

一种新型消弧方法的研究及其实现

李新泉, 齐 郑, 杨以涵

(华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206)

摘要: 分析了现行消弧装置的优缺点, 提出了一种使用自动补偿消弧线圈与故障相快速接地装置相配合使用的新型的消弧方法, 阐述了基于该消弧方法的消弧装置的整体结构以及各部分的工作方式, 讨论了所使用各部分装置的动作配合方案。该消弧方法能够兼顾快速熄灭电弧和减小接地电流, 使小电流接地系统单相弧光接地问题得到很好的解决, 能够进一步提高电网的安全性和供电质量。

关键词: 小电流接地; 消弧方法; 消弧装置; 消弧线圈; 故障相快速接地装置

Research and realization on a new tape arc-suppression method

LI Xin-quan, QI Zheng, YANG Yi-han

(Department of Electric Power Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The merits and demerits of present arc-suppression devices were analyzed. A new method that coordinately used automatic tracking compensation arc-suppression coil and grounding phase quick-ground device was proposed. The overall construction of arc-suppression device based on this arc-suppression method and working of various parts were elaborated. The movement coordination plan of various parts installed was discussed. This arc-suppression method could extinguish arc quickly and compensate earth current. Enabled the problem of single-phase ground arcing faults in neutral point non-effectively grounded systems to obtain a good solution, could further enhance the security and quality of electrical network.

Key words: neutral point non-effectively grounding; arc-suppression method; arc-suppression device; arc-extinguishing coil; grounding phase quick-ground device

中图分类号: TM475 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)24-0083-05

0 引言

我国 6~66 kV 配电网的运行主要采用小电流接地方式, 包括中性点不接地或经消弧线圈接地方式。目前随着配电网的扩大以及电缆线路的增加, 电网对地电容电流急剧增加。当接地电流超过一定范围时, 自然熄弧将变得非常困难。在此种情况下, 易产生间歇性电弧过电压, 同时电弧的存在易导致由单相接地发展为相间短路故障^[1], 直接威胁电网的安全运行。

目前的消弧装置主要是消弧线圈, 老式手动调谐的消弧线圈由于不能精确地跟踪电网电容电流的变化^[2], 其使用越来越受到限制, 自动调谐消弧线圈很大程度上解决了手动消弧线圈存在的问题但由于消弧线圈本身的特点, 很多时候并不能起到很好的消弧效果。因此, 快速彻底熄灭电弧技术的研究对电网的安全运行有着十分重要的意义。

本文提出了自动补偿消弧线圈与故障相快速

接地装置配合使用的消弧方法, 使用该方法消弧不仅能够快速熄灭电弧, 同时可以使接地电流减小到安全水平, 能够进一步提高电网运行的安全性和可靠性。

1 消弧方法研究

电力系统中的单相电弧接地现象是比较复杂的, 故障点接地电弧的熄灭要受到故障点的过渡电阻、残流中的高次谐波和有功分量、电网频率、电压波动和自然界气象条件等诸多因素的影响^[3]。系统发生弧光接地, 电弧能否保持, 主要取决于两个方面。

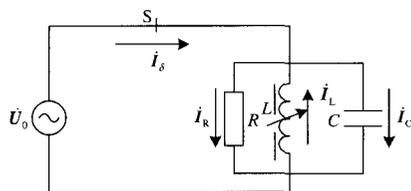
a. 流过弧道的电流强度和特性。若电弧电流很小, 则电弧不易保持, 一定条件下自行熄弧, 系统恢复正常。

b. 弧道两端的恢复电压与弧道介质抗电强度的相对关系。当电弧在电流过零熄灭后, 弧道绝缘介质抗电强度在恢复, 同时弧道两端的电压也在逐

渐上升, 如果能够保持弧道介质的抗电强度始终大于加在弧道上的电压, 电弧就不会复燃, 反之电弧就要持续下去^[4]。

1.1 消弧线圈的消弧原理及局限性

消弧线圈利用原理 a 灭弧, 消弧线圈的电感电流补偿了电网的接地电容电流, 限制了接地故障电流的破坏作用, 使残余电流的接地电弧易于熄灭。为了计算故障点残余电流, 利用赫尔姆斯-戴维南定理可以得出补偿电网的电流谐振等值回路如图 1 所示^[3]。



注: R 为补偿电网的等值全损耗电阻; L 为消弧线圈的调谐电感; C 为电网三相对地电容

图 1 补偿电网的电流谐振等值电路

Fig.1 Current resonance equivalent circuit of compensation electric network

利用图 1 中的等值电路, 可方便地求出残余电流 \dot{I}_s , 其值为:

$$\dot{I}_s = I_R + j(I_C - I_L) = I_R + j(\omega C U_0 - \frac{U_0}{\omega L} + 3\omega C U_0 - \frac{U_0}{3\omega L} + 5\omega C U_0 - \frac{U_0}{5\omega L} + \dots) \quad (1)$$

由公式 (1) 可以看出, 由于消弧线圈的电感电流补偿了电网的接地电容电流, 使故障点的接地电流变为数值显著减小的残余电流。

然而由于消弧线圈本身的特性, 在有些情况下, 利用消弧线圈熄弧并不能起到很好的效果。现行所有为消弧线圈设计的自动跟踪或自动调谐装置都是在电网工频 (50 Hz) 下工作的, 在高频振荡的过渡过程中, 由于消弧线圈和电网电容两者的频率特性相差悬殊, 是不可能互相补偿或调谐的^[5]。也就是说, 消弧线圈对弧光接地过程中产生的高频谐波分量并不能起到补偿的作用。随着近代工业的发展, 大量的换流设备和非线性负荷不断投入电力系统, 使电网的谐波含量显著增加。表 1 为某 6 kV 变电站发生单相金属性接地时接地电流各谐波成分分析, 可以看出, 接地电流中的五次谐波成分相当大, 由于消弧线圈只能补偿基波电流, 这将直接影响消弧线圈对接地电流的补偿。同时, 某些自动调谐消弧

线圈本身也是谐波源, 当系统电容电流较大时, 高频谐波的存在就会给消弧线圈的熄弧带来严峻的挑战。

表 1 单相金属性接地故障接地电流各谐波成分分析

Tab.1 Harmonic component analysis sheet of single-phase bolted grounding fault grounding current

谐波次序	I
基波/A	22.4036
三次谐波/A	0.3673
五次谐波/A	2.8464
七次谐波/A	0.6842
有效值/A	22.6731

另外, 消弧线圈是无功补偿装置, 它不能补偿单相接地故障电流中的有功分量, 同时由于它自身的存在, 还增大了这一有功分量^[3], 当补偿容量很大时, 有功损耗电流也是比较可观的, 而且还有可能派生出其它损耗, 这也会对消弧线圈的熄弧产生不良的影响。

1.2 故障相快速接地方法的熄弧原理

当发生弧光接地后, 如果将故障相快速接地, 就可以实现利用原理 b 灭弧。由于故障相直接接地, 可使故障相电压即弧道恢复电压限定在接近于零的值。据交流电弧理论, 电弧电流过零后, 若弧道介质抗电强度始终大于加在弧道上的电压, 则可使电弧熄灭。图 2 为电弧电流衰减的等值回路。

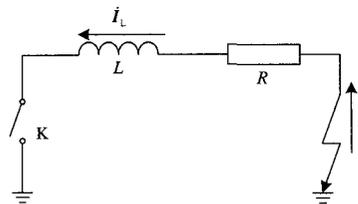


图 2 电弧电流衰减等值电路

Fig.1 Current resonance equivalent circuit of attenuation of arcing earth current

由图 2 可知, 以真空接触器闭合的时刻为零时刻, 则有 $i(t) = i_L(0+)e^{-\frac{R}{L}t}$, $i_L(0+) = I_{max} \cos \varphi$ 即有:

$$i(t) = I_{max} \cos \varphi e^{-\frac{R}{L}t} \quad (2)$$

式中: I_{max} 为电弧接地电流的最大值, $I_{max} \cos \varphi$ 为接触器闭合时刻接地电流的瞬时值, L 、 R 分别为等值回路的电感和电阻。

可见在电弧熄灭之前, 电弧电流成指数衰减, 此种熄弧方法能可靠地熄灭电弧。电弧电流的衰减速度与线路电感、电阻有关, 还与故障相快速接地

装置投入时刻接地电流的瞬时值有关。接地电流的瞬时值越小,线路电阻越大,线路电感越小,则衰减速度越快,电弧熄灭的速度越快。

就一般情况而言,电弧的熄灭速度能满足现场要求,并且,由于采取了与消弧线圈完全不同的熄弧原理,因此这种方法能够快速熄灭电弧,且不受谐波分量和有功分量的影响,适应能力较强。

文献[6]提出的消弧及过电压保护装置采用了类似的原理,该装置通过将母线的故障相直接接地实现消弧,其不足之处在于增加了运行的危险性,因为一旦将母线接地后出现另一相接地,将直接危及主变的安全。我们提出的故障相快速接地方法是将备用线路上的故障相快速接地,接地点在备用线路断路器的外侧,因此大大降低了故障转移后的危险性。但由于该方法未对接地电流进行处理,直接接地形成比较大的接地电流会引起对地电位升高,增加了跨步电位差和接地电位差。所以,该方法是一种很好的熄弧手段,但不具备单独处理单相接地故障的能力。

1.3 消弧线圈与故障相快速接地装置配合使用的消弧方法

评价一种消弧装置的关键在于其熄灭电弧的速度及对接地故障产生威胁进行处理即减小接地电流的效果。消弧线圈通过补偿接地电流的原理熄灭电弧,使电弧熄灭的同时,也减小了接地故障对电网及人身安全产生的威胁,但由于只能对接地电流中的基波无功电流分量进行补偿,当其他电流分量较大时,熄弧的效果受到严峻的考验;故障相快速接地装置熄灭电弧速度较快,且适应能力强,但未对接地电流进行处理。因此本文提出了使用自动补偿消弧线圈与故障相快速接地装置配合使用的消弧方法,该消弧方法可有效结合故障相快速接地装置快速可靠熄灭电弧和消弧线圈从根本上减小接地电流的优点,使弧光接地故障得到很好的处理,能够进一步提高电网的安全性和供电质量。

2 消弧装置结构

本文提出了自动补偿消弧线圈与故障相快速接地装置配合使用的消弧方法。

针对我们提出的这种消弧方法,本文设计了一种新型的消弧装置,目前该装置已在现场投入运行。装置的整体结构如图3所示。

自动调谐的消弧线圈均可应用于该消弧装置,本消弧装置采用的与故障相快速接地装置配合使用

的消弧线圈是我们自行研发的并联电抗器组合式消弧线圈。用到的基本装置有Z型接地变压器(当系统具有中性点时可不用)、8421 并联电抗器组合式消弧线圈、故障相快速接地装置、主控制器等。

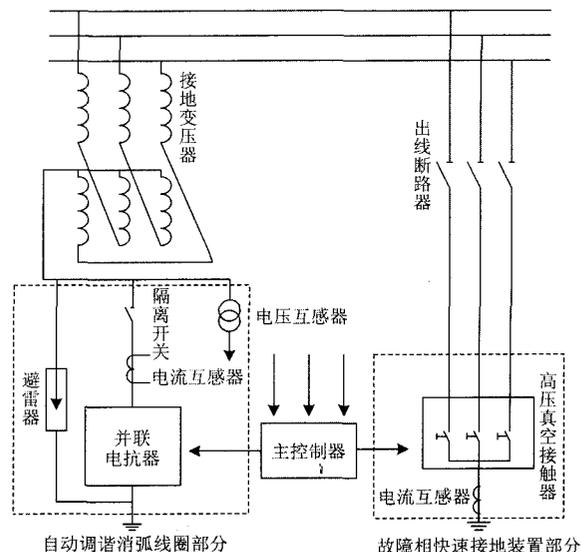


图3 消弧装置结构图

Fig.3 Structure map of the arc-suppression device

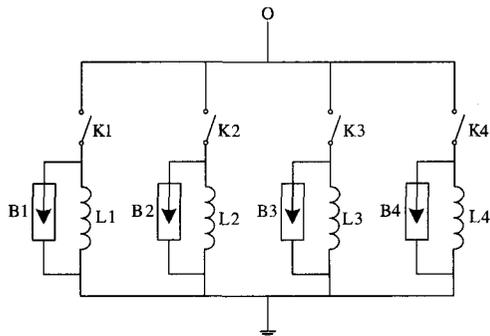
2.1 故障相快速接地装置

故障相快速接地装置是一种故障转移装置,如图3中故障相快速接地装置部分所示。当发生单相接地故障时,控制器根据采集的信号进行计算,判断单相接地故障的接地相别和接地属性。当判断出的接地属性为不稳定的间歇性弧光接地时,则判断接地相别并发出指令,使分相控制的高压真空接触器中对应的一相接地,系统由不稳定的弧光接地转化为稳定的金属性接地,故障相的对地电压为零,故障点的电弧熄灭,其它两相的对地电压稳定在线电压^[7]。当接地属性为稳定的金属性接地或经过渡电阻接地时,本部分无动作。

2.2 8421 并联电抗器组合式消弧线圈

8421 并联电抗器组合式消弧线圈结构如图4所示,L1、L2、L3、L4 为电抗器,其容量按 1:2:4:8 分配,K1、K2、K3、K4 为高压接触器。当接触器闭合时,相应的电抗器投入电网;当接触器断开时,相应的电抗器退出电网。这样消弧线圈具有 0000~1111 之间变化的 16 个档位。

消弧线圈采用“随调”的运行方式,正常运行时真空接触器都处于断开状态,即电抗器都退出系统,发生单相接地后快速投入电抗器,达到全补偿熄弧^[8]。



注：O 为中性点；K1, K2, K3, K4 为高压真空接触器；L1, L2, L3, L4 为电抗器；B1, B2, B3, B4 为避雷器。

图 4 并联电抗器组合式消弧线圈

Fig.4 Combined arc suppression coil with shunt reactor

2.3 主控制器

主控制器监测电压互感器，电流互感器二次侧的信号，通过编写程序进行分析计算，可以自动跟踪测量系统的对地电容。当发生单相接地故障时，进行单相接地故障选线，并根据电压互感器的电压信号进行计算处理，判断故障相别及故障属性。当发生单相弧光接地时，控制故障相快速接地装置部分的真空接触器的投入。对并联电抗器组合式消弧线圈部分真空接触器进行调节控制，以改变消弧线圈补偿电流。

3 消弧装置工作方式

在系统正常运行时，需跟踪测量出系统的对地电容，以便控制器根据用户指定的残流或脱谐度要求得到准确的补偿方案。目前，测量系统对地电容的方法主要有中性点位移电压法、两点法、注入信号法等^[9,10]。装置的工作流程如图 5 所示。

当发生单相弧光接地故障时，控制器通过附带的选线功能进行选线，同时立即投入故障相快速接地装置进行熄弧，并通过投入消弧线圈来补偿接地电流，恢复线路的绝缘，使系统重新回到正常的运行状态；金属性接地或经过渡电阻接地时，故障相快速接地装置无动作，控制器进行选线，并投入消弧线圈补偿接地电流。

4 动态试验效果

为了验证这种消弧方法的可行性，在我校的 10 kV 高压物理模拟实验室里进行了大量的试验，该试验系统的核心设备是 10 kV 电网模型，由 380/10 kV 变压器及接在 10 kV 母线上的四条出线构成，线路模型采用 π 型等效模型。通过控制器上的录波功能录取波形。

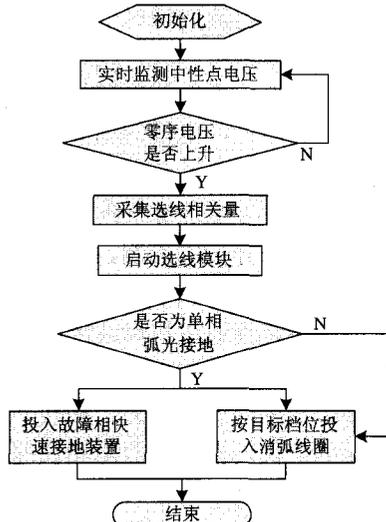


图 5 故障发生处理流程图

Fig.5 Flow diagram of fault disposal

图 6 所示为发生单相弧光接地时新型消弧装置投入时的零序电压及接地点电流、故障相快速接地装置的接地电流的波形（其中电压为 PT 二次侧值，变比为 80:1）。

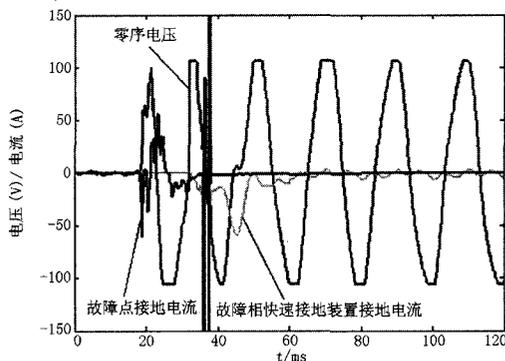


图 6 接地故障发生时电压电流波形

Fig.6 Waveform of voltage and current when single-phase ground arcing faults is happening

图中，通过母线零序电压可以看出，故障开始发生时刻为第 18 ms，故障相快速接地装置中的接触器完全闭合时刻为第 32 ms，由于故障相快速接地装置的投入，故障点接地电流迅速减小为零，此时，电弧被熄灭，又经过 4 ms 后，并联阻抗式消弧线圈的接触器按照预定方式投入，经过 2 ms 过渡过程后开始补偿，由于消弧线圈补偿了接地电流中的基波无功分量，使得故障相快速接地装置的接地电流迅速地减小。

可见，当发生单相弧光接地故障时，新型的消弧装置即能快速可靠的熄灭电弧，又能减小小接地电

流,基本消除了单相接地故障带来的危害。

5 结语

本文提出了自动补偿消弧线圈与故障相快速接地装置配合使用的消弧方法,这是一种快速可靠的新型消弧方法,能够提高熄弧速度并消除接地故障对电网产生的威胁,从而提高电网运行的安全性及可靠性。

针对本文提出的新型消弧方法,本文设计了一种新型的并联电抗器组合式消弧线圈与故障相快速接地装置配合使用的消弧装置,可以快速可靠地实现消弧功能,模拟试验及现场应用表明这种消弧装置能够提高熄弧能力,大大改善了现有消弧装置的性能。

参考文献

- [1] 刘虹,尹忠东.新型可控自动消弧成套装置的应用研究[J].电力系统自动化,1998,22(2):9-12.
LIU Hong, YIN Zhong-dong. Application Research on a New Type Automatic Controllable Arc Extinguishing Apparatus[J]. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22(2): 9-12.
- [2] GRIFFEL D, LEITLOFF V, HARMAND Y, et al. A New Deal for Safety and Quality on MV Networks[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1997, 12(4):1428-1433.
- [3] 要焕年,曹梅月.电力系统谐振接地[M].北京:中国电力出版社,2000.
YAO Huan-nian, CAO Mei-yue. Resonant Grounded System in Electric Power Systems[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2000.
- [4] 杨振宇,钱敏慧,陈宏钟,等.基于ZnO非线性电阻的新型消弧消谐策略研究[J].电力自动化设备,2006,26(9):20-23.
YANG Zhen-yu, QIAN Min-hui, CHEN Hong-zhong, et al. Study on Arc and Resonance Elimination Strategy Based on ZnO Varistor[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(9): 20-23.
- [5] 许颖.对消弧线圈“消除弧光接地过电压”的异议[J].电网技术,2002,26(10):75-77.
XU Ying. Dissidence to “The Elimination of Ground Arcing Faults Caused Over-voltage by Peterson’s Coils”[J]. Power system Technology, 2002, 26(10): 75-77.
- [6] 姜坛.弧光接地过电压及其限制措施[J].铜业工程,2006,(4):48-51.
JIANG Tan. Over-voltage of Arc Light Earthing and Its Restricting Measures[J]. Copper Engineering, 2006, (4): 48-51.
- [7] 杨旭.一种消弧及过电压保护装置的分析[J].广东电力,2005,18(6):37-40.
YANG Xu. Analysis on a Kind of Arc-suppression and Over-voltage Protection Device[J]. Guangdong Electric Power, 2005, 18(6): 37-40.
- [8] 何锡祺,齐郑,杨以涵,等.并联电抗器组合式消弧线圈的研究.电力系统自动化,2008,29(24):75-78.
HE Xi-qi, QI Zheng, YANG Yi-han. Research on Esearch on Combine Arc Suppression Coil With Shunt Reactor[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 29(24): 75-78.
- [9] 陈忠仁,吴维宁,张勤,等.调匝式消弧线圈自动调谐新方法[J].电力系统自动化,2005,29(24):75-78.
CHEN Zhong-ren, WU Wei-ning, ZHANG Qin, et al. New Automatic Tuning Method for Multi-tap Arc-suppression Coil[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(24): 75-78.
- [10] 蔡旭,李仕平,杜永忠,等.变阻尼调匝式消弧线圈及接地选线综合控制器.电力系统自动化,2004,28(5):85-89.
CAI Xu, LI Shi-ping, DU Yong-zhong, et al. An Integrated Controller of Multi-tap Arc-suppression with Variational Damp and Detection of Earth Fault Feeder[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(5): 85-89.

收稿日期:2008-06-03; 修回日期:2008-06-10

作者简介:

李新泉(1985-),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统运行、分析与控制; E-mail: tiankong7710@163.com

齐郑(1977-),男,博士,讲师,研究方向为配电网自动化;

杨以涵(1927-),男,博士生导师,研究方向为电力系统分析与控制。