

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190845

# 配电网快速故障点转移熄弧方法的有效性在线辨识研究

齐 郑, 刁春燕, 陈艳波

(华北电力大学电气与工程学院, 北京 102206)

**摘要:** 针对中性点不接地系统快速故障点转移熄弧方法在故障相母线接地期间无法判断原故障点故障状态的问题, 分析了线路重载和轻载两种情况下站内可测电气量的特征差异。当线路重载时, 若原故障点故障未消除, 两同相接地点间的大地支路将对负荷电流产生分流, 推导叠加负荷分量的母线接地点电流表达式。利用幅值和相位偏移度是否超过所设门限值判断原故障点状态。当线路轻载时, 若原故障点故障未消除, 两同相接地点使中性点不接地系统零序通路改变。利用对称分量法分别计算一点接地和两点接地时的故障线路零序电流, 利用零序电流偏移度判断原故障点状态。设计了故障相母线接地期间原故障点状态辨识及动作流程, 并通过 ATP 仿真软件对提出的方法进行了仿真验证。

**关键词:** 中性点不接地系统; 单相接地; 快速故障点转移熄弧方法; 故障状态辨识

## Online identification of the effectiveness of fast fault point transfer arc extinguishing method for distribution networks

QI Zheng, DIAO Chunyan, CHEN Yanbo

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** This paper addresses the problem in neutral ungrounded system that the fast fault point transfer arc extinguishing method cannot identify the original fault state during the grounding of the fault phase bus. The characteristic difference of measurable electrical quantities in the station is analyzed respectively in the case of heavy and light load. In the case of heavy load, if the fault of the original fault point is not eliminated, the earth branch between the two grounding points will divert the load current, and the formula for the current at the bus grounding point with superimposed load component is derived. The original fault state is judged by whether the current amplitude and phase offset exceed the threshold value. In the case of light load, if the original fault is not eliminated, the two grounding points in the same phase change the zero-sequence path of the system. The zero-sequence current in the fault line is calculated by the symmetrical component method when one point is grounded and two points are grounded, and the original fault state is identified by zero-sequence current offset. The identification procedure and motion flow to identify the original fault state during the grounding of fault phase bus are designed, and the proposed method is simulated and verified by ATP simulation software.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51777067).

**Key words:** neutral non-grounding system; single-phase grounding; fast fault point transfer method; identification of fault state

## 0 引言

我国 3~35 kV 采用中性点不接地方式的中低压配电网, 发生单相接地故障后, 继电保护装置不会立即动作跳闸, 系统可以带故障运行一段时间并在该时间内将故障排除。随着配电网容量扩大以及电

缆线路覆盖率增加, 系统对地电容电流随之增大<sup>[1]</sup>。传统利用中性点消弧线圈产生感性电流补偿系统电容电流的消弧方法虽然应用广泛, 但具有难以连续调节, 无法补偿接地电流有功和高频分量, 以及电容电流过大时成本过高等不足<sup>[2]</sup>。文献[3-7]提出一些对消弧线圈进行改进的方法, 希望实现全电流补偿, 但增加了装置的复杂度, 价格较高、现场应用较少。此外, 部分配电网将中性点接地方式改为中

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51777067)



### 1.3 母线接地电流特征差异分析

根据 1.1 节和 1.2 节中的分析, 作出各电气量相量图如图 2 所示。

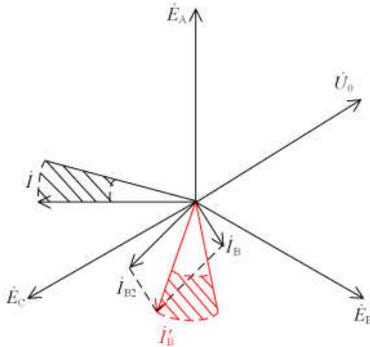


图 2 电压电流相量图

Fig. 2 Phasor diagram of voltage and current

由图 2 可以看出, 故障消除时的母线接地点电流  $\dot{I}_B$  相比故障未消除时的母线接地点电流  $\dot{I}'_B$  幅值与相位都发生较大变化。由于母线接地点的接地电阻及线路阻抗受设计规程限制变化较小, 因此这种差异的大小主要受负荷电流以及过渡电阻的大小影响, 负荷电流越大, 过渡电阻越小, 即越有可能出现严重故障的情况下, 母线接地点电流幅值和相位差异越大。根据系统实际参数计算故障未消除情况下母线接地电流可能的范围, 如图 2 所示, 黑色阴影部分表示负荷电流可能的范围, 母线接地电流  $\dot{I}'_B$  的范围如红色阴影部分所示, 而  $\dot{I}_B$  由系统电容电流组成, 相位滞后系统零序电压  $90^\circ$ , 幅值变化范围较小。因此在线路负载电流较大的情况下, 计算出  $\dot{I}'_B$  相对于系统零序电压  $\dot{U}_0$  的相位差, 以及相对于  $\dot{I}_B$  的幅值偏移度, 从而判断原故障点故障状态。考虑系统电容电流变化及测量误差, 当幅值偏移度大于 20% 或相位差大于  $100^\circ$  时, 认为此时原故障未消除。由于负荷电流较小的情况下, 原故障未消除时母线接地电流偏移度也有可能未达到设定的门槛, 此时需辅以其他判据进一步确认故障状态。

## 2 负荷电流较小时的故障状态分析

由 1.3 节分析可知, 故障未消除时母线接地电流的电容分量与故障消除时的母线接地电流差异很小, 当线路负载电流较小时, 母线接地点的负荷分量也较小, 通过母线接地点电流难以判断原故障点故障状态, 需要寻找新的判据。在中性点不接地系统中, 当只存在一点单相接地时, 接地点与线路对地电容构成零序通路, 而当原故障点未消除时, 系统出现同相两点接地, 此时零序通路发生变化, 因

此故障消除与否, 可通过故障线路零序电流特征进一步确认。

### 2.1 故障消除时的故障线路零序电流特征

原故障点故障消除时, 仅有故障相母线金属性接地, 作出此时的正序网络图如图 3 所示,  $Z_1$  为线路正序阻抗,  $C_1$  为系统等效正序电容,  $\dot{U}_{am}^1$ ,  $\dot{I}_{am}^1$  分别为母线接地点序电压和序电流。负序网络无电源, 即将  $\dot{E}_A$ 、 $\dot{E}_B$ 、 $\dot{E}_C$  处短路, 由于中性点不接地, 零序网络中将  $\dot{E}_A$ 、 $\dot{E}_B$ 、 $\dot{E}_C$  处开路。

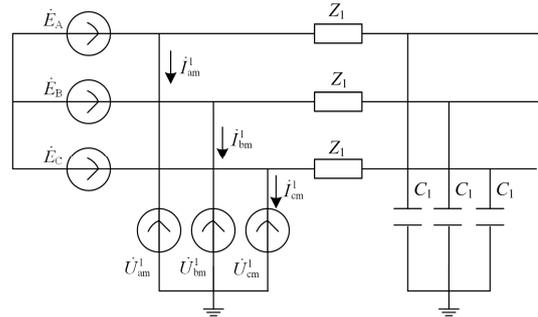


图 3 故障消除时系统正序网络图

Fig. 3 Positive sequence network diagram of the system with successful fault elimination

以 C 相为特殊相, 根据序网图列出网络方程如式(5)所示。

$$\begin{cases} \dot{E}_C = \dot{U}_{cm}^1 \\ 0 = \dot{U}_{cm}^2 \\ \dot{U}_{cm}^2 = -\dot{I}_{cm}^0 \cdot (Z_0 + 1/j\omega C_0) \end{cases} \quad (5)$$

根据边界条件列出方程如式(6)所示。

$$\begin{cases} \dot{U}_{cm} = \dot{U}_{cm}^1 + \dot{U}_{cm}^2 + \dot{U}_{cm}^0 = R_B \dot{I}_{cm} \\ \dot{I}_{am} = \dot{I}_{bm} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

根据对称分量法<sup>[23]</sup>联立式(5)、式(6)解出零序电流如式(7)所示。

$$\dot{I}_{cm}^0 = \frac{\dot{E}_C}{3R_B + Z_0 + 1/j\omega C_0} \quad (7)$$

### 2.2 故障未消除时的故障线路零序电流特征

原故障点故障未消除时, 故障相母线和原故障点同时接地, 根据对称分量法, 作出此时的正序网络图如图 4 所示,  $\dot{U}_{af}^1$ 、 $\dot{I}_{af}^1$  分别为原故障点序电压和序电流。负序网络无电源, 即将  $\dot{E}_A$ 、 $\dot{E}_B$ 、 $\dot{E}_C$  处短路, 由于中性点不接地, 零序网络中将  $\dot{E}_A$ 、 $\dot{E}_B$ 、 $\dot{E}_C$  处开路。

以 C 相为特殊相, 为简化方程及计算, 忽略对计算结果影响较小的正序及负序对地电容, 认为线

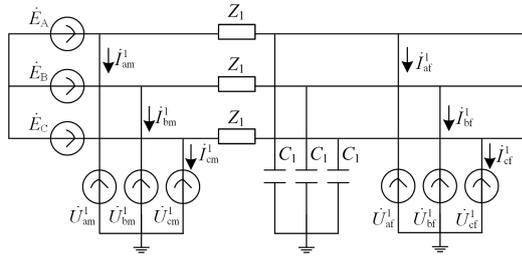


图 4 故障未消除时系统正序网络图

Fig. 4 Positive sequence network diagram of the system with unsuccessful fault elimination

路正序参数与负序参数相同，根据序网图列出网络方程如式(8)所示。

$$\begin{cases} \dot{E}_C = \dot{U}_{cm}^1 = \dot{U}_{cf}^1 + Z_1 \cdot \dot{I}_{cf}^1 \\ 0 = \dot{U}_{cm}^2 = \dot{U}_{cf}^2 + Z_1 \cdot \dot{I}_{cf}^2 \\ \dot{U}_{cm}^0 = \dot{U}_{cf}^0 + Z_0(\dot{U}_{cf}^0 \cdot j\omega C_0 + \dot{I}_{cf}^0) \\ \dot{I}_{cm}^0 + \dot{U}_{cf}^0 \cdot j\omega C_0 + \dot{I}_{cf}^0 = 0 \end{cases} \quad (8)$$

根据边界条件列出方程如式(9)所示。

$$\begin{cases} \dot{U}_{cm} = \dot{U}_{cm}^1 + \dot{U}_{cm}^2 + \dot{U}_{cm}^0 = R_B \dot{I}_{cm} \\ \dot{I}_{am} = \dot{I}_{bm} = 0 \\ \dot{U}_{cf} = \dot{U}_{cf}^1 + \dot{U}_{cf}^2 + \dot{U}_{cf}^0 = R_{tr} \dot{I}_{cf} \\ \dot{I}_{af} = \dot{I}_{bf} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

根据对称分量法联立式(8)、式(9)解出零序电流如式(10)所示。

$$\dot{I}_{cm}^0 = \frac{\dot{E}_C}{3R_B + Z_0 + (1 + \frac{3R_B + Z_0}{3R_{tr} + 2Z_1}) / j\omega C_0} \quad (10)$$

### 2.3 故障线路零序电流特征差异分析

对比式(7)和式(10)，将分母项记为故障等效零序阻抗  $Z_{0eq}$ ，原故障消除与未消除时的  $Z_{0eq}$  差异主要由母线接地电阻、线路阻抗以及原故障点过渡电阻决定，当过渡电阻趋于无穷大时，式(10)的极限形式即为式(7)。

等效零序阻抗的差异反映在零序电流上，即主要表现为零序电流幅值差异，过渡电阻的值越小，这种差异越显著。以故障消除时的故障线路零序电流为参考值，在计算及测量误差允许范围内，故障线路零序电流幅值低于参考值 90% 即判断原故障点未消除。

## 3 原故障点状态判别流程

快速故障点转移熄弧方法的有效性在线辨识流程图如图 5 所示。

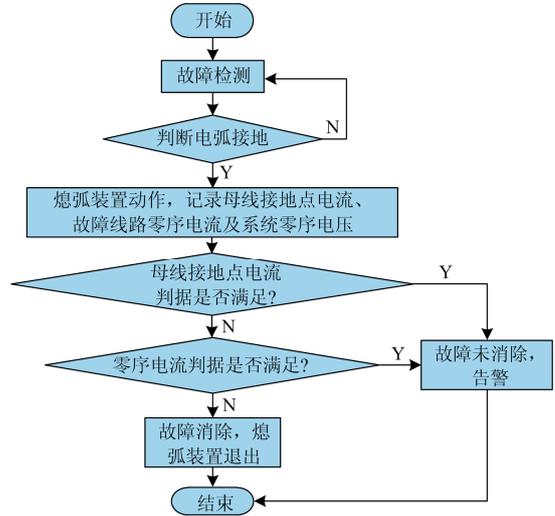


图 5 熄弧有效性辨识流程图

Fig. 5 Flow chart of arc extinguishing effectiveness identification

1) 根据三相工频电压有效值判断故障相，分析零序信号的各次谐波含量和相角、谐波失真率等因素判断是否为经电弧接地故障<sup>[24-28]</sup>，如果故障类型为电弧接地，则快速故障点转移熄弧装置动作，迅速将故障相母线金属性接地，在高电阻接地情况下，快速故障点转移熄弧装置闭锁不动。

2) 在故障相母线接地期间，记录母线接地点电流，若相对于故障消除时的系统电容电流幅值偏移大于 20%，相位滞后母线零序电压大于 100°，则判断原故障点故障未消除或绝缘损坏，发出告警信号，进入 4)；否则进入 3)。

3) 根据式(7)计算故障消除时故障线路零序电流参考值。在故障相母线接地期间，记录故障线路零序电流幅值，若故障线路零序电流幅值低于参考值的 90%，则判断原故障点故障未消除或绝缘损坏，发出告警信号，否则判断原故障消除。

4) 如果故障相母线接地期间，消弧装置告警，则通知值班人员处理故障；若判断原故障消除，则立即断开母线接地开关，系统恢复正常运行。

利用母线接地电流的判据具有幅值和相位双重辨识依据，在负荷电流较大时判断更加准确。如果负荷电流较小情况下利用母线接地电流的判据有可能失效，此时利用零序电流的判据可以使辨识结果更加可靠。

## 4 仿真验证

采用 ATP-EMTP 软件搭建了典型 10 kV 中性点不接地系统单相电弧接地故障模型如图 6 所示，模

型参数和运行工况基于现场典型运行情况。线路均为单回出线, 长度设定为 15 km, 故障点 k 距离母线出口处 5 km, 故障类型为 C 相经电弧接地, 线路负荷以 RLC 元件等效。线路为架空线、电缆 1:1 混合线路,  $L_1$  和  $L_2$  为电缆线路,  $L_3$  和  $L_4$  为架空线路, 架空线与电缆参数如表 1 所示。

设定系统负载电流幅值范围为 50~300 A, 相位滞后相电动势  $30^\circ\sim 40^\circ$ , 弧光接地时的过渡电阻范围设为  $4\sim 50\ \Omega$ <sup>[13]</sup>, 母线接地点电阻范围为 0~4  $\Omega$ 。

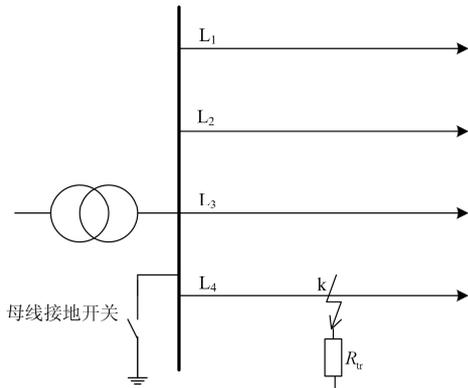


图 6 10 kV 系统示意图

Fig. 6 Schematic diagram of 10 kV system

表 1 10 kV 架空线和电缆参数

Table 1 Parameters of 10 kV overhead lines and cables

类型	$R_0/$ ( $\Omega/\text{km}$ )	$L_0/$ (H/km)	$C_0/$ ( $\mu\text{F}/\text{km}$ )	$R_1/$ ( $\Omega/\text{km}$ )	$L_1/$ (H/km)	$C_1/$ ( $\mu\text{F}/\text{km}$ )
架空线	0.21	0.007	0.004 6	0.21	0.0013	0.009
电缆	1.23	0.000 92	0.258	0.123	0.000 23	0.284

#### 4.1 负载较大时的母线接地电流

设定线路  $L_4$  负荷电流 182 A, 线路电流相位滞后电动势  $32^\circ$ , 原故障点过渡电阻 20  $\Omega$ , 母线接地点接地电阻等效为 4  $\Omega$ , 故障发生于 0.1 s 时刻, 母线接地开关于 0.145 s 合闸。分别记录了故障未消除与故障消除两种情况下母线接地点电流波形, 如图 7 所示。故障消除时, 母线接地点电流滞后母线零序电压  $89.61^\circ$ , 故障未消除时, 母线接地点电流相位滞后母线零序电压  $118.21^\circ$ , 幅值超出故障消除时的电流幅值 56.31%。根据偏移度, 可以判断原故障点故障未消除。

当负荷电流设定为 75 A, 原故障点过渡电阻 4  $\Omega$  时, 故障未消除情况下, 母线接地点电流相位滞后零序电压  $103.5^\circ$ , 幅值超出故障消除时的电流幅值 6.41%, 此时幅值偏移度未达 20%, 需要根据故障线路零序电流进一步判断。

#### 4.2 负载较小时的线路零序电流

线路  $L_4$  负荷电流 75 A, 原故障点过渡电阻 4  $\Omega$

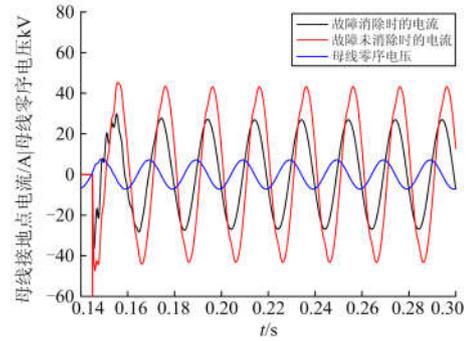


图 7 母线接地点电流波形图

Fig. 7 Current waveform at bus grounding point

时, 故障发生于 0.1 s 时刻, 母线接地开关于 0.145 s 合闸。分别记录了故障未消除与故障消除两种情况下故障线路零序电流波形, 如图 8 所示。这两种情况下, 故障未消除时的电流幅值为故障消除时的电流幅值的 52.07%。根据偏移度可以判断原故障点故障状态。

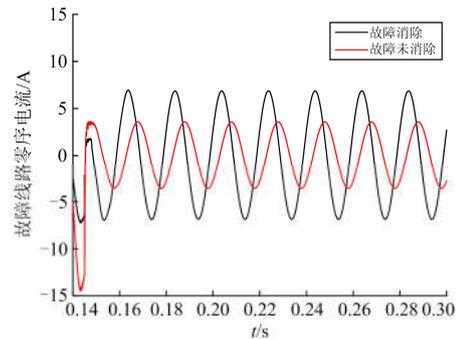


图 8 故障线路零序电流波形图

Fig. 8 Zero sequence current waveform in fault line

原故障点过渡电阻为 20  $\Omega$  时, 故障未消除时的电流幅值为参考值的 64.09%, 原故障点过渡电阻为 50  $\Omega$  时, 故障未消除时的电流幅值为参考值的 83.01%, 根据幅值差异, 仍可以判断原故障点故障状态, 因此零序电流判据基本可以满足轻载时低过渡电阻弧光接地情况下原故障点状态的辨识。

## 5 结论

基于快速故障点转移熄弧方法在故障相母线接地期间原故障点状态无法判断的问题, 提出了在线路负荷电流较大时, 计算故障未消除时母线接地点电流偏移, 根据母线接地点电流相位及幅值偏移度判断原故障点状态; 在负荷电流较小, 母线接地电流判据失效时, 计算故障未消除时故障线路零序电流偏移, 根据故障线路零序电流幅值偏移度判断原故障点状态。

由于系统电容电流几乎不受负荷电流及故障过渡电阻影响,因此线路负载较重时,以系统电容电流为对比,具有较高的准确度;当线路轻载时,根据零序网络能够准确反应系统接地状态,辅以零序电流幅值作为判据提高辨识结果的可靠性。

本文提出的方法能够在故障相母线接地期间对原故障点状态进行辨识,若判断原故障消除则立即断开接地开关,若原故障未消除则立即告警通知处理故障,缩短了故障处理时间,避免了原故障未消除情况下快速故障点转移熄弧装置可能存在的多次接地对系统造成冲击。本文针对传统的变电站内可观测的电气量进行研究,随着配电自动化系统的普及,本文提出的方法将如何在信息量更大的情况下进行改进有待于进一步研究。

### 参考文献

- [1] 要焕年,曹梅月. 电力系统谐振接地[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [2] 彭沙沙,曾祥君,喻琨,等. 基于二次注入的配电网接地故障有源电压消弧方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(20): 142-149.  
PENG Shasha, ZENG Xiangjun, YU Kun, et al. Active arc-suppression method of grounding fault for distribution network based on secondary injection[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(20): 142-149.
- [3] 王朋,陈柏超,周洪,等. 非连续铁心结构磁控消弧线圈的稳态建模与优化设计方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(18): 5606-5614.  
WANG Peng, CHEN Baichao, ZHOU Hong, et al. Steady-state modeling and optimal design method of magnetic controllable Petersen coil with discontinuous core structure[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(18): 5606-5614.
- [4] 贾晨曦,王崇林,杨龙月. 全电流补偿消弧线圈增容改造方案的研究[J]. 高压电器, 2016, 52(7): 89-95.  
JIA Chenxi, WANG Chonglin, YANG Longyue. Research on capacity-expansion modification scheme of full current compensation arc suppression coil[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(7): 89-95.
- [5] 程路,陈乔夫,张宇,等. 基于变压器可控负载原理的新型消弧线圈[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(21): 77-81.  
CHENG Lu, CHEN Qiaofu, ZHANG Yu, et al. Novel arc-suppression coil based on the theory of transformer with controllable load[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(21): 77-81.
- [6] 曲铁龙. 全电流补偿消弧线圈及其控制方法的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2008.
- QU Yilong. Research on full-compensation arc-suppression coil and its control technology[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2008.
- [7] TIAN J, CHEN Q, CHENG L, et al. Arc-suppression coil based on transformer with controlled load[J]. IET Electric Power Applications, 2011, 5(8): 644-653.
- [8] 申建强. 10 kV 配电网混合接地方式运行研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2011.  
SHEN Jianqiang. Research on hybrid grounding run of 10 kV distribution network[D]. Changsha: Hunan University, 2011.
- [9] TANG Tao, HUANG Chun, HUA Leng, et al. Single phase high-impedance fault protection for low-resistance grounded distribution network[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(10): 2462-2470.
- [10] DATSIOS Z G, MIKROPOULOS P N. Safety performance evaluation of typical grounding configurations of MV/LV distribution substations[J]. Electric Power Systems Research, 2017, 26(15): 150-156.
- [11] 赵军,阮琦,李景禄. 考虑线路压降的快速接地开关消弧性能及应用[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(20): 158-164.  
ZHAO Jun, RUAN Qi, LI Jinglu. Arc eliminating performance and application of fast grounding switch considering line voltage drop[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(20): 158-164.
- [12] 李新泉,齐郑,杨以涵. 一种新型消弧方法的研究及其实现[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(24): 83-87.  
LI Xinquan, QI Zheng, YANG Yihan. Research and realization on a new tape arc-suppression method[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(24): 83-87.
- [13] 黄跃. 配电网接地故障辨识与消弧柜投入控制研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2014.  
HUNAG Yue. Research on earth fault identification and arc-overvoltage suppressor operation control in distribution networks[D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2014.
- [14] 张红飞,汤明金,程志友,等. 一种快速的配电网单相接地故障时域测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(17): 24-30.  
ZHANG Hongfei, TANG Mingjin, CHENG Zhiyou, et al. A fast time domain fault location method for single phase to ground fault in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(17): 24-30.
- [15] LI Guoxin, ZHANG Lijuan, SU Lisha, et al. Line selection for single-phase ground fault based on grey relation analysis in small current grounding system[J]. Revista

- Tecnica de la Facultad de Ingenieria Universidad del Zulia, 2016, 39(2): 364-371.
- [16] ELKALASHY N I, SABIHA N A, LEHTONEN M. Earth fault distance estimation using active traveling waves in energized-compensated MV networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 30(2): 836-843.
- [17] 郭霖徽, 刘亚东, 王鹏, 等. 基于相空间重构与平均电导特征的配电网单相接地故障辨识[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(7): 192-198.  
GUO Linhui, LIU Yadong, WANG Peng, et al. Single-phase grounding fault recognition in distribution networks based on phase-space reconstruction and average conductance characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(7): 192-198.
- [18] ROOSTAEE S, THOMAS M S, MEHFUZ S. Experimental studies on impedance based fault location for long transmission lines[J]. Protection and Control Modern Power Systems, 2017, 2(2): 169-177. DOI: 10.1186/s41601-017-0048-y.
- [19] 余斌, 尹项根, 朱维钧, 等. 复合接地消弧方式接地故障分析及保护对策[J]. 中国电力, 2018, 51(12): 72-79.  
YU Bin, YIN Xianggen, ZHU Weijun, et al. Grounding fault analysis and protection scheme study for composite grounding arc-suppression mode[J]. Electric Power, 2018, 51(12): 72-79.
- [20] 李振兴, 吴李群, 谭洪, 等. 基于简单通信的双端行波测距新方法[J]. 中国电力, 2018, 51(3): 74-79.  
LI Zhenxing, WU Liqun, TAN Hong, et al. A novel method for double terminal traveling wave fault location based on simple communication[J]. Electric Power, 2018, 51(3): 74-79.
- [20] 曾祥君, 王媛媛, 李健, 等. 基于配电网柔性接地控制的故障消弧与馈线保护新原理[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(16): 137-143.  
ZENG Xiangjun, WANG Yuanyuan, LI Jian, et al. Novel principle of faults arc extinguishing & feeder protection based on flexible grounding control for distribution networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(16): 137-143.
- [21] 张毅, 薛永端, 宋华茂, 等. 低阻接地故障有源电压消弧算法性能分析和改进[J]. 电网技术, 2017, 41(1): 314-321.  
ZHANG Yi, XUE Yongduan, SONG Huamao, et al. Performance analysis and improvement of active voltage arc-suppression algorithm about low resistance grounding fault[J]. Power System Technology, 2017, 41(1): 314-321.
- [22] 李光琦. 电力系统暂态分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [23] LEE W J, SAHNI M, METHAPRAYOON K, et al. A novel approach for arcing fault detection for medium-low voltage switchgear[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2009, 45(4): 1475-1483.
- [24] 刘官耕, 杜松怀, 苏娟, 等. 低压电弧故障防护技术研究与发展趋势[J]. 电网技术, 2017, 41(1): 305-313.  
LIU Guangen, DU Songhuai, SU Juan, et al. Research on LV arc fault protection and its development trends[J]. Power System Technology, 2017, 41(1): 305-313.
- [25] 许晔, 郭谋发, 陈彬, 等. 配电网单相接地电弧建模及仿真分析研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 57-64.  
XU Ye, GUO Moufa, CHEN Bin, et al. Modeling and simulation analysis of arc in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 57-64.
- [26] 杨明波, 龙毅, 樊三军, 等. 基于组合 Mayr 和 Cassie 电弧模型的弧光接地故障仿真及分析[J]. 电测与仪表, 2019, 56(10): 8-13.  
YANG Mingbo, LONG Yi, FAN Sanjun, et al. Simulation and analysis of arc grounding fault based on combined Mayr and Cassie arc models[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(10): 8-13.
- [27] 顾荣斌, 蔡旭, 陈海昆, 等. 非有效接地电网单相电弧接地故障的建模及仿真[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(13): 63-67.  
GU Rongbin, CAI Xu, CHEN Haikun, et al. Modeling and simulating of single-phase arc grounding fault in non-effective earthed networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(13): 63-67.

收稿日期: 2019-07-19; 修回日期: 2019-12-29

作者简介:

齐 郑(1977—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统及其自动化; E-mail: qizheng319@126.com

刁春燕(1997—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统及其自动化; E-mail: 18810526320@163.com

陈艳波(1982—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统及其自动化。E-mail: yanbochen2008@sina.com

(编辑 姜新丽)