# 配电网接地故障相主动降压消弧成套装置及其现场试验

卓超1,曾祥君2,彭红海3,喻锟2,王沾2,4

(1. 广西大学 广西电力系统最优化与节能技术重点实验室,广西 南宁 530004;

2. 长沙理工大学 智能电网运行与控制湖南省重点实验室,湖南 长沙 410004;

3. 湖南大学 电气与信息工程学院,湖南 长沙 410082;4. 长沙精科电力技术有限公司,湖南 长沙 410004)

摘要:中性点非有效接地配电网易发生间歇性弧光接地故障,产生过电压,危及人身设备安全,甚至引发电缆 通道火灾。针对该问题,提出了接地故障相主动降压消弧控制原理与技术,研发了成套装置,通过灵活调控 零序电压,控制故障点电压低于故障电弧重燃电压,强迫故障电弧自行熄灭,实现间歇性弧光接地故障的不 停电消除,且有效抑制过电压。通过大量实验室测试、实际变电站实测与运行,验证了接地故障相主动降压 消弧技术的正确性和可行性。

关键词:非有效接地配电网;接地故障;主动降压消弧;接地故障现场试验

中图分类号:TM 77

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202010023

#### 0 引言

国内外配电系统普遍采用中性点非有效接地方 式,所构成的非有效接地电网占我国6kV及以上电 压等级电网的95%以上,近70%的停电事故由非有 效接地电网故障引发,年均直接损失达上千亿元<sup>[1]</sup>。 非有效接地电网接地故障电弧电流小,具有瞬时性、 持续性等不同复杂模式及演变特征,故障检测和保 护非常困难,易产生间歇性弧光过电压,危及人身设 备安全,甚至引发变电站爆燃、电缆沟起火等危险事 故,导致大面积长时间停电事故,严重影响电网运行 安全和供电可靠性<sup>[23]</sup>。

2019年国家电网公司设备部发布《关于加强大 城市配电电缆网单相接地故障快速处置工作的通 知》,通知指出:应按照"瞬时故障安全消弧,永久故 障快速隔离"的原则,稳妥推进中性点接地方式改 造,全面提升大城市配电电缆单相接地故障快速处 置能力,降低因配电电缆单相接地故障引发的电缆 通道火灾及大面积停电风险。

接地故障处理是配电领域研究的难点和热点, 国内外学者相继在有源电流消弧领域取得了一定的 成果。针对接地故障全补偿,学者们提出了接地故

#### 收稿日期:2020-01-31;修回日期:2020-08-30

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(51737002);国家电网公司科学技术项目(52170217000S);长沙市科技项目(kh1901140)

Project supported by the Key Program of the National Natural Science Foundation of China(51737002), the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (52170217000S) and the Science and Technology Project of Changsha(kh1901140)

专利:中华人民共和国发明专利(非有效接地系统接地故障 相降压消弧的安全运行方法)(ZL201710544978.8) 障电流解耦控制的有源消弧方法,通过有效控制电 流注入量,减少单相接地故障瞬间的残流,提高供配 电系统的可靠性,例如长沙理工大学、中国矿业大学 的学者提出残流全补偿理论并研发了实验样机[46], 华北电力大学、武汉大学的学者提出了有源滤波的 主从式消弧线圈<sup>[7-8]</sup>,福州大学的学者提出了配电网 三相级联H桥变流器来补偿接地点的电弧电流<sup>[9]</sup>, 山东理工大学、中国石油大学的学者提出了适应线 路参数动态变化的全补偿新算法<sup>[10]</sup>,国外瑞典中立 公司开发了接地故障全中和器(GFN)综合补偿装 置[11],这些方法或装置都是通过向配电网注入电流 的方式补偿故障线路零序电流,实现接地故障有功、 无功和谐波电流的全补偿,调控方式灵活,但消弧过 程需依赖对故障零序电流的动态精确测量,而故障 电流呈现间歇性燃熄变化,不确定性很强,因此,上述 装置对测量及控制环节的要求极高,实现较为复杂。

接地故障消弧的本质机理在于:故障电流过零 熄弧后,故障点绝缘介质恢复速度快于故障电压恢 复速度,有效阻止电弧重燃<sup>[12]</sup>。顺应消弧技术的本 质机理,电压消弧方法成为新的发展方向。电压消 弧方法是在发生弧光接地故障时,限制故障点恢复 电压,使其小于绝缘介质的再次击穿电压,达到消弧 效果。早在20世纪70年代国内外就已开始使用接 地故障转移装置,近年来推出了限制间歇电弧接地 过电压的消弧柜,通过在站内设置故障旁路接地支 路,将故障相电压直接抑制为0,阻止故障电弧重 燃[13-14]。但受操作过电压和高阻接地故障选相准确 率低的制约,有可能因选相错误造成相间短路故障, 开关动作速度也会影响消弧效果;另外接地旁路冲 击电流大,有可能对变电站地电位产生干扰。为此, 国内采用一电抗器短路接地故障相,限制短路电流, 但消弧效果难以得到显著提高;在发生低阻接地故

障时,旁路电抗器为故障点分流小,故障点电流较大,有可能影响消弧效果;另外当长馈线重载馈线发 生低阻接地故障时,故障转移装置理论上不能消除 故障残流,但考虑放电间隙的击穿电压,实际工程中 是能够有效熄灭瞬时故障电弧的<sup>[15-16]</sup>。

为此,笔者所在课题组提出了接地故障相主动 降压消弧控制理论,在发生接地故障后,灵活调控零 序电压,控制故障点电压低于故障电弧重燃电压,强 迫故障电弧自行熄灭,实现了中性点非有效接地配 电网间歇性弧光的不停电消除,且有效抑制了过电 压。在主动降压消弧理论的基础上,研发了配电网 接地故障相主动降压成套装置,继而开展了一系列 实验和现场测试工作。在国网电力科学研究院武汉 分院(武高所)进行了满载运行实验,在国网配电网 智能化应用及关键设备联合实验室(漯河真型配电 网)开展了性能检测实验,在国网公司某110 kV变 电站完成了故障相主动降压消弧成套装置的标准化 安装、调试和实际单相故障实际试验,并挂网投运。

#### 1 接地故障相主动降压消弧原理

配电网发生弧光高阻单相接地故障时,随着电 弧电压方向的交替变换,故障点处电弧将反复起弧、 重燃:当故障点电流经零休时刻后,恢复电压高于电 弧燃烧的电压阈值时,电弧重燃。线路发生弧光接 地故障时,由于故障支路电弧间隙的存在,故障间隙 介质多为空气,其电阻和间隙长度成正比,间隙越长 电阻越大,相应的击穿电压阈值也就越大,电弧电流 零休时刻持续时间越长;故障电流在过零点处呈明 显的非线性畸变特性,畸变程度取决于电弧间隙长 度和击穿的介质材料。

中性点非有效接地配电网发生单相接地故障时,故障点残流较小,弧光热量少,不容易造成热击穿,故障点等效的非线性电阻主要由电场击穿决定。

当线路发生弧光接地故障时,故障支路可等效为可 变击穿电压放电间隙与可变电阻的串联电路,如图1 所示。如10kV电缆C相在外力或老化作用下,绝缘 受损击穿并发生弧光放电,当故障点电压U<sub>f</sub>小于起 弧阈值电压时,故障点对地电阻R<sub>f</sub>呈高阻态,I<sub>f</sub>突变 为0,电弧熄灭;随着故障点电压U<sub>f</sub>恢复至大于起弧 阈值电压,故障点在电场作用下击穿R<sub>t</sub>,R<sub>f</sub>呈低阻 态,I<sub>t</sub>突然增大,弧光复燃。



Fig.1 Equivalent model diagram of grounding fault

根据接地故障电弧特性,接地故障过渡电阻包 含接地介质电阻以及接地介质与大地非有效接触产 生的电阻。当线路发生弧光接地故障时,接地介质 电阻随着故障相电压的下降而增大,当由回路电感 和电流陡度决定的熄弧峰压小于弧道介质的恢复强 度时,故障相电压降低到故障点重燃电压以下,故障 电流急剧减小,电弧不再发生重燃。

故障相主动降压消弧系统结构见图 2。如图 2 (a)所示,非有效接地系统的电源和负荷变压器无中 性点引出,中性点电压变化不影响三相线电压,具有 中性点电压变化不影响电源和负荷正常运行的天然 优势,即非有效接地系统的零序电压可以灵活调控。 可以通过外加零序电源,主动调控中性点位移电压, 即零电位点与中性点分离,实现故障相电压的灵活 调控。在图 2(b)所示的 10 kV 配电网系统中: *E*<sub>AB</sub>、





 $E_{BC}$ 、 $E_{CA}$ 为电源电势, $U_A$ 、 $U_B$ 、 $U_C$ 为三相对地电压, $U_0$ 为中性点零序电压, $C_A$ 、 $C_B$ 、 $C_C$ 为三相对地电容, $g_A$ 、  $g_B$ 、 $g_C$ 为三相对地泄漏电导,配电网中性点N由 ZNyn11型接地变引出。消弧线圈为过补偿态,以C 相发生单相接地故障为例,零电位点O沿半圆轨迹 移动到O',零序电压源输出电压U<sub>s</sub>经中性点N注 入,强迫零电位点O'脱离半圆轨迹,移动到直线OC 上的O"点,非故障A、B相的电压U<sup>\*</sup>\_A、U<sup>\*</sup>\_B升高,使非 故障相对地电压在ABC三角区域内,故障C相电压 U<sup>\*</sup>\_C降低并在电弧重燃电压U<sub>a</sub>为半径的圆轨迹内,如 式(1)所示。

$$\boldsymbol{U}_{\mathrm{C}}^{\prime\prime} = \boldsymbol{E}_{\mathrm{C}} + k\boldsymbol{U}_{\mathrm{S}} \tag{1}$$

其中,k为中性点单相注入变压器变比。为抑制电弧 燃烧,要求故障相电压小于电弧重燃电压,强迫故障 电弧熄灭,即有:

$$\left| U_{\rm C}'' \right| < \left| U_{\rm ds} \right| \tag{2}$$

在笔者所在课题组的10kV真型实验室环境中 进行起弧实验时,钻孔破坏电缆绝缘层,电弧重燃电 压U<sub>a</sub>的幅值约为1000V。实际配电网接地故障都 存在一定的故障电阻和击穿电压,调控故障点电压 小于电弧重燃电压,可强迫故障电弧熄灭。因此,发 生接地故障后,通过灵活调控零序电压,控制故障点 电压低于故障电弧重燃电压,强迫故障电弧自行熄 灭,实现了中性点非有效接地配电网间歇性弧光接 地故障的不停电消除,且有效抑制了过电压。由于 非有效接地配电网的零序回路阻抗大,调控所需零 序电源容量小,可方便地实现故障相主动降压消弧。

#### 2 接地故障相主动降压消弧成套装置

基于上述接地故障相主动降压消弧原理,在配 电网中性点外加一单相零序电压源,配电网发生单 相接地故障时,调控单相零序电压源的输出电压幅 值和相位,即调控接地故障相电压,将故障点电压控 制到小于电弧重燃电压,实现电压消弧。

配电网接地故障相主动降压消弧装置的结构如

图3所示,主要包含接地变、消弧线圈、注入变柜、消 弧及选线控制屏和零序电压源屏。其中,接地变用 于产生10kV中性点N;消弧线圈采用调匝式多级抽 头电感线圈,发生单相接地故障时用于补偿电容电 流,减少故障点残流;注入变压器柜包括注入变压器 T、二次阻容柜,注入变压器一次侧与消弧线圈L并 联,二次侧接入零序电压源屏和二次阻容柜;消弧及 选线控制屏用于对地参数测量、消弧线圈档位控制、 二次阻容柜投切、接地选线选相和控制零序电压源 屏;零序电压源屏采用幅值和相角可控的电力电子 电压源,锁相同步输出调控故障相电压。

#### 2.1 消弧线圈

对于谐振接地系统,调匝式消弧线圈具有结构 简单、可靠性高、无谐波污染及响应速度快等优点, 在我国电网公司得到了普遍应用。在变电站现场, 预调式调匝消弧线圈的级差电流通常约为5A,调档 至过补偿残流 5~10 A,消弧线圈偏离谐振点,且二 次并阻尼电阻将中性点零序电压控制在一定范围内。 2.2 **消弧及选线控制屏** 

消弧及选线控制屏由选线装置和消弧装置组 成,主要功能为:①通过中性点电压互感器,注入配 电网小电流信号,谐振测量对地电容电流、泄漏电导 等参数,误差小于3%;②采集消弧线圈档位,调档 至消弧线圈过补偿残流 5~10 A;③实时采集母线电 压以及中性点电压,进行故障选线选相,出线一次零 序电流采样精度为50 mA,选相选线保护灵敏度为 20 kΩ;④判断发生单相接地故障后,通过控制器局 域网络(CAN)总线下发控制指令至零序电压源屏, 控制输出特定幅值和相位的零序电压,抑制故障点 电压和残流,保证人身和设备的安全;⑤调控故障相 电压后,根据装置整定值,实时测量系统对地零序导 纳变化率,根据零序导纳变化率判断瞬时性故障或 永久性故障,进行后续逻辑控制和处理;⑥监测消弧 线圈、注入变压器、二次电容组及电压源输出电流, 进行过流保护。



图 3 降压消弧装置结构图 Fig.3 Structure diagram of voltage reduced arc suppression device

#### 2.3 零序电压源

针对配电网接地故障相主动降压消弧的理论与 技术,研发了相位和幅值快速可调的零序电压源,采用 交直交变换的整流逆变技术,额定容量为50 kV·A, 输出电压为50~345 V,稳态输出电压误差小于1%, 稳态同步相位误差在±2°范围内,输入过压、欠压和 缺相保护,输出过压、过流、过载和过热保护。为减 少零序电压源容量,降低造价,电压源输出并联电 容,用于补偿接地故障无功残流,即消弧线圈过补偿 5~10 A 的电感电流。则电压源主要补偿接地故障 有功残流,其容量S<sub>0</sub>如式(3)所示。

 $S_0 = S_c d \tag{3}$ 

其中, $S_c$ 为10 kV一段母线对地电容容量,根据电网 公司的现场实际情况,取最大值1000 kV·A,d为系 统阻尼率,一般为2%~5%,则 $S_0$ 为20~50 kV·A。

#### 2.4 注入变压器柜

注入变压器柜含注入变压器、二次电容组和阻 尼电阻,注入变压器额定电压6062/345/345V, 690V的低压侧接电容组和阻尼电阻;二次电容组额 定容量63kvar,折算到一次侧按1.5A级差电流配 置,用来抵消过补偿的电感电流,减少零序电压源无 功输出;二次阻尼电阻35Ω,用来抑制中性点电压。

#### 3 故障处理时序及流程

#### 3.1 故障处理时序

配电网发生单相接地故障过程中,主动降压消弧 成套装置的动作时序见附录A中的图A1,具体如下。

(1)当电网正常运行时,成套装置处于热备用状态,当发生接地故障时,中性点零序电压幅值 $|U_0|$ (或变化量 $|\Delta U_0|$ )大于等于启动门槛值 $|U_{set}|$ (或变化 量 $|\Delta U_{set}|$ )。

(2)选线装置在第1个周期使用暂态法进行选线,第2~3个周期使用导纳法、有功法等稳态法进行选线,综合给出故障选线结果。

(3)消弧装置在第3~4个周期内完成正确选相, 零序电压源开始输出,在第5~6个周期内,向中性点 注入与故障相反相的零序电压,强迫故障相电压抑 制到故障电弧重燃电压以下,残流被抑制到mA级。

(4)装置在5s(可整定)后,逻辑判断故障类别 是瞬时性接地故障还是永久性接地故障。若为瞬时 性接地故障,零序电压源退出,系统恢复正常运行方 式;若为永久性接地故障,零序电压源保持输出,抑 制接地故障电流,20s(可整定)后,再次逻辑判故障 类别,重复该步骤直至接地故障消失。

#### 3.2 对地电容电流测量

配电网正常运行时, $|U_0| < |U_{set}|$ ,从中性点电压 互感器二次侧注入小电流信号,改变信号频率,谐振 测量对地电容电流 $I_c$ 、脱谐度v及阻尼率d等参数, 根据整定的残流值(过补偿5~10 A),调整消弧线圈 档位至合适位置,工作流程见附录A中的图A2。

#### 3.3 单相接地故障选线保护及降压消弧处理

选线保护和降压消弧流程如附录A中的图A3 所示,具体如下。

(1)在接地故障瞬间,选线装置比较各线路零序 电流幅值、相位,并与零序电压极性作对比,自适应 融合接地过程中的各馈线零序电流幅值、相位及零 序导纳、功率、介损等特征参数,判断故障线路;并通 过各种判据信息融合,提高选线的准确率和提升高 阻接地故障选线能力。

(2)消弧装置正确选相后,消弧控制屏迅速(ms级)切除阻尼电阻、投入二次电容组,补偿多余电感电流;并控制电压源输出,调控故障相电压,抑制故障点电压至小于故障电弧重燃电压,强迫故障电弧熄灭。

(3)进行接地故障补偿后,通过调控零序电压, 实时测量零序导纳或对地介损的变化率,检测接地 故障是否消除。若接地故障已消除,即为瞬时性故 障,零序电压源自动退出,电网恢复正常状态。若接 地故障没有消除,即为永久性故障,零序电压源连续 输出,抑制故障电弧,保护人身和设备安全;并由用 户选择是让电网带故障持续运行一段时间,等待运 维检修人员处理,还是选线保护跳闸隔离故障。

## 4 中国电力科学研究院武汉分院(武高所) 满载运行实验

对于永久性故障,接地故障相主动降压消弧成 套装置调控故障相电压,抑制故障点电压和电流,可 以确保非故障相电压小于线电压,此时可以带单相 接地故障继续运行一段时间,运维检修人员可采取 措施处理接地故障,提高供电可靠性。为验证成套 装置长时间故障处理的能力,在武高所开展3h满载 温升实验(≥80%),记录电气和温度数据,验证装置 的可靠性和稳定性。

武高所10kV母线由110kV主变低压侧供电, 10kV配电网模拟电缆线路、架空及电缆架空混联共 计4条线路,系统电压为10.5kV,中性点零序电压为 56V,对地电容电流为40A,脱谐度为-41%,阻尼率 为1.8%。

成套装置满载输出时,消弧线圈输出电流为51.0A,注入变高压侧注入电流为15.1A,二次电容组输出电流为53.5A,零序电压源输出电流为133.5A,输出容量为46.1kV·A(有功输出5.3kW,无功输出45.8kvar),输出负载率为92.1%。连续运行3h后,关键测试点温度记录如附录B中的表B1所示。实验得到的主要结论如下:

(1)环境温度为28.4 ℃,测试时间从17:00开始 至20:20结束,接地运行200 min,间隔30 min记录 52

一次温度数据,各项参数正常;

(2)接地运行期间,故障点电压抑制在300V以下,残流为mA级,补偿效果良好;

(3)消弧线圈、消弧及选线控制屏、零序电压源 屏及二次阻容柜均无明显过热及烧损痕迹;

(4)晶闸管和IGBT电力电子器件3h温度稳定 在37.0℃左右,散热良好。

## 5 国家电网配电网智能化应用及关键设备 联合实验室(漯河真型配电网)性能测试

为验证主动降压消弧成套装置的功能效果,在 河南漯河10kV配电网真型试验场开展了单相接地 故障模拟试验,验证其单相接地故障的处理能力。

#### 5.1 实验室系统环境

10 kV 母线通过 2 500 kV · A 降压变压器和 2 500 kV · A 升压变压器背靠背接线供电,中性点经消弧 线圈接地;线路子系统共有 6 条出线(包含 3 条真实 线路与 3 条模拟线路),系统电压为 10.5 kV,中性点 零序电压为 60 V,对地电容电流为 112.4 A,脱谐度 为-3.2%,阻尼率为 3.4%。

#### 5.2 实验室故障类型设置

现场模拟5种单相接地故障:经500 Ω、10 kΩ和 16 kΩ电阻的单相接地故障,金属性单相接地故障, 单相电缆弧光接地故障。在电缆线路和架空线路分 别模拟A、B、C三相单相接地故障实验,每种工况分 别在装置退出和投入2种情况下进行,共记录30次 有效单相接地模拟实验的结果。

#### 5.3 实验结果及分析

经电缆弧光接地录波波形及实验数据分别如图 4和表1所示。表中, $t_1$ 为从故障开始到补偿结束的时间。经10k $\Omega$ 、16k $\Omega$ 电阻单相接地故障和金属接地





Fig.4 Recorded waveforms of single-phase cable arc grounding fault

#### 表1 单相电缆弧光接地实验数据

Table 1 Test data of single-phase cable arc

grounding fault 状态  $U_{\Lambda} / V$  $U_{\rm B}$  / V  $U_c / V$  $U_0 / V$  $I_{\rm f}$  / A  $t_1$  / ms 正常态 6231.9 6321.7 6233.2 56.34 \_ 故障态 9212.8 1810.5 8915.8 4334.20 3.5 \_\_\_\_ 补偿后 10854.0 232.7 10611.2 6271.50 0 110 故障的故障录波分别见附录B中的图B1—B3,对应的实验数据分别见附录B中的表B2—B4。

(1)由图4和表1可知,发生经电缆弧光接地故障时,装置能够进行正确选线和选相并进行补偿,零序电压源将中性点电压由故障态的4334.2 V 调控到补偿态的6271.5 V,将故障相电压由1810.5 V 抑制到232.7 V,并使故障点残流由3.5 A 减少到0,从故障开始到补偿结束的时间t,约为110 ms。

(2)由图 B1—B3 和表 B2—B4 可知,本文所提 成套装置均能进行正确选线和选相。发生金属性接 地故障时,若故障相母线电压小于 200 V 时则不补 偿,可整定选线保护装置动作切除接地故障。

(3)针对配电网单相接地故障,零序电压源从中 性点外加零序电压,主动调控故障相电压,将故障点 电压抑制到300 V以下并使残流均为mA级,补偿效 果明显,补偿时间与接地电阻、装置定值整定相关, 经16 kΩ高阻接地故障从发生到补偿结束的时间不 超过300 ms。

(4)本文所提成套装置对配电网电缆弧光接地 故障的处理效果最为明显,当故障发生时装置可迅 速抑制弧光重燃,避免弧光过电压及电缆火灾事故。

#### 6 110 kV 变电站挂网运行

#### 6.1 变电站系统环境

选定国家电网公司某110 kV 变电站进行标准 化安装和调试,对原有消弧线圈进行升级改造,不改 动原有消弧线圈接地方式。在不对该110 kV 变电 站10 kV 侧配电网运行方式、负荷进行任何改变的 前提下,进行了多种工况下的单相接地故障的效果进行了 验证,并完成了国内首个配电网接地故障相主动降 压消弧成套装置安装试运行,安装现场如附录 B 中 的图 B4 所示。10 kV 母线 II、III并列运行,有功负载 为17.6 MW,线路总数为8条,系统电压为10.3 kV,中 性点零序电压为311.0 V,对地电容电流为85.2 A, 脱谐度为-2.8%,阻尼率为4.1%。

#### 6.2 变电站故障类型设置

从现场某10 kV出线距变电站约3 km处的环网 柜B相引出试验线路,经过单相开关后经电缆安装 在绝缘支架上。分别在本文所提成套装置退出、投 入这2种情况下,模拟了经1 kΩ、16 kΩ过渡电阻的 单相接地故障及经泥土地单相断线弧光接地故障, 共完成19次单相接地试验,现场见附录B中的图B5。

#### 6.3 试验结果及分析

经1kΩ电阻单相接地故障的现场录波波形和 试验数据分别如图5和表2所示,其他故障的现场录 波波形和试验数据分别如附录B中的图B6、B7和表 B5、B6所示。

由现场试验录波波形和试验数据得到的主要结



图 5 经1 kΩ 电阻单相接地故障的现场录波波形

Fig.5 Field recorded waveforms of grounding fault with  $1 \text{ k}\Omega$  transition resistance

表2 经1 k $\Omega$ 电阻单相接地故障的现场试验数据

Table 2 Field test data of grounding fault with

1 kΩ	transition	resistance

状态	$U_{\rm A}/{\rm V}$	$U_{\rm B}/{\rm V}$	$U_{\rm C}/{\rm V}$	$U_0/\mathrm{V}$	$I_{\rm f}/{\rm A}$	$t_1/\mathrm{ms}$
正常态	6270	5740	5920	310	_	_
故障态	9080	1180	9630	4860	1.18	_
补偿后	10360	210	10550	6120	0.23	150

论如下。

(1)本文所提成套装置兼容原有消弧线圈等一次 设备,可用于经消弧线圈非有效接地配电网的升级; 通过注入小电流信号,谐振测量配电网对地参数,精 度高、速度快,不会引起中性点电压越限及告警。

(2)由图5和表2可知,本文所提成套装置能够 正确选相并进行补偿,零序电压源将中性点电压由 故障态的4860 V调控到补偿态的6120 V,将故障相 电压由1180 V抑制到210 V,并使得故障点残流由 1.18 A减少到230 mA,从故障开始到补偿结束的时 间约为150 ms。

(3)由图 B6、B7 和表 B5、B6 可知,本文所提成套装置在各种电阻接地、金属接地和断线弧光试验工况下,选相、选线结果均正确。

(4)发生瞬时性故障时,本文所提成套装置进行 补偿后,约5s(定值可整定)后自动退出,恢复电网 正常状态,不需要人工退出机制;发生永久性故障 时,装置进行补偿后,约20s(定值可整定)后自动识 别故障类型。

(5)本文所提成套装置可对瞬时故障进行安全 消弧、对永久故障进行迅速隔离,并调控故障相电 压,将故障点电压抑制到300 V以下,使接地点残流 均为mA级,故障点接近零电压零电流,在补偿过程 中现场不会产生过电压级谐波电流,提高了供电可 靠性,保证了人身和设备安全。

#### 7 结论

针对配电网接地故障处理难题,本文提出了配 电网接地故障相主动降压消弧原理与技术,研发了 故障相主动降压消弧成套装置。在武高所、国网配 电网智能化应用及关键设备联合实验室(漯河真型 配电网)开展性能检测实验,在国网某110 kV变电 站完成了故障相主动降压消弧装置的标准化安装、 调试和单相故障试验,并挂网投运。对故障录波及 实验数据进行分析可知,当发生单相接地故障时,本 文成套装置通过中性点调控故障相电压,补偿后故 障点电压被抑制到300 V以下,残流为mA级,故障 发生到补偿结束的时间约为100~300 ms。

本文成套装置在实际配电网运行过程中,由于 对地绝缘故障通常有一个缓慢的发展历程,初始故 障的绝缘击穿电压高,只需要对故障相主动降压 25%左右就可能抑制接地故障,即非故障相电压上 升小于20%,可以长期运行,有效提升了供电可靠 性和安全运行水平。

对于中性点经消弧线圈接地的城市电缆配电网 系统,本文所提成套装置能够快速抑制接地故障点 的电压和残流,以及故障点的跨步电压和接触电压。 切实提升了人身安全防护水平,可防止人身触电事 故的发生,有利于提高用户供电可靠性,降低电缆间 隙性弧光及过电压火灾等事故风险。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

#### 参考文献:

- [1] 要焕年,曹梅月. 电力系统谐振接地[M]. 北京:中国电力出版 社,2009:121-128.
- [2]郑鹏鹏. 配电网消弧装置应用中相关问题的研讨[J]. 电力自动化设备,2007,27(8):115-118.
   ZHENG Pengpeng. On arc suppression device application in distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007,27(8):115-118.
- [3]朱珂,王怡轩,倪建. 主动干扰技术在消弧线圈接地系统故障 选线中的应用[J]. 电力自动化设备,2017,37(10):189-196.
   ZHU Ke,WANG Yixuan,NI Jian. Application of active disturbance technology in faulty line selection of arc suppression coil grounding system[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(10):189-196.
- [4] 曾祥君,王媛媛,李健,等.基于配电网柔性接地控制的故障消弧与馈线保护新原理[J].中国电机工程学报,2012,32(16): 137-143.
  ZENG Xiangjun, WANG Yuanyuan, LI Jian, et al. Novel principle of faults arc extinguishing & feeder protection based on flexible grounding control for distribution networks[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(16):137-143.
- [5]杨磊,曾祥君,喻锟,等.新型谐振接地系统接地故障全补偿方法[J].电力自动化设备,2018,38(11):57-62.
  YANG Lei,ZENG Xiangjun,YU Kun, et al. Novel method of full compensation for grounding fault of resonant grounding system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38 (11):57-62.
- [6]李晓波,王崇林. 零残流消弧线圈综述[J]. 电力自动化设备, 2011,31(6):116-121.
   LI Xiaobo,WANG Chonglin. Survey of zero-residual-current arc suppression coil[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011,31(6):116-121.
- [7]曲铁龙,董一脉,谭伟璞,等.基于单相有源滤波技术的新型消弧线圈的研究[J].电力系统保护与控制,2007,35(3):29-33.
   QU Yilong,DONG Yimai,TAN Weipu,et al. Research on new type arc-suppression coil based on single-phase active power filter technology[J]. Power System Protection and Control, 2007,35(3):29-33.

[8]陈柏超,王朋,沈伟伟,等.电磁混合式消弧线圈的全补偿故障 消弧原理及其柔性控制策略[J].电工技术学报,2015,30 (10):311-318.

64

CHEN Baichao, WANG Peng, SHEN Weiwei, et al. The principle of full compensation arc suppression and flexible control of electromagnetic hybrid Petersen coil[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(10):311-318.

[9] 郭谋发,游建章,张伟骏,等.基于三相级联H桥变流器的配电
 网接地故障分相柔性消弧方法[J].电工技术学报,2016,31 (17):11-22.
 GUO Moufa,YOU Jianzhang,ZHANG Weijun, et al. Separate-

phase flexible arc-suppression method of earth-fault in distribution systems based on three-phase cascaded H-bridge converter [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(17):11-22.

- [10] 刘维功,薛永端,徐丙垠,等.可适应线路结构动态变化的有源 消弧算法[J]. 电网技术,2014,38(7):2008-2013.
  LIU Weigong, XUE Yongduan, XU Bingyin, et al. An active arc-supression algorithm adaptable to dynamic structure variation of transmission line[J]. Power System Technology,2014, 38(7):2008-2013.
- [11] 王宇波, KLAUS Winter. 接地故障中和器全补偿技术及应用
  [J]. 供用电,2015,32(6):24-29.
  WONG Yubo, KLAUS Winter. Earth fault neutralizer full compensation technology and application[J]. Distribution & Utilization,2015,32(6):24-29.
- [12] 王宾,耿建昭,董新洲,等. 基于介质击穿原理的配电线路高阻接地故障精确建模[J]. 电力系统自动化,2014,38(12):62-66.
   WANG Bin, GENG Jianzhao, DONG Xinzhou, et al. High-impedance fault modeling based on solid dielectric electrical breakdown theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014,38(12):62-66.
- [13] 艾绍贵,李秀广,黎炜,等. 配电网快速开关型消除弧光接地故障技术研究[J]. 高压电器,2017,53(3):178-184.
  AI Shaogui,LI Xiuguang,LI Wei,et al. Arc suppression technology based on fast switch for distribution network[J]. High Voltage Apparatus,2017,53(3):178-184.

- [14] 李新泉,齐郑,杨以涵. 消弧线圈与接地故障转移装置配合使用的消弧方法[J]. 电力系统自动化,2008,32(19):71-75.
   LI Xinquan, QI Zheng, YANG Yihan. Arc-suppression method for coordinated using of arc-extinguish coil with grounded-fault transfer device[J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(19):71-75.
- [15] 刘健,田晓卓,李云阁,等. 主动转移型熄弧装置长馈线重载应用问题分析[J]. 电网技术,2019,43(3):1105-1110.
  LIU Jian,TIAN Xiaozhuo,LI Yunge, et al. Application analysis of active transfer type arc-extinguishing device under long feeder line and heavy load[J]. Power System Technology, 2019,43(3):1105-1110.
- [16] 赵军,阮琦,李景禄.考虑线路压降的快速接地开关消弧性能及应用[J].电力系统自动化,2018,42(20):159-164.
   ZHAO Jun, RUAN Qi, LI Jinglu. Arc eliminating performance and application of fast grounding switch considering line voltage drop[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018,42 (20):159-164.

#### 作者简介:



卓 超(1985—),男,湖南慈利人,博 士研究生,主要研究方向为电力系统保护与 控制(**E-mail**:zhuochao106@qq.com);

曾祥君(1972—),男,湖南邵阳人,教 授,博士,通信作者,主要研究方向为电力系 统保护与控制(E-mail:eexjzeng@qq.com); 彭红海(1972—),男,湖南怀化人,讲

卓 超

师,硕士,主要研究方向为电力系统保护与 控制(E-mail:476544631@qq.com);

喻 锟(1989—), 男, 湖南长沙人, 讲师, 博士, 主要研究 方向为电力系统保护与控制(E-mail: kunyu0707@163.com);

王 沾(1989—),男,湖南湘潭人,工程师,博士研究生,主 要研究方向为电力系统保护与控制(E-mail:704869953@qq. com)。

(编辑 任思思)

# Arc suppression device with active reduction of grounding fault phase voltage and field test for distribution networks

ZHUO Chao<sup>1</sup>, ZENG Xiangjun<sup>2</sup>, PENG Honghai<sup>3</sup>, YU Kun<sup>2</sup>, WANG Zhan<sup>2,4</sup>

(1. Guangxi Key Laboratory of Power System Optimization and Energy Technology, Guangxi University,

Nanning 530004, China; 2. Hunan Province Key Laboratory of Smart Grids Operation and Control,

Changsha University of Science and Technology, Changsha 410004, China;

3. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

4. Changsha Jingke Electric Power Technology Co., Ltd., Changsha 410004, China)

Abstract: Intermittent arc grounding fault often occurs in neutral non-effectively grounded distribution networks, resulting in overvoltage, endangering personal and equipment safety, and even causing cable channel fire disasters. Aiming at this problem, the arc suppression control principle and technology based on active reduction of grounding fault phase voltage are proposed, and the corresponding device is developed. By flexibly adjusting the zero-sequence voltage, the fault point voltage is controlled to be lower than the reignition voltage of fault arc to force the fault arc extinguish, so the grounding fault can be eliminated without power outage and overvoltage can be effectively suppressed. Through large amount of laboratory tests, actual substation tests and operation, the correctness and feasibility of the arc suppression technology based on active reduction of grounding fault phase voltage are verified.

Key words: non-effectively grounded distribution networks; grounding fault; arc suppression with active voltagereduction; grounding fault field test 附录 A





Fig.A1 Sequence diagram of Voltage reduced arc suppression device



图 A2 谐振测量流程图

Fig.A2 Flowchart of resonance measurement



图 A3 降压消弧流程图

Fig.A3 Flowchart of step-down voltage

#### 表 B1 关键测试点温度数据

Table B1 Temperature data of test point

测试上	测试点温度/℃							
仍民	0	30min	60min	90min	120min	150min	180min	
注入变压器铁芯	29.5	30.6	30.5	31.8	33.1	37.5	39.9	
注入变压器绕组	29.7	41.5	73.5	97.5	115.9	122.8	125.2	
隔离变压器	29.3	41.0	61.4	79.4	76.8	63.0	65.4	
直流电容器	28.2	31.5	33.8	32	31.2	31.2	31.2	
晶闸管	32.5	42.8	35.0	35.2	39.8	37.4	36.8	
IGBT	32.5	42.8	35.0	35.2	39.8	37.4	36.8	
电压源风扇	36.5	46.5	48.5	52.4	54.0	56.4	57.3	



Fig.B1 Recorded waveforms of single-phase grounding fault with  $10 k \Omega$  transition resistance



Fig.B2 Recorded waveforms of single-phase grounding fault with  $16 k \Omega$  transition resistance



Fig.B3 Recorded waveforms of single-phase direct grounding fault

#### 表 B2 经 10kΩ 电阻单相接地故障的实验数据

Table B2 Test data of single-phase grounding fault with  $10k\Omega$  transition resistance

状态	$U_{\rm A}/{ m V}$	$U_{\rm B}/{ m V}$	$U_{\rm C}/{ m V}$	$U_0/V$	$I_{\rm f}/{\rm A}$	$t_1/ms$
正常态	6104.5	6225.1	6125.8	65.3	_	_
故障态	6262.6	6324.1	5880.2	266.8	0.4	—
补偿后	10727.2	10817.4	172.0	6429.3	0.01	350

表 B3 经 16kΩ	电阻单相接地故障的实验数据

Table B3 Test data of single-phase grounding fault with  $16 k \Omega$  transition resistance

状态	$U_{\rm A}/{ m V}$	$U_{\rm B}/{ m V}$	$U_{\rm C}/{ m V}$	$U_0/\mathrm{V}$	$I_{\rm f}/{\rm A}$	$t_1/ms$
正常态	6122.6	6223.6	6145.2	52.0	—	_
故障态	61690	5995.0	6337.0	216.7	0.2	—
补偿后	10763.9	200.9	10543.8	6278.7	0.01	260

#### 表 B4 单相金属接地实验数据

Table B4 Test data of single-phase direct grounding fault

状态	$U_{\rm A}/{ m V}$	$U_{\rm B}/{ m V}$	$U_{\rm C}/{ m V}$	$U_0/\mathrm{V}$	$I_{\rm f}/{\rm A}$	$t_1/ms$
正常态	6277.9	6373.8	6316.9	56.4	—	—
故障态	10877.9	57.0	10877.6	6214.0	2.9	—
补偿后	10967.4	57.0	10920.4	6214.0	2.9	不补偿



图 B4 保护室及户外柜安装图

Fig.B4 Installation diagram of substation relay room and outdoor cabinet



图 B5 试验现场图 Fig.B5 Field test





Fig.B6 Field recorded waveforms of grounding fault with  $16 k \Omega$  transition resistance





Fig.B7 Recorded waveforms of single-phase ARC grounding in dirt

表 B5 经  $16k\Omega$  电阻单相接地故障的现场试验数据

Table B5 Field test data of grounding fault with  $16 k \Omega$  transition resistance

状态	$U_{\rm A}/{ m V}$	$U_{\rm B}/{\rm V}$	$U_{\rm C}/{ m V}$	$U_0/\mathrm{V}$	$I_{\rm f}/{\rm A}$	$t_1/ms$
正常态	6270	5740	5920	310	—	_
故障态	6386	5451	6152	530	0.34	—
补偿后	10340	230	10550	6110	0.02	220

表 B6 经泥土地断线弧光接地试验数据

Table B6 Test data of ARC grounding in dirt

状态	$U_{\rm A}/{ m V}$	$U_{\rm B}/{ m V}$	$U_{\rm C}/{ m V}$	$U_0/\mathrm{V}$	$I_{\rm f}/{\rm A}$	$t_1/ms$
正常态	6297	5744	5934	311	—	_
故障态	8180	2430	8150	3520	0.72	—
补偿后	10330	230	10530	6090	0.03	110