

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201706043



低压开关触头压降取样电路的设计

彭长青, 尚荣艳, 方瑞明

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 针对低压开关通断前后端电压相差很大,触头压降检测仪表难以兼顾精度与安全的问题,利用稳压二极管的稳压特性,提出一种检测触头压降的无源电路取样方案.在此基础上,对取样电路中限流电阻和稳压二极管的影响进行理论分析,确定选取规则.然后,通过直流特性测试,检测取样电路测量误差;通过频率特性测试,检测取样电路对不同频率谐波的衰减和失真情况;通过模拟工况测试,检测取样电路的实际应用情况.实验结果表明:低压开关触头压降取样电路有助于实现精确测量触头压降,并保证检测仪表安全.

关键词: 低压开关;触头压降;检测电路;取样电路

中图分类号: TM 52 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2018)02-0240-06

Design of Sampling Circuit for Measuring Contact Voltage Drop of Low Voltage Switch

PENG Changqing, SHANG Rongyan, FANG Ruiming

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: Aiming at the problem that the contact voltage difference of low voltage switch between making and breaking is so large that the instrumentation is difficult to balance the precision and safety issues, a new method of passive circuit sampling for measuring the contact voltage drop was proposed by using the steady voltage characteristics of the Zener diode. On this basis, the influence of the current-limiting resistor and the Zener diode in the contact voltage drop sampling circuit was analyzed theoretically and the selection rules were determined. The detection circuit characteristic test was used to detect the measurement error of the sampling circuit. Through the test of frequency characteristic, the attenuation and distortion of different frequency harmonics in the sampling circuit were detected. The practical application of the sampling circuit was tested by simulating the condition test. The experimental results show that the contact voltage drop sampling circuit of the low voltage switch can accurately measure the contact voltage drop and ensure the safety of the measuring instrument.

Keywords: low voltage switch; contact voltage drop; detection circuit; sampling circuit

开关设备(继电器、接触器、断路器等)通断过程的触头压降,包含了大量反映开关性能的信息.开关设备进行触头间电阻检测、电弧放电分析、接触性能评估、可靠性评估、电寿命预测等相关研究时,触头压降都是必不可少的一项重要参数^[1-11].然而,开关触头压降测量比较困难.开关闭合时,触头压降相对极低,可能小于 1 mV;断开后,断口两端电压相对较高,可能超过 1 kV.检测仪表难以兼顾精度与安全的问题.现有的检测仪表一般存在存储深度达不到要求、录波时间达不到秒级,数据采集系统精度不够,

收稿日期: 2017-06-14

通信作者: 彭长青(1976-),男,实验师,主要从事电气装置状态监测与故障诊断的研究. E-mail: mymail@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(51707068);福建省厦门市科技计划项目(3502Z20153029)

特殊的取样电路反应时间慢, 容易受干扰的问题^[12-17]. 根据某电力继电器直流过负载试验系统精确测量触头压降的要求, 本文利用稳压二极管的稳压特性, 提出一种检测触头压降的无源电路取样方案.

1 电力继电器直流过负载试验系统

电力继电器直流过负载试验系统的示意图, 如图 1 所示. 系统的硬件部分主要由电源柜、样品柜、负载柜、控制柜 4 部分组成. 该系统主要进行 1 000 V 以内电力继电器的电寿命试验和过负载实验.

此系统要求精确测量触头压降. 具体技术指标: 开关开路端电压直流 1 000 V; 开关触头压降最大不超过 10 V; 触头压降检测分辨率 1 mV; 直流检测精度 0.5%; 10 kHz 谐波衰减不超过 5%. 对波形采集仪表的要求: 至少 4 个通道; 通道必须隔离, 通道对地隔离电压必须在 1 000 V 及以上; 4 个通道采样率 1 MSa · s⁻¹ 时, 同时连续录波时间必须大于 6 s.

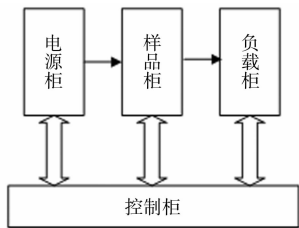


图 1 电力继电器直流过负载试验系统
Fig. 1 Direct current overload test system for power relay

2 触头压降取样电路的设计

2.1 工作原理

设计一种基于稳压二极管的无源电路取样的触头压降检测方案, 其原理图如图 2 所示.

取样电路主要由限流电阻 R (无感电阻, 阻值远小于检测设备输入电阻) 和稳压二极管 Z (稳定电压低于检测设备安全电压) 串联组成; 取样装置并联在开关 K 两端, 高精度检测设备 M 并联在稳压二极管的两端. 开关闭合时, 稳压二极管截止, 相当于开路, 开关触头压降直接传递到检测仪表, 从而达到精确检测的目的. 开关断开时, 端电压超过稳压二极管反向击穿电压, 稳压二极管反向导通, 检测仪表的输入电压得到有效钳制, 从而达到保护检测仪表的目的.

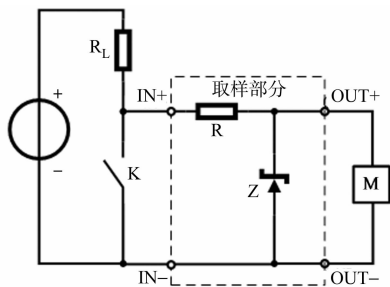


图 2 触头压降检测电路原理图
Fig. 2 Detection circuit diagram of contact voltage drop

2.2 限流电阻的选取

限流电阻 R 的主要作用是限制流经稳压二极管 Z 的反向导通电流, 使其不要过大.

开关闭合, 稳压二极管处于截止状态时, 测量触头压降时取样电路的等效电路, 如图 3 所示. 图 3 中: R_Z 为稳压二极管的泄漏电阻; C_Z 为稳压二极管的结电容; R_M 为检测设备的输入电阻; C_M 为检测设备的输入电容.

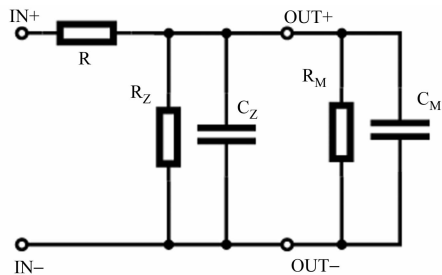


图 3 测量触头压降时取样电路的等效电路
Fig. 3 Equivalent circuit of sampling circuit when measuring contact voltage drop

式(1)中: U_{IN} 为取样装置的输入电压, 即开关触头的实际电压; U_{OUT} 为取样装置的输出电压, 即检测设备的测量电压.

根据图 3 与式(1), 可以推导出相对测量误差与阻抗的关系为

$$\delta = \frac{|Z_{IN}| - |Z_{OUT}|}{|Z_{IN}|} \times 100\%. \quad (2)$$

式(2)中: $Z_{OUT} = R_Z // -j \frac{1}{\omega C_Z} // R_M // -j \frac{1}{\omega C_M}$; $Z_{IN} = R + R_Z // -j \frac{1}{\omega C_Z} // R_M // -j \frac{1}{\omega C_M}$, $\omega = 2\pi f$, f 为谐波频率, 对于直流分量, $f = 0$.

结合图 3 与式(2)可知: 限流电阻不能太大. 开关导通时, 限流电阻越大, 电阻上的电压降则越大, 测量误差就会增大. 特别是, 由于电容容抗会随频率上升而下降, 所以高频谐波衰减和失真更加严重. 当然, 限流电阻也不能太小. 当开关断开后, 电阻越小, 稳压二极管反向导通时的工作电流越大, 限流电阻

和稳压二极管上的功耗越大. 因此, 必须选用更大功率的稳压二极管, 结电容随之增大, 电容容抗减小, 同样导致高频谐波衰减和失真严重.

此外, 限流电阻的功率必须大于计算值, 限流电阻计算功率公式为

$$W_R = (U - U_Z)^2 / R. \tag{3}$$

式(3)中: W_R 为限流电阻计算功率; U 为开关开路端电压; U_Z 为稳压二极管稳定电压.

2.3 稳压二极管的选取

稳压二极管的选取需要注意以下 4 点.

- 1) 稳压二极管击穿电压必须比测量量程高 0.5 V 以上. 因为在临界击穿点附近稳压二极管性度非常差, 会导致取样误差增大.
- 2) 稳压二极管最大稳定电压必须低于检测设备的安全电压.
- 3) 稳压二极管额定功率必须大于计算值, 计算功率为

$$W_Z = \frac{U_Z(U - U_Z)}{R}. \tag{4}$$

式(4)中: W_Z 为稳压二极管计算功率.

- 4) 稳压二极管结电容越小越好.

2.4 取样电路的时间常数

由图 3 可知: 取样电路含有稳压二极管的结电容和检测设备的输入电容. 开关动作时, 电压不能突变, 信号按指数规律上升或下降. 又由于稳压二极管的泄漏电阻 R_Z 、检测设备的输入电阻 R_M 远远大于限流电阻 R , 这里可以忽略不计. 因此, 取样电路的时间常数 τ 为

$$\tau = R \cdot (C_Z + C_M). \tag{5}$$

取样电路的时间常数 τ 不能过大, 否则, 开关动作时, 过渡过程太长, 也会使测量失真, 增大误差.

2.5 取样电路的频率特性

电源波动、开关动作、负载变化等诸多因素均可能使输入电压中含有许多不同频率谐波. 取样电路必须尽可能准确地检测出输入电压的实际值. 根据图 3 可知, R_Z 、 R_M 远远大于稳压二极管的结电容和检测设备的输入电容的容抗 X_C , 所以输入电压主要由 R 与 X_C 承担; 随着频率的上升, 容抗 X_C 下降, R 承受的电压越来越大, 相对测量误差 δ 也越来越大.

如果谐波频率为 f_k 时, $X_C = 1 / (2\pi f_k (C_Z + C_M)) = R$, 可得

$$f_k = \frac{1}{2\pi R (C_Z + C_M)}. \tag{6}$$

显然, 当输入电压中含有频率为 f 的谐波时, 只要选择 f_k 大于谐波频率 f 一定倍数 (比如 20 倍), 就能提高测量该谐波的精度.

3 取样电路的结构与参数

3.1 限流电阻的确定

取样电路输入方波电压, 频率为 10 kHz, 幅度为 10 V. 检测设备输入阻抗为 1 G Ω , 输入电容为 16 pF, 采样率为 1 MSa \cdot s⁻¹ (Sa 为 sampling 缩写, 代表采样), CH1 为输入波形, CH2 为输出波形. 除限流电阻不同以外, 其他器件和配置参数完全相同 (稳压管型号为 IN4774). 选用不同限流电阻的实测波形, 如图 4 所示.

由图 4 可知以下 3 点: 1) 限流电阻从 100 k Ω 变为 10 k Ω , 稳态时, 相对测量误差 δ 都很小, 可忽略不计; 2) $R=100$ k Ω 时, 取样电路的时间常数 τ 约为 5 μ s, 与式(5)计算值 3.3 μ s 接近; 3) $R=100$ k Ω 时, τ 过大, 输出波形与输入波形相差较大, 失真严重; 当 R 减小到 10 k Ω 时, τ 减小到 1/10, 输出波形与输入波形几乎重合, 失真较小.

通过采用不同的电阻试验, 确定 $R=10$ k Ω 是比较合适的选择.

3.2 稳压二极管的确定

根据节 2.3 进行稳压二极管选型, 除了电压、功率以外, 需要特别注意结电容大小. 不同稳压二极管

结电容相差非常大, 需要根据厂家提供的参数或实测数据具体判定结电容大小. 进行与节 3.1 相同的试验, 限流电阻为 10 kΩ, 仅改变稳压二极管, 取样电路的实测波形, 如图 5 所示.

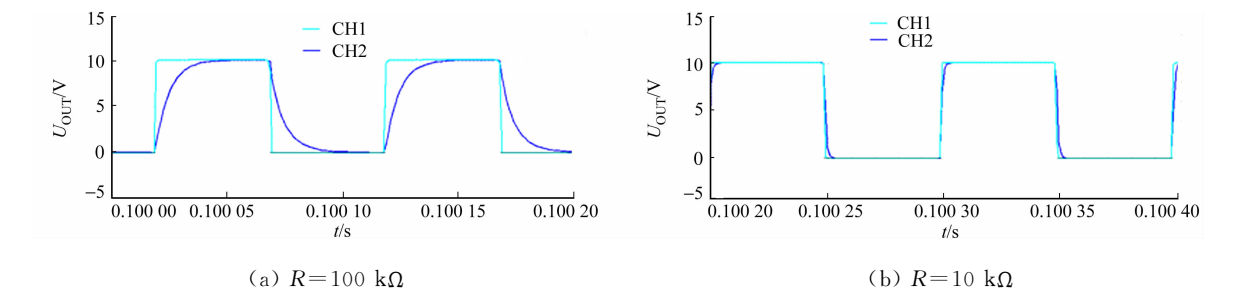


图 4 不同限流电阻的实测波形

Fig. 4 Measured waveforms of different current-limiting resistors

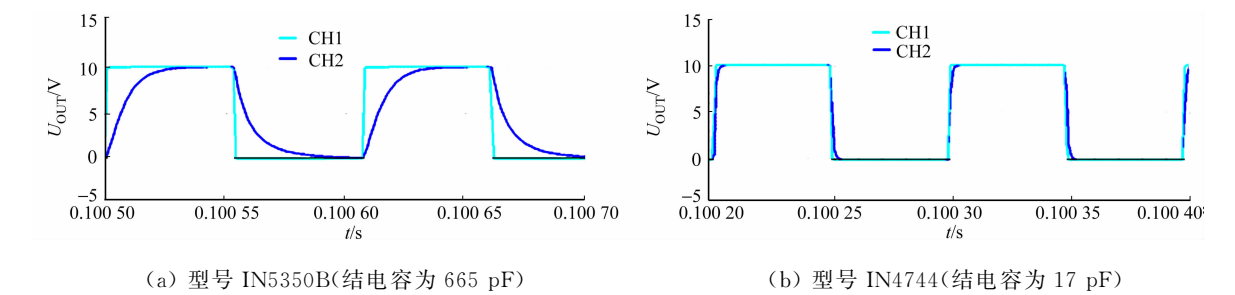


图 5 不同稳压二极管的实测波形

Fig. 5 Measured waveform of different Zener diode

由图 5 可知以下 3 点: 1) 稳压二极管的结电容对稳态时相对测量误差 δ 的影响很小, 可忽略不计; 2) 稳压二极管采用型号 IN5350B 时, 取样电路的时间常数 τ 约为 $8\text{ }\mu\text{s}$, 与式(5)计算值 $6.81\text{ }\mu\text{s}$ 接近; 3) 若稳压二极管的结电容越大, τ 越大, 则测量失真越严重. 通过比较, 最终选定型号 IN4744.

4 取样电路的性能验证

4.1 直流特性测试

在取样装置输入端接直流电源, 改变输入电压, 并用同一个高精度电压表分别测量输入和输出电压, 测试数据如表 1 所示.

表 1 取样电路测量误差

Tab. 1 Measurement error of sampling circuit

| 序号 | U_{IN}/V | U_{OUT}/V | 误差/V | $\delta/\%$ | 序号 | U_{IN}/V | U_{OUT}/V | 误差/V | $\delta/\%$ |
|----|------------|-------------|-------|-------------|----|------------|-------------|------|-------------|
| 1 | 0.104 | 0.104 | 0 | 0 | 17 | 12.613 | 12.541 | — | — |
| 2 | 0.206 | 0.206 | 0 | 0 | 18 | 12.713 | 12.564 | — | — |
| 3 | 0.499 | 0.499 | 0 | 0 | 19 | 12.813 | 12.567 | — | — |
| 4 | 1.017 | 1.016 | 0.001 | 0.10 | 20 | 13.016 | 12.568 | — | — |
| 5 | 2.017 | 2.015 | 0.002 | 0.10 | 21 | 14.016 | 12.561 | — | — |
| 6 | 4.012 | 4.008 | 0.004 | 0.10 | 22 | 15.017 | 12.566 | — | — |
| 7 | 6.013 | 6.007 | 0.006 | 0.10 | 23 | 16.014 | 12.571 | — | — |
| 8 | 8.012 | 8.002 | 0.010 | 0.12 | 24 | 17.011 | 12.517 | — | — |
| 9 | 10.011 | 10.000 | 0.011 | 0.11 | 25 | 18.012 | 12.583 | — | — |
| 10 | 11.011 | 10.998 | 0.013 | 0.12 | 26 | 20.010 | 12.592 | — | — |
| 11 | 11.511 | 11.496 | 0.015 | 0.13 | 27 | 40.019 | 12.625 | — | — |
| 12 | 12.011 | 11.992 | 0.019 | 0.16 | 28 | 80.024 | 12.697 | — | — |
| 13 | 12.212 | 12.188 | 0.024 | 0.20 | 29 | 100.086 | 12.720 | — | — |
| 14 | 12.312 | 12.284 | 0.028 | 0.23 | 30 | 150.240 | 12.790 | — | — |
| 15 | 12.413 | 12.378 | 0.035 | 0.28 | 31 | 200.230 | 12.853 | — | — |
| 16 | 12.515 | 12.469 | 0.046 | 0.37 | 32 | 300.350 | 12.970 | — | — |

4.2 频率特性测试

为了检测取样电路对不同频率谐波的衰减和失真情况,在取样电路输入端接入波形发生器,用同一块 NI 采集卡的两个通道分别录制输入和输出波形,如图 6 所示。

由式(6)得到 $f_k=480\text{ kHz}$ 。由图 6 可得以下 3 点:1) $f=1\text{ kHz}$ 时, $f\ll f_k$ 测量精度很高,输出信号几乎不衰减或失真;2) $f=10\text{ kHz}$ 时, $f\approx\frac{1}{50}f_k$,输出信号开始有轻微幅度衰减及相移,但还在可接受范围内;3) $f=100\text{ kHz}$ 时, $f\approx\frac{1}{5}f_k$,输出信号有一定幅度的衰减及较大的相移,已超出允许范围。可见,只要选择合适的倍数,检测装置就能比较准确地测量某些谐波。

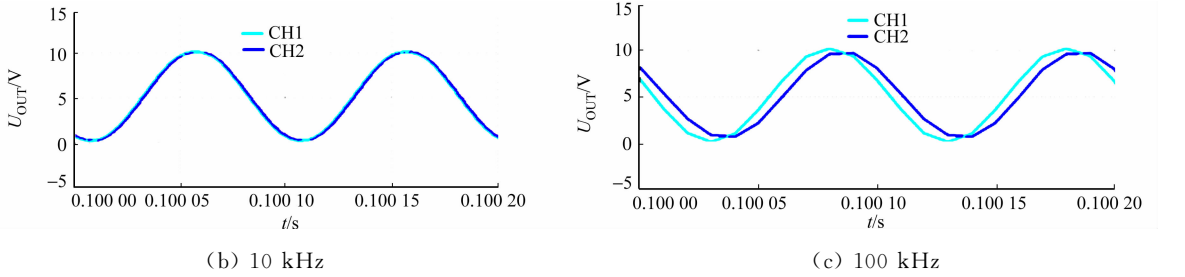


图 6 输入不同频率信号的实测波形
Fig. 6 Measured waveform of input signal at different frequencies

4.3 模拟工况测试

为了检测取样电路的实际应用情况,参照图 2 接线。直流电源电压为 30 V,因为采集器安全电压是 30 V,可以直接测量触头压降,便于直观地比较取样电路的输入输出波形。负载电阻为 1 kΩ,试品开关为钮子开关。用同一块 NI 采集卡的两个通道分别录制取样装置的输入和输出波形,如图 7 所示。

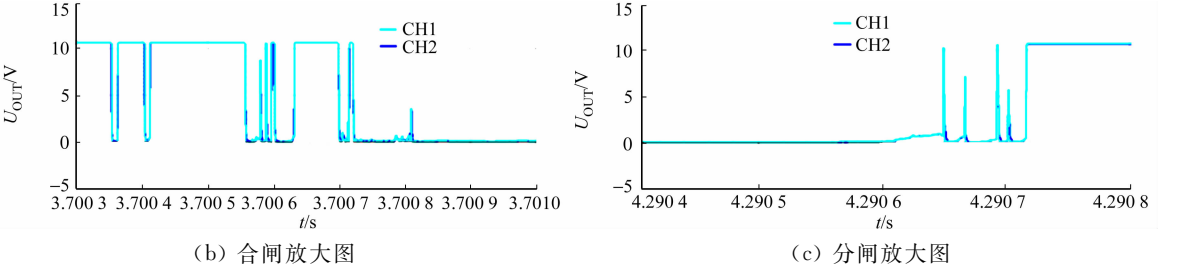


图 7 模拟工况的实测波形
Fig. 7 Measured waveform of simulated operating conditions

由图 7 可知以下 2 点:1) 尽管分闸电压远远高于合闸电压,但取样电路的输出电压维持在稳压二极管的稳压值,可大大减小检测设备的量程,有助于检测设备兼顾测量精度与安全性;2) 尽管开关动作期间两端电压会畸变,但取样电路的输电波形几乎与输入波形重合,能保证检测电压的正确性。

5 结论

- 1) 针对低压开关通断前后触头压降相差很大,检测仪表难以兼顾精度与安全的问题,利用稳压二极管的稳压特性,提出一种检测触头压降的无源电路取样方案。
- 2) 理论分析了触头压降的取样电路中限流电阻和稳压二极管的影响,并确定选取规则。结合理论分析,分别利用实验方法,确定限流电阻的大小,选取稳压二极管的型号。
- 3) 通过直流特性测试,检测取样电路测量误差;通过频率特性测试,检测取样电路对不同频率谐波

的衰减和失真情况;通过模拟工况测试,检测取样电路的实际应用情况.实验结果表明:低压开关触头压降取样电路有助于实现精确测量触头压降,并保证检测仪表安全.

4) 论述的取样电路是基于直流开关的,但只需简单地调整电路结构,交流开关同样适用.

参考文献:

- [1] 王淑娟,余琼,翟国富.电磁继电器接触失效机理判别方法[J].电工技术学报,2010,25(8):38-44. DOI:10.3969/j.issn.1000-6753.2010.08.007.
- [2] 罗毅,杨昆,董麟,等.开关触点接触电阻动态测量方法研究[J].仪器仪表学报,2015,36(1):49-55. DOI:10.19650/j.cnki.cjsi.2015.01.008.
- [3] 蓝磊,陈功,文习山,等.基于动态电阻测量的 SF6 断路器触头烧蚀特性[J].高电压技术,2016,42(6):1731-1738. DOI:10.13336/j.1003-6520.hve.20160616008.
- [4] 李玲玲,马东娟,李志刚.触点动态接触电阻时间序列混沌预测[J].电工技术学报,2014,29(9):187-193. DOI:10.3969/j.issn.1000-6753.2014.09.027.
- [5] 王召斌,翟国富,黄晓毅.电磁继电器贮存期接触电阻增长的动力学模型[J].电工技术学报,2012,27(5):205-211.
- [6] HOTTA K, INAGUCHI T. Contact welding mechanism with bounce arc on Ag and Cu contacts in low-voltage switches[J]. IEEE Transactions on Components Packaging and Manufacturing Technology, 2017, 7(3):363-370. DOI: 10.1109/TCPMT.2017.2652458.
- [7] HOTTA K, INAGUCHI T. Dependence of contact weld force on arc energy supplied to contact surface in low voltage switches[C]// Holm Conference on Electrical Contacts. San Diego: IEEE Press, 2015:160-165. DOI:10.1109/HOLM.2015.7355090.
- [8] CHENG Gao, FU Chengcheng, HUANG Jiaoying, *et al.* Failure analysis for electromagnetic relay contacts adhesion by using XES[C]// Prognostics and System Health Management Conference. Paraiba: IEEE Press, 2014:97-101. DOI:10.1109/PHM.2014.6988141.
- [9] 李玲玲,韩俊杰,王成山.基于灰色理论的继电器电接触可靠性预测[J].机械工程学报,2012,48(2):68-72. DOI: 10.3901/JME.2012.02.068.
- [10] 张菲菲,李志刚,李玲玲,等.触点寿命试验中初始接触电阻与寿命的关系研究[J].电力系统保护与控制,2015,43(5):63-68.
- [11] 陆俭国,李奎,杜太行,等.塑壳断路器可靠性理论与验证试验方法[J].电工技术学报,2012,27(5):180-185. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.2012.05.027.
- [12] 杜太行,陆俭国,张露,等.低压电器触点间收缩电阻检测技术的研究[J].电工技术学报,2003,18(2):41-44. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.2003.02.010.
- [13] 杜太行.继电器电寿命试验计算机测控技术与数据处理技术[D].天津:河北工业大学,2002.
- [14] 陈默.高压直流大功率继电器电寿命模型的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.
- [15] 王容华.直流继电器电性能测试系统及实验研究[D].武汉:华中科技大学,2012.
- [16] 邱进,阮江军,吴士普,等.特快速暂态过电压光学测量系统的设计[J].电力自动化设备,2017,37(2):205-210. DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2017.02.031.
- [17] FROST B J. Mass parametric acquisition of relay contact data during high-speed life test[C]// Holm Conference on Electrical Contacts. New Orleans: IEEE Press, 2014:1-7. DOI:10.1109/HOLM.2014.7031069.

(责任编辑:钱筠 英文审校:吴逢铁)