

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.236102

预防电缆沟起火的小电流接地系统单相接地故障处理

刘健¹, 张薛鸿², 张小庆¹, 张志华¹, 徐丙垠³, 徐阳⁴, 李瑞桂⁵

(1. 国网陕西省电力有限公司电力科学研究院, 陕西 西安 710100; 2. 国网陕西省电力有限公司, 陕西 西安 710048;
3. 山东科汇电力自动化股份有限公司, 山东 淄博 255087; 4. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049;
5. 河北旭辉电气股份有限公司, 河北 石家庄 050035)

摘要: 为避免小电流接地系统单相接地故障引发的电缆沟起火事故, 采用火灾动态仿真分析方法得到了接地故障电弧导致电缆沟引燃的时间与空间阈值。在此基础上阐述了预防电缆沟起火的综合治理措施。论述了兼具相控消弧线圈和预调式消弧线圈优点的相控预调式消弧线圈的实现方式及其实验测试数据。阐述了跨线相继接地故障的处理方法, 包含以暂态量法为主的连续检测过程及以稳态量法为主的增补处理过程。给出了单相接地保护跳闸延时的整定依据及间断性接地故障的处理方法。针对城区和郊区配电线路分别论述了集中智能容错单相接地故障处理方法和基于合闸速断的分布智能单相接地故障处理方法。介绍了在陕西全省 172 座 110 kV 变电站供电区域范围内配电网的整体应用成效, 表明所论述的技术措施的有效性。

关键词: 电缆沟起火; 小电流接地系统; 单相接地; 消弧线圈; 继电保护; 馈线自动化

Treatment of a single-phase grounding fault in a small current grounding system to prevent fire in a cable trench

LIU Jian¹, ZHANG Xuehong², ZHANG Xiaoqing¹, ZHANG Zhihua¹, XU Bingyin³, XU Yang⁴, LI Ruigui⁵

(1. State Grid Shaanxi Electric Power Research Institute, Xi'an 710100, China; 2. State Grid Shaanxi Electric Power Co., Ltd., Xi'an 710048, China; 3. Shandong Kehui Power Automation Co., Ltd., Zibo 255087, China; 4. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 5. Hebei Xuhui Electric Co., Ltd., Shijiazhuang 050035, China)

Abstract: To avoid a cable trench fire caused by a single-phase grounding fault in a small current grounding system, this paper uses a fire dynamic simulation analysis method to define the time and space threshold of cable trench ignition caused by the arc fault. Comprehensive control measures to prevent a cable trench fire are described. We discuss how the method is implemented and the test data of the phase-controlled pre-adjustment arc suppression coil. The advantages of both the phase-controlled arc suppression coil and the pre-adjustment arc suppression coil are described. This paper also describes the processing method for the cross-country earth fault, including a continuous detection process of transients and supplementary processing of the steady-state. The setting basis of single-phase grounding protection trip delay and the treatment method for an intermittent grounding fault are given. We discuss a centralized intelligent fault-tolerant single-phase grounding fault handling method and distributed intelligent single-phase grounding fault handling method based on closing and quick breaking respectively for urban and suburban distribution lines. The effectiveness of the technical measures is demonstrated by the overall application of the distribution network in the power supply area of 172 110 kV substations in Shaanxi province.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China "Key Technologies of Urban Intelligent Distribution Network Protection and Self-healing Control" (No. U1766208).

Key words: cable trench fire accident; small current grounding system; single-phase grounding fault; arc suppression coils; relay protection; feeder automation

0 引言

消弧线圈接地系统与小电阻接地系统相比, 具

有跳闸率低、人身安全性好、改造工作量小等优点^[1-5], 在我国城市配电网中得到了广泛采用。

随着城市配电网规模扩大和电缆化率大幅提高, 大量电缆在电缆沟内密集敷设, 由于电缆单相接地不能及时切除引发电缆沟火灾的风险日益突出。近年来, 西安、重庆、大连等城市曾多次发生

基金项目: 国家自然科学基金项目资助“城市智能配电网保护与自愈控制关键技术”(U1766208)

由于 10 kV 配电电缆单相接地故障引发沟道火灾^[6-9], 导致大面积停电的恶性事件, 严重影响社会正常生产、生活秩序。

为了有效降低电缆单相接地引发沟道火灾导致的大面积停电风险, 本文对电缆沟引燃特性、综合治理措施、新型消弧线圈、复杂接地故障准确检测和快速切除、配电网单相接地故障处理自动化等关键技术问题进行了阐述与分析, 可为小电流接地系统单相接地引发电缆沟起火的整治工作提供全方位的技术支撑, 提升配电网的运行安全性和供电可靠性。

1 电缆沟内电弧的引燃特性

国内外现有的研究主要关注的是引发火灾后的火灾蔓延规律和烟气运动规律^[10], 未研究引发电缆隧道火灾的击穿电弧过程与电缆隧道的火灾动态仿真之间的相关性, 未能揭示单相接地电弧与沟道火灾的时空特性关联关系。

由于试验条件的限制, 对电缆进行全尺寸的燃烧试验难以实现, 一般通过火灾动态仿真计算来研究电缆隧道火灾过程, 主要采用的有区域模型和流体动力学计算模型。

采用流体动力学计算仿真软件 FDS 对由故障电弧引发的电缆隧道火灾进行研究, 采用大涡模拟对火灾时封闭空间烟气湍流运动进行刻画。采用混合分数法的燃烧源模型模拟火灾场景中的火源。

FDS 仿真中采用图 1 所示的典型电缆隧道, 各层电缆支架上共设置有 12 个热电偶 THCP1—THCP12, 在电缆隧道的顶部设置有一个烟气浓度测试装置和一个热释放速率装置, 分别测试电缆隧道内部烟气浓度和热释放速率的动态变化过程。隧道内温度为环境温度 20 °C, 隧道内通常是无风的, 因此不考虑风速的影响。仿真模拟时间长度设置为 1800 s。

电缆隧道内的火灾荷载主要有两部分: 一部分是隧道内故障电缆电弧产生热能构成的火灾荷载; 另一部分是隧道内电缆的绝缘层和护套层燃烧构成的火灾荷载。前者先根据电弧实验结果得出 Kizilcay 模型参数并建立电弧模型, 然后在 PSCAD/EMTDC 平台上搭建含电弧故障的电路模型, 通过对电路模型的分析得出^[11]; 后者根据 SFPE 手册^[12]获得。

将计算区域划分为 0.05 m×0.05 m×0.05 m 的网格, 共有网格数目 50 600 个。由于 10 kV 电缆护套材料聚氯乙烯在 100 °C 左右软化, 在 120~165 °C 开始分解, 110 kV 电缆护套材料聚乙烯的熔点为 105~110 °C。因此设置 100 °C 为 10 kV 电缆的临界

点燃温度, 105 °C 为 110 kV 电缆的临界点燃温度。电缆火灾风险判据如表 1 所示。

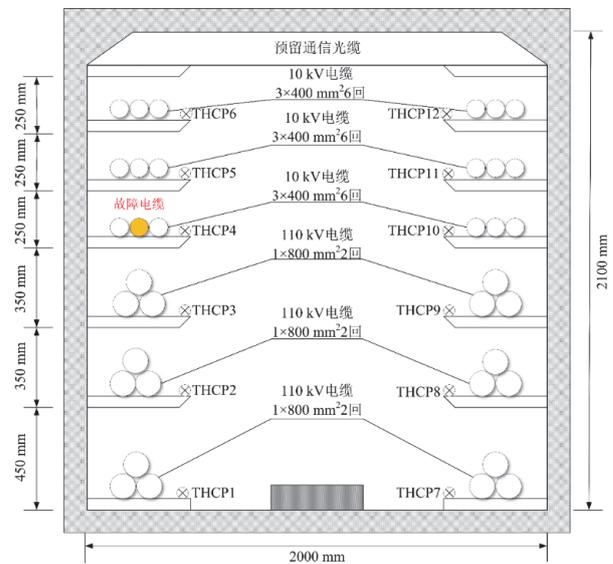


图 1 一个典型的电缆隧道

Fig. 1 A typical cable channel

表 1 电缆火灾风险判据

Table 1 Cable fire risk criterion

电压等级	低风险	中等风险	高风险
10 kV	<100 °C	100~120 °C	≥120 °C
110 kV	<105 °C	—	≥105 °C

对电缆隧道火灾动态仿真的结果进行分析, 在清除了电缆沟中易燃物, 只剩下电力电缆的条件下, 得到如下结论:

1) 故障电流为 200 A 时, 电弧故障发生 14.4 s 后故障电缆同侧上层 50 cm 范围内的电缆被引燃, 电弧故障发生 21.6 s 后故障电缆同侧向上 50~75 cm 范围内的电缆被引燃, 隧道内其余电缆均未被引燃。

2) 当隧道内发生单相电弧接地故障后, 故障电缆上层的 10 kV 电缆火灾风险较高, 故障电缆同侧向上 50 cm 范围内的电缆处于高火灾风险, 故障电缆同侧向上 50~75 cm 范围内的电缆处于中等火灾风险, 故障电缆下层的电缆处于低火灾风险。与故障电缆同隧道敷设的邻侧电缆温度均未超过电缆的临界点燃温度, 因此邻侧电缆处于低火灾风险。

3) 接地电流为 10 A 的情况下, 从产生电弧到故障层电缆被引燃的时间大约为 15 min。

通过上述研究, 揭示了电缆单相接地故障导致火灾的温度场以及热释放速率动态分布规律, 明确了电弧故障导致电缆引燃的时间与空间阈值, 为合理配置预防电缆沟起火的单相接地故障处理“三道

防线”^[13]提供了科学依据。

2 综合治理措施

根据电缆沟内电弧的引燃特性研究结果,制定了针对电缆沟起火的综合治理措施,其要点如下。

1) 开展电缆沟综合治理

清理和隔离易燃物,隔离高压电缆和包覆电缆头,加强带电检测和停电检测,及时发现危急缺陷并加以消除。

2) 构筑变电站内三道防线

第一道防线:消弧线圈。根据本文第1节的研究,将接地故障电弧电流限制到10 A的条件下可大幅增加故障层电缆被引燃所需时间,因此消弧线圈是关键,其作用一方面在于有效补偿电容电流,将故障点残流降低至10 A以下,有助于及时熄灭电弧,即使电弧不能熄灭,也能显著降低电弧能量和破坏力,为后续故障处理争取宝贵的时间;另一方面在于增强自动化装置启动灵敏性^[14]。

第二道防线:站内选线保护。采用集中型小电流接地选线装置,并配置延时跳闸功能。

第三道防线:调度自动推拉选线。作用在于在第二道防线失败时,确保能够在几分钟内切除故障线路,而根据本文第1节的研究,在消弧线圈将接地故障电弧电流限制到10 A的条件下,故障层电缆被引燃的时间大约需要15 min。

3) 站外馈线自动化与站内三道防线协调配合

其作用在于缩小因单相接地故障造成的停电范围、减少停电时间、降低站内跳闸率。

4) 开展现场系统级测试

其作用在于发现提升单相接地故障处理能力建设与改造工程的缺陷,以便及时消除缺陷。现场系统测试相关内容参见文献[15],本文不再赘述。

3 相控预调式消弧线圈

根据电缆沟内电弧的引燃特性研究结果,消弧线圈的补偿作用可将单相接地故障切除的时限要求从秒级延缓至分钟级,从而具有单相接地故障处理第一道防线的作。

消弧线圈按照调节方式可分为预调式和随调式两种。预调式主要包括调匝式^[16]和调容式^[17],随调式主要包括相控式^[18]和磁控电抗器式^[19]。其中调匝式及相控式在现场应用最为广泛。

预调式消弧线圈响应快、启动灵敏性高,但存在档级不连续、补偿精度差的不足。随调式消弧线

圈理论上具有较高的补偿精度,但由于正常工作时远离谐振点,发生接地后进入有效补偿状态需要一定时间,且其耐过渡电阻能力远低于预调式消弧线圈,一旦启动失败接地电流将彻底失去补偿。

因此,综合预调式及相控随调式消弧线圈的优点,提出一种相控预调式消弧线圈,实现了更佳的接地电容电流补偿效果,其原理如图2所示。图中: R_L 为阻尼电阻; SCR_1 为控制补偿电流的晶闸管; SCR_2 为投退阻尼电阻的晶闸管; L_1 和 C_1 分别为3次滤波电抗及电容; L_2 、 C_2 分别为5次滤波电抗及电容; K 为投切滤波支路的开关; CP 为测控装置,采集三相电压、消弧线圈电压 U_0 和回路电流 I_0 ,控制 SCR_1 的导通角 ϕ 。

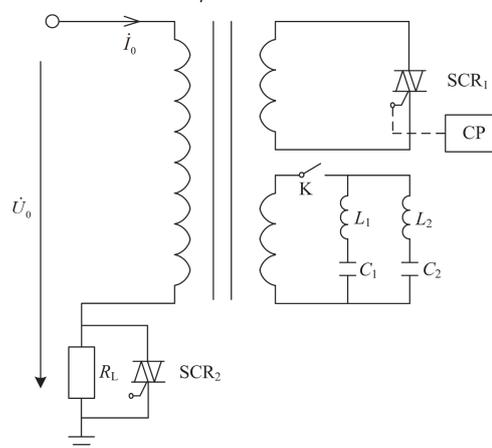


图2 相控预调式消弧线圈原理图

Fig. 2 Schematic diagram of phase-controlled pre-adjustment arc suppression coil

上述相控预调式消弧线圈工作流程为:在系统正常运行时测量系统电容,控制晶闸管导通角将相控消弧线圈补偿量连续精确调节到谐振点附近,采用阻尼电阻抑制谐振,实现预调式消弧线圈的功能;在发生单相接地时,晶闸管迅速导通,短接阻尼电阻,进入有效补偿状态所需时间由传统随调消弧线圈的几百毫秒缩短到60 ms以内,可有效补偿故障点残流至2.5 A以下,远高于传统调匝预调消弧线圈的补偿精度,更加有利于抑制电弧能量和熄弧,并能显著提升单相接地保护装置的灵敏度。

实验室测试相控预调式消弧线圈在不同接地过渡电阻下的补偿效果如表2所示。

由表2可见,0~2000 Ω 不同接地过渡电阻下,所研制的相控预调式消弧线圈的残流稳定时间最大仅为50 ms,远低于传统随调式消弧线圈的数百毫秒,同时故障点残流低至2.1~2.4 A。

表 2 不同接地过渡电阻下的补偿效果测试结果

Table 2 Test results of compensation effect under various grounding resistances

接地过渡电阻/ Ω	残流稳定时间/ms	故障相电压/V	零序电压/V	电容电流/A	电感电流/A	接地残流/A
金属	50	40	5528	18.0	20.1	2.1
200	50	640	5169	17.4	19.7	2.3
500	45	1048	4681	15.1	17.5	2.4
1250	50	3267	3302	12.1	14.5	2.4
2000	50	3267	3302	5.1	7.5	2.4

4 复杂接地故障选线保护

消弧线圈接地系统中的单相接地故障具有一定的复杂性, 依靠传统继电保护技术无法取得令人满意的效果。

近年来, 以暂态量法为代表的小电流接地系统单相接地检测技术^[20-23]取得了长足进展, 正确率超过 90%, 但对于相继接地、间断性接地等复杂接地故障的处理缺乏有效的方法, 有可能造成单相接地故障快速处理第二道防线失守, 从而导致此类故障的电弧持续存在并引发电缆沟起火事故。

4.1 跨线相继接地故障处理

相继故障^[24]是指在一次单相接地故障被检测出来后, 在系统零序电压未恢复正常前, 又发生另一起或几起其他单相接地故障。某变电站小电流接地选线装置一次相继接地故障录波如图 3 所示。

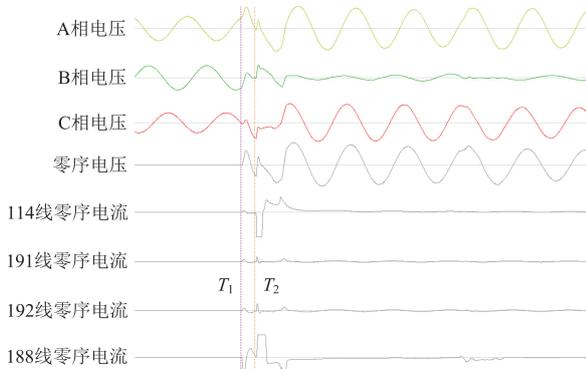


图 3 某变电站相继接地故障录波

Fig. 3 Record wave of successive earth fault of a substation

图 3 中, T_1 时刻系统零序电压开始上升, 188 线暂态零序电流极性与其他线路相反, 符合接地故障线路特征。 T_2 时刻, 114 线暂态零序电流极性与其他线路相反, 说明在 114 线发生第二次接地故障。

相继接地故障少见但并不罕见, 在西安地区连续跟踪记录的 427 起单相接地故障中, 相继接地故障有 12 次, 约占 2.81%, 曾在 1 个月内发生两次因相继故障未切除彻底而引起的电缆沟起火事件。

即使发生了同名相继接地故障形成相间短路

接地, 由于接地过渡电阻的存在, 短路电流往往低于过流保护定值而无法引起保护动作跳闸。

现有单相接地选线装置在投入跳闸功能时, 一般采用零序电压启动, 启动后进行 1 次单相接地检测, 检测出接地线路后进入延时等待并监测零序电压; 若零序电压降至所设置的返回值以下则返回, 否则当预先设置的延时时间到达后, 出口跳闸切除所选中的单相接地线路。

由于在延时等待过程中不再进行单相接地检测, 选线装置无法选出相继接地故障线路, 只能切除已选出的第 1 次接地线路。此时因相继接地故障的存在, 零序电压依然较高, 导致选线装置无法返回并再次启动进行检测, 使相继接地故障进一步失去检测机会。

为了解决相继故障处理问题, 提出以暂态量法为主的连续检测流程和以稳态量法为主的增补故障处理流程。

基于工频有功功率方向的稳态量法仅适用于稳定接地故障检测而不适用于中性点经消弧线圈接地系统的间歇性弧光接地, 而前半波法、暂态方向法等暂态量方法既适用于稳定接地, 也适用于间歇性弧光接地, 因此在连续检测流程中采用暂态量法优先的策略。但是, 在一些情形下, 暂态量特征不够明显, 在暂态量法漏检而已经进入稳态的情形下, 还需要采用基于稳态量法的增补故障处理过程加以补充。

以暂态量法为主的连续检测流程是指在选线装置启动后至跳闸前的延期内, 不断对滑动窗口内(一般取 5~10 ms)的信号应用暂态量法进行检测, 当预先设置的延时时间到达后, 若零序电压不符合返回条件, 则将选出的接地线路全部切除。若暂态量法无法选出任一接地线路, 则再次应用稳态量法进行选线。该方法能够检测出包括间歇性弧光接地在内的大部分相继接地故障线路, 但是在两次接地间隔较短、暂态量微弱、电磁干扰大的情况下仍存在漏检风险。

以稳态量法为主的增补故障处理流程可解决暂

态量法漏检接地故障线路问题。若跳闸后零序电压仍未恢复正常,表明未切除全部接地线路,进入增补处理流程。此时仅在未切除的故障为间歇性接地故障时暂态量法可检测出剩余接地线路,否则只能应用稳态量法检测出剩余接地线路。

在采用稳态量法进行功率方向检测时,其准确性依赖于零序电流互感器的精度,但变电站实际安装的零序电流互感器有时不能满足要求,全面更换不仅工作量较大,而且往往需要利用停电检修的机会进行,更换持续时间较长。在零序电流互感器尚未全面更换的情况下,会对稳态量法的准确性产生一定影响。为此,采取“接近故障判据的线路跳闸”的策略,每次都选出一条线路跳闸,以避免存在接地线路长期未被切除而引起电缆沟起火。在最不利的情况下,此策略相当于进行了一次按判断出的接地可能性从大到小排序的自动推拉选线操作。

基于上述方法,研发出了具有相继接地故障处理能力的选线保护装置并投入运行。

但是,对于极少数的相继接地故障,即使是采用稳态量法增补故障处理后仍无法完全检出,则需通过第三道防线(即调度自动化系统自动推拉)进行切除。

4.2 单相接地保护跳闸延时时间整定

文献[7]虽然建议了我国小电流接地变电站单相接地延时跳闸时间的整定值,但是没有结合实际观测数据论述其合理性。

确定变电站出线断路器的单相接地跳闸延时时间需综合考虑两个方面的因素:一是充分发挥消弧线圈的熄弧作用,因此不宜过短;二是避免长时间永久性单相接地持续存在造成严重后果,不可过长。

文献[25]通过对实际发生的334次单相接地故障接地监测与统计分析发现:熄弧成功未跳闸的约占76.65%;熄弧时间小于1s的占77.16%;熄弧时间在1~2s的占14.62%;熄弧时间在2~3s的占3.81%;熄弧时间在3~4s的占2.93%;熄弧时间在4~5s的占1.48%。

根据上述结果,可将站内跳闸延时时间设置为5s,站外馈线开关跳闸延时时间设置为2~4s。同时考虑到单相接地故障切除后,系统零序电压下降过程需要一定时间,因此单相接地保护时间级差不能参照相间短路过流保护时间级差设置,而需适当加大,通常可以设置为0.5~1s。

4.3 间断性接地故障处理

与间歇性弧光接地不同,间断性接地故障的间断时间更长,通常接地现象消失的间断时间间隔可达若干秒,然后接地现象又会出现。也即:间断性

接地故障是指短时间内多次发生、且每次故障均在接地保护装置出口前消失的接地故障。

对于此类故障,现有接地保护装置将误认为是瞬时性故障而不跳闸。例如,某电缆线路曾在4时17分21秒开始至4时17分44秒结束的23s内,先后发生了11次弧光接地故障,单次持续时间最大210ms,间隔时间最小1s、最大5s以上,选线装置在每次接地时均启动并正确选线,但都由于未达到出口跳闸延时而返回,最终接地电弧导致电缆沟起火。

由4.2节可知,变电站出线开关跳闸延时时间设置为5s,如果每次故障持续时间超过5s,则单相接地保护装置可正常跳闸。因此只需考虑每次故障持续时间小于5s的间断性故障即可。

通过对实际接地故障连续3年监测与统计发现,永久性接地故障中间隔时间在3s以内的约占46.7%,间隔时间在5s以内的约占73.3%,因此可得:

1个间隔在5s以上的概率为 $1 - 73.3\% = 26.7\%$,则2个间隔都在5s以上的概率为 $(1 - 73.3\%)^2 = 7\%$,属于小概率事件。

1个间隔在3s以上的概率为 $1 - 46.7\% = 53.3\%$,则4个间隔都在3s以上的概率为 $(1 - 46.7\%)^4 = 8\%$,属于小概率事件。

同时,考虑到电缆线路一般采用消弧线圈接地方式,随着电弧熄灭,中性点偏移电压逐渐降低、故障相电压逐渐恢复,当故障相电压再次恢复到起弧电压时,即发生下一次弧光接地,考虑到每一次故障都是对电缆的一次伤害,因此起弧电压会随着故障次数的增加逐渐降低,也即故障的间隔时间呈现越来越短的特点。

基于上述假设条件,从排除小概率事件的角度考虑故障时间间隔可能的组合情况。

若发生5次故障共有4个间隔,则排除小概率事件后(即排除这4个间隔都大于3s的小概率事件,那么最不利的情况为存在3个间隔大于3s,1个间隔为3s;排除2个间隔都大于5s的小概率事件,那么这3个大于3s的间隔的最不利情况为存在1个间隔大于5s,2个间隔为5s),则在最不利的情况下,此4个间隔的排序为:大于5s、5s、5s、3s。

若发生6次故障共有5个间隔,则排除小概率事件后(即排除4个间隔都大于3s的小概率事件,那么最不利的情况为存在3个间隔大于3s,另2个间隔为3s;在3个间隔大于3s的间隔中,排除2个间隔都大于5s的小概率事件,那么最不利的情况为存在1个间隔大于5s,2个间隔为5s),则在

最不利的情况下,此5个间隔的排序为:大于5s、5s、5s、3s、3s。

若发生7次故障共有6个间隔,则排除小概率事件后(即排除4个间隔都大于3s的小概率事件,那么最不利的情况为存在3个间隔大于3s,另3个间隔为3s;在3个间隔大于3s的间隔中,排除2个间隔都大于5s的小概率事件,那么最不利的情况为存在1个间隔大于5s,2个间隔为5s),则在最不利的情况下,此6个间隔的排序为:大于5s、5s、5s、3s、3s、3s。

假设设置一个判据,在T时间段内检测到N次间断性接地故障则跳闸,前N-1次都以判断为瞬时性接地故障的时刻为准,第N次以检测到的时刻为准。则可以得出长延时判据,即:在30s内监测到同一线路5次瞬时性接地故障,则直接跳闸。下面分析其性能。

由前所述,在发生了7次间断性接地故障时,其6个间隔的排序为:大于5s、5s、5s、3s、3s、3s,也即当检测到后5次故障时对应4个间隔(分别为5s、3s、3s、3s),每次故障持续时间取极端时间5s(若超过5s则直接跳闸而不会被判为瞬时性故障),则从倒数第5次故障被判为瞬时性故障开始计时,中间3次故障总共持续15s,4个间隔的时间之和为5+3+3+3=14s,加上故障持续时间共为29s,刚好满足30s的检测时间段。也即若采用长延时判据,一般可以在发生了7次间断性接地故障的时间之内将其检测出来并跳闸切除。上述分析的时序图如图4所示。

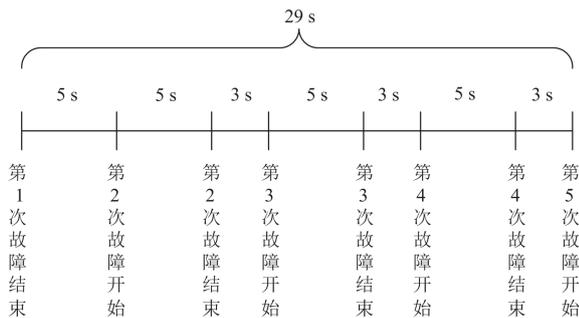


图4 间断性故障发展时序

Fig. 4 Sequence of the development of intermittent faults

为了避免长延时判据的漏判,利用随着时间的推移故障间隔时间越来越短的规律,可同时设置短延时判据,即:在10s内监测同一线路3次瞬时性接地故障,则直接跳闸。一些电弧能量比较大的间断性接地故障,其间隔时间往往较短,采用短延时判据可以更快地切除这类间断性接地故障。在实际

应用中,长延时判据和短延时判据一般设置为“或”的关系,满足任一判据即出口跳闸。

将上述判据在现场单相接地故障处理装置部署后,再未发生过将间断性弧光接地判为瞬时性故障而不动作的现象。

5 站内站外协调配合

应用相控预调式消弧线圈及具有复杂接地故障选线保护功能装置,能够有效避免因单相接地持续存在而导致的电缆沟“火烧连营”等大范围停电的恶性事件。但是变电站内会直接跳开出线开关,造成馈线全线停电,给供电可靠性带来较大压力。

为了进一步缩小永久性单相接地时的影响范围,还需要在变电站外馈线上配置针对单相接地故障的继电保护和馈线自动化功能,通过站内站外协调配合,减少变电站内出线开关跳闸,避免造成影响范围较大的全线停电事件。

由4.3节可知,变电站出线开关跳闸延时可设为5s,因而配电线路沿线具备配置单相接地保护并与变电站内单相接地保护实现时间级差配合的条件,从而实现单相接地故障选择性跳闸切除。但是单相接地保护只能将故障区域与其上游馈线隔离并维持上游健全区域供电,而故障区域与下游健全区域的隔离以及下游健全区域的供电恢复还需要借助馈线自动化实现。

城区配电网可以采用基于配电自动化主站的集中智能馈线自动化方案,配电终端根据检测判据的满足程度,评价所采用的各种检测算法判断结果的可信度,综合后得出单相接地故障位于区内(在其下游)还是区外(不在其下游)的判断结果,并上报配电自动化主站。主站采取最大似然估计^[26]实现单相接地故障容错定位,以降低故障信息误报、漏报对故障定位的影响。

对于第*i*个故障位置假设,配电自动化主站根据配电终端上报的单相接地故障检测信息,可以得到该故障位置假设正确的条件概率 $p_h(i)$ 为

$$p_h(i) = \prod_{j \in A} P_{C,j} \prod_{k \in \Omega} (1 - P_{C,k}) \quad (1)$$

式中: A 为与故障位置假设相符的单相接地故障检测信息的集合; Ω 为与故障位置假设不相符的单相接地故障检测信息的集合; $P_{C,j}$ 为*A*内第*j*个单相接地故障检测信息上报正确概率; $P_{C,k}$ 为*Ω*内第*k*个单相接地故障检测信息上报正确概率。

综合各种接地故障位置假设,第*i*个接地故障位置假设正确的可能性 $P_h(i)$ 为

$$P_h(i) = \frac{p_h(i)}{\sum_{m=1}^N p_h(m)} \quad (2)$$

式中, N 为可能的接地故障位置假设的总数。

最终配电自动化主站将可能性最大的接地故障假设作为接地故障定位结果。

城郊配电网以架空线路为主,可采用基于合闸速断原理^[23]的分布智能单相接地故障处理方法。通过对分段开关设置失压分闸、一侧带电后延时重合以及合闸后零序电压越限加速保护机制,可不依赖通信,在仅需一次重合的情况下恢复故障区域上游供电;通过对联络开关设置一侧失压延时合闸以及合闸后零序电压越限加速保护机制自动恢复故障区域下游供电。

以图5所示的“手拉手”配电线路为例:A为变电站出线断路器,具有单相接地保护功能,仅配置一次重合闸功能,重合延时时间为5s;分段开关B、C和D采用增加合闸瞬时速断零序电压保护功能的合闸速断方式分段器,均设置在第I套功能,其 X 时限均整定为3s, Y 时限均整定为2s;联络开关E亦采用增加合闸瞬时速断零序电压保护功能的合闸速断方式分段器,设置在第II套功能,其 X_L 时限整定为25s, Y_L 时限整定为2s。

假设在c区段发生永久性故障后,A单相接地保护动作,其跳闸后B、C、D因失压分闸,如图5(a)所示;5s后A重合将电送至B,因A在 Y 时限内未检测到零序电压超过阈值,关闭瞬时速断零序电压保护功能。

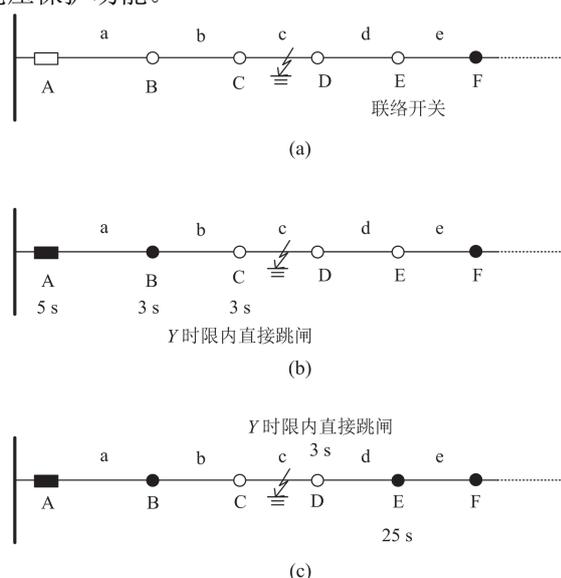


图5 基于合闸速断原理单相接地故障处理

Fig. 5 Single-phase grounding fault treatment based on the principle of closing and quick-break

3s后B的 X 时限到达,合闸并将电送到C;因B合闸后在 Y 时限内未检测到零序电压超过阈值,B关闭瞬时速断零序电压保护功能;再3s后,C因 X 时限到达合到单相接地故障点,其合闸后 Y 时限内检测到零序电压超过阈值,因此跳闸并闭锁在分闸状态;A单相接地保护因延时时间未到而不跳闸,如图5(b)所示。

在A单相接地保护动作跳闸后,经过25s的 X_L 时限,联络开关E自动合闸;又过3s后D的 X 时限到达并合闸到单相接地故障点,随后因在 Y 时限内检测到零序电压超过阈值,跳闸并闭锁在分闸状态;对侧变电站出线断路器的单相接地保护因延时时间未到不跳闸。至此故障处理过程结束,如图5(c)所示。

6 应用成效

2020年1月起在西安三环内56座110kV变电站开展了单相接地故障快速处置三道防线建设,随后在陕西全省172座110kV变电站推广应用。

根据2020年6月—2022年6月期间2964条录波记录,在改造完成区域内的单相接地故障中,由于消弧线圈熄弧成功而没有引起跳闸的占76.6%,单相接地保护正确跳闸的占22.4%,自动推拉跳闸占1%,三道防线整体成功率达到100%,选线跳闸准确率达到95.8%。完成改造的区域再未发生电缆沟起火的恶性事故。

7 结论

本文在电缆沟引燃特性研究分析的基础上,分别论述了相控预调式消弧线圈、具有复杂接地故障处理能力的新型选线保护、配电线路单相接地故障处理自动化技术以及现场系统级测试设备等关键技术,建立了能够有效预防电缆沟火灾的单相接地故障高效处置技术体系,包含以下主要内容:

1) 通过火灾动态仿真方法,揭示了由电缆单相接地故障导致火灾的温度场以及热释放速率动态分布规律,明确了电弧故障导致电缆引燃的时间与空间阈值,为故障处理的动作时间设置提供了理论依据。

2) 采用的相控预调式消弧线圈在保留相控消弧线圈高补偿精度优点的同时,提升了其耐过渡电阻能力和补偿速度。

3) 综合利用暂态量和稳态量原理,提出了跨线相继故障、间断性电弧故障等复杂接地故障的检测逻辑,并通过熄弧时间统计数据合理确定单相接地保护跳闸延时,给出了单相接地保护时间级差设置

建议,提高了单相接地选线保护的适用性和选择性。

4) 为了在降低电缆沟起火风险的前提下提高供电可靠性,综合考虑城乡配电网差异,针对城区配电线路,采用基于智能终端就地两值化检测结果和最大匹配原则的集中智能容错单相接地定位方法;针对城郊配电线路,采用基于合闸速断原理分布智能故障处理方法,实现了接地故障准确、快速、就近隔离。

参考文献

- [1] 要焕年,曹梅月. 电力系统谐振接地[M]. 2版. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [2] 徐丙垠. 配电网继电保护与自动化[M]. 北京: 中国电力出版社, 2017.
- [3] 徐丙垠,李天友,薛永端. 配电网触电保护与中性点接地方式[J]. 供用电, 2017, 34(5): 21-26.
XU Bingyin, LI Tianyou, XUE Yongduan. Electric shock protection and earthing methods of distribution networks[J]. Distribution & Utilization, 2017, 34(5): 21-26.
- [4] 陈桥山,王媛媛,方涛,等. 基于相间电流突变特征的可调消弧线圈接地系统选线方法[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(2): 47-53.
CHEN Qiaoshan, WANG Yuanyuan, FANG Tao, et al. A faulty feeder selection method for adjustable arc-suppression coil system based on phase-to-phase current mutation feature[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(2): 47-53.
- [5] 周焱,刘建政,张琦雪,等. 大型水轮发电机消弧线圈接地方式下的注入式定子接地保护新方案[J]. 中国电力, 2021, 54(12): 112-120.
ZHOU Lang, LIU Jianzheng, ZHANG Qixue, et al. A new method for stator ground fault protection with voltage injection on large hydro generators grounded by arc suppression coils[J]. Electric Power, 2021, 54(12): 112-120.
- [6] 王宾,崔鑫. 中性点经消弧线圈接地配电网弧光高阻接地故障非线性建模及故障解析分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(11): 3864-3872.
WANG Bin, CUI Xin. Nonlinear modeling and analytical analysis of arc high resistance grounding fault in distribution network with neutral grounding via arc suppression coil[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(11): 3864-3872.
- [7] 刘健,王毅钊,张小庆,等. 配电网单相接地故障处理保护化关键技术[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(22): 18-23.
LIU Jian, WANG Yizhao, ZHANG Xiaoqing, et al. Key technologies on single-phase earthed fault protection for a distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(22): 18-23.
- [8] 曾祥君,王福恒,李理,等. 中压配电网接地故障快速安全处置技术[J]. 供用电, 2021, 38(12): 2-8, 14.
ZENG Xiangjun, WANG Fuheng, LI Li, et al. Fast and safe disposal technology of grounding fault in medium voltage distribution network[J]. Distribution & Utilization, 2021, 38(12): 2-8, 14.
- [9] 胡冰颖,李梅. 基于零模线模时差的配电网双端行波故障测距[J]. 电力工程技术, 2021, 40(2): 114-120.
HU Bingying, LI Mei. Double ended traveling wave fault location in distribution network based on the time difference of zero-mode and line-mode[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(2): 114-120.
- [10] NOWLEN S P, MCGRATTAN K B, WOODS H R, et al. The cable response to live fire (carolfire) project: advancing the cable fire response knowledge base[R]. Washington DC, USA: Nuclear Regulatory Commission, 2008.
- [11] 刘素蓉,胡钰骁,郑建康,等. 10 kV 电缆单相电弧接地故障引燃隧道的火灾动态仿真[J]. 高电压技术, 2021, 47(12): 4341-4348.
LIU Surong, HU Yuxiao, ZHENG Jiankang, et al. Dynamics simulation of 10 kV cable tunnel fire for single-phase arc grounding fault[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(12): 4341-4348.
- [12] HURLEY M J, GOTTUK D, HARADA K, et al. SFPE handbook of fire protection engineering[M]. Springer, 2015.
- [13] 刘健,张小庆,王毅钊. 筑牢变电站单相接地故障处理三道防线[J]. 供用电, 2021, 38(12): 37-41.
LIU Jian, ZHANG Xiaoqing, WANG Yizhao. Establishment of three defensive lines in substations for single-phase earth fault protection of low-current grounded systems[J]. Distribution & Utilization, 2021, 38(12): 37-41.
- [14] 袁超,薛永端,梅睿,等. 不同接地方式下配电网绝缘监察的灵敏性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(3): 130-137.
YUAN Chao, XUE Yongduan, MEI Rui, et al. Sensitivity analysis of insulation monitoring of distribution network under different grounding modes[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(3): 130-137.
- [15] 刘健,张小庆,申巍,等. 中性点非有效接地配电网的单相接地定位能力测试技术[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(1): 138-143.
LIU Jian, ZHANG Xiaoqing, SHEN Wei, et al. Performance testing of single phase to earth fault location for distribution network with neutral point non-effectively grounded systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(1): 138-143.

- [16] 杨廷胜, 苗厚利, 李志军. 基于电力电子开关的快速调匝式消弧线圈研究[J]. 电测与仪表, 2021, 58(5): 62-69.
YANG Tingsheng, MIAO Houli, LI Zhijun. Research of fast adjustable arc suppression coil based on power electronic switch[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(5): 62-69.
- [17] 公茂法, 葛卉婷, 林煜清, 等. 10 kV 消弧线圈补偿系统的应用研究[J]. 电测与仪表, 2015, 52(17): 84-87.
GONG Maofa, GE Huiting, LIN Yuqing, et al. Application research of arc suppression coil compensation system in 10 kV[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2015, 52(17): 84-87.
- [18] 桑振华, 苗晓鹏, 李晓波, 等. 基于调相法的消弧线圈自动跟踪补偿的测量方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(10): 104-107.
SANG Zhenhua, MIAO Xiaopeng, LI Xiaobo, et al. A new measurement method of automatic tracking compensation arc-suppression coil based on the phase modulation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(10): 104-107.
- [19] 蔡旭. 新型偏磁式消弧线圈及其控制[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(10): 32-35.
CAI Xu. A new arc-suppression coil with magnetic bias and its control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(10): 32-35.
- [20] 薛永端, 李娟, 徐丙垠. 中性点经消弧线圈接地系统小电流接地故障暂态等值电路及暂态分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(22): 5703-5714.
XUE Yongduan, LI Juan, XU Bingyin. Transient equivalent circuit and transient analysis of single-phase earth fault in arc suppression coil grounded system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(22): 5703-5714.
- [21] 郭清滔, 吴田. 小电流接地系统故障选线方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(2): 146-152.
GUO Qingtao, WU Tian. Survey of the methods to select fault line in neutral point ineffectively grounded power system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(2): 146-152.
- [22] 魏科文, 张靖, 何宇, 等. 基于 VMD 和相关性聚类的谐振接地系统单相接地故障选线[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(22): 105-113.
WEI Kewen, ZHANG Jing, HE Yu, et al. Single-phase grounding fault line selection in a resonant grounding system based on VMD and correlation clustering[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(22): 105-113.
- [23] 邵文权, 程畅, 卫晓辉, 等. 利用暂态电流 Hausdorff 距离的谐振配电网故障选线方案[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(8): 33-42.
SHAO Wenquan, CHENG Chang, WEI Xiaohui, et al. Fault line selection scheme using the Hausdorff distance of transient current in resonant distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(8): 33-42.
- [24] 姜博, 董新洲, 施慎行. 近似熵在配电网继发性故障检测中的应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(17): 15-21.
JIANG Bo, DONG Xinzhou, SHI Shenxing. Application of approximate entropy to cross-country fault detection in distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(17): 15-21.
- [25] 刘健, 王毅钊, 张小庆, 等. 中性点经消弧线圈接地系统单相接地故障数据分析[J]. 供用电, 2022, 39(4): 40-44.
LIU Jian, WANG Yizhao, ZHANG Xiaoqing, et al. Statistics of single-phase grounding faults with arc suppression coil grounding systems[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(4): 40-44.
- [26] 刘健, 张志华, 张小庆, 等. 基于配电自动化系统的单相接地定位[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(1): 145-149.
LIU Jian, ZHANG Zhihua, ZHANG Xiaoqing, et al. Single phase to ground fault location based on distribution automation systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(1): 145-149.
- [27] 程红丽, 张伟, 刘健. 合闸速断方式馈线自动化的改进与整定[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(15): 35-39.
CHENG Hongli, ZHANG Wei, LIU Jian. Improvement of reclosing and instantaneous protection based feeder automation and its setting approach[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(15): 35-39.

收稿日期: 2022-09-22; 修回日期: 2023-02-01

作者简介:

刘健(1967—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为配电网及其自动化技术; E-mail: powersys@263.net

张薛鸿(1967—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 长期从事电网运维检修管理方面工作; E-mail: 53205001@qq.com

张小庆(1971—), 男, 教授级高级工程师, 主要研究方向为配电网故障处理技术。E-mail: 13992837136@163.com

(编辑 周金梅)