

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190809

10 kV 配电网的接地故障测试述评及真型实验场设计

王鹏¹, 冯光¹, 韦廷方², 王磊¹, 陈明¹, 王晓卫², 曾志辉², 程凤鸣³

(1. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 河南 郑州 450052; 2. 河南理工大学电气工程与自动化学院, 河南 焦作 454000; 3. 国网河南省电力公司漯河供电公司, 河南 漯河 462000)

摘要: 针对现实中单相接地故障选线和定位困难、相关产品测试验证的效率低下等问题, 述评了 10 kV 配电网接地故障的仿真测试与试验验证相关问题。首先, 基于单相接地故障的暂态过程分析, 阐明了引起接地选线困难的机理原因。综述了小电流接地故障的三种常用测试验证手段, 并讨论了各自的优缺点。接着, 分析了小电流接地故障选线和定位装置效果不理想的原因。讨论了其仿真与试验验证面临的难题, 论证了建立真型实验场的重要性和迫切性。最后, 设计了一种 10 kV 配电网真型实验场的系统方案, 给出了实测案例。并指出了该实验场的技术优势和应用前景。

关键词: 10 kV 配电网; 小电流接地故障; 仿真测试; 真型实验场

Review of grounding fault testing and design of real experiment field for 10 kV distribution network

WANG Peng¹, FENG Guang¹, WEI Yanfang², WANG Lei¹, CHEN Ming¹, WANG Xiaowei², ZENG Zhihui², CHENG Fengming³

(1. State Grid Henan Electric Power Research Institute, Zhengzhou 450052, China; 2. School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China; 3. Luohe Power Supply Company, State Grid Henan Electric Power Company, Luohe 462000, China)

Abstract: To solve the difficulties in selecting and locating single-phase grounding faults, and the inefficiency of related product testing, simulation tests and verification for grounding faults of a 10 kV distribution network are reviewed. First, based on the transient analysis of single-phase grounding, the mechanism of the difficulty in grounding line selection is analyzed. Three test and verification methods are summarized, and the merits and demerits of each method are analyzed. Then, the reasons for the unsatisfactory effect of line selection and locating devices for small current grounding faults are analyzed. The difficulties faced by simulation and test verification are discussed. The importance and urgency of establishing a real experimental field are discussed. Finally, the design scheme of a real experimental field for a 10 kV distribution network is given, and practical test cases are discussed. The prospective technical advantages and application prospects of the real experimental field are discussed.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61703144).

Key words: 10 kV distribution network; small current grounding fault; simulation testing; real experiment field

0 引言

智能配网是智能电网的关键环节之一^[1-2], 与输电网仅采用中性点直接接地不同, 目前我国配电网

主要采用以下三种方式^[3-4]: (1) 自动消弧线圈接地, 此为配网的主要应用方式; (2) 电阻接地方式, 主要应用在北上广等以电缆为主的大中城市配电网; (3) 中性点对地绝缘方式, 主要应用在农村小规模架空线路为主的配电网。

目前, 我国 10 kV 配电网普遍采用不接地或经消弧线圈接地的小电流接地形式^[5-6], 由于稳态故障电

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(61703144); 国网科技项目资助(18PH08)“主动干预型消弧装置应用技术研究”

流微弱、接地过程复杂、电弧不稳定等原因,配电网单相接地故障选线和定位已成为困扰现场多年的难题,且国内外都是如此^[7-8]。一直以来,针对配电网单相接地故障的处理,现场多采用原始的人工拉线方式进行选线,此方式效率低下、供电可靠性和经济性较差。自上世纪 80 年代以来,随着微机技术的成熟应用,更多基于微机的单相接地故障选线和定位方法得以应用,但现场运行的选线和定位装置效果并不理想,其原因是多方面的^[9-10],其中一个重要因素在于目前市场上针对小电流接地系统单相接地故障的选线产品虽然很多,但质量参差不齐,很多产品并没经过系统测试验证。基于仿真和试验平台模拟虽然具有仿真结果全面、可视性好等优势,但无法完全反映配电网现场故障的本质^[11-13],通过现场应用发现问题具有一定可行性,但其效率太低,具体如下。

(1) 在现场可能要等很长时间才能遇到一次故障;

(2) 现场装置经历的故障场景和工况有限,难以全面考察其性能;

(3) 现场故障数据记录不全面,不利于问题分析等,从而无法有效记录和还原故障,不利于及时发现缺陷并进行产品完善。

当前,我国正处于大力建设智能电网的关键时期,作为直接衔接用户和电力输送网的配电网,其单相接地故障处理所面临的上述技术问题愈发凸显。为此,本文通过综述当前小电流接地故障的仿真测试与试验验证的相关技术方法,论证建立真型实验场的必要性。真型实验场不仅可有效进行故障再现、产品测试、教学培训,具备故障选线装置的实试验证功能,且可有效提升对相关入网装置的统一管控,对推动小电流接地故障选线和定位技术的研究与应用具有重要的实际意义。

1 中性点经消弧线圈接地系统单相接地暂态分析

利用稳态信号的选线方法在实际应用中的效果不理想,主要在于稳态接地电流微弱,同时在过补偿方式下零序电流及方向故障特征不明显^[4]。而小电流接地故障产生的暂态信号中包含故障信息,虽然暂态过程不明显,但若有效提取暂态信号,可构成基于暂态信息的选线原理。本文以图 1 所示零序故障模型为例,通过分析中性点经消弧线圈接地发生接地故障的暂态变化过程,阐明引起接地选线困难的机理原因。图 1 中开关 K 闭合代表中性点经消

弧线圈接地。图 2 为图 1 对应的零序等值回路,图 2 中 i_L 、 i_C 分别表示暂态电容电流和暂态电感电流; u_0 为零序等值电源电压, $u_0 = U_{\phi m} \sin(\omega t + \varphi)$; $U_{\phi m}$ 为零序等值回路相电压幅值。

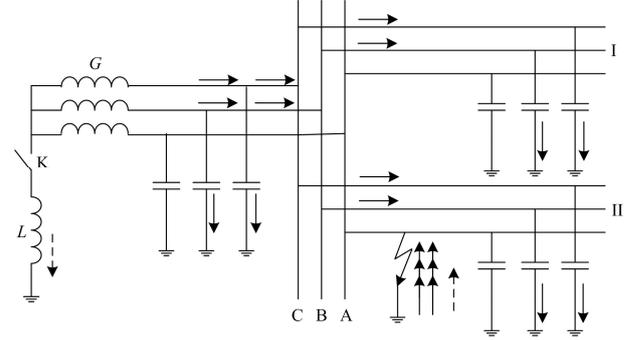


图 1 配电网单相接地故障模型

Fig. 1 Single phase grounding fault model

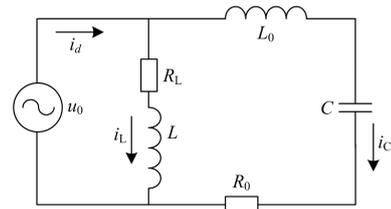


图 2 图 1 对应的零序等值回路

Fig. 2 Zero sequence circuit of Fig. 1

1) 暂态电容电流

由于自由振荡频率一般较高,考虑消弧线圈 L 远大于三相线路以及电源变压器在零序回路中的等值电感 L_0 ,故可不考虑图 2 中的消弧线圈电阻 R_L 和 L ,可得 i_C 为^[14-15]

$$R_0 i_C + L_0 \frac{di_C}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t i_C dt = U_{\phi m} \sin(k\omega t + \varphi) \quad (1)$$

经过拉氏变换运算可得 i_C 的暂态量 $i_{C\cos}$ 和稳态量 i_{Cst} 之和为

$$i_C = i_{C\cos} + i_{Cst} = I_{Cm} \left[\left(\frac{\omega_f}{\omega} \sin \varphi \sin \omega_f t - \cos \varphi \cos \omega_f t \right) e^{-\delta t} + \cos(\omega t + \varphi) \right] \quad (2)$$

式中: I_{Cm} 为电容电流幅值; ω_f 、 δ 分别为暂态自由振荡分量的角频率和衰减系数,且 $\delta = 1/\tau_C = R_0/2L_0$; τ_C 为回路时间常数; φ 为初始相位角。

故障相电压达峰值时,电容电流自由振荡分量的振幅最大值为

$$i_{C\cos\max} = I_{Cm} \frac{\omega_f}{\omega} e^{T_f/4\tau_C} \quad (3)$$

其比值为

$$\gamma_{C_{\max}} = \frac{\omega_f}{\omega} e^{T_f/4T_c} \quad (4)$$

2) 暂态电感电流

由图 2 可得

$$U_{\varphi m} \sin(\omega t + \varphi) = R_L i_L + N \frac{d\Phi_L}{dt} \quad (5)$$

式中: R_L 为消弧线圈电阻; N 、 Φ_L 分别为消弧线圈分接头的匝数和铁芯中的磁通。

将 i_L 代入式(5)可得到磁通 Φ_L 的表达式为

$$\Phi_L = \Phi_{st} \frac{\omega L}{Z} [\cos(\varphi + \xi) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_L}} - \cos(\omega t + \varphi + \xi)] \quad (6)$$

式中: Φ_{st} 为稳态磁通, $\Phi_{st} = U_{\varphi m} / N\omega$; ξ 为补偿电流相角, $\xi = \arctan(R_L / \omega L)$; Z 为消弧线圈阻抗, $Z = \sqrt{R_L^2 + (\omega L)^2}$; τ_L 为电感回路的时间常数。

因 $R_L \ll \omega L$, 取 $Z \approx \omega L$, $\xi = 0$, 式(6)可化简为

$$I_L = I_{Lm} [\cos \varphi \cdot e^{-\frac{t}{\tau_L}} - \cos(\omega t + \varphi)] \quad (7)$$

式中, I_{Lm} 为电感电流幅值, $I_{Lm} = U_{\varphi m} / \omega L$ 。

3) 流经故障点的暂态电流

结合上述分析以及式(2)和式(7)结果, 可得到流过接地点的暂态电流为

$$i_d = i_C + i_L = (I_{Cm} - I_{Lm}) \cos(\omega t + \varphi) + I_{Cm} \left(\frac{\omega_f}{\omega} \sin \varphi \sin \omega_f t - \cos \varphi \cos \omega_f t \right) e^{-\frac{t}{\tau_C}} + I_{Lm} \cos \varphi e^{-\frac{t}{\tau_L}} \quad (8)$$

式(8)第一项为流过接地点电流稳态工频量的零序电流, 后面几项为暂态量, 暂态量包括振荡衰减分量和直流衰减分量两部分。

由上述可知, 中性点不接地系统只存在暂态电容电流, 该电流的衰减情况与经消弧线圈接地系统相同。因此接地方式对单相接地暂态故障特征影响不大。一般地, 接地电容电流的暂态分量比其稳态分量大几倍到十几倍, 所以用暂态分量检测单相接地故障以及进行单相接地区域定位, 可以克服稳态分量值较小不易检测的缺点。

与稳态选线原理相比, 基于暂态信息的选线技术在实际使用时由于暂态电流幅值大、抗干扰能力强、受不稳定电弧影响较小, 选线功率较高, 且适应性和安全性均有优势, 但其对设备的硬软件工艺指标要求更高, 且在电压过零故障时, 暂态电流幅值小, 一定程度上影响检测灵敏性, 但其仍是当前最具有发展潜力的选线原理。

2 小电流接地故障的仿真测试与试验方法

小电流接地故障的测试及试验验证可分为以下三类: 基于 CPU 的数值仿真平台^[16-27]、基于实验平台的模拟试验测试^[28-36]和基于故障模拟的现场接地测试^[38-41]。

2.1 基于 CPU 的数值仿真平台

目前用于小电流接地故障的仿真测试软件除了常用的 EMTP/ATP^[16]、Matlab^[17]、PSCAD^[18]等离线电磁暂态软件, 还有 NETOMAC^[19]、OpenDSS^[20-21]等软件。此外, 文献[22]开发了基于 OPEN3200 的配电网仿真平台, 并在南京河西新城进行了成功应用; 文献[23]采用虚拟现实技术实现了具有三维可视化及人机交互功能的配网仿真系统; 文献[24]提出基于 GridLAB-D 和 Matlab 的联合仿真平台。除了上述离线仿真测试, 在线实时仿真方面也取得了一系列成果。文献[25]建立了基于 RT-LAB 的配网实时仿真平台; 文献[26]实现了基于 FPGA 的配网暂态实时仿真; 文献[27]实现了基于分布式组件服务的配网在线仿真。上述测试平台主要为基于 CPU 的数值仿真软件平台, 仿真环境、参数及工况的设置基本不受限制, 无需过多的硬件配置、人机的可视界面友好。对于某些现场无法用录波设备完整记录的复杂故障, 仿真测试不失为一种非常有效的技术手段, 其具有良好的经济性和可控性。但该类软件平台构建的模型精度和准确性受制于操作人员的专业知识和软件使用熟练程度, 且对实际小电流接地故障系统的等效建模有可能存在较大偏差, 无法满足实时、在线的测试要求, 不能有效反映或重现系统的故障内涵、动态特性及配套保护的响应情况, 从而直接影响建模和结论的正确性。

2.2 基于实验平台的模拟试验手段

基于实验平台的模拟试验手段是指在实时数字仿真装置(RTDS)或实际等值系统上模拟实际电网运行及故障状态, 常用的有继电保护测试仪模拟^[28]、静模系统模拟^[29]、低压动模实验^[30]等, 这类方法的测试地点通常位于实验室, 因此也称实验室测试^[4]。

文献[12,31]提出配电网信息物理系统的数模测试验证平台; 文献[32]采用 RTDS 虚实结合的馈线自动化系统测试平台设计; 文献[3,33]采用模拟试验对 10 kV 配网单相接地故障电弧特性进行了研究; 文献[34]设计了配网自愈在线动模测试; 文献[35]基于 10 kV 接地故障模拟了有源电压消弧装置; 文献[36]搭建了 10 km 电缆组成的配电网动态模拟实验平台; 文献[37]利用暂态行波测试仪实现了现场接地的模拟测试。基于实验平台的模拟试验可对电

网保护装置的功能和性能进行考核,重心是校验整套保护对现场各种运行及故障的反应情况,其物理概念清晰、直观,且能真实反映实际系统的特征。但建立动态模型投资大,实验方案及参数调整受限于已有硬件设备的实验条件,与现场工程验证仍有一定差距。由于数值仿真模拟和动态模拟各具优缺点,二者可互相补充验证。

2.3 基于故障模拟的实际现场接地测试

现场接地测试是基于真实配电网,通过人工接地试验来模拟实际发生的接地故障,也称人工接地试验^[4],通过故障现场测试能够反映电网真实故障特性,是检验保护性能的有效途径。文献[38]基于固定电阻、电弧和间歇3种接地方案,进行了现场接地选线试验;文献[39]实现了基于暂态行波的接地选线装置现场试验;文献[40]基于10 kV线路现场接地试验,分析了接地故障电参量特性;文献[41]评价了小电流接地选线装置测试的相关性能。需要特别指出的是,在电网原型上进行实验研究,往往受电力系统安全、经济运行的限制。人工接地试验相比数值仿真和模拟试验,更能真实反映现场的故障特性,测试结果的可信度高,但现场测试的故障类型和试验种类依然受限,出于安全考虑不易频繁进行,其适用性具有一定的局限性。

3 配电网单相接地故障仿真与试验验证面临的难题

上述各类仿真试验测试手段均具有各自优缺点,当用于小电流接地故障时,与实际运行的真实场景仍有较大差距,当前现场运行的选线和故障定位效果十分不理想,其原因主要如下。

(1) 故障工况复杂,而稳态电流信号微弱,故障特征不明显。

由于接地介质(金属杆塔、绝缘子表面污垢、树枝或树干,甚至人体等)、接地点过渡电阻、系统电容电流水平、接地持续时间、故障初相角情况等均影响故障的特征量,以及瞬时性接地或间歇性接地的不稳定电弧故障影响,包括配电网结构复杂,不同电网有功分量和谐波分量的含量不尽相同等,使得故障特征不明显;暂态的故障特征幅值比实测要大,但由于其持续时间短,难以有效测量^[4,42-44]。

(2) 现场负荷等干扰因素较多。

实际电网正常运行过程中可能存在电压波动、暂降等,非线性负载导致的谐波污染、不平衡负载投切导致的零序信号干扰等。装设地点电磁干扰、

负荷电流不平衡造成的零序电流和谐波电流等外界干扰影响,母线电压水平、负荷电流大小等不确定随机因素的影响。

(3) 选线方法原理存在缺陷。

各种获得应用的选线方法均有其优势,但也都存在一定局限性,其在实际现场应用都需要满足特定的适用条件。理论和实践表明,当前尚无一种能对所有配电网结构和各种故障类型都有效的选线方法。

(4) 装置硬件、工艺可能存在局限。

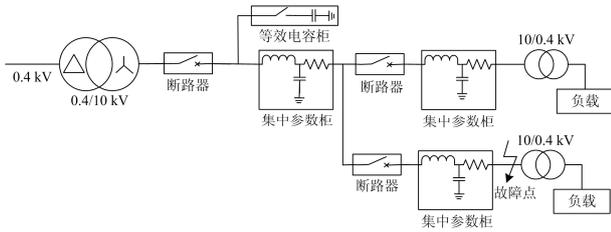
装置采样率、零序电流合成精度、电子互感器、故障指示器的电场强度测量等问题,定位所需信号获取困难、信号传输困难等,以及测量互感器在小信号时的测量误差、硬件装置的电磁兼容性、元器件自身的性能参数等。

由于小电流接地故障和定位的方法和装置种类繁多,设备厂家多,产品设计和生产环节差别大,各厂家的技术实力和生产能力高低不齐,缺乏系统的综合性能对比,装置的硬软件平台可靠性参差不齐、环境适应性差、电磁兼容性不好等,电网公司在产品选型时存在一定盲目性,装置的实用效果总体不佳。对于小电流接地选线装置,电力行业标准和企业标准虽然规定了相关技术要求,但受测试方法和条件限制,难以开展全面的测试。国家权威检测部门在检测时,功能及性能按企业标准或技术条件进行测试,其他项目如电磁兼容、绝缘性能、机械影响、温度影响等按继电保护行业标准和相关的国家标准进行检验,而无法对该类产品进行全面的性能试验^[4,45]。

因此,针对现实中所存在的上述严峻问题,开发一种真型实验场重现真实故障场景,对小电流接地故障选线装置开展实验检测,实现对产品性能的高效、全面、准确的测试,增强小电流接地故障选线装置的检测能力,提升相关入网设备的性能。在现场应用前及时发现产品问题,提升现场应用效果等,是一项迫切而具有重要现实意义的工作。

4 10 kV 配电网真型实验场系统应用现状

建设真型实验场具有多种优势:可重现高阻、弧光等现场故障;避免模型、参数带来的影响;灵活设置各类故障工况;试验数据可完整记录,方便分析;不造成停电损失;减小干扰的影响等。图3为某电科院建设的真型配电网系统结构^[46],其相关工作在配电网真型实验领域做出了突出贡献。



(a) 系统结构



(b) 现场试验系统

图3 某真型配电网

Fig. 3 A true-type distribution network

图4为本文所设计的10 kV配电网真型实验场拓扑结构,该系统以电容器组等集中参数代替线路分布参数模拟真实配电网的参数,包括降压变压器、调压变压器、升压变压器、电容器、柱上开关、多条试验线路、故障选线装置以及故障消弧装置。其中,试验线路、故障选线装置以及故障消弧装置均连接至10 kV母线上。10 kV母线通过外部线路上的降压变压器、调压变压器和升压变压器连接至外部10 kV进线;电容器配置在多条试验线路上,上述各线路上配置有柱开关^[5]。图4中1是待检测的小电流接地系统故障选线装置,2为故障消弧装置,试验系统具有3条试验线路,可远接5条实际线路中的3条,其中包含电缆线路1条、架空线路2条、混合线路2条。通过选择各条线路中投切的电容容量可以设定回路中产生的零序电流大小,以实现对待故障选线装置应用效果的判断。

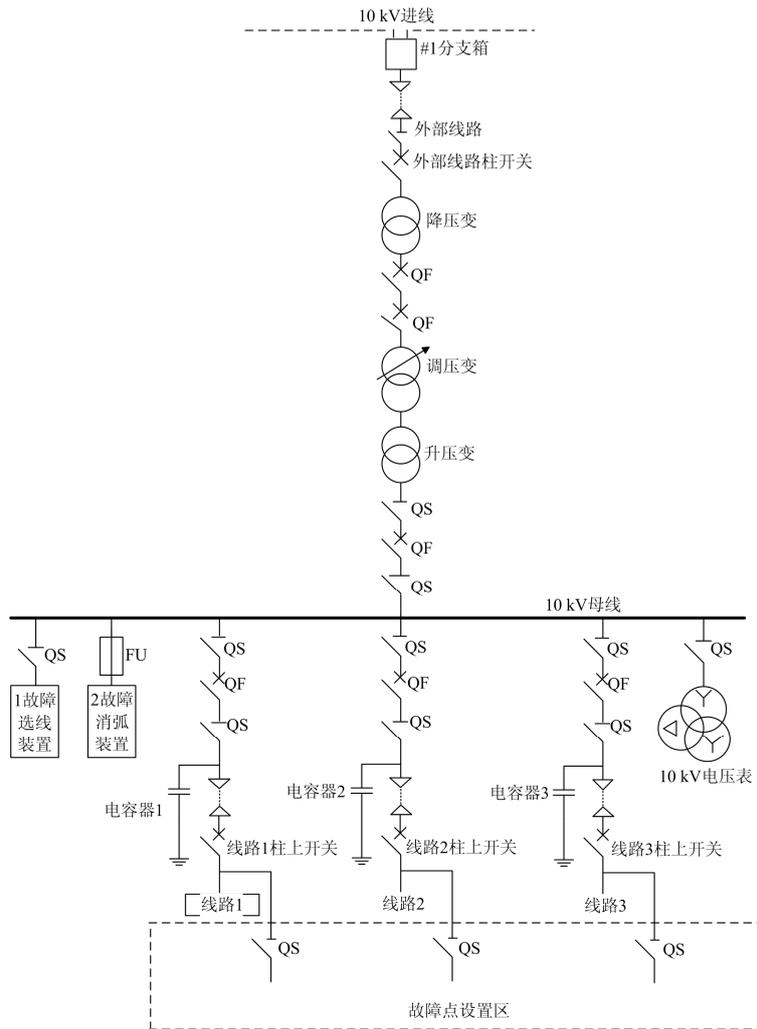


图4 真型实验场拓扑结构

Fig. 4 Topological of true-type experiment field

图4中试验系统的10 kV母线通过降压变压器、调压变压器和升压变压器与外部线路10 kV缆线隔离,可有效防止测试故障选线装置时产生的尖峰脉冲等刺激信号对外部供电网的影响,确保试验系统的测试工作不影响外部电力网的安全稳定运行。待检测的小电流接地系统故障选线装置接入到试验系统的10 kV母线中,如图4所示,试验系统的3条试验线路均接入到故障点设置区域,检测试验时,在不同的线路上设置故障点,以检测故障选线装置的性能。

3条试验线路上均设置有电容器,通过选择各条线路中投切的电容器容量模拟网路中产生的零序电流大小,以实现故障选线装置应用效果的判断。电容电流取值为1.5~30 A。

本文所设计的试验系统具备如下的优点。

1) 可以模拟配电网的各种倒闸操作,具备遥测、遥信、遥控功能,可实现远方、就地操作;能进行带电安全培训,故障应急处理教学培训。

2) 通过故障试验及处理子系统与微机保护结合,可以模拟多种配电网故障,如:单相永久接地及精确选线、单相瞬时和过渡电阻接地判断、断线判断及选线、三相短路、两相短路等,并可以进行跨步电压试验。可以真实再现故障现象、声情并茂,能进行配电网故障分析处理研究。

3) 可以开展配电网相关技术专题研究、试验。如:配电网参数测量试验、配电网的电能质量研究试验、配电网的雷电过电压及防雷措施试验、配电网内过电压研究试验等。

4) 可以对配电网新产品进行在线运行检测、试验。如:配电网动态接地成套装置开发研究试验,配电网接地选线与消谐、消弧装置开发研究试验,配电网故障智能诊断装置开发研究试验,配电网智能无功补偿装置开发研究试验,配电网谐波处理装置开发研究试验,配电网故障智能定位装置开发研究试验,配电网自动化设备的开发研究试验等。

5 真型实验场应用概况

本文在此以全补偿型设备测试、暂态录波型故障指示器接地故障检测功能测试为例,分别说明其在该实验场的测试情况。

5.1 全补偿型设备测试

在中性点经消弧线圈接地的系统中,由于消弧线圈无法消除残流中的有功分量和谐波分量,无法保证完全熄弧,采用全补偿技术,可同时补偿残流中的无功分量、有功分量和谐波分量,从而提高熄

弧效果^[47]。在该真型实验场,国内首次对两种类型的全补偿装置开展了研究型测试,图5为全补偿型设备测试现场。



(a) 电流型全补偿测试 (b) 电压型全补偿测试

图5 全补偿型设备测试现场

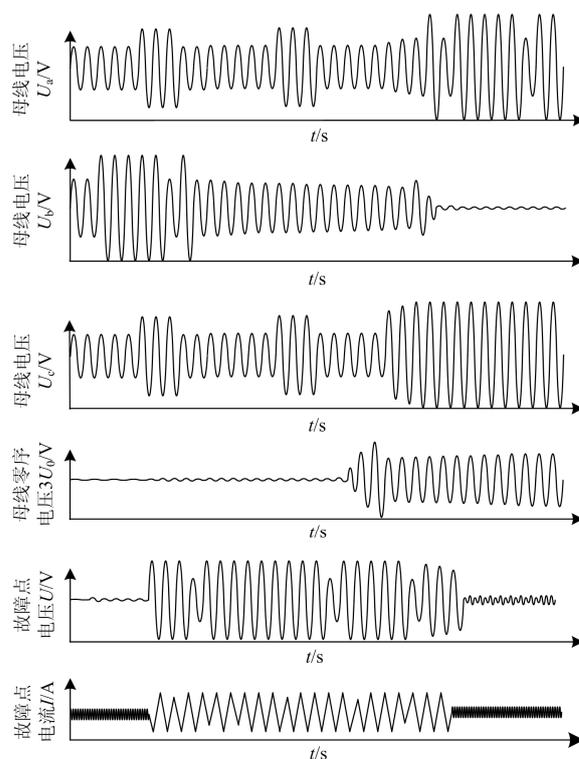
Fig. 5 Test site of full compensation equipment

以国外某电流型全补偿装置为例,图6为分别经过渡电阻、草地、弧光接地等工况下的故障波形对比分析,经该真型实验场测试验证表明。

(1) 该装置能够在故障发生后数十毫秒至数百毫秒内显著抑制故障点电流。在系统平衡且消弧线圈的阻尼电阻退运的情况下,对高阻接地故障的检测能力优异。

(2) 在模拟断线经潮湿水泥地、沙石地、草地、水泥砖铺路面接地工况时,装置介入后能够快速熄灭接地点的电弧。

(3) 装置对弧光接地故障残流控制效果相对弱于其他工况,但故障电弧仍能被迅速熄灭。



(a) 经16 000 Ω 过渡电阻接地

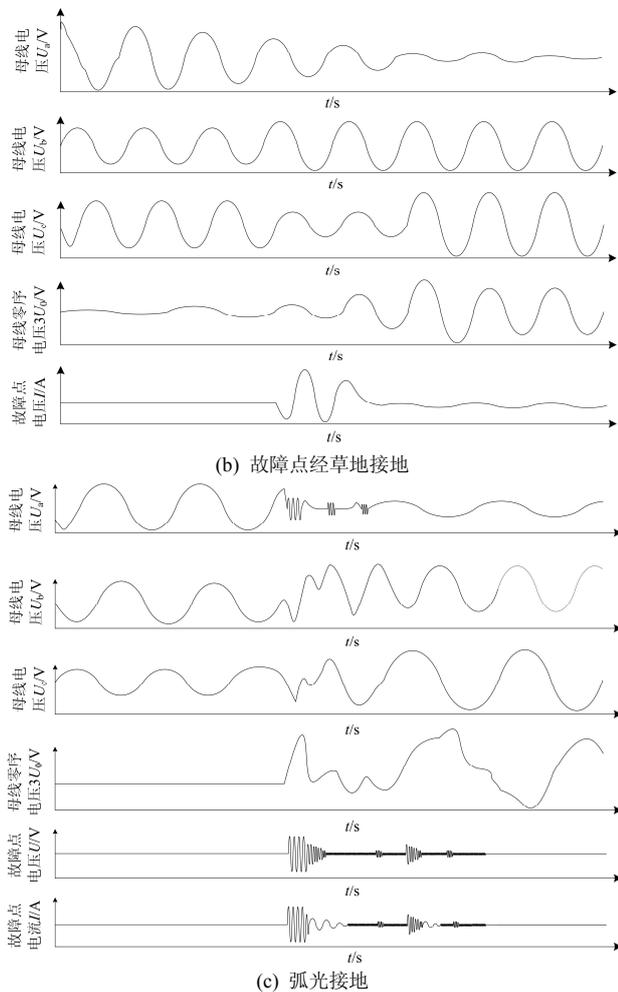


图 6 某电流型全补偿装置测试波形

Fig. 6 Test waveform of a current type full compensation device

由此可知该装置能够有效熄灭接地故障点的电弧,抑制接地残流,同时降低对供电可靠性的影响。

5.2 某暂态录波型故障指示器接地故障检测功能测试

图 7 为某暂态录波型故障指示器接地故障检测功能测试现场情况。



图 7 某暂态录波型故障指示器接地故障检测功能测试

Fig. 7 Test of fault detection for a transient fault indicator

经该真型实验场测试验证表明:

- (1) 通过工艺提升来提高电场和电流测量精度是有效的。
- (2) 采样频率对故障指示器的性能有较明显的影响。

(3) 综合利用零序电压特征和电流突变量特征,能够提高对高阻接地故障的检测能力。

(4) 存在断线或复电的干扰问题。

综上,通过依托该实验场对国内外多个厂家的小电流接地系统单相接地故障选线装置进行了技术验证、性能测试与对比,实践表明该实验场得到成功应用^[48]。

6 结论

本文综述了目前 10 kV 配电网接地故障的仿真测试与试验验证情况,设计并实现了 10 kV 配电网真型实验场。

(1) 该实验场用降压变压器、调压器、升压变压器进行安全隔离,确保不影响外网的安全稳定运行。

(2) 该实验场可用于教学培训、故障再现及研究、试验,有助于提高电力公司配电网精益运维水平,提升配电人员检修、维护、故障处置能力,提高培训效果。

(3) 该实验场可对试验现场进行全程监控、录波检测,实现全过程记录,能够复现各种典型接线方式下的故障真实场景,可以有效统计小电流接地系统故障选线装置的动作准确率,从而实现小电流接地系统故障选线装置性能的准确评估。

该实验场的相关工作可为供电企业相关决策提供参考依据,可以提高供电企业对故障选线装置的实验检测能力,提升对相关入网设备的管控能力,同时也为设备厂家产品完善提供了良好的平台,将进一步推动接地故障处理技术的发展。

参考文献

[1] 潘旭,王金丽,赵晓龙,等. 智能配电网多维数据质量评价方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(5): 1375-1384.
PAN Xu, WANG Jinli, ZHAO Xiaolong, et al. Multi dimensional data quality evaluation method for intelligent distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(5): 1375-1384.

[2] 徐丙垠,李天友,薛永端. 智能配电网与配电自动化[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(7): 38-42, 55.
XU Bingyin, LI Tianyou, XUE Yongduan. Smart grid from the perspective of demand response[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(7): 38-42, 55.

[3] 颜湘莲,陈维江,贺子鸣,等. 10 kV 配电网单相接地故障电弧自熄特性的试验研究[J]. 电网技术, 2008, 32(8): 25-28, 34.
YAN Xianglian, CHEN Weijiang, HE Ziming, et al. Experimental research on self-extinction behavior of arc caused by single-phase earth fault in 10 kV distribution

- network[J]. Power System Technology, 2008, 32(8): 25-28, 34.
- [4] 山东电力研究院. 小电流接地故障选线及定位技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2018.
- [5] 杨进, 程凤鸣, 张辉, 等. 一种真值配电网试验系统, 中国: 201610448072.1[P]. 2016-06-21.
- [6] 郭丽伟, 薛永端, 徐丙垠, 等. 中性点接地方式对供电可靠性的影响分析[J]. 电网技术, 2015, 39(8): 2340-2345. GUO Liwei, XUE Yongduan, XU Bingyin, et al. Research on effects of neutral grounding modes on power supply reliability in distribution networks[J]. Power System Technology, 2015, 39(8): 2340-2345.
- [7] 刘健, 张志华, 张小庆, 等. 配电网模式化故障处理方法研究[J]. 电网技术, 2011, 35(11): 97-102. LIU Jian, ZHANG Zhihua, ZHANG Xiaoqing, et al. Modeled fault isolation and restoration for distribution systems[J]. Power System Technology, 2011, 35(11): 97-102.
- [8] 陈玥云, 覃剑, 王欣, 等. 配电网故障测距综述[J]. 电网技术, 2006, 30(18): 89-93. CHEN Yueyun, QIN Jian, WANG Xin, et al. A survey on fault location for distribution network[J]. Power System Technology, 2006, 30(18): 89-93.
- [9] 苏继锋. 配电网中性点接地方式研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(8): 141-148. SU Jifeng. Research of neutral grounding modes in power distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(8): 141-148.
- [10] 徐铭铭, 肖立业, 王海风, 等. 一种基于 Prony 算法的直流配电网电缆故障定位方法[J]. 电工电能新技术, 2015, 34(4): 1-5, 30. XU Mingming, XIAO Liye, WANG Haifeng, et al. Novel method of locating cable fault in DC distribution based on prony algorithm[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2015, 34(4): 1-5, 30.
- [11] 孙刚, 时伯年, 孙谦浩, 等. 基于 RT-LAB 的柔性直流配电保护系统的硬件在环测试[J]. 南方电网技术, 2016, 10(4): 23-29. SUN Gang, SHI Bonian, SUN Qianhao, et al. RT-LAB based HIL test for protection system of MMC based DC distribution network[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(4): 23-29.
- [12] 翁嘉明, 刘东, 王云, 等. 信息物理融合的有源配电网故障仿真测试技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(2): 497-504, 680. WENG Jiaming, LIU Dong, WANG Yun, et al. Research on fault simulation of active distribution network based on cyber physical combination[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(2): 497-504, 680.
- [13] 张伟. 基于隔离信息相似度的配电网故障仿真培训评价方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(19): 158-164. ZHANG Wei. A distribution network fault training evaluation method based on isolation information matrix similarity[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(19): 158-164.
- [14] 李志军, 王娟, 张珈玮, 等. 阻尼电阻投切方式对消弧线圈残流及残流时间的影响[J]. 天津大学学报: 自然科学与工程技术版, 2018, 51(2): 143-149. LI Zhijun, WANG Juan, ZHANG Jiawei, et al. Influence of rapidly removing damping resistance on residual current and residual time of arc suppression coil[J]. Journal of Tianjin University: Science and Technology, 2018, 51(2): 143-149.
- [15] 王晓卫. 基于暂态功率相关分析的配电网故障定位研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2010.
- [16] 赵彦, 王俊江, 卓梦飞, 等. 基于暂态方向的小电流接地故障多级保护技术[J]. 水电能源科学, 2018, 36(10): 185-189. ZHAO Yan, WANG Junjiang, ZHUO Mengfei, et al. Multi-stage protection scheme for small current grounding fault based on transient direction[J]. Water Resources and Power, 2018, 36(10): 185-189.
- [17] 陈博博, 屈卫锋, 杨宏宇, 等. 小电流接地系统单相接地综合电弧模型与选线方法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(16): 1-7. CHEN Bobo, QU Weifeng, YANG Hongyu, et al. Research on single phase grounding arc model and line selection for neutral ineffectively grounding system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(16): 1-7.
- [18] 梁睿, 辛健, 王崇林, 等. 应用改进型有功分量法的小电流接地选线[J]. 高电压技术, 2010, 36(2): 375-379. LIANG Rui, XIN Jian, WANG Chonglin, et al. Fault line selection in small current grounding system by improved active component method[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(2): 375-379.
- [19] 毕见广, 郭永基, 孙元章, 等. 配电网单相故障仿真计算及分析[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(18): 41-44. BI Jianguang, GUO Yongji, SUN Yuanzhang, et al. Single phase fault simulation and analysis of distribution systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(18): 41-44.
- [20] 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 Information and Communication Technology, 2018, 16(11): 88-92.
- [21] 雷振, 吴琴芳, 叶剑烽, 等. 基于 OPENDSS 仿真平台的分布式光伏接入对配电网的影响分析[J]. 供用电, 2013, 32(9): 69-73.
LEI Zhen, WU Qinfang, YE Jianfeng, et al. Analysis of the influence of distributed photovoltaic generation integration on distribution network based on OPENDSS simulation platform[J]. Distribution & Utilization, 2013, 32(9): 69-73.
- [22] 张明, 周冬旭, 嵇文路, 等. 含源网荷的智能配电网运行仿真平台研究及应用[J]. 电力工程技术, 2017, 36(2): 66-71.
ZHANG Ming, ZHOU Dongxu, JI Wenlu, et al. Research and application of intelligent distribution network operation simulation platform contains the source and network[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(2): 66-71.
- [23] 乔卉, 龚庆武, 江传文. 采用体验性游戏模型的配电网运行仿真培训系统设计[J]. 电网技术, 2011, 35(10): 230-236.
QIAO Hui, GONG Qingwu, JIANG Chuanwen. Design of experiential gaming model-based simulation training system for distribution network operation[J]. Power System Technology, 2011, 35(10): 230-236.
- [24] 李媛禧, 顾荣伟, 林今. 基于混合仿真的主动配电网运行态势时序仿真平台[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(5): 142-154.
LI Yuanxi, GU Rongwei, LIN Jin. Co-simulation-based timing simulation platform for operating situation of active distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(5): 142-154.
- [25] 李巍巍, 陈俊, 陈名, 等. 多端柔性直流配电网 RT-LAB 实时仿真研究[J]. 广东电力, 2015, 28(10): 78-82, 86.
LI Weiwei, CHEN Jun, CHEN Ming, et al. RT-LAB realtime simulation research for multiterminal VSC-DC power distribution network[J]. Guangdong Electric Power, 2015, 28(10): 78-82, 86.
- [26] 王成山, 丁承第, 李鹏, 等. 基于 FPGA 的配电网暂态实时仿真研究(一): 功能模块实现[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 161-167.
WANG Chengshan, DING Chengdi, LI Peng, et al. I/O interface design for FPGA based real-time simulator of active distribution networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 161-167.
- [27] 叶学顺, 盛万兴, 孟晓丽, 等. 基于分布式组件服务的配电网在线仿真技术[J]. 系统仿真学报, 2016, 28(9): 2062-2068.
YE Xueshun, SHENG Wanxing, MENG Xiaoli, et al. Research on online simulation technology of intelligent distribution network based on distributed component service[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(9): 2062-2068.
- [28] 李文强, 李悠, 杨梅, 等. 微机继电保护测试仪技术指标和检定方法的研究[J]. 电测与仪表, 2016, 53(7): 51-56.
LI Wenqiang, LI You, YANG Mei, et al. Research on the technology index and the verification method of the test instrument of microcomputer based relay protection[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(7): 51-56.
- [29] 王慧, 肖洪, 王惠萍, 等. 具有计算机监控的电力系统静态模拟实验室的设计与实现[J]. 中国电力, 2002, 35(3): 40-43.
WANG Hui, XIAO Hong, WANG Huiping, et al. Design and implementation of power system static simulation lab with supervisory computer control[J]. Electric Power, 2002, 35(3): 40-43.
- [30] 张凤鸽, 杨德先, 程利军, 等. 配电系统动态模型设计与应用[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(19): 177-183.
ZHANG Fengge, YANG Dexian, CHENG Lijun, et al. Design and application of dynamic model for power distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(19): 177-183.
- [31] 陈彬, 黄建业, 张功林, 等. 配电网信息物理系统的典型特征与联合测试验证[J]. 电力建设, 2017, 38(5): 46-51.
CHEN Bin, HUANG Jianye, ZHANG Gonglin, et al. Typical characteristics and joint test verification of cyber physical system in distribution network[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(5): 46-51.
- [32] 吴栋萁, 杨涛, 黄晓明, 等. 虚实结合的馈线自动化系统测试平台设计[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(19): 137-143.
WU Dongqi, YANG Tao, HUANG Xiaoming, et al. Testing platform of feeder automation system with the combination of virtual and reality[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(19): 137-143.
- [33] 中国电力科学研究院, 华北电网有限公司廊坊供电公司. 10 kV 配电网单相接地故障电弧自熄特性研究[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2007.
- [34] 黄红远, 曹志辉, 黄小耘, 等. 智能配电网自愈控制功能在线动模测试的方案设计[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(2): 43-45.
HUANG Hongyuan, CAO Zhihui, HUANG Xiaoyun, et al. Scheme design of online-dynamic simulation for self-healing control function in smart distribution grid[J].

- Proceedings of the CSU-EPSC, 2016, 28(2): 43-45.
- [35] 彭沙沙, 曾祥君, 喻琨, 等. 基于二次注入的配电网接地故障有源电压消弧方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(20): 142-149.
- PENG Shasha, ZENG Xiangjun, YU Kun, et al. Active arc-suppression method of grounding fault for distribution network based on secondary injection[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(20): 142-149.
- [36] 姜运, 彭红海, 曾祥君, 等. 配电网故障行波定位动模实验平台[J]. 电力科学与技术学报, 2017, 32(3): 81-85.
- JIANG Yun, PENG Honghai, ZENG Xiangjun, et al. Dynamic simulation experimental platform for traveling-wave-based fault location in distribution network[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2017, 32(3): 81-85.
- [37] 孔瑞忠, 董新洲, 毕见广, 等. 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, et al. Test of fault line selector based on current traveling wave[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(5): 63-67.
- [38] 吴清, 许云峰. 小电流接地选线装置的现场接地选线试验[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(17): 105-107.
- WU Qing, XU Yunfeng. Field grounding wire selection test of small current grounding wire selection device[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(17): 105-107.
- [39] 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.
- [40] 徐诚, 梁仕斌, 田庆生, 等. 基于现场接地试验的配电网单相接地故障定位分析[J]. 云南电力技术, 2016, 44(5): 92-95.
- XU Cheng, LIANG Shibin, TIAN Qingsheng, et al. Analysis of single-phase grounding fault location in distribution network based on field grounding test[J]. Yunnan Electric Power, 2016, 44(5): 92-95.
- [41] 俞小勇, 高立克, 高艳亮, 等. 小电流接地选线装置性能评价方法研究[J]. 广西电力, 2012, 35(1): 1-5.
- YU Xiaoyong, GAO Like, GAO Yanliang, et al. Study on performance evaluation method for small current grounding line selection device[J]. Guangxi Electric Power, 2012, 35(1): 1-5.
- [42] 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, 33(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, 33(5): 7-13.
- [43] 杨以涵, 齐郑. 中亚配电网单相接地故障选线及定位技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
- [44] 马士聪, 高厚磊, 徐丙垠, 等. 配电网故障定位技术综述[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(11): 119-124.
- MA Shicong, GAO Houlei, XU Bingyin, et al. A survey of fault location methods in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(11): 119-124.
- [45] 应高亮, 赵深, 张波, 等. 配网真型模拟平台, 中国: 201610606842.0[P]. 2016-07-27.
- [46] 刘健, 张小庆, 李品德, 等. 基于熄弧倍增原理的配电网单相接地故障处理[J]. 电网技术, 2016, 40(11): 3586-3590.
- LIU Jian, ZHANG Xiaoqing, LI Pinde, et al. A novel approach treating single-phase ground fault in distribution system[J]. Power System Technology, 2016, 40(11): 3586-3590.
- [47] 刘宝稳, 马宏忠, 沈培锋, 等. 新型接地故障基波电流全补偿柔性控制系统[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(9): 2322-2330.
- LIU Baowen, MA Hongzhong, SHEN Peifeng, et al. New flexible control system of full compensation single-phase ground fault fundamental current[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(9): 2322-2330.
- [48] 程维欣, 肖伸平, 刘弘洋, 等. 转移型消弧装置对线路首端断线故障试验处理异常分析[J]. 湖南工业大学学报, 2018, 32(1): 70-75.
- CHENG Weixin, XIAO Shenping, LIU Hongyang, et al. Analysis of the abnormal treatment of the first end line failure test by using transferring-type arc-suppression device[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2018, 32(1): 70-75.

收稿日期: 2019-07-12; 修回日期: 2019-08-31

作者简介:

王鹏(1983—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为智能配电网技术; E-mail: w-fsfe@163.com

冯光(1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为智能配用电技术、供电可靠性技术、新能源消纳技术; E-mail: qing-zhu0301@163.com

韦廷方(1982—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统及其新型输配电的分析与控制。E-mail: weiyantfang@hpu.edu.cn

(编辑 许威)