

DOI: 10.3969/j.issn.1001-4551.2013.10.030

自动跟踪补偿消弧系统综述*

赵晓东, 黄小彬

(杭州电子科技大学 信息与控制研究所, 浙江 杭州 310018)

摘要: 针对电网发生单相接地故障时,系统无法快速、准确地对单相接地电容电流进行有效补偿的问题,对中性点电压和补偿原理进行了研究,通过采用中性点经消弧线圈的接地方式,建立了自动跟踪补偿消弧系统,同时提出了自动调谐原理。该系统主要由消弧线圈和控制系统组成,在发生单相接地故障时,自动进入补偿状态,接地故障消除后,自动退出补偿状态。调谐原理是系统进行自动跟踪补偿的关键技术,在很大程度上影响系统的跟踪补偿速度与精度。通过对国内外几种常用的调谐原理进行总结和对比,指出了各自存在的优缺点及适用范围。研究表明,不同结构特点的消弧线圈所适用的调谐原理也不同,选择合适的调谐原理才能快速、有效地补偿接地电容、电流。

关键词: 中性点; 消弧线圈; 自动跟踪补偿; 自动调谐

中图分类号: TM711

文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2013)10-1293-04

Survey on automatic tracking compensation arc suppression system

ZHAO Xiao-dong, HUANG Xiao-bin

(Institute of Information and Control, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Aiming at the system cannot quickly and accurately compensate for single - phase grounding capacitor current effectively when the power grid grounding fault occurs, the neutral point voltage and compensation principles were studied. Through the use of neutral point via arc-suppression coil grounding mode, the automatic tracking compensation arc-suppression system was established and automatic tuning principle was proposed. The system was mainly composed of arc suppression coil and control system, when single-phase grounding fault occurs, it automatically into the compensation condition, the grounding fault is eliminated, it automatically exit the compensation state. Tuning principle is a key technology of automatic tracking compensation system and the compensation speed and accuracy of system were largely affected by it. After several kinds of tuning principle commonly used at home and abroad were summarized and compared, their advantages and disadvantages and application scope were pointed out. The results indicate that tuning principle applies to the suppression coil with different structures are also different, choosing the appropriate tuning principle can rapidly and effectively compensate the grounding capacitor current.

Key words: neutral point; arc-suppression coil; automatic tracking compensation; automatic tuning

0 引言

近20年来,随着国家对城市电网的大规模改造,电网规模的不断发展,电缆线路的大量使用使得配电系统对地电容的大量增加,这导致单相接地故障电流

的增加,接地电弧也不能并自动熄灭,单相接地故障将发展为其它类型的故障,并造成系统停电事故^[1]。为此必须采取有效措施加以解决,而电网中性点经消弧线圈接地运行方式便是解决这个问题有效方法之一。同时,在《交流电气装置的过电压保护和绝缘

收稿日期: 2013-06-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60974138);浙江省钱江人才资助项目(R10080)

作者简介: 赵晓东(1971-),男,山西太原人,博士,教授,硕士生导师,主要从事控制理论与控制工程方面的研究. E-mail:xdzhao@hdu.edu.cn

配合》中规定：当单相接地故障电容电流超过相应规定数值又需在接地故障条件下运行时，应采用消弧线圈接地方式^[2]。采用消弧线圈接地的方式^[3-4]，可以有效地补偿系统线路对地电容电流的大小，在发生单相接地故障时，减小了故障点的残余电流，达到自动熄弧的目的，降低了人身伤亡和设备损坏的可能性。在正常运行时，让消弧线圈远离在谐振点，以防止中性点电位偏高。因此，采用一种“能使消弧线圈自动地、准确地跟踪补偿电网电容电流，既能熄灭电弧又不产生谐振过电压”的自动跟踪补偿消弧系统很有必要。

为了深入研究自动跟踪补偿关键技术，本研究针对自动调谐原理进行综述。

1 消弧线圈运行分析

1.1 补偿原理

中性点经消弧线圈接地系统如图 1 所示，发生单相接地故障时的补偿系统电路^[5]。假设 A 相发生接地故障，则：

$$I_g = I_c + I_L + I_R \quad (1)$$

由式(1)可知，要使得流经故障点的电流减小为 0，则应使消弧线圈电感电流和接地电容电流的方向相反，大小相等，即 $I_c = -I_L$ ，系统对地电容电流 I_c 全部被消弧线圈的电感电流 I_L 所补偿，从而使得电弧自动熄灭^[6]。

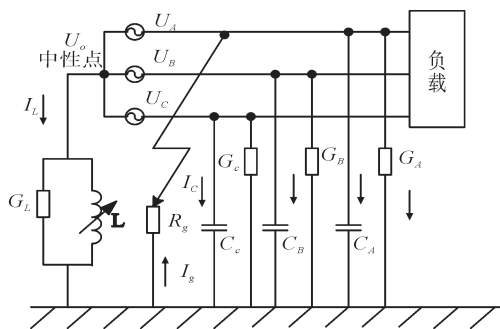


图1 中性点经消弧线圈接地电网单相接地故障示意图

I_c —全系统对地电容电流； I_L —消弧线圈补偿电流； I_g —流经故障点的残流； I_R —有功电流； R —等效线路泄漏电阻(R 阻值很大)

1.2 中性点电压分析

在系统正常运行时，中性点经消弧线圈接地的零序等值电路是一个串联谐振电路，可用戴维宁定理得到补偿电网正常运行时的零序等效电路。其等效原理图如图 2 所示。

中性点位移电压表达式为：

$$\dot{U}_o = \frac{\dot{U}_\omega}{v - jd} \quad (2)$$

$$U_o = \frac{U_\omega}{\sqrt{v^2 + d^2}} \quad (3)$$

式中： d —电网的阻尼率， $d = I_R / I_c$ ； v —补偿电网的

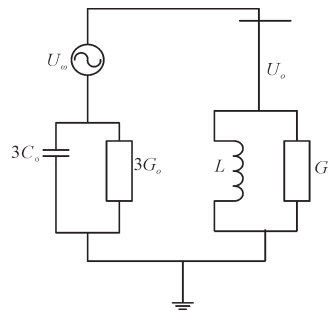


图2 正常运行时补偿电网的零序等值电路

$3C_0, 3G_0$ —等效对地电容和等效线路泄漏电导； L, G_L —消弧线圈的电感和电导； U_ω —电网未补偿时的不平衡电压； U_o —补偿后的中性点位移电压

脱谐度， $\nu = (I_c - I_L) / I_c$ 。

经多次实测表明，在绝缘正常的情况下，对于已经确定的电网运行方式， U_o 几乎不变，同时电缆网络的阻尼率较小，一般不超过 1.5%；架空线路电网的阻尼率较大，一般为 1.5%~2.0%。可见消弧线圈接地系统中性点电压的大小跟脱谐度有关，脱谐度越小，中性点位移电压越高；因此在正常运行时，则应当调节消弧线圈远离谐振点运行。在发生故障时，当 $\nu = 0$ 谐振补偿时，中性点的电压最高，此时的电压即为补偿系统的串联谐振电压，此时的补偿效果最好。但目前我国过电压保护规程规定，中性点位移电压不得超过相电压的 15%，因此不能让其长期运行，应当由故障选线装置尽快找出故障支路并断开。

2 自动跟踪补偿消弧系统

2.1 系统组成

系统一般包括：提供感性补偿电流的消弧线圈、控制消弧线圈行为的控制器、以及保证成套装置正常工作的相关辅助设备、接地变压器(可带负载用作所用的变压器)。其典型构成如图 3 所示。

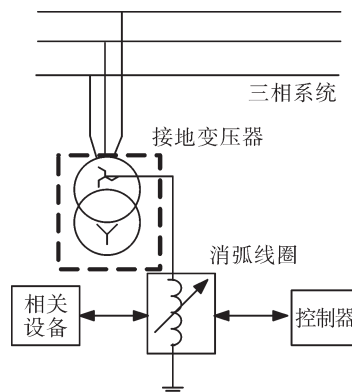


图3 自动跟踪补偿消弧系统构成示意图

2.2 工作原理

在正常运行时，系统能够自动跟踪系统电容、电流的变化，并据此设置执行机构的工作状态。当系

统发生单相接地故障时,系统通过检测立即作出判断,尽快启动执行机构并达到设定状态。系统采取相应的措施补偿电流以减少残流。当系统单相接地故障消除时,系统能及时检测判断并尽快退出补偿状态。

2.3 消弧线圈类型及特点

消弧线圈作为自动跟踪补偿系统的核心部件,就其发展来说,已经产生了很多种型式。按调谐方式划分可分为两种,在系统检测到电网对地电容的变化后,预先调整电感值到补偿的状态,系统接地后,消弧线圈产生的感性电流正好能够对接地电容电流进行补偿,使电弧不能维持、自动熄灭,这种方式为预调式;在出现接地故障前系统根据接地电容电流大小运行在远离谐振点,出现单相接地后,根据接地电流的大小,调节消弧线圈的电感值,补偿电流,使故障点电弧熄灭,这种方式为随调式。按调节电感的方式划分可分为:调匝式、调气隙式、调容式、直流助磁式。调匝式消弧线圈就是通过改变线圈的匝数来调节其电感量^[7];调气隙式消弧线圈是通过改变可动铁芯在气隙中的位置来调节电感值^[8];调容式消弧线圈通过改变消弧线圈二次绕组上的电容值的大小来改变其电感值^[9];直流助磁式消弧线圈采用直流助磁原理对消弧线圈电感量进行连续调节,这种线圈主要是通过改变铁芯磁路上的直流助磁磁通的大小来改变铁芯的饱和程度,从而实现电感连续调节^[10-11]。

2.4 自动调谐原理

系统的自动跟踪补偿需要解决两个方面的问题:一个是可调消弧电抗器,即消弧线圈;另一个就是自动调谐原理^[12]。调谐适当的消弧线圈才能达到理想的补偿效果,而自动调谐装置的跟踪补偿速度和精度,在很大程度上取决于电容电流的跟踪检测方法,这是构成自动跟踪补偿系统的基础。

下面介绍几种自动调谐原理:

(1) 最大位移电压法。

由前面式(2)可知,当电网运行方式一定时,电网的不平衡度和阻尼率是一定的。中性点位移电压的大小仅由脱谐度决定。当 $\nu=0$ 时, U_o 为最大值。因此,根据中性点位移电压的大小调节消弧线圈的电感值,当中性点位移电压最大时,接地故障点的残流为最小。该原理的优点是算法非常简单,补偿的精度较高,缺点是需要多次调节消弧线圈的电感值,该方法只适用于预调式系统^[13]。

(2) 阻抗法。

采用阻抗三角法的消弧线圈需要串联电阻接地,该方法常用于调匝式消弧线圈装置。其零序等值回路,分接头 T_1 和 T_2 对应电流 I_1 和 I_2 的相位关系以及相

应的阻抗三角形如图4所示。

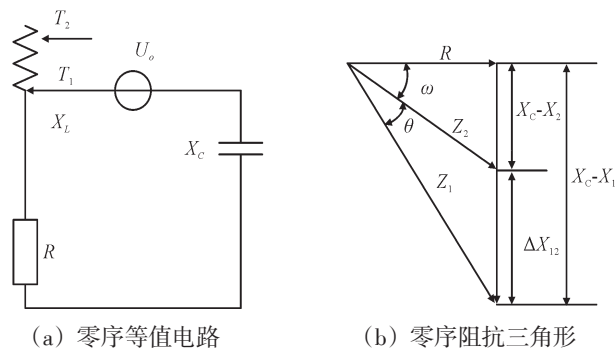


图4 零序等值电路及零序阻抗三角形

R —消弧线圈串联的阻尼电阻; X_L —消弧线圈的电抗; X_C —接地电容对地的容抗

由前面已知脱谐度 ν 为:

$$\nu = \frac{I_c - I_L}{I_c} = 1 - \frac{X_c}{X_L} \quad (4)$$

其中, X_L 值可以通过消弧线圈获知,但是 X_c 值无法直接得到,进而无法直接得到 ν 的值。因此只能通过分接头在 T_1 和 T_2 位置时,零序电路阻抗三角形以及电流相位关系的变化间接求出来。

由下式可解得脱谐度 ν :

$$\cos 2\omega = \frac{2I_2 R}{I_1(X_1 - X_2)} \sin \theta - 1 \quad (5)$$

$$X_c = \frac{R}{\tan \omega} + X_2 \quad (6)$$

$$\nu = (X_2 - X_c)/X_2 \quad (7)$$

由于该方法常适用于调匝式消弧线圈,因此无法连续调节,调节精度受到影响。

(3) 三点法。

由前面已知,电网正常运行时,由式(3)得补偿电网中性点位移电压 U_o ,其中 U_o 为电网未补偿时的不平衡电压、 d 为电网的阻尼率、 ν 为补偿电网的脱谐度、 I_c 为全系统对地电容电流、 I_L 为消弧线圈补偿电流。令 $X=1/I_c$,即 $\nu=1-XI_L$ 代入式(3),可得:

$$U_o = \frac{U\omega}{\sqrt{(1 - I_L X)^2 + d^2}} \quad (8)$$

根据中性点电压与脱谐度之间的关系,通过调节消弧线圈电感值,当消弧线圈工作在 I_1 、 I_2 、 I_3 时,测得中性点位移电压为 U_1 、 U_2 、 U_3 ,将这3组数据代入式(8)中,通过解方程组便可解得 X 值,继而得到电网单相接地对地电容电流^[14-15]。这种调谐方法较二点法精度要高。

(4) 注入信号法。

注入信号法就是在消弧线圈的副圈中向系统注入一个恒流、变频的信号,通过改变注入信号的频率,使电感和电容发生并联谐振,找到系统的谐振频率,

通过系统谐振频率计算脱谐度^[16]。用这种方法优点在于不改变系统状态,不影响系统运行,不影响消弧线圈的熄弧效果,不需要对消弧线圈进行多次调整。缺点是这种方法的调节精度取决于变频信号源的精度,对信号的功率及滤波处理要求比较严格。

3 结束语

本研究介绍了中性点消弧补偿原理和自动消弧补偿系统的系统构成、工作原理、及类型特点,深入分析了4种常用的调谐原理:最大位移电压法、阻抗法、三点法、注入信号法。综合比较这4种调谐原理的优缺点及其使用范围可以看出,不同的设计结构的消弧线圈所采用的调谐原理也不同,选择不当的调谐原理将大大的影响系统的跟踪补偿速度,因此,选择合适的消弧线圈及自动调谐原理才能使得配电网快速有效解决单相接地故障,保证配电网完全、经济、可靠运行。随着经济的发展及配电网的扩大,自动跟踪补偿消弧系统将广泛应用于配电网中,先进的控制技术将使得跟踪补偿技术进一步提高,使得配电网更加安全可靠运行。

参考文献(References):

- [1] 李润先. 中压电网系统接地实用技术[M]. 2版. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [2] 电力工业部电力科学研究院高压研究所. DL/T 620-1997 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合[S]. 北京: 中国电力出版社, 1998.
- [3] MAZON A J, ZAMORA I, ZABALA L, et al. First resonant

- neutral grounding implantation in Spanish distribution system[J]. **IEEE Power Tech Proceedings**, 2001, 4(2):6-10.
- [4] ZAMORA I, MAZON A J, SAGASTABEITIA K J, et al. Verifying resonant grounding in distribution systems[J]. **IEEE Computer Applications in Power**, 2002, 15(4):45-50.
- [5] 张可奇. 有制新型自动跟踪补偿消弧线圈的研究[D]. 长沙: 湖南大学电气工程学院, 2007:9-15.
- [6] 李景禄, 李朝晖. 自动消弧补偿装置用于配电网若干问题讨论[J]. 高电压技术, 2001, 7(6):61-64.
- [7] 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):75-77.
- [8] 陈忠仁, 董浩斌, 李景禄. 调气隙式自动消弧线圈装置测量原理研究[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(10):25-26.
- [9] 徐玉琴, 陈志业, 李鹏, 等. 晶闸管投切电容式消弧线圈的设计与应用研究[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(13):38-41.
- [10] 蔡旭, 刘杰. 偏磁式消弧线圈的动态调谐装置[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(15):53-56.
- [11] 贾雅君, 蔡旭. 偏磁式消弧线圈自动调谐新原理及应用[J]. 继电器, 2004, 32(10):1-5.
- [12] 要焕年, 曹梅月. 电力系统谐振接地[M]. 2版. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [13] 赵牧函, 纪延超. 消弧线圈自动调谐原理的研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 2002, 14(4):50-54.
- [14] 柯远青. 基于工控机的消弧线圈控制系统研究与仿真[D]. 厦门: 厦门大学计算机学院, 2008:19-20.
- [15] 陈忠仁, 吴维宁, 陈家宏, 等. 配电网自动消弧装置的测量跟踪问题[J]. 电力系统及其自动化学报, 2004, 28(10):84-87.
- [16] 王鸿雁, 何湘宁. 消弧线圈自动调谐原理的分析[J]. 继电器, 2002, 30(4):8-11.

[编辑: 张翔]

(上接第 1283 页)

6 结束语

本研究设计和实现的服装吊挂生产线控制系统与目前市场同类产品相比, 通信架构产生了全新的变化, 整个结构灵活性更强, 所设计的连接两种通信方式的中转器, 其结构简便、成本低, 数据转换效果理想。系统的上位机软件界面友好, 操作简单。该系统已经在宁波纤真服饰有限公司、宁波华鑫针织制衣有限公司等企业投入使用, 得到用户满意反馈。

参考文献(References):

- [1] 陈洪倩, 陈雁, 丁佳, 等. 服装吊挂线生产组织分析[J]. 丝绸, 2012, 49(1):30-32.
- [2] 周旭东, 宋晓霞, 刘静萍. 智能服装吊挂生产管理系统的研究[J]. 上海工程技术大学学报, 2000, 14(3):63-67.
- [3] 唐黎, 负超, 宁远明. 密集架安全监测与控制技术研究

- [J]. 机电工程, 2008, 25(6):1-4.
- [4] 张早生, 黄廷磊. 基于以太网的嵌入式数据采集系统的研究与应用[J]. 计算机系统应用, 2010, 19(7):122-125.
- [5] 李秉荣, 刘夫云, 鲁倪亚. 基于RS485和TCP/IP网络的分布式称重系统[J]. 计算机系统应用, 2011(9):35-38
- [6] 高军丽, 王宝珠. 基于RS-485总线的智能分布式测控系统设计[J]. 计算机与现代化, 2012(3):151-154.
- [7] 王计元. 单片网络接口芯片W5100的原理与应用[J]. 上海电力学院学报, 2011, 27(2):153-159.
- [8] 王林玮. Delphi7数据库工程实用编程技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [9] 高扬. 基于NET平台的三层架构软件框架的设计与实现[J]. 计算机技术与发展, 2011, 21(2):77-80, 85.
- [10] 张立. C#程序设计编程经典[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [11] [美] Jeffrey R. Shapiro. Microsoft SQL Server 2000 参考大全[M]. 周之, 等译. 北京: 清华大学出版社, 2002.

[编辑: 李辉]