

基于注入工频信号的相控式消弧线圈系统的研究

黎军华, 胡天祥, 胡华萍

(乐山一拉得电网自动化有限公司, 四川 乐山 614000)

摘要:分析了相控式消弧线圈的构成原理,提出了一种基于注入工频信号的相控式消弧线圈系统,阐述了工频信号注入法测量配电网系统电容电流的原理,并通过模拟系统测试了该消弧系统的测量精度。该消弧系统结构简单,测量电容电流快速、准确,投入使用以来运行稳定,使用效果良好。

关键词:相控式;消弧线圈;注入工频信号;电容电流测量

中图分类号:TM 72 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2021)05-0027-04

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20210506

Research on Phase – controlled Arc Suppression Coil System Based on Injected Power Frequency Signal

Li Junhua, Hu Tianxiang, Hu Huaping

(Leshan ELECT Electrified Wire Netting Automation Co., Ltd., Leshan 614000, Sichuan, China)

Abstract:The composition principle of phase-controlled arc suppression coil is analyzed, and a phase-controlled arc suppression coil system based on injected power frequency signal is put forward. The principle of power frequency signal injection method for measuring capacitance current of distribution network system is described, and the measurement accuracy of this arc suppression system is tested through simulation system. The arc suppression system has a simple structure, and can measure the capacitance current fast and accurately, which has a stable operation and good application effect after it being put into operation.

Key words:phase-controlled type; arc suppression coil; injected power frequency signal; measurement of capacitance current

0 引言

国内 6~35 kV 中压配电网中,系统中性点的接地方式主要有不接地、经小电阻接地和经消弧线圈接地 3 种方式^[1]。近 20 年来,由于电缆在城市配电网建设中大量使用,从而导致城市配电网的电容电流很大,发生单相接地时易产生弧光过电压,这对于配电网的安全运行构成了威胁。消弧线圈既可以有效解决单相接地弧光过电压问题,又可以减少单相接地引发的停电事故,因此在城市变电站建设中使用非常广泛。进入 21 世纪以来,随着智能控制与电力电子技术的快速发展,消弧线圈的智能化水平也得到显著提高。目前,自动跟踪型消弧线圈在国内

配电网系统中得到了广泛的应用,其技术实现方式主要分为调匝式、相控式、调容式三种^[2],其中相控式消弧线圈技术先进,并具有补偿电流连续无级可调、响应快速、结构简单、运行维护方便等优点,所以使用越来越广泛。

由于国内变电站的主变压器 35 kV 侧的中性点通常已经引出,所以 35 kV 配电网无需采用接地变压器,消弧线圈可直接接在主变压器的中性点上。对于用于 35 kV 配电网系统的相控式消弧线圈,由于配电网系统中性点的正常不对称电压通常很小,但是没有接地变压器来调节,因此若采用常规的电网电容电流测量方法,测量误差很大,有时甚至无法进行测量(由于大功率晶闸管两端电压太小无法导通),从而造成相控式消弧线圈无法正常工作。

对于这种场合,采用信号注入法来测量系统电容电流是一个合适的选择。目前,采用注入变频信号^[3]来测量配电网电容电流的消弧线圈比较常见,但该消弧系统需要采用结构复杂的变频模块,这对于整套消弧设备来讲,不但制造成本会增加,而且设备可靠性也会降低,运行维护更复杂。

下面提出一种基于注入工频信号的相控式消弧线圈系统,该系统采用了工频信号注入装置,其结构简单、使用稳定、成本低廉,在配电网系统不对称电压很小时也能快速、准确地测量出配电网的电容电流。

1 相控式消弧线圈的构成原理

IDC-3000 型相控式消弧线圈系统主要包括相控式消弧线圈、本地控制柜、微机控制器、中性点电压互感器、中性点电流互感器、单极隔离开关、Z 型接地变压器(可选)。

相控式消弧线圈是一种阻抗电压在 90% 左右的高短路阻抗单相变压器,它包括高压绕组(A_X)和低压绕组,其低压绕组由控制绕组(a₁x₁)和滤波绕组(a₂x₂)组成。高压绕组的额定电压与配电网系统的额定相电压相同,低压绕组的额定电压通常设计为固定的 500 V,这样做的目的是为了便于晶闸管选型。高压绕组的 A 端与配电网系统的中性点连接,X 端与变电站的地网连接。低压绕组的控制绕组(a₁x₁)与两个反向并联的高电压、大功率晶闸管连接。通过调节晶闸管的控制角在 0~90° 之间变化,其导通角的变化范围即为 0~180°,从而使消弧线圈高压侧的等效阻抗在无穷大至额定值之间连续变化,输出的感性补偿电流可根据电网电流的变化进行连续无级调节。低压绕组的滤波绕组与 LC 滤波器连接,其主要作用是消除晶闸管工作时产生的 3 次和 5 次谐波电流,从而避免消弧线圈输出的补偿电流中含有较大的谐波电流。相控式消弧线圈的结构原理如图 1 所示。

本地控制柜用于安装工频信号注入装置、大功率晶闸管以及 LC 滤波器。工频信号注入装置由一台微型单相降压变压器、一个双向的小功率晶闸管 and 一只电阻器组成。从主控室交流电源屏引入 220 V 交流工频电源,把该电源接入到微型单相降

压变压器的一次绕组;把单相降压变压器的二次绕组通过串联双向晶闸管和电阻器,然后并接到相控式消弧线圈的低压滤波绕组(a₂x₂)。工频信号注入装置的结构原理如图 2 所示。

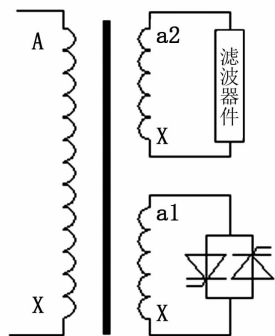


图 1 IDC 型消弧线圈结构原理

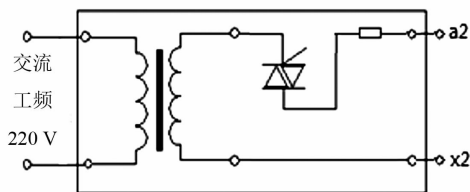


图 2 工频信号注入装置结构原理

微机控制器是相控式消弧线圈系统的“大脑”,负责监测电网系统的运行状况,实时测量配电网的电容电流。当微机控制器监测到配电网发生单相接地时,迅速控制晶闸管导通,使消弧线圈高压绕组输出与当前配电网电容电流相匹配的补偿电流。由于具有补偿电流连续无级可调的优点,消弧线圈补偿后的残流通常在 2 A 左右,因而接地点的电弧更容易熄灭。微机控制器的电压、电流采集电路采用了特殊的调理技术,从而确保电压、电流采集误差均小于 1%。该控制器采用工频信号注入法来测量配电网系统的电容电流,即使用于没有接地变压器的配电网系统,也能保证电容电流测量的准确性。

微机控制器具有“一控二”功能,即一台控制器可以控制两台消弧线圈,两台消弧线圈既可分列运行也可并列运行,每台消弧线圈只需满足安装段容量要求即可。两台控制器可实现一控一联机运行,即正常工作时一控一,其中一台控制器故障时另一台控制器就同时控制两台消弧线圈,由此实现两台控制器互为热备用,大大提高了设备

的可靠性。

中性点电压互感器用于测量系统中性点的零序电压,该电压的幅值与频率是作为电网是否发生单相接地和单相接地是否消失的主要判据。当相控式消弧线圈的大功率晶闸管未导通时,中性点电压互感器所测得的电压即为系统的不对称电压。中性点电流互感器用于测量相控式消弧线圈高压绕组中流过的电流,当配电网发生单相接地时,该电流即为消弧线圈输出的补偿电流。单极隔离开关用于消弧线圈系统检修时产生一个明显的断开点,从而确保人身安全。

接地变压器的主要作用是引出配电网的中性点。对于110 kV及以上的变电站,由于主变压器的35 kV绕组通常采用的是星型接线,因此35 kV系统的中性点已经引出,消弧线圈可直接接在主变压器的中性点上,无需再设置接地变压器。然而主变压器的10 kV绕组通常采用的是三角形接线,所以10 kV系统就需要增加接地变压器来产生系统中性点。由于接地变压器自身的零序阻抗过大会影响消弧线圈的额定补偿容量,因此实际应用中是通过绕组采用Z型接线的办法来降低接地变压器的零序阻抗。此外,绕组采用Z型接线可以增大接地变压器的激磁阻抗,减少其功耗。接地变压器可配400 V绕组用作站用电源。需要注意的是,当接地变压器兼作站用变压器时,其初级绕组容量是由消弧线圈容量和站用变压器容量两部分组成。

2 工频信号注入法的测量原理

IDC-3000型相控式消弧线圈系统需要测量配电网电容电流时,微机控制器以220 V工频电源的电压作为参考矢量。首先,通过中性点电压互感器测出系统中性点的不对称电压 \dot{U}_{bd} ;然后,控制信号注入装置内的双向小功率晶闸管导通,使工频电压信号通过相控式消弧线圈的滤波绕组(a2x2)注入到配电网系统,此时在中性点电压互感器处测得消弧线圈高压绕组两端的电压 \dot{U}_{AX} ,在中性点电流互感器处测得输出电流 I_z 。

采用注入工频信号来测量电网电容电流的等效

原理如图3所示。图中 X_L 为相控式消弧线圈高压侧的等效电抗; C' 为低压滤波回路折算到高压侧的等效电容; C 为系统对地电容; U_{bd} 为系统不对称电压; I_z 为注入工频电压信号后测量回路中产生的电流。

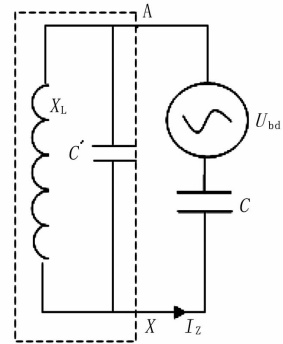


图3 测量电网电容电流的等效原理

图3对应的矢量关系如图4所示。

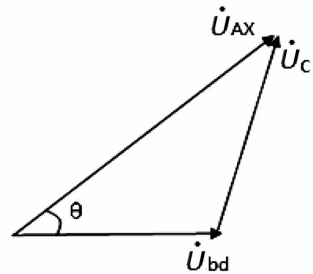


图4 矢量关系

由图4可以得出消弧线圈高压绕组两端的电压 U_{AX} 、系统中性点的不对称电压 U_{bd} 以及系统对地电容两端的电压 U_C 三者之间的矢量关系为

$$\dot{U}_{AX} = \dot{U}_{bd} + \dot{U}_C \quad (1)$$

根据余弦定理,进一步可以得出 U_{AX} 、 U_{bd} 以及 U_C 三者之间的幅值关系为

$$U_C^2 = U_{AX}^2 + U_{bd}^2 - 2U_{AX}U_{bd}\cos\theta \quad (2)$$

对式(2)两端开方可得出 U_C 的幅值为

$$U_C = \sqrt{U_{AX}^2 + U_{bd}^2 - 2U_{AX}U_{bd}\cos\theta} \quad (3)$$

把 U_{bd} 、 U_{AX} 以及两者之间的夹角 θ 的值代入式(3)即可计算出对地电容两端的电压 U_C 。再把 U_C 、 I_z 代入容抗计算公式:

$$X_C = U_C / I_z \quad (4)$$

即可求出配电网系统的对地电容容抗 X_C 。最后,把系统额定相电压 U_e 和 X_C 代入系统的电容电流计算公式:

$$I_C = U_e / X_C \quad (5)$$

即可求出配电网系统的电容电流 I_C 。该值即为系统发生单相金属性接地时,从接地点流入配电网系统的零序电流值。

3 实验及应用

为了测试基于注入工频信号的相控式消弧线圈系统测量电网电容电流的精度,在实验室搭建了一个模拟系统,实验接线如图 5 所示。图中的消弧线圈为 IDC-3000 型相控式消弧线圈系统, C 为模拟的配电网系统对地电容,调压器输出模拟系统的不对称电压 U_{bd} 。

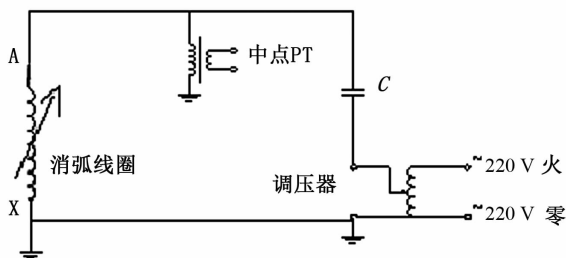


图 5 实验接线

采用 9 只标称电容值为 $1 \mu\text{F}$ 的电容器并联组合成 $2 \mu\text{F}$ 、 $3 \mu\text{F}$ 、 $4 \mu\text{F}$ 三种电容器组合,实测电容量分别为 $2.13 \mu\text{F}$ 、 $3.21 \mu\text{F}$ 、 $4.29 \mu\text{F}$ 。通过公式 $I_C = U_e \times 2\pi f C$,即可计算出 3 种电容组合对应到 35 kV 系统的模拟电容电流分别是 14.85 A、22.38 A、29.90 A,式中 U_e 的取值为 35 kV 系统的标称相电压 22.2 kV。测试数据见表 1。

表 1 工频信号注入法模拟测试数据

测试次数	模拟 U_{bd} / V	模拟 C / μF	模拟 I_C / A	控制器 显示 I_C /A	测量误差/ A
1	40.13	2.13	14.85	15.27	0.42
2	39.97	3.21	22.38	22.91	0.53
3	40.32	4.29	29.90	30.49	0.59

消弧线圈标准(DL/T 1057—2007)对电容电流测量误差的规定:当系统电容电流 $I_C \leq 30 \text{ A}$ 时,测量误差应不大于 1 A;当 $30 \text{ A} \leq I_C \leq 100 \text{ A}$ 时,测量误差应不大于 3% I_C ;当 $I_C > 100 \text{ A}$ 时,应保证补偿后的残流不应大于 10 A。根据多年研制消弧线圈系统的经验可知,系统电容电流越小,微机控制器采样信号的相对误差就越大,从而使电容电流的测量精度越难保证。对应到消弧线圈的标准要求来讲:

当系统电容电流 $I_C \leq 30 \text{ A}$ 时,电容电流的测量精度最难保证;当 $I_C > 30 \text{ A}$ 时,电容电流的测量精度更容易达到标准要求。由上述测试结果可以看出,当系统电容电流 $I_C \leq 30 \text{ A}$ 时,基于注入工频信号的 IDC-3000 型相控式消弧线圈系统的电容电流测量误差在 1 A 以内,能满足消弧线圈标准对电容电流测量精度的要求。

采用工频信号注入法的 IDC-3000 型相控式消弧线圈系统已在乐山 110 kV 桐梓坪变电站、乐山 110 kV 井研变电站、雅安 35 kV 广元堡变电站等多个变电站使用,投入运行以来工作稳定,有效地抑制了单相接地时产生的弧光过电压,对提高电网系统的供电可靠性及安全运行起到了显著的作用。

4 结语

上面研究了基于注入工频信号的相控式消弧线圈系统,提出了一种全新的电容电流测量方法——工频信号注入法,该测量方法已取得国家发明专利。基于该方法的消弧线圈系统特别适用于配电网系统的不对称电压很小,但是又没有接地变压器来调节的场合。经过 3 年多的运行实践,已证实基于注入工频信号的相控式消弧线圈系统使用效果良好,可广泛用于 6~35 kV 配电网系统。

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.
- [2] 赵刚,黎军华,竺尚林. 10 kV 智能消弧线圈在配电网中的应用[J]. 四川电力技术, 2006,29(5):21-23.
- [3] 曾祥君,尹项根,于永源,等. 基于注入变频信号法的经消弧线圈接地系统控制与保护新方法[J]. 中国电机工程学报,2000,20(1):29-32.

作者简介:

黎军华(1979),男,硕士,工程师,主要从事电力自动化产品的研发工作;

胡天祥(1979),男,高级工程师,主要从事电力自动化产品的研发工作;

胡华萍(1982),女,工程师,主要从事高低压成套电气设备的设计工作。

(收稿日期:2021-03-11)