

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190064

基于 RTDS 小步长仿真的配电网行波选线装置 动模试验研究

李志勇¹, 王伟¹, 庄良文¹, 周鹏鹏¹, 李书琰²

(1. 许昌开普检测研究院股份有限公司, 河南 许昌 461000; 2. 国网许昌供电公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 行波选线装置是配电网接地故障选线装置的重要类型之一, 对其开展动模试验研究有助于行波选线功能的不断完善和发展。分析了行波选线的基本原理及配电网行波传输的特性。研究了 RTDS 小步长仿真的原理及 GTAO 板卡的模拟量输出特性, 采用小步长的方式建立了配电网仿真模型。通过分析动模试验中影响行波选线性能测试的多种因素, 制定了行波选线装置动模测试方案, 搭建了闭环试验环境。试验结果证明, 利用 RTDS 小步长仿真能够完成行波选线装置的动模试验。

关键词: RTDS; 小步长仿真; 行波选线; 动模试验

Dynamic test of traveling wave line selecting device based on RTDS small time-step simulation

LI Zhiyong¹, WANG Wei¹, ZHUANG Liangwen¹, ZHOU Pengpeng¹, LI Shuyan²

(1. Xuchang KETOP Testing Technology Co., Ltd., Xuchang 461000, China;

2. State Grid Xuchang Power Supply Company, Xuchang 461000, China)

Abstract: The traveling wave line selection device is one of the important types in the distribution fault line selection devices. The dynamic test is a helpful way to develop and improve the device function. This paper analyzes the basic principle of traveling wave selection and the characteristics of traveling wave transmission in distribution network. It studies the principle of RTDS small time-step simulation and the analog output characteristics of GTAO card, builds the distribution network simulation model by RTDS small time-step. By analyzing various factors affecting the traveling wave selection performance test in the dynamic simulation experiment, it develops the dynamic simulation test scheme for traveling wave selection device and sets up a closed loop test environment. The test result shows that the dynamic test of the traveling wave line selection can be completed by RTDS small time-step simulation.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900600).

Key words: RTDS; small time-step simulation; line selection of traveling wave; dynamic simulation test

0 引言

我国配电网大多采用中性点非有效接地方式。中性点非有效接地系统发生单相接地故障时故障电流幅值小, 故障选线十分困难, 及时和准确识别故障线路对于配电系统的安全稳定运行具有重要意义^[1]。

针对配电网中性点非有效接地系统接地故障选线问题, 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工频法、暂态法以及行波法。工频法所使用的是故障后的工频稳态量, 工频幅值通常很小, 在电缆线路含量小的网架中选线难度更大。

单相接地故障所产生的暂态量远大于稳态量, 暂态法通过如暂态电流比幅比相法、暂态能量法、暂态无功功率法、首半波法等方法进行选线^[2-4]。暂态法与网络结构参数、故障过渡电阻等因素有很大关系。行波法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。

对使用工频法、暂态法开发的选线装置进行动模试验通常采用实时数字闭环仿真的方式, 将 RTDS(Real Time Digital Simulator)产生的故障信号通过功率放大器输出至选线装置。RTDS 的典型仿真步长为 50 μ s, 功率放大器的带宽一般小于 1 kHz, 而基于行波法的选线装置需要的行波信号一般在 100 kHz 以上, 常规的动模试验方法无法适用于行

基金项目: 国家重点研发计划基金资助(2016YFB0900600)

波选线装置。

文献[5]给出了行波选线的 RTDS 测试可行性分析, 该分析基于 RTDS 大步长仿真建模, 未能有效产生行波选线所需的全部高频信号。文献[6]提出的试验方法基于暂态行波测试仪, 是一种开环的利用暂态波形进行回放的测试方法。由于目前的行波选线装置除选线功能外还要求具备后加速跳闸、故障轮切及铁磁谐振闭锁等功能, 开环测试方法无法满足动模试验要求。总体而言, 现有研究工作尚未能明确提出针对行波选线装置的动模试验方法。

本文基于常规选线的动模试验方法, 结合行波选线的技术原理, 采用 RTDS 小步长仿真的方法进行配电网仿真模型的搭建, 仿真步长为 2~3 μs , 采用宽频功率放大器输出 100 kHz 以上的电压电流信号至行波选线装置, 通过闭环仿真的方式完成动模试验。

1 中性点非有效接地系统行波选线

1.1 行波选线主要选线理论

将线路电流经 Karenbauer 变换得到零模、线模分量, 比较各条线路的初始行波, 有如下两种基本方法, 可选出故障线路。

1) 初始行波幅值比较

接地线路的初始电流行波幅值大于非接地线路的初始电流行波幅值。

2) 初始行波极性比较

非接地线路的初始电流行波极性相同, 与接地线路的初始电流行波极性相反。

1.2 配电网中行波的传输特性

配电网的结构与输电网存在较大区别, 与输电网上行波的传输特性相比, 配电网行波的传输具有其特殊性。配电网存在较多混合线路, 出线较多, 并在末端安装有配电变压器, 这些特殊的结构会影响配电网电压行波和电流行波的传输, 动模试验在搭建仿真模型时需要考虑这些特殊的因素对行波选线装置的影响^[7]。

1) 配电网混合线路对行波的影响

架空线和电缆混合线路在接头处波阻抗不连续, 架空线路波阻抗一般为 300~500 Ω , 波速度为 $290 \times 10^6 \sim 300 \times 10^6$ m/s, 电缆波阻抗一般为 10~100 Ω , 波速度为 $150 \times 10^6 \sim 265 \times 10^6$ m/s, 当故障行波信号到达接头时会发生折射和发射, 行波波速和幅值将发生变化^[8]。

行波信号反射系数 α 和折射系数 β 的表达式分别为

$$\alpha = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (1)$$

$$\beta = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (2)$$

式中: Z_1 为入射端等效波阻抗; Z_2 为折射端等效波阻抗。

将架空线及电缆的波阻抗代入式(1)、式(2)计算可得

$$-0.96u_1 \leq u_2 = \alpha u_1 = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} u_1 \leq -0.5u_1 \quad (3)$$

$$0.04u_1 \leq u_3 = \beta u_1 = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} u_1 \leq 0.5u_1 \quad (4)$$

入射行波为 u_1 , 反射行波为 u_2 , 折射行波为 u_3 。由上式可知, 行波信号由架空线进入电缆时, 反射行波与入射行波方向相反, 幅值变为入射行波的 0.5~0.96 倍; 折射波与入射波的方向相同, 幅值变为入射波的 0.04~0.5 倍。同理, 行波信号由电缆进入架空线时, 反射行波与入射行波方向相同, 幅值变为入射行波的 0.5~0.96 倍; 折射波与入射波的方向相同, 幅值变为入射波的 1.5~1.96 倍^[9-10]。

因此, 行波信号由架空线进入电缆时, 方向不变, 幅值变为原始行波的 0.077~0.75 倍, 同理, 行波信号由电缆进入架空线时, 变化情况相同。混合线路会降低行波信号的幅值, 影响行波选线。

2) 配电变压器对行波的影响

在分析配电变压器对高频行波信号的影响时, 需要考虑配电变压器中的漏磁感抗及分布电容。通过建立配电变压器的模型, 结合实际配电变压器的参数进行计算, 可得出变压器对高频信号的截止频率处于行波的频率范围之内, 在此不再赘述。由此可得出结论, 配电变压器能有效传变行波波头, 但会对行波信息造成影响。

3) 配电网出线对行波的影响

因配电网出线数量的不同计算出来折射系数及反射系数也会不同, 影响行波信号的传输过程, 行波的幅值大小与出线数量及每条出线的波阻抗有关。

2 RTDS 及其小步长仿真

2.1 RTDS 小步长仿真原理

RTDS 是一种基于 Dommel 电磁暂态算法及并行处理机制的实时电磁暂态仿真工具。一般来说, 电磁暂态仿真程序是通过修改导纳矩阵来仿真开关器件的, 在 Dommel 计算理论中, 一旦导纳矩阵发生改变, 必须对它重新分解求逆才能进行节点电压的计算。当然, 如果开关器件的数量很少, 例如只有 12 个, 可以对所有开关状态组合的导纳矩阵先进行求逆, 对 12 个开关来说有 4 096 种导纳矩阵。

不论是对导纳矩阵进行在线求逆，还是事先求逆，对于小步长实时仿真而言都有很大的困难：在线求逆方法的计算量很大，当节点较多时处理器无法完成计算；事先求逆方法需要很大的存储空间来保存导纳矩阵，例如 36 个开关的仿真需要保存 2^{36} 个导纳矩阵，这在技术上是不可行的^[11-12]。

为解决上述问题，实现大量开关器件的小步长仿真，RTDS 小步长仿真使用以下方法：在模型中设定开关开通时的电抗与关断时的阻抗相等，各阻抗数值会根据所设定的参数自动生成。这样开关器件的状态改变后不会引起导纳矩阵的变化，因此不需要重新进行分解求逆。RTDS 中小步长开关器件的等效电路如图 1 所示。

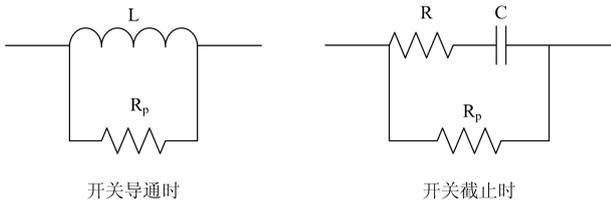


图 1 小步长开关等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit of the small step switch

当开关处于导通状态，它等效为一个小电感 L ，当开关处于截止状态，它等效为串联的电阻 R 和电容 C ，另外开关器件还有一个并联的大电阻 R_p 。输入所仿真的开关器件的工作电压、工作电流和阻尼系数，DRAFT 软件将自动计算开关器件的 LCR 参数，使其满足在小步长情况下(约 $2 \mu s$)，导通状态和截止状态的等效导纳相同，参数之间的约束关系如下式所示。

$$L = \sqrt{2}(\Delta t \times F)v / i \quad (5)$$

$$C = (\Delta t \times F)^2 / L \quad (6)$$

$$R = \frac{2L}{\Delta t} - \frac{\Delta t}{2C} \quad (7)$$

$$F = \frac{1}{2(\sqrt{\delta^2 + 1} - \delta)} \quad (8)$$

式中： v 为工作电压； i 为工作电流； δ 为阻尼系数； Δt 为仿真步长； L 为导通电感； C 、 R 分别为截止电容和电阻。

通过小步长方式搭建模型，可以计算出 500 kHz 的信号，有效体现行波的高频信息。

2.2 RTDS 模拟量小信号输出

小步长仿真的行波信号通过 RTDS 的 GTAO 板块将仿真数据等比再现为最大幅值为 $\pm 10 V$ 的模拟信号。

GTAO 板卡采用了超采样技术，通过 $1 \mu s$ 的时间

间隔对模拟量小信号进行输出，如图 2 所示，未采用超采样技术，模拟量在输出的时候按照仿真步长进行输出，台阶比较陡峭，超采样技术将一个仿真步长内的数据通过算法细化，数据的颗粒度更小^[13]。

GTAO 板卡 1 MHz 的输出频率能够保证仿真数据中的行波信号的输出。

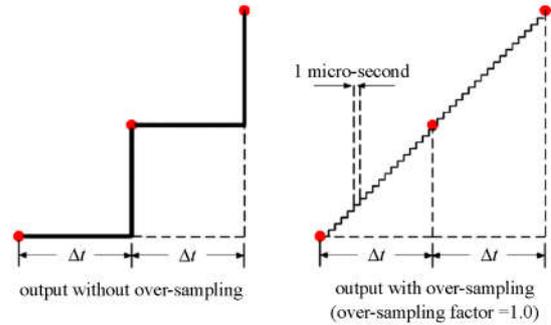


图 2 GTA0 板卡采用超采样前后对比

Fig. 2 GTA0 output without and with over-sampling

3 配电网 RTDS 小步长建模

依据配电网中行波的传输特性，考虑 RTDS 小步长的仿真规模，搭建如图 3 所示的 10 kV 配电网模型。

- 1) 两个 110 kV 等值电源通过 110 kV/10 kV 变压器连接 10 kV 单母分段母线。
- 2) 馈线采用 RTDS 中的 Tline 模型，共计 6 条馈线，每个分段母线各含有 3 条馈线。
- 3) 馈线中包含架空线路、电缆线路以及线缆混合线路，每条馈线的长度不一致，其中 1 条馈线含有分支线路。

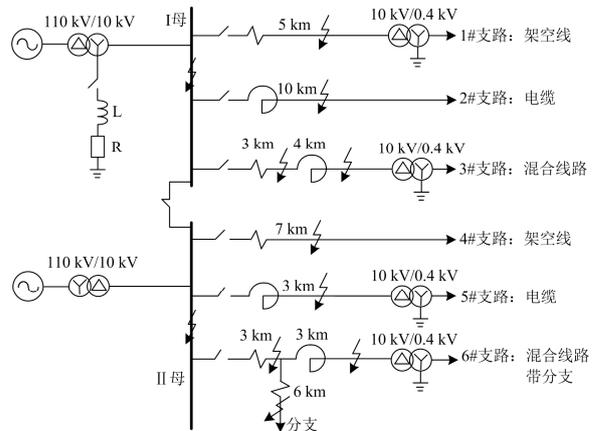


图 3 仿真测试模型

Fig. 3 Simulation model for test

架空线路和电缆线路的参数如表 1、表 2 和表 3 所示^[14-16]。

表 1 LGJ-95 架空线参数

Table 1 Parameters of LGJ-95 overhead line

相序	电阻/(Ω/km)	电抗/(Ω/km)	电容/(μF/km)
正序	0.33	0.41	0.007
零序	1.041	1.245	0.004

表 2 YJV22-3*240 电缆参数

Table 2 Parameters of YJV22-3*240 cable line

相序	电阻/(Ω/km)	电抗/(Ω/km)	电容/(μF/km)
正序	0.098	0.086	0.351
零序	0.246 23	0.3	0.166

表 3 YJV22-3*300 电缆参数

Table 3 Parameters of YJV22-3*300 cable line

相序	电阻/(Ω/km)	电抗/(Ω/km)	电容/(μF/km)
正序	0.079 1	0.083	0.373
零序	0.227 33	0.291	0.166

在模型中,以电感模拟调匝式消弧线圈的电感,以电阻模拟消弧线圈的等效损耗。根据系统对地电容电流的大小以及脱谐度来确定电感的大小。过补偿是常用的消弧线圈补偿方式,本项目消弧线圈采用5%过补偿的方式,消弧线圈的损耗取消弧线圈容量的1%。

模型可以模拟中性点不接地和经消弧线圈接地两种接地方式。在模拟中性点经消弧线圈接地系统时,对消弧线圈采用图4所示的控制策略。故障开始后,消弧线圈的控制单元检测到中性点电压 U_0 超过30%相电压,消弧线圈动作信号 ASC_Con 控制阻尼电阻开关闭合,消弧线圈进行补偿。在故障消除之后,该控制单元需要检测中性点电压的变化。只有在中性点电压 U_0 低于30%相电压时,ASC_Con 才会发出退出补偿的指令。

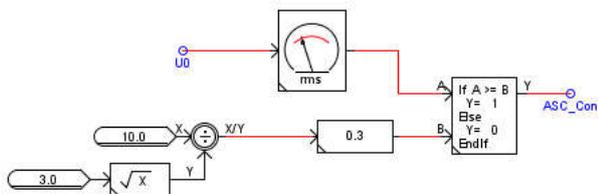


图 4 消弧线圈的控制单元

Fig. 4 Control logic of arc suppression coil

4 行波选线装置动模试验

按照上述模型,采用 RTDS、宽频带功率放大器与选线装置构成闭环连接,系统示意图如图5所示。宽频带功率放大器采用清华大学研制的行波专用功率放大器^[17-18],放大器的电压输出为0~120 V,

电流输出为0~50 A,电压电流的输出带宽>100 kHz。

依据配电网行波传输的特性,在进行选线装置动模试验时考虑了8种对行波选线结果可能造成影响的因素^[19],如表4所示。

发生接地故障时,典型的 RTDS 小步长仿真波形如图6所示。

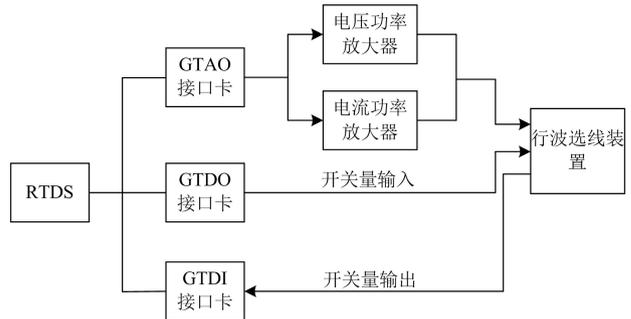


图 5 测试系统图

Fig. 5 Schematic diagram of test system

表 4 选线装置测试因素

Table 4 Key factor of faulty line selection testing

序号	影响因素	备注
1	故障初始角	90°、60°、30°、3°
2	故障持续时间	10 s、1 min、5 min
3	故障类型	稳定性接地、间歇性接地、弧光接地
4	故障过渡电阻	1~1 000 Ω
5	谐波含量	电源侧与负荷侧存在谐波源,谐波含量分别为0%、1%、6%
6	线路参数三相不平衡	考虑线路参数三相不平衡,PT二次侧的零序电压分别为10 V、3 V、1 V、0 V
7	故障相	AN、BN、CN
8	故障位置	线路的末端、中间以及母线

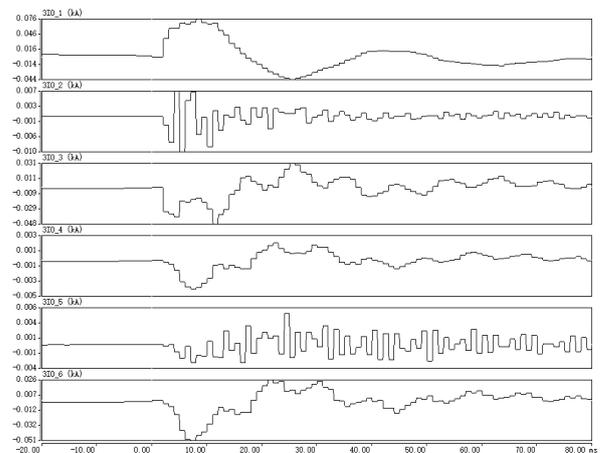


图 6 典型仿真波形

Fig. 6 Simulation wave

从动模试验的结果来看，行波选线装置的选线结果达到预期，同时也反向证明了 RTDS 小步长仿真通过宽频带功率放大器与装置形成闭环连接的试验方式是可行的，满足动模试验的要求。

为了进一步验证闭环实时仿真的可行性，分别通过 RTDS 以及 EMTDC 搭建 120 km 长度同样参数的输电线路模型，采用手动计算以及行波测距装置来对比验证实时闭环仿真方式与离线仿真的一致性，如图 7 所示。

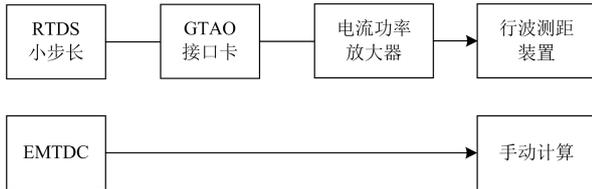


图 7 一致性验证

Fig. 7 Conformance verification

EMTDC 离线仿真的波形采样率为 500 kHz，采用波形分析软件手动截取故障启动时刻线路两侧的时间差，计算故障距离，EMTDC 的仿真波形如图 8 所示。

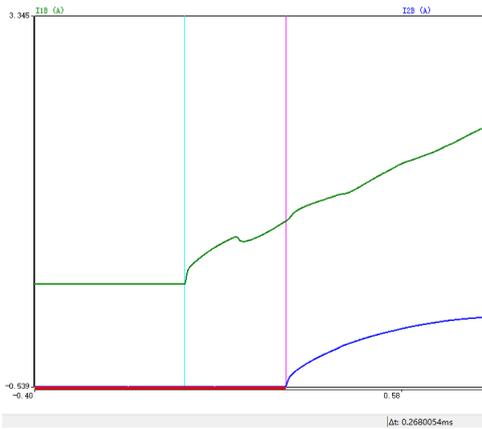


图 8 EMTDC 仿真波形

Fig. 8 EMTDC waveform

RTDS 与行波测距装置闭环连接，与 EMTDC 同等参数相同故障的情况下进行测距，两种方式的测距结果进行比较，行波选线装置的测距结果界面如图 9 所示。

线路两侧的时间差为 0.268 005 4 ms，波速度按 300 km/ms 计算，故障距离为

$$D = 0.2680054 \times 300 = 19.7992 \text{ km}$$

行波测距装置的波速度设定为 300 km/ms，测距结果为：时间差为 268 000 ns，测距结果为 100.2/19.8 km。两种测距结果高度一致，进一步验证了闭环实时仿真的可行性。

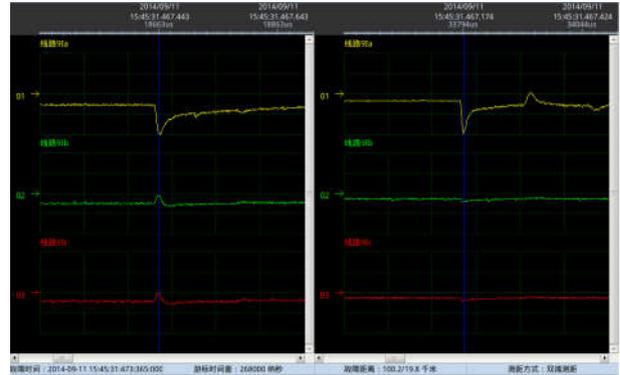


图 9 行波测距装置测距结果

Fig. 9 Distance measurement result of travelling wave device

5 结论

利用 RTDS 的小步长仿真搭建动模试验环境可进行多种行波装置的动模试验，包括行波选线、行波测距等。本文利用行波理论分析了行波选线装置动模试验的影响因素及建模原则，利用 RTDS 小步长原理搭建了配电网模型^[20-22]，通过模拟多种影响选线结果的因素全面系统地考核了选线装置的性能，从而验证了将 RTDS 小步长仿真用于行波选线装置动模试验的可能性，并通过测试项目的设计及具体测试对动模试验方案进行了验证^[23-25]。

需要指出的是，RTDS 小步长仿真与大步长仿真相比，仿真规模存在局限性，一些特殊的测试工况依然难以模拟，比如铁磁谐振等，需要继续研究小步长仿真模型，进一步完善行波选线装置的动模试验方案。

参考文献

[1] 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.

[2] 姜博, 董新洲, 施慎行. 自适应时频窗行波选线方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(24): 6387-6397.
JIANG Bo, DONG Xinzhou, SHI Shenxing. A method of adaptive time frequency window traveling wave based fault feeder selection[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(24): 6387-6397.

[3] 施慎行, 董新洲. 基于单相电流行波的故障选线原理研究[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(14): 13-16.
SHI Shenxing, DONG Xinzhou. Study of fault line selection using single-phase current traveling waves[J]. Power System

- Protection and Control, 2008, 36(14): 13-16.
- [4] Feng Deng, Xiangjun Zeng, Lanlan Pan. 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. DOI: 10.1186/s41601-017-0042-4.
- [5] 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.
- [6] 姜博, 董新洲, 施慎行. 配电网单相接地故障选线典型方法实验研究[J]. 电力系统自动化, 2015, 35(11): 67-74.
JIANG Bo, DONG Xinzhou, SHI Shenxing. Experimental research on typical single-phase grounding line selection methods of distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 35(11): 67-74.
- [7] 柳芊芊. 智能配电网故障行波选线及定位方法研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2014.
LIU Qianqian. Research on traveling waves fault feeder detection and fault location method for smart distribution power networks[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2014.
- [8] 王侃, 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 王峥夏, 周鹏鹏, 贾德峰, 等. 用 RTDS 小步长算法仿真换流阀合成试验回路[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(6): 128-133.
WANG Zhengxia, ZHOU Pengpeng, JIA Defeng, et al. Simulating the thyristor valve synthetic test circuit with RTDS small step algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(6): 128-133.
- [12] 许汉平, 魏威, 邹建明, 等. 利用 RTDS 测试输电线路行波故障定位装置[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(24): 45-47.
XU Hanping, WEI Wei, ZOU Jianming, et al. Use of RTDS to test travelling wave based fault location devices for transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(24): 45-47.
- [13] The world standard for real time digital power system simulation[EB/OL].[2011-07-08].http://www.RTDS.com.
- [14] 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.
- [15] 董新洲, 毕见广. 配电网暂态行波的分析及接地选线研究[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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.

- [19] 张承学, 丁涛, 黄涛, 等. 基于 RTDS 仿真测试的配网单相接地故障选线系统优化[J]. 低压电器, 2009(11): 40-43.
ZHANG Chengxue, DING Tao, HUANG Tao, et al. Optimization of faulty line selection system in neutral un-effectual grounded system based on RTDS simulation & testing[J]. Low Voltage Apparatus, 2009(11): 40-43.
- [20] 曾祥军, 尹项根, 林福昌, 等. 输电线路故障 GPS 行波定位装置实验测试研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(8): 31-34.
ZENG Xiangjun, YIN Xianggen, LIN Fuchang, et al. Experimentation for the GPS and traveling-wave based fault locator of transmission line[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(8): 31-34.
- [21] 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 of transient line selection of small current grounding fault based on field recorded waveform[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(6): 180-187.
- [22] 陈豪威, 王媛媛, 唐夏菲, 等. 基于 S 变换暂态能量与方向的无整定配电网选线新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(14): 71-78.
CHEN Haowei, WANG Yuanyuan, TANG Xiafei, et al. A new fault line selection method for distribution network system based on transient energy and direction of S-transformation[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(14): 71-78.
- [23] 杨正理, 黄其新, 王长鹏, 等. 采用差分滤波算法改进最大投影差值故障选线[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(4): 158-164.
YANG Zhengli, HUANG Qixin, WANG Changpeng, et al. A new fault line selection method of the maximizing shadow difference optimized by differential filter algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(4): 158-164.
- [24] 曾钰, 邹贵彬, 孙辰军, 等. 一种柔性直流配电网直流侧故障保护方法[J]. 电力信息与通信技术, 2018, 16(7): 80-86.
ZENG Yu, ZOU Guibin, SUN Chenjun, et al. A DC side fault protection method for a flexible DC distribution network[J]. Electric Power ICT, 2018, 16(7): 80-86.
- [25] 徐珂, 聂萌, 王洋, 等. OpenDSS 在分布式光伏接入配电网仿真分析中的应用[J]. 电力信息与通信技术, 2018, 16(11): 88-92.
XU Ke, NIE Meng, WANG Yang, et al. Application of OpenDSS in simulation and analysis of distributed photovoltaic connected to distribution network[J]. Electric Power ICT, 2018, 16(11): 88-92.

收稿日期: 2019-01-15; 修回日期: 2019-04-04

作者简介:

李志勇(1986—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 从事电力系统仿真试验研究工作; E-mail: lizhiyong@ketop.cn

王伟(1972—), 男, 高级工程师, 从事电力系统仿真试验研究工作;

庄良文(1979—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事电力系统仿真试验研究工作。

(编辑 魏小丽)