

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.04.034

## 气体绝缘隔离开关开合母线转换电流试验的分析

范广伟, 樊楚夫, 黄实, 李刚, 李涛

(西安高压电器研究院有限责任公司, 西安 710077)

**摘要:** 隔离开关作为电力系统中的重要设备,其开合母线转换电流能力是该设备的重要选型参数。因此,隔离开关开合母线转换电流试验是必要的。文中结合相关标准,不仅对隔离开关开合母线转换电流的机理进行了论述,而且给出了在实验室进行该试验的试验原理;提出了GIS中气体绝缘隔离开关开合母线转换电流试验新的试验方法及试验回路。通过仿真分析及型式试验验证,该方法能够满足气体绝缘隔离开关开合母线转换电流试验的要求,试验参数符合标准GB 1985—2014及IEC 62271-102—2013的相关规定。

**关键词:** 隔离开关; 气体绝缘; 母线转换电流; 母线转换电压; 试验回路

### Analysis of Switching Bus-transfer Current Test of Gas Insulated Disconnect Switch

FAN Guangwei, FAN Chufu, HUANG Shi, LI Gang, LI Tao

(Xi'an High Voltage Apparatus Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

**Abstract:** Disconnecter is one of the important equipments in power system. The bus-transfer current ability is as an important parameter of the equipment selection. So the disconnecter's bus-transfer current switching test is necessary. This paper combines the relevant standards, not only for the mechanism of disconnecter switching bus-transfer current is discussed, and the test principle of in the laboratory is given, a new test method and test circuit is present for a gas insulated disconnecter in GIS switching bus-transfer current test. The simulation analysis and the type test verification show that the method can meet the requirements of gas insulated disconnecter switching bus-transfer current test. The test parameters are in accordance with the relevant provisions of the standard GB 1985—2014 and IEC 62271-102—2013.

**Key words:** disconnecter; gas insulated; bus-transfer current; bus-transfer voltage; test circuit

### 0 引言

在变电站中常用的高压开关设备包括断路器、隔离开关、接地开关等,其中隔离开关的数量众多,数量大概是断路器的3.3倍以上。隔离开关的主要作用是隔离电力线路,建立隔离断口。同时,在变电站的某些接线中,通过操作隔离开关实现转换母线的功能。如在双母线接线的变电站中,隔离开关在转换母线时,需要开合母线转换电流,其转换电流值通常小于或接近系统的额定负荷电流。一般情况下,隔离开关的分闸速度较慢,通常不设专门的灭弧装置,因此,在开断过程中燃弧时间会比较长。在GIS设备中,其产生的电弧会使得隔离开关的触头烧损,并出现金属颗粒飞溅,使得绝缘表面产生污

秽,会严重影响GIS的内绝缘,甚至影响GIS的安全运行<sup>[1-7]</sup>。所以,GIS中的气体绝缘隔离开关进行相关的开合母线转换电流试验是非常有意义的。

文中通过对隔离开关开合母线转换电流试验的研究,分析了隔离开关在开合母线转换电流过程的机理,针对气体绝缘隔离开关,采用了一种新颖的试验回路应用于开合母线转换电流的试验中,该试验方法和试验回路能够满足标准GB 1985—2014、IEC 62271-102—2013中对气体绝缘隔离开关开合母线转换电流的要求。

### 1 气体绝缘隔离开关开合母线电流的机理

GB 1985—2014及IEC 62271-102—2013中对气体绝缘隔离开关做出了相关的规定,其中额定母线转换电流是其额定电流的80%,通常不超过1 600 A。

额定母线转换电压随着产品电压等级的不同,主要分为10、20、30、40、100、400 V等。而预期TRV的波形应呈三角形,可以采用频率不低于10 kHz,预期振幅系数不小于1.5的(1-cos)波形的预期瞬态恢复电压。隔离开关开合母线转换电流试验的试验回路要求见图1<sup>[18-19]</sup>。

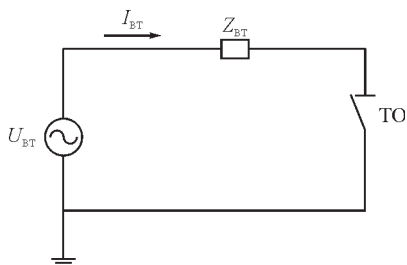


图1 试验回路原理图

Fig. 1 Schematic diagram of test circuit

在电力系统的实际应用中,根据工程计算往往也存在额定母线转换电流大于标准规定值的情况,如2 000、2 500、3 200 A等。由于气体绝缘隔离开关开合母线转换电流的额定母线转换电压较低,特别是10、20、30、40 V的情况,标准中对母线转换电压及母线转换电流的试验偏差要求均为0~10%,这样就对隔离开关进行开合母线转换电流的试验回路提出了更高的要求。

某变电站典型的双母线供电系统接线示意图见图2,根据图2分析隔离开关开合母线转换电流的原理及计算。其中供电回路的开关状态为QS<sub>1</sub>、QS<sub>3</sub>、QS<sub>4</sub>、QS<sub>5</sub>、QS<sub>6</sub>均处于合闸位置,而QS<sub>2</sub>处于分闸位置。母线M<sub>1</sub>的电流走向为QS<sub>1</sub>→QS<sub>6</sub>→QS<sub>5</sub>→QS<sub>4</sub>,母线M<sub>2</sub>的电流走向为QS<sub>1</sub>→QS<sub>3</sub>,如果母线M<sub>1</sub>进行检修或发生故障需退出运行时,QS<sub>4</sub>需要打开,这时开断的电流即为母线转换电流,QS<sub>3</sub>合闸即为闭合母线转换电流。隔离开关开合母线转换电流的等值电路见图3<sup>[20-21]</sup>。

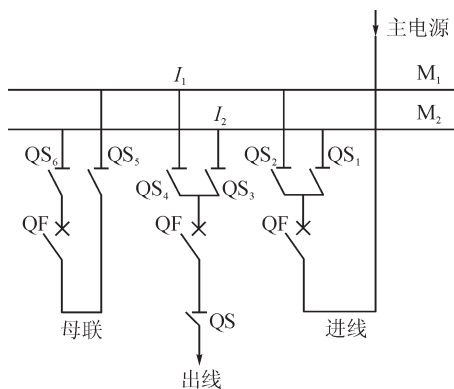


图2 开合母线转换电流系统图

Fig. 2 Switching bus-transfer current system chart

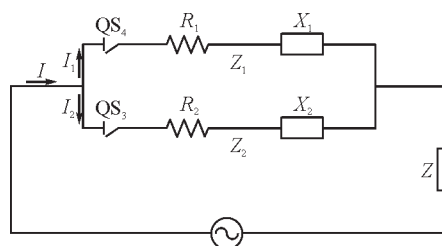


图3 等值电路图

Fig. 3 Equivalent circuit diagram

根据图3的等值电路,设母线M<sub>1</sub>路径的长度为L<sub>1</sub>,阻抗为Z<sub>1</sub>=R<sub>1</sub>+jX<sub>1</sub>,母线M<sub>2</sub>路径的长度为L<sub>2</sub>,阻抗为Z<sub>2</sub>=R<sub>2</sub>+jX<sub>2</sub>。计算隔离开关开合母线转换电流及母线转换电压。

1)开合的母线转换电流。

已知U<sub>1</sub>=U<sub>2</sub>,I=I<sub>1</sub>+I<sub>2</sub>,U<sub>1</sub>=I<sub>1</sub>Z<sub>1</sub>,U<sub>2</sub>=I<sub>2</sub>Z<sub>2</sub>,可得

$$\frac{I_2}{I} = \frac{Z_1}{(Z_1+Z_2)} = \frac{L_1}{(L_1+L_2)} = \frac{1}{1+\frac{L_2}{L_1}} \quad (1)$$

如果L<sub>1</sub>在实际运行中的长度明显长于L<sub>2</sub>时,则I<sub>2</sub>/I≈1,取I<sub>2</sub>=I,也就是说开断母线电流等于额定负荷电流。

2)断口工频恢复电压。

$$U_{QS}=I_1 Z_1=I Z_1 \quad (2)$$

由以上分析可知,隔离开关在开合母线转换电流试验时,既需要开断最大为额定负荷电流的母线转换电流,也需要在开断后承受母线转换电压。

## 2 试验原理

气体绝缘隔离开关的额定母线转换电压较低,通常为几十伏,如果采用通过变压器降压的方式实现,就需要一系列变比的变压器来满足标准中对不同额定母线电压的要求,而且变压器的阻抗应合适以适应隔离开关开断额定母线转换电流后的瞬态恢复电压(TRV)要求。使用降压变压器进行试验不仅需要特殊设计,成本也较高且灵活性较差。

基于以上原因,文中提出了采用负载分压法实现气体绝缘隔离开关开合母线转换电流的试验,以满足标准中对气体绝缘隔离开关开合母线转换电流试验参数的要求。试验原理图见图4。

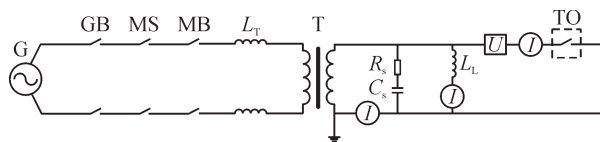


图4 试验原理图

Fig. 4 Schematic diagram of test

图4中:G为短路发电机;GB为发电机保护断路器;MS为选相合闸开关;MB为操作断路器; $L_T$ 为限流电抗器;T为短路变压器; $R_s$ 为阻尼电阻; $C_s$ 为调频电容; $L_L$ 为负载分压电抗器; $U$ 为试验电压测量; $I$ 为试验电流测量;TO为被试隔离开关。

由图4的试验原理图可知,试验回路电源侧功率因数不超过0.15,电源侧阻抗主要集中在变压器的低压侧以及变压器的内阻抗,设变压器的变比为 $K$ ,低压侧阻抗为 $Z_1$ ,变压器的内阻抗为 $Z_T$ ,则变压器高压侧的阻抗为 $K^2(Z_1+Z_T)$ ,其等值电路见图5。

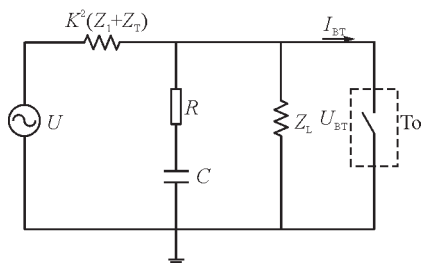


图5 等值电路图

Fig. 5 Equivalent circuit diagram

图5中: $I_{BT}$ 为额定母线转换电流,即试验电流; $U_{BT}$ 为额定母线转换电压,即试验电压。

在隔离开关处于合闸位置时,母线转换电流为

$$I_{BT} = \frac{U}{K^2(Z_1+Z_T) + (Z_{BT} \cdot Z_L)/(Z_{BT}+Z_L)} - \frac{U_{BT}}{Z_L} \quad (3)$$

通常隔离开关的回路阻抗值相对于负载电抗小得多,如果忽略试品的阻抗,则

$$I_{BT} \approx I = \frac{U}{K^2(Z_1+Z_T)} \quad (4)$$

隔离开关开断后的工频恢复电压(即母线转换电压)为

$$U_{BT} = I Z_L \quad (5)$$

可得电源侧电压与母线转换电压的分压比为

$$\frac{U}{U_{BT}} = \frac{K^2(Z_1+Z_T)}{Z_L} + 1 \quad (6)$$

试验回路瞬态恢复电压(TRV)的频率为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s C_0}} \quad (7)$$

式(7)中: $L_s$ 为电源侧电感; $C_0$ 为调频电容。

计算调频电容及阻尼电阻,根据试验回路经验公式调频电容可根据式(8)进行计算。

$$C_0 = \frac{8}{f_0^2 \cdot X} \quad (8)$$

当振幅系数为 $K_0=1.5$ 时,试验回路阻尼电阻根据式(9)进行计算。

$$R_0 = 6.6 f_0 \cdot X \quad (9)$$

### 3 仿真分析

根据以上的分析结果,文中采用Pscad/Emtdc电磁暂态仿真软件进行验证分析,仿真回路见图6。仿真时选取额定母线转换电压为10、20、30、40 V,额定母线转换电流为1 600 A<sup>[22]</sup>,见图7。

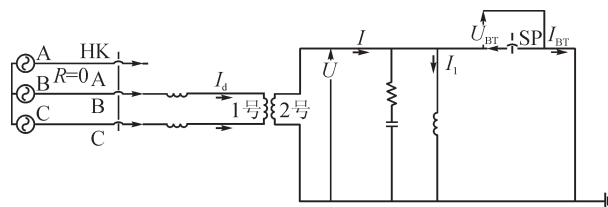


图6 仿真原理图

Fig. 6 Simulation principle diagram

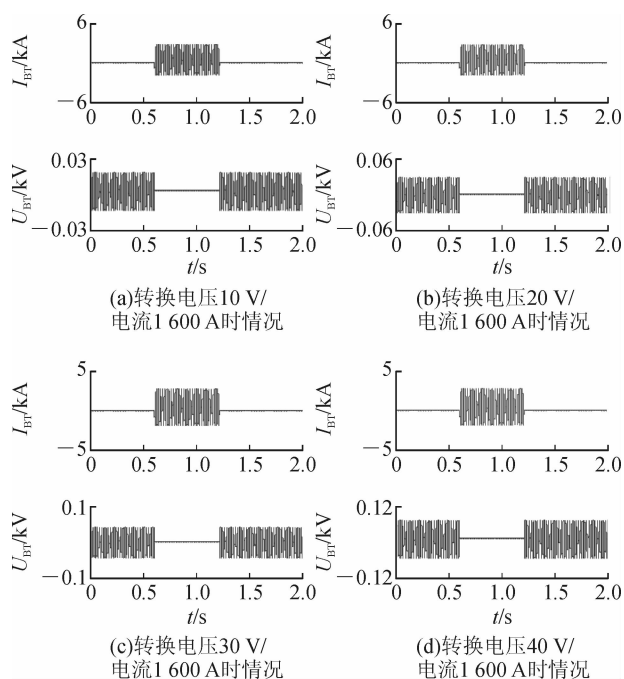


图7 仿真分析结果

Fig. 7 Simulation analysis results

图7仿真结果表明,采用负载电抗器分压的方法实现气体绝缘隔离开关开合母线转换电流的方法是可行的,且容易实现的,母线转换电流及母线转换电压满足标准GB 1985—2014、IEC 62271-102—2013中的相关规定。

### 4 试验验证

根据以上分析结果,采用国内某开关厂家生产的GIS用气体绝缘隔离开关对文中提出的开合母线转换电流试验的方法进行验证,该产品额定电压等级为252 kV,额定母线转换电压为20 V,额定母线转换电流为1 600 A。

根据式(8)、(9)可得气体绝缘隔离开关开合母线

转换电流试验时不同额定母线转换电压的调频电容及阻尼电阻计算参数,见表1。

表1 不同额定母线转换电压的调频电容及阻尼电阻

| Table 1 TRV parameters of different rated bus-transfer voltage |                   |              |                  |
|----------------------------------------------------------------|-------------------|--------------|------------------|
| 额定母线转换电压/V                                                     | $C_0/\mu\text{F}$ | $R_0/\Omega$ | $f_0/\text{kHz}$ |
| 10                                                             | 0.080 3           | 65.75        | 10               |
| 20                                                             | 0.079 8           | 66.17        | 10               |
| 30                                                             | 0.079 3           | 66.58        | 10               |
| 40                                                             | 0.078 8           | 67.00        | 10               |

由于标准中规定 TRV 的值大于 10 kHz, 振幅系数大于 1.5 即可, 所以上述不同额定母线转换电压开断后的 TRV 调节电容及阻尼电阻可以合并为一组, 取  $C_0=0.075 \mu\text{F}$ ,  $R_0=68 \Omega$ 。

如图4所示, 该试验回路预期瞬态恢复电压 (TRV) 的频率  $f_0=19.7 \text{ kHz}$ , 预期振幅系数  $K_0=1.9$ , 预期参数满足标准中的规定值。关合母线转换电流试验工频示波图见图8, 开断母线转换电流试验工频示波图见图9, 开断后瞬态恢复电压 (TRV) 放大示波图见图10。

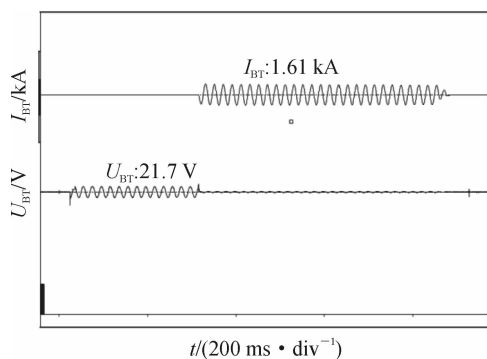


图8 试验示波图(关合)

Fig. 8 Test oscillograms (closing)

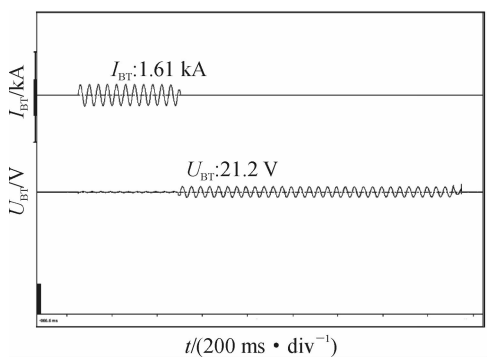


图9 试验示波图(开断)

Fig. 9 Test oscillograms (breaking)

图8、9中母线转换电压为21.2 V, 母线转换电流为1.61 kA, 试验回路预期参数及试验参数均符

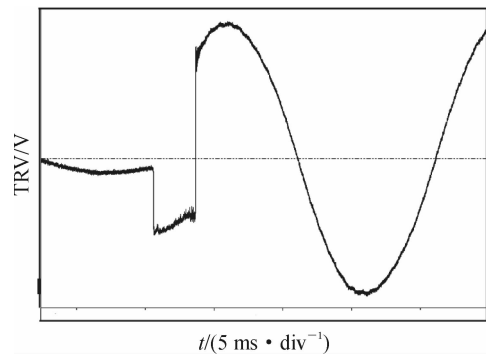


图10 试验示波图(TRV)

Fig. 10 Test oscillograms (TRV)

合标准要求值。综上所述, 通过试验验证了采用负载分压的方法进行气体绝缘隔离开关开合母线转换电流试验是满足要求的, 且容易实现的, 但该方法对负载分压用电抗器电感值的精度要求较高, 此电抗器需要特殊制造, 而且试验时试验回路的接线形式对试验结果也存在一定的影响。

## 5 结语

文中首先对隔离开关开合母线转换电流的机理进行了分析, 提出了一种用于气体绝缘隔离开关开合母线转换电流的试验方法, 不仅能够满足标准 GB 1985—2014、IEC 62271-102—2013 中对额定母线转换电压、额定母线转换电流及瞬态恢复电压 (TRV) 的要求, 而且可以节省试验设备, 降低试验成本。由于额定母线转换电压的数值较低且试验偏差为 0~10%, 使得对负载电抗器的电感值的精度要求较高, 否则会超出标准的要求值。提出的试验方法同样适用于空气绝缘的隔离开关开合母线转换电流试验, 也适用于额定母线转换电流超出标准要求的其他试验参数的试验, 在隔离开关开合母线转换电流的试验中具有广泛的应用。

## 参考文献:

- [1] 钟振蛟. 高压交流隔离开关和接地开关选用中的若干问题[J]. 电力设备, 2008, 9(4): 55-58.  
ZHONG Zhenjiao. Some problems in selection for HVAC disconnector and grounding switch[J]. Electrical Equipment, 2008, 9(4): 55-58.
- [2] 崔博源, 李志兵, 王承玉, 等. 提高特高压串补用旁路隔离开关转换电流开合能力的方法[J]. 高压电器, 2014, 50(8): 26-31.  
CUI Boyuan, LI Zhibing, WANG Chengyu, et al. Method to improve transfer current switching capacity for bypass disconnectors used in UHV series compensation[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(8): 26-31.

- [3] 陈 隽,崔景春,阮 羚,等. 1 100 kV HGIS 中隔离开关开合母线转换电流试验及转换电压确定[J]. 湖北电力, 2008,32(1):35-36.  
CHEN Jun, CUI Jingchun, YUAN Ling, et al. Conversion current test of opening and closing bus bar of isolator in 1 100 kV HGIS and ascertainment of its conversion voltage[J]. Hubei Electric Power, 2008,32(1):35-36.
- [4] 胡延涛. 串补站旁路隔离开关研究设计[J]. 高压电器, 2015,51(11):182-186.  
HU Yantao. Design of bypass disconnector for series compensation station[J]. High Voltage Apparatus, 2015,51(11):182-186.
- [5] 钟振蛟. 高压隔离开关切环流能力的分析[J]. 高压电器, 1990,26(2):9-16.  
ZHONG Zhenjiao. Analysis of bus-transfer current switching by high voltage disconnectors[J]. High Voltage Apparatus, 1990,26(2):9-16.
- [6] 张宗伟,卢昌宏. GW5-126 型隔离开关触头烧损故障分析及对策[J]. 高压电器, 2011,47(2):76-79.  
ZHANG Zongwei, LU Changhong. Failure analysis and countermeasures for GW5-126 disconnector contacts burning[J]. High Voltage Apparatus, 2011,47(2):76-79.
- [7] 齐保新,刘青杰,李学锋. GW5-110 隔离开关常见故障及其改造[J]. 河北电力技术, 2004,23(6):27-28.  
QI Baoxin, LIU Qingjie, LI Xuefeng. Frequent failures of GW5-110 disconnecting switches and their improving modification[J]. Hebei Electric Power, 2004,23(6):27-28.
- [8] 张 煦. 变电站隔离开关常见故障及预防措施[J]. 内蒙古电力技术, 2009,27(1):54-55.  
ZHANG Xu. Frequent malfunction to isolation switch in substation and its precaution measure[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2009,27(1):54-55.
- [9] 刘 伟. GW5 系列隔离开关运行中的几个问题[J]. 吉林电力技术, 1994(5):9-11.  
LIU Wei. Some problems of GW5 isolating switch in operation[J]. Jilin Electric Power, 1994(5):9-11.
- [10] 陈宏伟,王光临. GW4-126 型户外隔离开关的常见缺陷分析及改进措施[J]. 高压电器, 2004,40(2):155-157.  
CHEN Hongwei, WANG Guanglin. Analysis of common faults of type GW4-126 disconnector and its improvement [J]. High Voltage Apparatus, 2004,40(2):155-157.
- [11] 丁昌国. 隔离开关存在的问题及改进措施[J]. 吉林电力, 2004(6):55-56.  
DING Guochang. Problems existing in disconnecting switch and its improvement[J]. Jilin Electric Power, 2004(6):55-56.
- [12] 尹晓芳,杨 左,曲再文,等. 500 kV GIS 中隔离开关开合母线充电电流试验[J]. 高压电器, 2000,36(2):31-33.  
YIN Xiaofang, YANG Zuo, QU Zaiwen, et al. Opening closing bus charging current test of 500 kV GIS isolating switch[J]. High Voltage Apparatus, 2000,36(2):31-33.
- [13] 刘伯涛. 隔离开关合分母线转换电流试验方法分析[J]. 辽宁电机工程学报, 1992(1):31-37.  
LIU Botao. Conversion current test of isolating switch opening and closing bus bar[J]. Liaoning Motor Engineering Journal, 1992(1):31-37.
- [14] 浦文宗,李景贵,刘重琪. 330 kV 隔离开关切环流试验[J]. 高压电器, 1988,24(2):9-12.  
PU Wenzong, LI Jinggui, LIU Zhongqi. The test of interrupting loop current for 330 kV disconnector[J]. High Voltage Apparatus, 1988,24(2):9-12.
- [15] 吴盛刚,田 阳. GIS 隔离和接地开关特殊工况下的验证试验方法评述[C]//输变电年会论文集. 2012:231-243.  
WU Shenggang, TIAN Yang. The test method comment on disconnector and earthing switch for GIS in special working situations[C]//Annual Meeting of the Power Transmission and Transformation. Shanghai: CES, 2012:231-243.
- [16] 钟振蛟. 国产高压交流隔离开关的发展和向特高压的跨越[J]. 高压电器, 2007,43(4):265-268.  
ZHONG Zhenjiao. Discussion of development of EHV and UHV disconnector in China[J]. High Voltage Apparatus, 2007,43(4):265-268.
- [17] 沈赛丽,刘振华,柳建平,等. GW27A-363 隔离开关母线电流转换试验探讨[J]. 企业技术开发, 2015,34(24):89-90.  
SHEN Saili, LIU Zhenhua, LIU Jianping, et al. Discussion on the bus-transfer current test of GW27A-363[J]. Technological Development of Enterprise, 2015,34(24):89-90.
- [18] GB 1985—2014 高压交流隔离开关和接地开关[S]. 北京:中国国家标准化管理委员会, 2014.  
GB 1985—2004 High-voltage alternating-current disconnectors and earthing switches[S]. Beijing: China National Standardization Management Committee, 2014.
- [19] IEC 62271-102—2013 High-voltage switchgear and controlgear-Part 102: alternating current disconnectors and earthing switches[S]. 2012.
- [20] 裴 峰,蔡艺云. 隔离开关开合母线电流转换能力分析[J]. 机电工程技术, 2015,44(9):134-137.  
PEI Feng, CAI Yiyun. Analysis of bus-transfer current switching disconnectors[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2015,44(9):134-137.
- [21] 李广山. GIS 中隔离开关开合母线转换电流能力的分析[J]. 高压电器, 2002,38(1):57-59.  
LI Guangshan. Analysis of bus-transfer current switching by disconnectors in GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2002,38(1):57-59.
- [22] 郝建成,田 勇,金 鑫. 隔离开关分、合空载母线仿真分析[J]. 东北电力技术, 2009(5):14-16.  
HAO Jiancheng, TIAN Yong, JIN Xin. The simulation analysis on the opening-closing on disconnectors for buses without load[J]. Northeast Electric Power Technology, 2009(5):14-16.
- 范广伟(1983—),男,工程师,硕士研究生,研究方向为高压电器试验技术。