

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201237

小电流接地系统接地型早期故障扰动特征分析

楚恬歆¹, 张文海¹, 瞿科¹, 张妹¹, 肖先勇¹, 谭媛^{1,2}

(1. 四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065; 2. 国网四川省电力公司成都市郫都供电分公司, 四川 成都 611730)

摘要: 早期故障用于描述系统中不会导致继电保护动作的瞬时性自恢复故障扰动。基于对早期故障扰动的检测识别可实现对配网的故障预测和预警, 对于提升供电可靠性有重要意义。受中性点接地方式影响, 小电流接地系统中早期故障将有不同表现形式。针对小电流接地系统特点及其运行要求, 分别从等效电路及仿真建模两方面, 对该类系统中接地型早期故障的表现形式及其电气量变化特征进行了分析和总结。结果表明, 小电流接地系统中接地型早期故障分为“单相接地型”和“异名相两点接地型”, 同时总结了各种情况下早期故障扰动波形的变化特征。仿真和部分现场故障录波数据证明了分析结论的正确性, 研究结论将为小电流接地系统早期故障检测识别及故障预测预警提供重要理论支撑。

关键词: 早期故障; 小电流接地系统; 单相接地故障; 异名相两点接地故障; 瞬时性故障

Grounded incipient fault analysis in a non-solidly grounding system

CHU Tianxin¹, ZHANG Wenhai¹, QU Ke¹, ZHANG Shu¹, XIAO Xianyong¹, TAN Yuan^{1,2}

(1. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. Chengdu Pidu Power Supply Branch, State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 611730, China)

Abstract: Incipient faults are used to describe transient self-recovery faults that will not cause relay protection actions in the system. Fault prediction and early warning of distribution network faults can be realized based on incipient fault detection and identification. This is of significance for improving power supply reliability. Affected by the neutral grounding method, incipient faults in a non-solidly grounding system manifest in different ways. For the characteristics and operating requirements of such a system, this paper analyzes and summarizes manifestations and characteristics of grounded incipient faults quantitatively from the equivalent circuit and simulation modeling. Results indicate that grounded incipient faults are divided into single-phase-to-ground fault and two-point grounding fault in two phases, and characteristics of incipient fault waveforms are summarized. The conclusions are verified by simulation and field data, and will provide theory and data support for detection and identification of incipient faults in non-solidly grounding system, as well as fault prediction and early warning.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2020YFF0305800) and Sichuan Applied Basic Research Project (No. 2020YJ0012).

Key words: incipient fault; non-solidly grounding system; single-phase-to-ground fault; two-point grounding fault in two phases; transient fault

0 引言

由于配网分布范围广、设备体量大、运行环境复杂, 在经长时间运行后, 设备不可避免地会出现绝缘劣化、局部损坏等缺陷, 随着缺陷的累积和发

展, 其将在系统运行过程中表现出各种故障特征^[1-2], 其中最典型的即为局部放电信号^[3], 并得到了大量的关注。现有多数设备状态诊断和分析方法均是基于设备局部放电信号的在线监测、带电检测实现^[4], 然而由于局放信号的检测对传感器、信号采样频率等都有较高的要求, 投入较大, 限制了其在配电网中的应用。

近年来, 根据实测数据发现, 部分设备在发生

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2020YFF0305800);
四川省应用基础研究项目资助(2020YJ0012)

永久性故障前可能产生多次的瞬时性、重复性故障扰动^[5], 该扰动可被安装在变电站端的电压和电流互感器测量到, 基于录波可实现对该故障扰动的记录。由于该类故障扰动具有自清除性, 其持续时间或故障电流幅值不满足配网过流保护动作条件, 过流保护不会动作, 但在重复发生多次之后可能造成永久故障并最终导致跳闸, 因此这些故障扰动被称为早期故障, 也被称为自清除故障^[3,6-9]。因此, 基于对早期故障扰动的检测识别, 有望实现对配网设备的故障预警, 减少非计划故障停运, 对于提高供电可靠性有重要意义。

随着电网信息化的发展, 故障录波仪、电能质量监测装置、微型 PMU、带故障录波功能的故障指示器等在配网中得到了大量应用, 为该类早期故障扰动的检测提供了重要的硬件和数据基础, 针对配网设备早期故障的检测识别成为近年来的研究热点^[9-17]。

配网早期故障主要体现为瞬时性单相接地故障, 前期研究主要针对中性点直接接地系统, 该类系统早期故障特征明显(单相接地故障电流大), 然而我国中压配网主要采用小电流接地^[18-19], 包括中性点不接地和经消弧线圈接地, 该类系统单相接地故障电流小^[20], 并且其运行特性存在特殊性, 现有大量检测方法不能直接应用。针对小电流接地系统, 文献^[9-11]提出了基于类人概念学习的配网早期故障辨识方法, 该方法基于数据驱动, 应用基于学习的算法进行辨识; 文献^[12-13]提出了基于 HHT、小波、能量检测等方法对中压配网中的瞬时性接地故障进行分析, 提出各种特征量用以刻画故障扰动的严重程度。然而现有研究均只考虑到了小电流接地系统的部分特征, 并且缺乏对小电流接地系统早期故障的系统分析, 所提方法不能满足小电流接地系统所有运行方式。

本文针对小电流接地系统特点——发生单相接地故障后允许继续运行 2 h, 根据实际特征将该类系统可能存在的早期故障类型分为“单相接地型早期故障”和“异名相两点接地型早期故障”, 并基于简化等效电路推导和仿真模型构建, 分别对两类早期故障特征进行了分析, 对其相电压/电流和零序电压/电流的特征进行了归纳和对比, 为未来进一步开展检测、识别和定位算法研究奠定了理论基础。

1 早期故障特性分析

早期故障指在设备发生永久性故障前产生故障扰动的状态, 如图 1 所示。配电网早期故障最初在中性点直接接地系统中被发现, 文献^[21]对电缆接头处的早期故障物理过程进行了详细分析, 其表现

为瞬时性单相接地, 在电压峰值时刻发生击穿, 由于电弧产生的热量使湿润空气快速蒸发散除, 绝缘恢复到正常水平, 故障在第一个电流过零点清除, 其物理本质为瞬时性的电弧击穿, 故障持续时间通常为 1/4~4 周波, 在重复发生多次故障后最终导致永久性故障, 如图 2 所示为文献^[7]中监测到的中性点直接接地系统电缆早期故障波形图。

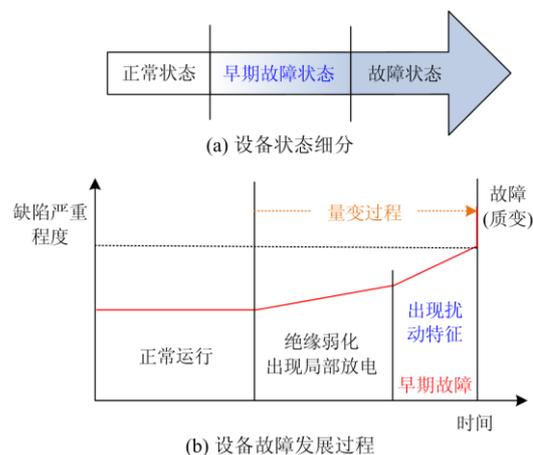


图 1 设备状态发展过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of equipment status development

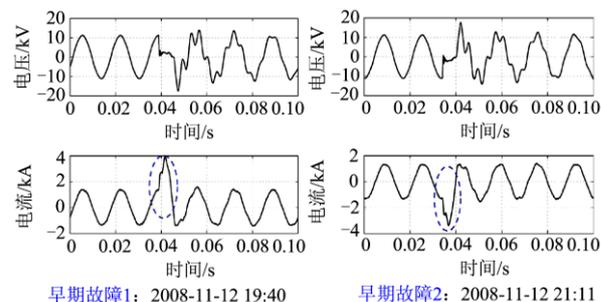


图 2 中性点直接接地系统电缆早期故障波形图

Fig. 2 Waveforms of underground cable incipient fault in solidly grounding system

区别于传统的稳定接地故障引起的电弧故障(如高阻故障), 传统电弧故障是由于故障期间导线与导地介质之间因存在微小的空气间隙而导致的电弧(如树枝碰线、导线断裂等), 而本文中早期故障主要指设备绝缘失效导致的瞬时性电弧故障, 在瞬时性击穿后, 绝缘快速恢复、故障清除, 故障本身是瞬时的^[21], 电弧持续时间很短。

1.1 配网故障保护动作特性分析

中压配网通常采用过流保护(三段式电流保护或反时限电流保护)^[22], 保护动作曲线如图 3 所示。只有当故障电流的幅值和持续时间同时满足动作条件时(图中右上方区域), 保护才能可靠动作, 而当

故障电流特征(幅值和持续时间)位于左下方时:(1)故障电流小、持续时间长;(2)故障电流大而持续时间短;(3)故障电流小且持续时间短,保护均不会动作。该类故障又被称为“弱故障”^[23],包括:高阻故障、断线故障、瞬时性故障、小电流接地系统中的单相接地故障等。本文研究的早期故障主要为瞬时性且不会导致跳闸的故障。

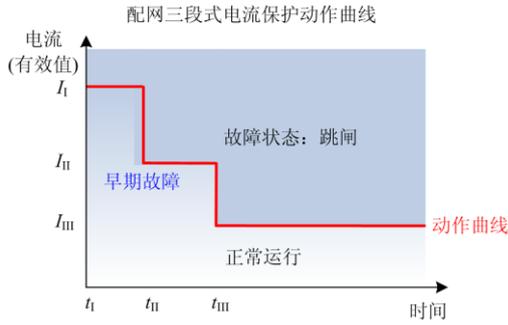


图 3 配网过流保护动作曲线
Fig. 3 Time-current characteristic curve of overcurrent protection in distribution system

1.2 小电流接地系统中的早期故障

我国中压配网目前主要采用小电流接地(包括中性点不接地和经消弧线圈接地),该类系统单相接地故障电流小(通常为几十安培),单相接地故障后系统允许继续运行 2 h,非故障相电压升高到线电压(1.732 倍)^[24]。因此,小电流接地系统的早期故障可能存在两种情况:

1) 系统正常运行期间,在相电压峰值时刻发生的瞬时性单相接地,可被称为“单相接地型早期故障”,在文献[8]中列举的故障多属于此类。

2) 当系统已存在永久性单相接地故障后,在系统继续运行的 2 h 期间,非故障相电压升高导致在电压峰值时刻发生击穿,在故障点处表现为某一相的接地故障,在系统层面则表现为异名相两点接地故障^[25-26],当该故障为瞬时性击穿时(早期故障),该类故障扰动可被称为“异名相两点接地型早期故障”,如图 4 所示为 2 个现场实测的故障波形。从图 4 中可以看出,在初始阶段系统发生了单相接地故障,随后引起两相瞬时性接地故障,在持续约 3 周波后,故障自动清除。

针对小电流接地系统中的永久性单相接地故障特征分析,已有大量研究成果^[27-28],但对于早期故障(瞬时性故障),由于持续时间短,没有考虑故障初相角、故障持续时间等因素对故障特征带来的影响,更重要的是,目前尚缺乏对异名相两点接地型早期故障的系统分析。

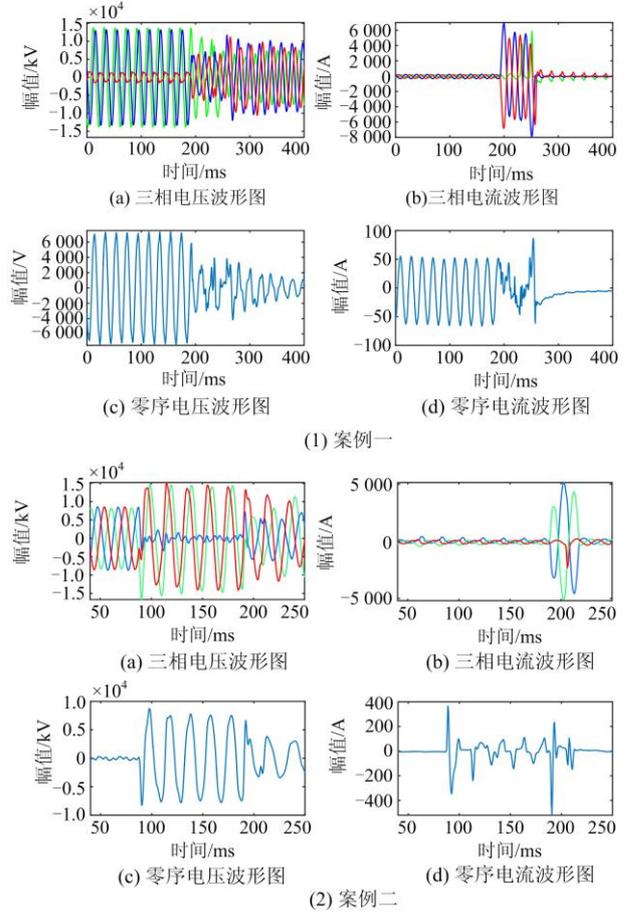


图 4 单相接地导致的异名相两点接地早期故障
Fig. 4 Two-point grounding in two phases incipient fault caused by single-phase-to-ground fault

2 单相接地型早期故障特征分析

2.1 电压特征分析

故障发生在电压峰值时刻是早期故障重要的电压特征,用时域模型表示三相电压,如式(1)。

$$\begin{cases} u_A(t) = u \cdot \sin(\omega t + \varphi_u) \\ u_B(t) = u \cdot \sin(\omega t + \varphi_u + 120^\circ) \\ u_C(t) = u \cdot \sin(\omega t + \varphi_u - 120^\circ) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $u_A(t)$ 、 $u_B(t)$ 、 $u_C(t)$ 分别代表三相电压瞬时值; u 为相电压的峰值; φ_u 为初始相位角。此时零序电压表示为

$$u_0 = \frac{1}{3}[u_A(t) + u_B(t) + u_C(t)] = 0 \quad (2)$$

假设故障发生在 A 相峰值时刻,令故障初相角 $\varphi_u = 90^\circ$,此时非故障相电压 B、C 相将存在相位跳变,且幅值升高为线电压,其中 B 相电压将超前 30°,而 C 相电压将滞后 30°,此时三相电压表示为

$$\begin{cases} u'_A(t) = 0 \\ u'_B(t) = \sqrt{3} \cdot u \cdot \sin(\omega t + 90^\circ + 120^\circ + 30^\circ) \\ u'_C(t) = \sqrt{3} \cdot u \cdot \sin(\omega t + 90^\circ + 240^\circ - 30^\circ) \end{cases} \quad (3)$$

此时零序电压可表示为

$$u'_0(t) = \frac{1}{3}[u'_A(t) + u'_B(t) + u'_C(t)] = u \cdot \sin(\omega t + 270^\circ) \quad (4)$$

因此,从理论上讲,当故障发生在 A 相峰值时刻时(即 $\varphi_u = 90^\circ$),零序电压也在峰值时刻(初相角为 270°),即零序电压故障初相角也在电压峰值时刻,同理,故障发生在峰值时刻附近时,其零序电压的故障初相角也在电压峰值时刻附近。需要注意的是,由于故障初始阶段可能存在大量高频和直流量,因此可能对波形特征产生一定的影响。

根据现有研究,小电流接地系统单相接地故障零序电压幅值主要与系统电容电流和故障电阻相关,并且随着故障电阻和系统电容电流的增大,零序电压幅值逐渐减小,其定量表达式不再赘述,但需要注意的是,由于早期故障持续时间短,算法需考虑其适应性。

2.2 电流特征分析

小电流接地系统单相接地故障电流将同时包括稳态基频分量和暂态高频分量,其中基频分量为系统电容电流,通常为几十安培,暂态分量为故障暂态过程中产生的暂态谐振分量^[27-28],频率通常为数百至数千 Hz,信号频率和幅值与系统参数有关。

由于早期故障为瞬时性电弧故障,电弧故障通常在电流过零时刻清除,而决定电弧是否重燃的关键在于弧隙电压恢复速度与弧隙介质恢复速度之间的关系^[29]。由于故障电流同时包含基频和高频分量,因此:(1)当高频分量占主导时,在半个工频周期内就可能存在多个过零点,故障可能在第一个过零点即实现清除,也可能在经过多个高频电流过零点后电弧才熄灭,该情况下的故障持续时间很短,仅有数毫秒;(2)当基频分量占主导时,在基频电流过零时即可实现熄弧,此时故障持续时间相对较长,可达十余毫秒。因此,由于受系统参数影响(系统电容电流水平),单相接地型早期故障扰动持续时间存在多样性,故障可能仅持续数毫秒(高频电流主导下在第一个电流过零点熄弧),也可能持续半周波(工频电流主导下在第一个过零点熄弧),从文献[9]中的实测波形中即可看到持续时间仅几毫秒的早期故障扰动。

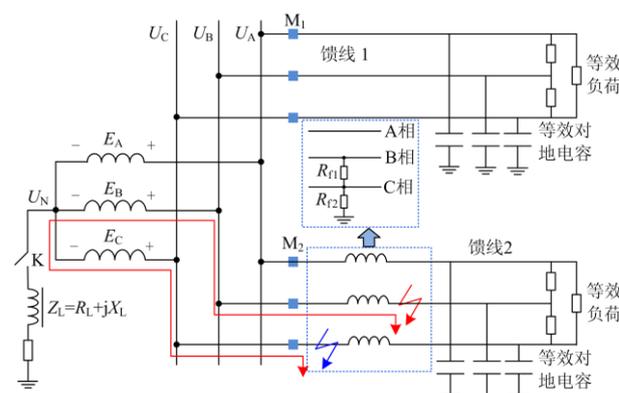
3 异名相两点接地型早期故障特征分析

小电流接地系统在实际运行过程中,单相接地

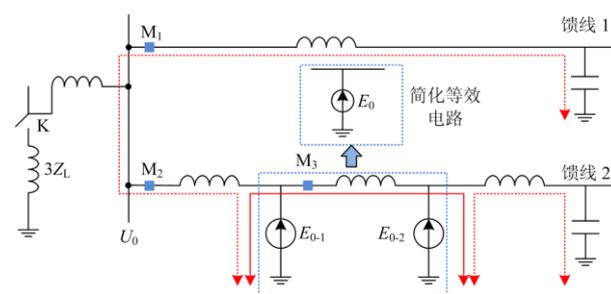
故障后非故障相电压的升高极易导致非故障相绝缘弱点击穿,引起异名相两点接地。与单相接地不同的是,该故障本质是“相间短路接地”,故障电流幅值较大。(1)当非故障相的击穿点刚好和单相接地故障点在同一位置时,该故障发展为两相短路接地故障;(2)当非故障相击穿点和单相接地故障点在同一馈线、不同位置时,该馈线将经历较大的故障电流;(3)当非故障相击穿点和单相接地故障点分别在两条馈线上时,两条馈线都将检测到大故障电流。当非故障相的击穿故障为瞬时性故障时,由于故障持续时间短,保护不会动作,该类故障即是本节分析的“异名相两点接地型早期故障”。

3.1 同一馈线异名相两点接地故障

当异名相两点接地故障发生在同一馈线时,如图 5(a)所示,假设最初在馈线 2 的 C 相发生单相接地故障(故障 1),随后在同一馈线 B 相又发生击穿(故障 2),此时该故障可以等效为相间短路接地故障,两相之间的故障电阻 R_{f1} 代表两个故障点之间的线路阻抗,当击穿点位于同一位置时, $R_{f1}=0$ 。



(a) 同一馈线发生异名相两点接地三相示意图



(b) 同一馈线发生异名相两点接地零序等效电路图

■ 测量点 → 故障电流流路径 ⚡ 故障1 ⚡ 故障2

图 5 同一馈线发生异名相两点接地故障分析

Fig. 5 Analysis of two-point grounding fault in two phases occurred in the same feeder

零序电路如图 5(b)所示, 其等效电路与单相接地故障基本一致, 但此时电路中存在两个零序电源, 两个零序电源之间会形成环流。对于变电站端测量点 M_2 而言, 其零序电流为馈线的电容电流(如图 5(b)中虚线箭头所示), 而对于两个故障点之间的测点 M_3 , 其零序电流将较大, 为两个零序电源之间的环流(如图 5(b)中的实线箭头所示)。

在理想状态下, 两故障点发生在同一位置, 此时故障演化为两相短路接地故障, 根据不对称短路故障分析, 可知零序电压为^[30]

$$U_0 = (1 - \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2 // Z_0}) \cdot E = \frac{Z_2 Z_0 \cdot E}{Z_1 Z_2 + Z_2 Z_0 + Z_1 Z_0} \quad (5)$$

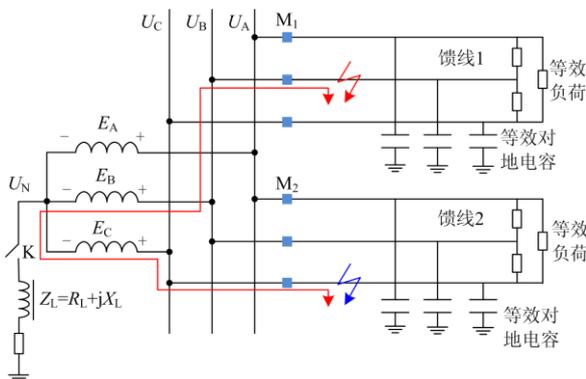
式中: Z_1 、 Z_2 、 Z_0 分别为故障端口处的系统等效正、负、零序阻抗; E 为复合序网电源电压(以相电压表示)。对于小电流接地系统, 由于中性点不接地或经消弧线圈接地, 其序阻抗满足: $Z_0 \gg Z_1$, $Z_0 \gg Z_2$, $Z_1 = Z_2$, 因此零序电压计算中可省略 $Z_1 Z_2$ 项, 并进一步简化为

$$U_0 \approx \frac{Z_2 Z_0 \cdot E}{Z_2 Z_0 + Z_1 Z_0} = 0.5E \quad (6)$$

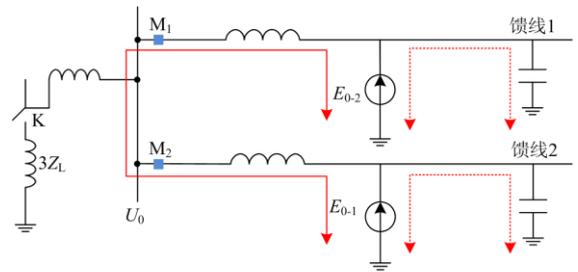
由此可知, 在发生异名相两点接地故障期间, 零序电压将降低为单相接地故障状态下的一半。当计及故障电阻以及两故障之间存在的线路时, 零序电压幅值会有所增大, 具体幅值与系统参数、故障距离等相关。

3.2 不同馈线异名相两点接地故障

当异名相两点接地故障发生在不同馈线时, 如图 6(a)所示, 同样假设最初在馈线 2 的 C 相发生单相接地故障(故障 1), 与 3.1 节中不同的是, 此时异名相击穿发生在馈线 1 B 相(故障 2), 故障的本质与 3.1 节中发生在同一馈线相同, 但电流流通路径有所不同, 其等效电路如图 6(a)中所示。母线测量相电压和零序电压的变化规律相同, 然而站端出线侧测点 M_1 和 M_2 位于两故障点之间, 此时 M_1 和 M_2 测点处的相电流和零序电流都将明显增大。



(a) 不同馈线发生异名相两点接地三相示意图



(b) 不同馈线异名相两点接地零序等效电路图

■ 测量点 → 故障电流通路 ⚡ 故障1 ⚡ 故障2

图 6 不同馈线发生异名相两点接地故障分析

Fig. 6 Analysis of two-point grounding fault in two phases occurred in different feeders

4 仿真分析

基于理论定性结论, 考虑搭建小电流接地系统仿真模型, 在故障模型上, 利用动态电弧模型模拟早期故障过程, 分析小电流接地系统早期故障特征。

4.1 仿真分析模型

搭建仿真模型时分别考虑了中性点不接地和经消弧线圈接地, 网络简化模型如图 7 所示, 在模拟早期故障时, 采用 Kizilcay 电弧模型, 其中电弧模型可表示为

$$\frac{dg(t)}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{|i_f(t)|}{u_0 + r_0 |i_f(t)|} - g(t) \right) \quad (7)$$

式中: τ 为电弧时间常数; $g(t)$ 为瞬时电弧电导; u_0 和 r_0 分别为电弧特征电压和特征电阻; i_f 为电弧瞬时电流。早期故障模型表示为恒定电阻 R_0 与电弧电阻 R_{arc} 的串联, 如图 8 所示, 在仿真分析中通过调节 R_0 以改变故障电阻。

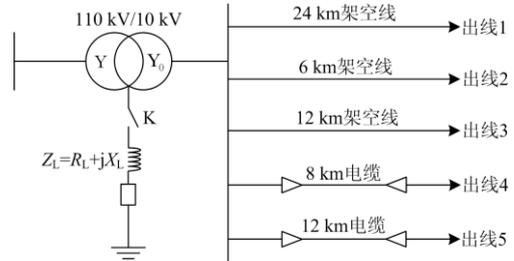


图 7 配网仿真模型

Fig. 7 Simulation model of distribution system

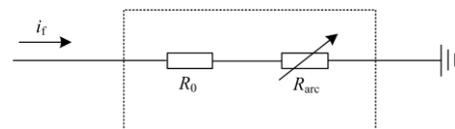


图 8 早期故障模型

Fig. 8 Simulation model of incipient fault

对于“单相接地型早期故障”, 直接用早期故障模型进行仿真, 对于“异名相两点接地型早期故障”, 首先在系统中搭建永久性单相接地故障, 然后分别在同一馈线和不同馈线的异名相搭建早期故障模型, 实现对异名相两点接地型早期故障的模拟。由于故障过程持续时间短(毫秒级), 故障中将存在大量暂态信号, 并且由于电弧电阻的非线性, 故障暂态过程的定量分析将非常困难^[31]。本文主要针对该过程进行定性的分析与验证, 并分析了故障电阻、系统阻抗、故障距离分别对小电流接地系统不同类型早期故障特征的影响。

4.2 单相接地型早期故障特征

图 9 所示为工频电流过零时刻息弧的单相接地型早期故障波形图。从图 9 中可以看出: (1) 相电压有明显变化, 相电流变化较小; (2) 零序电压和电流都有较明显变化, 但从变化幅值来看, 零序电压和零序电流变化率(瞬时最大值除以相电压/电流峰值)

分别为 113.83% 和 16.67%, 因此零序电压变化幅值明显大于零序电流, 且由图 9(d) 可知零序电流中有明显的高频分量。基于大量仿真分析, 不同参数对单相接地型早期故障影响的仿真结果如表 1 所示, 记录了不同参数条件下各特征量的半波有效值。

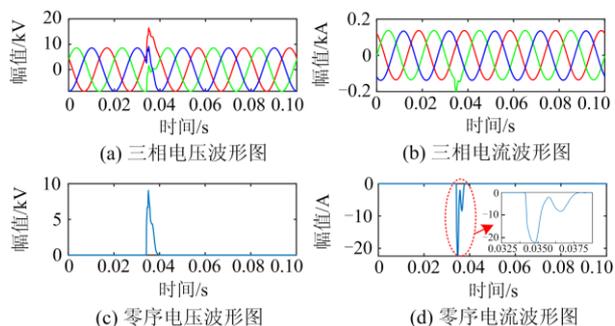


图 9 单相接地型早期故障波形

Fig. 9 Waveform of single-phase-to-ground sub-cycle incipient fault

表 1 不同参数下单相接地型早期故障扰动特征对比

Table 1 Comparison of characteristics of single-phase-to-ground incipient fault under different parameters

系统参数或故障参数	故障相电压半波 RMS/kV	零序电压半波 RMS/kV	零序电流半波 RMS/A	
故障电阻 R_0/Ω ($Z_S=1+j3 \Omega$, $D_f=3 \text{ km}$)	0	4.041	4.527	5.387
	100	4.197	3.316	3.735
	500	4.963	1.617	1.794
	1 000	5.354	0.986	1.091
	2 000	5.646	0.554	0.612
系统阻抗 Z_S/Ω ($R_0=0 \Omega$, $D_f=3 \text{ km}$)	1+j3	4.041	4.527	5.387
	2+j5	4.031	4.522	5.154
	3+j7	4.02	4.517	5.36
故障距离 D_f/km ($R_0=0 \Omega$, $Z_S=1+j3 \Omega$)	0.5	4.023	4.561	5.154
	1	4.023	4.552	5.435
	3	4.041	4.527	5.387
	5	4.05	4.472	5.309
	10	4.064	4.333	4.940

4.3 异名相两点接地型早期故障特征

1) 同馈线异名相两点接地型早期故障

图 10 所示为单相接地故障发展为同馈线异名相两点接地故障的电压、电流波形变化图。图中 t_1 为单相接地故障(故障 1)发生时刻, t_2 为异名相故障击穿(故障 2)发生时刻。从图中可以看出, 异名相两点接地发生后: (1) 三相电压不平衡度减小, 零序电压减小。(2) 故障馈线的两故障相电流明显增大, 但零序电流反而减小。

在稳态单相接地故障情况下, 零序电压与相电

压均相差 30° (其中一相超前 30° , 另一相滞后 30°), 因此相电压峰值时刻并非对应零序电压峰值时刻; 虽然早期故障中同样包含暂态分量, 但是由于基频分量幅值较大, 暂态分量中的高频成分将不再占主导成分, 并且由于电流不能突变, 暂态分量中将产生一较大的衰减直流分量。图 11 所示为同一馈线异名相两点接地早期故障扰动波形图。不同参数对同馈线异名相两点接地型早期故障影响的仿真结果如表 2 所示, 记录了不同参数条件下各特征量的半波有效值。

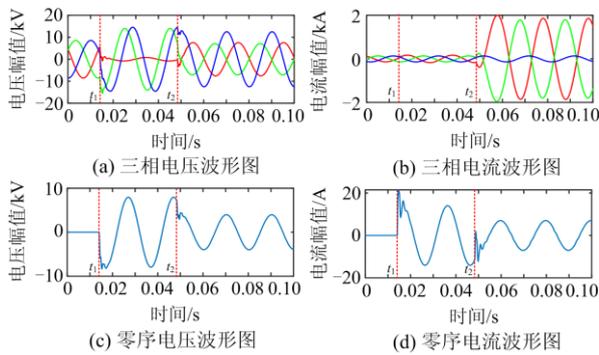


图 10 同一馈线发生异名相两点接地故障特征

Fig. 10 Characteristic of two-point grounding fault in two phases occurred in the same feeder

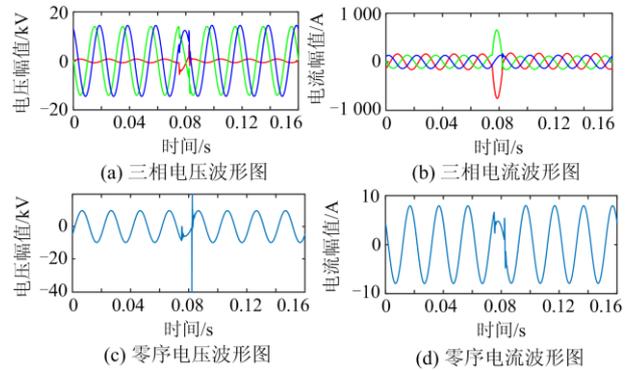


图 11 同一馈线“异名相两点接地”型早期故障

Fig. 11 Two-point grounding in two phases incipient fault occurred in the same feeder

表 2 不同参数下的同馈线异名相两点接地型早期故障扰动特征对比

Table 2 Comparison of characteristics of two-point grounding in two phases incipient fault occurred in the same feeder under different parameters

系统参数或故障参数	早期故障相电压 半波 RMS/kV	早期故障相电流 半波 RMS/A	零序电压半波 RMS/kV	零序电流半波 RMS/A	
故障电阻 R_0/Ω ($Z_S=1+j3 \Omega, D_f=3 \text{ km}$)	50	10.17	261.8	5.865	6.638
	100	10.24	179	5.883	6.482
	200	10.28	137	5.898	6.473
	500	10.3	112.1	5.909	6.491
系统阻抗 Z_S/Ω ($R_0=50 \Omega, D_f=3 \text{ km}$)	1+j3	10.17	261.8	5.865	6.638
	2+j5	10.18	261.7	5.889	6.72
	3+j7	10.16	261.1	5.88	6.718
故障距离 D_f/km ($R_0=50 \Omega, Z_S=1+j3 \Omega$)	0.5	10.41	274.7	6.014	6.756
	1	10.37	272.4	5.985	6.686
	3	10.17	261.8	5.865	6.638
	5	10.03	252.5	5.802	6.725
	10	9.611	231.2	5.563	6.511

2) 不同馈线异名相两点接地型早期故障

图 12 所示为单相接地故障发展为不同馈线异名相两点接地故障的电压、电流波形变化图。结合早期故障发生特点，分析不同馈线异名相两点接地型早期故障特征，如图 13 所示。该类早期故障特征表现为：(1) 三相电压存在明显扰动，并且体现为最初故障相电压的升高(故障 1)，以及后击穿故障相电压的降低(故障 2)，对于零序电压，其故障发生在接近峰值时刻，幅值存在短时降低；(2) 对于三相电流，两条馈线均有一相电流存在明显的短时增大，同时两条馈线零序电流均有短时增大。不同参数对不同馈线异名相两点接地型早期故障影响的仿真结果如表 3 所示，记录了不同参数条件下各特征量的半波有效值。

4.4 小电流接地系统早期故障特征总结

早期故障扰动的特征分析是进行检测、开展进

一步诊断分析的前提，基于第 2 节和第 3 节中对小电流接地系统中两大类早期故障扰动特征的分析，其特征对比如表 4 所示。需要注意的是，两类早期故障的初始状态存在明显不同，“单相接地型”早期故障的初始状态为健康状态，而“异名相两点接地型”早期故障的初始状态为单相接地故障，因此在确定检测触发判据时需要计及初始状态影响。

根据大量仿真，分别分析了故障电阻、系统阻抗、故障距离对小电流接地系统不同类型早期故障的故障相电压、电流和零序电压、电流的影响，分析发现系统阻抗和故障距离对各电气量特征影响较小，而故障电阻对故障特征影响较大。

针对小电流接地系统早期故障的检测，尚未有针对性的触发检测算法，现有的方法主要针对小电流接地系统的单相接地故障检测，以零序电压大于额定相电压的 15%~30%为标准^[20,32]。然而对于“异

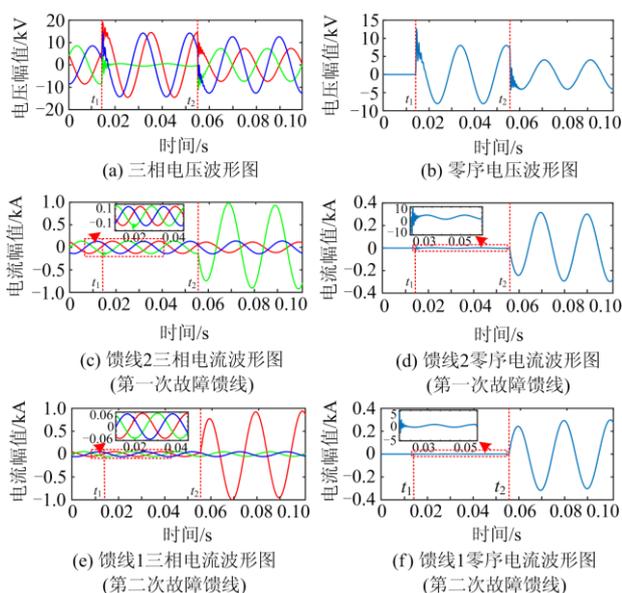


图 12 不同馈线发生异名相两点接地故障特征

Fig. 12 Characteristic of two-point grounding fault in two phases occurred in different feeders

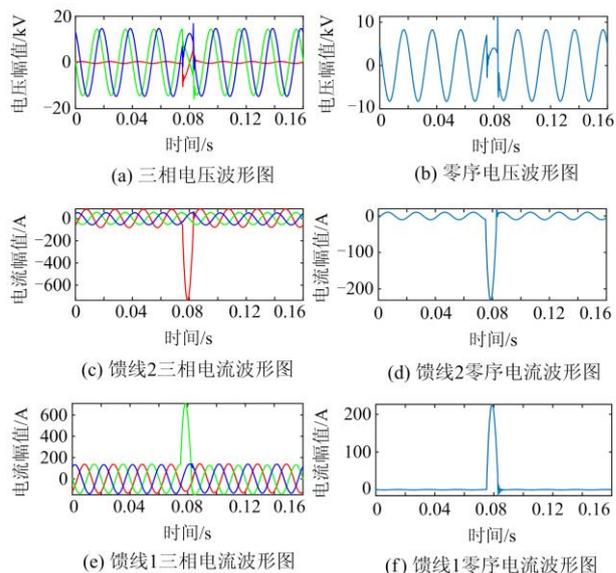


图 13 不同馈线“异名相两点接地”型早期故障

Fig. 13 Two-point grounding in two phases incipient fault occurred in different feeders

表 3 不同参数下不同馈线异名相两点接地型早期故障扰动特征对比

Table 3 Comparison of characteristics of two-point grounding in two phases incipient fault occurred in different feeders under different parameters

系统参数或故障参数		早期故障相电压	早期故障相电流	零序电压	零序电流
		半波 RMS/kV	半波 RMS/A	半波 RMS/kV	半波 RMS/A
故障电阻 R_0/Ω ($Z_S=1+j3 \Omega$, $D_F=3 \text{ km}$)	50	10.29	260.1	6.133	58.33
	100	10.31	179.6	6.024	30.37
	200	10.35	137.9	5.997	15.63
	500	10.37	112.9	5.99	6.538
系统阻抗 Z_S/Ω ($R_0=50 \Omega$, $D_F=3 \text{ km}$)	1+j3	10.29	260.1	6.133	58.33
	2+j5	10.27	259.6	6.123	58.21
	3+j7	10.25	259.1	6.113	58.09
故障距离 D_F/km ($R_0=50 \Omega$, $Z_S=1+j3 \Omega$)	0.5	10.28	268.4	6.129	60.19
	1	10.28	266.8	6.135	59.83
	3	10.29	260.1	6.133	58.33
	5	10.28	253.5	6.098	56.9
	10	10.38	237.7	6.302	53.44

表 4 小电流接地系统不同类型早期故障特征对比

Table 4 Different types incipient faults feature comparison in non-solidly grounding system

早期故障	三相电压	三相电流	零序电压	零序电流
单相接地型	故障相电压短时降低, 非故障电压短时增大	稳态电流不明显, 存在短时暂态	存在短时电压增大 (数千伏)	短时小幅增大 (数十安培, 含暂态)
同馈线异名相两点接地型	存在短时电压变动	故障馈线存在两相电流短时大幅增大(数百安培)	零序电压短时降低	短时小幅降低
不同馈线异名相两点接地型	存在短时电压变动	两条故障馈线分别存在一相电流短时大幅增大(数百安培)	零序电压短时降低	短时大幅增大

名相两点接地型”早期故障，其发生在单相接地故障期间，现有判据不能将该类故障扰动从单相接地故障中区分出来。“异名相两点接地型”早期故障的最大特点是电流的变化，如果发生在同一馈线，可测量到故障相电流的突变，如果发生在不同馈线，相电流和零序电流都将存在突变，因此可结合零序电压/电流和相电流构建组合判据进行触发检测，具体的检测方法将在下一步进行系统研究。

5 结论

针对小电流接地系统的特殊性，重点分析了该类系统中可能存在的“单相接地型”和“异名相两点接地型”两类早期故障特征，并得出以下结论：

1) “单相接地型”早期故障特征中，其相电流和零序电流特征都较为微弱，并且易受暂态分量影响，零序电压特征受暂态分量影响较小，幅值变化也较大，基于零序电压进行“单相接地型”早期故障检测判断更有优势。

2) “异名相两点接地型”早期故障会导致相电流的增大和零序电压的降低，如果两故障发生在同一馈线，两相电流将增大，而站端测量零序电流将减小；如果发生在不同馈线，两条馈线分别存在一相电流增大，且两条馈线零序电流将增大。

3) 针对小电流接地系统的早期故障检测，需考虑早期故障前的初始状态的差异，同时利用多个扰动的变化特征量进行检测。

参考文献

- [1] RUSSELL B D, BENNER C L. Intelligent systems for improved reliability and failure diagnosis in distribution systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2010, 1(1): 48-56.
- [2] WISCHKAEMPER J A, BENNER C L, RUSSELL B D, et al. Application of waveform analytics for improved situational awareness of electric distribution feeders[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(4): 2041-2049.
- [3] KASZTENNY B, VOLOH I, JONES C G, et al. Detection of incipient faults in underground medium voltage cables[C] // 61st Annual Conference for Protective Relay Engineers, April-3, 2008, Texas, USA: 349-366.
- [4] 周正钦, 杜振波, 王文瑞, 等. 基于分层分布的变电站带点运维智能化技术及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(1): 151-157.
ZHOU Zhengqin, DU Zhenbo, WANG Wenrui, et al. Intelligent technology and application of live detection for substation operation and maintenance based on hierarchical distribution[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(1): 151-157.
- [5] 徐丙垠, 李天友. 配电网中性点接地方式若干问题的探讨[J]. 供用电, 2015, 32(6): 12-16, 29.
XU Bingyin, LI Tianyou. Discussion on the neutral grounding modes of distribution networks[J]. Distribution & Utilization, 2015, 32(6): 12-16, 29.
- [6] KIM C, BIALEK T, AWIYLIKA J. An initial investigation for locating self-clearing faults in distribution systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(2): 1105-1112.
- [7] KULKARNI S, SANTOSO S, SHORT T A. Incipient fault location algorithm for underground cables[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(3): 1165-1174.
- [8] SIDHU T S, XU Z. Detection of incipient faults in distribution underground cables[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(3): 1363-1371.
- [9] 熊思衡, 刘亚东, 方健, 等. 配电网早期故障辨识方法[J]. 高电压技术, 2020, 46(11): 3970-3976.
XIONG Siheng, LIU Yadong, FANG Jian, et al. Detection method of incipient faults of power distribution lines[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(11): 3970-3976.
- [10] XIONG Siheng, LIU Yadong, FANG Jian, et al. Incipient fault identification in power distribution systems via human-level concept learning[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(6): 5239-5248.
- [11] 刘亚东, 丛子涵, 严英杰, 等. 配电设备早期故障检测基本原理、关键技术与发展趋势[J]. 供用电, 2020, 37(4): 10-16, 32.
LIU Yadong, CONG Zihan, YAN Yingjie, et al. Basic principles, key technologies and development trends of incipient fault detection for power distribution equipment[J]. Distribution & Utilization, 2020, 37(4): 10-16, 32.
- [12] 张先泰, 李天友, 蔡金锭. 基于暂态信号的中压配电网绝缘监测技术[J]. 供用电, 2010, 37(6): 60-63, 83.
ZHANG Xiantai, LI Tianyou, CAI Jinding. Insulation monitoring technology based on transient signal in medium-voltage distribution network[J]. Distribution & Utilization, 2010, 37(6): 60-63, 83.
- [13] 严秋问, 江修波, 蔡金锭. 基于瞬时性故障时频分析的配网绝缘状态监测[J]. 电气开关, 2016, 54(2): 45-49, 52.
YAN Qiuwen, JIANG Xiubo, CAI Jinding. Distribution network insulation condition monitoring based on transient fault time frequency analysis[J]. Electric Switchgear, 2016, 54(2): 45-49, 52.
- [14] ZHANG W, XIAO X, ZHOU K, et al. Multi-cycle incipient fault detection and location for medium voltage underground cable[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(3): 1450-1459.
- [15] 汪颖, 卢宏, 杨晓梅, 等. 堆叠自动编码器与 S 变换相

- 结合的电缆早期故障识别方法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(8): 117-124.
- WANG Ying, LU Hong, YANG Xiaomei, et al. Early fault identification method of cable combined with stacked automatic encoder and S transform[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(8): 117-124.
- [16] WANG Y, LU H, XIAO X, et al. Cable incipient fault identification using restricted Boltzmann machine and stacked autoencoder[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2020, 14(7): 1242-1250.
- [17] CHANG G W, HONG Y, LI G. A hybrid intelligent approach for classification of incipient faults in transmission network[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(4): 1785-1794.
- [18] XIAO Yang, OUYANG Jinxin, XIONG Xiaofu, et al. Fault protection method of single-phase break for distribution network considering the influence of neutral grounding modes[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(2): 111-123. DOI: 10.1186/s41601-020-00156-w.
- [19] 但扬清, 赵伟, 朱艳伟, 等. 基于 ABC-DNN 的小电流接地故障选线方法[J]. 智慧电力, 2019, 47(4): 46-52.
- DAN Yangqing, ZHAO Wei, ZHU Yanwei, et al. Fault line selection in small current ground power system based on ABC-DNN[J]. Smart Power, 2019, 47(4): 46-52.
- [20] 徐丙垠, 薛永端, 冯光, 等. 配电网接地故障保护若干问题的探讨[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(20): 1-7.
- XU Bingyin, XUE Yongduan, FENG Guang, et al. Discussion on several problems of earth fault protection in distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(20): 1-7.
- [21] STRINGER N T, KOJOVIC L A. Prevention of underground cable splice failures[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2001, 37(1): 230-239.
- [22] 刘健, 同向前, 张小庆, 等. 配电网继电保护与故障处理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
- [23] 张文海. 中压配电网弱故障检测定位理论与方法研究[D]. 成都: 四川大学, 2016.
- ZHANG Wenhai. Research on the theory and method of weak fault detection and location in medium voltage (MV) distribution system[D]. Chengdu: Sichuan University, 2016.
- [24] 电力工业部电力科学研究院高压研究所. 交流电气装置过电压保护和绝缘配合: DL/T 620—1997[S].
- [25] 王苏, 曾铁军, 郑茂然. 中性点非有效接地电力系统异名相两点接地短路时的选择性跳闸决策[J]. 电网技术, 2010, 34(7): 195-199.
- WANG Su, ZENG Tiejun, ZHENG Maoran. Selective tripping strategy decision of two-point ground fault occurred in different phases of neural non-effective grounding system[J]. Power System Technology, 2010, 34(7): 195-199.
- [26] 王学羽. 中性点不接地电力系统异地两相短路故障的案例分析报告[J]. 电力科学与技术学报, 2012, 27(3): 81-85.
- WANG Xueyu. Case analysis on phase-to-phase grounding faults in different spots of electric power systems with neural-point ungrounded[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2012, 27(3): 81-85.
- [27] 薛永端, 李娟, 徐丙垠. 中性点经消弧线圈接地系统小电流接地故障暂态等值电路及暂态分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(22): 5703-5714.
- XUE Yongduan, LI Juan, XU Bingyin. Transient equivalent circuit and transient analysis of single-phase earth fault in arc suppression coil grounded system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(22): 5703-5714.
- [28] 薛永端, 李娟, 徐丙垠. 中性点不接地系统小电流接地故障暂态等值电路的建立[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 223-232.
- XUE Yongduan, LI Juan, XU Bingyin. Construction of transient equivalent circuits of single-phase earth fault for isolated neural systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 223-232.
- [29] 要焕年, 曹梅月. 电力系统谐振接地[M]. 2 版. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [30] 夏道止. 电力系统分析[M]. 2 版. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [31] 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.
- [32] 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.

收稿日期: 2020-10-14; 修回日期: 2021-01-25

作者简介:

楚恬歆(1997—), 女, 硕士研究生, 研究方向为配电网早期故障检测识别; E-mail: 787343812@qq.com

张文海(1989—), 男, 通信作者, 博士, 助理研究员, 研究方向为电力扰动分析; E-mail: zhangwh2079@scu.edu.cn

瞿科(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为配电网早期故障检测、评估与定位。E-mail: 2350204562@qq.com

(编辑 魏小丽)