

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200816

# 基于空充电流的线路保护带负荷试验方法

楼晓轩<sup>1</sup>, 宋平<sup>1</sup>, 徐栋杰<sup>1</sup>, 周念成<sup>2</sup>, 王强钢<sup>2</sup>

(1. 国网浙江省电力有限公司杭州供电公司, 浙江 杭州 310000;

2. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆 400044)

**摘要:** 电流回路变动过的线路保护须进行带负荷试验后才能投入运行。针对常规带负荷试验存在的耗时长、负荷不稳定、改接线风险性大的问题, 提出了利用线路在空充状态下的电容电流进行带负荷试验的方法。首先分析了线路空充电流特性及其在带负荷试验中的适用性, 给出了空充电流带负荷试验的适用范围。其次通过与常规带负荷试验进行对比, 论证了所提出的带负荷试验方法在电流二次回路改接线过程中的安全性。最后通过某220 kV变电站的现场试验测试了该方法的有效性。结果表明, 采用线路空充电流进行带负荷试验可在保证试验精确度的前提下缩减设备操作流程, 大幅提升电力设备投产效率。

**关键词:** 带负荷试验; 电容电流; 空充线路; 继电保护

## On-load test of line protection based on no-load charging current

LOU Xiaoxuan<sup>1</sup>, SONG Ping<sup>1</sup>, XU Dongjie<sup>1</sup>, ZHOU Niancheng<sup>2</sup>, WANG Qianggang<sup>2</sup>

(1. Hangzhou Power Supply Company, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310000, China;

2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology  
(Chongqing University), Chongqing 400044, China)

**Abstract:** Power line protection where the current circuit is modified cannot be put into operation until the on-load test has been carried out. The problems of a normal on-load test are that it is inefficient, unstable and of high risk when modifying the circuit loop. Thus this paper proposes a new on-load test based on capacity current when the power line is unloaded. It demonstrates the characteristics of no-load charging current and explores the application range of this new method. The safety of modifying the circuit loop of this method is proved theoretically and compared with the normal on-load method. This new on-load test method is proved to be effective in practice in a 220 kV power station. The result shows that the on-load test based on capacity current will help simplify operational procedure with a precondition of ensuring accuracy, and this new method will dramatically promote the production efficiency of power equipment.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51877017).

**Key words:** on-load test; capacity current; no-load power line; relay protection

## 0 引言

继电保护是电力系统的第一道防线。随着电力系统的飞速发展, 部分变电站内的继电保护装置面临运行年份偏长、维保力量薄弱等问题, 许多已经无法满足现阶段电网的运行要求<sup>[1-2]</sup>。近年来, 为增强电网运行的可靠性, 老旧保护装置更换工程在各省市电网全面铺开<sup>[3]</sup>。

在保护装置更换完成之后, 为明确互感器二次侧极性接线的正确性, 根据《继电保护和电网安全

自动装置检验规程》要求<sup>[4]</sup>, 新安装或二次回路有变动的线路保护在投入运行之前, 必须进行带负荷试验工作<sup>[5-7]</sup>。常规的带负荷试验方法存在以下缺点: 1) 带负荷试验使用的工具为相位伏安表, 测量的二次电流要达到 0.1 A 以上才能满足带负荷试验的精度要求<sup>[8-9]</sup>, 这就需要负荷侧带上较大的负载。因此, 常规带负荷试验前操作步骤较多, 且部分用户调负荷难度大, 严重影响了线路、主变等设备的投产效率<sup>[10-11]</sup>。2) 带负荷试验过程中, 部分负荷大小不稳定, 导致二次电流、功角变动较大<sup>[12]</sup>, 会影响现场试验人员的判断<sup>[13-14]</sup>。3) 带负荷试验后, 若发现有流变二次极性错接的情况, 回退操作会造成

用户侧失电<sup>[15]</sup>。若带电更改接线,由于负荷电流较大,倘若流变二次侧不慎开路会产生高压<sup>[16]</sup>,严重威胁试验人员人身安全。

目前,已有研究提出采用电容器模拟负载、新能源发电机组并网变流器注入无功<sup>[17-19]</sup>来进行带负荷试验,但是前者可模拟的带负荷容量有限,而后者仅适用于新能源场站的保护装置试验。为此,亟需充分利用变电站已有设备,提出一种更高效和安全的带负荷试验方法。由于线路在空充状态(供电侧合闸、受电侧分闸)下会出现较大幅度的电容电流<sup>[20]</sup>,与常规的负荷电流相比,线路电容电流的幅值大小取决于线路长度、结构和电压等级等,且电容电流为纯无功,其功角特性稳定,可作为带负荷试验的重要依据<sup>[21-22]</sup>。因此,本文利用变电站线路空充电流特性,提出一种基于空充电流的线路保护带负荷试验方法。

## 1 采用空充电流的带负荷试验方法

### 1.1 均匀传输线路的稳态电容电流计算

由于线路空充电流幅值太小,常规的伏安表无法得到其准确数值<sup>[23]</sup>,需更加精准的测量手段才能获得空充电流的幅值和相位。为了确定线路电容电流带负荷试验方法的有效性,首先计算空充状态下不同类型线路首端电容电流值。根据均匀传输线路的正弦稳态解<sup>[24]</sup>,在已知线路末端电压 $U_2$ 、电流 $I_2$ 的前提下,始端 $x(\text{km})$ 处的电压电流相量可分别表示为

$$\begin{cases} \dot{U} = \frac{1}{2}(\dot{U}_2 + Z_c \dot{I}_2)e^{\gamma(l-x)} + \frac{1}{2}(\dot{U}_2 - Z_c \dot{I}_2)e^{-\gamma(l-x)} \\ \dot{I} = \frac{1}{2Z_c}(\dot{U}_2 + Z_c \dot{I}_2)e^{\gamma(l-x)} - \frac{1}{2Z_c}(\dot{U}_2 - Z_c \dot{I}_2)e^{-\gamma(l-x)} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\gamma$ 为线路传播常数; $Z_c$ 为线路特性阻抗。即

$$\begin{cases} \gamma = \sqrt{(R_0 + j\omega L_0)(G_0 + j\omega C_0)} \\ Z_c = \sqrt{\frac{R_0 + j\omega L_0}{G_0 + j\omega C_0}} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $R_0$ 、 $L_0$ 、 $G_0$ 、 $C_0$ 分别为线路单位长度串联阻抗、并联导纳参数。

在线路空充状态下,已知线路末端电流 $I_2=0$ 、 $U_2=U_{av}$ (电压平均值, kV),根据式(1)可以求得线路首端 $x=0$ 处的电压、电流分别为

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \frac{1}{2}\dot{U}_{av}(e^{\gamma l} + e^{-\gamma l}) \\ \dot{I}_1 = \frac{1}{2Z_c}\dot{U}_{av}(e^{\gamma l} - e^{-\gamma l}) \end{cases} \quad (3)$$

### 1.2 不同线路稳态电容电流计算

在不考虑同杆双回线的前提下,在式(3)中代入常规架空线、电缆线路参数<sup>[25]</sup>,可得到首端稳态电容电流有效值经验公式如下<sup>[26]</sup>。其中,式(4)为电缆线路,式(5)为架空线路。

$$I_1 = 0.1 \times \frac{95 + 1.44S}{2200 + 0.23S} U_{av} \times l \quad (4)$$

$$I_1 = (2.7 \text{ 或 } 3.3) \times U_{av} \times l \times 10^{-3} \quad (5)$$

式中; $S$ 为线路导线截面积;式(5)中系数2.7适用于无架空地线的线路,3.3适用于有架空地线的线路。

### 1.3 空充电流带负荷试验的适用范围

选取 35 kV、110 kV、220 kV 电缆截面积分别为 100 mm<sup>2</sup>、200 mm<sup>2</sup>、300 mm<sup>2</sup>。图 1、图 2 分别是不同长度、电压等级的电缆、架空线空充时电容电流大小,纵坐标为电流大小,横坐标为线路长度。高精度伏安表最低能够测量相位角的电流大小为 $I_m=5 \text{ mA}$ ,根据式(6)可计算不同 CT 变比下( $N=500$ 、1 000、2 000、3 000、4 000)的 $I_m$ 所对应的一次电流大小为

$$I_{1m} = N \times I_m \quad (6)$$

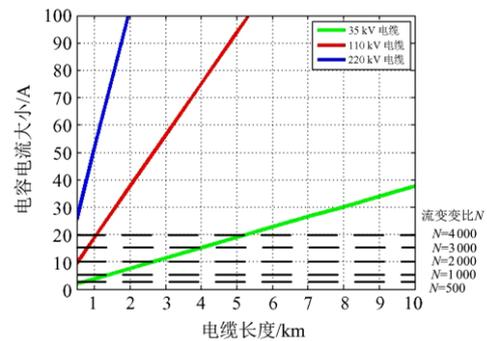


图 1 电缆线路空充状态下电容电流大小  
Fig. 1 No-load capacity current of cable lines

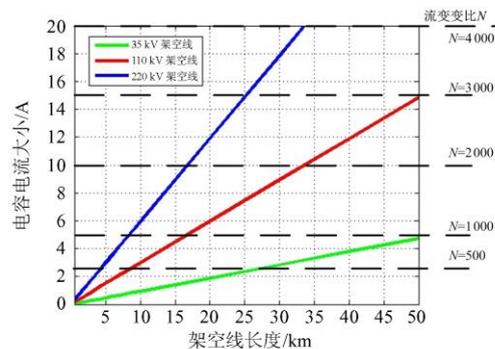


图 2 架空线路空充状态下电容电流大小  
Fig. 2 No-load capacity current of overhead lines

图 1 和图 2 中虚线表示  $I_{lm}$ , 斜线在虚线上方, 代表该种线路在此长度以上可以进行电容电流带负荷试验。对线路在不同流变变比下可进行的电容电流带负荷试验的长度进行统计, 得到表 1。根据表 1 的结果, 即可确定不同线路是否能采用线路空充电容电流带负荷试验。

表 1 适合进行空充电流带负荷试验的线路长度

Table 1 Length of power lines whose protection on-load test can be done with no-load current

变比/ 类型	N=500		N=1 000		N=2 000		N=3 000		N=4 000	
	电缆	架空线	电缆	架空线	电缆	架空线	电缆	架空线	电缆	架空线
35 kV	0.5	27	1.5	∞	2.5	∞	4	∞	5.2	∞
110 kV	≤0.1	8	≤0.1	17	≤0.1	33	0.5	50	1.1	65
220 kV	≤0.1	4	≤0.1	6	≤0.1	17	≤0.1	25	≤0.1	34

## 2 带负荷试验方法比较

### 2.1 一次设备状态要求

与常规带负荷试验前操作不同, 采用空充电流带负荷试验方法可以省去一部分一次设备操作步骤。如图 3 所示, 常规带负荷试验中所测量到的电流其实是电容电流与负荷电流之和, 需把两侧开关均合上, 等受电侧有足够的负荷, 直至负荷电流  $I_{load}$  完全占据主导, 即功角稳定后, 带负荷试验才可以开始。而采用电容电流带负荷试验方法, 受电侧开关仅需操作到热备用状态, 且受端无需调负荷, 即可进行带负荷试验, 可大幅提升线路投产效率。

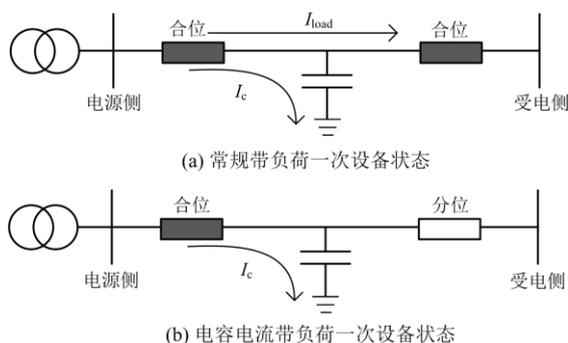


图 3 常规带负荷、空充电流带负荷方式一次设备状态比较

Fig. 3 Status of primary equipment with normal on-load test and no-load current on-load test

### 2.2 试验方法安全性

电流互感器二次侧严禁开路, 否则会产生高电压, 威胁作业人员人身安全<sup>[27-28]</sup>。然而在带负荷试验过程中, 不免会遇到流变二次极性、相序接错的情况。此时有两种解决方案: 方案 1 回退操作, 受电侧把负荷倒空, 电路两端开关断开, 进行二次回

路改接线后, 再进行带负荷试验; 方案 2 带电改接线, 将流变二次流入端短接, 更改内部二次线, 改接完成后再将短接线拆除<sup>[29]</sup>。

方案 1 回退操作需要耗费大量时间, 改完接线后要重新进行带负荷试验, 严重影响投产效率; 现场大部分情况采用方案 2, 但在作业过程中, 一旦造成电流互感器二次侧开路, 将威胁作业人员人身安全。电流互感器开路二次电压表达式为

$$E_{KL} = KN_{2n}A_c\sqrt{f}\sqrt{\frac{I_{1n}N_{1n}}{L_c}} \quad (7)$$

式中:  $K$  为铁芯系数;  $N_{2n}$  为额定二次匝数;  $A_c$  为铁芯有效截面积( $\text{cm}^2$ );  $I_{1n}N_{1n}$  为一次安匝(A);  $L_c$  为铁芯平均磁路长度(cm)。同样的电流互感器在不同一次电流下的开路电压峰值之比见式(18)。

$$\frac{E_{KL1}}{E_{KL2}} = \sqrt{\frac{I_{11}}{I_{21}}} \quad (8)$$

设变比为 2000/5 的 CT 二次开路,  $N_{2n}$  为 400,  $A_c=35.5 \text{ cm}^2$ ,  $L_c=85.4 \text{ cm}$ , 铁芯采用冷轧硅钢片, 取  $K=4.13 \times 10^{-2}$ , 于是可以计算一次电流为 200 A 的负荷电流和 2 A 的电容电流时, 二次开路电压的大小: 取一次负荷电流 200 A 时开路电压  $E_{KLload}=4 558 \text{ V}$ ; 取一次电容电流 2 A 时开路电压  $E_{KLc}=455.8 \text{ V}$ 。可见, 采用负荷电流带负荷方式需要改接线时, 若发生 CT 开路, 二次侧会产生上千伏的高压, 可能造成端子排击穿, 严重威胁作业人员安全。而若采用电容电流带负荷方式, 二次开路电压仅为几百伏, 不会击穿二次端子排, 大幅降低了带电改接线时的作业风险。

## 3 现场测试及分析

### 3.1 现场试验条件

结合某 220 kV 变电站综合自动化改造, 对两条位于同一段母线的 35 kV 出线(3684 线、3686 线)进行带负荷试验, 两条线保护绕组 CT 变比均为 2000/5。3686 线需两端开关均合位, 采用常规带负荷方式; 3684 线仅需供电侧开关合位, 受电侧开关分位, 采用电容电流带负荷方式。

### 3.2 试验数据分析

取二次 A 相电压  $U_A$  作为参考电压, 测量两条出线二次电流  $I_A$  幅值与相位角  $\varphi$ 。图 4 和图 5 分别为 3686 线与 3684 线分别采用常规带负荷、空充电流带负荷试验方法的测量幅值、相角, 0 时刻为供电侧合上开关时刻。采用常规带负荷方式的 3686 线在  $t_1 \approx 1.2 \text{ h}$  时, 受电侧才合上开关, 又经过  $t_2 \approx 0.45 \text{ h}$  后, 负荷电流二次值、相角才略微稳定, 带负荷试

验才得以进行, 前后大约需要 64 min, 而且相角值波动较为明显。而基于高精度伏安表, 采用电容电流带负荷法的 3684 线, 在供电侧开关合上后, 经过  $t_3 \approx 10$  min 即完成带负荷试验, 且二次电流、相位角(电流超前电压  $90^\circ$ )几乎没有波动。

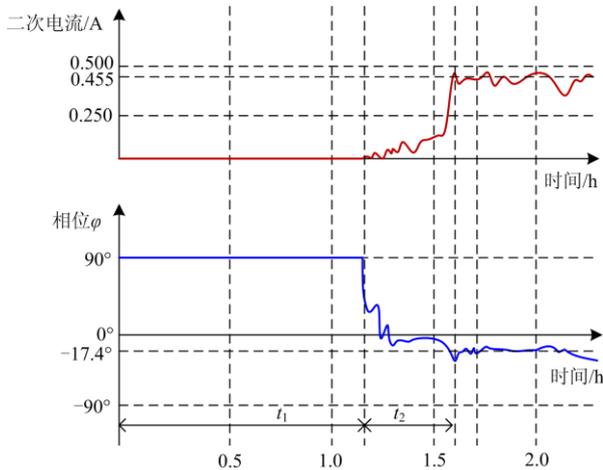


图 4 3686 线(常规带负荷)电流、相角变化曲线  
Fig. 4 Curves of current and phase of line-3686 with normal on-load test

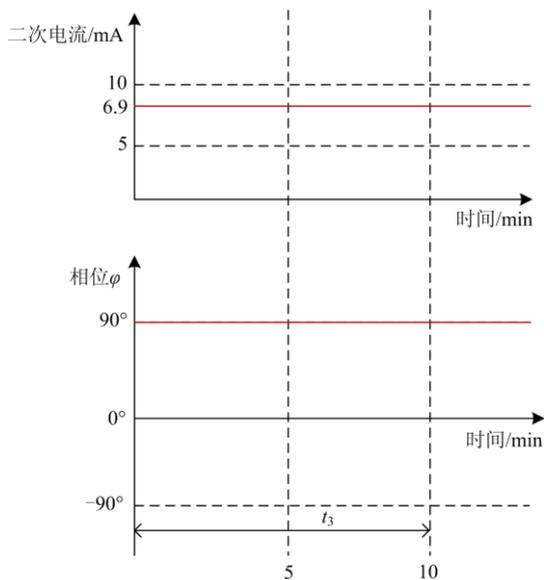


图 5 3684 线(空充电流带负荷)电流、相角变化曲线  
Fig. 5 Curves of current and phase of line-3684 with on-load test based on no-load current

经过以上现场测试, 相对于常规带负荷试验, 利用空充电容电流进行带负荷试验, 可以省略对侧操作( $t_1$ )、受电侧倒负荷( $t_2$ )这些步骤, 此外还排除了回退操作对用户的影响, 节约了至少 90% 的送电时间。

## 4 结论

本文提出了利用电容电流进行线路带负荷试验的方法, 通过计算不同电压等级线路(电缆、架空线)空充时的电容电流, 确定了空充电流带负荷试验的适用范围。电缆线路的电容电流比架空线要大得多, 因此空充电流带负荷方法基本适用于各电压等级的电缆型线路, 而对于架空线, 该方法只适用于电压等级较高、长度较长的线路。

在带负荷试验中, 若发生 CT 二次接线错误, 经常需要带电更改 CT 二次接线, 存在 CT 二次开路的风险。通过对 CT 二次开路电压峰值的计算, 发现采用电容电流带负荷方法的 CT 开路电压约是常规带负荷方式的十分之一, 大幅降低了带电改接线时的人身安全风险。

通过对两条即将投产的 35 kV 线路分别采用常规带负荷、电容电流带负荷方法进行对比试验, 结果发现, 采用常规带负荷法, 操作、倒负荷的时间较长, 且电流幅值、相位角受负荷波动突变较大, 容易对试验结果判断产生影响。而采用电容电流带负荷法一次设备的操作步骤简单, 试验耗时短。另外, 由于容性电流幅值大小完全取决于电压等级和线路长度, 且电流相位一直超前电压  $90^\circ$ , 不受负荷变化影响, 为电力设备的投产提供了更加稳定、可靠的判断依据。

## 参考文献

- [1] 陈国平, 王德林, 裘愉涛, 等. 继电保护面临的挑战与展望[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(16): 1-11, 26.  
CHEN Guoping, WANG Delin, QIU Yutao, et al. Challenges and development prospects of relay protection technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(16): 1-11, 26.
- [2] 王轶禹, 王晶, 冯长有, 等. 电网系统保护在线监视研究及典型应用[J]. 电力工程技术, 2019, 38(5): 63-70.  
WANG Yiyu, WANG Jing, FENG Changyou, et al. Online monitoring for large power system protection and its optimization strategy[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(5): 63-70.
- [3] 张宝坤. 变电站综合自动化改造探讨与经验总结[J]. 电力安全技术, 2019, 21(9): 49-52.  
ZHANG Baokun. Reform and experience summary of integrated automation modification in substation[J]. Electric Safety Technology, 2019, 21(9): 49-52.
- [4] 继电保护和电网安全自动装置检验规程: DL/T 995—2016[S].

- Testing regulations on protection and stability control equipment: DL/T 995—2016[S].
- [5] 闫立伟, 徐刚, 章炳泉, 等. 变压器差动保护带负荷自动化试验装置的研制[J]. 浙江电力, 2015, 34(4): 26-28. YAN Liwei, XU Gang, ZHANG Bingquan, et al. Research and development of the automatic device for the on-load test of the main transformer differential protection[J]. Zhejiang Electric Power, 2015, 34(4): 26-28.
- [6] 周文越, 李霞, 刘明忠, 等. 就地化保护检验机制的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(7): 162-167. ZHOU Wenyue, LI Xia, LIU Mingzhong, et al. Research on outdoor installation protection inspection mechanism[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(7): 162-167.
- [7] 丁卫东, 张丽全, 许剑冰, 等. 电网安全稳定控制系统标准体系研究评述[J]. 电力工程技术, 2021, 40(1): 58-64. DING Weidong, ZHANG Liquan, XU Jianbing, et al. Review of standard system of power grid security and stability control system[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(1): 58-64.
- [8] 周红斌, 周万竣, 张小波. 变电站电流互感器二次侧极性检测方案设计的研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(18): 83-89. ZHOU Hongbin, ZHOU Wanjun, ZHANG Xiaobo. Research on the design of secondary side polarity detection scheme for CT in substation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(18): 83-89.
- [9] 向先直. 电流互感器二次极性检测装置研制与应用[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(1): 89-92. XIANG Xianzhi. Development and application of secondary polarity detection device for current transformer[J]. Power System and Clean Energy, 2018, 34(1): 89-92.
- [10] 朱鹏. 变电站互感器二次极性智能检测方案及其激励系统的研究[D]. 南京: 东南大学, 2015. ZHU Peng. Research on intelligent testing method of mutual transformer secondary polarity in substation and its excitation system[D]. Nanjing: Southeast University, 2015.
- [11] 杨剑友, 赵张磊, 奚洪磊, 等. 就地化保护智能运维检修模式研究[J]. 浙江电力, 2018, 37(12): 57-61. YANG Jianyou, ZHAO Zhanglei, XI Honglei, et al. Research on intelligent maintenance and repair mode for localized protection[J]. Zhejiang Electric Power, 2018, 37(12): 57-61.
- [12] 郇宁, 张慧媛, 王子琪, 等. 区域电网分布式储能选址定容规划[J]. 高压电器, 2020, 56(8): 52-58. GAO Ning, ZHANG Huiyuan, WANG Ziqi, et al. Planning for site selection and capacity determination of distributed energy storage in regional power grid[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(8): 52-58.
- [13] 付晓奇. 带负荷试验中电流互感器的变比及极性验证方法[J]. 继电器, 2007, 35(增刊1): 403-404. FU Xiaoqi. Validating ways of current transform ratio and polarity for electrification test[J]. Relay, 2007, 35(S1): 403-404.
- [14] 雷正新, 徐念云, 张绮, 等. 带负荷试验功角分析及其改进措施[J]. 电力与能源, 2018, 39(2): 292-294, 298. LEI Zhengxin, XU Nianyun, ZHANG Qi, et al. Power angle analysis of on-load test and its corrective actions[J]. Power & Energy, 2018, 39(2): 292-294, 298.
- [15] 李本瑜, 陈海龙, 刘志文, 等. 大型发变组保护CT极性及保护方向自动检测技术研究[J]. 电测与仪表, 2018, 55(14): 100-104. LI Benyu, CHEN Hailong, LIU Zhiwen, et al. Research on CT polarity and protection direction automatic detection technology for large generator transformer unit[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(14): 100-104.
- [16] 郑一鸣, 刘石, 刘浩军, 等. 220 kV电力电缆线路合闸操作过电压分析[J]. 高压电器, 2020, 56(4): 153-158. ZHENG Yiming, LIU Shi, LIU Haojun, et al. Closing switching overvoltage analysis of 220 kV power cable transmission lines[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(4): 153-158.
- [17] 梁海东, 汪冬辉, 王达峰, 等. 海上风电工程受电启动带负荷试验新方法的研究与应用[J]. 浙江电力, 2019, 38(2): 62-67. LIANG Haidong, WANG Donghui, WANG Dafeng, et al. Research and application of a new on-load test method for power-receiving startup of off-shore wind power project[J]. Zhejiang Electric Power, 2019, 38(2): 62-67.
- [18] LIU Hong, YU Hua, NIU Shu, et al. Measurement of capacitance current of neutral point non-grounding system[C] // 2018 IEEE 3rd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC), October 12-14, 2018.
- [19] 吴炳晨. 核电厂外电源系统保护带负荷试验替补方法研究[J]. 中国核电, 2016, 9(1): 5-11. WU Bingchen. Study on load replacing test for offsite power system relay protection in nuclear power plant[J]. China Nuclear Power, 2016, 9(1): 5-11.

[20] 丁芑, 朱珂, 朱裕庆, 等. 基于模型辨识的配电线路永久性故障判定方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(5): 1004-1012.  
DING Fan, ZHU Ke, ZHU Yuqing, et al. Determining the permanent fault in distribution lines based on model recognition[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(5): 1004-1012.

[21] 齐郑, 刁春燕, 陈艳波. 配电网快速故障点转移熄弧方法的有效性在线辨识研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(11): 69-75.  
QI Zheng, DIAO Chunyan, CHEN Yanbo. Online identification of the effectiveness of fast fault point transfer arc extinguishing method for distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(11): 69-75.

[22] 薛永端, 李娟, 陈筱菁, 等. 谐振接地系统高阻接地故障暂态选线与过渡电阻辨识[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(17): 5037-5048.  
XUE Yongduan, LI Juan, CHEN Xiaoru, et al. Faulty feeder selection and transition resistance identification of high impedance fault in a resonant grounding system using transient signals[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(17): 5037-5048.

[23] 贾清泉, 王振宇, 王宁, 等. 基于参数辨识的消弧线圈接地电网单相接地故障测距方法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(23): 77-85.  
JIA Qingquan, WANG Zhenyu, WANG Ning, et al. A single-phase-to-ground fault locating algorithm for arc-suppression-coil earthed power distribution systems based on parameter estimation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(23): 77-85.

[24] 杨丝琪, 陈维, 郭天伟, 等. 特高压交流输电线路正常运行对埋地油气管道电磁影响及防护措施研究[J]. 高压电器, 2019, 55(6): 205-211.  
YANG Siqu, CHEN Wei, GUO Tianwei, et al. Electromagnetic effect of UHV AC transmission line on oil/gas pipeline and protective measures[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(6): 205-211.

[25] 夏君山, 夏向阳, 赵威, 等. 基于差值电流分析的高压电缆在线监测研究[J]. 高压电器, 2019, 55(7): 165-172.  
XIA Junshan, XIA Xiangyang, ZHAO Wei, et al. Research on online monitoring for HV cable based on differential current analysis[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(7): 165-172.

[26] 冉启鹏, 胡之荣, 字美荣, 等. 配电网电容电流测试研究[J]. 南方电网技术, 2011, 5(4): 81-85.  
RAN Qipeng, HU Zhirong, ZI Meirong, et al. Study on the test of distribution network's capacitive current[J]. Southern Power System Technology, 2011, 5(4): 81-85.

[27] 熊卫红, 毛兴华, 李景禄, 等. 小电阻接地方式对人身安全的影响及智能电阻接地方式研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(14): 166-172.  
XIONG Weihong, MAO Xinghua, LI Jinglu, et al. Influence of small resistance grounding mode on personal safety and research of intelligent resistance grounding mode[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(14): 166-172.

[28] 周仕敏. 电流互感器开路产生高压的原因分析[J]. 电气开关, 2020, 58(4): 9-10, 15.  
ZHOU Shimin. Analysis of causes for current transformer open-circuit producing high voltage[J]. Electric Switchgear, 2020, 58(4): 9-10, 15.

[29] 李敏, 靳绍平, 胡琛, 等. 高压电流互感器泄漏电流测量及消除方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(3): 156-163.  
LI Min, JIN Shaoping, HU Chen, et al. Research on leakage current measurement and elimination method of high voltage current transformer[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(3): 156-163.

收稿日期: 2020-07-11; 修回日期: 2020-09-05

作者简介:

楼晓轩(1990—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统及其自动化; E-mail: 393478579@qq.com

宋平(1983—), 男, 学士, 高级技师, 研究方向为电力系统及其自动化;

徐栋杰(1993—), 男, 硕士, 助理工程师, 研究方向为电力系统及其自动化。

(编辑 魏小丽)