

# 配电网单相接地故障选线典型方法实验研究

姜 博,董新洲,施慎行

(清华大学 电机系 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室,北京 100084)

**摘要:** 为验证小电流接地配电系统中各种单相接地故障选线方法的性能,利用暂态行波保护测试仪、宽频功率放大器和自行开发的小电流接地选线装置搭建了测试平台,模拟了不同故障条件和线路结构下的故障,对几种典型的选线方法进行了测试实验,并给出了不同选线方法的有效域。结果表明,所搭建的测试平台能够有效进行选线方法实验;行波选线法优势明显,但在分支线路故障或较小故障初相角条件下可靠性降低;暂态信号选线法在较大过渡电阻或较小故障初相角条件下可靠性降低。行波选线法和暂态信号选线法结合可提高选线可靠性。

**关键词:** 故障选线; 配电; 中性点非有效接地; 单相接地故障; 行波; 暂态; 实验

**中图分类号:** TM 77

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.11.011

## 0 引言

中性点非有效接地系统的单相接地故障选线问题尚未彻底解决,目前已有多种方法被提出,按照所使用的信号频带不同,分为行波法、暂态法和工频法。其中,行波选线法<sup>[1-2]</sup>以其不受中性点接地方式、故障距离、网络结构等因素影响的特点,具有良好的选线效果。单相接地故障所产生的暂态量远大于稳态量<sup>[3-6]</sup>,暂态选线法如暂态电流比幅比相法<sup>[7]</sup>、暂态能量法<sup>[8]</sup>、暂态无功功率法<sup>[9]</sup>、首半波法<sup>[10]</sup>等方法,亦被广泛提出。但暂态法属于基于模型的方法,与网络结构参数、故障过渡电阻等因素有很大关系,因此仍有很大的改进余地。工频法<sup>[11]</sup>所使用的工频信号幅值通常很小,选线效果受到很大影响,已不再被广泛使用。

目前所报道的大多数选线方法,在一般性强故障下均具有较为良好的仿真结果。然而,现场反馈信息反映出现有装置的选线结果并不太理想。此外,现有的典型选线方法缺乏统一的实验测试标准方法,各选线方法有效范围也并不明晰。因此,有必要构造能够模拟现场工况的测试平台,测试各种典型的选线方法在不同故障条件和线路结构下的性能,从而确定选线方法的有效范围。

文献[12]首先提出了行波选线的试验方法,但仅针对金属性接地与 100 Ω 过渡电阻、两相配置互感器等有限几种条件;文献[13]给出了行波选线在现场的实验结果;文献[14]给出了行波选线的 RTDS 测试方法,但由于 RTDS 试验系统的采样率有限,未能有效产生行波选线所需的全部高频信号。关于暂

态选线法,则尚无关于实验方法的报道。总体而言,现有研究工作尚未能明确提出小电流选线方法的系统性测试方法。

本文将在文献[12]的基础上,充分利用暂态行波测试仪的良好高频传变性能,设计并构建选线方法的测试平台,对典型选线方法进行全面测试,最后给出不同选线方法有效域的计算方法,为下一步的多方法融合选线研究提供了实验参考。

## 1 实验系统

### 1.1 测试系统的搭建

由于继电保护装置测试通用的实时数字仿真仪 RTDS(Real Time Digital Simulator)的仿真步长往往在 50 μs 左右,且功率放大器的截止频率也低于 100 kHz,难以给出装置需要的行波信号。因此本文采用课题组自主研制的 TPTP-01 暂态行波保护测试仪<sup>[15-16]</sup>、功率放大器和选线装置 SL-02 搭建了选线测试平台。

测试平台以 ATP/EMTP 仿真软件的输出数据 PL4 文件为数据源,仿真模型如图 1 所示,仿真步长为 1 μs;利用暂态行波保护测试仪,将仿真数据等比再现为最大幅值为双极性 5 V 的模拟信号,并利用功率放大器将模拟信号放大,来模拟实际电力系统互感器二次侧的电流、电压。电流功率放大器的放大倍数为 10,电压功率放大器的放大比例为 1V:30V。故测试系统电压输出信号的幅值范围为 0~150 V,电流输出信号的幅值范围为 0~50 A。由此,电流、电压功率放大器的输出端即为测试系统再现出的电力系统电流和电压经过电流互感器和电压互感器后输出的二次侧故障信息。最后,将模拟的二次侧电流电压输入自行研制的小电流接地选线装置中。测试流程如图 2 所示。用于进行选线方法实验的自行开发

收稿日期:2014-12-17;修回日期:2015-10-14

基金项目:国家自然科学基金重大国际合作项目(51120175001)

Project supported by Major International Cooperation Projects of the National Natural Science Foundation of China(51120175001)

的选线装置采样率为 500 kHz,可在故障前后至少录波 21 ms。

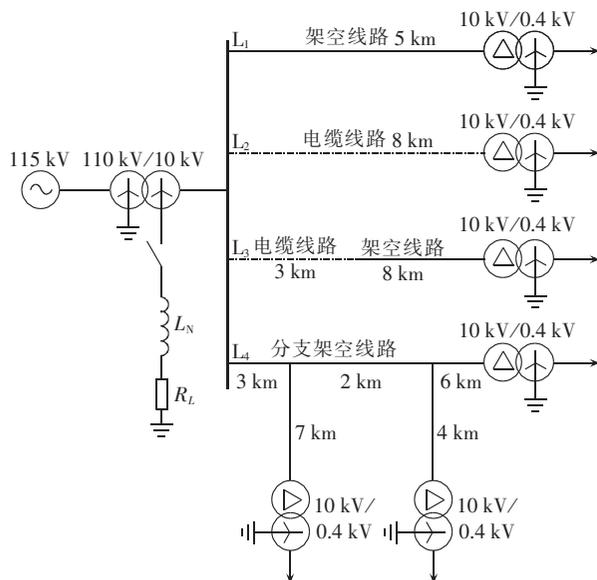


图 1 用于测试的仿真模型

Fig.1 Simulation model for test

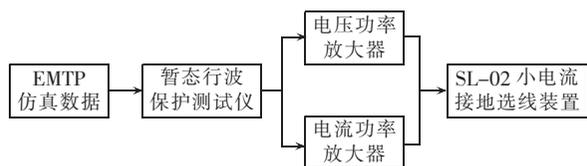


图 2 测试系统图

Fig.2 Schematic diagram of test system

故障仿真模型采用如文献[17]所示的 10 kV 的 4 馈线配电系统,包括 1 条架空线路、1 条电缆线路、1 条线缆混合线路和 1 条分支线路,用于全面分析不同故障条件、线路结构下的选线效果。架空线路和电缆线路参数分别如表 1、2 所示。

表 1 架空线路参数

Table 1 Parameters of overhead line

相序	电阻/( $\Omega \cdot \text{km}^{-1}$ )	电容/( $\mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1}$ )	电感/( $\text{mH} \cdot \text{km}^{-1}$ )
零序	0.23	0.0060	5.4749
正序	0.17	0.0097	1.2096

表 2 电缆线路参数

Table 2 Parameters of cable line

相序	电阻/( $\Omega \cdot \text{km}^{-1}$ )	电容/( $\mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1}$ )	电感/( $\text{mH} \cdot \text{km}^{-1}$ )
零序	2.700	0.280	1.019
正序	0.270	0.339	0.255

为简便起见,所有线路的负荷采用折算到 10 kV 侧的  $100 + j20 \Omega$  阻抗来模拟。消弧线圈补偿度取 8%,由线路参数求出系统对地分布电容  $C_{\Sigma}$ ,进而可计算出消弧线圈等效电感  $L_N$ :

$$L_N = 1 / 1.08 \times 1 / (3\omega^2 C_{\Sigma}) = 0.9505 (\text{H}) \quad (1)$$

其中,  $\omega = 2\pi f$  为角频率,  $f$  为信号频率。

消弧线圈的有功损耗取为感性损耗的 3%,算得

$$R_L = 0.03 \omega L = 8.9584 (\Omega).$$

## 1.2 测试系统的高频特性

传统的继电保护测试仪如 ONLY 测试仪等,更注重工频信号的传变性能,最高只能放出 1 kHz 左右的高频信号,其频带对于行波测试远远不够。而若干能够播放出高频信号的测试仪,其功放功率又过小。本测试系统相比其他测试系统的优势在于,具有良好的高频特性。所采用的本课题组自行开发的 TPTP-01 暂态行波保护测试仪与功率放大器组成的测试系统能够良好传变频率最高 120 kHz、幅值最高 50 A 的电流模拟信号<sup>[15-16]</sup>。该测试系统已成功应用于中国电科院、许继集团和南方电网的行波测试中,其高频特性优于 RTDS 测试系统和其他离线测试系统,可以专门用来测试行波选线与暂态选线的各类方法。

基于图 1 仿真模型的典型单相接地故障零序电流仿真结果与测试系统输出结果对比如图 3 所示。二者用于暂态分析频带的幅频分析结果如图 4 所示,可见本测试系统的暂态幅频特性良好,能够有效进行各类暂态选线法的实验。由文献[18]知,本测试系统对于初始行波波头的传变具有良好的高频特性,能够有效进行行波选线法的实验。综上,本测试系统的高频特性良好,对于初始行波与暂态过程均具有良好的复现性能,是进行选线实验的理想实验系统。

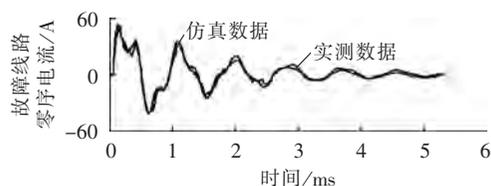


图 3 仿真波形与测试系统输出波形对比图

Fig.3 Comparison between simulation waveform and output waveform of test system

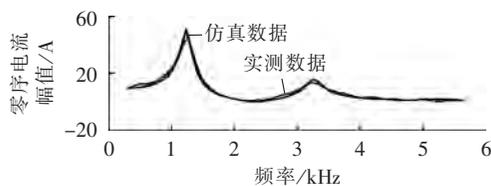


图 4 仿真与测试系统输出波形暂态幅频特性对比图

Fig.4 Comparison of transient amplitude-frequency characteristic between simulation waveform and output waveform of test system

## 1.3 测试方法

为了尽可能模拟现场可能出现的各种运行工况,本文在选线测试平台上采用以下方案进行测试。通过修改仿真模型中的关键参数,如过渡电阻、故障初相角、故障距离、线路结构,生成相应的测试仪输

入文件,利用测试系统进行故障复现。同时,通过修改选线装置监控板中的选线算法软件程序,实现对不同选线方法的测试。测试项目包括 4 项。

- a. 过渡电阻:1~600  $\Omega$ ,间隔 10  $\Omega$ 。
- b. 故障初相角:0~90°,间隔 5°。
- c. 故障距离:以 1 km 为间隔,从线路首端故障起,到线路末端止。
- d. 线路结构:纯架空线路、纯电缆线路、分支架空线路、线缆混合线路。

所述实验针对上述 4 项条件对选线方法性能的影响进行测试,并针对两大类选线方法(行波法、暂态法)进行实验,其中暂态法中细分为 5 种不同的选线判据,以便全面分析暂态法的综合性能。上述系统化的选线测试方法可以普遍用于各类选线方法的性能测试实验中。

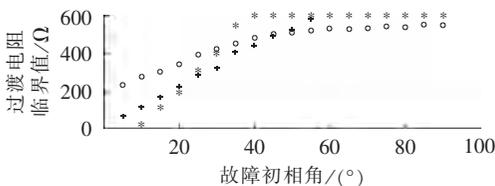
## 2 行波选线法测试实验

### 2.1 方法介绍与实验结果

行波选线的核心思想是,故障线路的故障电流初始波头幅值大于健全线路,且极性与健全线路相反。初始波头大于阈值是行波选线装置启动的必要条件。根据文献[19]给出的初始行波计算方法知,影响初始波头幅值的因素为故障初相角、线路波阻抗、过渡电阻、母线结构、电流互感器变比等。为了测试行波选线法性能,在测试平台上进行了多次实验,模拟了一次侧零序电流互感器的变比为 50 A:5 A,且过渡电阻、线路类型、故障初相等因素变化时行波选线法的选线效果。

#### 2.1.1 行波选线法与过渡电阻、线路类型关系的实验研究

分别在不同故障初相角、过渡电阻、故障距离的故障条件下,进行架空线路和电缆线路故障实验,在不同故障初相角下,行波选线法可抗的最大过渡电阻值如图 5 所示。架空线路 1 km 处故障时,当故障初相角为 10°以下时,装置不启动。当电缆 1 km 处故障时,由于电缆波阻抗(60  $\Omega$  左右)远小于架空线路波阻抗(950  $\Omega$  左右),电流行波幅值远大于架空线路故障电流行波幅值,因此,在故障初相角接近 0°



\*架空线路 1 km 处故障,+电缆 1 km 处故障  
o 架空线路 0.01 km 处故障

图 5 架空线路与电缆线路故障时行波选线法结果  
Fig.5 Results of faulty line selection based on travelling wave for overhead line and cable line

时,装置仍然能够启动。当架空线路 0.01 km 处故障时,由于初始与后续行波大量叠加,使得初始波头幅值急剧增加。原则上,故障初始行波幅值不随故障距离的变化而变化;但算法实现时,由于装置采样率不可能无限高,实际采得的故障行波初始波头幅值远大于理论值。因此,在故障初相角接近 0°时,装置仍然能够启动。

#### 2.1.2 分支线路存在时的行波选线实验

分支线路上的分支点是阻抗不连续点,行波波头将发生折反射,波头幅值进一步减小,本实验分析了架空线路的分支线路上故障对行波选线法的影响,图 1 中线路 L<sub>4</sub> 的第 2 个分支点后 1 km 处发生单相接地故障,在不同故障初相角下,行波选线法可抗的最大过渡电阻值如图 6 所示。由于架空线路本身波阻抗较大,电流行波幅值远小于电缆线路;当架空线路分支上发生单相接地故障时,行波波头幅值进一步降低,选线死区有所增大。

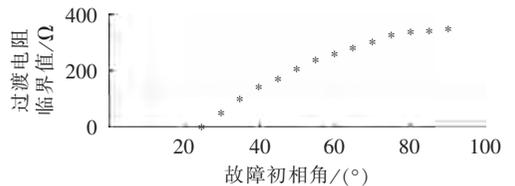


图 6 距母线 2 个分支点后的分支线路故障时行波选线法结果  
Fig.6 Results of faulty line selection based on travelling wave for branch two points away from bus

### 2.2 实验结果分析

通过行波选线法的实验分析,可得以下几点结论。

a. 理论上,只要故障初相角不为 0°,则初始电流行波永远存在,且其存在性不受中性点接地方式、系统运行方式、网络结构、负荷情况、线路结构等因素的影响,选线性能稳定。

b. 行波选线受到故障条件的影响,在较小故障初相角、较大过渡电阻时,初始波头幅值较小,行波选线灵敏度较低;故障距离越小,行波选线灵敏度越高。

c. 行波选线受到线路结构的影响,电缆线路的行波选线灵敏度高于架空线路。分支线路故障时,初始波头较小,行波选线灵敏度有待提高。

d. 行波选线依赖于初始行波的准确获得,并可靠规避后续波头的影响。在实际应用中,常使用阈值对初始行波进行提取,当行波幅值低于阈值时,尽管行波存在,行波选线不启动。因此,如何合理设置行波阈值,并在合适的选线时频窗内进行初始行波的提取是下一步研究的重点。

## 3 暂态选线法测试实验

### 3.1 方法介绍与实验结果

暂态选线法主要利用故障产生的高频暂态信息

进行选线。暂态信息频带范围宽广,内容丰富,但从理论上不易分析。目前暂态选线法主要集中于利用特征频带内的信息进行选线。所谓特征频带,即配电网发生单相接地故障时,故障零序电流常在该频带内出现能量集中的现象,且在该频带内,健全线路呈现容性,而故障线路呈现感性。

本节在暂态选线方法的范畴中,选取了暂态电流幅值法<sup>[7]</sup>、暂态电流相位法<sup>[8]</sup>、暂态能量法<sup>[9]</sup>、暂态无功功率法<sup>[10]</sup>和首半波法<sup>[11]</sup>进行实验研究。上述方法除首半波法外,均需要以特征频带的提取为前提,按照文献<sup>[7]</sup>所述,对谐振接地系统而言,特征频带的下限截止频率常取 4 倍工频,上限截止频率常取 3 kHz。上述方法的判据简述如下。

**a. 暂态电流幅值法:**依据文献<sup>[7]</sup>,利用特征频带内的暂态电流幅值式(2),进行故障选线。

$$I_{0j} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N i_{0jk}^2} \quad (2)$$

其中, $j$ 为线路序号; $k$ 为采样值序号; $N$ 为数据长度。故障线路具有幅值最大的暂态电流。

**b. 暂态电流相位法:**依据文献<sup>[7]</sup>,选定某一条线路  $L_m$  为参考,利用其他线路  $L_j$  与参考线路暂态零序电流在特征频带内的内积  $P_{jm}$  进行选线,判据如式(3)所示。

$$P_{jm} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (i_{0jk} i_{0mk}) \quad (3)$$

**c. 暂态能量法:**依据文献<sup>[8]</sup>,通过求取特征频带内零模电压与零模电流的积分(如式(4)所示),并比较不同线路判据的大小与极性,从而选出故障线路。

$$E_j = \sum_{k=1}^N u_0(k) i_{0j}(k) \quad (4)$$

其中, $E_j$ 为线路能量; $i_{0j}$ 为线路  $L_j$  的零模电流; $u_0$ 为母线零模电压。

**d. 暂态无功功率法:**依据文献<sup>[9]</sup>,通过计算特征频带内无功功率的极性与幅值(如式(5)所示),从而选出故障线路。

$$q_j(t) = i_{0j}(t) du_0(t) / dt \quad (5)$$

**e. 首半波法:**首半波法是最早出现的暂态选线法,它是基于接地故障发生于相电压最大值处这一假设条件而提出的。该方法认为接地发生后的第 1 个暂态半周期内,故障线路零序暂态电流和母线零序电压极性相反<sup>[20]</sup>。判据计算方法如(6)所示。

$$S_j = \text{sgn} \left[ \sum_{k=1}^N i_{0j}(k) \sum_{k=1}^N u_0(k) \right] \quad (6)$$

实验结果如表 3 所示。篇幅所限,表 3 仅示出了线路  $L_1$  1 km 处单相接地故障的测试结果。其中,暂态电流幅值法的实验结果绘制如图 7 所示。可见,在

表 3 典型暂态选线法选线结果  
Table 3 Results of typical faulty line selection based on transient signal

故障初相角/ (°)	过渡电 阻/ $\Omega$	选线结果				
		暂态电流 幅值法	暂态电流 相位法	暂态 能量法	暂态无功 功率法	首半 波法
90	1	√	√	√	√	√
90	100	√	√	√	√	√
90	200	×	×	×	×	×
90	300	×	×	×	×	×
90	400	×	×	×	×	×
45	1	√	√	√	√	√
30	1	√	√	√	√	√
25	1	√	√	√	√	√
20	1	√	√	√	√	√
15	1	√	√	√	√	×
10	1	√	√	×	√	×
5	1	√	√	×	√	×

注:√为选线正确,×为选线错误。

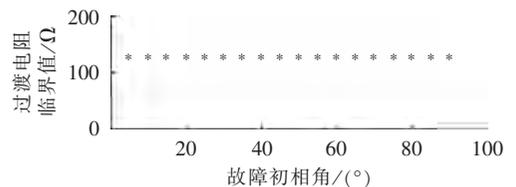


图 7 暂态电流幅值法的选线结果

Fig.7 Results of faulty line selection based on transient current amplitude

低故障初相角且过渡电阻较小时,暂态法能够正确选线;但暂态法对于过渡电阻极为敏感,过渡电阻稍高即会导致暂态衰减振荡分量消失,进入选线死区。

### 3.2 实验结果分析

中性点非有效接地配电网发生单相接地故障后,分布电容在高频暂态下呈现较小的对地阻抗,暂态故障电流能量很大,故障线路与健全线路特征鲜明,在故障选线方面的应用前景良好。暂态选线法性能具体分析如下。

#### 3.2.1 故障条件的影响

##### a. 过渡电阻的影响。

过渡电阻对于暂态过程有着决定性的影响,暂态法所依赖的暂态衰减振荡信息,可以看作故障时刻在故障点加入的故障附加源所产生,其暂态过程实质上是配电网等效  $RLC$  电路列写出的二阶线性微分方程的自由分量。当过渡电阻较大时,故障电流呈现过阻尼特征,暂态衰减振荡分量不存在,取而代之的是衰减直流形式的故障电流,暂态选线法失效。在这一点上,暂态法性能弱于行波选线法。图 8 示出了线路  $L_1$  4 km 处发生故障初相角为  $90^\circ$ 、过渡电阻为  $400 \Omega$  的接地故障时的故障波形。特征频带滤波后的故障波形如图 9 所示。

由图 9 可见,滤波后特征频带内信号含量过低,暂态电流幅值为  $[0.0014, 0.0009, 0.0001, 0]A$ ,仅为

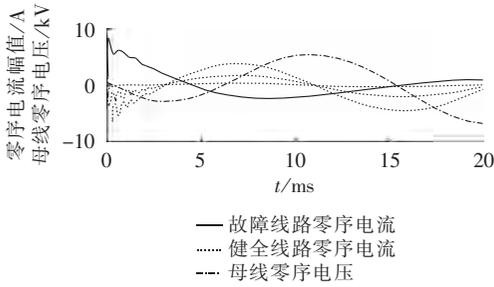


图 8 高阻接地故障下的故障波形

Fig.8 Waveforms of grounding fault with large transition resistance

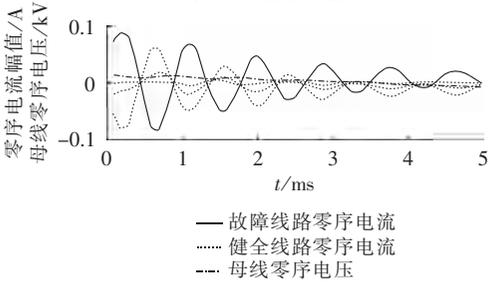


图 9 特征频带滤波后的故障波形

Fig.9 Fault waveforms after SFB filtering

金属性接地情况下的 1/100000。因此,在过渡电阻较大时,暂态信号很弱,暂态选线法可靠性较低。

**b. 故障初相角的影响。**

大量研究表明,在故障初相角较小时,暂态法由于特征频带内信号含量过低而失效。当故障初相角为  $\pm 5^\circ$  时,故障波形如图 10 所示。可见,故障初相角为  $\pm 5^\circ$  时,特征频带内信号含量均很低,不足故障初相角为  $90^\circ$  时的 1/10。特别地,在故障初相角为  $-5^\circ$  时,对于首半波法而言,线路零序电流与母线零序电压的暂态首半波持续时间仅能维持  $400 \mu s$  左右,算法有效时间极短。因此,较小的故障初相角对暂态选线法可靠性带来不利影响。

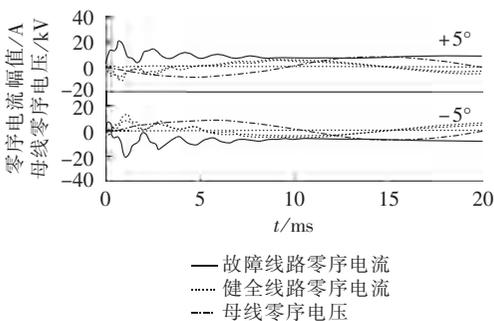


图 10  $\pm 5^\circ$  故障初相角下的故障波形

Fig.10 Faulty waveforms when initial fault phase is  $\pm 5^\circ$

**3.2.2 网络结构的影响**

暂态选线法属于基于模型的选线方法,大多数暂态选线法使用特征频带(SFB)作为提取首容性故障电流的频带,这要求对每条线路的首容性频带进行准确的提取。当线路为线缆混合等复杂线路结构时,首容性频带的提取难度增大。此外,谐振接地系

统中的 SFB 提取由于消弧线圈的加入而更为复杂。一旦特征频带选择不恰当,各条线路之间将不再满足首容性电流的极性规律,从而对选线结果造成不良影响。

尽管暂态首半波法虽不需要提取 SFB,但其首半波电压电流极性维持时间不确定。由图 11 知,电缆与架空线路故障的暂态谐振主频率相差较大,电缆故障时的首半波极性维持时间远远短于架空线路故障。综上,暂态选线法易受网络结构的影响。

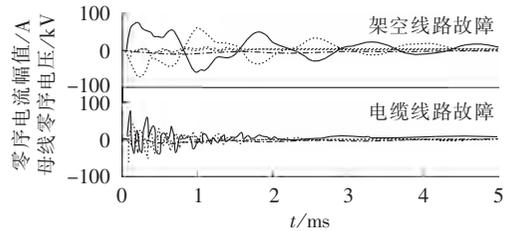


图 11 架空线路与电缆线路故障后特征频率对比

Fig.11 Comparison of characteristic frequency between overhead line and cable line

**4 选线算法有效域的界定**

不同选线方法具有不同的适用范围,以往的选线方法只定性描述适用范围,描述方法较为粗糙。本文采用“有效域”来定量表征各种选线方法能够正确选线的故障集合,以便为不同选线方法的互补研究提供参考。

当过渡电阻较大时,配电网故障电流呈现过阻尼状态,暂态衰减振荡过程完全消失,仅存在行波过程、衰减直流分量和微弱的工频分量。此时,依靠特征频带内故障信息的暂态选线法不适用。而过渡电阻并不会使初始波头消失,只会影响初始波头的幅值。

当故障初相角较小时,电流行波初始波头的幅值严重降低,当其低于启动定值时,行波选线法失效,暂态分量的能量也将变弱。具体分析如下。

**4.1 行波选线法有效域**

只要电流初始行波被正确检测到,行波选线法即有效。因此,电流初始行波幅值大于启动定值的故障,属于行波选线法有效域集合。根据文献[19]对单相接地故障初始电流行波的理论计算,可列写出线路  $L_i$  故障时,行波选线有效域集合元素  $W_i$  如式(7)所示。

$$W_i(\varphi, R_f) \in \left\{ \frac{U_{ph}(1-\beta) \prod_{f=1}^M \alpha_{if} \sin \varphi}{(2Z_1 + Z_0 + 6R_f) A_{factor}} > V_{set1} \right\} \quad (7)$$

其中,  $U_{ph}$  为母线相电压幅值;  $\beta$  为母线反射系数;  $\varphi$  为故障初相角;  $A_{factor}$  为从一次侧到二次侧选线装置前端的通道系数;  $\alpha_{if}$  为线路  $L_i$  从母线到故障点之间第  $f$  个阻抗不连续点的折射系数;  $M$  为线路  $L_i$  从母

线到故障点之间的阻抗不连续点总数;  $V_{set1}$  为行波选线定值, 一般取 400 mA (二次侧)。

#### 4.2 暂态选线法有效域

根据文献[21-23]所述, 单相接地故障时的暂态电流最大幅值约为  $(\omega_0/\omega)I_C$ , 且仅在过渡电阻  $R_f$  与网络等效电阻的和小于网络临界阻尼值  $2\sqrt{L_{tot}/C_{tot}}$  时, 才存在特征频带内的暂态衰减振荡分量。由于网络零模等效电阻通常不超过十几欧姆, 故在列写暂态法有效域时将其忽略。因此, 符合 2 个条件的故障即属于暂态选线方法有效域: ①暂态过程最大幅值大于阈值  $V_{set2}$ ; ②特征频带内的暂态衰减振荡分量存在。列出线路  $L_i$  故障时, 暂态选线法有效域集合元素  $T_i$  如式(8)所示。

$$T_i(\varphi, R_f) \in \left\{ \left( \frac{\omega_0}{\omega} I_C > V_{set2} \right) \cap \left( R_f < 2\sqrt{\frac{L_{tot}}{C_{tot}}} \right) \right\} \quad (8)$$

其中,  $L_{tot}$ 、 $C_{tot}$  分别为馈线  $L_i$  故障情况下, 网络等效电感与电容;  $V_{set2}$  为暂态分量定值;  $\omega_0$  为网络零序电流的共振频率;  $I_C$  为故障后的工频电容电流。

#### 4.3 选线算法有效域的计算实例

根据上述选线方法有效域计算方法, 可得如图 1 所示的网络拓扑结构下线路  $L_1$  故障时, 行波、暂态选线法的有效域, 如图 12 所示。可见, 选线方法有效域的理论计算结果与实验结果(见图 5、图 7、表 3)相吻合。

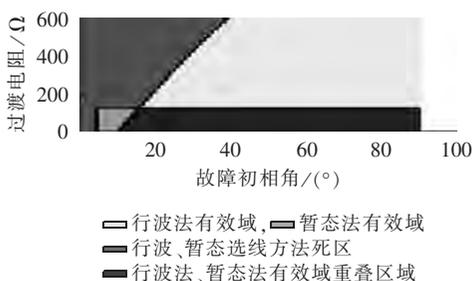


图 12 行波、暂态选线法的有效域计算结果

Fig.12 Calculative validity domains of travelling-wave based method and transient-signal based method

分析有效域理论计算与实验结果知, 当线路分支点较少时, 行波选线法优势明显, 在较大过渡电阻下仍能够正确选线, 但当故障初相角较小时, 初始波头幅值过小, 存在死区。暂态选线法在过渡电阻很小且故障初相角较小时, 性能较其他选线方法更好; 但其对过渡电阻极为敏感, 只能在过渡电阻很小时正确选线, 否则将因过阻尼状态下暂态分量的消失而进入死区。

当线路  $L_4$  距离母线 2 个分支点后的分支线路故障时, 选线方法有效域如图 13 所示。可见, 当故障点与母线之间存在分支点时, 行波法有效域将缩小, 而暂态法的有效域则基本不受影响。

可见, 不同线路结构下, 行波法与暂态法的有效

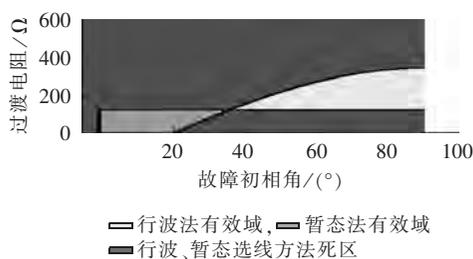


图 13 行波、暂态选线法的有效域计算结果

Fig.13 Calculative validity domains of travelling-wave based method and transient-signal based method

域有所不同。行波法与暂态法宜互补结合, 以达到较高的选线可靠性。

#### 4.4 选线方法有效域计算的影响因素

##### a. 故障条件的影响。

现场中, 瞬时性故障、间歇性故障和弧光接地故障多发, 这类故障主要影响故障电流的工频特性, 而由于行波、暂态信号一般只存在于故障后的 5 ms 以内, 在新一次的间歇性故障发生之前, 行波、暂态过程可认为已衰减殆尽, 故本有效域分析方法仍然适用, 不会受到瞬时性故障和弧光接地故障等故障条件的影响。

##### b. 网络结构的影响。

配网线路运行方式变化快, 用确定拓扑下的 1 条故障线路改变故障初相角和故障电阻值的理想测试场景对有效域进行分析, 将会与实际情况存在细微差别。但运行方式仅会改变上述分析中的网络等效电感  $L_{tot}$  和等效电容  $C_{tot}$ , 使得计算出的暂态法有效域中所抗的过渡电阻、故障初相角略有不同。

本选线方法有效域的计算方法属于基于模型的计算方法, 为得到较为精确的选线方法有效域, 宜在事前对网络拓扑结构进行获取, 并对网络等效电感  $L_{tot}$  和等效电容  $C_{tot}$  进行计算。在对选线方法有效域精确度要求不高的场合下, 有关变量可使用平均值, 以便得到行波、暂态选线法的互补关系。

## 5 结论

针对目前各类选线方法缺乏统一的实验手段与实验验证结果的问题, 本文利用课题组自主研发的暂态行波保护测试仪、功率放大器以及小电流接地选线硬件装置, 对现有的几种典型选线方法进行测试实验, 得出了以下几点启示。

a. 故障行波可分析、可度量、物理意义明确, 依据故障行波构成的行波选线法具有不受系统运行方式、负荷大小、中性点接地方式、故障持续时间等因素影响的优势, 且对过渡电阻耐受性能强。但在架空线路分支故障条件下, 行波选线有效域有所缩小; 故障初相角较小的情况下, 行波选线存在死区。

b. 暂态选线法在强故障下选线效果良好, 在过

渡电阻很小的较低角度故障情况下也能够正确选线,在小过渡电阻、低角度故障下具有选线优势。但在过渡电阻稍高时,暂态衰减振荡分量即会消失。且随着故障初相角的减小,暂态过程逐渐减弱。故暂态选线法在过渡电阻较大和故障初相角较小的情况下存在死区。

c. 单一的选线方法只能在各自的有效域中正确选线,难以全面兼顾所有故障情况和网络结构。因此,如何实现行波选线法和暂态选线法的互补,构造多方法融合的选线方法是下一步研究的重点。

### 参考文献:

- [1] 董新洲,毕见广. 配电线路暂态行波的分析 and 接地选线研究[J]. 中国电机工程学报,2005,25(4):3-8.  
DONG Xinzhou, BI Jianguang. Analysis on transient traveling wave and study on fault line selection for distribution lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(4): 3-8.
- [2] 范新桥,朱永利,卢伟甫,等. 基于多点电流测量的输电线路行波故障定位新方法[J]. 电力自动化设备,2012,32(11):39-45.  
FAN Xinqiao, ZHU Yongli, LU Weifu, et al. Traveling wave fault location based on multiple current measurements for transmission line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(11): 39-45.
- [3] 徐靖东,张保会,尤敏,等. 基于暂态零序电流特征的小电流接地选线装置[J]. 电力自动化设备,2009,29(4):101-105.  
XU Jingdong, ZHANG Baohui, YOU Min, et al. Fault line selection device for non-solid earthed network based on transient zero-sequence current features [J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(4): 101-105.
- [4] 康忠健,李丹丹,刘晓林. 应用非工频暂态分量的配电网故障选线方法[J]. 电力自动化设备,2011,31(4):1-6.  
KANG Zhongjian, LI Dandan, LIU Xiaolin. Faulty line selection with no-power frequency transient components of distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(4): 1-6.
- [5] 郭谋发,杨耿杰,黄世远. 谐振接地系统暂态特征自适应故障选线方法[J]. 电力自动化设备,2012,32(10):35-41.  
GUO Moufa, YANG Gengjie, HUANG Shiyuan. Adaptive faulty line selection based on transient characteristics for resonant earthing system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(10): 35-41.
- [6] 束洪春,朱梦梦,黄文珍,等. 基于暂态零序电流时频特征量的配电网故障选线方法[J]. 电力自动化设备,2013,33(9):1-6.  
SHU Hongchun, ZHU Mengmeng, HUANG Wenzhen, et al. Faulty line selection based on time-frequency characteristics of transient zero-sequence current [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(9): 1-6.
- [7] 薛永端,冯祖仁,徐丙垠,等. 基于暂态零序电流比较的小电流接地选线研究[J]. 电力系统自动化,2003,27(9):48-53.  
XUE Yongduan, FENG Zuren, XU Bingyin, et al. Earth fault protection in non-solidly earthed network based on transient zero sequence current comparison [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(9): 48-53.
- [8] 何奔腾,胡为进. 能量法小电流接地选线原理[J]. 浙江大学学报:自然科学版,1998,4(4):77-83.  
HE Benteng, HU Weijin. A new principle to detect the grounded line in a neutral point indirectly grounded power system based on the energy function [J]. Journal of Zhejiang University: Natural Science Edition, 1998, 4(4): 77-83.
- [9] 薛永端,徐丙垠,冯祖仁,等. 小电流接地故障暂态方向保护原理研究[J]. 中国电机工程学报,2003,23(7):51-56.  
XUE Yongduan, XU Bingyin, FENG Zuren, et al. The principle of directional earth fault protection using zero sequence transients in non-solid earthed network [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(7): 51-56.
- [10] 胡佐,李欣然,石吉银. 基于残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.  
HU Zuo, LI Xinran, SHI Jiying. Analysis of earth fault selection based residual current and current angle integration [J]. Relay, 2006, 34(7): 6-9.
- [11] 郝玉山,杨以涵,任元恒,等. 小电流接地微机选线的群体比幅比相原理[J]. 电力情报,1994,5(2):15-19.  
HAO Yushan, YANG Yihan, REN Yuanheng, et al. The magnitudes and phases comparison method of fault line selection [J]. Information on Electric Power, 1994, 5(2): 15-19.
- [12] 孔瑞忠,董新洲,毕见广. 基于电流行波的小电流接地选线装置的试验[J]. 电力系统自动化,2006,30(5):63-67.  
KONG Ruizhong, DONG Xinzhou, BI Jianguang. Test of fault line selector based on current traveling wave [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(5): 63-67.
- [13] 王佩,施慎行,杨建明,等. 基于暂态行波的接地选线装置及其现场试验[J]. 电力自动化设备,2008,28(6):118-121.  
WANG Kan, SHI Shenxing, YANG Jianming, et al. Transient-traveling-wave-based grounding line selector and its field tests [J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(6): 118-121.
- [14] 高立克,丁涛,俞小勇,等. 小电流接地系统行波法选线的 RTDS 测试可行性分析[J]. 电力系统自动化,2012,36(17):113-118.  
GAO Like, DING Tao, YU Xiaoyong, et al. Feasibility analysis using RTDS for line selecting based on traveling wave method in neutral un-effectual grounded systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(17): 113-118.
- [15] 董新洲,张言苍,余学文. 暂态行波保护测试仪:中国,ZL01120138 [P]. 2002-03-27.
- [16] DONG Xinzhou, LIU J Z, XU Xuewen, et al. New relay testing platform [C] // Seventh International Conference on Developments in Power System Protection, 2001. Amsterdam, Holland: IEE, 2001: 54-57.
- [17] 姜博,董新洲,施慎行. 基于单相电流行波的配电网单相接地故障选线方法[J]. 中国电机工程学报,2014,34(34):6216-6227.  
JIANG Bo, DONG Xinzhou, SHI Shenxing. A method of single phase to ground fault feeder selection based on single phase current traveling wave for distribution lines [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(34): 6216-6227.
- [18] 王珺,董新洲,施慎行. 配电网单相接地行波保护的实现与试验[J]. 中国电机工程学报,2013,33(13):172-178.  
WANG Jun, DONG Xinzhou, SHI Shenxing. Scheme and test of traveling-waves based single-phase-to-ground protection for distribution lines [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(13): 172-178.

- [19] 施慎行,董新洲,周双喜. 单相接地故障行波分析[J]. 电力系统自动化,2005,29(23):29-32.  
SHI Shenxing,DONG Xinzhou,ZHOU Shuangxi. Analysis of single-phase-to-ground fault generated traveling waves [J]. Automation of Electric Power Systems,2005,29(23):29-32.
- [20] 程路,陈乔夫. 小电流接地系统单相接地选线技术综述[J]. 电网技术,2009,33(18):219-224.  
CHENG Lu,CHEN Qiaofu. A survey on faulty line selection technology for single-phase grounded transmission line in small current neutral grounded system [J]. Power System Technology, 2009,33(18):219-224.
- [21] 要焕年,曹梅月. 电力系统谐振接地[M]. 北京:中国电力出版社,2009:64-67.
- [22] 庄伟,牟龙华. 融合零序电流衰减直流分量的矿山电网接地选线[J]. 电网技术,2014,38(4):1087-1095.  
ZHUANG Wei,MU Longhua. Fault line selection of coalmine distribution network considering decaying DC component of zero-sequence current under single-phase earth fault [J]. Power System Technology,2014,38(4):1087-1095.

- [23] 束洪春,司大军. 一种利用衰减直流分量的谐振接地系统故障选线方法[J]. 中国电力,2006,39(2):1-4.  
SHU Hongchun,SI Dajun. New approach for fault line selection in distribution system with arc suppressing coil grounding using decaying DC component [J]. Electric Power,2006,39(2):1-4.

#### 作者简介:



姜 博

姜 博(1987—),女,河北邢台人,博士研究生,主要研究方向为配电网继电保护与故障选线(E-mail:jiang-b09@mails.tsinghua.edu.cn);

董新洲(1963—),男,陕西周至人,教授,博士研究生导师,IET Fellow,博士,主要研究方向为电力系统继电保护(E-mail:xzdong@tsinghua.edu.cn);

施慎行(1978—),男,江苏淮安人,副教授,博士,主要研究方向为基于行波电气量的配电线路故障检测和继电保护(E-mail:shishenxing@tsinghua.edu.cn)。

## Experimental research on typical single-phase grounding line selection methods of distribution network

JIANG Bo,DONG Xinzhou,SHI Shenxing

(State Key Lab of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipments,  
Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** A test platform consisting of the transient travelling wave protection tester, broadband power amplifiers and self-developed faulty line selection device is established to verify the performance of different faulty line selection methods for the single-phase grounding fault in distribution network. The different fault conditions and line structures are simulated and several typical faulty line selection methods tested. The validity domain is given for different methods. Results show: the established test platform can effectively test different faulty line selection methods; the method based on the travelling wave has obvious advantages, but its reliability reduces when the fault occurs in the branch line or the initial fault phase is small; the method based on the transient signal reduces its reliability when the transition resistance is large or the initial fault phase is small. The combination of the travelling-wave based method and the transient-signal based method can effectively improve the reliability of faulty line selection.

**Key words:** faulty line selection; electric power distribution; non-effectively grounded neutral; single-phase grounding fault; travelling wave; transients; experiment