

配电线路自适应相序识别方法

陈恒¹, 王鹏玮², 徐丙垠², 薛永端³, 孙中玉²

(1. 山东科汇电力自动化股份有限公司, 山东 淄博 255000; 2. 山东理工大学电气与电子工程学院, 山东 淄博 255000; 3. 中国石油大学(华东)新能源学院, 山东 青岛 266580)

摘要: 配电网故障测距主要依靠双端行波法和双端阻抗法, 线路换相会造成故障点两侧终端采集的电压电流相序不对应, 导致测距结果不可信, 因此迫切需要自适应相序识别方法来解决双端电气量不对应的问题。在配电终端同步采样的前提下, 利用沿线分布负荷对系统电压电流影响较小的特性, 分析了两种换相方式的不同换相次数对于相邻配电终端采集电气量与故障信息产生的变化, 提出了一种自适应相序识别方法。该方法通过计算相邻配电终端采集电气量的相似系数与相角差, 统计同一次故障的动作或告警信息对应关系, 判断其保护区内线路以何种方式换相以及换相次数, 实现相序识别。通过判断配电终端采集电气量的相位超前关系, 实现互感器反接的自动识别, 无需外加装置或人工配置。仿真结果表明, 该方法可有效识别任意相邻终端之间电压电流相序关系, 具有较高的准确性, 为双端测距法的工程应用提供了保障。

关键词: 配电线路; 双端测距; 自适应方法; 线路换相; 相序识别

Adaptive phase sequence identification method for distribution lines

CHEN Heng¹, WANG Pengwei², XU Bingyin², XUE Yongduan³, SUN Zhongyu²

(1. Shandong Kehui Electric Power Automation Co., Ltd., Zibo 255000, China; 2. School of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China; 3. College of New Energy, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China)

Abstract: Distribution network fault location mainly depends on the dual-end traveling wave and dual-end impedance methods. Line commutation may cause the voltage and current phase sequence collected by the terminals on both sides of the fault point to not correspond to each other. This leads to untrustworthy results in distance measurement. Therefore, an adaptive phase sequence identification method is urgently needed to solve the problem of dual-end electrical quantity mismatch. Given synchronous sampling of distribution terminals, and using the characteristic that distributed load along the line has little influence on system voltage and current, the changes of collection of electrical quantity and fault information by adjacent distribution terminals caused by different commutation times of two commutation modes are analyzed. An adaptive phase sequence identification method is presented. This method calculates the similarity coefficient of collection electrical quantity by adjacent distribution terminals and phase angle difference, and records the corresponding relation of action or alarm information of the same fault. It also judges how and how many times the lines in the protection area commutate, and realizes phase sequence recognition. By judging the phase advance relationship of electric quantity collected by the distribution terminal, automatic identification of mutual inductor reverse connection can be achieved without additional devices or manual configuration. The simulation results show that this method can effectively identify the voltage and current phase sequence relationship between arbitrary adjacent terminals with high accuracy. This provides a guarantee for the application of the double-ended ranging method in engineering.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52077221).

Key words: distribution lines; dual-end ranging; adaptive method; line commutation; phase sequence identification

0 引言

我国 10~35 kV 中压配电网中性点普遍采用不接地与经消弧线圈接地方式,其单相接地故障隔离与故障点查找问题长期以来困扰着供电运行部门^[1-4]。配电网单相接地故障保护技术可分为故障选线、故障区段定位和故障测距三种,其中故障选线与故障区段定位技术目前在一定程度上得到了实用化^[5-7],而故障测距的准确性与可靠性难以保证,导致其难以进一步地推广与实用^[8-9]。

现阶段,实际工程中广泛应用的配电网故障测距方法主要以阻抗法^[10-11]、行波法^[12-13]和智能测距算法^[14-15]为主,根据信息量来源又可分为单端法和双端法两种^[16-17]。配电网网络拓扑结构复杂,分支线路较多,行波波头上升速度缓慢且行波波形十分复杂,识别难度较大^[18-19],因此其测距的精度与可靠性难以得到保证;智能测距算法创新性强,但是原理上不够成熟和完善,尚不能投入实际应用^[20]。阻抗法原理简单易于实现,对保护终端采样精度要求低,在实际工程中得到了广泛应用^[21]。单端法由于信息量不足,测距精度受对端系统阻抗(负荷阻抗)与过渡电阻影响较大,双端法原理与差动保护类似,不受上述因素的影响,测距精度较高,受到了业内的普遍关注^[22]。但仍有较多问题亟待解决,其一,为保证三相线路参数的平衡,每隔一段距离需要对线路进行换相^[23],当两配电终端保护区内线路进行换相时,电压与电流的对应关系不再一致,会出现两端采集的电压电流信息量无法对应的“紊乱”现象,无法保证双端测距结果的可靠性;其二,由于现场存在电压互感器与电流互感器的一次侧、二次侧接线不对应导致的极性反接问题^[24],使得双端测距结果不可信。

为解决上述异常情况给双端阻抗测距可靠性带来的影响,本文结合配电网线路换相以及配电终端可能存在的互感器极性反接现象,提出了基于电压信息量、相电流信息量以及故障信息同步比较的配电网线路自适应相序识别方法。该方法利用配电终端采集的电压电流信息量以及故障信息自动识别相序,自适应性强。仿真数据验证了本文方法具有较高的可靠性。

1 线路换相对配电终端采集量的影响

1.1 两配电终端保护区内线路换相 1 次

配电系统中,沿线分布负荷对于系统电压电流信息量幅值与相位的影响较小。由图 1 可知,当相邻两配电终端保护区内线路换相时,配电终端的电

压电流信息量采集会产生以下变化。

1) 当线路未换相时配电终端 1、2 的电压与电流信息量保持一致。

2) 当线路采用方式 1 换相 1 次时,配电终端 1 的 A、B 相电流转换为配电终端 2 的 B、C 相电流,配电终端 1 的 C 相电流转换为配电终端 2 的 A 相电流;配电终端 1 的线电压 \dot{U}_{AB1} 转换为配电终端 2 的线电压 \dot{U}_{CB2} ,配电终端 2 的线电压 \dot{U}_{AB2} 为配电终端 1 线电压 \dot{U}_{CB1} 与 \dot{U}_{AB1} 的差值($\dot{U}_{CB1} - \dot{U}_{AB1}$),表 1 给出当线路采用方式 1 换相,忽略线路损耗时配电终端 1、2 采集的电压电流信息量。

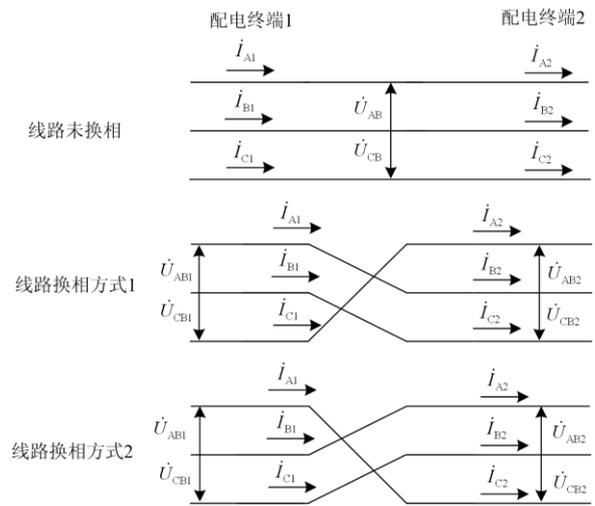


图 1 线路未换相与换相 1 次示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the line not commutated and commutated once

表 1 按方式 1 换相 1 次时配电终端采集的电压电流信息量
Table 1 Voltage and current information collected by distribution terminals commutated once according to mode 1

配电终端编号	物理量	采集信息量
1	线电压	\dot{U}_{AB1} 、 \dot{U}_{CB1}
	相电压	\dot{U}_{A1} 、 \dot{U}_{B1} 、 \dot{U}_{C1}
	相电流	i_{A1} 、 i_{B1} 、 i_{C1}
2	线电压	$\dot{U}_{AB2} = \dot{U}_{CB1} - \dot{U}_{AB1}$ 、 $\dot{U}_{CB2} = -\dot{U}_{AB1}$
	相电压	$\dot{U}_{A2} = \dot{U}_{C1}$ 、 $\dot{U}_{B2} = \dot{U}_{A1}$ 、 $\dot{U}_{C2} = \dot{U}_{B1}$
	相电流	$i_{A2} = i_{C1}$ 、 $i_{B2} = i_{A1}$ 、 $i_{C2} = i_{B1}$

3) 当线路采用方式 2 换相 1 次时,配电终端 1 的 B、C 相电流转换为配电终端 2 的 A、B 相电流,配电终端 1 的 A 相电流转换为配电终端 2 的 C 相电流;配电终端 1 的线电压 \dot{U}_{BC1} 转换为配电终端 2 的线电压 \dot{U}_{AB2} ,配电终端 2 的线电压 \dot{U}_{BC2} 为配电终端 1 线电压 \dot{U}_{AB1} 与 \dot{U}_{CB1} 的差值($\dot{U}_{AB1} - \dot{U}_{CB1}$),表 2 给出

忽略线路损耗时, 配电终端 1、2 采集的电压电流信息量。

表 2 按方式 2 换相 1 次时配电终端采集的电压电流信息量

Table 2 Voltage and current information collected by distribution terminals commutated once according to mode 2		
配电终端编号	物理量	采集信息量
1	线电压	$\dot{U}_{AB1}、\dot{U}_{CB1}$
	相电压	$\dot{U}_{A1}、\dot{U}_{B1}、\dot{U}_{C1}$
	相电流	$\dot{I}_{A1}、\dot{I}_{B1}、\dot{I}_{C1}$
2	线电压	$\dot{U}_{AB2}=-\dot{U}_{CB1}、\dot{U}_{CB2}=\dot{U}_{AB1}-\dot{U}_{CB1}$
	相电压	$\dot{U}_{A2}=\dot{U}_{B1}、\dot{U}_{B2}=\dot{U}_{C1}、\dot{U}_{C2}=\dot{U}_{A1}$
	相电流	$\dot{I}_{A2}=\dot{I}_{B1}、\dot{I}_{B2}=\dot{I}_{C1}、\dot{I}_{C2}=\dot{I}_{A1}$

由上述分析可知, 两配电终端中线路换相 1 次时, 配电终端 1、2 采集的相电流信息量根据换相方式的不同, 配电终端 1 的 A、B、C 分别对应配电终端 2 的 C、A、B 或 B、C、A; 配电终端 2 采集的两组线电压信息量, 根据换相方式的不同, 一组对应配电终端 1 采集的某组线电压的负值, 另一组对应配电终端 1 采集的两组线电压的差值。

1.2 两配电终端保护区内线路换相两次

本文 1.1 节给出了两配电终端保护区内线路换相 1 次时, 采集信息量的转换情况。实际工程应用中, 可能存在两配电终端中换相 2 次的情况, 图 2 给出两配电终端保护区内线路未换相与两种换相方式的示意图。

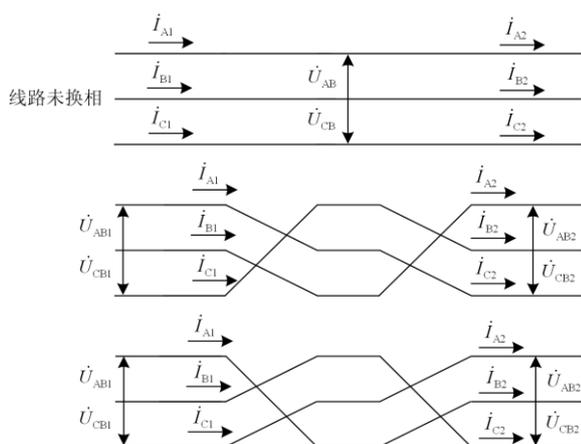


图 2 线路未换相与换相两次示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the line not commutated and commutated twice

由图 2 可知, 配电终端的电压电流信息量采集会产生以下变化。

1) 当线路未换相时配电终端 1、2 的电压与电流信息量保持一致。

2) 当线路采用方式 1 换相 2 次时, 配电终端 1

的 B、C 相电流转换为配电终端 2 的 A、B 相电流, 配电终端 1 的 A 相电流转换为配电终端 2 的 C 相电流; 配电终端 1 的线电压 \dot{U}_{BC1} 转换为配电终端 2 的线电压 \dot{U}_{AB2} , 配电终端 2 的线电压 \dot{U}_{BC2} 为配电终端 1 线电压 \dot{U}_{AB1} 与 \dot{U}_{CB1} 的差值 $(\dot{U}_{AB1}-\dot{U}_{CB1})$, 表 3 给出忽略线路损耗时配电终端 1、2 采集的电压电流信息量, 易知其与两配电终端中线路采用方式 2 换相 1 次时的采集信息量一致。

表 3 按方式 1 换相 2 次时配电终端采集的电压电流信息量

Table 3 Voltage and current information collected by distribution terminals commutated twice according to mode 1		
配电终端编号	物理量	采集信息量
1	线电压	$\dot{U}_{AB1}、\dot{U}_{CB1}$
	相电压	$\dot{U}_{A1}、\dot{U}_{B1}、\dot{U}_{C1}$
	相电流	$\dot{I}_{A1}、\dot{I}_{B1}、\dot{I}_{C1}$
2	线电压	$\dot{U}_{AB2}=-\dot{U}_{CB1}、\dot{U}_{CB2}=\dot{U}_{AB1}-\dot{U}_{CB1}$
	相电压	$\dot{U}_{A2}=\dot{U}_{B1}、\dot{U}_{B2}=\dot{U}_{C1}、\dot{U}_{C2}=\dot{U}_{A1}$
	相电流	$\dot{I}_{A2}=\dot{I}_{B1}、\dot{I}_{B2}=\dot{I}_{C1}、\dot{I}_{C2}=\dot{I}_{A1}$

3) 当线路采用方式 2 换相 2 次时, 配电终端 1 的 A、B 相电流转换为配电终端 2 的 B、C 相电流, 配电终端 1 的 C 相电流转换为配电终端 2 的 A 相电流; 配电终端 1 的线电压 \dot{U}_{AB1} 转换为配电终端 2 的线电压 \dot{U}_{CB2} , 配电终端 2 的线电压 \dot{U}_{AB2} 为配电终端 1 线电压 \dot{U}_{CB1} 与 \dot{U}_{AB1} 的差值 $(\dot{U}_{CB1}-\dot{U}_{AB1})$, 表 4 给出了忽略线路损耗时配电终端 1、2 采集的电压电流信息量, 易知其与两配电终端中线路采用方式 1 换相 1 次时的采集信息量一致。

表 4 按方式 2 换相 2 次时配电终端采集的电压电流信息量

Table 4 Voltage and current information collected by distribution terminals commutated twice according to mode 2		
配电终端编号	物理量	采集信息量
1	线电压	$\dot{U}_{AB1}、\dot{U}_{CB1}$
	相电压	$\dot{U}_{A1}、\dot{U}_{B1}、\dot{U}_{C1}$
	相电流	$\dot{I}_{A1}、\dot{I}_{B1}、\dot{I}_{C1}$
2	线电压	$\dot{U}_{AB2}=\dot{U}_{CB1}-\dot{U}_{AB1}、\dot{U}_{CB2}=-\dot{U}_{AB1}$
	相电压	$\dot{U}_{A2}=\dot{U}_{C1}、\dot{U}_{B2}=\dot{U}_{A1}、\dot{U}_{C2}=\dot{U}_{B1}$
	相电流	$\dot{I}_{A2}=\dot{I}_{C1}、\dot{I}_{B2}=\dot{I}_{A1}、\dot{I}_{C2}=\dot{I}_{B1}$

由上述分析可知, 按照不同方式换相时, 两配电终端保护区内线路换相 2 次与换相 1 次时采集的电压电流信息量转换方式基本相同, 线路换相 3 次与线路未换相的相序一致, 不再赘述。

表 1—表 4 为线路换相后两配电终端电压电流信息量采集的差异与对应关系, 同时也是本文给出的自适应相序识别方法所需要满足的电气量对应约

束关系。

表 5 给出自适应相序识别方法涉及到的电压与电流信息量,该方法利用配电终端 1(相对位置在前)的三相电压、三相电流、线电压、线电压差值等信息量,与配电终端 2(相对位置在后)的相应信息量之间的对应关系即可确定两配电终端的相序关系,无需对信息量进行额外处理。

表 5 自适应相序识别方法涉及到的电压电流信息量

Table 5 Voltage and current information involved in the adaptive phase sequence identification method

信息量名称	采集信息量
电压信息量	$\dot{U}_{A1}、\dot{U}_{B1}、\dot{U}_{C1}、\dot{U}_{A2}、\dot{U}_{B2}、\dot{U}_{C2}$ $\dot{U}_{CB1}-\dot{U}_{AB1}$ 或 $\dot{U}_{AB1}-\dot{U}_{CB1}、\dot{U}_{AB2}、\dot{U}_{CB2}$
电流信息量	$i_{A1}、i_{B1}、i_{C1}、i_{A2}、i_{B2}、i_{C2}$

2 自适应相序识别方法

2.1 基于电压同步比较的自适应相序识别方法

由于配电系统结构复杂,分支线路繁多,为保证各个终端之间通信的可靠性以及故障信息上传的有序性,主站会针对各个终端的安装位置进行配电系统的拓扑识别^[25],并对分支线路与主干线路的配电终端进行编号,从而得到主干线路与分支线路的配电线路结构图。实际应用中,需要对安装在主干与分支线路首端、末端的配电终端进行同步对时^[26]。为便于分析,取某一单电源辐射型线路各终端作为相序识别方法的分析对象,且忽略其对时通信的误差,图 3 给出辐射型线路与配电终端示意图。

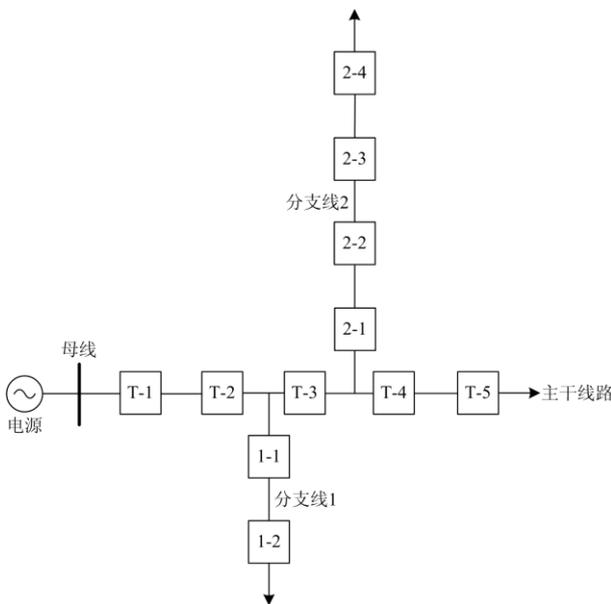


图 3 单电源辐射型线路示意图

Fig. 3 Schematic diagram of single power radiation line

由图 3 可知,T-1 至 T-5 为主干线路上的配电终端,实际工程应用中为保证实施成本,可能仅在线路首末安装配电终端,即仅保留 T-1 与 T-5 两配电终端;1-1、1-2 与 2-1、2-2 分别为分支线 1 与分支线 2 的配电终端。为便于分析,本文选用图 3 中分支线 1 的两配电终端 1-1 与 1-2 作为“邻居”,分析其线路换相时的自动相序识别方法。

基于电压同步比较的自适应相序识别方法示意图如图 4 所示,配电终端 1 与配电终端 2 将电压信号上传故障测距主站,主站利用 DFT(Discrete Fourier Transform)对相电压与线电压信号进行分解,其目的是提取电压信号的工频分量,减少配电线路中的谐波干扰。主站接收配电终端上传数据后,计算分解后两配电终端对应的线电压与相电压在某一工频时间窗内的相角差与相似系数,其中相似系数计算公式如式(1)所示。

$$\rho = \frac{\int_0^T U_1(t)U_2(t)dt}{\sqrt{\int_0^T U_1^2(t)dt} \sqrt{\int_0^T U_2^2(t)dt}} \quad (1)$$

式中: ρ 为相似系数; $U_1(t)$ 为配电终端 1 的电压信息量; $U_2(t)$ 为配电终端 2 的电压信息量; T 为时间窗长度。

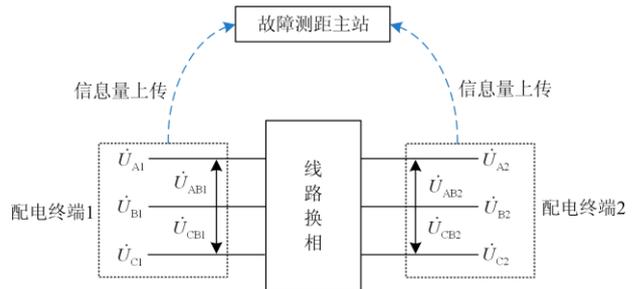


图 4 基于电压同步比较的自适应相序识别方法示意图

Fig. 4 Schematic diagram of adaptive phase sequence identification method based on voltage synchronous comparison

将相似系数判定门槛 ρ_d 判定设为 0.8,即 $|\rho| \geq \rho_d$ 时认为两信息量相似程度较高。

将相角差判定门槛 θ_d 设为 10° ,即 $|\theta| \leq \theta_d$ 时两信号量相角差较小,认为两信号量同步。由于相角差计算涉及到角度的转换,计算结果会出现 $\pm|\theta|$ 、 $180^\circ \pm|\theta|$ 、 $360^\circ \pm|\theta|$ 的情况,因此需要对相角差计算结果进行修正。当计算结果为 $180^\circ \pm|\theta|$ 且 $|\theta| \leq \theta_d$

时认为两信号量极性相反; 当计算结果为 $\pm|\theta|$ 或 $360^\circ \pm|\theta|$, 同时 $|\theta| \leq \theta_0$ 时认为两信号量极性相同。

基于电压同步比较的自适应相序识别方法的具体应用步骤如下。

步骤 1: 主站对各个配电终端实现同步对时与拓扑识别, 对位于主干线路或同一分支线路的配电终端按顺序下发编号。

步骤 2-1: 判断相邻编号配电终端相电压的相角、波形一致性。

步骤 2-2: 判断相邻编号配电终端线电压的相角、波形一致性。

步骤 3: 判断相邻配电终端相电压与线电压的相角、相似关系是否满足表 1—表 4 的约束关系。

步骤 4: 判定相邻配电终端保护区内线路的换相方式与次数。

2.2 基于负荷电流同步比较的自适应相序识别方法

当线路存在负荷电流时, 可以采用负荷电流同步比较的方式识别线路相序, 该方法与本文 2.1 节提出的相序识别方法中基于电压信息量的相序识别方法的内容与具体实现步骤基本一致。图 5 给出该方法的实现示意图, 计算同一工频时间窗内两配电终端的工频相电流相角差与相似系数, 当相电流对应关系满足表 1—表 4 的约束条件, 即可判定两配电终端保护区内线路的换相方式与次数, 从而确定两配电终端连接的相序。

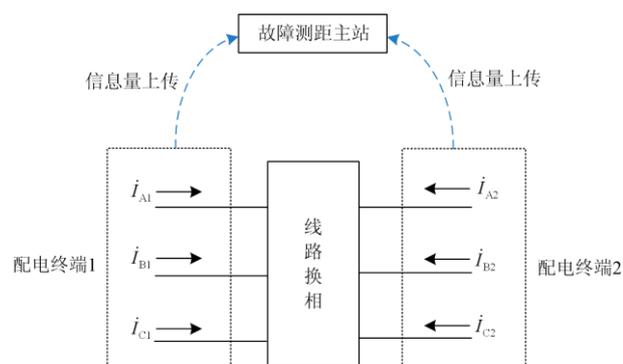


图 5 基于负荷电流同步比较的自适应相序识别方法示意图
Fig. 5 Schematic diagram of adaptive phase sequence identification method based on synchronous comparison of load and current

该方法适用于线路末端接有三相负荷, 即三相负荷电流幅值较大且波形畸变较小的工况。当线路负荷较少且单相负荷、两相负荷以及转动负荷较多

时, 三相负荷电流幅值差异较大与波形畸变较明显, 此时工频分量占比较少, 会导致分解后信号相角与相似系数的计算误差较大, 降低了相序识别的准确性。

2.3 基于故障信息的自适应相序识别方法

实际工程应用中, 当线路发生故障时配电终端会上报故障信息并告警。在不考虑配电终端运行故障的前提下, 当两配电终端保护区内线路发生换相时, 两配电终端对于同一次故障的“感受”与其上报的故障信息存在差异。通过对其上报故障信息的差异与预设文件进行对照, 当满足预设文件时即可确定两配电终端保护区内线路换相的方式与次数, 其具体实现步骤与基于电压信息量的相序识别方法的具体实现步骤基本一致, 如图 6 所示。

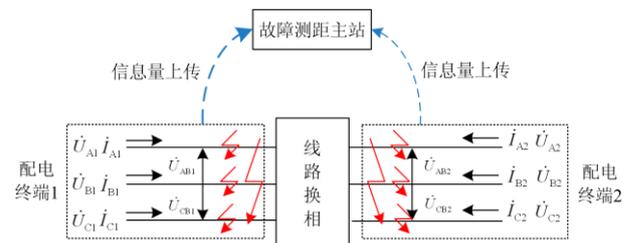


图 6 基于故障信息的自适应相序识别方法示意图
Fig. 6 Schematic diagram of adaptive phase sequence identification method based on fault information

在排除配电终端故障的前提下, 表 6 给出配电终端 1 与配电终端 2 对于故障选相结果与电压电流信息异常情况, 其中仅给出单相接地故障与两相接地故障的换相分析结果, 短路故障与接地故障的分析过程基本一致, 在此不再赘述。

该方法仅当线路发生故障时才能实现相序的识别, 与上述两种相序识别方法相比, 较为被动, 但其对应性与可靠性较高。

2.4 自适应相序识别方法流程图

图 7 给出自适应相序识别方法流程图。由图 7 可知, 主站通过三种方法得到相应的相序识别结果后, 自动分配每种方法预设的权重, 产生类似于投票的结果, 为提高相序识别的准确度与可靠性, 当某一种相序识别结果权重之和大于 0.8, 即基于电压同步比较的自适应相序识别方法给出的结果与另外两种或一种识别方法结果一致时, 认为该结果正确并将该结果反馈给配电终端, 表 7 给出三种相序识别方法的权重分配情况, 该权重可根据实际工况进行调整。

表 6 配电终端预设文件
Table 6 Distribution terminal preset file

故障类型	配电终端 1-1 选相结果	配电终端 1-2 选相结果	线路换相结果		
故障选相差异预设文件	A 相接地故障	A 相	A 相 未换相或换相 3 次		
			B 相 换相方式 1 换相 1 次或换相方式 2 换相 2 次		
			C 相 换相方式 2 换相 1 次或换相方式 1 换相 2 次		
	B 相接地故障	B 相	A 相	换相方式 2 换相 1 次或换相方式 1 换相 2 次	
			B 相	未换相或换相 3 次	
			C 相	换相方式 1 换相 1 次或换相方式 2 换相 2 次	
	C 相接地故障	C 相	A 相	换相方式 1 换相 1 次或换相方式 2 换相 2 次	
			B 相	换相方式 2 换相 1 次或换相方式 1 换相 2 次	
			C 相	未换相或换相 3 次	
	AB 两相 接地故障	AB 相	AB 相	未换相或换相 3 次	
			AC 相	换相方式 2 换相 1 次或换相方式 1 换相 2 次	
			BC 相	换相方式 1 换相 1 次或换相方式 2 换相 2 次	
AC 两相 接地故障	AC 相	AB 相	换相方式 1 换相 1 次或换相方式 2 换相 2 次		
		AC 相	未换相或换相 3 次		
		BC 相	换相方式 2 换相 1 次或换相方式 1 换相 2 次		
BC 两相 接地故障	BC 相	AB 相	换相方式 2 换相 1 次或换相方式 1 换相 2 次		
		AC 相	换相方式 1 换相 1 次或换相方式 2 换相 2 次		
		BC 相	未换相或换相 3 次		
异常电气量差异 预设文件	故障类型	配电终端 1-1 异常 电气量	配电终端 1-2 异常 电气量	线路换相结果	
		A 相接地故障	I_A 与 U_{AB}	I_A 与 U_{AB}	未换相或换相 3 次
					I_B 与 U_{BC}
				I_C 与 U_{AB} 或 $(U_{AB}-U_{BC})$	换相方式 2 换相 1 次或换相方式 1 换相 2 次
	B 相接地故障	I_B 与 U_{BC} 或 U_{AB}	I_B 与 U_{BC} 或 U_{AB}	未换相或换相 3 次	
				I_C 与 $(U_{AB}-U_{BC})$ 或 U_{BC}	换相方式 1 换相 1 次或换相方式 2 换相 2 次
				I_A 与 U_{AB} 或 $(U_{AB}-U_{BC})$	换相方式 2 换相 1 次或换相方式 1 换相 2 次
	C 相接地故障	I_C 与 U_{BC}	I_C 与 U_{BC}	未换相或换相 3 次	
				I_A 与 $(U_{AB}-U_{BC})$	换相方式 1 换相 1 次或换相方式 2 换相 2 次
				I_B 与 U_{AB}	换相方式 2 换相 1 次或换相方式 1 换相 2 次
	AB 两相 接地故障	I_A 、 I_B 与 U_{AB}	I_A 、 I_B 与 U_{AB}	未换相或换相 3 次	
				I_B 、 I_C 与 U_{BC}	换相方式 1 换相 1 次或换相方式 2 换相 2 次
				I_C 、 I_A 与 $(U_{AB}-U_{BC})$	换相方式 2 换相 1 次或换相方式 1 换相 2 次
	AC 两相 接地故障	I_A 、 I_C 与 $(U_{AB}-U_{BC})$	I_A 、 I_C 与 $(U_{AB}-U_{BC})$	未换相或换相 3 次	
				I_B 、 I_A 与 U_{AB}	换相方式 1 换相 1 次或换相方式 2 换相 2 次
				I_C 、 I_B 与 U_{BC}	换相方式 2 换相 1 次或换相方式 1 换相 2 次
	BC 两相 接地故障	I_B 、 I_C 与 U_{BC}	I_B 、 I_C 与 U_{BC}	未换相或换相 3 次	
				I_C 、 I_A 与 $(U_{AB}-U_{BC})$	换相方式 1 换相 1 次或换相方式 2 换相 2 次
				I_A 、 I_B 与 U_{AB}	换相方式 2 换相 1 次或换相方式 1 换相 2 次

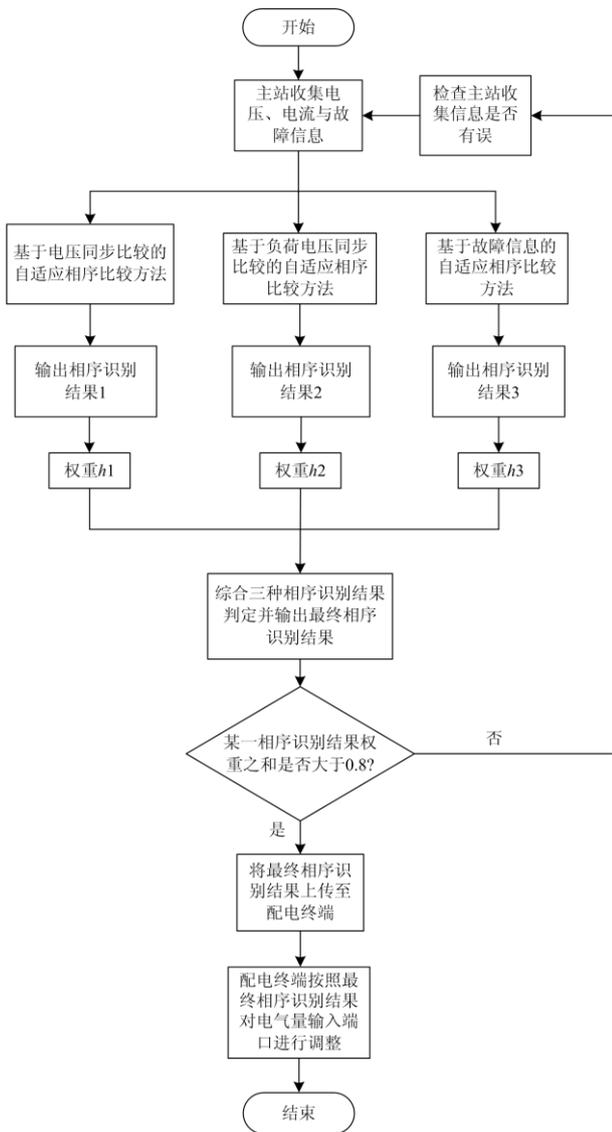


图 7 自适应相序识别方法流程图

Fig. 7 Flowchart of adaptive phase sequence identification method

表 7 三种相序识别方法的权重分配

Table 7 Weight allocation of three-phase sequence identification methods

相序识别方法	权重
基于电压同步比较的自适应相序识别方法	0.6
基于相电流同步比较的自适应相序识别方法	0.2
基于故障信息同步比较的自适应相序识别方法	0.2

3 互感器反接情况下的自适应相序识别方法

电流互感器是继电保护系统中最常用的一次系统与二次系统之间的联络装置。但实际工程应用中,对于电流互感器接线的极性关系无明确的标准与要

求^[27],由于安装人员的误操作或二次接线不规范等原因,极易出现互感器极性反接的问题,当电网人员运维与定期检修时,调整配电终端的相关接线还可能导致极性反复。

工程应用中实现故障测距电压的根本是利用测量点与故障点之间的线路压降,当互感器极性反接时易导致故障测距结果线路压降计算结果与实际不符,进而导致故障测距失败,以上问题往往需要现场人员解决,这并非易事,互感器反接问题已成为影响故障测距可靠性的关键问题。

已知三相互感器均反接与未反接三相相量关系一致。由图 8 可知,以 A 相作为反接相与未反接相为例,三相电压互感器中某一相互感器反接与某两相互感器反接的相电压与线电压的相序(次序)超前关系一致,均为 B 相超前 A 相 60°(120°),A 相超前 C 相 60°(120°)。

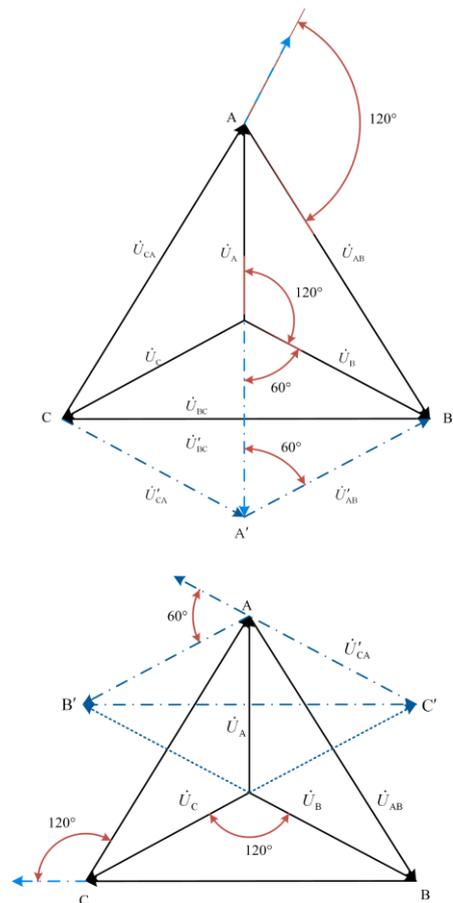


图 8 互感器反接时三相相量图

Fig. 8 Three-phase vector diagram under the reverse connection of transformer

当配置有故障测距功能的配电终端投入使用时,计算其采集的线电压与相电压的相角并比较其

超前关系, 由上述分析可知, 当配电终端识别出互感器存在反接问题后, 仅需将反接相采样数据软件自动取反即可。

4 仿真分析

4.1 仿真模型

图 9 为在 EMTP-ATP 中搭建的电压等级为 10 kV 的谐振接地系统仿真模型。该模型中 G 为无穷大电源, 变压器中性点经消弧线圈与阻尼电阻接地。馈线采用架空馈线与架空线-电缆混合线路 2 种线路组成。架空馈线 L1=30 km; 线-缆混合馈线 L2=7 km, 其中架空馈线 4 km, 电缆线路 3 km; 线-缆混合馈线 L3=7 km, 其中架空馈线 6 km, 电缆线路 1 km; 线-缆混合馈线 L4=3 km, 其中架空馈线 1 km, 电缆线路 2 km; 线-缆混合馈线 L5=4 km, 其中架空馈线 0.5 km, 电缆线路 3.5 km; 图 9 的仿真模型中, 两配电终端安装于 L1 馈线, 间隔为 10 km 架空线路。当线路换相 2 次时, 两线路换相单元中由一段长度为 10 km 的架空线路连接。

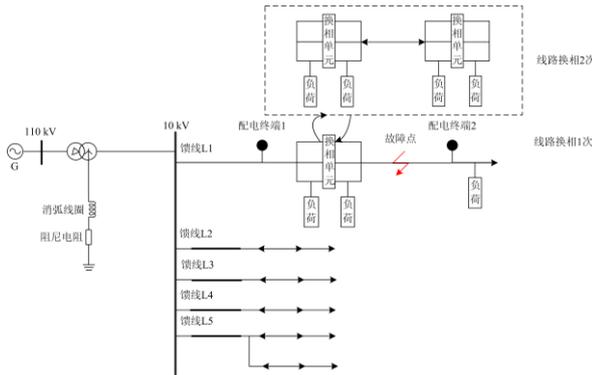


图 9 仿真模型示意图

Fig. 9 Diagram of simulation model

4.2 仿真结果分析

图 10—图 12 分别给出理想状态下, 按照线路换相方式 1 换相 1 次与 2 次时, 两配电终端的相电流、相电压以及线电压波形图。

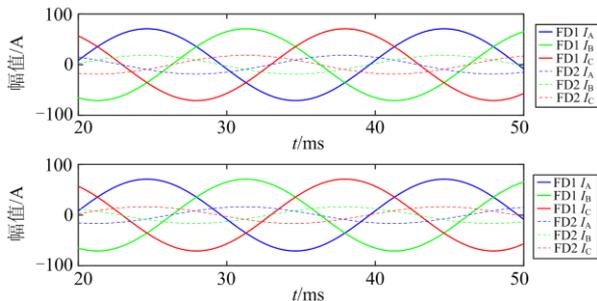


图 10 理想状态下两配电终端相电流波形图

Fig. 10 Phase current waveform of two distribution terminals

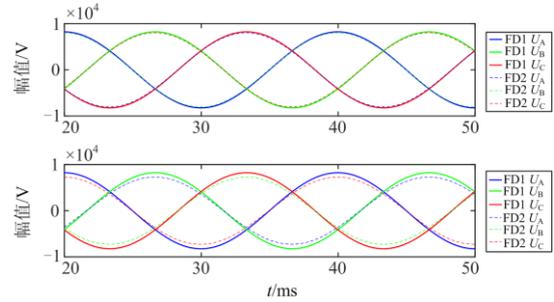


图 11 理想状态下两配电终端相电压波形图

Fig. 11 Phase voltage waveform of two distribution terminals under ideal conditions

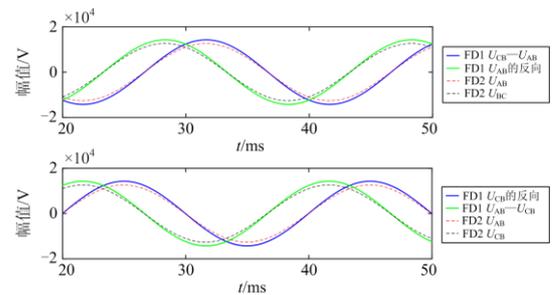


图 12 理想状态下两配电终端线电压波形图

Fig. 12 Line voltage waveform of two distribution terminals under ideal conditions

如图 10—图 12 所示, 当三相负荷平衡时, 相对位置为前置位的配电终端 1 的相电流幅值大于配电终端 2, 相电压与线电压的幅值差异较小。

4.3 方法适用性分析

4.3.1 同步对时误差的影响

实际工程应用中, 配电终端的同步对时误差普遍在 10 μs~1 ms 之间^[28-30], 为验证本文所提方法的可靠性, 考虑极端情况即同步对时误差为 1 ms(工频相角角度为 18°; 配电终端采样频率为 10 kHz/s 时, 共 100 个采样点), 本文所提方法能否给出正确的相序识别结果。图 13—图 15 给出考虑 1 ms 的同步对时误差, 按照线路换相方式 1 换相 1 次与 2 次时两配电终端的相电流、相电压以及线电压波形图。

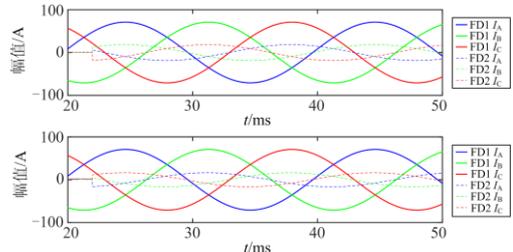


图 13 1 ms 同步误差时两配电终端相电流波形图

Fig. 13 Phase current waveform of two distribution terminals at 1 ms synchronization error

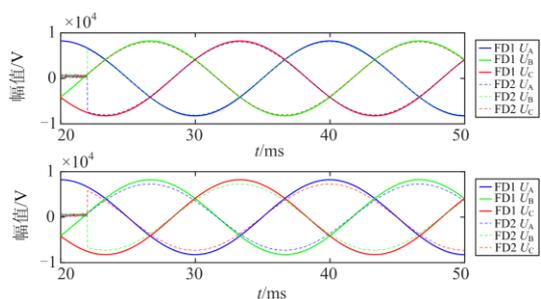


图 14 1 ms 同步误差时两配电终端相电压波形图

Fig. 14 Phase voltage waveform of two distribution terminals at 1 ms synchronization error

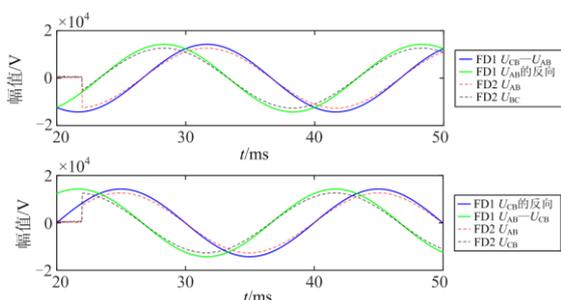


图 15 1 ms 同步误差时两配电终端线电压波形图

Fig. 15 Line voltage waveform of two distribution terminals at 1 ms synchronization error

4.3.2 噪声干扰的影响

配电线路的电压与电流信号经互感器进入配电终端, 通过 A/D 变换后加以利用, 这一采样过程易引入噪声干扰^[31]。图 16—图 18 给出考虑强度为 20 dB 噪声干扰, 按照线路换相方式 1 换相 1 次与 2 次时两配电终端的相电流、相电压以及线电压波形图。

4.3.3 沿线路分布负荷的影响

考虑到安装成本等问题, 配置有故障测距功能的配电终端往往安装在主干线路或分支线路首末两端, 当两配电终端保护区内存在不平衡负荷时, 其采集的电压与电流信息量可能存在差异。为验证这一因素对本文所提方法的影响, 将仿真模型中沿线

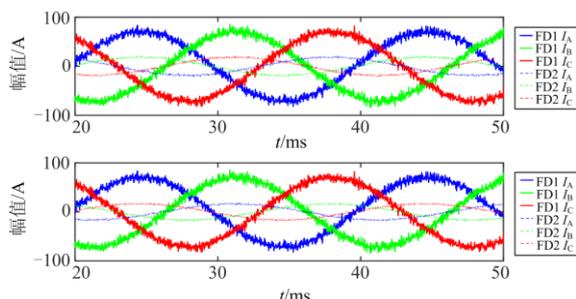


图 16 20 dB 噪声干扰时两配电终端相电流波形图

Fig. 16 Phase current waveform of two distribution terminals under 20 dB noise interference

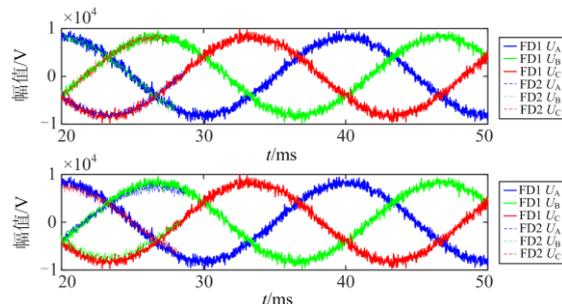


图 17 20 dB 噪声干扰时两配电终端相电压波形图

Fig. 17 Phase voltage waveform of two distribution terminals under 20 dB noise interference

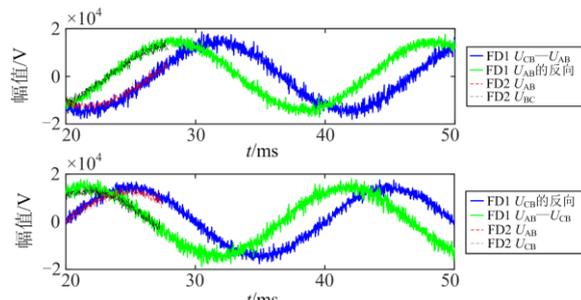


图 18 20 dB 噪声干扰时两配电终端线电压波形图

Fig. 18 Line voltage waveform of two distribution terminals under 20 dB noise interference

路分布负荷调整为三相不平衡线性负荷, 并在母线侧加入谐波源, 其中三次谐波电压与电流含量为 10%, 五次谐波电压与电流含量为 5%。

图 19—图 21 给出考虑负荷不平衡与系统谐波源, 按照线路换相方式 1 换相 1 次与 2 次时两配电终端的相电流、相电压以及线电压波形图。

表 8 给出了考虑不同情况下, 两配电终端电压与电流信息量固定时间窗内相角差与相似系数的计算结果。由表 8 可知, 仿真结果均满足判据, 可有效实现换相后的相序识别, 验证了本文所提方法的正确性与适用性。

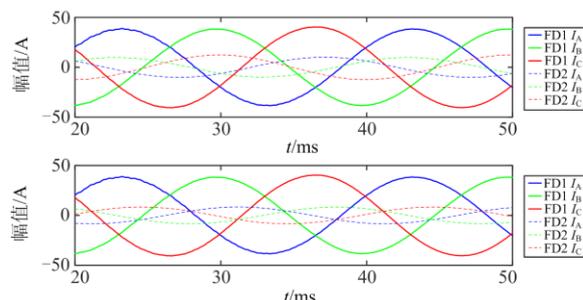


图 19 存在不平衡负荷和谐波时两配电终端相电流波形图

Fig. 19 Phase current waveform of two distribution terminals in the presence of unbalanced loads and harmonics

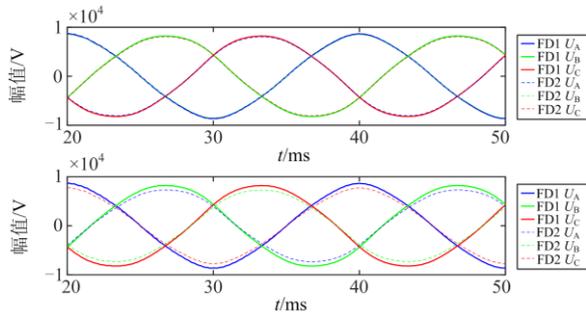


图 20 存在不平衡负荷和谐波时两配电终端相电压波形图
Fig. 20 Phase voltage waveform of two distribution terminals in the presence of unbalanced loads and harmonics

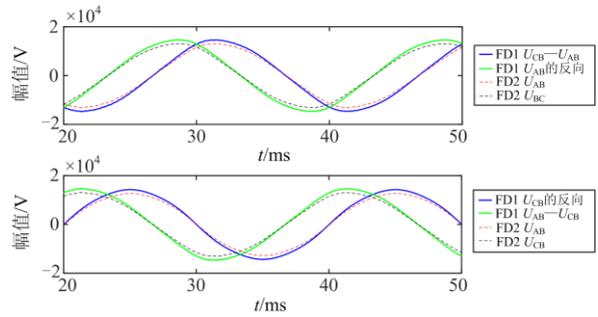


图 21 存在不平衡负荷和谐波时两配电终端线电压波形图
Fig. 21 Line voltage waveform of two distribution terminals in the presence of unbalanced loads and harmonics

表 8 仿真波形的相似系数与相角差计算

Table 8 Calculation of similarity coefficient and phase difference of simulation waveform

换相次数	物理量	理想状态		考虑同步对时误差影响		考虑噪声干扰影响		考虑沿线分布负荷影响	
		相似系数	相角差/(°)	相似系数	相角差/(°)	相似系数	相角差/(°)	相似系数	相角差/(°)
换相一次	\dot{U}_{C1} 与 \dot{U}_{A2}	0.99	-0.42	0.97	2.62	0.99	-0.46	0.98	3.47
	\dot{U}_{A1} 与 \dot{U}_{B2}	0.99	-0.42	0.96	-2.03	0.98	-0.59	0.96	-1.38
	\dot{U}_{B1} 与 \dot{U}_{C2}	0.99	-0.42	0.97	-1.86	0.97	-0.27	0.92	-1.04
	\dot{U}_{AB1} 与 \dot{U}_{CB2}	-0.99	179.59	-0.98	176.64	-0.92	178.45	0.94	177.31
	$\dot{U}_{AB1} - \dot{U}_{CB1}$ 与 \dot{U}_{AB2}	-0.99	176.56	-0.95	178.03	-0.98	179.63	-0.93	177.13
	\dot{i}_{C1} 与 \dot{i}_{A2}	0.99	-0.65	0.93	-3.13	0.96	-1.06	0.84	9.26
	\dot{i}_{A1} 与 \dot{i}_{B2}	0.99	-0.65	0.92	1.31	0.97	-0.49	0.90	-4.56
换相两次	\dot{i}_{B1} 与 \dot{i}_{C2}	0.99	-0.64	0.94	-0.11	0.95	-0.64	0.91	2.11
	\dot{U}_{B1} 与 \dot{U}_{A2}	0.99	-0.45	0.95	-1.86	0.96	-0.22	0.91	-1.08
	\dot{U}_{C1} 与 \dot{U}_{B2}	0.99	-0.45	0.97	2.63	0.94	-0.29	0.93	3.46
	\dot{U}_{A1} 与 \dot{U}_{C2}	0.99	-0.45	0.99	-2.08	0.94	-0.91	0.86	-1.34
	\dot{U}_{CB1} 与 \dot{U}_{AB2}	-0.99	179.55	-0.96	180.98	-0.93	178.69	0.94	181.79
	$\dot{U}_{AB1} - \dot{U}_{CB1}$ 与 \dot{U}_{CB2}	0.99	-0.45	0.96	0.66	0.91	-0.93	0.93	1.46
	\dot{i}_{B1} 与 \dot{i}_{A2}	0.99	-2.47	0.94	-2.09	0.98	-2.31	0.84	-351.64
	\dot{i}_{C1} 与 \dot{i}_{B2}	0.99	-2.47	0.91	-4.56	0.96	-2.63	0.90	4.25
\dot{i}_{A1} 与 \dot{i}_{C2}	0.99	-2.47	0.92	-0.67	0.97	-2.33	0.91	4.83	

5 结论

本文所提方法从两配电终端保护区内线路换相引发的终端采集信息量差异出发，利用配电终端采集电压电流信息量的相似性与故障信息的对应性差异，实现了自适应相序识别，为故障测距的应用提供了条件。

该方法首先计算两配电终端之间线电压、相电压与相电流相似系数、相角关系以及故障告警信息的对应关系，其次将上述对应关系与预设文件，即终端采集信息量与故障信息差异量表进行对照即可实现相序识别。为提高本文所提方法的适用性，考虑了互感器反接对其的影响，给出了仅需将反接相

采样数据软件自动取反的调整方案。

该方法自动化水平较高，计算量小且自适应性较强，无需人工配置与外接装置即可检测配电终端采集信息量的相序，同时避免了互感器反接导致的故障测距失败的问题。仿真数据验证了本文所提方法具有较高的可靠性与适用性。

参考文献

- [1] 徐丙垠, 李天友, 薛永端. 配电网继电保护与自动化 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
- [2] 梁栋, 徐丙垠, 王鹏玮. 10 kV 架空导线单相触树接地故障检测方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(14): 149-157. LIANG Dong, XU Bingyin, WANG Pengwei. Detection

- method for tree-contact single-phase-to-ground fault of 10 kV overhead line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(14): 149-157.
- [3] 周鹏, 刘伟博, 王交通, 等. 基于综合内积变换的小电阻接地系统高阻故障检测方法[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(9): 70-76.
ZHOU Peng, LIU Weibo, WANG Jiaotong, et al. A high impedance fault detection method of small resistance grounding system based on integrated inner product transformation[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(9): 70-76.
- [4] 李福志, 郑卫宾, 张文海, 等. 基于回路直流电阻测量的输电线路单相接地故障离线故障定位[J]. 中国电力, 2021, 54(2): 140-146.
LI Fuzhi, ZHENG Weibin, ZHANG Wenhai, et al. Fault path direct-current resistance based off-line single-phase-to-ground fault location[J]. Electric Power, 2021, 54(2): 140-146.
- [5] 陈燕擎, 刘涛, 韩文建, 等. 考虑配电网分布式零序电流关系的单相接地故障定位[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(22): 118-126.
CHEN Yanqing, LIU Tao, HAN Wenjian, et al. Single-phase-to-earth fault location in distribution networks considering the distributed relations of the zero-sequence currents[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(22): 118-126.
- [6] DENG Feng, ZENG Xiangjun, PAN Lanlan. Research on multi-terminal traveling wave fault location method in complicated networks based on cloud computing platform[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 199-210.
- [7] SHI Shenxing, LEI Aoyu, HE Xin, et al. Traveling waves-based fault location scheme for feeders in power distribution network[J]. The Journal of Engineering, 2018, 38(15): 1326-1329.
- [8] 唐金锐, 尹项根, 张哲, 等. 配电网故障自动定位技术研究综述[J]. 电力自动化设备, 2013, 22(5): 7-13.
TANG Jinrui, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Survey of fault location technology for distribution networks[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 35(5): 7-13.
- [9] WANG D, PSARAS V, EMHEMED A A S, et al. A novel fault let-through energy based fault location for LVDC distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(2): 966-974.
- [10] 夏经德, 张向聪, 黄新波, 等. 基于纵向阻抗的双端量故障测距新算法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(10): 133-139.
XIA Jingde, ZHANG Xiangcong, HUANG Xinbo, et al. Fault locating based on longitudinal impedance according to dual-terminal variables[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(10): 133-139.
- [11] 夏经德, 索南加乐, 王莉, 等. 基于纵连阻抗幅值的输电线路纵连保护[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(4): 43-51.
XIA Jingde, SUONAN Jiale, WANG Li, et al. A transmission line pilot protection based on the amplitude of the impedance[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(4): 43-51.
- [12] 付华, 刘公权, 邢亮. 基于同步挤压小波变化的故障行波测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(2): 18-24.
FU Hua, LIU Gongquan, XING Liang. Fault traveling wave ranging method based on synchrosqueezing wavelet transform[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(2): 18-24.
- [13] 闫红艳, 高艳丰, 王继选, 等. 同杆双回线路行波测距的关键技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(4): 120-128.
YAN Hongyan, GAO Yanfeng, WANG Jixuan, et al. Research on key problems of traveling wave location of double-circuit lines on the same tower[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(4): 120-128.
- [14] 束洪春, 鄂乾晋, 张广斌, 等. 神经网络的单端行波故障测距方式[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(4): 85-92.
SHU Hongchun, WU Qianjin, ZHANG Guangbin, et al. Single terminal traveling wave fault location method based on ANN[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(4): 85-92.
- [15] 夏远洋, 李啸骢, 陈飞翔, 等. 基于 FastICA 的输电线路行波故障测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(1): 138-143.
XIA Yuanyang, LI Xiaocong, CHEN Feixiang, et al. FastICA based traveling wave fault location algorithm for transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(1): 138-143.
- [16] 段宽, 樊艳芳, 王永进, 等. 基于波速补偿故障距离逐步逼近的直流线路行波测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(11): 70-78.
DUAN Kuan, FAN Yanfang, WANG Yongjin, et al. A traveling wave ranging method for a DC line based on wave velocity compensation and fault distance approaching its real value gradually[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(11): 70-78.
- [17] 李自乾, 樊艳芳, 胡剑生. 不受波速影响的特高压直流输电线路单端故障测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(18): 142-148.
LI Ziqian, FAN Yanfang, HU Jiansheng. Single terminal fault location method of UHVDC transmission line immune to wave speed[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(18): 142-148.

- [18] 赵冠琨, 贾科, 陈金锋, 等. 基于断路器重合闸的柔性直流输电线路单端故障测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(7): 48-56.
ZHAO Guankun, JIA Ke, CHEN Jinfeng, et al. A single terminal fault location method for a DC transmission line based on circuit breaker reclosing[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(7): 48-56.
- [19] LEI Aoyu, DONG Xinzhou, WANG Bin, et al. A novel current travelling wave based single-ended fault location method for locating single-phase-to-ground fault of transmission line[C] // 2015 50th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), September 1-4, 2015, Stoke on Trent, UK: 1-6.
- [20] ZHAO Jianwen, DUAN Jiixin. Traveling wave fault location for lines combined with overhead-lines and cables based on empirical wavelet transform[C] // 2019 IEEE 2nd International Conference on Electronics and Communication Engineering (ICECE), December 9-11, 2019, Xi'an, China: 285-289.
- [21] LEE Y, CHAO C, LIN T, et al. A synchrophasor-based fault location method for three-terminal hybrid transmission lines with one off-service line branch[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(6): 3249-3251.
- [22] 杨亚超, 黄纯, 江亚群, 等. MMC-HVDC 输电线路双端非同步故障测距方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(16): 148-154.
YANG Yachao, HUANG Chun, JIANG Yaqun, et al. Two-terminal asynchronous fault location method for MMC-HVDC transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(16): 148-154.
- [23] 张保会, 尹向根. 电力系统继电保护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2018.
- [24] 李振兴, 吴李群, 谭洪, 等. 基于简单通信的双端行波测距新方法[J]. 中国电力, 2018, 51(3): 74-79.
LI Zhenxing, WU Liqun, TAN Hong, et al. A novel method for double terminal traveling wave fault location based on simple communication[J]. Electric Power, 2018, 51(3): 74-79.
- [25] 林志淳, 沈煜, 杨帆, 等. 基于数据关联分析的低压配电网拓扑识别方法[J]. 电测与仪表, 2020, 57(18): 5-11.
YANG Zhichun, SHEN Yu, YANG Fan, et al. Topology identification method of low voltage distribution network based on data association analysis[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(18): 5-11.
- [26] 韩国政, 李镇宇, 董霞, 等. 利用工频电压信号的配电终端时钟同步方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(24): 181-186.
HAN Guozheng, LIU Zhenyu, DONG Xia, et al. Clock synchronization method of feeder terminal unit using power frequency voltage signal[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(24): 181-186.
- [27] 潘本仁, 宋华茂, 张秋凤, 等. 小电流接地故障无功功率分析及选线新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(14): 51-56.
PAN Benren, SONG Huamao, ZHANG Qiufeng, et al. Reactive power analysis and novel faulty selection method in resonant grounding system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(14): 51-56.
- [28] 童宁, 范理想, 林湘宁, 等. 不依赖边界元件及同步对时的多端柔直电网波形匹配式差动保护原理[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(13): 3820-3833.
TONG Ning, FAN Lixiang, LIN Xiangning, et al. Waveform matching based protection strategy for VSC-MTDC independent on synchronization and boundary component[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(13): 3820-3833.
- [29] 刘永欣, 易永辉, 陶永健, 等. 智能变电站过程层网络同步对时方案优化[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(10): 112-116.
LIU Yongxin, YI Yonghui, TAO Yongjian, et al. Synchronous optimization scheme of smart substation process level network[J]. Automation of Electric Power System, 2015, 39(10): 112-116.
- [30] 赵忠明, 韩亮, 胡炯, 等. 电力系统 SDH 网络非对称路径 PTP 对时策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(9): 150-157.
ZHAO Zhongming, HAN Liang, HU Jiong, et al. PTP strategy for asymmetric path in the SDH network of a power system[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(9): 150-157.
- [31] 李佳玮, 王小君, 和敬涵, 等. 基于图注意力网络的配电网故障定位方法[J]. 电网技术, 2021, 45(6): 2113-2121.
LI Jiawei, WANG Xiaojun, HE Jinghan, et al. Distribution network fault location based on graph attention network[J]. Power System Technology, 2021, 45(6): 2113-2121.

收稿日期: 2021-07-10; 修回日期: 2021-09-10

作者简介:

陈恒(1985—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为配电网继电保护及其自动化; E-mail: ichenheng@163.com

王鹏玮(1996—), 男, 通信作者, 硕士, 研究方向为配电网继电保护及其自动化与电力线路故障监测; E-mail: wpwsdut@163.com

徐丙垠(1961—), 男, 博士, 博士研究生导师, 教授, 研究方向为配电网继电保护及其自动化与电力线路故障监测。E-mail: xubp@vip.163.com

(编辑 许威)