

# 一种新的适合分布安装的消弧线圈

唐 轶, 陈 庆

(中国矿业大学 信电学院, 江苏 徐州 221008)

**摘要:** 可自恢复性单相接地故障点的电弧是否能自然熄灭的决定因素是接地故障残流的大小。以降低单相接地故障点的残流为出发点, 从理论上分析了谐振接地系统残流产生的原因; 消弧线圈自动跟踪补偿只能有效地降低零序回路的无功电流, 不能降低零序回路的有功电流。通过仿真计算得出结论: 消弧线圈分布安装是降低谐振接地系统接地故障点残流有功分量的有效方法。针对我国 6 kV 和 10 kV 中压配电网一般均为  $\Delta$  接线, 无辅助中性点供消弧线圈接入的特点, 设计了一种新颖的消弧线圈。该消弧线圈为三相五柱电抗器结构, 通过调节两边柱的气隙大小改变补偿电流的大小, 结构简单, 适合于分布安装。实验室试验证明其补偿电感线性度好、补偿效果好。

**关键词:** 消弧线圈; 单相接地故障; 中性点接地

**中图分类号:** TM 55

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1006-6047(2007)11-0087-04

## 0 引言

配电网故障的 80 % 左右为单相接地故障<sup>[1-4]</sup>。单相接地故障中的绝大多数为可自恢复的故障, 尤其是自然条件差(台风、雷电频繁)的架空线电网, 需要分断电路处理的永久性单相接地故障更是极少数<sup>[4]</sup>。因此, 从提高供电可靠性考虑, 我国中压配电网绝大多数采用小电流接地方式。小电流接地电网中, 单相接地故障相当大一部分为可自恢复的故障。可自恢复性单相接地故障点的电弧是否能自然熄灭的决定因素是接地故障残流的大小: 残流小, 有利于电弧过零时熄灭; 残流小, 电弧对介质绝缘的破坏程度低, 有利于故障点绝缘介质的恢复, 使电弧不易重燃; 残流小, 也有利于降低故障相恢复电压的初始速度, 使电弧不易重燃。小电流接地方式是以单相接

地故障电弧自行熄灭、故障自恢复为原则的。因此, 消弧线圈的安装、运行应该以使接地故障点的残流尽量小为目标。

不管是城市电网还是农村电网, 用电负荷都在急剧增加, 电网的结构及规模在不断扩大; 城镇电网的改造中, 电缆网络正在逐渐取代架空线路; 过去采用单电源的辐射式供电或树状供电方式, 已不能满足用电负荷增长的要求, 而需要采用网孔形或环形等供电方式; 这些因素都使其单相接地故障电流急剧增加, 单体大容量自动跟踪补偿消弧线圈被采用<sup>[5-8]</sup>。当消弧线圈的单体容量不能满足补偿电网接地电流的要求时, 在同一电网安装 2 台或多台自动跟踪补偿消弧线圈的也有之。实际上, 消弧线圈只能减少接地故障电流的无功分量, 即脱谐度只是单相接地残流中无功分量大小的决定因素。即使采用自动跟踪补偿的方法来实现理想调谐, 使接地电流中的无功分量几乎为零后, 零序回路的有功损耗电流仍然不

收稿日期: 2006-11-16; 修回日期: 2007-03-30

小。这显然不利于接地故障点电弧的熄灭。

我国 6 kV 和 10 kV 中压配电网一般均为  $\Delta$  接线,无辅助中性点供消弧线圈接入。为安装消弧线圈,一般均要有一台接地变压器提供一个供消弧线圈接入的中性点<sup>[9-10]</sup>。这不仅增加了消弧线圈的安装成本,而且要增大安装空间,给安装带来不便,不适合于消弧线圈的分布安装,尤其不适合于消弧线圈的“柱上”安装。

现以降低单相接地故障点的残流为出发点,分析了谐振接地系统残流产生的原因,提出消弧线圈分布安装是降低谐振接地系统接地故障点残流有功分量的有效方法。针对我国 6 kV 和 10 kV 中压配电网一般均为  $\Delta$  接线,无辅助中性点供消弧线圈接入的特点,设计了接地变压器和消弧线圈为一体的,适合于“柱上”安装的消弧线圈,其性能优良,制造成本相对较低,适合于分布安装。电气性能分析、实验室试验均证明:它具有调感线性度好、安装简单方便、调谐深度连续可变、调谐方式简单等特点。

## 1 消弧线圈分布安装的必要性

在谐振接地系统中,接地故障点的残流主要有 2 部分:一是欠补偿或过补偿后的无功零序电流,它的大小取决于补偿脱谐度,消弧线圈自动跟踪补偿技术可以保证该部分电流控制在一个允许的范围;二是电网零序回路的有功损耗电流。包括电网导线和各元件的对地电导、消弧线圈的有功损耗、接地网和接地极电阻损耗、接地点过渡电阻等的损耗,这部分零序电流的控制成为降低谐振接地系统单相接地故障有功残流值的关键。

接地故障有功残流是由于零序回路中零序电流流经电路各元件电阻、电导的有功损耗而产生的。零序回路的电阻、电导由电网的结构、供电距离、容量等决定,是不可控制的。降低残流中的有功分量的最好方法是尽量减少零序回路中各元件流过的零序电流。谐振接地系统中,消弧线圈的作用是对电网存在的各元件对地电容所需容性无功提供一个能量的交换源。因此,如果合理地布置这些能量交换源,使电网中的各元件流过的零序电流尽量小,则就可以使零序回路的有功损耗尽量小。这样,就可以降低接地故障点的残流值。从电网无功“就地”补偿,可以得到启发:如果采用消弧线圈分布安装方式,电网中分布电容电流就能“就近”被补偿,这样,缩短了电网分布电容电流和消弧线圈补偿电流流经的“路径”,使电网中各元件流经的零序电流减少,进而,降低电网零序回路的有功损耗,降低了接地故障点的残流值。

下面的仿真算例证明了这一点。某县局主变电所 10 kV 电网线路,计算总接地电流 97 A,有 12 条馈出线,其中 8 条经架空线较远距离送达镇开闭所。开闭所负荷侧为电缆、架空线混合线路,开闭所到主变电所的距离和开闭所负荷侧的计算接地电流见表 1(表中, $n$  为开闭所编号, $d$  为距离, $i$  为计算接地电流)。

表 1 开闭所到主变电所的距离和负荷侧接地电流

Tab.1 Grounding currents at load side and distances between main station and substations

| $n$ | $d/\text{km}$ | $i/\text{A}$ | $n$ | $d/\text{km}$ | $i/\text{A}$ |
|-----|---------------|--------------|-----|---------------|--------------|
| 1   | 32            | 10           | 5   | 30            | 11           |
| 2   | 21            | 8.1          | 6   | 28            | 9.5          |
| 3   | 18            | 9.1          | 7   | 26            | 8.6          |
| 4   | 24            | 9.2          | 8   | 29            | 9.8          |

短线路以电缆线为主,总计计算接地电流 12.5 A。仿真计算中主变电所接地网电阻取  $0.5 \Omega$ 、开闭所取  $2 \Omega$ 。当用 1 台额定补偿电流为 100 A 的自动跟踪补偿消弧线圈全补偿时,接地电流的有功分量为 3.274 A、无功分量为 0.26 A;当在 8 个开闭所各安装一台额定电流为 10 A 的固定补偿消弧线圈,在主变电所安装一台额定电流为 30 A 的自动跟踪补偿消弧线圈时,接地电流的有功分量为 1.386 A、无功分量为 0.66 A。从以上的仿真分析可见,消弧线圈的分布安装可以有效地降低接地电流的有功分量。

实际上,对一个对地分布电容大的配电网,分布安装消弧线圈可以承担主要的补偿任务,仅需一台自动跟踪补偿的消弧线圈调节补偿余缺来满足全补偿的要求。相对于集中安装自动跟踪补偿消弧线圈,分布安装很灵活。小容量的、廉价的、人工调节补偿电流的消弧线圈可以依据配电网的补偿需要,安装在远离主变电所的任何地点,必要时可以“柱上”安装。这样,不仅降低了安装成本,而且有利于运行维护、降低运行维护成本,有利于降低接地故障点的残流,有利于接地电弧的熄灭,有利于提高消弧线圈动作的成功率,更重要的是还有利于降低“跨步电压”,提高配电的安全性。

2 台或多台自动跟踪补偿消弧线圈安装在同一配电网,不仅安装成本高,而且并不利于降低接地故障电流,若各自动跟踪补偿控制器协调不当,将使配电系统难以达到全补偿,不利于故障电弧的熄灭。可见,大容量或 2 台、多台自动跟踪补偿消弧线圈安装在同一配电网相对于小容量固定补偿消弧线圈分布安装方案有害而无害,因此,对配电网考察计算、合理规划、分布安装消弧线圈是必要的。

## 2 适合于分布安装的消弧线圈

分布安装地点相对于集中安装地点的主变电所,条件可能要差得多。首先,安装空间和环境小而且差,有些地方可能找不到消弧线圈的安放位置,需要“柱上”安装。这就要求消弧线圈体积小、安装占地小、安装简单方便。再者,大多是一个无运行维护看管人员、无监测控制设备、而且是交通不很方便的地方。这就要求消弧线圈结构简单、零配件尽量少、最好为一件、环境条件适应性好、免运行维护、经久耐用。我国 6 kV 和 10 kV 中压配电网一般均为  $\Delta$  接线,无中性点供消弧线圈接入,因此,现有的消弧线圈安装均要配一台接地变压器,这不仅增加了消弧

线圈的安装成本,也使分布安装地点的环境难以适应,并给运行维护带来不便。这里介绍了一种接地变压器和消弧线圈为一体的、性能优良的、制造成本相对低的、适合于分布安装的、尤其是适合于“柱上”安装的、可免维护的三相电抗器式消弧线圈。

## 2.1 结构

图 1 所示为一个三相电抗式消弧线圈。它有 5 柱铁芯,中间 3 柱有 3 个绕组,星形连接,并且中性点直接接地,形式上为一三相电抗器。两边柱铁芯与中间 3 柱铁芯形成零序磁路。

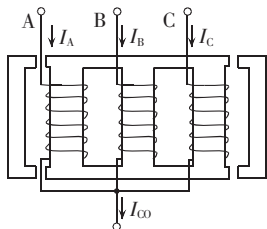


图 1 消弧线圈的结构

Fig.1 Configuration of arc-suppression coil

## 2.2 消弧线圈的补偿调节原理

### 2.2.1 电网正常工作状态

当电网处于三相对称运行的正常工作状态时,消弧线圈的 A、B、C 3 个绕组承受对称三相电压,若忽略消弧线圈损耗,绕组的电压方程为

$$\begin{aligned} U_{A1} &= I_{A1}j(X_{\sigma 1} + X_m) \\ U_{B1} &= I_{B1}j(X_{\sigma 1} + X_m) \\ U_{C1} &= I_{C1}j(X_{\sigma 1} + X_m) \end{aligned} \quad (1)$$

式中  $U_{A1}$ 、 $U_{B1}$ 、 $U_{C1}$  分别为各绕组承受的相电压(正序电压); $I_{A1}$ 、 $I_{B1}$ 、 $I_{C1}$  分别为各绕组的正序电流; $X_{\sigma 1}$  为各绕组的正序漏抗; $X_m$  为正序激磁电抗。

### 2.2.2 电网单相接地故障状态

当电网发生单相接地故障(以 A 相接地为例)时,电网对地电压不对称。按对称分量理论,该不平衡电压主要分解为 2 组对称分量:

$$U_A = U_{A1} + U_0, U_B = U_{B1} + U_0, U_C = U_{C1} + U_0 \quad (2)$$

式中  $U_A$ 、 $U_B$ 、 $U_C$  分别为三相对地电压; $U_0$  为零序电压。

这时,消弧线圈的绕组承受 2 组电压,一组是三相对称的正序电压  $U_{A1}$ 、 $U_{B1}$ 、 $U_{C1}$ ,这组电压与电网正常运行时消弧线圈承受电压完全相同。即在这组电压作用下,消弧线圈仅仅是三相电抗器的功能,为补偿提供一个“中性点”,而不起补偿功能。另一组是 3 个大小相等方向相同的零序电压。在这组电压作用下,3 个绕组中的电流同相位并联相连,必然在 3 绕组中产生同相位的电流,在中间 3 柱铁芯中形成同方向的零序磁通  $\phi_{m0}$ ,因此,零序磁通只能经过 4 个气隙与两边柱铁芯形成回路。因此,绕组零序回路的电压方程为

$$u_0 = \frac{d\phi_{\sigma 0}}{dt} + \frac{d\phi_{m0}}{dt} = L_{\sigma} \frac{di_0}{dt} + \left( \frac{\mu_0 S}{\delta} + \frac{\mu S}{l} \right) \frac{di_0}{dt} \quad (3)$$

式中  $\delta$  为气隙长度; $S$  为铁芯截面积; $l$  为铁芯平均长度。

写成相量形式为

$$U_0 = I_0 j(X_{\sigma 0} + X_{m0}) \quad (4)$$

式中  $I_0$  为零序电流; $X_{\sigma 0}$  为零序漏抗, $X_{\sigma 0} = \omega L_{\sigma}$ ; $X_{m0}$  为零序激磁电抗, $X_{m0} = \omega(\mu_0 S / \delta + \mu S / l)$ 。

消弧线圈 3 个绕组的电流为

$$I_A = I_{A1} + I_0, I_B = I_{B1} + I_0, I_C = I_{C1} + I_0 \quad (5)$$

消弧线圈的补偿电流为

$$I_L = I_A + I_B + I_C = 3I_0 \quad (6)$$

由式(4)和式(6)可见该消弧线圈补偿调节原理是:调节气隙  $\delta$  增大, $X_{m0}$  就减小,则零序电压一定时,零序电流增大,即补偿电流增大。各绕组电压、电流及补偿电流的矢量图如图 2 所示。

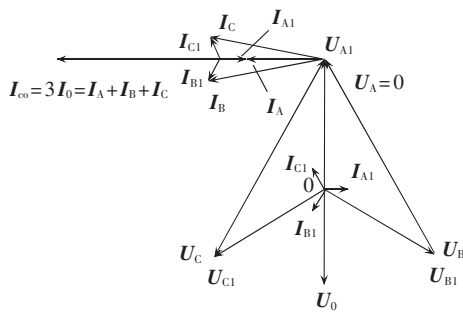


图 2 消弧线圈各绕组电压、电流的矢量图

Fig.2 Vector diagram of winding voltages and currents

由于正序激磁电抗很大,激磁电流很小,绕组的电流约等于零序电流,因此,尽管单相接地故障时 3 个主绕组的电压差别很大,但电流则是基本相等的。

## 2.3 消弧线圈的特点

通过以上分析可见,接地变压器式消弧线圈有下面几个特点。

### 2.3.1 补偿线性度好,不产生谐波,补偿效果好

由于消弧线圈的零序磁路中设有气隙,消弧线圈始终工作在线性段,补偿电感的线性度好,所以补偿效果很好。图 3 是该消弧线圈在 6 kV 实验室模拟电网上试验的零序电压  $u_0$ 、接地电流  $i_g$  和补偿电流  $i_{\sigma 0}$  波形图。

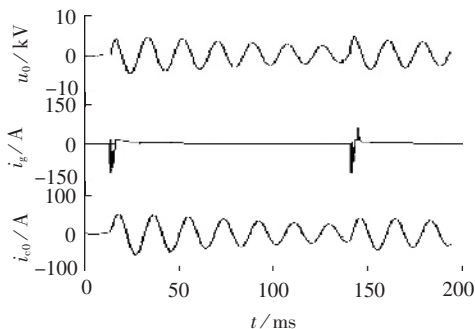


图 3 零序电压和补偿电流的波形图

Fig.3 Waveforms of zero-sequence voltage and compensation current

### 2.3.2 结构极为简单,象一个三相电抗器

不仅安装占地面积小,而且很方便,适合于分布安装,尤其适合于消弧线圈“柱上”安装。只需 3 个



“跌落”式保险接至三相电网,在杆下打个接地极,将消弧线圈的中性点接至接地极即可。

### 2.3.3 成本低

从消弧线圈的结构可见,其成本比同容量的接地变压器稍高些,仅多 2 个边柱铁芯则省去了一个消弧线圈。

## 3 结语

消弧线圈分布安装是降低谐振接地系统接地故障点残流有功分量的有效方法,因此,从降低单相接地故障点的残流的目的出发,消弧线圈分布安装是很有必要的。所提出的三相电抗器式消弧线圈具有调感线性度好、调谐深度连续可变、调谐方式简单、安装简单方便、适合于分布安装、尤其适合于“柱上”安装等特点。另外,不管是电网延伸或是架空线改电缆线,都将使电网的电容电流增大,造成原有的消弧线圈容量不足。更换大容量自动补偿消弧线圈不仅不经济,而且补偿后残流大,影响消弧效果。采用分布补偿,在电网延伸的开闭所安装文中提出的消弧线圈不仅经济、补偿效果更好,而且简单、易实施。

### 参考文献:

- [1] HANNINEN S, LEHTONEN M, HAKOLA T. Earth faults and related disturbances in distribution networks[J]. IEE Proc-Gener Transm Distr, 2002, 149(3): 283-288.
- [2] HANNINEN S, LEHTONEN M. Characteristics of earth faults in electrical distribution networks with high impedance earthing[J]. Electric Power System Research, 1998, 44(3): 155-161.
- [3] NIKANDER A, LAKERVI E. A philosophy and algorithms for extinguishing earth arcs in suppressed medium voltage networks [C]//CIREN 97. Brimingham, UK: [s.n.], 1997: 2-5.
- [4] 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.
- [5] 李景禄, 林玉怀, 陈忠仁, 等. ZXB 系列自动跟踪补偿消弧装置 [J]. 电网技术, 1998, 22(2): 77-79.
- [6] LI Jing-lu, LIN Yu-huai, CHEN Zhong-ren, et al. ZXB series arc-suppression device with automatic tuning compensation [J]. Power System Technology, 1998, 22(2): 77-79.
- [7] 陈柏超, 陈维贤, 尹忠东. 10 kV 电网新型自动调谐消弧线圈及控制装置[J]. 中国电力, 1997, 30(9): 70-71.
- [8] CHEN Bo-chao, CHEN Wei-xian, YIN Zhong-dong. A novel controllable arc-extinguishing reactor for 10 kV network and its control system[J]. Electric Power, 1997, 30(9): 70-71.
- [9] 蔡旭, 刘勇. 三相五柱偏磁式接地消弧变压器及其自动调谐[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(2): 83-88.
- [10] CAI Xu, LIU Yong. Magnetic bias arc-suppression transformer with three phases five columns and its tuning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(2): 83-88.
- [11] 陆国庆, 姜新宇. 高短路阻抗变压器式自动消弧系统——一种配电网中性点接地方式[J]. 电网技术, 2000, 24(7): 25-28.
- [12] LU Guo-qing, JIANG Xin-yu. An automatic rapid arcsuppression system based on transformer with high short circuit impedance—implement of a new approach of neutral grounding for distribution network[J]. Power System Technology, 2000, 24(7): 25-28.
- [13] 陈庆, 唐轶. 接地变压器式消弧线圈的电气性能[J]. 中国电力, 2005, 38(10): 15-17.
- [14] CHEN Qing, TANG Yi. Arc-suppression with three phases five columns[J]. Electric Power, 2005, 38(10): 15-17.
- [15] TANG Yi. A complete set of automatic compensation equipment of a capacitive charging current in application of a medium-voltage power system[J]. Electric Power System Research, 1997, 41(1): 35-41.

(责任编辑: 康鲁豫)

### 作者简介:

唐 轶(1957-), 男, 江苏张家港人, 教授, 博士研究生导师, 博士, 从事电力系统自动化和电能质量控制领域的教学、研究工作(E-mail: tangyi@cumt.edu.cn);

陈 庆(1962-), 男, 江苏溧水人, 高级工程师, 博士研究生, 从事电力系统自动化和继电保护领域的研究工作。

## Arc-suppression coil for decentralized compensation

TANG Yi, CHEN Qing

(China University of Mining & Technology, Xuzhou 221008, China)

**Abstract:** The self-extinguishing of the arc caused by a single-phase grounding fault depends mainly on the amplitude of the residual current at grounding point. To reduce the residual current, the reason of residual current generation in resonant grounding system is analyzed theoretically; the automatic arc-suppression coil can only compensate the zero-sequence reactive current, but not the active current. Simulative calculation points out that, the decentralized compensation is an effective way to reduce the active components of residual current. For 6 & 10 kV distribution networks in China are wired in  $\Delta$  type and there is no auxiliary neutral point for arc-suppression coil, a new type arc-suppression coil is developed, which is a three-phase-five-column reactor and the compensation current is controlled by adjusting the gaps of two side columns. It is fitted for decentralized compensation with simple structure. The lab experiments show its fine inductance linearity and effective compensation performance.

**Key words:** arc-suppression coil; single-phase grounding fault; neutral grounding