

# 基于无功电流的中性点 不接地系统小电流接地选线方案

李世龙 滕予非 李小鹏 张华杰 张星海 姜振超  
(国网四川省电力公司电力科学研究院 四川 成都 610041)

**摘要:** 针对中性点不接地系统发生单相故障后难以准确选取故障回线的问题,提出一种基于无功电流的选线方案。单相短路故障发生后的,故障相各回馈线的电流变化主要来自线路分布电容电流变化,此电流为无功电流。其中故障回线无功电流为非故障回线与故障回线无功电流变化量之和,非故障回线无功电流变化量为该回线无功电流变化量。在此基础上提出基于无功电流变化量的中性点不接地系统小电流接地选线方案。单相短路故障发生后,比较故障相各回馈线无功电流变化量,变化量最大的馈线为故障馈线。利用PSCAD电磁暂态仿真软件搭建中性点不接地系统,对配电网中的架空线路和电缆线路单相短路故障进行了仿真研究,结果表明所提方法可靠性高,有较强带过渡电阻能力,且不受线路架设方式影响。

**关键词:** 中性点不接地系统; 无功电流; 单相短路; 故障选线

中图分类号: TM713 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2019)02-0020-04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2019.02.005

## A Novel Fault Line Selection Scheme for Isolated Neutral System When Single-phase Short Circuit Faults Occur Based on Reactive Current

Li Shilong, Teng Yufe, Li Xiaopeng, Zhang Huajie, Zhang Xinghai, Jiang Zhenchao  
(State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

**Abstract:** Fault line selection is difficult in isolated neutral system. A novel fault line selection scheme based on reactive current is proposed. After single-phase short circuit faults occur, the current change of fault phase in each line is mainly composed of capacitive current, and the current is reactive current. For fault phase, the reactive current change of fault line is larger than that of normal line. On this basis, the novel fault line selection scheme is proposed. A isolated neutral system model is built in PSCAD to research the reliability of the proposed scheme. The type of transmission line and grounding resistance are considered in simulation. Simulation results show that the proposed scheme can select the fault line with a high reliability.

**Key words:** isolated neutral system; reactive current; single-phase short circuit; fault line selection

## 0 引言

目前对于中性点不接地系统中单相短路故障的保护方法主要利用稳态量和暂态量。基于稳态量的保护方法主要包括:零序电流幅值法、零序电流比相法、零序电流群体比幅比相法、零序功率方向法、负序电流法和谐波法等。零序电流幅值法比较故障后各回馈线的零序电流幅值,幅值最大的馈线为故障线路<sup>[1]</sup>;然而此种检测方法灵敏度低,选线结果的可靠性受系统运行方式、线路长度和过渡电阻等影响。零序电流比相法比较故障后各回馈线零序电流方向,若某回馈线电流方向与其他馈线方向相反,则

此馈线为故障线路<sup>[2]</sup>;然而此方法同样受过渡电阻影响,当过渡电阻阻值较大时,零序电流方向难以准确比较。零序电流群体比幅比相法首先选出故障后零序电流幅值较大的三回馈线,在这三回馈线中比较零序电流方向,方向与另外两相反的为故障线路<sup>[3]</sup>;此方法综合了零序电流比幅和零序电流比相法,选线精度有一定程度提高,但仍无法消除过渡电阻对选线可靠性的影响。零序功率方向法的原理是故障馈线零序电流方向滞后于零序电压 $90^\circ$ ,而非故障馈线零序电流方向超前零序电压 $90^\circ$ ,因此零序功率小于0的馈线为故障线路<sup>[1]</sup>;此方法在本质上仍为零序电流比幅比相法的推广,因此其可靠性仍受过渡电阻影响。负序电流法的原理是故障后选

择负序电流最大的馈线为故障线<sup>[4]</sup>,但此方法的可靠性受系统对称性和负荷影响。谐波法主要针对中性点经消弧线圈接地的系统。基于暂态量的故障选线方法包括首半波法和小波变换法等。首半波法的前提是故障发生在相电压接近最大值的瞬间,故障线路暂态零序电流和电压在故障初始阶段极性相反而非故障线路二者极性相同的<sup>[5]</sup>,但此极性关系成立时间极短,且受故障初相角和过渡电阻影响。小波变换法对故障后的零序暂态电流进行小波变换,通过选取合适的小波基可实现对故障馈线和非故障馈线的区分<sup>[6]</sup>;但由于零序暂态电流受过渡电阻的影响,因此基于小波变换法的故障选线方法同样存在一定程度局限性。还有一些基于神经网络等智能算法的选线方法<sup>[7-9]</sup>,需要大量的故障后电气量进行训练,实际中难以实现。

根据前面的分析,现有中性点不接地系统小电流接地选线方法可靠性仍受过渡电阻和运行方式等多种因素的影响,存在一定局限性。仍有必要对小电流接地选线方法进行进一步研究。针对中性点不接地系统,下面提出一种基于故障相无功电流变化的新型小电流接地系统故障选线方案。通过比较故障前后的相电流无功分量变化大小选择故障馈线,提高了选线方案的耐受过渡电阻能力。

### 1 基于无功电流的小电流接地选线原理

典型中性点不接地系统结构如图1所示。

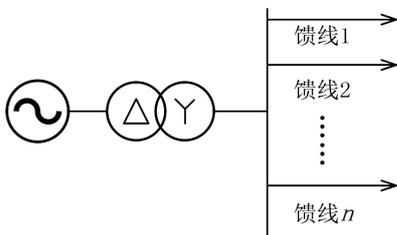


图1 中性点不接地系统结构

中性点不接地的配电网系统中变压器多采用三角形/星型的接线方式,其中高压侧绕组为三角形接线,低压侧绕组为星型接线,发生单相接地故障后,由于中性点不接地系统无法形成故障电流通路,系统可在此状态下持续运行数小时。但出于系统安全角度考虑,仍需对故障馈线进行判断并清除故障。

以包含两回馈线中性点不接地系统为例,正常运行与发生单相接地故障后的中性点不接地系统

无功电流分布情况如图2所示。

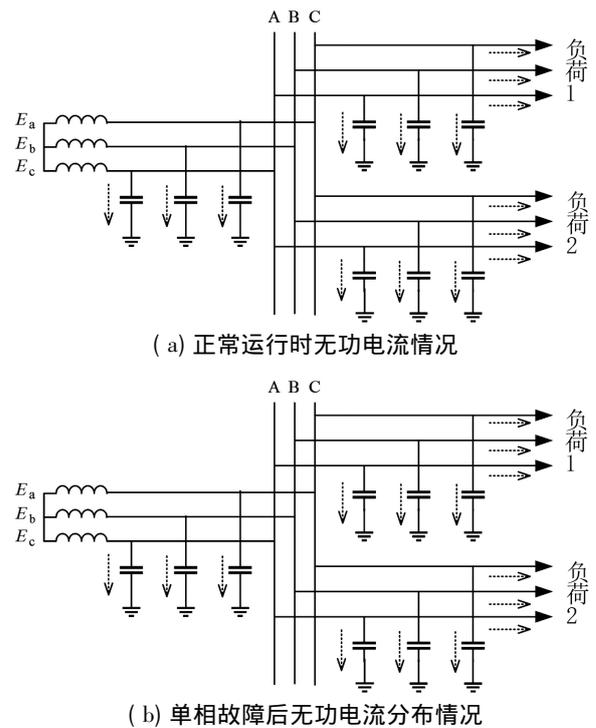


图2 中性点不接地系统单相接地故障后无功电流分布

图2(a)和图2(b)分别为正常运行时和馈线2的A相短路故障后的无功电流分布情况,系统中的无功电流主要由负荷电流无功分量和线路对地电容电流组成。以A相为例,设馈线1和馈线2的A相负荷无功电流分别为 $I_{qa1L}$ 和 $I_{qa2L}$ ,三相母线电压为 $U_a$ 、 $U_b$ 和 $U_c$ 。馈线1、馈线2和母线对地等效分布电容分别为 $C_1$ 、 $C_2$ 和 $C_b$ 。如图2(a)所示的正常运行情况,馈线1和馈线2各相无功电流 $I_{qa1}$ 和 $I_{qa2}$ 可表示为

$$I_{qa1} = I_{qa1L} + j\omega C_1 U_a \quad (1)$$

$$I_{qa2} = I_{qa2L} + j\omega C_2 U_a \quad (2)$$

如图2(b)所示的第2回馈线A相金属短路后,由于系统中性点不接地,A相电压降为0,B相和C相电压上升为线电压。各相之间的线电压不变,两回馈线所带负荷可正常运行,负荷电流不变。此时馈线1和母线的A相对地电容电流为0,非故障相对地电容电流增加。馈线2的A相由于接地,其所流过的电容电流为各回馈线及母线的非故障相电容电流之和。此时馈线1和馈线2的A相无功电流 $I_{qa1f}$ 和 $I_{qa2f}$ 可表示为

$$I_{qa1f} = I_{qa1L} \quad (3)$$

$$I_{qa2f} = I_{qa2L} - [j\omega(C_1 + C_2 + C_b)\sqrt{3}U_b + j\omega(C_1 + C_2 + C_b)\sqrt{3}U_c] \quad (4)$$

故障相各回馈线的无功电流变化量  $\Delta I_{q\phi 1}$  和  $\Delta I_{q\phi 2}$  分别为

$$\Delta I_{q\phi 1} = j\omega C_1 U_a \quad (5)$$

$$\Delta I_{2a} = j\omega C_2 U_a + [j\omega(C_1 + C_2 + C_b)\sqrt{3}U_b + j\omega(C_1 + C_2 + C_b)\sqrt{3}U_c] \quad (6)$$

由式(5)、式(6)可以看出,故障回馈线的故障相无功电流变化最大。

## 2 基于无功电流的小电流接地选线判据

根据上节分析,小电流接地系统中,单相故障后的相电流变化主要为无功电流变化。通过比较各回馈线中故障相无功电流变化量可识别故障回馈线。设故障相为  $\phi$ ,故障前各回馈线  $\phi$  相的无功电流可表示为  $I_{q\phi n}$ ,其中  $n$  为母线上的回馈线序号。故障后各回馈线故障相无功电流可表示为  $I_{q\phi n f}$ ,单相故障后各回馈线的故障相无功电流变化量可表示为  $\Delta I_{q\phi n}$

$$\Delta I_{q\phi n} = |I_{q\phi n} - I_{q\phi n f}| \quad (7)$$

其中,

$$\text{Max}(\Delta I_{q\phi 1}, \Delta I_{q\phi 2}, \dots, \Delta I_{q\phi n}) \quad (8)$$

所对应的回馈线即为故障回馈线。例如,当A相发生单相接地故障后,若  $\text{Max}(\Delta I_{qA1}, \Delta I_{qA2}, \dots, \Delta I_{qAn})$  为  $\Delta I_{qA3}$ ,则故障位于回馈线3。

故障相的故障前无功电流可通过相电流  $I_{\phi n}$  与母线电压夹角  $\theta_{\phi n}$  计算,  $\theta_{\phi n}$  表示回馈线  $n$  的  $\phi$  相电流与母线电压的夹角,电压超前电流时夹角为正。

$$I_{q\phi n} = I_{\phi n} \times \sin(\theta_{\phi n}) \quad (9)$$

考虑到金属性单相接地故障后故障相电压有可能降为0,此时故障相电压与电流的夹角难以准确测量,因此单相故障后以超前非故障相线电压与故障电流夹角  $90^\circ$  的位置作为参考电压角度。以A相单相接地故障为例,故障后各回馈线A相无功电流可表示为

$$I_{qAn f} = I_{An} \times \sin(\theta_{BC} + 90) \quad (10)$$

将式(9)和式(10)代入式(7)后根据式(8)即可选出故障线路。

## 3 仿真研究与验证

### 3.1 仿真模型

利用PSCAD/EMTDC电磁暂态仿真软件搭建如图1所示的仿真模型,其为一个单电源供电的10kV

配电网,变压器低压侧为星型不接地连接。母线共有5回馈线,为检验此方法在电缆线路和架空线路中的适应性,其中回馈线1至回馈线3为电缆线路,回馈线4和5为架空线。仿真模型中各回馈线均使用频率特性模型。仿真验证中分别将短路点设置在回馈线首端和末端,故障在仿真开始0.2s后发生,且在仿真结束前故障不消失。各回馈线的长度和所带负荷如表1所示。

表1 仿真模型中各回馈线参数

回馈线编号	架设形式	线路长度 /km	有功负荷 /MW	无功负荷 /MVA
回馈线1	电缆	17.0	1.0	0.620
回馈线2	电缆	12.0	2.0	1.240
回馈线3	电缆	8.0	0.5	0.310
回馈线4	架空线	8.5	0.2	0.124
回馈线5	架空线	17.6	4.0	2.480

### 3.2 仿真结果及研究

分别以线路分布电容最大和最小的回馈线1和回馈线4为例,对所提小电流单相接地选线判据的性能进行仿真验证。

回馈线1末端发生A相金属性短路时,各回馈线A相无功电流变化量如图3所示。

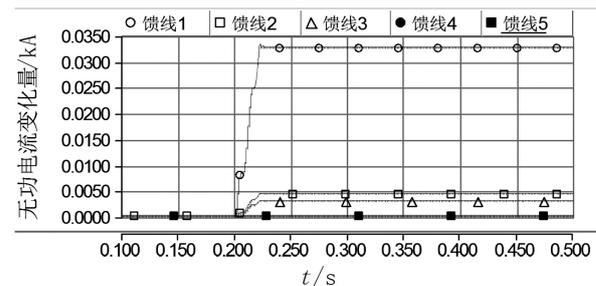


图3 回馈线1的A相金属性接地后各回馈线的无功电流变化情况

如图3所示,故障发生后,各回馈线的故障相无功电流变化量上升。其中回馈线1的故障相无功电流变化量远大于其他回馈线,根据所提选线判据,可正确判断回馈线1发生单相接地故障。

当回馈线1末端发生带100Ω过渡电阻的A相短路接地故障时,各回馈线的故障相无功电流变化情况如图4所示。

如图4所示,与金属性故障相比,带100Ω过渡电阻后,各回馈线故障相无功电流变化量的最大值降低,但回馈线1的故障相无功电流变化量仍明显大于其他回馈线,利用所提选线判据仍可实现故障回馈线的正确识别。

表 2 不同馈线发生单相短路故障后选线判据可靠性对比

过渡电阻/ $\Omega$	故障线	无功电流变化量/A					选线结果	选线结果正确性
		馈线 1	馈线 2	馈线 3	馈线 4	馈线 5		
0	1	33.0	4.5	3.1	0.08	0.1	馈线 1	正确
	2	5.0	27.0	2.7	0.07	0.1	馈线 2	正确
	3	6.0	4.8	40.0	0.09	0.1	馈线 3	正确
	4	6.5	5.1	3.5	47.0	0.1	馈线 4	正确
	5	4.0	3.0	2	0.05	21.0	馈线 5	正确
100	1	20.0	2.5	1.7	0.03	0.2	馈线 1	正确
	2	3.0	18.0	1.6	0.03	0.2	馈线 2	正确
	3	3.5	2.6	23.6	0.04	0.2	馈线 3	正确
	4	3.6	2.7	1.9	26.00	0.2	馈线 4	正确
	5	2.6	2.0	1.4	0.02	15.0	馈线 5	正确

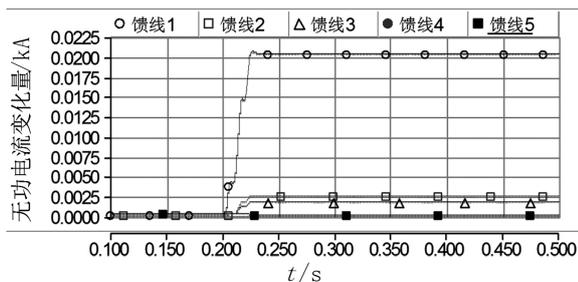


图 4 馈线 1 的 A 相带 100  $\Omega$  过渡电阻接地后各回馈线的无功电流变化情况

对其他线路上的单相短路故障进行仿真研究, 分别对金属性故障和带 100  $\Omega$  过渡电阻时的选线判据可靠性进行验证, 仿真结果如表 2 所示。

由表 2 结果可知, 金属性接地故障时, 故障馈线的故障相无功电流变化量远大于非故障馈线。利用所提选线方案能可靠选出故障馈线。当单相接地故障带过渡电阻时, 考虑 100  $\Omega$  过渡电阻, 由表 2 中所示的仿真结果可知, 虽然无功电流变化量的最大值较金属性故障时有所减少, 但故障馈线和非故障馈线之间仍存在明显差异, 所提选线方案有较强的耐受过渡电阻能力。前面仿真中考虑了架空线和电缆线路, 由仿真结果可知所提选线方案对于中性点不接地系统中架空线和电缆线路的单相接地故障均具有较高精度的选线结果。

## 4 结 语

针对中性点不接地系统单相接地故障后故障馈线难以准确识别的问题, 分析了各馈线故障相无功电流变化情况, 并在此基础上提出了基于故障相无功电流变化量的故障选线方案。通过理论分析, 中性点不接地系统发生单相接地故障后, 故障馈线的故障相无功电流变化量远大于非故障馈线故障相。

基于此特征构造故障选线判据, 实现了对中性点不接地系统故障馈线的识别。利用 PSCAD 软件搭建中性点不接地系统仿真模型, 考虑到架空线和电缆的混合架线方式, 对所提选线方案进行验证, 仿真结果表明所提选线方案能准确识别故障线路, 有较高的带过渡电阻能力。

## 参考文献

- [1] 贺家李, 宋从矩. 电力系统继电保护原理 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.
- [2] 潘贞存. 比相式和比幅式小接地电流系统接地选线保护 [J]. 山东电力技术, 1991(3): 60-64.
- [3] 张尔桦, 潘贞存, 桑在中, 等. 群体比幅原理接地选线保护 [J]. 继电器, 1991(2): 15-17.
- [4] 曾祥君, 尹项根, 张哲, 等. 配电网接地故障负序电流分布及接地保护原理研究 [J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(6): 84-89.
- [5] 胡佐, 李欣然, 石吉银. 基于餐流与首半波综合的接地选线方法研究 [J]. 继电器, 2006, 34(7): 6-9.
- [6] 王耀南, 霍百林, 王辉, 等. 基于小波包的小电流接地系统故障选线的新判据 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(6): 54-58.
- [7] 李荣明, 王官洁, 罗建. 基于神经网络的小电流接地系统综合智能选线 [J]. 重庆大学学报, 2004, 27(5): 85-89.
- [8] 陈炯聪, 齐郑, 杨奇逊. 基于模糊理论的小电流单相接地选线装置 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(8): 88-91.
- [9] 齐郑, 艾欣, 王炳革, 等. 基于粗糙集理论的小电流接地系统故障选线方法的有效域 [J]. 电网技术, 2005, 29(12): 43-46.

作者简介:

李世龙(1989), 博士, 研究方向为电力系统继电保护。

(收稿日期: 2018-11-26)