

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200963

一二次融合成套断路器单相接地故障处置真型试验技术研究

李辉^{1,2}, 田野³, 陈江波^{1,2}, 邵崑峰^{1,2}, 万保权^{1,2}, 戴敏^{1,2}, 吴雪琼⁴, 程婷⁴

(1. 中国电力科学研究院有限公司, 湖北 武汉 430074; 2. 电网环境保护国家重点实验室, 湖北 武汉 430074; 3. 国网辽宁省电力有限公司电力科学研究院, 辽宁 沈阳 110000; 4. 国网电力科学研究院有限公司, 江苏 南京 211000)

摘要: 目前一二次融合成套柱上断路器的单相接地故障处置准确率较低, 亟需开展单相接地故障处置考核验证。在运行现场开展单相接地试验受制于安全风险和用户供电可靠性的影响, 不易多次开展。通过建立 10 kV 真型配电网试验平台, 实现了被试品快速接入, 灵活复现配电网单相接地故障。提出了一二次融合成套柱上断路器单相接地故障处置真型试验方法, 有效验证了一二次融合成套柱上断路器单相接地故障处置功能与处置准确率, 发现了 9 项不合格原因。通过真型配电网试验平台的建立, 提高了配电网设备入网质量, 有效支撑配电网供电可靠性进一步提升。

关键词: 一二次融合; 单相接地故障; 故障处置; 真型试验

Research on a single-phase grounding fault handling true test of primary and secondary integration circuit breaker

LI Hui^{1,2}, TIAN Ye³, CHEN Jiangbo^{1,2}, SHAO Minfeng^{1,2}, WAN Baoquan^{1,2}, DAI Min^{1,2},
WU Xueqiong⁴, CHENG Ting⁴

(1. China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Wuhan 430074, China; 2. State Key Laboratory of Power Grid Environmental Protection, Wuhan 430074, China; 3. Electric Power Research Institute of State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd., Shenyang 110000, China; 4. State Grid Electric Power Research Institute Co., Ltd., Nanjing 211000, China)

Abstract: At present, the primary and secondary integration column circuit breaker single-phase ground fault disposal function and accuracy rate is lower. Thus it is urgent to carry out assessment and verification of single-phase ground fault disposal. A single-phase ground test at an operational site is subject to the safety risk and user power supply reliability. It is not easy to carry out frequently. In this paper, a 10 kV real distribution network test platform is built. The test object is quickly connected to the test position. The single-phase ground fault can be reproduced flexibly. A single-phase ground fault treatment true test method of a primary and secondary fusion complete column circuit breaker is put forward. The disposal function and accuracy rate of the primary and secondary fusion complete column circuit breaker are effectively verified. Nine unqualified problems are found in the test. Through the establishment of a real distribution network test platform, the quality of equipment is improved, and the reliability of the network power supply is further improved.

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China "Research and Application of Distribution Automation Equipment Detection Key Technology based on True Test" (No. 5442PD210006 and No. PD71-21-005).

Key words: primary and secondary integration; single-phase ground fault; fault handling; true test

0 引言

随着我国用电量和用电质量需求的增长, 对供

电可靠性的要求越来越高, 对配电网故障要求快速处置。目前, 单相接地故障在配电网故障中占比较高, 中性点不接地或经消弧线圈接地方式在我国被广泛应用, 该接地方式在发生单相接地故障时故障电流非常小。因此, 小电流接地配电网单相接地故障处置要求技术高、难度大^[1-9]。近年一二次融合成套柱上断路器开始大量应用, 要求一二次融合断路

基金项目: 国家电网公司科技项目资助“基于真型试验的配电自动化设备检测关键技术研究及应用”(5442PD210006, PD71-21-005)

器可以实现对小电流单相接地故障就地判别与隔离,形成了站内与站外协同处置单相接地故障的局面,进一步提升配电网供电可靠性^[10-18]。

一二次融合设备的单相接地故障处置考核不够;目前一二次融合设备中一次设备和二次设备在相关实验室分别完成型式试验验证,一二次融合设备的成套化试验通过入网专业检测完成。一二次融合设备的单相接地故障处置试验多数在动模平台或数字反演系统下完成验证,真实工况的考核验证不足,部分单位开展了现场真型试验验证,但现场真型试验受制于安全风险和用户供电可靠性影响,不易多次、灵活地开展验证^[19-24]。

本文建立了 10 kV 真型配电网试验平台(以下简称:试验平台),通过试验平台灵活、快速发生配电网单相接地故障,复现配电网金属性、弧光、间歇、瞬时、不同过渡电阻、高阻接地(水泥、沥青、草地、土地、砂石等)等接地故障。提出利用试验平台开展配电网单相接地故障处置真型试验的方法,完成配电网一二次融合成套柱上断路器对单相接地故障处置的真型试验,评估一二次融合成套柱上断路器对单相接地故障就地研判与故障隔离的有效性和准确率。

1 一二次融合成套柱上断路器

一二次融合成套柱上断路器由开关本体(12 kV/630 A-20 kA)、馈线终端(箱式或罩式)、互感器(电源电压互感器,电压互感器/传感器,电流互感器/传感器)、连接电缆等构成。一二次融合成套柱上断路器的开关本体结构分为三相共箱式断路器和支柱式断路器;三相共箱式断路器可采用 SF₆ 或真空灭弧,支柱式断路器采用真空灭弧,如图 1 所示。

开关本体、馈线终端、电源电压互感器之间采用军用级航空接插件,通过户外型全绝缘电缆连接,航空接插件具有防误插设计;暴露在空气中的航空插座必须采用密封材料对金属导体进行密封。电源电压互感器的连接电缆破口做防雨水浸入处理,安装时做上 U 型固定。

一二次融合成套柱上断路器按功能可分为分段/联络断路器和分界断路器,均要求具备三相电流、零序电流、三相相电压或开关两侧各一个线电压、零序电压的采集能力,实现单相接地、相间短路故障处理,具备小电流接地系统单相接地故障就地判别和隔离功能,具备接地故障就地切除、选线功能和重合闸功能。开关采用弹簧操作机构时,相间故障整组固有动作时间不大于 100 ms;采用永磁操作

机构时,整组固有动作时间不大于 70 ms。



(a) SF₆ 罐式断路器 LW56



(b) SF₆ 箱式断路器 LW3



(c) 真空箱式断路器 ZW20



(d) 真空柱式断路器 ZW32

图 1 一二次融合成套柱上断路器的开关本体图

Fig. 1 Switch body diagram of primary and secondary fusion complete column circuit breaker

柱上开关按照互感器配置的不同,分为三种组合模式,第一种是电磁式互感器组合模式(简称电磁

式): 电磁式电源电压互感器(AC220 V, U_{ab}/U_{bc})+电磁式电流互感器(I_a, I_b, I_c, I_0)+电子式零序电压传感器(U_0); 第二种是电压/电流传感器组合模拟量输出模式(简称电子式): 电源电压互感器(AC220 V)+电压传感器(U_a, U_b, U_c, U_0)+电流传感器(I_a, I_b, I_c, I_0); 第三种是电压/电流传感器组合数字量输出模式(简称数字式): 电源电压互感器(AC220 V)+电压传感器

(U_a, U_b, U_c, U_0)+电流传感器(I_a, I_b, I_c, I_0)+传感器数字化单元。开关本体配置电压传感器后, 整机在 $1.2 U_m / \sqrt{3}$ 时, 局部放电水平小于 50 pC。柱上开关所有相序/零序互感器的极性与开关(进线侧/电源侧、出线侧/负荷侧)保持一致。10 kV 互感器和传感器配置表, 如表 1 所示。

表 1 10 kV 互感器和传感器配置表

Table 1 10 kV transformer and sensor configuration table

名称	额定变比	准确级	综合输入阻抗	容量
电子式电压传感器	相电压: (10 kV/1.732)/(3.25 V/1.732) 零序: (10 kV/1.732)/(6.5 V/3))	相电压: 0.5 级 零序电压: 3P	$\geq 10 \text{ M}\Omega$	—
电子式电流传感器	相: 600 A/1 V 零序: 20 A/0.2 V	相: 0.5 S 级 零序: 1 A 至额定电流时, 1 级; 保护 10P10	$\geq 20 \text{ k}\Omega$	—
电磁式电压互感器	线电压测量 10 kV/0.1 kV 供电电压: 10 kV/0.22 kV	线电压: 0.5 级 供电电压: 3 级	—	测量绕组: $\geq 10 \text{ VA}$ 供电绕组: $\geq 300 \text{ VA}$ 短时容量 $\geq 500 \text{ VA/1 s}$
电磁式电流互感器	相电流: 600 A/1 A, 1 VA 零序电流: 100 A/1 A, 1 VA	相电流: 保护 5P10 级、测量 0.5 级 零序电流: 一次侧输入 1 A 至额定电流时相 对误差 $\leq 3\%$, 5P10	—	相电流绕组: 1 VA 零序电流绕组: 1 VA
电子式零序电压传感器	(10 kV/ $\sqrt{3}$)/(6.5 V/3)	3P 级	—	—

电子式电压传感器/零序电压传感器采用电容分压式电子传感器时, 分压电容为陶瓷电容, 电压传感器应为无源器件, 输出模拟电压小信号, 在开关侧一二次之间应隔离。电子式电流传感器配置低功耗线圈原理的电流传感器, 输出模拟电压小信号。传感器数字化单元在开关侧配置并可更换, 传感器数字化单元将电压、电流传感器的模拟量输出以及分闸、合闸、未储能等状态信号按照 GB/T20840.8 的相关规定转换成数字量输出, 传感器数字化单元由 FTU 供电。

2 真型试验条件

2.1 真型试验平台

在国家电网公司特高压交流试验基地建立了世界规模最大的 10 kV 真型配电网试验平台, 试验平台整体规划、分期建设, 一期占地约 5 万 m^2 , 预留二期规划用地。试验平台在特高压交流试验基地的整体布置图, 如图 2 所示, 试验平台由电源、网架、负荷、组态式试验监控主站、中性点接地切换装置和故障灵活接入装置等构成。

电源由 220 kV/10 kV-75 MVA 主变提供 10 kV 电源; 网架由架空线路、电缆线路和混合线路组成, 可实现 6 种拓扑结构变换。网架结构如图 3 所示, 由 2 回架空线路(JKZX01 和 JKZX02)、2 回电缆线

路(JKMN03 和 JKMN04)组成; 通过多模配电终端控制网架中 18 台开关的分合状态, 网架结构可组成单辐射、末端联络、多分段适度联络、两供一备、三供一备和单环网 6 种网架结构。负荷为配电台区接入 500 kW RLC 可调负载; 组态式试验监控主站实现试验场景一键顺控和“五遥”功能(遥信、遥测、遥控、遥调、遥视)。

中性点接地切换装置可实现 3 种中性点接地方式灵活切换, 其主要由 10 kV 母线、开关柜、小电阻成套装置和消弧线圈成套装置等组成; 通过开关柜合分实现小电阻成套装置、消弧线圈成套装置的接入与退出, 对应实现配电网中性点不接地、中性点经小电阻接地、中性点经消弧线圈接地 3 种接地方式。



图 2 真型配电网试验平台整体布置图

Fig. 2 Overall layout of real distribution network test platform



图3 网架拓扑结构图

Fig. 3 Structure diagram of network topology

故障灵活接入装置,如图4所示,其主要由10 kV柱上断路器、互感器、隔离开关、配电终端FTU、录波装置和故障接地点等组成。故障灵活接入装置可实现在试验平台中网架上灵活接入不同故障,其灵活性表现在两个方面,一是故障接入点的灵活选取,二是不同接地故障类型的灵活设置。故障接入点的灵活选取,在网架上不同位置设置6个接地点,分别设在线路的20%、40%以及60%处;不同故障位置配合,可实现单点、多点故障,线路首端、中部、末端故障,干线、支线故障等7种故障位置的设置。不同接地故障类型的灵活设置,在每个故障接地点处,通过图2网架中独立配置的6台断路器(HW-GZJR01-026/053/077和HW-GZJR02-025/054/078)分合实现故障接入与退出,可灵活复现金属性、弧光、间歇、瞬时、不同过渡电阻、高阻接地(水泥、沥青、草地、土地、砂石等)、相间经地短路等11种故障类型。



图4 配电网故障灵活接入装置现场图

Fig. 4 Field diagram of distribution network fault flexible access device

2.2 真型试验的试品接入与故障点准备

10 kV 一二次融合成套柱上断路器接入真型配电网试验平台开展真型试验,需要2台一二次融合成套柱上断路器分别接入1回线路(JKZX01)和2回(JKZX02)线路;为了增加试验效率,将一二次融合成套柱上断路器放在试验场内部专用试验区进线接线;将线路中原有柱上断路器(HW-JKZX01-026和HW-JKZX02-025)分断,以及断路器两侧的隔离开关分断,退出原有断路器;每台一二次融合成套柱上断路器被试品两侧新增2个隔离开关,并通过2条10 kV电缆将被试品与线路连接,实现替换原有断路器接入网架;例如:在线路的6个单相接地故障点中,选取线路JKZX02的末端故障点为接地点,经断路器HW-GZJR02-078控制接地;一二次融合成套柱上断路器试验接线原理图,如图5所示。

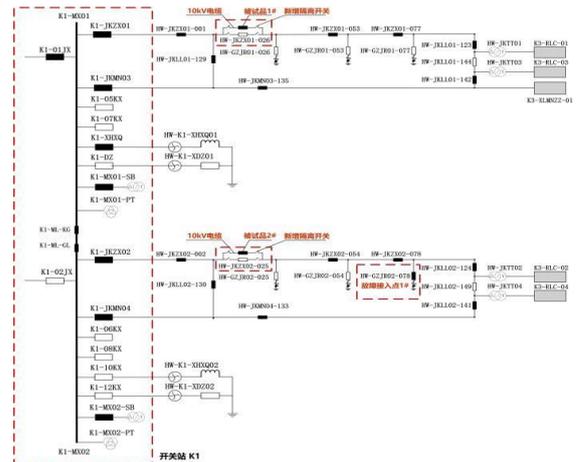


图5 一二次融合成套柱上断路器试验接线图

Fig. 5 Test wiring diagram of primary and secondary fusion complete column circuit breaker

选取配电网单相接地故障接入点,预先将不同过渡电阻、弧光模拟装置串入接地点回路,通过组态式试验监控主站远程操作故障点接入断路器HW-GZJR02-078,合闸实现单相接地故障,分闸退出单相接地故障。一二次融合成套柱上断路器试验现场接线图如图6所示。

3 一二次融合成套柱上断路器真型试验

3.1 试验测试方法

为正确、系统地开展一二次融合成套柱上断路器对单相接地故障处置性能的测试与比对,保证测试的安全性以及测试结果的准确性与有效性,试验步骤主要分为试验前准备、试验测试、试验结束。试验前准备:确认系统运行方式和保护方式,校核设备与试验环境;试验测试:发生单相接地故障,



图 6 一二次融合成套柱上断路器试验现场接线图

Fig. 6 Test onsite wiring diagram of primary and secondary fusion complete column circuit breaker

录取试验波形；试验结束：分断试验电源，核对设备分断状态，对电容型设备放电，验电后挂接地线。单相接地故障处置试验测试项目与要求如表 2 所示。

3.2 试验场景设置

由于城市配电网对单相接地故障处置要求准确率高、处置快，避免单相接地故障发展为相间故障或起火等隐患；试验设置场景选取城市电缆网或架空电缆混合网架进行模拟；选取中性点经消弧线圈接地方式，消弧线圈对系统接地故障容性电流进行补偿，消弧线圈通常处于过补偿状态，使单相接地故障较为明显的暂态特征变短，此场景增加了选线难度；可对一二次融合成套断路器的接地故障处置功能进行有效考核；因此，选取消弧线圈接地方式，未选中性点经小电阻接地场景，小电阻接地系统靠零序电流保护跳闸实现单相接地故障处置，该技术相对成熟；为了确保被试品在同等条件下考核，采用过渡电阻(1 kΩ、2 kΩ)接地方式进行考核；不采用水泥、沥青、草地、土地、砂石等重复性不好的单相接地故障，单相接地故障次数的增加会使水泥、沥青、草地、土地、砂石等接地点过渡电阻逐渐变大。

试验前对真型配电网试验平台开展设置与确认。

(1) 中性点接地方式设置：经消弧线圈接地；

(2) 网架结构：单辐射结构，4 条出线；

(3) 系统容性电流设置：109 A；

(4) 消弧线圈档位设置：12 档，116.89 A；

(5) 单相接地故障类型设置：经 1 kΩ、2 kΩ 过渡电阻接地；

(6) 故障点设置：选取 JKZX02 线路(078 号杆)位置；

(7) 故障点相别设置：C 相；

(8) 故障持续时间设置：5 s；

(9) 保护装置设置：站内开关投过流与速断保护。

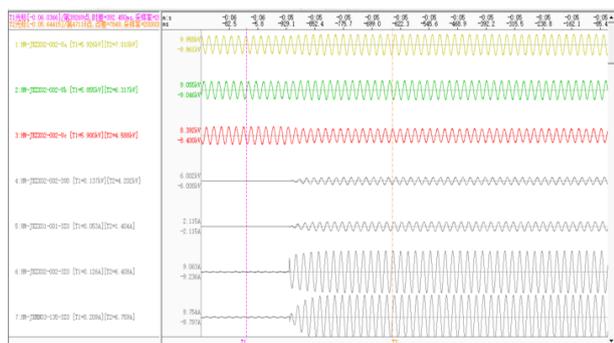
表 2 试验测试项目与要求
Table 2 Test item and requirement

序号	试验项目	试验内容	试验要求
1	外观检查	(1) 开关本体、配电终端有独立保护接地端子，接地螺栓直径不小于 6 mm，并可以和大地牢固连接，接地端子有明显的接地标识	(1) 成套设备部件配置齐全 (2) 各部件外观良好
		(2) 外接端口采用航空接插件，一次设备与配电馈线终端连接良好	
		(3) 馈线终端底部上具备外部可见的运行指示灯和线路故障指示灯，运行指示灯为绿色，线路故障指示灯为红色	
		(4) 采用 SF ₆ 灭弧的开关，壳体上应有位于在地面易观察的、明显的气压异常指示	
2	一二次回路连接检查	(1) 对一次开关设备本体、馈线终端、互感器等三部分进行连接，在馈线终端上就地操作开关分闸、合闸 3 次，确保一二次回路、储能回路等正常，设备正常工作	(1) 设备就地分合闸 3 次，动作正常，分合闸状态显示正常 (2) 初始状态确认为合闸 (3) 投入就地故障保护的软压板和硬压板
		(2) 一二次融合设备初始状态为合闸状态	
		(3) 投入就地故障保护的软压板和硬压板	
3	单相接地故障处置真型试验	(1) 设置中性点接地方式	(1) 故障线路被试品正确选线跳闸 (2) 正常线路被试品未动作 (3) 故障线路故障处置的整组动作时间小于 100 ms
		(2) 设置网架结构	
		(3) 设置线路电容电流水平	
		(4) 设置消弧线圈档位	
		(5) 设置单相接地故障类型	
		(6) 设置故障点位置	
		(7) 设置故障点相别	
		(8) 设置故障持续时间	
		(9) 设置保护装置	

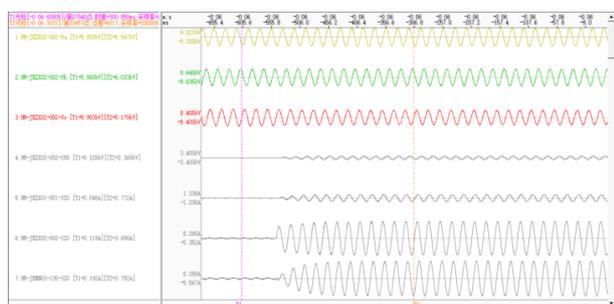
3.3 试验结果分析

配电网中性点经消弧线圈接地，开关站母线带 4 条单辐射线路(JKZX01 线路、JKZX02 线路、JKMN03 线路和 JKMN04 线路)，故障点发生在 JKZX02 线路 078 号杆的 C 相，对单相接地故障过程进行录波，图 7 所示为故障持续时间 1 s 内的录波图，图 7(a)为单相经 1 kΩ 过渡电阻接地故障录波图，在 JKZX02 线路 C 相发生单相接地故障。单相接地故障发生前：母线零序电压 0.137 kV，C 相电压 5.900 kV，JKZX02 线路零序电流 0.126 A；发生

单相接地故障后: 母线零序电压 4.202 kV, C 相电压 4.588 kV, JKZX02 线路零序电流 6.408 A, 故障点残流 4.476 A; 故障特征在首周波内, 正常线路零流超前零序电压, 故障线路零流滞后零序电压; 2 个周波左右消弧线圈进入完全补偿, 影响暂态特征, 故障线路和正常线路零序电流都超前零序电压, 故障线路特征不再明显。图 7(b)为单相经 2 kΩ 过渡电阻接地故障录波图, JKZX02 线路 C 相发生单相接地故障, 单相接地故障发生前: 母线零序电压 0.128 kV, C 相电压 5.903 kV, JKZX02 线路零序电流 0.119 A; 发生单相接地故障后: 母线零序电压 2.369 kV, C 相电压 5.179 kV, JKZX02 线路零序电流 3.696 A, 故障点残流 2.563 A; 故障特征同上述, 但由于接地过渡电阻变大, 暂态特征突变幅值变小, 故障过程达到稳态时间变长。故障线路的馈线终端在单相接地故障 5 s 后发分闸信号, 断路器跳闸, 切断单相接地故障; 正常线路的馈线终端不发动作信号, 正常线路的断路器不动作。



(a) 单相经 1 kΩ 过渡电阻接地故障



(b) 单相经 2 kΩ 过渡电阻接地故障

图 7 配电网单相接地故障录波图

Fig. 7 Record waveform of single phase earth fault in distribution network

对一二次融合成套柱上断路器开展真型试验测试, 发现 9 个问题, 其中外观检查发现 4 个问题(不合格率 16%): 外观破损、互感器极性错误、无进线侧出线侧标识、IP 和点表配置错误; 一二次连接回

路检查发现 2 个问题(不合格率 4%): 开关储能后 FTU 未显示, 开关本体不能电动储能; 单相接地故障处置发现 3 个问题(不合格率 55%): 故障线路未能选线跳闸、正常线路误动跳闸、整组动作时间超时; 在已开展单相接地故障试验的被试品中, 其经 1 kΩ 单相接地故障处置准确率为 45%, 经 2 kΩ 单相接地故障处置准确率为 28%。

4 结论

在国家电网公司特高压交流试验基地建设了世界规模最大的 10 kV 真型配电网试验平台, 试验平台具备网架结构多态重构、接地方式灵活切换、试验场景一键顺控、多态故障灵活复现和多元负荷随机接入的能力; 试验平台可实现 3 种中性点接地方式灵活切换, 6 种网架结构多态重构。研发了配电网故障灵活接入装置, 快速复现配电网 11 种故障。实现一二次融合成套柱上断路器被试品快速接入真型配电网试验平台, 提出一二次融合成套柱上断路器单相接地故障处置性能试验项目与考核指标, 完成一二次融合成套柱上断路器单相接地故障处置的真型试验, 通过真型试验发现 9 项合格原因。有效地验证了一二次融合成套柱上断路器的故障处置性能与处置准确率评估, 促进了配电网新技术、新方法的应用, 支撑了配电网供电可靠性进一步提升。

参考文献

- [1] 贺家李, 李永丽, 董新洲, 等. 电力系统继电保护原理[M]. 4 版. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [2] 李振强, 彭庆华, 李辉, 等. 国家电网公司小电流接地情况及故障处理技术[J]. 供用电, 2017, 34(5): 1-6.
LI Zhenqiang, PENG Qinghua, LI Hui, et al. Small current grounding system presentation and fault processing technology of state grid[J]. Distribution & Utilization, 2017, 34(5): 1-6.
- [3] 詹启帆, 李天友, 蔡金锭. 配电网高阻接地故障检测技术综述[J]. 电气技术, 2017, 18(12): 1-7.
ZHAN Qifan, LI Tianyou, CAI Jinding. The review of high impedance fault detecting technology of distribution network[J]. Electrical Engineering, 2017, 18(12): 1-7.
- [4] 邱进, 崔鑫, 田野, 等. 小电流接地配电网弧光高阻接地故障电压特征分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(16): 115-121.
QIU Jin, CUI Xin, TIAN Ye, et al. Analysis of the arc high impedance grounding faults voltage characteristics in non-effective grounding feeders[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(16): 115-121.

- [5] 韦莉珊, 贾文超, 焦彦军. 基于 5 次谐波与导纳不对称度的配电网单相接地选线方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(15): 77-83.
WEI Lishan, JIA Wenchao, JIAO Yanjun. Single-phase fault line selection scheme of a distribution system based on fifth harmonic and admittance asymmetry[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(15): 77-83.
- [6] 林志超, 刘鑫星, 王英民, 等. 基于零序电流比较的小电阻接地系统接地故障保护[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(22): 15-21.
LIN Zhichao, LIU Xinxing, WANG Yingmin, et al. Grounding fault protection based on zero sequence current comparison in low resistance grounding system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(22): 15-21.
- [7] 许庆强, 许扬, 周栋骥, 等. 小电阻接地配电网线路保护单相高阻接地分析[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(9): 91-94, 115.
XU Qingqiang, XU Yang, ZHOU Dongji, et al. Analysis of distribution network line relay protection during single-phase high-resistance grounding faults in low resistance neutral grounded system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(9): 91-94, 115.
- [8] 常仲学, 宋国兵, 王晓卫. 基于零序电压幅值差的配电网断线识别与隔离[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(6): 135-139.
CHANG Zhongxue, SONG Guobing, WANG Xiaowei. Identification and isolation of line breakage fault in distribution network based on zero sequence voltage amplitude differential principle[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(6): 135-139.
- [9] 林雨丰, 薛毓强, 高超, 等. 基于多故障特征量提取的配电网单相接地故障类型识别[J]. 供用电, 2020, 37(6): 40-47, 71.
LIN Yufeng, XUE Yuqiang, GAO Chao, et al. Distribution network single-phase grounding fault type identification based on multi-fault feature extraction[J]. Distribution & Utilization, 2020, 37(6): 40-47, 71.
- [10] 杨帆, 任伟, 沈煜, 等. 消弧线圈并联小电阻系统接地故障灵活处理策略[J]. 供用电, 2019, 36(3): 44-49.
YANG Fan, REN Wei, SHEN Yu, et al. Grounding fault processing strategy in Petersen coil paralleled small resistance grounding system[J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(3): 44-49.
- [11] 束洪春, 彭仕欣, 李斌, 等. 利用测后模拟的谐振接地系统故障选线方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(16): 59-64.
SHU Hongchun, PENG Shixin, LI Bin, et al. A new approach to detect fault line in resonant earthed system using simulation after test[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(16): 59-64.
- [12] 薛永端, 李娟, 陈筱蓓, 等. 谐振接地系统高阻接地故障暂态选线与过渡电阻辨识[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(17): 5037-5048, 5223.
XUE Yongduan, LI Juan, CHEN Xiaoru, et al. Faulty feeder selection and transition resistance identification of high impedance fault in a resonant grounding system using transient signals[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(17): 5037-5048, 5223.
- [13] 张慧芬. 配电网单相接地故障检测技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2006.
ZHANG Huifen. Study on earth fault detection in distribution network[D]. Jinan: Shandong University, 2006.
- [14] 李晓波, 刘宝稳, 王崇林. 谐振接地系统零序电压轨迹及精确控制方法[J]. 电网技术, 2013, 37(9): 2669-2674.
LI Xiaobo, LIU Baowen, WANG Chonglin. Zero-sequence voltage locus of resonant grounded system and its accurate control[J]. Power System Technology, 2013, 37(9): 2669-2674.
- [15] 杨帆, 金鑫, 沈煜, 等. 10 kV 架空配电网接地故障原因模拟试验及特征分析[J]. 供用电, 2019, 36(3): 37-43.
YANG Fan, JIN Xin, SHEN Yu, et al. Simulation test and characteristic analysis of grounding fault causes of 10 kV overhead distribution network[J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(3): 37-43.
- [16] 张宇, 陈乔夫, 程路, 等. 检测配电网电容电流及辨识高阻接地的新方法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(8): 83-87, 101.
ZHANG Yu, CHEN Qiaofu, CHENG Lu, et al. Novel method for measuring capacitive current and distinguishing high-resistance grounding of distributing network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(8): 83-87, 101.
- [17] 曾祥君, 黄明玮, 王文, 等. 配电网三相不平衡过电压有源抑制方法研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(9): 61-69.
ZENG Xiangjun, HUANG Mingwei, WANG Wen, et al. Research on active suppression method of three-phase unbalanced overvoltage for distribution networks[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015,

- 30(9): 61-69.
- [18] 薛永端, 宋伊宁, 刘日亮, 等. 基于暂态功率方向的小电流接地故障处理技术[J]. 供用电, 2018, 35(8): 3-8.
XUE Yongduan, SONG Yining, LIU Riliang, et al. The processing technology of single-phase earth fault based on the transient power direction in non-solidly earthed network[J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(8): 3-8.
- [19] 李辉, 陈江波, 陈维江, 等. 基于真型试验平台的配电网柔性消弧实证测试研究[J]. 供用电, 2021, 38(4): 85-92.
LI Hui, CHEN Jiangbo, CHEN Weijiang, et al. Research on flexible arc suppression technology based on distribution network true test platform[J]. Distribution & Utilization, 2021, 38(4): 85-92.
- [20] 宗剑, 牟龙华, 张鑫, 等. 配电网单相接地故障类型及程度的判据[J]. 电力系统及其自动化学报, 2004, 16(4): 27-29.
ZONG Jian, MU Longhua, ZHANG Xin, et al. Criterion of single-phase ground fault type and its degree for distribution network[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2004, 16(4): 27-29.
- [21] 屈刚, 李长凯. 配电网架空线路断线故障定位[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(12): 35-38.
QU Gang, LI Changkai. Fault locating of non-grounding line break in distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(12): 35-38.
- [22] WEN Fan, YUAN Liao. Wide area measurements based fault detection and location method for transmission lines[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(1): 53-64. DOI: 10.1186/41601-019-0121-9.
- [23] 邹豪, 曾祥君, 喻锬, 等. 基于零序电压调控的故障选线选相新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(15): 69-76.
ZOU Hao, ZENG Xiangjun, YU Kun, et al. A new method of fault line selection and phase selection based on zero sequence voltage regulation[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(15): 69-76.
- [24] 李振兴, 王新, 王鹏飞, 等. 综合工频与特征频率零序导纳角差的选线方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(12): 13-21.
LI Zhenxing, WANG Xin, WANG Pengfei, et al. Line selection method based on the zero-sequence admittance angle difference of power frequency and characteristic frequency[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(12): 13-21.

收稿日期: 2020-08-08; 修回日期: 2020-10-06

作者简介:

李 辉(1982—), 男, 高级工程师, 研究方向为智能配电网技术, 高电压绝缘与试验技术, 输变电设备故障监测与诊断。E-mail: lihui2@epri.sgcc.com.cn

(编辑 葛艳娜)