

## 基于双端同步信息量测的小电流单相接地故障区段定位

袁靖<sup>1</sup> 程林<sup>2</sup> 李洪涛<sup>3</sup> 黄仁乐<sup>3</sup>

(1. 东北电力大学 电气工程学院, 吉林 吉林 132012; 2. 清华大学电机系国家重点实验室, 北京 100084; 3. 国网北京市电力公司, 北京 100031)

**摘 要:** 配电网的各分段开关将各馈线分成若干区段, 针对中性点不接地系统中故障无法可靠定位的问题, 在分析健全区段与故障区段首末端稳态零序电流及差值特征的基础上, 提出了基于双端同步信息量测的故障区段定位判据。该定位方法借助双端同步信息测量装置, 与配电自动化系统一同实现。利用实时数字仿真系统仿真验证, 该方法可准确定位中性点不接地系统故障区段, 不受线路长短的影响, 并能削弱过渡电阻的影响。

**关 键 词:** 中性点不接地系统; 双端同步信息量测; 故障定位; 实时数字仿真仪  
**中图分类号:** TM711 **文献标识码:** A

配电系统采用中性点不接地方式发生单相接地故障时, 故障线路处短路电流是所有非故障线路的对地电容电流之和, 信号微弱导致识别困难。故障可靠定位的问题一直也没能得到很好的解决。目前, 常见的故障定位的方法有故障分析法<sup>[1-14]</sup>、行波法<sup>[15-19]</sup>和“S”注入法<sup>[20-21]</sup>。

故障分析法是故障发生后, 获取线路的电压和电流信息, 利用某些测距原理和算法得出故障点的位置<sup>[4]</sup>。常用的测距算法有零序电流修正法、零序电流相位修正法、解一次方程法、解二次方程法、解微分方程法和智能化算法等。零序电流修正法是根据线路电压、电流与故障位置的函数关系列写方程, 并进行迭代求故障位置, 迭代的结果不一定收敛于实际故障距离; 零序电流相位修正法和解微分方程法是基于线路集中参数的, 不考虑分布电容的影响, 所以并不适用于中性点不接地系统; 解一、二次方程的方法是对电流的分布系数做适当处理, 需要列写的方程数目较多, 计算过程复杂且易出现伪根, 因此也并不适用于分支居多、线路复杂、结构多变的配电网。智能化算法将其他学科的研究成果应用到了故障测距中, 此算法大部分处于研究开发阶段。

故障分析法包括基于以上算法的单端信息法和利用双端信息进行采样定位的方法, 单端信息法不能克服过渡电阻及对端系统阻抗变化的影响; 双端信息法中不计分布电容的集中参数电路并不适用于中性点不接地系统单相接地故障定位, 计及分布电容的迭代法趋于复杂。行波法是根据行波的传输实现输电线路的故障测距, 此定位方法不受线路类型、过渡电阻及量测系统的影响, 但是也会受参数频变及非线性元件动态时延的影响等。S注入法是向电压互感器的二次侧注入区别于工频的故障信号, 该故障信号耦合至电压互感器一次侧并与故障点形成回路, 根据注入信号的路径就可以找到故障点<sup>[20]</sup>。注入信号受过渡电阻影响较大, 过渡电阻越高, 信号的衰减越严重。小电流接地系统中现存的一些新型定位方法如故障区间边界节点算法<sup>[22]</sup>、最大故障电流法<sup>[23-24]</sup>、零序导纳法<sup>[25]</sup>及基于线电压和零模电

收稿日期: 2014-11-25

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)(2014AA051901)

作者简介: 袁靖(1989-), 女, 山东省东营市人, 东北电力大学电气工程学院在读硕士研究生, 主要研究方向: 小电流单相接地故障选线及定位。

流的区段定位法<sup>[26]</sup>等也各自有其适用条件,因此对于小电流接地系统的故障定位仍是急需解决的问题。

本文针对中性点不接地系统发生单相接地故障时特定区段的双端同步信息特征进行分析,提出了基于区段双端同步信息量测的故障定位新方法。该方法简便易实现,且不受线路长短的影响,对过渡电阻较大时的故障定位均可行,通过 RTDS 仿真验证了其可行性。

## 1 单相接地故障特征

当某一电力网络中有发电机  $G$  和  $n$  条线路存在时,设第  $i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) 条线路的对地电容为  $C_{0i}$ , 以  $C$  相接地为例,则发生单相接地故障时,  $C$  相电流为零,  $A$  相和  $B$  相中流有本身的电容电流,图1显示故障时的零序电流图。

故障线路故障相的电流为

$$\begin{aligned} \dot{I}_k &= -j\omega \sum_{i=1}^n C_{0i} (U_A + U_B + U_C) \\ &= -3j\omega \sum_{i=1}^n C_{0i} U_0 \end{aligned} \quad (1)$$

各线路非故障相的电流为

$$\dot{I}_{Ai} = jU_A \omega C_{0i} \quad \dot{I}_{Bi} = jU_B \omega C_{0i} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

由此可见,非故障线路从母线流向线路的零序电流,数值上等于线路本身的对地电容电流,由故障线路流向母线的零序电流,其数值等于全系统非故障元件对地电容电流之总和(但不包括故障线路本身),恰好与非故障线路上的相反。

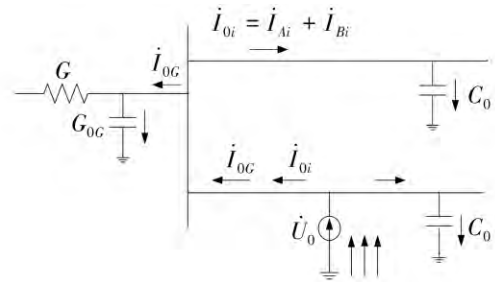


图1 单相接地故障零序网络图

## 2 区段双端同步信息定位法

### 2.1 故障判据

中性点直接接地系统中差动保护是利用基尔霍夫电流定理实现的,当电力元件正常工作时,流入电流和流出电流相等,差动继电器不动作。当其内部发生故障时,两侧向故障点提供短路电流,此时差动保护感受的电流正比于故障电流,差动继电器动作。

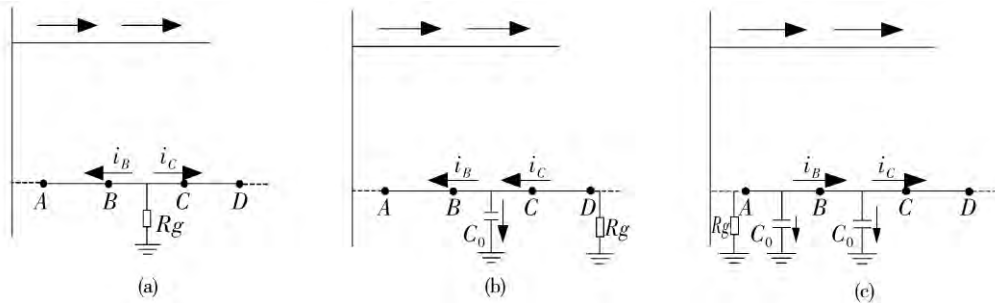


图2 区段 BC 的区内及区外故障零序电流示意图

本文将此“差动”的思想应用到中性点不接地系统中,根据单相接地故障发生时,区段双端稳态零序电流值的差异,采集区段双端同步稳态零序电流瞬时值并利用此双端同步信息做差。线路正常运行时无零序电流,当发生单相接地故障时,非故障线路零序电流由母线流向线路,任意区段的双端零序电流极性一致,双端稳态零序电流瞬时值做差瞬时值变小;故障区段首端零序电流由线路流向母线,末端零序电流由故障处流向线路,首末端极性相反,差值极性仍与故障区段的首端极性一致。

定义由电源侧指向负荷侧终端的方向为该网络的正方向,即极性为“+”,反之为“-”。如图2所示,

区段 BC 的区内故障和区外故障示意图。

(a) 对于故障线路区段 BC 发生区内故障时:

$$i_B - i_C = \Delta i_{BC} < 0。 \quad (3)$$

(b) 对于线路区段 BC 负荷侧发生区外故障时:

$$i_B - i_C = \Delta i_{BC} > 0。 \quad (4)$$

(c) 对于线路区段 BC 系统侧发生区外故障时:

$$i_B - i_C = \Delta i_{BC} > 0, \quad (5)$$

其中:  $i_B$  为 BC 区段首端 B 点处 3 倍稳态零序电流瞬时值;  $i_C$  为 BC 区段末端 C 点处 3 倍稳态零序电流瞬时值;  $\Delta i_{BC}$  为 BC 区段双端同步 3 倍稳态零序电流瞬时值的差。

对于公式(2)的理论分析, 双端信息同步时, 线路自身电容电流在线路首端最大, 所以  $|i_B|$  小于  $|i_C|$ , 因此以上非故障区段极性为正值。

## 2.2 故障定位的原理及实现

根据系统发生单相接地故障时, 线路区段双端检测装置采集的 3 倍稳态零序电流瞬时值  $i_B$ 、 $i_C$  及计算得到的双端差值  $\Delta i_{BC}$  极性来判断故障区段。

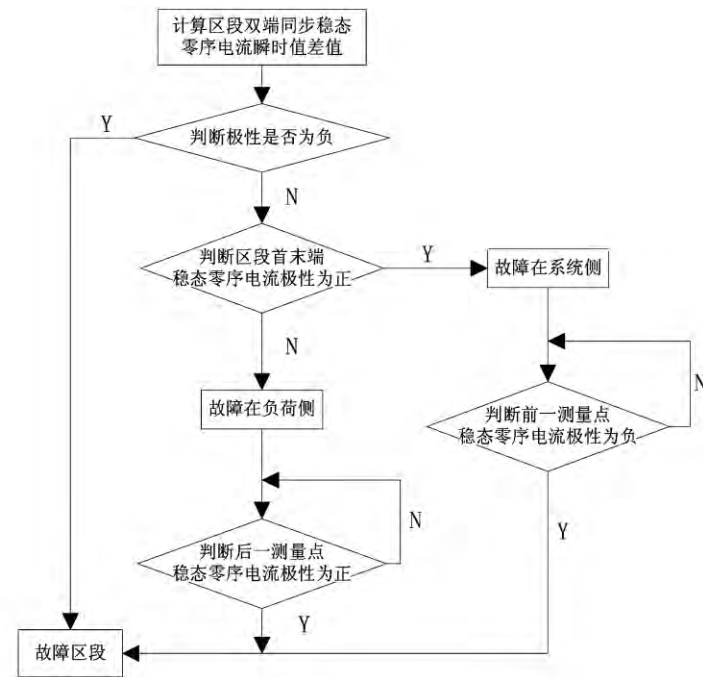


图3 故障定位流程

1) 若双端检测装置所提取计算的  $\Delta i_{BC}$  极性为负, 则该特定区段为故障区段, 可直接进行故障隔离, 消除故障;

2) 若双端检测装置所提取的  $\Delta i_{BC}$  为正, 则故障发生在该特定区段外, 再判定双端 3 倍零序电流极性;

a) 若特定区段 BC 双端  $i_B$ 、 $i_C$  都为正, 故障点在该区段系统侧。则由特定区段向系统侧分析前一检测装置稳态零序电流极性, 直到找到极性为负的一点, 则该点检测装置与后一个检测装置之间的线路区段为故障区段; 若所有检测装置测出 3 倍零序电流稳态值全为正值, 则故障点位于其他线路;

b) 若特定区段 BC 双端  $i_B$ 、 $i_C$  都为负, 故障点在该区段负荷侧。则由特定区段向负荷侧分析后一检测装置稳态零序电流极性, 直到找到极性为正的一点, 则该点检测装置与前一个检测装置之间的线路区段为故障区段; 若所有检测装置测出 3 倍零序电流稳态值全为负值, 则故障点位于线路末端。

判定某区段为故障区段或者故障区段定位的基本流程, 见图 3。

3 仿真验证

利用 RTDS 对 10 kV 中性点不接地系统带 5 条电缆出线进行仿真 ,三相负荷对称 ,系统参数对称。11 ,12 ,21…为双端信息检测装置的测量点 ,仿真接地故障位于线路四 BC 区段(区内故障) ,BC 区段外系统侧(A 点故障)和 BC 区段外负荷侧(E 点故障)时基于双端同步信息量测的故障区段判据。仿真参数如下:110 kV 电源  $R=1.0\ \Omega$   $L=0.1\ \text{H}$  ,变压器容量 31.5 MVA ,电缆线路参数: $R_1=0.34\ \Omega/\text{km}$   $L_1=0.385\ \text{mH}/\text{km}$   $C_1=0.455\ \mu\text{F}/\text{km}$  ,零序参数: $R_0=1.0\ \Omega/\text{km}$   $L_0=1.050\ \text{mH}/\text{km}$   $C_0=0.4516\ \mu\text{F}/\text{km}$  ,负载  $S=3+j4\ \text{MVA}$ 。

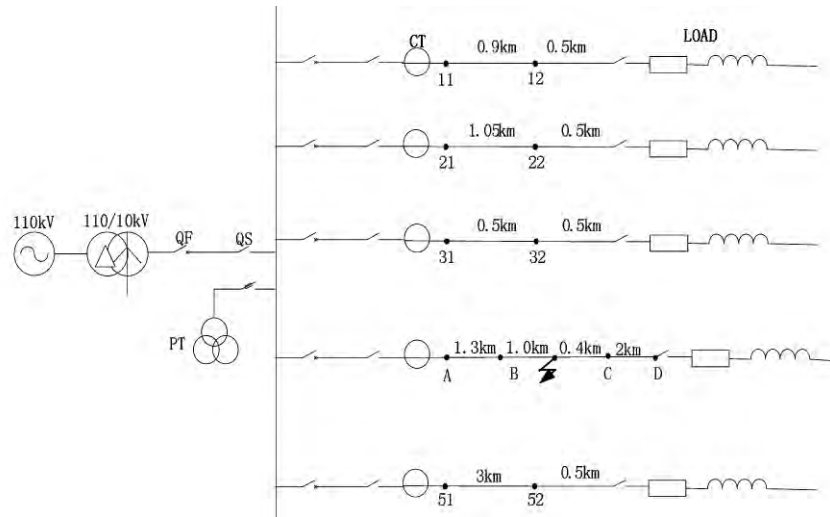


图 4 配电网仿真实验模型

(1) 以下仿真中性点不接地系统经不同过渡电阻发生单相接地故障时 ,区段 BC 内故障时双端 3 倍稳态零序电流的有效值  $I_B$ 、 $I_C$  及  $\Delta I_{BC}$  差值。

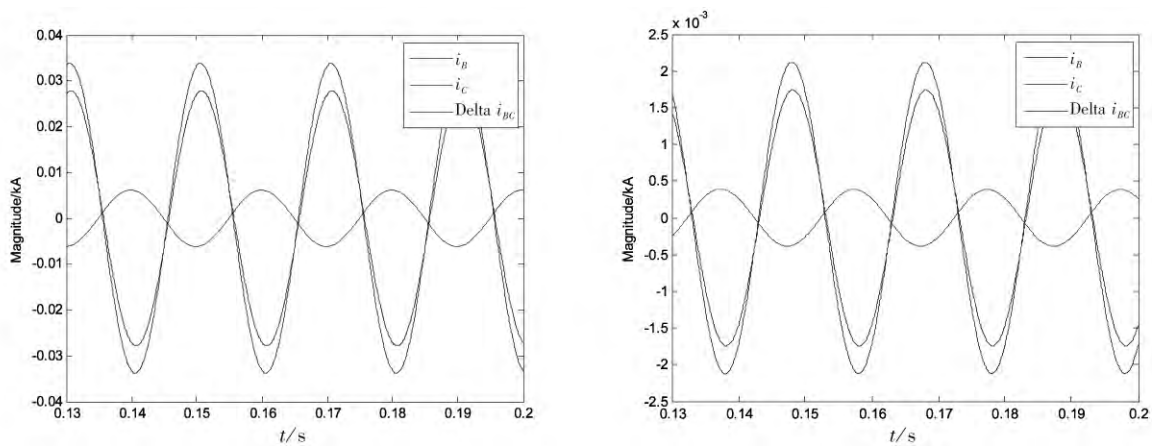


图 5  $R_g=0\ \Omega$  和  $3\text{k}\ \Omega$  时故障区段两端稳态零序电流

以上算例显示 ,区段首末端稳态零序电流差值的有效值都为负值时发生区内故障。并且首末端做差以后比首端稳态零序电流有效值明显变大 ,因为多了一维测度 ,进而验证此方法较单端选线方法具有一定的优越性。

表 1 区内故障时区段稳态电流有效值

	$R_g/\Omega$	$I_B/\text{A}$	$I_C/\text{A}$	$\Delta I_{BC}/\text{A}$
故障线路四	0	-19.88	4.40	-24.17
	50	-18.26	4.03	-22.18
	500	-6.58	1.44	-7.99
	3 000	-1.22	0.27	-1.48
	5 000	-0.73	0.17	-0.89

(2) 以下仿真中性点不接地系统经不同过渡电阻发生单相接地故障时, 区段 BC 系统侧故障时双端稳态 3 倍零序电流信息有效值  $I_B$ 、 $I_C$  及  $\Delta I_{BC}$  差值。

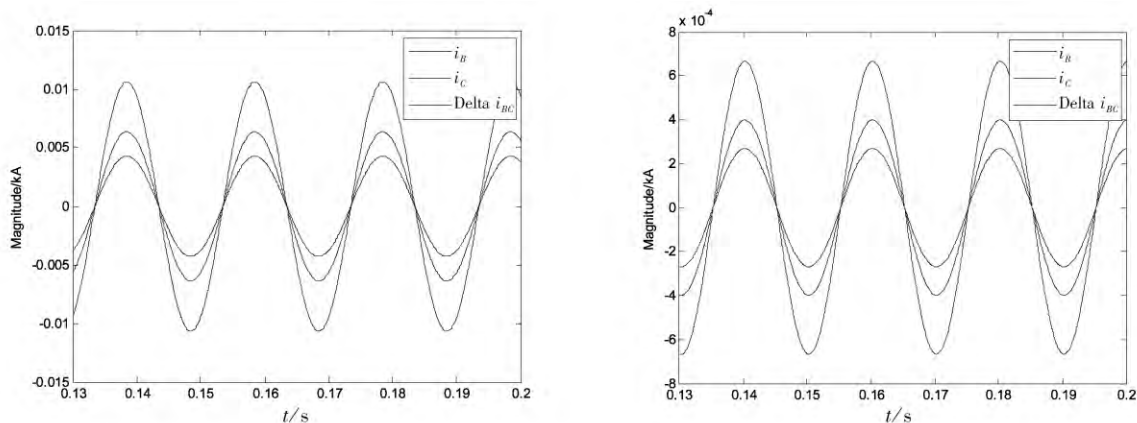


图 6 区段系统侧故障  $R_g = 0 \Omega$  和  $3 \text{ k}\Omega$  时故障区段两端稳态零序电流及差值信息

以上算例仿真显示, 区段首末端稳态零序电流差值的有效值为正值时, 发生区外故障, 首末端的稳态零序电流的有效值均为正值, 为区段的系统侧发生单相接地故障。继续向上一双端检测装置的测量点进行极性判断, 直到找到极性为负值的监测点, 得到故障区段。

(3) 以下仿真中性点不接地系统经不同过渡电阻发生单相接地故障时, 区段 BC 负荷侧故障时双端稳态 3 倍零序电流信息有效值  $I_B$ 、 $I_C$  及  $\Delta I_{BC}$  差值。

表 2 区段系统侧故障时区段稳态电流有效值

	$R_g / \Omega$	$I_B / \text{A}$	$I_C / \text{A}$	$\Delta I_{BC} / \text{A}$
故障线路四	0	7.53	4.50	3.03
	50	6.90	4.13	2.78
	500	2.55	1.52	1.02
	3 000	0.47	0.28	0.19
	5 000	0.28	0.17	0.11

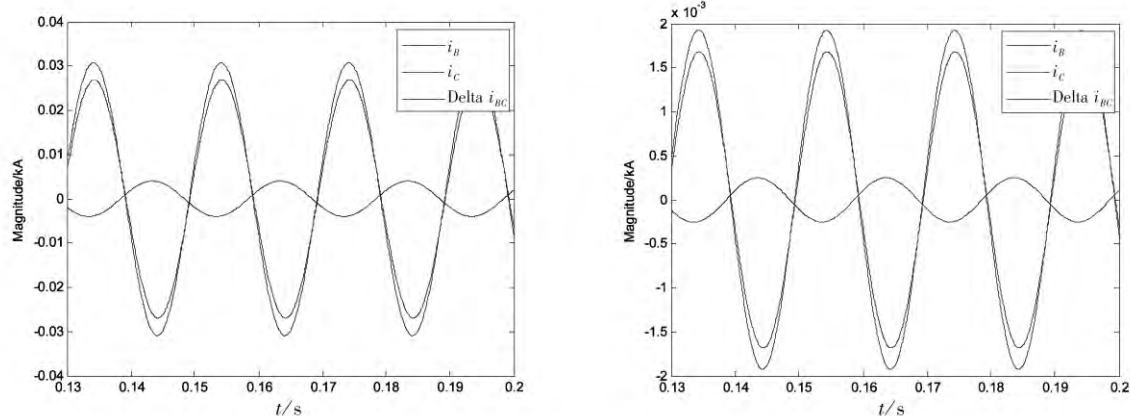


图 7 区段负荷侧故障  $R_g = 0 \Omega$  和  $3 \text{ k}\Omega$  时故障区段两端稳态零序电流及差值信息

以上算例仿真显示, 区段首末端稳态零序电流差值的有效值为正值时, 发生区外故障, 首末端的稳态零序电流的有效值均为负值, 为区段的负荷侧发生单相接地故障。继续向下一双端检测装置的测量点进行极性判断, 直到找到极性为正值的监测点, 得到故障区段; 若全为负值, 则故障发生在线路末端。

(4) 改变电缆线路的长度将 CD 段改为  $10 \text{ km}$ , 分别发生三种区段故障时, 区段 BC 双端稳态 3 倍

表 3 区段负荷侧故障时区段稳态电流有效值

	$R_g / \Omega$	$I_B / \text{A}$	$I_C / \text{A}$	$\Delta I_{BC} / \text{A}$
故障线路四	0	-19.03	-21.86	2.86
	50	-17.79	-20.37	2.64
	500	-6.39	-7.32	0.95
	3 000	-1.17	-1.34	0.17
	5 000	-0.71	-0.82	0.11

零序电流信息有效值  $I_B$ 、 $I_C$  及  $\Delta I_{BC}$  差值。

此仿真不受系统线路长短的影响,从区段首末端稳态零序电流的差值的幅值得出,此方法还可具备减轻过渡电阻影响的效果,提高了定位的准确性。

表 4 区段内和区段外故障时区段稳态电流有效值

故障	$I_B/A$	$I_C/A$	$\Delta I_{BC}/A$
故障线路四			
区段内	-16.17	36.21	-52.09
系统侧	39.44	36.97	2.47
负荷侧	-12.14	-13.91	1.82

4 结 语

本文提出了一种基于馈线各区段双端同步信息的小电流接地故障定位方法。此方法借助双端检测装置上传的同步信息配合配电自动化对区段双端同步稳态零序电流及其差值进行分析以确定故障区段。该方法可适用于中性点不接地及高阻接地的配电系统,方法原理简单,无需复杂计算,且不受系统线路长短的影响,抗过渡电阻的能力强。对于消弧线圈接地系统的单相接地故障定位方法还需进一步研究,通过双端检测装置进行双端同步数据上传,需要采样的同步性,并需要精确测量单相接地故障时的稳态零序电流,对设备的精度要求较高。

参 考 文 献

[1] Toshihisa Funabashi. Digital fault location high resisittance rgrounded transmission Lines[J]. IEEE Trans. Power Delivery. 1999. 14(1):80-85.

[2] 王玮 蔡伟 张元芳 樊大伟. 基于阻抗法的电力电缆高阻故障定位理论及试验[J]. 电网技术 2001 25(11).

[3] 范新桥. 基于多点电流测量的输电线路故障定位方法研究[D]. 北京:华北电力大学 2012. 6.

[4] 全玉生. 高压架空输电线路故障测距新算法的研究[D]. 西安:西安交通大学博士学位论文,1999 6.

[5] 苏进喜 解子凤 吴欣荣,等. 双端同步采样的输电线路故障定位方法的仿真研究[J]. 高电压技术 1998 24(4):26-29.

[6] 毛鹏 张兆宁 苗友忠,等. 基于双端电气量的输电线路故障测距的新方法[J]. 继电器 2000 28(5):24-27.

[7] 王宾 董新洲 薄志谦 Andrew KLIMEK. 特高压长线路单端阻抗法单相接地故障测距[J]. 电力系统自动化 2008 32(14):25-29.

[8] 肖东晖 刘沛 程时杰. 架空输电线路故障测距方法综述[J]. 电力系统自动化 1993 17(8):46-55.

[9] Yang Q S ,Morrison I F ,et al. Microprocessor - Based Algorithm for High - Resistance Earth - Fault Distance Protection. IEE Proc ,Vol. 130 , Pt. C ,NO. 6 ,Nov. 1983 tion. IEEProc. ,Vbl. 130 Pt. C ,NO. 6 ,Nov. 1983.

[10] String T W ,et al. Fault Location Methods for Overhead Lines. AIEE Trans ,1957. 8 76:518-529.

[11] Vitins M ,A Correlation Method for Transmission Line Protection. IEEE Trans. 1978 Vol. PAS -97 ,No. 5.

[12] 桑在中 潘贞存 李磊 张慧芬. 小电流接地系统单相接地故障选线测距[J]. 电网技术 1997. 21(10).

[13] 束洪春 许承斌 徐贤敏 陈学允. 10kV 或 6kV 直配线路单相接地故障测距的新方法[J]. 中国电机工程学报 1995 15(6):423-428.

[14] 金滇黔. 基于 GPS 双端同步采样的输电线路故障定位的研究[D]. 广西大学硕士学位论文 2004 5.

[15] 严凤 胡立峰 杨奇逊 齐郑 杨以涵. 基于行波理论的配电网故障定位方法的研究[J]. 中国电机工程学报 2004 24(9).

[16] 卢继平 黎颖 李建,等. 行波法与阻抗法结合的综合单端故障测距新方法[J]. 电力系统自动化 2007 31(23):65-69.

[17] 李泽文 姚建刚 曾祥君,等. 基于整个电网行波时差的故障定位方法[J]. 中国电机工程学报 2009 29(4):60-64.

[18] 覃剑. 输电线路单端行波故障测距的研究[J]. 电网技术 2005 29(15):65-70.

[19] 董新洲 刘建政 余学文. 输电线路暂态电压行波的故障特征及其小波分析[J]. 清华大学学报 2001 16(3):57-61.

[20] 张钧. 配电网智能故障诊断与谐波源定位研究[D]. 成都:西南交通大学 2012 6.

[21] 戚宇林 成燕 杨以涵. 35kV 配电网单相接地故障综合定位方法[J]. 电网技术 2008 32(10):38-42.

[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).

[23] 穆毓. 基于双端同步信息的输电线路故障测距的研究[M]. 北京:华北电力大学 2008 12.

[24] 穆毓 梁志瑞 苏海峰,等. 基于双端同步信息的配电网单相接地故障定位新方法[C]. 中国高等学校电力系统及其自动化专业第二十四届学术年会论文集.

[25] 张林利 高厚磊 徐丙垠,等. 基于区段零序导纳的小电流接地故障定位方法[J]. 电力系统自动化 2012 36(20).

[26] 张林利 高厚磊 徐丙垠 薛永端. 基于线电压和零模电流的小电流接地故障暂态定位方法[J]. 中国电机工程学报 2012 32(13):110-115.

[27] 唐华. 小电流接地系统故障定位技术研究[D]. 北京:北京交通大学 2014. 3.

[28] Thomas Baldwin. Frank Renovich ,Lynn Saunders ,David Lubkeman. Fault locating in ungrounded and high - resistance grounded systems

- [J]. IEEE Paper No. ICPS -01 -24.
- [29] Leel Ho Seol ,Bok Nam Ha ,Mi Ae Jeong ,Moon Ho Kang ,Sang Ho Lee, "A study of line - to - ground fault solution in ungrounded network base on the distribution automatic system" ,KIEE summer conference ,July 14 -16 2004.
- [30] In Sun Choi ,Myeon Song Choi ,Seong Il Lim ,Seung Jae Lee, "A new algorithm of the line to grounded fault section isolation & restoration in ungrounded distribution power system" ,Trans. KIEE. Vol. 53A ,No. 10 ,Oct 2004.
- [31] 杨丽娜 ,辛雷 ,辛鹏. 小电流接轨系统故障仿真分析与研究[J]. 东北电力大学学报 2010 ,30(1) :57 -61.
- [32] 陈晓娟 ,刘晓翠 ,于远志. 基于多判据融合的小电流单相接地故障选线法[J]. 东北电力大学学报 2010 ,30(1) :53 -56.

## Fault Location Based on Synchronous Data of Both Ends in Non-effectively Grounded System

YUAN Jing<sup>1</sup> ,CHENG Lin<sup>2</sup> ,LI Hong-tao<sup>3</sup> ,HUANG Ren-le<sup>3</sup>

(1. Electrical Engineering College ,Northeast Dianli University ,Jilin Jilin 132012 ;2. State Key Laboratory of Power Systems ,  
Department of Electrical Engineering ,Tsinghua University ,Beijing 100084 ;3. State Grid Beijing Electric Power Company ,Beijing  
100031)

**Abstract:** Because of the sectionalized switches ,each feeder of the distribution network is divided into several sections. The single-phase fault may not be effectively and efficiently detected based on existing approaches. The paper puts forward a fault location method based on synchronous data of both ends ,on the basis of analyzing zero sequence current of both ends and differential characteristics of sound section and fault section. The positioning method is implemented by using the synchronous measurement device with distribution automation (DA) system. The proposed method is experimented based on the Real Time Digital Simulator (RTDS) system. Simulation results demonstrate that the proposed method has better robustness in non-effectively grounded system when coping with uncertainties such as feeder length or transition resistance.

**Key words:** Non-effectively grounded system ; Fault location ; Synchronous data of both ends ; Real Time Digital Simulator