

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200308

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

张国军¹, 张文周¹, 葛群¹, 徐磊²

(1. 辽宁工程技术大学电气与控制工程学院, 辽宁 葫芦岛 125105; 2. 国网秦皇岛供电公司, 河北 秦皇岛 066000)

摘要: 采用多零序电流互感器结构和补偿参数介入的方法, 研究了小电流接地系统单相接地故障选线问题。设计了系统的拓扑结构, 分析了不同性质补偿参数对各零序电流互感器电流幅值和相位影响的规律及对故障选线灵敏度的影响问题。分析了不同补偿参数条件下流过故障点零序电流的变化规律及故障电流的安全性问题。该选线方法的选线判据具有很高的可靠性和适应性, 能够准确识别出故障线路, 有效解决目前小电流接地系统单相接地故障选线领域存在的可靠性差和适应性低的技术问题。

关键词: 多零序电流互感器; 补偿参数; 灵敏度; 可靠性; 适应性

Single-phase ground fault line selection method of small current grounding system of multiple zero-sequence current transformer based on compensation parameters

ZHANG Guojun¹, ZHANG Wenzhou¹, GE Qun¹, XU Lei²

(1. Faculty of Electrical and Control Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China;

2. State Grid Qinhuangdao Power Supply Company, Qinhuangdao 066000, China)

Abstract: The method of multi-zero sequence current transformer structure and compensation parameters is used to study the single-phase ground fault line selection of a small current grounding system. This paper designs the topology of the system, and analyzes the influence rule of the different sequence of compensation parameters on current amplitude and phase of each zero sequence current transformer and the problem of the sensitivity of fault line selection. The variation rule of the zero-sequence current flowing through the fault point and the safety problem of the fault current under different compensation parameters are analyzed. The line selection criterion of the line selection method has high reliability and adaptability, can accurately identify the faulty line, and can effectively solve the current poor reliability and low adaptability technologies in the field of single-phase grounding fault line selection in the current small-current grounding systems problem.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51974151) and the Liaoning Provincial Natural Fund Guidance Project (No. 20180550438).

Key words: multiple zero-sequence current transformers; compensation parameters; sensitivity; reliability; adaptability

0 引言

我国 3~66 kV 配电网普遍采用中性点不接地或消弧线圈接地的小电流接地运行方式, 单相接地是电力系统中的多发性故障, 是影响供电可靠性和安全性的主要故障形式之一。故障选线技术能够及时

准确地确定故障线路, 有助于快速排除故障, 特别是在诸如煤矿等对供电可靠性和安全性要求都很高的企业供电系统中, 要求当发生单相接地故障时必须实施保护, 切断电源。因此, 故障选线的可靠性对于保证供电的可靠性和安全性至关重要^[1-3]。

小电流接地系统发生单相接地故障时, 故障线路选线判据的可靠性问题一直没有得到很好的解决^[4-9]。目前, 在小电流接地系统单相接地故障选线方面, 主要是利用故障参数的暂态分量和稳态分量

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51974151); 辽宁省自然科学基金指导计划项目资助(20180550438)

的特征确定选线判据^[10-17]，但由于故障参数特征受中性点运行方式和系统规模等因素的影响，这些判据在应用时多具有局限性^[18-24]。具体表现为：①小电流接地系统发生单相接地故障时，绝大多数零序电流主要是通过通过对地电容构成回路，而对地电容一般都比较小，因此故障信号微弱，既不容易检测也不容易控制。②小电流接地系统发生单相接地故障时，暂态分量特征明显，变化速度快，不同的环境又会造成不同的暂态特性，情况复杂且检测难度大^[25-31]。常用单相接地故障选线方法特点比较见表1。

表1 常用单相接地故障选线方法特点比较

Table 1 Comparison of characteristics of common single-phase grounding fault line selection methods

选线判据	优点	缺点
零序电流鉴幅选线法	当出线较多时故障选线效果较好，且检测方便	在消弧线圈接地系统将发生误判；在配电线路较少的系统会发生误判或分辨率较低的情况
零序电流鉴相选线法	中性点不接地且系统规模较大时，单相接地故障选线方便可靠	在消弧线圈接地系统将发生误判；在系统规模较小时灵敏度低
零序无功功率选线法	中性点不接地且系统规模较大时，单相接地故障选线方便可靠	在消弧线圈接地系统将发生误判；在系统规模较小时灵敏度低
零序有功功率选线法	可用于消弧线圈接地系统的单相接地故障选线，在电缆线路系统可靠性较高	在架空线路系统信号较小，灵敏度低，可靠性差
首半波法	当故障发生在相电压过峰值时刻时，检测效果好	信号小，且持续时间短，容易受谐波干扰；算法较复杂

由于以上问题的存在，使得在特定系统中表现出良好技术性能的判据，在另一种结构或规模的系统中的可靠性就不能满足要求，这会导致保护的拒动作或误动作，造成故障影响范围扩大，使供电可靠性下降，影响用户的安全生产。

本文针对小电流接地供电系统选择性漏电保护可靠性低、灵敏性差的问题，研究了一种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。该选线方法采用一种新型的拓扑结构，通过补偿参数的介入和多零序电流互感器参数比较实现小电流接地系统单相接地故障选线，因为不同零序电流互感器测得的故障参数的差值只与补偿参数有关，且可通过调节补偿元件的性质和参数改善故障选线的灵敏度，因此，该选线方法能适应各种接地方式、各种线路形式和各种规模的系统，并能够有效地解决小电流接地系统单相接地故障选

线判据可靠性差和灵敏性低的问题。

1 多零序电流互感器参数特征分析

1.1 系统的拓扑结构

根据小电流接地系统发生单相接地故障时故障线路和非故障线路零序电流互感器测得的零序电流间的差异，设计了如图1所示的具有补偿参数的多零序电流互感器选线系统的拓扑结构。图中，SK为三相平衡电抗器，LK为补偿元件，LH为零序电流互感器，其中 LH_{α} 设在SK前端， LH_{β} 设在SK后端， LH_{γ} 设在SK回路。

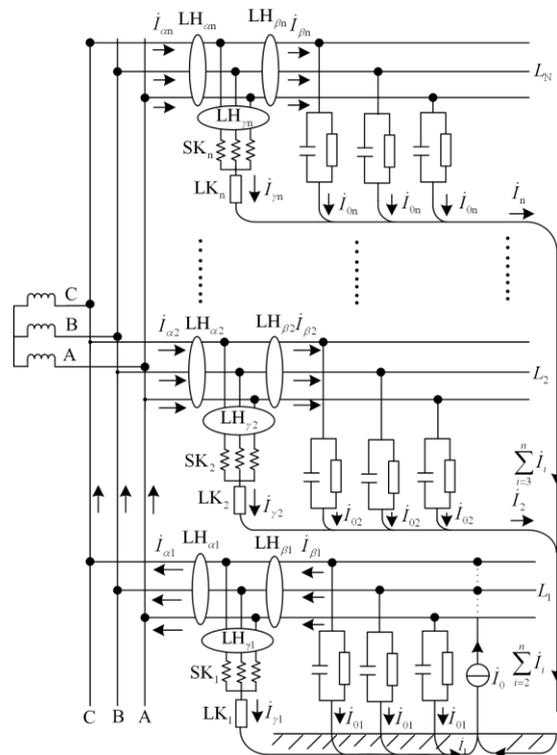


图1 多零序电流互感器小电流单相接地系统选线原理拓扑结构

Fig. 1 Principle of topology selection for multi-zero-sequence current transformer small current single-phase grounding system

接入三相平衡电抗器和补偿元件的目的在于补偿线路的零序电流，由于非故障线路零序电流互感器只能测得SK后侧线路部分产生的零序电流，而故障线路零序电流互感器只能测得SK前侧系统产生的零序电流，所以，可以通过SK前后LH测得零序电流的差异，确定故障线路的位置。

补偿元件LK的性质不同，SK前后LH测得零序电流间的差异也不同，具体补偿方式主要包括容性补偿(C)、阻容性补偿(RC)、阻性补偿(R)、阻感

性补偿(RL)、感性补偿(L), 其中感性补偿又可分为过补偿、欠补偿、完全补偿。

根据图 1 的零序电流方向, 以线路零序电压 \dot{U}_0 为参考向量, 设线路 1 发生单相接地故障, 则各线路电流互感器零序电流间的关系为

$$\sum_{i=2}^n \dot{i}_i = \sum_{i=2}^n (3\dot{i}_{0i} + \dot{i}_{\gamma i}) \quad (1)$$

$$\dot{i}_0 = -\dot{i}_{\gamma 1} - 3\dot{i}_{01} - \sum_{i=2}^n (3\dot{i}_{0i} + \dot{i}_{\gamma i}) \quad (2)$$

$$\dot{i}_{\alpha 1} = \dot{i}_{\beta 1} - \dot{i}_{\gamma 1} \quad (3)$$

$$\dot{i}_{\alpha i} = \dot{i}_{\beta i} + \dot{i}_{\gamma i} \quad (4)$$

式中: \dot{i}_{01} 为故障线路 L_1 单相对地零序电流; \dot{i}_{0i} 为非故障线路 L_i 单相对地零序电流; $\dot{i}_{\alpha 1}$ 、 $\dot{i}_{\beta 1}$ 、 $\dot{i}_{\gamma 1}$ 分别为故障线路上 SK_1 前侧、后侧及 SK_1 回路零序电流互感器所测零序电流; $\dot{i}_{\alpha i}$ 、 $\dot{i}_{\beta i}$ 、 $\dot{i}_{\gamma i}$ 分别为非故障线路上 SK_i 前侧、后侧及 SK_i 回路零序电流互感器所测零序电流; \dot{i}_0 为故障点零序电流; n 为配电线路条数; i 表示第 i 条配电线路 ($i \neq 1$)。

1.2 参数特征分析

该选线判据引入了补偿参数, 补偿元件 LK 的性质不同, 零序电流互感器测得的电流参数特征和流过故障点的电流值也不同, 因此, 选择不同性质的补偿元件, 会对选线判据的灵敏度产生影响, 同时, 也会对故障点的接地电流产生影响, 进而影响触电事故时人身安全和故障电弧的大小。所以, 在确定补偿元件的参数时应统筹考虑保护的灵敏性和运行的安全性问题, 以获得最佳的补偿效果。

1) 补偿参数对非故障线路检测参数的影响

在小电流接地系统发生单相接地故障时, 补偿元件采用容性补偿、阻性补偿、感性欠补偿和感性过补偿时, 非故障线路零序电流互感器的检测电流的变化如图 2 所示。

补偿支路后端零序电流互感器 LH_β 测得的是本条线路对地参数产生的零序电流 \dot{i}_β , 补偿支路前端零序电流互感器 LH_α 测得的零序电流 \dot{i}_α 为 $\dot{i}_\alpha = \dot{i}_\beta + \dot{i}_\gamma$ 。由图 2 可知, 零序电流互感器 LH_β 测得的零序电流为线路对地参数产生的零序电流, 且与补偿支路参数无关。零序电流互感器 LH_α 测得的零序电流值受补偿参数影响较大。采用容性补偿时, 零序电流的幅值增大, 且变化较大, 相位超前零序电压角度增大, 但变化较小; 采用阻性补偿时, 幅值增大, 但变化较小, 相位超前零序电压角度减小,

且变化较大; 采用感性补偿时, 由于补偿元件与线路同步操作, 不存在过渡为谐振的危险。所以, 可以采用欠补偿方式。感性补偿参数以脱谐度为 10% 确定。采用感性欠补偿时, 幅值大幅度减小, 相位超前零序电压角度也大幅度减小, 但仍在第一象限; 采用感性过补偿时, 幅值大幅度减小, 相位滞后零序电压一个较小的角度值, 在第四象限。

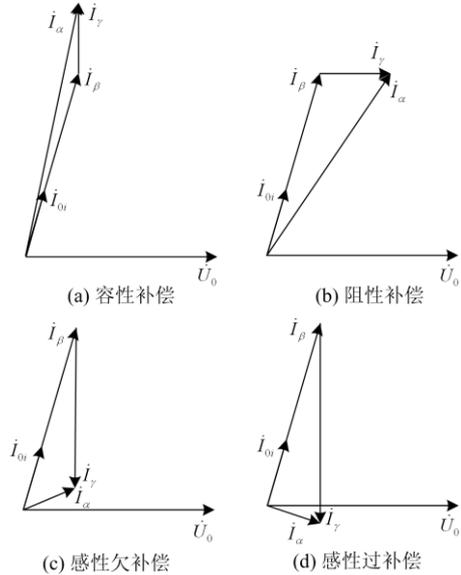


图 2 补偿参数对非故障线路检测参数的影响向量图
Fig. 2 Vector diagram of the influence of compensation parameters on non-faulty line detection parameters

2) 补偿参数对故障线路检测参数的影响

在小电流接地系统发生单相接地故障时, 采用不同性质补偿元件时, 故障线路零序电流互感器检测电流的变化如图 3 所示。

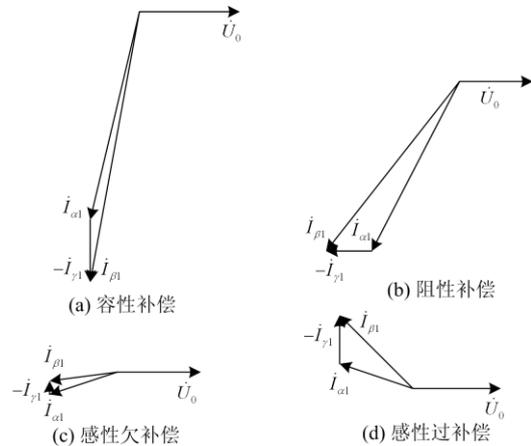


图 3 补偿参数对故障线路检测参数的影响向量图
Fig. 3 Vector diagram of the influence of compensation parameters on fault line detection parameters

故障线路零序电流互感器 $LH_{\alpha 1}$ 测得的是所有非故障线路 $LH_{\alpha i}$ 测得零序电流向量和的反向值, 即

$$\dot{i}_{\alpha 1} = -\sum_{i=2}^n \dot{i}_i = -\sum_{i=2}^n (3\dot{i}_{0i} + \dot{i}_{\gamma i}) \quad (5)$$

因此, 补偿参数对故障线路零序电流 $\dot{i}_{\alpha 1}$ 幅值的影响与非故障线路的零序电流 $\dot{i}_{\alpha i}$ 值受到影响的规律相同, 相位为合成相量的相位角加 180° 。

补偿支路后端零序电流互感器 $LH_{\beta 1}$ 测得的零序电流是零序电流互感器 $LH_{\alpha 1}$ 测得的零序电流加上补偿支路零序电流互感器测得的零序电流。

由图 3 可知: 采用容性补偿时, 两互感器测得的零序电流值均较大, 且 $I_{\beta 1} > I_{\alpha 1}$, 具有较好的幅值分辨率, 相位滞后零序电压 $-90^\circ \sim -180^\circ$, 更靠近 -90° , 但相位变化较小, 相位分辨率较低; 采用阻性补偿时, 电流幅值增大, 但变化较小, 幅值的分辨率较低, 相位滞后零序电压 $-90^\circ \sim -180^\circ$, 补偿量越大, 相位变化也越大, 且越远离 -90° , 相位分辨率较高; 采用感性欠补偿时, 电流 $\dot{i}_{\beta 1}$ 和 $\dot{i}_{\alpha 1}$ 的幅值都很小, 幅值的分辨率很低, 相位滞后零序电压, 角度更靠近 -180° ; 采用感性过补偿时, 电流 $\dot{i}_{\beta 1}$ 和 $\dot{i}_{\alpha 1}$ 的幅值都很小, 分辨率很低, 相位滞后零序电压 $-180^\circ \sim -270^\circ$, 位于第二象限。不同补偿方式下故障线路与非故障线路的零序电流幅值关系见表 2。

表 2 不同补偿下故障线路和非故障线路的零序电流幅值关系

Table 2 Zero-sequence current amplitude relationship between faulted line and non-faulted line under different compensation

补偿方式	零序电流幅值关系	
	非故障线路(L_2)	故障线路(L_1)
容性补偿	$I_{\alpha 2} > I_{\beta 2}$	$I_{\beta 1} > I_{\alpha 1}$
阻性补偿	$I_{\alpha 2} > I_{\beta 2}$	$I_{\beta 1} > I_{\alpha 1}$
感性欠补偿	$I_{\beta 2} > I_{\alpha 2}$	不确定
感性过补偿	不确定	$I_{\beta 1} > I_{\alpha 1}$

3) 补偿参数对流过故障点的零序电流的影响

在图 1 所示的系统中, 当发生触电事故时, 流过故障点的零序电流 \dot{i}_0 即为流过人体的触电电流, 零序电流 \dot{i}_0 越大, 对触电者人身伤害越大, 当零序电流达到一定数值时, 会危及触电者生命安全。零序电流 \dot{i}_0 过大, 接地点电弧过零熄灭后会重燃, 容易引起电网谐振, 产生谐振过电压。

补偿参数的性质对接地点故障电流幅值的影响很大, 如图 4 所示。由图 4 可知: 当采用容性补偿时, 零序电流 \dot{i}_0 最大, 因此, 在使用容性补偿时,

一定要兼顾安全要求, 并保证容性接地电流不超过国家规范的限值要求; 采用阻性补偿时, 电流 \dot{i}_0 的幅值增大, 但变化不大, 同时, 由于阻性补偿抑制了接地点弧隙电压恢复速度, 有利于接地电弧的熄灭; 采用感性欠补偿和过补偿时, 电流 \dot{i}_0 的幅值大幅度减小, 有利于安全和电弧的熄灭。

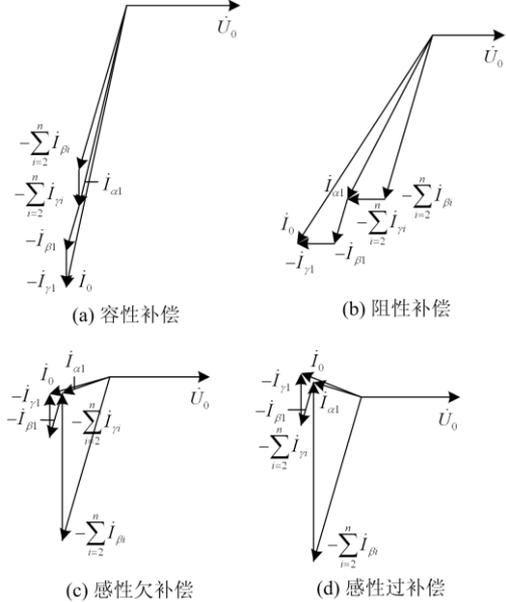


图 4 补偿参数对故障点零序电流影响向量图

Fig. 4 Vector diagram of influence of compensation parameters on zero-sequence current at fault point

2 单相接地故障选线方法

采用图 1 所示拓扑进行单相接地故障选线时, 为保证选线的可靠性, 应根据补偿参数的特点, 选择与参数特征相适应、具有较高灵敏度和抗干扰能力的选线方法。选线时可采用 α 、 β 和 γ 处 3 个零序电流互感器的稳态参数计算, 也可以采用 α 和 β 处两个零序电流互感器的稳态参数进行比较或计算, 实现对故障线路的识别。当采用 3 个零序电流互感器时, 如果 3 个零序电流互感器的零序电流满足式 (3) 时, 该线路为故障线路, 满足式 (4) 时, 该线路为非故障线路。当采用两个零序电流互感器时, 可以根据上述分析获得的 \dot{i}_α 和 \dot{i}_β 幅值及相位随补偿参数变化的规律, 通过鉴幅或鉴相实现故障选线, 也可以应用有功功率选线法或无功功率选线法。但在选择鉴幅或鉴相时, 必须保证幅值或相位具有较高的分辨率, 以免发生选线保护的误动作或拒动作, 影响保护的可靠性。所以, 容性补偿适合采用鉴幅法或无功功率选线法, 而不适合采用鉴相法; 阻性补偿适合采用鉴相法和有功功率选线法, 而不适合采用鉴幅法; 采用感性欠补偿和过补偿时, 由于故

障线路的 i_{α} 和 i_{β} 的幅值都很小, 幅值分辨率很低, 且易受干扰信号影响, 因此, 该补偿方式更适合采用 3 个零序电流互感器进行单相接地故障选线, 并应采取必要的抗干扰技术措施。该选线方法存在的不足是一次设备投入较多, 给检测人员带来了更多安全风险。

3 仿真

为了验证上述分析结论的正确性, 参考图 1 所示的系统拓扑图, 搭建 Matlab/Simulink 仿真模型对系统进行仿真。仿真时设置两条出线, 一条为故障线路, 另一条为所有非故障线路的等效线路。系统参数如表 3 所示, 补偿参数如表 4 所示, 故障相设为 A 相。具体仿真过程如下:

1) 把补偿元件设置为容性补偿, 调节系统参数和补偿电容值, 观察非故障线路和故障线路零序电流互感器 LH_{α} 和 LH_{β} 电流值的变化, 电流波形见图 5, 参数见表 5。

2) 把补偿元件设置为阻性补偿, 调节系统参数和补偿电阻值, 观察非故障线路和故障线路零序电流互感器 LH_{α} 和 LH_{β} 电流值的变化, 电流波形见图 6, 参数见表 5。

3) 把补偿元件设置为感性欠补偿, 调节系统参数和补偿电感值, 观察非故障线路和故障线路零序电流互感器 LH_{α} 和 LH_{β} 电流值的变化, 电流波形见图 7, 参数见表 5。

表 3 系统参数

Table 3 System parameters

参数名称	参数值
三相电源电压/V	1 000
系统频率/Hz	50
仿真时间/s	0.2
A 相故障接入时间/s	0.02~0.2
过渡电阻/ Ω	0.1~5
非故障线路等效长度/km	100~500
故障线路等效长度/km	100~200

表 4 补偿参数

Table 4 Compensation parameters

参数名称	参数值
补偿电容/F	$1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-5}$
补偿电阻/ Ω	100~600
非故障线路感性欠补偿/H	1.2~1.5
故障线路感性欠补偿/H	1.4~2.0
非故障线路感性过补偿/H	0.8~0.9
故障线路感性过补偿/H	1.0~1.2

4) 把补偿元件设置为感性过补偿, 调节系统参数和补偿电感值, 观察非故障线路和故障线路零序电流互感器 LH_{α} 和 LH_{β} 电流值的变化, 电流波形见图 8, 参数见表 5。

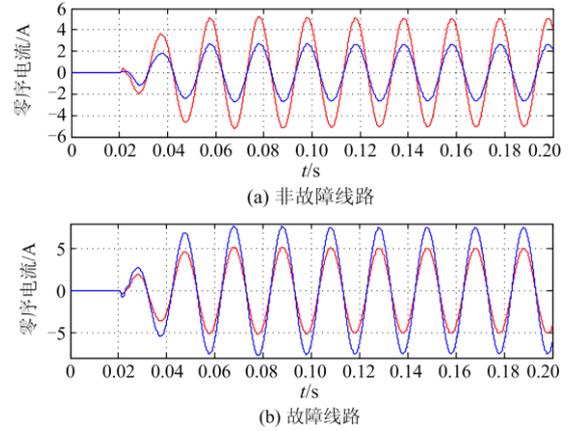


图 5 容性补偿仿真波形

Fig. 5 Simulation waveform of capacitive compensation

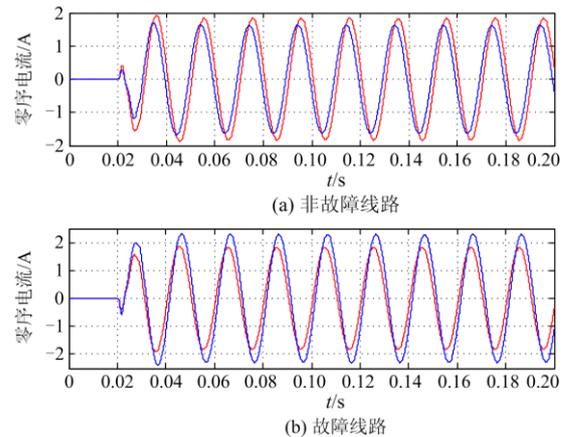


图 6 阻性补偿仿真波形

Fig. 6 Simulation waveform of resistive compensation

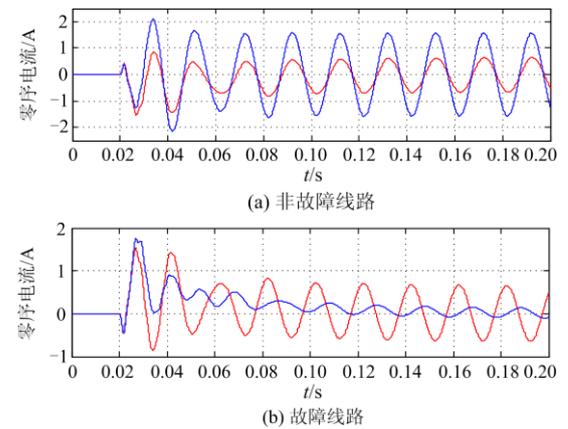


图 7 感性欠补偿仿真波形

Fig. 7 Simulation waveform of inductive undercompensation

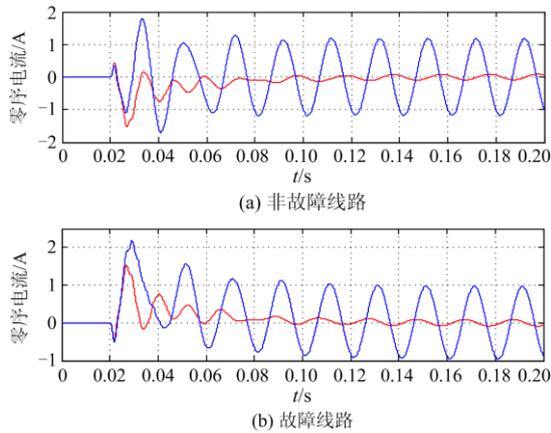


图 8 感性过补偿仿真波形

Fig. 8 Simulation waveform of inductive overcompensation

注：图中曲线红色为 LH_α 测得的零序电流，蓝色为 LH_β 测得的零序电流。

仿真获得的参数特征与理论分析具有相同的变化规律，图 5—图 8 为其中一组仿真参数条件下，非故障线路和故障线路零序电流互感器 LH_α 和 LH_β 电流值的波形图，其对应参数见表 5。

4 实验

4.1 实验系统搭建

在实验室搭建图 1 所示系统的模拟系统，具体构建方法如下：

1) 利用两台 380 V/220 V 的三相变压器对接，将实验室 380 V 中性点直接接地系统转化为 380 V 中性点不接地系统。

表 5 各补偿仿真幅值相位表

Table 5 Phase table of each compensation simulation amplitude

补偿类型	非故障线路				故障线路			
	幅值 $I_{m\alpha}/A$	相位 $\varphi_\alpha/(\circ)$	幅值 $I_{m\beta}/A$	相位 $\varphi_\beta/(\circ)$	幅值 $I_{m\alpha}/A$	相位 $\varphi_\alpha/(\circ)$	幅值 $I_{m\beta}/A$	相位 $\varphi_\beta/(\circ)$
容性补偿	1.11	89.12	0.55	88.82	1.11	-92.26	1.66	-90.83
阻性补偿	0.57	63.03	0.52	88.45	0.57	-117.18	0.75	-136.95
感性欠补偿	0.65	83.09	1.57	88.82	0.65	-97.13	0.12	-132.25
感性过补偿	0.08	-21.92	1.17	88.75	0.08	-201.71	0.97	-268.32

2) 搭建两条输电线路，一条代表故障线路，另一条为所有非故障线路的等效电路，利用电容器模拟输电线路对地电容，电阻器模拟对地电导，通过调节对地电容和对地电导值，模拟不同规模的电力系统。

3) 利用 3 台 220 V/110 V 单相变压器的原绕组构建三相平衡电抗器制造人为中性点，并将补偿元件接入中性点。通过调节补偿元件的性质和参数验证不同补偿方法的参数特征。

4) 应用 3 个零序电流互感器测量 α 、 β 和 γ 处的零序电流值，并利用单相变压器的副绕组观察零序电压；开关串一 0~45 Ω 的电阻作为单相接地故障的过渡电阻。采用上述方法搭建的实验系统如图 9 所示。

4.2 实验参数和步骤

图 9 所示系统的实验参数如表 6 所示。在实验过程中通过调整对地电容和对地电阻模拟不同规模配电系统，通过调整过渡电阻模拟不同的故障状态，通过调整补偿参数的性质和参数验证补偿参数对 i_α 和 i_β 的影响。在实验过程中，反复调整观察实验数据，部分实验数据见表 7 和表 8。



图 9 小电流接地系统单相接地故障选线实验平台

Fig. 9 Single-phase ground fault line selection experimental platform for small current grounding system

表 6 实验参数表

Table 6 Experimental parameters

参数名称	参数值
电源电压/V	380
过渡电阻/ Ω	0~45
对地电容/ μF	5~10
对地电阻/ $k\Omega$	200~500
补偿电容/ μF	5~15
补偿电阻/ Ω	30~50
补偿电感/H	0.5~1.6

表 7 对地电容 5 μF 实验数据

Table 7 Ground capacitance 5 μF experimental data

补偿方式		非故障线路零序电流			故障线路零序电流		
		$I_{\alpha 2}/\text{mA}$	$I_{\beta 2}/\text{mA}$	$I_{\gamma 2}/\text{mA}$	$I_{\alpha 1}/\text{mA}$	$I_{\beta 1}/\text{mA}$	$I_{\gamma 1}/\text{mA}$
容性补偿	5 μF	67.8	45.4	21.4	68.8	90.9	20.8
	15 μF	64.5	42.0	23.1	66.5	96.4	21.6
阻性补偿	50 Ω	72.9	28.6	50.8	73.6	105.4	49.3
	30 Ω	150.4	60.0	138.7	148.6	192.6	134.2
感性欠补偿	2.3 H	8.5	70.7	56.5	8.4	54.2	55.4
	2.5 H	13.2	68.7	56.7	13.1	42.4	54.1
感性过补偿	1.5 H	23.6	72.4	84.8	24.7	63.4	85.6
	1.6 H	17.9	68.3	81.4	81.4	103.7	80.5

表 8 对地电容 10 μF 实验数据

Table 8 Ground capacitance 10 μF experimental data

补偿方式		非故障线路零序电流			故障线路零序电流		
		$I_{\alpha 2}/\text{mA}$	$I_{\beta 2}/\text{mA}$	$I_{\gamma 2}/\text{mA}$	$I_{\alpha 1}/\text{mA}$	$I_{\beta 1}/\text{mA}$	$I_{\gamma 1}/\text{mA}$
容性补偿	10 μF	89.1	82.6	4.9	86.0	94.8	4.6
	15 μF	89.7	82.1	7.9	87.4	95.4	7.5
阻性补偿	50 Ω	90.5	86.5	22.4	93	97.5	23.5
	30 Ω	94.4	85.5	24.3	92.2	98.2	23.3
感性欠补偿	1.2 H	21.2	141.4	117.8	23.1	94.3	121.6
	1.5 H	44.8	136.7	91.3	43.2	47.1	88.5
感性过补偿	0.7 H	56.6	122.5	179.1	55.6	235.7	183.4
	0.8 H	35.4	132.0	164.8	36.7	198.4	167.6

5 结论

设计了一种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, 设计了系统的拓扑结构, 并分析了不同性质补偿参数对故障选线灵敏度和流过故障点零序电流的影响, 通过分析获得如下结论。

该拓扑条件下的单相接地故障选线可采用 3 个零序电流互感器参数计算的方法选线, 该方法适用于各种补偿参数。

1) 采用容性补偿时幅值的分辨率最高, 但相位的分辨率较低。阻性补偿时相位的分辨率最高, 但幅值的分辨率不高。感性补偿时测得的故障参数值较小, 抗干扰能力较差。

2) 容性补偿时流过故障点的零序电流最大, 安全性较差, 感性补偿时流过故障点的零序电流最小, 安全性较好。

3) 由于该小电流接地系统单相接地故障选线方法采用了多参数比较或计算实现故障选线, 且补偿支路前后零序电流的差值只与补偿参数的性质和参数大小有关, 而与系统的运行方式和规模大小无关, 因此, 在特定的补偿参数条件下, 能够准确识别出故障线路, 判据具有很高的可靠性, 能有效克

服目前小电流接地系统单相接地故障选线领域存在的可靠性低和适应性差的技术问题。

参考文献

- [1] 郭清滔, 吴田. 小电流接地系统故障选线方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(2): 146-152.
GUO Qingtao, WU Tian. Summary of fault line selection methods for small current grounding system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(2): 146-152.
- [2] 赵军, 邓杰文, 胡晨旺, 等. 不对称电网单相接地故障中性点位移电压轨迹分析及应用[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(5): 159-173.
ZHAO Jun, DENG Jiewen, HU Chenwang, et al. Analysis and application of neutral displacement voltage trajectory of single phase grounding fault in asymmetric power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(5): 159-173.
- [3] 郭丽伟, 薛永端, 徐丙垠, 等. 中性点接地方式对供电可靠性的影响分析[J]. 电网技术, 2015, 39(8): 2340-2345.
GUO Liwei, XUE Yongduan, XU Bingyin, et al. Analysis of the influence of neutral point grounding method on power supply reliability[J]. Power System Technology, 2015, 39(8): 2340-2345.
- [4] 邵庆祝, 郭霖徽, 刘亚东, 等. 基于 LSTM 模型的配电

- 网单相接地故障辨识方法[J]. 广东电力, 2019, 32(9): 100-106.
- SHAO Qingzhu, GUO Linhui, LIU Yadong, et al. Single-phase ground fault identification method for distribution network based on LSTM model[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(9): 100-106.
- [5] 马莉, 范孟华, 曲昊源, 等. 中国电力市场建设路径及市场运行关键问题[J]. 中国电力, 2020, 53(12): 1-9.
- MA Li, FAN Menghua, QU Haoyuan, et al. China's power market construction path and market operation key issues[J]. Electric Power, 2020, 53(12): 1-9.
- [6] 唐轶, 陈庆. 基于零序暂态电流方向判断的小电流接地选线方法[J]. 电网技术, 2007, 31(19): 79-82.
- TANG Yi, CHEN Qing. Small current grounding line selection method based on zero sequence transient current direction judgment[J]. Power System Technology, 2007, 31(19): 79-82.
- [7] 张国军, 韩静静, 任荣, 等. 多判据融合小电流单相接地故障选线方法研究与实验[J]. 电工电能新技术, 2015, 34(4): 56-61.
- ZHANG Guojun, HAN Jingjing, REN Rong, et al. Research and experiment on multi-criteria fusion small-current single-phase ground fault line selection method[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2015, 34(4): 56-61.
- [8] 单喜斌, 麻亚鹏, 宋宗勋, 等. 基于多源信息融合的配电网小电流接地选线方法[J]. 自动化技术与应用, 2019, 38(4): 102-106, 122.
- SHAN Xibin, MA Yapeng, SONG Zongxun, et al. A small current grounding line selection method for distribution networks based on multi-source information fusion[J]. Automation Technology and Application, 2019, 38(4): 102-106, 122.
- [9] 束洪春, 龚振, 田鑫萃, 等. 基于故障特征频带及形态谱的单相接地故障选线[J]. 电网技术, 2019, 43(3): 1041-1053.
- SHU Hongchun, GONG Zhen, TIAN Xincui, et al. Single-phase ground fault line selection based on fault characteristic frequency band and morphology spectrum[J]. Power System Technology, 2019, 43(3): 1041-1053.
- [10] 贾一凡, 王春杰, 孔珍珍, 等. 基于 AHP 的高压电器产品认证评价方法研究[J]. 高压电器, 2020, 56(7): 229-233, 245.
- JIA Yifan, WANG Chunjie, KONG Zhenzhen, et al. Research on AHP-based certification and evaluation method of high voltage electrical appliances[J]. High Voltage Electrical Apparatus, 2020, 56(7): 229-233, 245.
- [11] 金明亮, 李会新, 谢俊, 等. 基于规则式的多重故障诊断及最优送电路径策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(4): 176-181.
- JIN Mingliang, LI Huixin, XIE Jun, et al. Rule based intelligent fault diagnosis and recovery power delivery algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(4): 176-181.
- [12] 蒋建东, 陈帆, 任建. 小电流接地系统暂态零序电压电流特征仿真研究[J]. 郑州大学学报: 工学版, 2011, 32(4): 68-71.
- JIANG Jiandong, CHEN Fan, REN Jian. Simulation study on transient zero-sequence voltage and current characteristics of small current grounding system[J]. Journal of Zhengzhou University: Engineering Science Edition, 2011, 32(4): 68-71.
- [13] 颀雅迪, 何柏娜, 孟涛, 等. 特高压高补偿度串补线路潜供电弧特性研究[J]. 高压电器, 2019, 55(7): 78-86.
- JIE Yadi, HE Bina, MENG Tao, et al. Research on submerged arc characteristics of UHV high compensation series compensation line[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(7): 78-86.
- [14] 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.
- [15] 严敏敏, 陈平, 周新军, 等. 基于瞬时负序分量的小电流接地选线[J]. 广东电力, 2017, 30(3): 87-93.
- YAN Minmin, CHEN Ping, ZHOU Xinjun, et al. Fault line selection for small current based on instantaneous negative-sequence component[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(3): 87-93.
- [16] 金涛, 褚福亮. 基于暂态非工频零序电流的含 DG 新型配电网的接地选线方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(17): 96-105.
- JIN Tao, CHU Fuliang. A fault line-selection method in new distribution network with DG based on transient non-power frequency zero sequence current[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(17): 96-105.
- [17] 张启浩, 吴德贯, 马正霖. ± 800 kV 特高压直流输电工程直流穿墙套管设计缺陷及其改进方法[J]. 高压电器, 2019, 55(4): 239-244.
- ZHANG Qihao, WU Deguan, MA Zhenglin. Design defects and improvement methods of DC wall bushings for ± 800 kV UHV DC transmission projects[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(4): 239-244.
- [18] 唐金锐, 尹项根, 张哲, 等. 零模检测波速度的迭代提

- 取及其在配电网单相接地故障定位中的应用[J]. 电工技术学报, 2013, 28(4): 202-211.
- TANG Jinrui, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Iterative extraction of detected zero-mode wave velocity and its application in single phase-to-ground fault location in distribution networks[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(4): 202-211.
- [19] 骆玮, 王恒, 王磊, 等. 基于设备信息交互的小电流接地故障定位[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(4): 73-82.
- LUO Wei, WANG Heng, WANG Lei, et al. Faulted line location method for distribution systems based on the equipment's information exchange[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(4): 73-82.
- [20] 张淑清, 翟欣沛, 董璇, 等. EMD 及 Duffing 振子在小电流系统故障选线方法中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 161-167.
- ZHANG Shuqing, ZHAI Xinpei, DONG Xuan, et al. Application of EMD and Duffing oscillator to fault line detection in un-effectively grounded system[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 161-167.
- [21] 张峰, 梁军, 高红梅, 等. 基于多频带信息融合的小电流故障选线方法[J]. 山东大学学报: 工学版, 2012, 42(2): 118-123.
- ZHANG Feng, LIANG Jun, GAO Hongmei, et al. Method for fault line selection of small current based on multi-band information fusion[J]. Journal of Shandong University: Engineering Science, 2012, 42(2): 118-123.
- [22] 郑顾平, 姜超, 李刚, 等. 配网自动化系统中小电流接地故障区段定位方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(13): 103-109.
- ZHENG Guping, JIANG Chao, LI Gang, et al. Method of fault area & section location for non-solidly earthed distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(13): 103-109.
- [23] 雷兴列, 彭勇, 肖宾, 等. 交流特高压复合横担对带电作业安全影响[J]. 中国电力, 2019, 52(12): 54-61.
- LEI Xinglie, PENG Yong, XIAO Bin, et al. The impact of AC UHV composite crossarm on the safety of live work[J]. Electric Power, 2019, 52(12): 54-61.
- [24] DHARMAPANDIT O, PATNAIK R K, DASH P K. A fast time-frequency response based differential spectral energy protection of AC microgrids including fault location[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 331-358. DOI: 10.1186/s41601-017-0062-0.
- [25] 邱进, 田野, 李冠华, 等. 基于现场实录波形的小电流接地故障暂态选线研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(6): 180-187.
- QIU Jin, TIAN Ye, LI Guanhua, et al. Study on transient line selection of small current grounding fault based on field recorded waveform[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(6): 180-187.
- [26] 童宁, 余梦琪, 林湘宁, 等. 基于相电流高频特征识别的配电网故障指示器原理[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 465-471.
- TONG Ning, YU Mengqi, LIN Xiangning, et al. Study for fault indicator based on the faulty phase current feature recognition for the distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 465-471.
- [27] 马天祥, 程肖, 杜旭浩, 等. 配电自动化系统中单相接地故障定位新方法[J]. 陕西电力, 2016, 44(8): 67-70.
- MA Tianxiang, CHENG Xiao, DU Xuhao, et al. A new location method of single phase to earth fault in distribution automation system[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(8): 67-70.
- [28] 陈博博, 屈卫锋, 杨宏宇, 等. 小电流接地系统单相接地综合电弧模型与选线方法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(16): 1-7.
- CHEN Bobo, QU Weifeng, YANG Hongyu, et al. Research on single phase grounding arc model and line selection for neutral ineffectively grounding system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(16): 1-7.
- [29] XUE C, LI C, HUANG X, et al. Application of intelligent substation information integration[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(7): 110-114.
- [30] 曾祥君, 尹项根, 张哲, 等. 零序导纳法馈线接地保护的研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(4): 6-10.
- ZENG Xiangjun, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Study on feeder grounding fault protection based on zero sequence admittance[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(4): 6-10.
- [31] 牟龙华. 零序电流有功分量方向接地选线保护原理[J]. 电网技术, 1999, 23(9): 61-62.
- MU Longhua. Principle of selective grounding fault protection based on active component direction of zero-sequence current[J]. Power System Technology, 1999, 23(9): 61-62.

收稿日期: 2020-03-25; 修回日期: 2020-04-27

作者简介:

张国军(1960—), 男, 教授, 硕士生导师, 研究方向为电力系统及其自动化; E-mail: zhangguojun_305@163.com

张文周(1993—), 男, 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: 18342918825@163.com

葛群(1971—), 女, 博士, 硕士生导师, 研究方向为电力系统继电保护。E-mail: 260546341@qq.com

(编辑 葛艳娜)