

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201415

高阻接地故障时消弧线圈并联小电阻接地的控制方法研究

叶远波¹, 汪胜和¹, 谢民¹, 蔡翔², 徐波³, 魏立新⁴

(1. 安徽电力调度控制中心, 安徽 合肥 230022; 2. 上海蓝瑞电气有限公司, 上海 201613;
3. 上海电力大学电气工程学院, 上海 200090; 4. 上海思源电气股份有限公司, 上海 201108)

摘要: 中性点经消弧线圈并联小电阻接地方式可以实现自动熄弧与永久接地故障的可靠保护, 兼具中性点经消弧线圈接地和经小电阻接地两种方式的优点。但在高阻接地故障时投切并联小电阻可能造成零序电压低于保护装置启动阈值, 从而造成保护装置误动, 甚至可能加剧故障。为此, 提出一种高阻接地故障时并联小电阻投入的控制方法。首先, 利用电力系统的基本原理分析了高阻接地故障时并联小电阻投入前后零序电流与零序电压的特征。其次, 根据故障线路与非故障线路零序电流与零序电压夹角的异同提出并联小电阻装置退出的判据, 据此也提出一种线路故障的保护方法。最后通过仿真验证了所提方法的有效性。

关键词: 消弧线圈; 并联小电阻; 高阻故障; 单相接地故障

Study on the control method of high impedance faults in the neutral via arc suppression coil paralleled with a low resistance grounded system

YE Yuanbo¹, WANG Shenghe¹, XIE Min¹, CAI Xiang², XU Bo³, WEI Lixin⁴

(1. Anhui Electrical Power Dispatch Center, Hefei 230022, China; 2. Shanghai Lanrui Electric Co., Ltd., Shanghai 201613, China; 3. School of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 4. Shanghai Sieyuan Electric Co., Ltd., Shanghai 201108, China)

Abstract: The neutral via arc suppression coil paralleled with a low resistance grounded system can realize arc extinguishing and reliable protection against permanent single-line-to-grounded faults, taking into account the advantages of resonant grounded systems and the neutral via a low resistance grounded system. However, in the case of high impedance faults, the paralleling low resistance may cause the zero sequence voltage to be lower than the starting threshold value of the protection device. This may cause the protection device to malfunction and even aggravate the fault. In this paper, a control method of the paralleling low resistance in the high impedance fault is proposed. First, the characteristics of zero sequence current and the zero sequence voltage before and after the paralleling low resistance is put into operation are analyzed, which is based on the power system basic principle. Secondly, from the difference between the angle of the zero sequence current and the zero sequence voltage of the fault line and the non-fault line, the criterion of the paralleling low resistance device exit is proposed. Finally, the effectiveness of the method is verified by simulation.

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 52120018004L).

Key words: arc suppression coils; low paralleled resistances; high impedance faults; single-line-to-grounded faults

0 引言

我国 3~66 kV 电网主要采用中性点不接地或经消弧线圈接地^[1-3]运行方式。中性点经消弧线圈接地的优点是能够熄灭并抑制电弧重燃, 按照规程可以

带故障运行 2 h, 保证供电可靠性^[4-5]。但随着城市配电网线路中电缆化率的提高, 永久性接地故障的比例越来越高, 并且单相接地故障往往会发展成为两相短路故障^[6-7]。因此, 一些电缆化率较高的大城市采用了中性点经小电阻接地运行方式, 以提高线路保护的快速性。这种接地方式可以快速选线及跳闸, 但线路跳闸率偏高, 中性点设备容易损坏^[8-11]。

基金项目: 国家电网公司科技项目资助(52120018004L)

为兼顾消弧线圈和小电阻两种接地方式的优点, 有学者提出消弧线圈并联小电阻的接地方式^[12-15]。

这种新型的接地方式由消弧线圈和可控电阻器组成^[12-13]。配电网正常运行时, 中性点仅通过消弧线圈接地, 并联电阻器处于断开状态。发生瞬时性接地故障时, 消弧线圈立即工作, 补偿接地电流, 实现熄灭电弧抑制重燃的目的。若瞬时性故障发展为永久性故障, 则投入并联小电阻, 其作用是抑制故障过电压以及快速选线跳闸。

文献^[14-15]利用并联小电阻投切时的故障特征提出谐振系统故障定位的新方法。消弧线圈并联小电阻接地方式具有中性点经消弧线圈与经小电阻两种接地方式的优点, 但也存在一些问题。例如, 配电网中发生高阻接地故障时, 零序电压(中性点电压)及零序电流等特征量非常小, 在中性点经消弧线圈接地系统中更为微弱^[16-19]。研究表明, 单相接地故障时投入并联小电阻会使中性点电压继续下降, 尤其在高阻接地故障时情况更为严重^[20-21]。因为高阻接地故障时零序电压有可能仅仅超过 15% 相电压的启动阈值, 此时投入并联小电阻则加剧了零序电压的下降程度, 使其值小于或者远小于 15% 相电压的启动阈值。对消弧线圈控制器与保护装置而言, 零序电压小于启动阈值则认为故障消失, 从而退出消弧线圈及并联小电阻, 结果造成: (1) 故障电弧继续存在, 故障线路也不能正确选出; (2) 消弧线圈及小电阻装置反复投入与退出、频繁动作, 影响设备寿命。此外, 高阻接地故障时, 中性点电压非常小, 因此各线路的零序电流及并联小电阻产生的阻性电流也很小, 采用零序电流过流保护的方法难以保证控制策略的有效性。

因此, 为避免高阻接地故障时消弧线圈及并联小电阻误动, 本文通过理论分析, 提出并联小电阻投入的控制方法, 并且提出高阻接地故障时线路的保护方案。

1 消弧线圈并联小电阻高阻接地故障分析

中性点经消弧线圈并联小电阻接地方式如图 1 所示, R_N 表示小电阻, 其阻值一般为 10Ω 或者 16Ω 。K 表示小电阻的投切装置。L 表示消弧线圈。为便于分析, 本文假设所有线路对地电容均对称, 并且忽略相间电容以及线路对地泄漏电阻。

并联小电阻的工作流程一般为: 正常运行时, K 断开, 并联电阻 R_N 不投入运行, 仅消弧线圈 L 工作在过补偿状态。当线路(如 WL_1)发生单相接地故障时: (1) 若为瞬时性接地故障, 消弧线圈可熄灭

电弧并抑制重燃, 系统可继续供电 1~2 h, 并联小电阻不投入; (2) 若为永久性接地故障, 经过延迟 Δt 后 K 闭合, 投入并联电阻, 然后根据相关保护判据确定故障线路并跳闸。

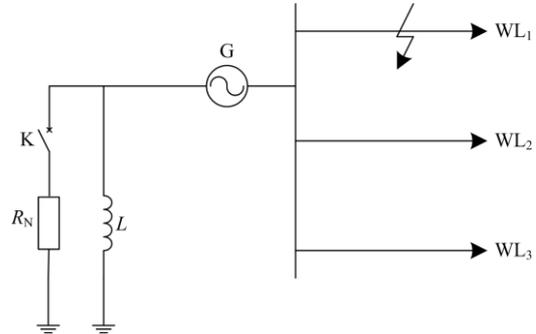


图 1 消弧线圈并联小电阻接地系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of arc suppression coil paralleled with a low resistance grounded system

下面根据并联小电阻的工作流程, 分析系统中性点电压、各线路零序电流的变化特征。

1.1 并联小电阻投入之前

当发生接地故障时, 消弧线圈立即投入工作, 等效电路如图 2 所示(图中 R_f 表示接地电阻)。

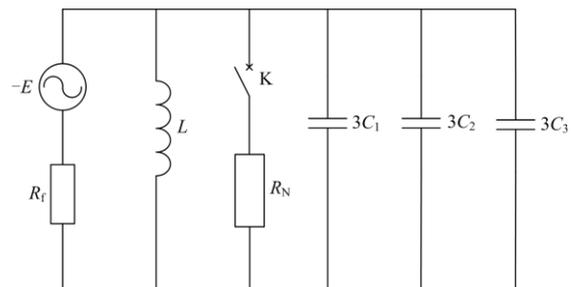


图 2 消弧线圈并联小电阻接地零序电路图(K 断开)

Fig. 2 Zero sequence circuit diagram of arc suppression coil paralleled with a low resistance grounded system (K is open)

根据电路原理, 接地故障发生后, K 闭合前, 中性点电压为

$$U_N^{\&N} = -\frac{E}{R_f} \frac{1}{\frac{1}{j\omega L} + j3\omega C + \frac{1}{R_f}} \quad (1)$$

故障线路 1 首端的零序电流为

$$3I_{10}^{\&N} = \left[-\frac{1}{j\omega L} - j3\omega(C_2 + C_3) \right] U_N^{\&N} \quad (2)$$

非故障线路 2、3 首端的零序电流分别为

$$\begin{cases} 3I_{20}^{\&N} = j3\omega C_2 U_N^{\&N} \\ 3I_{30}^{\&N} = j3\omega C_3 U_N^{\&N} \end{cases} \quad (3)$$

为避免串联谐振过电压, 消弧线圈一般工作在过补偿方式^[22-24]。因此, 由式(2)得故障线路零序电流与中性点电压(零序电压)的夹角为

$$\arg \frac{3I_{10}^{\&}}{U_N^{\&}} = 90^\circ \quad (4)$$

由式(3)得非故障线路零序电流与零序电压的夹角为

$$\begin{cases} \arg \frac{3I_{20}^{\&}}{U_N^{\&}} = 90^\circ \\ \arg \frac{3I_{30}^{\&}}{U_N^{\&}} = 90^\circ \end{cases} \quad (5)$$

需要说明的是, 图 2 所示的等效电路中忽略了线路中的对地泄漏电阻。若考虑该电阻, 则式(4)与式(5)并不成立, 而是零序电流与零序电压的夹角略小于 90° 。

1.2 并联小电阻投入之后

若为永久性接地故障, 则闭合开关 K, 投入并联小电阻, 以实现线路保护功能。

同样根据电路原理可知零序电压发生改变, 即

$$U_N^{\&} = -\frac{\frac{E}{R_f}}{\frac{1}{j\omega L} + j3\omega C + \frac{1}{R_f} + \frac{1}{R_N}} \quad (6)$$

由式(6)可以看出, 并联小电阻投入之后, 零序电压幅值不仅没有升高反而减小了, 这有利于电网过电压水平的降低。在零序电压 $U_N^{\&}$ 的作用下, 并联小电阻中流过的电流为

$$I_{RN}^{\&} = \frac{U_N^{\&}}{R_N} \quad (7)$$

故障线路 1 与非故障线路 2、3 首端的零序电流分别为

$$\begin{cases} 3I_{10}^{\&} = \left[-\frac{1}{R_N} - \frac{1}{j\omega L} - j3\omega(C_2 + C_3) \right] U_N^{\&} \\ 3I_{20}^{\&} = j3\omega C_2 U_N^{\&} \\ 3I_{30}^{\&} = j3\omega C_3 U_N^{\&} \end{cases} \quad (8)$$

可见, 故障线路 1 的零序电流与零序电压的夹角为

$$\arg \frac{3I_{10}^{\&}}{U_N^{\&}} = 180^\circ - \arctg \frac{|\nu - \gamma|}{d} \quad (9)$$

$$\text{式中: } \nu = \frac{3\omega(C_1 + C_2 + C_3) - \frac{1}{\omega L}}{3\omega(C_1 + C_2 + C_3)}; \gamma = \frac{C_1}{C_1 + C_2 + C_3};$$

$$d = \frac{1}{3R_N\omega(C_1 + C_2 + C_3)}。 \text{可见:}$$

$$90^\circ \leq \arg \frac{3I_{10}^{\&}}{U_N^{\&}} \leq 180^\circ \quad (10)$$

由于并联小电阻 R_N 的阻值比较小, 实际中一般取 10Ω 或者 16Ω 。而且脱谐度 ν 的取值较小, 为 $-10\% \sim -5\%$, 所以 $\arg \frac{3I_{10}^{\&}}{U_N^{\&}}$ 接近 180° 。以系统对地

电容电流为 100 A 的 10 kV 电网为例, 在过补偿工作方式下, 脱谐度 ν 取 -5% 。此时

$$171^\circ \leq \arg \frac{3I_{10}^{\&}}{U_N^{\&}} \leq 179.5^\circ \quad (11)$$

而非故障线路 2、3 的零序电流与零序电压的夹角为

$$\begin{cases} \arg \frac{3I_{20}^{\&}}{U_N^{\&}} = 90^\circ \\ \arg \frac{3I_{30}^{\&}}{U_N^{\&}} = 90^\circ \end{cases} \quad (12)$$

1.3 并联小电阻投入前后对比分析

对比式(2)、式(3)与式(8)可以看出: 并联小电阻投入前后, 只有故障线路的零序电流发生了变化; 并且从式(8)可以看出, 投入并联电阻 R_N 之后, 其产生的电流占主导地位。

对比式(4)与式(10)可以看出: 并联小电阻投入前后, 故障线路零序电流与零序电压的夹角发生改变, 由 90° 附近改变至 180° 附近。对比式(5)与式(12)可以看出: 非故障线路零序电流与零序电压的夹角并未发生改变, 均在 90° 附近。因此, 可以根据此特征进行故障判断。

2 高阻接地故障时并联小电阻的控制

在配网故障中, 单相接地故障比例较大, 其中又以高阻接地故障为多。根据上述故障过程的推导, 可以得到高阻接地故障时, 并联小电阻投入之后零序电流与零序电压的特征。

在高阻接地故障时, 式(1)、式(6)中故障电阻 R_f 比较大, 因此零序电压要降低, 各条线路的零序电流也因此减小。但是, 从式(2)、式(3)分析可知, 故障电阻 R_f 的大小仅影响零序电压和零序电流的大小, 并不改变电网中零序电流的分布特点及其与零序电压的相位关系, 高阻接地故障与金属性接地故障时的相位关系是相同的。

2.1 高阻接地故障时并联小电阻的控制

当发生高阻接地故障时, 零序电压将会降低。

因此, 在零序电压已经比较小的情况下, 再投入并联小电阻之后零序电压的值更小, 甚至有可能小于消弧线圈与保护装置的启动阈值(如 15%的相电压), 从而导致其发生误判, 造成小电阻及消弧线圈退出, 影响灭弧效果及小电阻的寿命。

比较式(4)与式(10)、式(5)与式(12), 考察投入并联小电阻前后零序电流与零序电压夹角的变化特征, 本文提出一种新的并联小电阻投入期间的控制方法, 如图 3 所示。在投入并联小电阻之后, 监测各线路零序电流与零序电压夹角的变化, 如果不变, 则说明故障可能消除, 则不需要投入小电阻; 如果发生变化(如故障线路 1, 该夹角由略小于 90° 增加为接近 180°), 则说明故障仍然存在, 需要投入消弧线圈和并联小电阻。

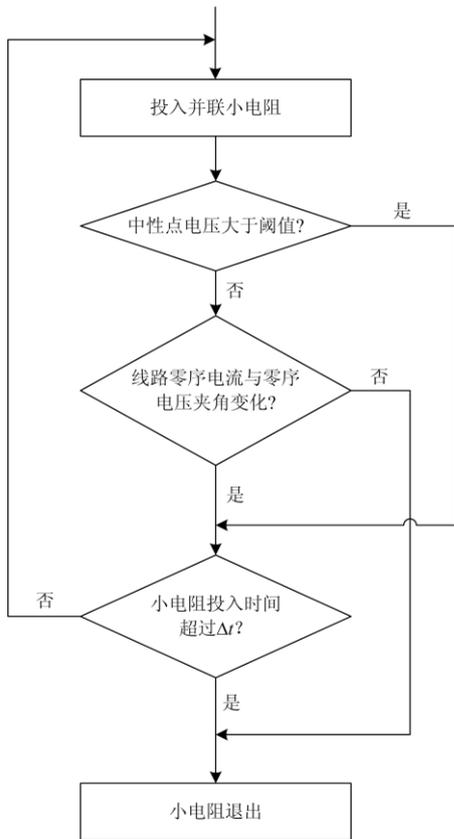


图 3 高阻接地故障时并联小电阻的控制

Fig. 3 Control method of the shunt low resistance in case of high impedance faults

在高阻接地故障中, 零序电压与零序电流的值比较小, 其精度受到测量装置的影响。在 10 kV 配电网中, 常用的零序 CT 的准确级为 5P10 级, 其相位差为 $\pm 60^\circ$ 。零序 PT 的准确级为 3P 级, 其相位差为 $\pm 120^\circ$ 。两者夹角的相位差最大为 180° ; 可以满足判断需求。

2.2 高阻接地故障时线路保护方法

从上述分析可知, 接地点故障电阻仅仅改变零序电流与零序电压的幅值, 并不改变各条线路零序电流的性质。

因此, 除实现小电阻装置正确投入退出的控制之外, 利用这个特点也可以实现线路保护, 以避免高阻接地故障时零序电流保护失效的不足。具体判断流程如图 4 所示。

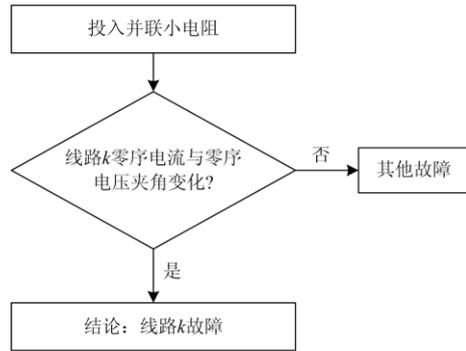


图 4 高阻接地故障时线路故障保护

Fig. 4 Line protection in case of high impedance faults

3 仿真验证

利用 PSCAD/EMTDC 软件搭建如图 1 所示的配电网仿真平台^[24-25]。交流电源为 10 kV。线路 WL₁ 为 30 km 架空线, 线路 WL₂ 为 45 km 架空线和 11 km 电缆的混合线路, 线路 WL₃ 为 38 km 电缆线。架空线参数为相间距 2 m、高度 9.85 m 的水平排列的三相钢芯铝绞线。电缆参数为: (1) 正序电阻 $R_1=0.075 \Omega/\text{km}$, 正序电感 $L_1=0.254 \text{ mH}/\text{km}$, 正序电容 $C_1=0.318 \mu\text{F}/\text{km}$; (2) 零序电阻 $R_0=0.102 \Omega/\text{km}$, 零序电感 $L_0=0.892 \text{ mH}/\text{km}$, 零序电容 $C_0=0.210 \mu\text{F}/\text{km}$ 。

在金属性接地故障时, 测量所搭建系统的对地容抗为 98Ω 。仿真中, 并联小电阻 $R_N=16 \Omega$, 保护启动阈值 $k=15\%$, 消弧线圈工作在过补偿状态, 脱谐度 $\nu=-10\%$ 。

仿真中单相接地故障过程如下: $t=0.203 \text{ s}$ 时, 线路 WL₁ 发生 A 相接地故障。 $t=0.4 \text{ s}$ 时, 投入并联小电阻。 $t=0.6 \text{ s}$ 时, 并联小电阻退出。 $t=0.8 \text{ s}$ 时, 故障消除, 消弧线圈退出。

3.1 10 Ω 故障电阻接地故障

设置故障电阻为 10Ω 。发生接地故障时, 投入并联小电阻, 零序电压会下降, 但降幅不大。这种情况下, 以零序电压不低于 15%相电压作为故障消除的标志是可行的。各条线路的零序电流与零序电压的仿真波形如图 5 所示。

从图 5 中可以看出, 小电阻投入之前, 故障线

路 WL_1 与非故障线路零序电流与零序电压的夹角基本相等, 为 90° 。小电阻投入之后, 故障线路 WL_1 的零序电流 I_{10} (红色曲线)与零序电压(黑色曲线)相位相差 180° , 而非故障线路的零序电流与零序电压相位相差接近 90° 。根据前述方法, 可以确定线路 WL_1 为故障线路。

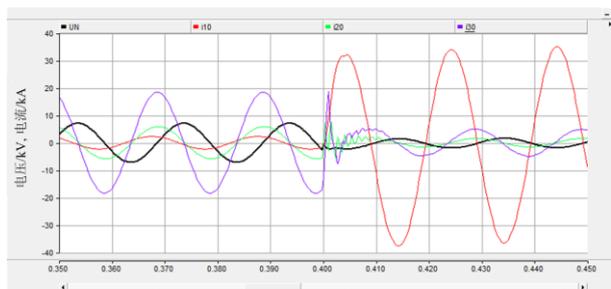


图5 系统零序电压与线路零序电流(故障电阻为 10Ω , $t=0.35\sim 0.45$ s)

Fig. 5 Zero sequence voltage and currents (fault resistance is 10Ω , $t=0.35\sim 0.45$ s)

3.2 200Ω 故障电阻的接地故障

设置故障电阻为 200Ω 。故障发生后投入并联小电阻, 零序电压会下降, 降幅较大。这种情况下, 以零序电压不低于 15% 相电压作为故障消除的标志是错误的, 因为此时仍旧存在单相接地故障, 退出消弧线圈只会使电弧重燃。各条线路的零序电流与零序电压的波形如图 6 所示。

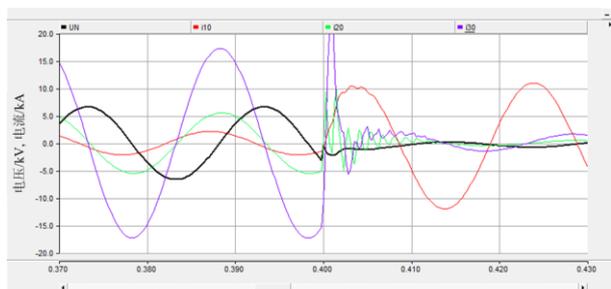


图6 系统零序电压与线路零序电流(故障电阻为 200Ω , $t=0.37\sim 0.43$ s)

Fig. 6 Zero sequence voltage and currents (fault resistance is 200Ω , $t=0.37\sim 0.43$ s)

从图 6 中可以看出, 投入小电阻之后, 故障线路 WL_1 的零序电流 I_{10} (红色曲线)与零序电压(黑色曲线)相位相差 180° , 而非故障线路与零序电压相位相差 90° 。根据前述方法, 可以确定线路 WL_1 为故障线路。

4 结论

在消弧线圈并联小电阻接地方式下, 故障期间

并联小电阻投入使零序电压降低, 当高阻接地故障时, 有可能导致零序电压小于启动阈值。因此, 本文利用零序电流与零序电压的夹角作为小电阻的控制条件, 这样可以避免高阻接地故障时消弧线圈及其并联小电阻装置的频繁启动。同时, 利用零序电流与零序电压夹角特征也可以判断故障线路, 以弥补线路零序保护在高阻接地故障时的不足。

实际中消弧线圈的工作方式比较复杂, 电弧接地故障发生频繁, 本文方法对这些复杂工况的适用性还需要进一步研究与改进。

参考文献

- [1] 要焕年, 曹月梅. 电力系统谐振接地[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [2] 吴斌, 陈纲, 金云奎, 等. 一种新型的消弧线圈自动跟踪补偿装置[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(19): 151-157.
- [3] WU Bin, CHEN Gang, JIN Yunkui, et al. A new type of arc-suppression coil automatic tracking compensation device[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(19): 151-157.
- [4] WAQAR A K, BI Tianshu, JIA Ke. A review of single phase adaptive auto reclosing schemes for EHV transmission lines[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(3): 205-214. DOI: 10.1186/s41601-019-0133-5.
- [5] 徐铭铭, 高淑萍, 常仲学, 等. 基于模型识别的消弧线圈接地系统单相接地选线方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(2): 73-78.
- [6] XU Mingming, GAO Shuping, CHANG Zhongxue, et al. Model recognition based single-phase earthed faulty line selection method of Petersen coil grounded system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(2): 73-78.
- [7] BARIK M A, GARGOOM A, MAHMUD M A, et al. A decentralized fault detection technique for detecting single phase to ground faults in power distribution systems with resonant grounding[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(5): 2462-2473.
- [8] LI Zhengtian, YE Yuqing, MA Xiao, et al. Single-phase-to-ground fault section location in flexible resonant grounding distribution networks using soft open points[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 122: 1-9.
- [9] PENG Wang, CHEN Baichao, HONG Zhou, et al. Fault location in resonant grounded network by adaptive control of neutral-to-earth complex impedance[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(2): 689-698.
- [10] 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.
- [11] 张健, 马伟, 朱亚奇, 等. 10 kV 配网中性点小电阻接

- 地系统的研究与设计[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(14): 109-115.
- ZHANG Jian, MA Wei, ZHU Yaqi, et al. Research and design of neutral grounding resistance system for 10 kV distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(14): 109-115.
- [10] 廖峰, 陈锦荣, 黎永豪, 等. 小电阻接地方式下接地变压器零序差动保护的研究及应用[J]. 广东电力, 2020, 33(7): 100-106.
- LIAO Feng, CHEN Jinrong, LI Yonghao, et al. Research and application of zero-sequence differential protection of grounding transformer under the mode of small resistance grounding[J]. Guangdong Electric Power, 2020, 33(7): 100-106.
- [11] 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.
- [12] 杨帆, 任伟, 沈煜, 等. 消弧线圈并联小电阻系统接地故障灵活处理策略[J]. 供用电, 2019, 36(3): 44-49.
- YANG Fan, REN Wei, SHEN Yu, et al. Grounding fault processing strategy in Petersen coil paralleled small resistance grounding system[J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(3): 44-49.
- [13] 韩静, 徐丽杰. 中性点经消弧线圈瞬时并联小电阻接地研究[J]. 高电压技术, 2005, 31(1): 38-39, 52.
- HAN Jing, XU Lijie. Study of a neutral grounding method with an arc suppression coil and a parallel low resistance[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(1): 38-39, 52.
- [14] 齐郑, 杭天琦, 李悦悦. 消弧线圈并联小电阻接地方式下的行波故障测距[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(1): 175-182.
- QI Zheng, HANG Tianqi, LI Yueyue, et al. Traveling wave fault location for arc-suppression coil in parallel with low resistance grounding mode[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(1): 175-182.
- [15] 齐郑, 庄舒仪, 刘自发, 等. 基于并联电阻扰动信号的配电网故障定位方法分析[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(9): 195-200.
- QI Zheng, ZHUANG Shuyi, LIU Zifa, et al. Analysis on distribution network fault location method based on parallel resistance disturbed signal injection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(9): 195-200.
- [16] SILVA S, COSTA P, GOUVEA M, et al. High impedance fault detection in power distribution systems using wavelet transform and evolving neural network[J]. Electric Power Systems Research, 2018, 154: 474-483.
- [17] 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.
- [18] 王宾, 倪江, 王海港, 等. 输电线路弧光高阻接地故障单端测距分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(5): 1333-1340.
- WANG Bin, NI Jiang, WANG Haigang, et al. Single-end fault location for high impedance arc grounding fault in transmission line[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(5): 1333-1340.
- [19] WEI Mingjie, SHI Fang, ZHANG Hengxu, et al. High impedance arc fault detection based on the harmonic randomness and waveform distortion in the distribution system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(2): 837-850.
- [20] CHAITANYA B K, YADAV A, PAZOKI M, et al. An intelligent detection of high-impedance faults for distribution lines integrated with distributed generators[J]. IEEE Systems Journal, 2020, 14(1): 870-879.
- [21] WANG Xiaowei, GAO Jie, WEI Xiangxiang, et al. High impedance fault detection method based on variational mode decomposition and Teager-Kaiser energy operators for distribution network[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(6): 6041-6054.
- [22] HUANG Shaofeng, LUO Lan, CAO Kai. A novel method of ground fault phase selection in weak-infeed side[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(5): 2215-2222.
- [23] 袁超, 薛永端, 梅睿, 等. 不同接地方式下配电网绝缘监察的灵敏性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(3): 130-137.
- YUAN Chao, XUE Yongduan, MEI Rui, et al. Sensitivity analysis of insulation monitoring of distribution network under different grounding modes[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(3): 130-137.
- [24] HUANG Chun, TANG Tao, JIANG Yajun, et al. Faulty feeder detection by adjusting the compensation degree of arc-suppression coil for distribution network[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2017, 12(4): 807-814.
- [25] 邱进, 崔鑫, 田野, 等. 小电流接地配电网弧光高阻接地故障电压特征分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(16): 115-121.
- QIU Jin, CUI Xin, TIAN Ye, et al. Analysis of the arc high impedance grounding faults voltage characteristics in non-effective grounding feeders[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(16): 115-121.

收稿日期: 2020-11-16; 修回日期: 2021-01-07

作者简介:

叶远波(1973—), 男, 硕士, 教授级高工, 研究方向为电力系统继电保护。E-mail: yeyb7079@ah.sgcc.com.cn

(编辑 魏小丽)