

小电阻接地系统单相接地保护方法

李宇琦¹ 侯炜¹ 徐光福¹ 金震¹ 石勇¹

(1. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏省 南京市 211102)

Single-phase grounding protection method of low resistance grounding system

Li Yuqi¹, Hou Wei¹, Xu Guangfu¹, Jin Zhen¹, Shi Yong¹

(1. NR Electric Co., Ltd. Nanjing 211102, China)

摘要: 小电阻接地系统, 发生高阻接地故障很难被识别, 针对该问题本文通过分析系统单相接地故障特征发现: 故障线路、健全线路零序电流有功分量与中性点零序电流的比值两者具有明显差异, 并且此差异与接地过渡电阻的大小关系极小, 利用此差异可以有效识别单相高阻接地故障。基于此可实现在高阻接地故障初期快速隔离故障, 通过 PSCAD 搭建仿真模型进行仿真, 结果验证了该方法的可靠性。

关键词: 零序电流有功分量; 单相接地故障; 高阻接地

中图分类号: TM771 文献标志码: A

Abstract: Low resistance grounding system, it is difficult to be identified when high resistance grounding fault occurs. In view of this problem, the electrical characteristics of single-phase grounding fault are analyzed, the active component of zero sequence current of faulty line and non-faulty line compare respectively with that of neutral point, which shows that the ratio differs a lot and the difference has a little relation with the transition resistance. Based on this, high resistance grounding fault can be identified and quickly isolated in the early stage of high-resistance grounding fault. The simulation model is built on PSCAD, and the simulation results verify that the scheme is reliable.

Keywords: Active component of zero-sequence current; Single-phase grounding fault; high resistance eart

0 引言

¹小电阻接地方式在抑制过电压以及切除接地故障速度上具有一定优势, 因此得到了广泛应用, 但此接地方式下当系统发生单相高阻接地故障时故障特征不明显^[1-2], 而现场常用的传统零序过流保护方案, 其整定值按躲过区外线路发生金属性接地故障时区内线路的对地电容电流整定, 一般我国 10kV 小电阻接地配电网零序过电流保护的电流定值(指 3 倍的零序电流定值下同)为 40~60A, 最大只能检测到 85~135 欧姆左右的接地电阻^[3-6], 因此高阻接地时保护容易拒动故障不易被切除, 而系统长时间带故障运行, 可能导致接地变保护动作切除电源或者相间短路故障扩大故障范围, 并且往往易引起故障点火灾、设备损坏以及人员伤亡等事故^[7]。

针对上述问题本文通过分析单相接地故障电气量特征, 提出利用故障线路、健全线路的零序电流有功分量与中性点零序电流比值具有明显差异这一特点来识别高阻接地故障; 最终实现在高阻接地故障初期快速动作隔离故障, 仿真分析结果验证了该方法的可靠性。

1 小电阻接地系统单相接地故障判别方法

1.1 单相接地故障电气特征

中性点经小电阻接地系统发生接地故障示意图如图 1 所示。图中 R_N 为中性点电阻, 按照国内 10kV 小电阻接地系统的工程经验取 $R_N=10\Omega$, R_f 为故障点接地电阻, C_{01} 、 $C_{02}\cdots C_{0n}$ 为各线路对地电容。

¹基金项目: 国家电网有限公司科技项目(5400-202256273A-2-0-XG)

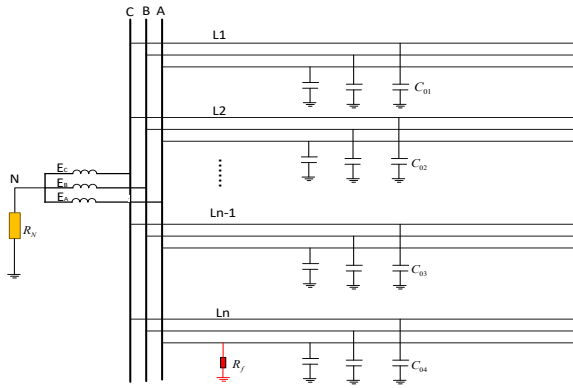


图 1 小电阻接地系统单相接地故障示意图
Figure 1 Single phase ground fault schematic diagram of low-resistance grounding system

系统中正序、负序阻抗远小于零序阻抗，对零序电流分布影响很小，本文分析忽略上述电气参数。小电阻接地系统单相接地故障零序等效网络如图 2 所示，其中为故障点虚拟电源电压 $\dot{U}_f = -\dot{U}_A$ 为故障点故障前相电压， \dot{I}_{0n} 为故障线路零序电流， \dot{I}_{0k} ($k=1, 2, \dots, n-1$) 为健全线路零序电流， \dot{I}_{0r} 为中性点零序电流， \dot{U}_0 为母线零序电压。

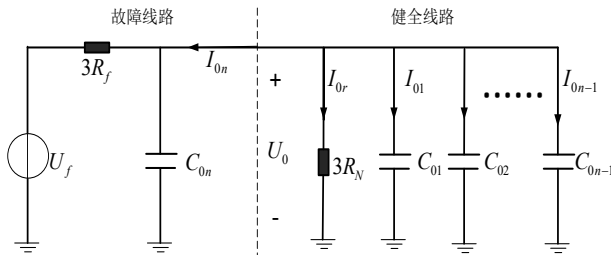


图 2 单相接地故障的零序等效网络
Figure 2 Zero-sequence equivalent network of line grounding fault

图 2 可知中性点零序电阻 $3R_N$ 与各条出线的对地零序电容 C_{0n} ($i=1, 2, \dots, n$) 并联得到零序阻抗 Z_0 ：

$$Z_0 = \frac{1}{\frac{1}{3R_N} + j\omega \sum_{m=1}^n C_{0m}} \quad (1)$$

根据电路分压原理，通过分析图 2 可知零序电压 \dot{U}_0 为：

$$\dot{U}_0 = \dot{U}_f \left(\frac{Z_0}{Z_0 + 3R_f} \right) \quad (2)$$

中性点零序电流 \dot{I}_{0r} 为：

$$\dot{I}_{0r} = \dot{U}_f \frac{Z_0}{(Z_0 + 3R_f)3R_N} \quad (3)$$

Z_0 以及 $\dot{U}_f = -\dot{U}_A$ 入式 (3) 得到：

$$\dot{I}_{0r} = -\dot{U}_A \frac{1}{3R_N + 3R_f + 9j\omega R_N R_f \sum_{m=1}^n C_{0m}} \quad (4)$$

同理健全线路 k 的零序电流 \dot{I}_{0k} 为

$$\dot{I}_{0k} = \dot{U}_f \frac{Z_0 j\omega C_{0k}}{(Z_0 + 3R_f)} = -\dot{U}_A \frac{j\omega R_N C_{0k}}{R_N + R_f + 3j\omega R_N R_f \sum_{m=1}^n C_{0m}} \quad (5)$$

故障线路 n 的零序电流 \dot{I}_{0n} 为：

$$\dot{I}_{0n} = \dot{U}_f \left(-\frac{1}{(Z_0 + 3R_f)} + \frac{Z_0 j\omega C_{0n}}{(Z_0 + 3R_f)} \right) \quad (6)$$

$$= \dot{U}_A \frac{1 + 3j\omega R_N \sum_{m=1}^{n-1} C_{0m}}{3R_N + 3R_f + 9j\omega R_N R_f \sum_{m=1}^n C_{0m}} \quad (7)$$

式中： $\sum_{m=1}^n C_{0m}$ 为所有线路零序对地电容之和， $\sum_{m=1}^{n-1} C_{0m}$ 为所有健全线路零序对地电容之和， ω 为工频角频率。

健全线路 k 零序电流与中性点零序电流之比：

$$\frac{\dot{I}_{0k}}{\dot{I}_{0r}} = 3j\omega R_N C_{0k} \quad (8)$$

故障线路 n 零序电流与中性点零序电流之比：

$$\frac{\dot{I}_{0n}}{\dot{I}_{0r}} = -1 - 3j\omega R_N \sum_{m=1}^{n-1} C_{0m} \quad (9)$$

10kV 系统零序过电流保护定值一般最大整定为 60A，按照健全线路最大零序电流约 20A 计算式 (8)；按照系统对地电容电流一般不超过 150A，即所有健全线路电流不超过 50A 计算式 (9) 可得：

$$\left| \frac{\dot{I}_{0k}}{\dot{I}_{0r}} \right| = 3\omega R_N C_{0k} \approx 0.1039 \quad (10)$$

$$\left| \frac{\dot{I}_{0n}}{\dot{I}_{0r}} \right| = \sqrt{1 + 9\omega^2 R_N^2 \left(\sum_{m=1}^{n-1} C_{0m} \right)^2} \approx 1.033 \quad (11)$$

由式(10)、(11)可知发生线路单相接地故障时，故障线路零序电流与中性点零序电流有效值之比略大于 1，健全线路的零序电流与中性点零序电流之比最大值略大于 0.1，远小于前者。

利用式 (4) 定量分析可知，中性点零序电流虽

并不完全是阻性电流，但其无功电流是很小的，最大约占总电流 3% 左右，分析时可忽略无功电流分量，认为中性点电流与零序电压同相位，作为基准相量。

取中性点电流 \dot{I}_{0r} 为基准相量，式 (8) 可以看出，健全线路零序电流相位超前中性点零序电流约为 $\theta_k = 90^\circ$ 。

结合式(9)，故障线路零序电流 \dot{I}_{0n} 与中性点电流 \dot{I}_{0r} 的夹角 θ_n 为：

$$\theta_n = (180^\circ + \arctan(3\omega R_N \sum_{m=1}^{n-1} C_{0m})) \quad (12)$$

经计算可得故障线路零序电流相位超前中性点零序电流约为 $\theta_n = 180^\circ \sim 194.56^\circ$ 。

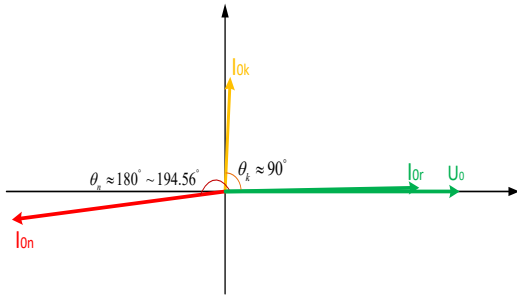


图 3 相量分析示意图

Figure 3 The diagram of Phase analysis

以零序电压、中性点零序电流相量作为参考，可以看出健全线路零序电流 \dot{I}_{0k} 性质基本呈容性， \dot{I}_{0k} 的有功分量很小几乎为 0，故障线路零序电流 \dot{I}_{0n} 有功分量与 \dot{I}_{0r} 方向相反，大小略小于 \dot{I}_{0n} 的模。

小电阻接地系统母线接地故障与线路接地故障零序网络相似，各线路及中性点零序电流分布规律与线路接地故障时分布规律相似，因此这里不再对母线接地情况进行详细推导分析。

1.2 基于零序电流有功分量系数的单相接地故障判别方法

利用故障线路与健全线路零序电流有功分量显著不同这一特点，可以作为接地故障判据。设线路 m 零序电流有功分量为 I_{0pm} ，则：

$$\dot{I}_{0pm} = \dot{I}_{0m} \cos \theta_m \quad (13)$$

式中： I_{0pm} 为线路 m 零序电流有功分量， θ_m 为线路 m 零序电流与中性点零序电流的夹角。

健全线路 k 、故障线路 n 零序电流有功分量分别为：

$$\begin{cases} \dot{I}_{0pk} = \dot{I}_{0k} \cos \theta_k \\ \dot{I}_{0pn} = \dot{I}_{0n} \cos \theta_n \end{cases} \quad (14)$$

各线路零序电流有功分量与中性点零序电流之

比称为有功分量系数 λ_k ， θ_k 、 θ_n 范围前文已经讨论过，结合式 (8)、(9) 则有：

$$\begin{cases} \lambda_k = \left| \frac{\dot{I}_{0pk}}{\dot{I}_{0r}} \right| = \left| \frac{\dot{I}_{0k} \cos \theta_k}{\dot{I}_{0r}} \right| \approx 0 \\ \lambda_n = \left| \frac{\dot{I}_{0pn}}{\dot{I}_{0r}} \right| = \left| \frac{\dot{I}_{0n} \cos \theta_n}{\dot{I}_{0r}} \right| \approx 1 \end{cases} \quad (15)$$

故障线路零序电流有功分量与中性点电流之比 λ_n ，健全线路零序电流有功分量与中性点电流之比 λ_k ， λ_n 与 λ_k 两者间具有明显差异，此差异理论上与接地过渡电阻的大小无关。

根据上述分析提出单相接地判别依据为：当线路零序电流有功分量系数 λ 超过预设值 λ_{0set} 时判定为接地故障线路。

具体判别流程为：1) 线路零序电流越过 I_{0qd} 时整组启动；2) 若此时零序电流大于零序过流保护定值 I_{0set} 的线路直接判定为故障线路；3) 若此时零序电流小于 I_{0set} ，则计算其有功分量系数，若 $\lambda_k > \lambda_{0set}$ (有功分量系数整定值) 则判定该线路为故障线路。下面分别考虑，各个定值参数整定原则。

启动定值 I_{0qd} ，考虑保护可靠性要求，整组启动门槛需要躲过线路最大不平衡零序电流，根据现场实际情况门槛值可设定 2~5A。

零序过流保护整定值 I_{0set} ，整定值需躲过区外线路发生金属性接地故障时流过区内线路的对地电容电流。

有功分量系数 λ_{0set} ，考虑零序 CT 相位测量误差最大约 30° ，则有：

根据式(10)健全线路有功系数最大值约为：

$$\lambda_{kmax} = 0.1039 \times \sin 30^\circ \approx 0.05 \quad (16)$$

根据式(11)故障线路有功系数最小值约为：

$$\lambda_{nmin} = 1 \times \cos(14.56^\circ + 30^\circ) \approx 0.71 \quad (17)$$

由式(16)、(17)可知：

$$0 < \lambda_k \leq 0.05 \quad \lambda_n > 0.71 \quad (18)$$

健全线路的 λ 最大值小于 0.05，而故障线路的 λ 最小值大于 0.71，根据两者有功系数的显著差异并考虑保护可靠性的要求，本文设定 $\lambda_{0set} = 0.5$ ，即当线路 $\lambda_{0m} > 0.5$ 则判定第 m 条出线发生接地障。

上述小电阻接地系统单相接地判别方法原理清晰，区分度明显，理论上不受过渡电阻影响。

2 仿真分析

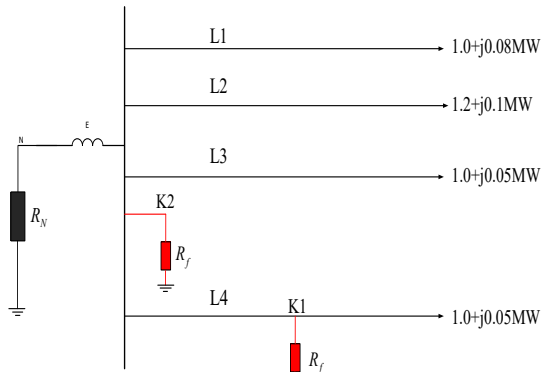


图 4 仿真系统示意图

Figure 4 The Diagram of Simulation System

通过 PSCAD 搭建仿真模型，验证本文所提保护方案^[8-10]。

如图 9 所示，其中 L1~L4 为地铁主变电所母线上各出线，为方便分析 L1~L4 做等值处理；K1~K2 为故障点，K1 代表 L4 发生单相接地故障，K2 代表主变电所母线发生单相接地故障。

根据图 4 搭建仿真模型，模拟 L4 发生区内单相

表 1 K1 点故障时各支路零序电流
Table.1 K1 Fault- Zero Sequence Current

过渡电阻/欧	\dot{i}_{0r}	\dot{i}_{01}	\dot{i}_{02}	\dot{i}_{03}	\dot{i}_{04}
10	235.03∠116.92°	3.093∠-153.57°	3.093∠-153.52°	3.092∠-153.58°	235.79∠-60.72°
100	49.87∠116.64°	0.6575∠-153.44°	0.6578∠-153.57°	0.6575∠-153.45°	49.99∠-60.58°
500	11.07∠116.66°	0.1461∠-153.41°	0.1461∠-153.54°	0.1461∠-153.41°	11.09∠-60.55°
1000	5.61∠116.67°	0.074∠-153.41°	0.074∠-153.54°	0.074∠-153.42°	5.618∠-60.54°
1500	3.75∠116.67°	0.049∠-153.41°	0.049∠-153.53°	0.049∠-153.40°	3.77∠-60.69°

表 2 K1 点故障时各支路计算零序电流有功分量系数
Table.2 K1 Fault-Active Component Coefficient

过渡电阻/欧	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4
10	1.1254E-04	1.0106E-04	1.1481E-04	1.0023
100	1.8408E-05	4.8344E-05	2.0709E-05	1.0012
500	1.6124E-05	4.6069E-05	1.6124E-05	1.0006
1000	1.8414E-05	4.8337E-05	2.0716E-05	1.0003
1500	1.8401E-05	4.6003E-05	1.6101E-05	1.0027

表 3 K2 点故障时各支路计算零序电流有功分量系数
Table.3 K2 Fault-Zero Sequence Current Active Component Coefficient

过渡电阻/欧	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4
0.01	0.001255	4.8345E-5	1.8417E-5	4.4204E-5

如表 1、表 2 所示，变电主所 L4 线路发生 A 相单相接地故障时，健全线路 L1~L3 零序电流有功分量系

数 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 最大约为 10⁻⁴ 这个数量级，远小于保护整定值 0.5，而故障线路 L4 零序电流有功分量

接地故障以及主所母线单相接地故障进行仿真验证。
设地铁 10kV 交流供电系统主变电所中性点接地电阻为 10Ω，共有 4 条电缆出线 L1、L2、L3、L4 各出线电缆总长度先分别设定为 5km。正/负序参数： $R_1=0.27\Omega/km$ 、 $L_1=0.255\times 10^{-3}H/km$ 、 $C_1=339\times 10^{-9}F/km$ 。

零序参数： $R_0=2.7\Omega/km$ 、 $L_0=1.109\times 10^{-3}H/km$ 、 $C_0=280\times 10^{-9}F/km$ 。

模拟 K1 点故障，L4 电缆发生 A 相单相接地故障，过渡电阻分别取：

$R_f=10\Omega$ $R_f=100\Omega$ $R_f=500\Omega$ $R_f=1000\Omega$ $R_f=1500\Omega$

，仿真实验结果得到各线路零序电流相量以及计算得到有功分量系数如表 1、表 2 所示。

系数 λ 都略大于 1, 远大于整定值 0.5, 故障线路与健全线路的有功分量系数 λ 差异明显, 能够有效区分故障线路与健全线路。

故障线路沿线有功分量系数大于 0.5 ($\lambda > 0.5$) 发出接地启动信号, 判别此次接地故障为区内故障, 保护动作跳闸隔离故障。

模拟 K2 点故障, 即主变电所母线发生 A 相金属性接地故障, 取过渡电阻为 $R_f = 0.01\Omega$, L1 长度改为 20km, 健全线路越长其零序电流有功系数越大, 仿真结果如表 4、表 5 所示。

如表 3 所示母线发生金属性接地, 即便模型中线路 L1 长度改为 20km, 其零序电流有功分量系数也仅为 0.001255, 而 L2、L3 以及 L4 沿线各间隔零序电流有功分量系数都为 10⁻⁵ 这个数量级, 全部都远小于保护整定值 0.5, 可见母线单相接地故障时, 保护可靠不动作。

3 结语

本文针对经小电阻接地供电系统发生单相高阻接地故障时, 故障难以被识别这一问题展开研究, 通过分析单相接地故障零序等效网络发现, 健全线路零序电流有功分量远小于中性点零序电流; 而故障线路零序电流有功分量与中性点零序电流基本相等, 故障线路、健全线路零序电流有功分量与中性点零序电流的比值, 两者具有明显差异, 此差异与过渡电阻关系极小, 据此提出了一种单相接地故障识别方法, 即判定线路零序电流有功分量与中性点零序电流比值 λ 超过 0.5 的线路为故障线路; 最终可在高阻接地故障初期准确快速隔离故障, 最大限度地提高了系统供电可靠性, 仿真结果表明过渡电阻 1500 Ω 以内的接地故障, 所提方案均能可靠实现保护, 是具有绝对选择性的快速保护方。

参 考 文 献:

- [1] 刘明岩. 配电网中性点接地方式的选择[J]. 电网技术, 2004, 28(16): 86-89.
LIU Mingyan. Selection of neutral grounding modes in power distribution network[J]. Power System Technology, 2004, 28(16): 86-89.
- [2] 曹梅月, 要焕年. 电缆网络的中性点接地方式问题[J]. 电网技术, 2003, 27(2): 84-89.
CAO Meiyue, YAO Huannian. On neutral grounding modes of cable network[J]. Power System Technology, 2003, 27(2): 84-89.
- [3] 薛永端, 刘珊, 王艳松, 等. 基于零序电压比率制动的小电阻接地系统接地保护[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(16): 112-117.
XUE Yongduan, LIU Shan, WANG Yansong, et al. Grounding gault protection in low resistance grounding system based on zero-sequence voltage ratio restrain[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(16): 112-117.
- [4] 白浩, 黄升平, 潘姝慧, 等. 配电网中性点电压主动调控的接地故障零序电流多判据选线方法[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(4): 105-113.
BAI Hao, HUANG Shengping, PAN Shuhui, et al. Zero sequence current multi-criteria line selection method based on active regulation of neutral voltage in distribution networks [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(4): 105-113.
- [5] 林志超, 刘鑫星, 王英民, 等. 基于零序电流比较的小电阻接地系统接地故障保护[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(22): 15-21.
LIN Zhichao, LIU Xinxing, WANG Yingmin, et al. Grounding fault protection based on zero sequence current comparison in low resistance grounding system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(22): 21-27.
- [6] 许庆强, 许扬, 周栋骥, 等. 小电阻接地配电网线路保护单相高阻接地分析[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(9): 91-94.
XU Qingqiang, XU Yang, ZHOU Dongji, et al. Analysis of distribution network line relay protection during single-phase highresistance grounding faults in low resistance neutral grounded system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(9): 91-94.
- [7] 顾建昭, 王宾, 董新洲, 等. 中性点有效接地配电网高阻接地故障特征分析及检测[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(16): 85-91.
GENG Jianzhao, WANG Bin, DONG Xinzhou, et al. Analysis and detection of high impedance grounding fault in neutral point effectively grounding distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(16): 85-91.
- [8] 赵建文, 范文璐, 胡雨佳. 基于零序电流包络线拟合斜率的配电网故障选线方法[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(3): 117-125.
ZHAO Jianwen, FAN Wenlu, HU Yujia. A distribution network fault line selection method based on zero-sequence current envelope fitting slope [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(3): 117-125.
- [9] 王开康. 基于光纤数字通信的直流双边联跳保护方案[J]. 都市轨道交通, 2011, 24(4): 105-108.
WANG Kaikang. DC Two Mutual Transfer Tripping Protection Design Based on Optical Fiber Digital Communication[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2011, 24(4): 105-108.
- [10] 周鹏, 刘伟博, 王交通, 等. 基于综合内积变换的小电阻接地系统高阻故障检测方法[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(9): 70-76.
ZHOU Peng, LIU Weibo, WANG Jiaotong. A high impedance fault detection method of small resistance grounding system based on integrated inner product transformation[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(9): 70-76.
- [11] 陈桥山, 王媛媛, 方涛. 基于相间电流突变特征的可调消弧线圈接地系统选线方法[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(2): 47-53.
CHEN Qiaoshan, WANG Yuanyuan, FANG Tao. A faulty feeder selection method for adjustable arc-suppression coil system based on phase-to-phase current mutation feature [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(2): 47-53.
- [12] 单继平. 数字通信电流保护在地铁中压网络

- 零序电流保护的应用[J]. 都市轨道交通,2020,33(4):66-71.
- SHAN Jiping. Application of Digital Communication Current Protection in Zero-Sequence Current Protection of the Metro's MV Network [J]. Urban Rail Transit,2020,33(4): 66-71.
- [13] 王庭华, 薛永端, 赵雪霖, 等. 不同接地电阻下消弧线圈接地系统接地故障暂态特征[J]. 电力系统及其自动化学报,2019,31(9):43-51.
- WANG Tinghua, XUE Yongduan, ZHAO Xuelin, et al. Transient characteristics of earth fault in arc suppression coil grounded system with different grounding resistances[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA,2019, 31(9):43-51.
- [14] 张国军, 张文周, 葛群, 等. 基于补偿参数的多零序电流互感器的小电流接地系统单相接地故障选线方法[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(2):1-9.
- ZHANG Guojun, ZHANG Wenzhou, GE Qun, et al. Single-phase ground faultline selection method of small current grounding system of multiple zero-sequence current transformer based on compensation parameters[J]. Power System Protection and Control,2021,49(2):1-9.
- [15] 张颖, 张宇雄, 容展鹏, 等. 基于中性点零序电流注入的高阻接地辨识方法[J]. 电力科学与技术学报,2016,31(3):123-129.
- ZHANG Ying, ZHANG Yuxiong, RONG Zhanpeng, et al. High resistance grounding fault identification method with zero sequence current injection at neutral point[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2016,31(3):123-129.

作者简介:

李宇琦(1986), 男, 陕西商洛, 硕士, 高级工程师, 电力系统继电保护。