

DOI: 10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2024.05.013

不同接地方式下 10 kV 配电网主动干预型消弧装置 技术对比

王呈轩¹, 宫瑞邦¹, 程俊文¹, 张雷亮¹, 刘文清²

(1. 国网新疆电力有限公司电力科学研究院, 乌鲁木齐 830011;

2. 国网湖南省电力有限公司信息通信分公司, 长沙 410029)

摘要: 为进一步提升配电网单相接地故障处置能力, 变电站内安装主动干预型消弧装置, 然而, 不同接地方式下主动干预型消弧装置的运行状态及故障处置能力也略有不同。本文对比了不同接地方式下主动干预型消弧装置的防误动性能、非同相接地短路应对性能、接地体周围电位抬升风险、熄弧能力、动作时间及防范铁磁谐振能力, 并且从变电站接线方式的改造和主动干预性消弧装置的选择提出了相应的建议。对不同运行场景下主动干预型消弧装置的选择提供了一定的理论依据, 具有一定的实际工程价值。

关键词: 配电网; 主动干预型消弧装置; 单相接地; 变电站改造

Technical Comparison of Active Intervention Arc Suppression Device for 10 kV Distribution Network Under Different Grounding Modes

WANG Chengxuan¹, GONG Ruibang¹, CHENG Junwen¹, ZHANG Leiliang¹, LIU Wenqing²

(1. Electric Power Research Institute of State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830011, China; 2. State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd. Xintong Branch, Changsha 410029, China)

Abstract: The active intervention arc suppression device is installed inside the substation in order to improve the single-phase grounding fault handling capability of distribution network. However, the operation status and fault handling ability of the active intervention arc suppression device under different wiring modes are slightly different. In this paper, the misoperation resistance performance, non in-phase grounding short circuit response performance, risk of potential rise around the grounding body, arc extinguishing ability, operation time, and anti ferromagnetic resonance ability of active intervention arc suppression devices under different grounding methods are compared, and the corresponding suggestions in terms of modification of wiring mode of substation and selection of active intervention arc suppression device are proposed. It provides certain theoretical basis for the selection of the intervention arc suppression device and has a certain actual engineering value.

Keywords: active intervention arc suppression device; distribution network; single-phase grounding; substation transformation

0 引言

随着电网技术的蓬勃发展, 国网公司针对单相接地故障的处置要求已从带电运行两小时升级至以更快的速度完成故障的定位及隔离工作^[1-3], 随着经济体量及电网容量的不断扩大, 原有变电站接线方式及消弧线圈的容量逐渐难以满足现代电网的

要求, 因此变电站的升级改造工作正持续推进^[4-6]。

近年来, 为进一步提高单相接地故障的处置效率, 安装于变电站站内的主动干预型消弧装置正逐步走进大众视野^[7-8]。其优势在于接地保护回路直接与系统接地网相连, 装置的接地保护动作时将故障点电流迅速转移至站内, 通过降低接地相电压的方法快速熄灭单相接地故障电弧^[9-11]。并且当装置

收稿日期: 2024-01-08

基金项目: 国网新疆电力科学研究院项目配电自动化主站 IV 区接地故障分析功能完善技术(B130DK230002)。

处于有效保护状态时,将通过不断计算系统的接地阻抗,若接地阻抗恢复至正常状态,则判断接地故障消失,进而控制单相接地断路器分闸,实现单相接地保护自动复归功能^[12-13]。

目前,常见的变电站接线方式包括不接地、经消弧线圈接地及经小电阻接地^[14-18],其适用范围分别为电容电流不大于 10 A 的配电网;电容电流大于 10 A,且需在接地故障条件下运行的 35 kV 及 66 kV 系统;不容易发生瞬时性单相接地故障且系统电容电流大于 150 A 的城市配电网^[19-21]。随着电网体量的日渐增加,旧变电站中性点接地方式改造势在必行,其改造方式主要包括加装消弧线圈、原有线圈增容等方式,随着电网设备的推陈出新,主动干预型消弧装置提供了一种新的改造方式^[22-27]。

然而,主动干预型消弧装置并不适用于所有类型的电力网络,应根据变电站具体的出线参数及运行状态进行综合研判,确定适配度更高的接线方式,从而更好的完成变电站接线方式的改造工作^[28-33]。与此同时,不同类型的主动干预型消弧装置的动作原理及运行效果也略有不同,应根据各类变电站的实际需求灵活选择,从而更充分的发挥主动干预型消弧装置的优势。

为解决上述问题,本文首先介绍了主动干预型消弧装置的原理,其次对比了两类装置的运行参数及技术手段,最后对装置的使用场合及选择方式给出了相应的建议。本文具体工作内容如下:对主动干预型消弧装置的通用结构及动作原理进行了详细说明;并从不同运行状态下可能存在的风险点作为切入点,比较了两种不同接地类型装置的应对技术,具体包括:防误动性能、非同相接地短路应对性能、接地体周围电位抬升风险、熄弧能力、动作时间及防范铁磁谐振能力;结合装置原理及技术比较结果,说明了不同类型装置的适用场所及选择方式,并对变电站的改造和主动干预型消弧装置的选择提出了相应的建议。

1 主动干预型消弧装置原理介绍

1.1 基本结构

主动干预型消弧装置又称接地故障转移装置。基本原理是在采用中性点不接地方式中压配电网中,主动干预型消弧装置安装于变电站母线侧,当发生单相接地故障时,通过闭合故障相的快速接地开关,将母线或线路上流经接地点的电容电流立即转移到装置的主动接地点上。主动干预型

消弧装置的具体结构见图 1^[34]。

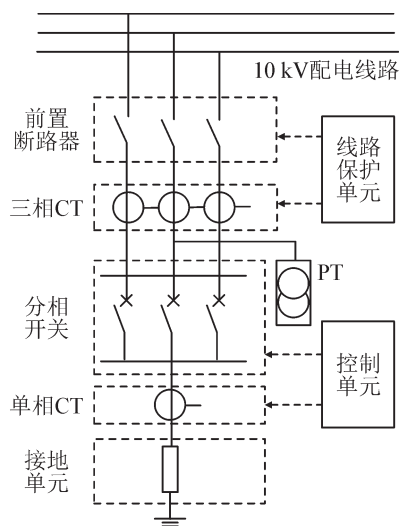


图1 主动干预型消弧装置结构图
Fig. 1 Structural diagram of active intervention arc suppression device

由图 1 可知,主动干预型消弧装置结构主要由前置断路器、电流互感器、电压互感器、控制单元、分相开关、接地元件组成^[35]。其中接地方式的不同会对装置的性能及故障处置能力带来不同的影响,目前常见的接地方式主要包括金属性接地和经低励磁阻抗变压器接地。

1.2 动作过程

主动干预型消弧装置在发生单相接地故障时的工作原理见图 2。

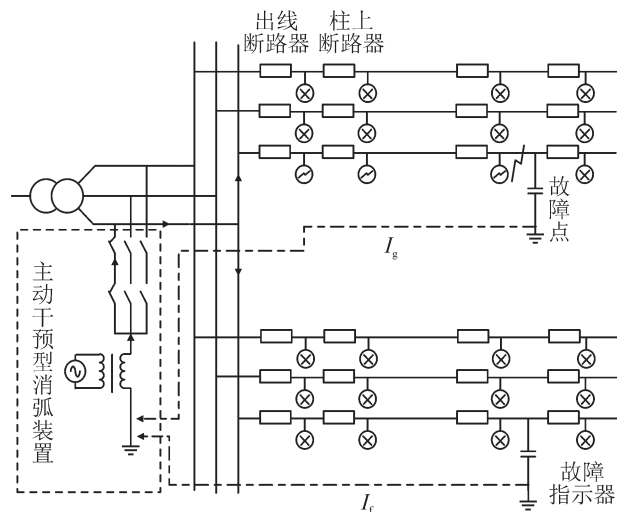


图2 站内主动干预式消弧处置单相接地故障原理
Fig. 2 Principle of single phase grounding fault of active intervention arc suppression inside substation

当发生单相接地故障时,主动干预型消弧装置的动作步骤可分为启动及选相过程、分相开关分闸过程及选线过程,具体描述如下。

1)启动及选相过程:目前主动干预型消弧装置的启动一般采用零序电压启动,在装置运行时控制器不断检测 PT 提供的开口电压和三相电压信号,当配网系统发生单相接地故障时,变电站母线电压互感器的开口三角绕组将产生零序电压 $3U_0$,其值大于装置启动阈值 U_N 时,装置启动选相功能,其原理多采用相电压幅值比较法,依据故障相电压最低的原则进行选相。按照国网公司在真型试验中的相关要求,设备应在系统电容电流为 65 A,接地电阻 1 k Ω 时应能够正确启动研判,装置能正确选相动作。

2)分相开关分闸过程:在装置进行有效保护状态下,通过计算系统接地阻抗,如果接地阻抗恢复至系统正常状态,判断接地故障消失,控制单相接地断路器分闸,实现单相接地保护自动复归功能。

3)选线过程:根据电弧熄灭前后各条线路零序电流的变化,快速准确地选出故障线路,并在面板上给出故障线号。无论消弧装置接地保护功能是否投入运行,小电流选线装置均能正常工作。

主动干预型消弧装置的动作流程可分为两部分:1)在故障发生时完成上述的完整动作步骤,2)在故障发生并延时一段时间后,装置将故障相断开,若为瞬时性接地,且接地已经自行消除,则不需要继续动作;若为永久性接地,应启动线路保护,隔离故障线路,并进行相应的故障排查及消除工作。

2 不同接地方式的主动干预型消弧装置技术对比

本文选择两类主动干预型消弧装置开展技术对比。

首先,从两类装置的结构展开分析,主动干预型消弧装置的结构及原理基本相同,但装置的接地方式存在一定的差异,目前常用的接地方式包括低励磁阻抗变压器接地和经金属导体接地,二者的装置结构见图 3。

其次,从两类装置的接地阻值、动作时间及残压水平等技术参数层面进行讨论,具体见表 1。由于接地方式的不同,接地体阻值会有相应的差异,金属性导体的接地阻值会明显低于低励磁阻抗变压器阻值。由于应用场景的不同,二者的动作时间等参数也有所差异,将在后文的性能分析中给出具体描述。

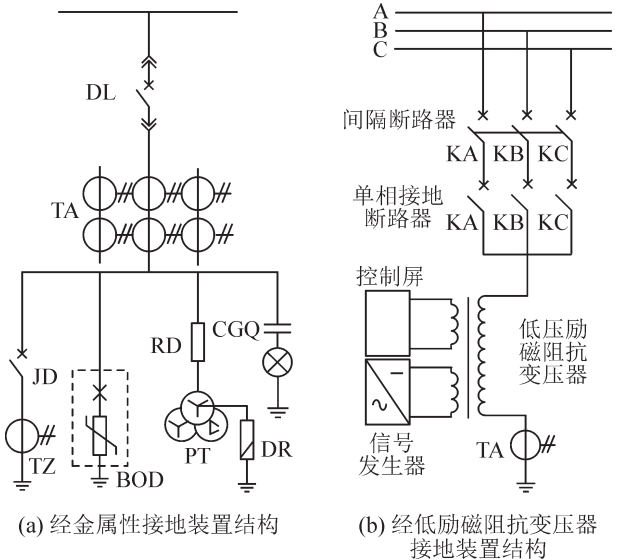


图 3 两种类型主动干预型消弧装置结构图
Fig. 3 Structural diagram of two types of active intervention arc suppression devices

表 1 两类主动干预型消弧装置的技术对比
Table1 Technical comparison of two types of active intervention arc suppression devices

比较项目	故障相经快速开关接地消弧装置	故障相经低励磁阻抗变压器接地消弧装置
接地体类型	金属性导体	低励磁阻抗变压器
接地体电阻值	50 $\mu\Omega$	0.5 Ω
接地选线开关	快速开关	快速开关
装置动作时间	不大于 20 ms	100 ms 以上
故障线路残压水平(300 A,变电站接地电阻 0.5 Ω)	150 V	300 V
是否能配合消弧线圈使用	可以	可以
可否消除系统内高频振荡	采用 3PT+强阻尼自限流抑制器	装置内置 4PT

最后,从实际应用层面对两类装置的具体性能进行比较,主要包括装置在启动、运行、退出 3 个阶段中所展示的防误动能力、抑制非同相接地短路能力、地体周围电位抬升风险、故障点熄弧能力、动作时间及防铁磁谐振能力。

2.1 启动阶段装置防误动性能分析

当配电网发生高阻接地时,可能会出现零序电压值较低的情况,若此时零序电压门槛值设置过高,存在装置不能启动的风险。系统电容电流在 100 A、150 A、200 A 时对应最大可启动的接地电阻分别为 1 910 Ω 、1 250 Ω 、930 Ω ,由此可知,随着系统电容电流值的增加,对应可识别的高阻接地故障范围越小,装置越难以启动。

为解决上述问题,主动干预型消弧装置多以零序电流作为辅助判据提升装置对高阻接地的耐受能力。当任何一条馈线零序电流的变化量大于 0.5 A (阈值可设置,0.5 A 对应高阻约为 12 k) 时启动判据,从而有效提升装置启动的灵敏度。本文所对比的两类装置中均具备上述逻辑。

当配电网发生高阻接地时,还可能会存在接地相的相电压幅值并不一定为幅值最低相,因此简单选择电压幅值最低相为故障相会存在选相错误的风险,该问题可通过旋转角理论进行相应的分析。

当配电网中的中性点不接地系统发生单相接地故障时,其电路见图 4。

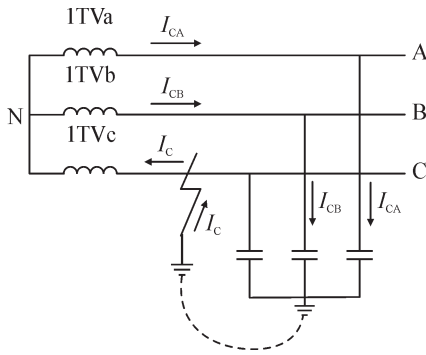


图4 中性点不接地系统 C 相不完全接地电路图
Fig. 4 Circuit diagram of incomplete grounding of phase C of neutral point ungrounded system

由图 4 可知,中性点不接地系统 C 相经过过渡电阻 R_d 接地,此时各相对地电压由下式表达

$$\begin{cases} U_{Ad} = U_A + U_{Nd} \\ U_{Bd} = U_B + U_{Nd} \\ U_{Cd} = U_C + U_{Nd} \end{cases} \quad (1)$$

式中: U_A 、 U_B 、 U_C 为相电压, U_{Ad} 、 U_{Bd} 、 U_{Cd} 及 U_{Nd} 分别为各相和中性点对地电压。

利用地中电流总和为零的关系,可得:

$$(U_A + U_{Nd})Y_A + (U_B + U_{Nd})Y_B + (U_C + U_{Nd})Y_C = 0 \quad (2)$$

式中: Y_A 、 Y_B 、 Y_C 分别为三相对地导纳,其计算表达式为

$$\begin{cases} Y_A = j\omega C_0 \\ Y_B = j\omega C_0 \\ Y_C = \frac{1}{R_d} + j\omega C_0 \end{cases} \quad (3)$$

式中, C_0 为三相对地电容,即 $C_A = C_B = C_C = C_0$ 。

中性点位移电压计算公式为:

$$U_{Nd} = -\frac{U_A Y_A + U_B Y_B + U_C Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C} \quad (4)$$

将式(3)代入式(4)得:

$$\begin{aligned} U_{Nd} &= -\frac{1}{\frac{1}{R_d} + 3j\omega C_0} \left(\frac{1}{R_d} + j\omega C_0 \right) U_A + j\omega C_0 U_B + j\omega C_0 U_C \\ &= -\frac{U_A}{1 + 3j\omega C_0 R_d} \end{aligned} \quad (5)$$

由式(5)可知,当 R_d 发生变化时,矢量 U_{Nd} 始端的轨迹是以接地相的相电压 U_A 为直径的位于其顺时针一侧的半圆,由此说明极端情况下电压幅值最低相并不一定为故障相,其矢量图见图 5。

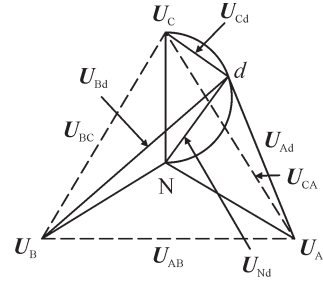


图5 中性点不接地系统 C 相不完全接地电路图
Fig. 5 Circuit diagram of incomplete grounding of phase C of neutral point ungrounded system

通过两类不同型号装置的对比,经低励磁阻抗变压器接地消弧装置通过加入接地旋转角理论可有效识别接地故障相,从而降低误动风险。

2.2 运行阶段装置抑制非同相接地短路性能分析

主动干预型消弧装置在投入配网系统后,当配电网先发生金属性接地,又发生相继性非同相接地时,将加剧两相接地短路对电网的不利影响。

采用低励磁阻抗变压器接地的装置,系统发生两相接地短路时,短路电流需要流经低励磁阻抗变压器的两相绕组,接入感性元件作为限流的最有效手段,经变压器接入的示意效果见图 6。

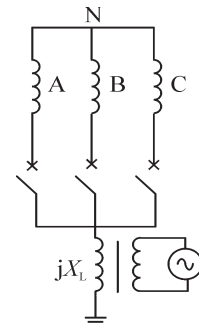


图6 感性元件(变压器)接入示意图
Fig. 6 Schematic diagram of the access of inductive components (transformers)

如图 6 可知,在发生两相接地短路故障时,感性元件中的感抗 jX_L 始终串接在故障相的电压回路中,由于电抗中的电流不会突变,因此可抑制短路电流的发展过程。本文经低励磁阻抗变压器接地装置中的分相开关采用进口的高断流能力、永磁型

高速开关,其额定电流1 250 A,开断电流31.5 kA,机械寿命30 000次,分闸时间6 ms。因此当系统中发生两相接地短路时分相开关可在半个周波内快速断开,有效抑制两相接地短路,保护站内设备。

采用低电阻值的接地体进行接地的装置,在发生两相短路期间仅依赖快速开关的动作,无法有效控制短路电流,因此对系统产生的暂态影响较大,说明其应对两相接地短路的能力相对较弱。

2.3 运行阶段接地体周围电位抬升风险分析

为考虑站内工作人员的人身安全,在装置动作期间,单相接地电流将流经接地点,从而可能存在引发电位抬升的现象,进而产生人身伤害风险。

主动干预型消弧装置接地体的接地点周围电位抬升的影响与配电网经消弧线圈的接地点周围电位抬升的情况相类似。经过目前消弧线圈的运行情况分析,在160 A的补偿电流状态下,接地点周围并未出现跨步电压的风险。由于站内接地体主要为接地网,向大地逸散的电流主要通过接地网的导体进行扩散,在地表面形成的跨步电压极为微小,不会对周围产生安全风险。因此两种类型的装置均可有效规避上述风险点。

2.4 运行阶段对故障点熄弧能力分析

在主动干预型消弧装置投入运行期间,电容电流流过接地元件后,会在接地元件两端产生一个电压降,即故障相线路上仍然有一定的残压,残压的大小与系统电容电流的大小和接地元件的电阻值有关。当系统的电容电流越大,并且接地元件的电阻越大时,在故障线路上的残压较高,虽然站内主动干预型消弧装置已将大部分接地电容电流进行转移,但站外接地故障点处由于残压较高,接地电容电流的通道将继续保持电离的状态。

为避免上述问题的发生,主动干预型消弧装置的阻抗值应被控制在较低水平。如本文中低励磁阻抗变压器的阻抗为 $0.5\ \Omega$,金属接地装置的阻抗为 $50\ \mu\Omega$,假设系统电容电流为300 A,考虑地网接地阻抗为 $0.5\ \Omega$ 的情况下,两类装置均能将线路残压控制在300 V左右,可以有效抑制故障点电位抬升,并实现熄弧目标。

2.5 运行阶段主动干预型消弧装置动作时间分析

在主动干预型消弧装置投入期间,线路上的单相接地电流几乎全部被引入站内,从而导致故障点处单相接地特征不明显,进而使得线路上配电自动化设备无法进行单相接地选段定位,从而引发与配电终端设备的配合问题。

从与终端设备的配合层面来看,配电自动化设

备进行单相接地故障研判主要采用故障点前4后8个周波的录波进行故障研判,主动干预型消弧装置的动作时间并非越快越好,本文中经低励磁阻抗变压器接地的装置在分相开关动作时限上采用了100 ms以上(时间可设)的延时,在站外设备完成接地故障定位后,再将故障电流引至站内,从而实现有效配合。

从保护接地点人身安全的角度分析,主动干预型消弧装置的动作时间越快,短路电流对触电者造成的危害就越低,经金属性接地的装置追求20 ms内快速投入,从而保护人身安全。

经过上述分析,根据应用场合及使用目标的不同,可灵活选择动作时间略有差异的两类装置。

2.6 装置退出阶段防范铁磁谐振的性能分析

由于电力系统配电网的建设及运行过程中存在大量的储能元件,如线路电容、PT电感,在某些情况下会对电网的稳定运行带来不利的影响。系统在正常运行状态下,电压互感器的励磁阻抗很大,三相电压基本维持在平衡状态,中性点几乎不存在位移电压;但当电力系统遭受较大的扰动,如系统单相接地消失、间隙弧光接地等,中性点不接地系统中使用中性点接地的PT在电网从接地状态恢复成不接地状态的暂态变化过程中,母线上Y0接线的PT一次绕组成为该电网对地唯一金属性通道。此时电网对地电容通过PT一次绕组有一个充放电的过渡过程,受PT绕组的非线性励磁特性的影响,容易在线路充电电流的激发下产生PT与线路电容的谐振,然而早期的变电站PT仅采用3PT形式,未加装中性点PT或未采用消谐措施,并且主动干预型消弧装置并未加装消谐单元,因此存在电源中性点产生零序性质的位移电压的风险,发生谐振时系统的相电压至少会升高到1.5 p.u.左右。

主动干预型消弧线圈装置为避免铁磁谐振带来不利影响,可采用一次消谐型电压互感器,另外通过配备一个4PT的电压互感器,起到分流和消谐的作用,可有效避免分闸造成损坏电压互感器和熔断器。本文中经金属性接地的装置采用3PT+强阻尼自限流抑制器,经励磁阻抗变压器接地的装置采用4PT互感器,均可有效达到防范铁磁谐振的目标。

3 加装主动干预型消弧装置变电站的改造建议

经过分析主动干预型消弧装置的基本结构及运行过程,并通过对两类不同接地类型的装置的具体性能进行对比,结合国网公司的相关要求,分别

从变电站接线方式的改造和主动干预型消弧装置的选择提出了相应的建议。

3.1 变电站的改造建议

由于单相接地等诸多线路故障的频发,为进一步保证配电网的供电可靠性,已开始全面推进变电站接线方式的改造,根据电容电流大小的不同,可对旧变电站的升级及新变电站的建设提出如下建议:

1)对于电容电流不超过 150 A 的变电站,按照国网公司配电网技术导则等相关技术标准要求,应采用消弧线圈+小电流选线装置方式;

2)对于电容电流大于 150 A 的变电站,由于消弧线圈仅能补偿工频电容电流分量,且一般情况下非工频电容电流约占总电容电流的 1/10,因此在电容电流超过 150 A 时,非工频电容电流将超过 10 A,无法通过消弧线圈补偿,产生的弧光过电压、电气火灾风险相对较高。考虑配网改造工程的实施难度,对于存量的变电站建议采用主动干预型消弧装置;

3)对于规划新建的电容电流超 100 A 且后期负荷发展主要以电缆网供电为主的变电站,按照区域联络的特性,逐步推进小电阻接地方式的建设。

3.2 主动干预型消弧装置的选择建议

对于准备加装主动干预型消弧装置的变电站,通过系统运行中可能存在的风险点,并结合两类不同接地类型装置的具体性能,对主动干预型消弧装置的要求及选择层面提出如下建议。

1)经综合比较,经低励磁阻抗接地的主动干预型消弧装置与采用直接接地方式的主动干预型消弧装置的运行特性差别主要集中于动作时间,可根据所在地区的具体要求进行灵活选择,如市区内应注重更短的动作时间,从而确保触电人员的人身安全;大范围线路应注重接地的选相选线的准确性,从而确保更快的完成故障消缺工作;

2)对于采用主动干预型消弧装置的变电站,在装置内部必须采用 4PT 或 3PT+强阻尼自限流抑制器的结构,用以防范由于装置投切期间产生铁磁谐振;

3)变电站的接地网应定期进行检查,主动干预型消弧装置的接地极应参照消弧线圈接地极的建设要求,对于电容电流较大的变电站应加强变电站接地网的状态检测;

4)应将主动干预型消弧装置与站外配电自动化终端配合使用。变电站内部的主动干预型消弧装置可以实现可靠消弧和永久性单相接地故障选线与跳闸,而配合线路侧的一二次融合开关等设备

的保护策略实现瞬时故障消弧,利用一二次融合设备实现不依靠通讯就地快速隔离故障。但在使用过程中主动干预型消弧装置的动作会对一二次融合设备的结果判断产生一定的影响,可通过相应的时序设定解决上述问题。

4 结语

本文对比了两类主动干预型消弧装置在启动、运行及退出阶段的具体性能,并对装置的选择及使用给出了相应的建议。在装置启动阶段:添加旋转角理论的装置可更有效的避免在高阻状态下误启动的现象。在装置运行阶段:两类装置均可避免接地体周围电位抬升的风险,并且均能有效实现消弧目标;经励磁阻抗变压器接地的装置动作时间高于经金属性接地的装置,但其可更有效的实现与配电自动化终端配合使用的目标,而通过低阻值接地的装置在运行过程中的缺点在于应对两相接地短路的能力相对较弱。在装置退出阶段:两类装置通过不同的方法均可实现防范铁磁谐振的目标。通过分析装置的运行性能,主动干预型消弧装置适用于电容电流大于 150 A 的变电站,并应根据使用场所及应用目标的不同,灵活选择不同接地类型的装置。本文对不同运行场景下主动干预型消弧装置的选择提供了一定的理论依据,具有一定的实际工程价值。

参考文献

- [1] 牛成林,李洋,王亮,等.影响单相接地故障选线准确性的主要因素研究[J].电力电容器与无功补偿,2023,44(4):34-40.
NIU Chenglin, LI Yang, WANG Liang, et al. Research on main influencing factors of accuracy of single line-to-ground fault line selection[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2023, 44(4): 34-40.
- [2] 陈洁羽,万青,王毅钊,等.小电流接地系统下单相接地处置装置真实环境试验与性能分析[J].电力电容器与无功补偿,2022,43(3):67-72.
CHEN Jieyu, WAN Qing, WANG Yizhao, et al. Real environment test and performance analysis of single-phase-grounding fault handling device at small current grounding system[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2022, 43(3): 67-72.
- [3] 汪士杰,孙晓茜,杨延钧,等.配电混合线路单相接地故障区段定位技术[J].电力电容器与无功补偿,2022,43(1):111-119.
WANG Shijie, SUN Xiaoqian, YANG Yanjun, et al. Location technology for single phase earth fault section of distribution hybrid line[J]. Power Capacitor & Reactive Power

- Compensation, 2022, 43(1): 111-119.
- [4] 岳璐, 芦颖. 220 kV 变电站内 20 kV 母线接地方式改造设计[J]. 电气技术与经济, 2018(5): 12-13.
- YUE Lu, LU Ying. Retrofit design of 20 kV busbar grounding method in 220 kV substation[J]. Electrical Equipment and Economy, 2018(5): 12-13.
- [5] 魏旗. 某改造项目中 35 kV 变电站的中性点接地方式的选择[J]. 建材世界, 2021, 42(5): 88-90.
- WEI Qi. Selection of neutral-point grounding mode of 35 kV substation in a reconstruction project[J]. The World of Building Materials, 2021, 42(5): 88-90.
- [6] 钟健航. 中小型变电站中电气主接线的设计方案及其可行性分析[J]. 机电工程技术, 2020, 49(7): 85-87.
- ZHONG Jianhang. Design scheme and feasibility analysis of main electrical connection in small and medium-sized substations[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2020, 49(7): 85-87.
- [7] LI Qingpeng, YANG Qin, ZHANG Rongrong, et al. Improvement measures of active intervention arc suppression technology[C]//2019 IEEE 8th International conference on advanced power system automation and protection (APAP). [S.l.]: IEEE, 2019: 1141-1145.
- [8] 贺晓, 陈洁羽, 张志华, 等. 含有主动干预消弧装置的变电站消弧线圈动作特性[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(6): 1-7.
- HE Xiao, CHEN Jieyu, ZHANG Zhihua, et al. Action behaviors of the arc suppression coil of the substation containing the active intervention arc suppression device[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(6): 1-7.
- [9] K. XU, P. WANG, F. SHI AND C. BIAN. Faulty line selection based on active-intervention-type arc suppression device via additional neutral resistance[C]// 8th Renewable Power Generation Conference, Shanghai, 2019, 1-6.
- [10] 朱文葛, 李景禄, 易洲楠, 等. 考虑线路阻抗的主动干预型熄弧装置应用分析[J]. 电瓷避雷器, 2021(5): 41-47.
- ZHU Wenge, LI Jinglu, YI Zhounan, et al. Application analysis of active intervention type arc-extinguishing device considering line impedance[J]. Insulators and Surge Arresters, 2021(5): 41-47.
- [11] 李文龙, 何山, 王维庆, 等. 主动干预型消弧装置应用性研究[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(4): 1-9.
- LI Wenlong, HE Shan, WANG Weiqing, et al. Applied research on active intervention-type arc extinguishing devices[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(4): 1-9.
- [12] K XU P W Z, F. SHI. Lock-out algorithm of active-intervention-type arc suppression device based on ELM[C]// 2020 IEEE/IAS Industrial and Commercial Power System Asia, weihai, 2020: 949-953.
- [13] 王鹏, 张贺军, 徐凯, 等. 主动干预型消弧装置的附加电阻故障选相方法[J]. 电力工程技术, 2020, 39(4): 180-186.
- WANG Peng, ZHANG Hejun, XU Kai, et al. Additional resistance based fault phase identification method suitable for active interference arc suppression device[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(4): 180-186.
- [14] 蔡飏. 变电站母线接线方式可靠性分析[J]. 电气开关, 2023, 61(6): 4-6.
- CAI Biao. Reliability analysis of bus connection mode in voltage substation[J]. Electric Switcher, 2023, 61(6): 4-6.
- [15] 李华, 朱一民, 陈琳, 等. 小电阻接地系统单相接地故障特征分析[J]. 广东电力, 2022, 35(12): 56-65.
- LI Hua, ZHU Yimin, CHEN Lin, et al. Transient characteristic analysis of single-phase ground fault in low resistance grounding system[J]. Guangdong Electric Power, 2022, 35(12): 56-65.
- [16] 陈琥, 刘红文, 黄继盛, 等. 基于 ZN₁₁-Dyn7 型无源降压消弧器件的高阻接地故障选线新方法[J]. 电瓷避雷器, 2023(6): 45-54.
- CHEN Xiao, LIU Hongwen, HUANG Jisheng, et al. New method for high-resistance-grounding-fault line selection based on zny11-dyn7 passive step-down arc suppression device[J]. Insulators and Surge Arresters, 2023(6): 45-54.
- [17] 刘家宁. 消弧线圈接地方式下的配电网单相接地故障模型分析[J]. 东北电力技术, 2021, 42(12): 40-46.
- LIU Jianing. Analysis of single-phase-to-ground fault model in network of arc suppression coil grounding[J]. Northeast Electric Power Technology, 2021, 42(12): 40-46.
- [18] 薛太林, 靳贰伟, 吴杰. 基于五次谐波和混沌系统的谐振接地系统故障选线[J]. 电测与仪表, 2022, 59(1): 176-182.
- XUE Tailin, JIN Erwei, WU Jie. Fault line selection of resonant grounding system based on fifth harmonic and chaotic system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(1): 176-182.
- [19] 杨海波, 姜鹏, 李士国, 等. 主动干预保安消弧装置故障选线及消除方法[J]. 电力设备管理, 2021(9): 41-43.
- YANG Haibo, JIANG Peng, LI Shiguo, et al. Actively intervene in the fault selection and elimination method of the security arc suppression device[J]. Electric Power Equipment Management, 2021(9): 41-43.
- [20] 石磊, 温鑫, 赵栓龙. 地铁 110 kV 变电站低压侧接地方式的选择新探[J]. 中国设备工程, 2021(11): 5-6.
- SHI Lei, WEN Xin, ZHAO Shuanlong. A new exploration on the selection of low-voltage side grounding methods for subway 110 kV substations[J]. China Plant Engineering, 2021(11): 5-6.
- [21] 王涛. 变电站 10 kV 接地方式的选择[J]. 自动化应用, 2015(2): 87-88.
- WANG Tao. Selection of 10 kV grounding method for sub-

- station[J]. Automation Application, 2015(2):87-88.
- [22]覃松涛,黄超,蒙亮,等. 220 kV 变电站主变压器中性点接地方式分析[J]. 南方电网技术, 2014, 8(2):46-50.
- QIN Songtao, HUANG Chao, MENG Liang, et al. Analysis of neutral point grounding mode for the main transformer of 220 kV substations[J]. Southern Power System Technology, 2014, 8(2):46-50.
- [23]曾祥君,王沾,喻锐,等. 相电源馈入中性点的配电网接地故障相主动降压消弧装置及其应用[J]. 高电压技术, 2022, 48(9):3356-3366.
- ZENG Xiangjun, WANG Zhan, YU Kun, et al. Arc suppression device for actively reducing grounding fault phase voltage based on phase power supply feedback in distribution network and its application[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(9):3356-3366.
- [24]郝越峰. 主动干预式消弧装置故障选线方法[J]. 高压电器, 2021, 57(2):184-188.
- HAO Yuefeng. Fault line selection method of active interference arc suppression device[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(2):184-188.
- [25]李景丽,任俊跃,赵子敬. 配电网弧光接地主动转移型消弧技术[J]. 电瓷避雷器, 2023(1):116-123.
- LI Jingli, REN Junyue, ZHAO Zijing. Active transfer arc extinguishing technology of arc grounding in distribution network[J]. Insulators and Surge Arresters, 2023(1):116-123.
- [26]李金东,王勇,王猛,等. 基于二次扰动的配电网单相接地故障有源电流消弧方案[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(12):72-78.
- LI Jindong, WANG Yong, WANG Meng, et al. An active current arc suppression method for single-phase grounding faults in the distribution network based on secondary current disturbance[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(12):72-78.
- [27]陆杨,潘一璠,杨亚军,等. 基于离散域双闭环控制的配电网柔性接地消弧方法[J]. 电器与能效管理技术, 2021(12):71-77.
- LU Yang, PAN Yifan, YANG Yajun, et al. Flexible grounding arc suppression method of distribution network based on discrete domain double closed loop control[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2021(12):71-77.
- [28]田家豪,姚林朋. 配电网小电阻接地对可靠性影响分析[J]. 电工技术, 2022(23):121-122.
- TIAN Jiahao, YAO Linpeng. Analysis of the influence of small resistance grounding on distribution network reliability[J]. Electric Engineering, 2022(23):121-122.
- [29]赵旭阳. 中压配电网小电阻接地方式改造相关技术的研究[D]. 北京:华北电力大学, 2019.
- [30]黄帅. 配电网中性点动态接地改造及控制系统开发应用研究[D]. 长沙:长沙理工大学, 2023.
- [31]王英英,王玉龙,吕东晓,等. 同塔双回线接地故障断路器误动的改进策略[J]. 高压电器, 2022, 58(5):172-179.
- WANG Yingying, WANG Yulong, LYU Dongxiao, et al. Improving strategy of ground fault mal-operation of circuit breaker with double-circuit transmission line in the same tower[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(5):172-179.
- [32]李文龙,何山,王维庆,等. 主动干预型消弧装置应用性研究[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(4):1-9.
- LI Wenlong, HE Shan, WANG Weiqing, et al. Applied research on active intervention-type arc extinguishing devices[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(4):1-9.
- [33]朱晓红,杨伟荣,张蓉,等. 基于RNN-LSTM神经网络的小电流接地故障选线方法[J]. 高压电器, 2023, 59(7):213-220.
- ZHU Xiaohong, YANG Weirong, ZHANG Rong, et al. Line selection method of low current grounding fault based on RNN-LSTM neural network[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(7):213-220.
- [34]徐栋杰. 中性点不接地配电系统中主动干预式消弧方法与技术[D]. 广州:华南理工大学, 2019.
- [35]徐凯. 主动干预型消弧装置选相判据研究及其对故障诊断的影响[D]. 济南:山东大学, 2021.
- 作者简介:**
- 王呈轩(1997—),男,助理工程师,主要从事单相接地处置工作。
- 宫瑞邦(1988—),男,高级工程师,主要从事配电网稳定运行工作。
- 程俊文(1990—),男,工程师,主要从事配电网稳定运行工作。
- 张雷亮(1997—),男,工程师,主要从事配电网稳定运行工作。
- 刘文清(1971—),男,正高级工程师,主要从事电力系统自动化,信息通信建设及运维工作。