5): 57-58.
- [2] 谢志杨. 母线导体插入深度不足导致 GIS 对地故障原因分析[J]. 高压电器, 2009, 45(3):160-163.  
XIE Zhiyang. Fault analysis on deficiency depth insert of GIS bus conductor[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(3): 160-163.
- [3] 梁明生. 220 kV 组合电器主回路直流电阻增大的原因分析[J]. 高压电器, 2006, 42(6):470-474.  
LIANG Mingsheng. Causal analysis of main circuit DC resistance increasing in a 220 kV gas-insulated metal-enclosed Switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2006, 42(6):470-474.
- [4] 张丽娜, 陈永义, 梁桂州. 关于 GIS 和 SF<sub>6</sub> 断路器的现场检测方法[J]. 高压电器, 2001, 37(3):47-48.  
ZHANG Lina, CHEN Yongyi, LIANG Guizhou. On the field detection of GIS and SF<sub>6</sub> circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2001, 37(3): 47-48.
- [5] 陈俊, 黄晓英, 曹作群, 等. 高压开关导电回路电阻测量方法的研究[J]. 电测与仪表, 2008, 45(8):24-25.  
CHEN Jun, HUANG Xiaoying, CAO Zuoqun, et al. Measurements study on the resistances in high-voltage switch contactor circuit[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2008, 45(8):24-25.
- [6] LANDRY M, TURCOTTE O, FOUAD B. Complete strategy for conducting dynamic contact resistance measurements on HV circuit breakers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(2):710-716.
- [7] ZOU Jiyan, ZHANG Zhangli, SONG Jinyan. Development of the 40 V hybrid super capacitor unit[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 41(1):311-315.
- [8] 杨光章, 继高, 鲍春燕. 铜表面硫化膜形成及其电接触特性[J]. 电子工艺技术, 1999, 20(3):36-38.  
YANG Guangzhang, JI Gao, BAO Chunyan. Research on sulphuret films of forming on copper surface and the electrical contact properties[J]. Electronics Process Technology, 1999, 20(3):36-38.
- [9] 肖湘莹, 赵彦. 金属全封闭开关主母线回路接触电阻的控制措施[J]. 高压电器, 2010, 46(9):92-93.  
XIAO Xiangying, ZHAO Yan. Control of contact resistance of main bus-bar circuit for GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(9): 92-93, 98.
- [10] 徐鹏, 秦华蔚, 郑树青, 等. 抽水蓄能机组发电机断路器回路电阻异常增大原因分析[J]. 高压电器, 2012, 48(3):90-94.

- XU Peng, QIN Huawei, ZHENG Shuqing, et al. Analysis of abnormal increase of circuit breaker resistance for pumped storage generator units [J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(3): 90-94.
- [11] 林 晶,张冠生.接触电阻数学模型研究[J]. 电工技术学报,1995(4):60-63, 45.  
LIN Jing, ZHANG Guansheng. A study of the contact resistance model [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1995(4): 60-63.
- [12] 曾 嵘,周佩朋,王 森,等.接地系统中接触电阻的仿真模型及其影响因素分析[J]. 高电压技术,2010, 36(10):2393-2397.  
ZENG Rong, ZHOU Peipeng, WANG Sen, et al. Modeling of contact resistance in ground system and analysis on its influencing factors [J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(10): 2393-2397.
- [13] 郭凤仪,王其平,孙鹤旭.无载合分小电流触头接触电阻增加的机理[J]. 电工技术学报,1998, 13(1):24-27.  
GUO Fengyi, WANG Qiping, SUN Hexu. The mechanisms of contact resistance increase of electrical contacts on making and breaking small currents under no-load [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1998, 13(1): 24-27.
- [14] 臧春艳,何俊佳,李 劲,等.密封继电器接触电阻与表面膜研究[J]. 中国电机工程学报,2008, 28(31):125-130.  
ZANG Chunyan, HE Junjia, LI Jin, et al. Contact resistance and surface film of sealed relay contacts [J]. Proceeding of the CSEE, 2008, 28(31): 125-130.
- [15] 罗容波,王 岩,黄松波,等.基于冲击电流的 GIS 导电杆回路电阻测量方法研究[J]. 高压电器,2013, 48(10): 46-50.  
LUO Rongbo, WANG Yan, HUANG Songbo, et al. Measuring loop resistance of GIS conductor Pole with impulse current method [J]. High Voltage Apparatus, 2013, 48(10): 46-50.
- [16] 孙家南,赵 洋,韦 莉,等.基于系统辨识的电化学超级电容器建模[J]. 高压电器,2012, 48(9):16-21.  
SUN Jianan, ZHAO Yang, WEI Li, et al. Modeling of electrochemical supercapacitor based on system identification [J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(9): 16-21.
- [17] 李 霄,胡长生,刘昌金,等.基于超级电容储能的风电场功率调节系统建模与控制[J]. 电力系统自动化,2009, 33(9):86-90.  
LI Xiao, HU Changsheng, LIU Changjin, et al. Modelling and controlling of SCES based wind farm power regulation system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(9): 86-90.
- [18] 龙锦壮,王克涛,赵 鑫,等.一种工程实用的 GIS 定量检漏方法[J]. 电网与清洁能源,2013, 29(6):67-70.  
LOMNG Jinzhuang, WANG Ketao, ZHAO Xin, et al. A practical engineering method for GIS leaking quantitative detection [J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(6): 67-70.
- [19] 朱培刚,梁炳婷,王 冶.导电、导磁与绝缘材质对变压器类产品运行可靠性的影响[J]. 变压器,2013, 50(4): 23-25.  
ZHU Peigang, LIANG Bingting, WANG Ye. Influence of conductive, magnetic and insulation materials to operation reliability of transformers [J]. Transformer, 2013, 50(4): 23-25.
- [20] 邓欢欢,张丹丹.串联超级电容器组动态电压均衡试验研究[J]. 电力电容器与无功补偿,2012, 33(5):64-68.  
DENG Huanhuan, ZHANG Dandan. Study on dynamic voltage balancing test of series super capacitor bank [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2012, 33(5): 64-68.
- [21] 高晓林.电容器大家族的新贵——超级电容器[J]. 电力电容器与无功补偿,2010, 31(6):26-28.  
GAO Xiaolin. New member of the capacitor family-ultra capacitor [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2010, 31(6): 26-28.
- 李 雷(1987—),男,硕士,助理工程师,主要从事电力系统电气试验工作。