

调容式自动消弧线圈设计

裴志宏, 文劲宇

(华中科技大学, 湖北 武汉 430074)

摘要: 介绍了电网消弧线圈接地的研究与应用状况, 指出了以晶闸管投切电容器组为基础的调容式消弧线圈的优点。讨论了晶闸管调容式消弧线圈的整体结构, 其中重点讨论了电容器分组和晶闸管选择的方法。之后根据电容电流补偿原理和参数计算, 简要说明了消弧线圈自动控制系统的构成, 给出了调容式消弧线圈自动补偿控制的流程。最后总结了调容式自动消弧线圈的特点, 得出调容式自动消弧线圈是一种比较有前景的补偿装置的结论。

关键词: 调容式; 消弧线圈; 自动补偿

中图分类号: TM475 **文献标识码:** B **文章编号:** 1003-4897(2005)02-0071-04

0 引言

随着城农网改造, 电网规模不断扩大, 电缆线路不断增多, 中压配电网电容电流严重超过标准要求, 目前中性点不接地系统已经越来越不能满足系统安全运行的需要。中性点经消弧线圈接地在国内外已经取得了一定经验^[1], 并且随着计算机和微电子技术的发展自动消弧线圈的性能也在提高。国内从研究电网消弧线圈接地开始出现了几种不同结构的调节装置^[2]。这些装置根据调节电抗器方法的不同, 可以分为调匝式、调气隙式、调磁阀式^[3]几种。采用前两种调节原理的装置一般采用机械调节方式进行调谐, 调节速度慢, 因此装置运行时采用先将消弧线圈调节到某一合适的位置的预调式调节方法, 这样消弧线圈必须使用限压电阻保证系统正常运行时中性点位移电压不超要求。采用后一种调节原理的调谐装置不需要机械传动, 装置可以根据系统的要求随时调节, 但是调节磁阀式的消弧线圈设计复杂, 并且调节的非线性和谐波等问题给控制和使用带来一定影响。本文中晶闸管过零投切电容器组为基础的调容式消弧线圈, 具有调节速度快、调节范围宽、线性调节、没有谐波污染等优点, 可以进一步提高电网的安全性和供电质量^[2]。以下本文主要从调容式消弧线圈电容电流的检测方法、消弧线圈系统结构及其参数设计以及控制系统设计几个方面讨论晶闸管调容式消弧线圈设计的问题。

1 电容电流补偿原理及参数计算^[4]

1.1 中性点不接地系统单相接地电容电流

系统接线示意如图 1, 当 A 相发生单相接地故

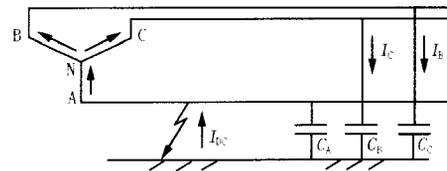


图 1 无消弧线圈系统接线图

Fig 1 Connection of system without arc-suppression coil

障时, 假设系统三相电压对称大小为 U_X , 三相线路对地电容大小相等 $C_A = C_B = C_C = C_0$, 则有

$$I_{bc} = I_b + I_c$$

$$I_{bc} = I_b \cos 30^\circ + I_c \cos 30^\circ = 3 C_0 U_X$$

式中: I_{bc} 为短路电流, I_b 、 I_c 分别为 B、C 相电容电流。

1.2 有消弧线圈时中性点电压

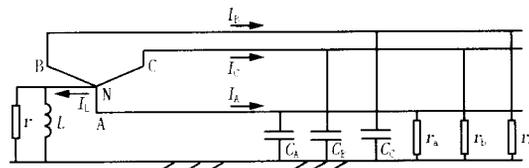


图 2 有消弧线圈的系统接线图

Fig 2 Connection of system with arc-suppression coil

如图 2 所示, 根据电路理论各量有以下关系:

$$I_A + I_b + I_c + I_L = 0$$

$$I_A = (U_A + U_N) (j C_A + 1/r_A)$$

$$I_b = (U_B + U_N) (j C_B + 1/r_b)$$

$$I_c = (U_C + U_N) (j C_C + 1/r_c)$$

$$I_L = U_N (1/r + j/L)$$

设电压三相对称, 以 A 相电压为基准, $r_a = r_b =$

$\epsilon = \epsilon_0$, 则

$$U_N = - \frac{j(C_A + C_B + C_C)}{j(C_A + C_B + C_C) - j\frac{1}{L}} U_X$$

$$\frac{j(C_A + C_B + C_C)}{j(C_A + C_B + C_C) - j\frac{1}{L}} - j\frac{1}{R(C_A + C_B + C_C)}$$

其中: $1/R = 1/r + 3/\epsilon_0$

设

$$v_0 = \frac{C_A + C_B + C_C}{C_A + C_B + C_C}, \text{ 为网络的不对称度;}$$

$$d = \frac{1}{R(C_A + C_B + C_C)} \quad 5\%, \text{ 为网络阻尼率;}$$

$$v = \frac{j(C_A + C_B + C_C) - j\frac{1}{L}}{j(C_A + C_B + C_C)} =$$

线路全对地电容电流 - 消弧线圈电流
线路全对地电容电流, 为网络脱谐

度;

网络脱谐度 = - (网络补偿度)

因此,

$$U_N = - \frac{v_0}{v - jd} U_X = \frac{v_0}{+jd} U_X$$

以上式中, I_A 、 I_B 、 I_C 、 I_L 分别为线路 A、B、C 和消弧线圈电流, U_A 、 U_B 、 U_C 、 U_N 分别为三相电压和中性点电压, ϵ_a 、 ϵ_b 、 ϵ_c 分别为三相泄漏电阻, r 为消弧线圈有功损耗电阻。

1.3 电容电流计算

当消弧线圈提供的电流发生变化时, 即线路处于不同补偿度时, 中性点电压不同, 由以上推导可知

$$\frac{U_{N1}}{U_{N2}} = \frac{\sqrt{2+d}}{\sqrt{1+d}}$$

忽略网络阻尼率的影响,

$$\frac{U_{N1}}{U_{N2}} = \frac{I_2 - I_C}{I_1 - I_C}$$

则网络电容电流

$$I_C = \frac{I_2 - \frac{U_{N1}}{U_{N2}} I_1}{1 - \frac{U_{N1}}{U_{N2}}}$$

求多个不同状态的取值平均值为最后的值 I_C 。

从以上计算可知, 根据以上方法计算电容电流要多次调节消弧线圈, 为避免测量网络电容电流时调节消弧线圈也可采用系统运行频率的自然变化来计算电网电容电流^[5]。当电网自然频率变化时, 系统串联谐振的程度也不同, 利用变化前后的频率、位

移电压和电容电流之间的关系可计算出电容电流, 即

$$I_C = \frac{2 \left[\frac{U_{N1}}{f_1^2} - \frac{U_{N2}}{f_2^2} \right]}{X_L (U_{N1} - U_{N2})} U_\phi = \frac{2 \cdot 500 \left[\frac{U_{N1}}{f_1^2} - \frac{U_{N2}}{f_2^2} \right]}{U_{N1} - U_{N2}} I_L$$

式中: I_C 为电容电流, U_{N1} 、 U_{N2} 分别为频率 f_1 、 f_2 对应的中性点位移电压, X_L 为消弧线圈运行的电抗, I_L 为消弧线圈电流。但是, 实际工程中由于准确监视系统频率比较困难, 因此很少采用这种测量方法。

1.4 其它参数计算

消弧线圈提供的补偿电流计算, 当计算出系统电容电流后, 假设完全补偿则消弧线圈提供的补偿电流应等于系统电容电流, 而额定情况下消弧线圈的补偿电流等于消弧线圈额定电流与投入电容器组电流之差, 所以额定情况下投入电容器组的电流为消弧线圈电流减去电网电容电流。当非额定时, 应根据电压与容量的关系进行调整。

残流计算: 残流 = 电容电流 - 补偿电流, 残流是衡量补偿效果的一个重要参数。

网络脱谐度计算: 网络脱谐度 = (电容电流 - 补偿电流) / 电容电流, 为了避免线路状态改变时谐振, 一般消弧线圈工作在较大过补偿或欠补偿状态, 即网络脱谐度不为 0 的状态, 但为了避免断路器非全相操作、线路断线或分相操作使网络不对称度增大, 容易引起消弧线圈异常动作, 通常消弧线圈工作在过补偿状态。

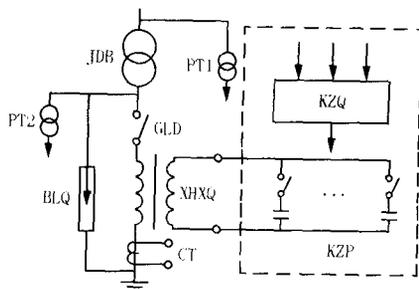
1.5 消弧线圈的补偿原理

通过前面计算可知, 当电网发生单相接地时, 接地电流等于网络电容电流, 如果此时产生一个与网络电容电流相反的电流去补偿它, 那么理想情况下接地电流可以为零, 实际中是将接地电流控制在一定范围之内, 保证不会产生电弧。消弧线圈的作用即在线路发生单相接地故障时产生补偿电流, 抑制电弧的产生。

2 调容式消弧线圈系统设计

2.1 调容式消弧线圈

调容式消弧线圈基于晶闸管投切电容器组的思想设计, 一般调容式消弧线圈整个系统结构如图 3 所示, 整个系统由接地变压器、消弧线圈、控制屏等组成。接地变压器用于中性点未引出的不接地系统, 为系统引出中性点; 消弧线圈本体为一带二次绕组的铁心电感线圈, 提供感性电流; PT、CT 为控制提供信号; 避雷器保护消弧线圈; 控制屏为调容式消弧



注: JDB 为接地变压器; PT1, 2 为电压互感器; GLD 为隔离刀闸; BLQ 为避雷器; XHXQ 为消弧线圈; KZP 为控制屏; KZQ 为控制器; CT 为电流互感器。

图 3 消弧线圈整体结构图

Fig 3 Structure of arc-suppression coil

线圈的主要部分,图中虚框部分为控制屏,它包括自动补偿控制器,电容器,无触点开关组件等。整个补偿系统可分散式安装,也可采用箱式变电站的结构方式安装。

2.2 调容式消弧线圈本体设计

2.2.1 调容式消弧线圈的特点

调容式消弧线圈是在传统的调匝式消弧线圈基础上发展起来的,其接线原理图如图 4 所示。

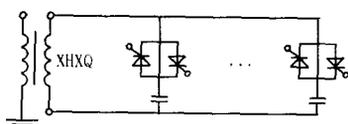


图 4 调容式消弧线圈

Fig 4 Capacitor tuning arc-suppression coil

调容式消弧线圈一次绕组没有分接头,消弧线圈设计制造更简单。消弧线圈二次侧的电容器组配置原则一是提高调谐精度,电容器组数越多,容量分得越细,调节的精度越高;二是扩大补偿电流的调节范围,当电容器全部投入时,消弧线圈补偿的电流最小,反之,当电容器全部退出时补偿的电流最大,由此可见其调节范围是相当宽的。因此,这种方式的消弧线圈特别适合于发展中的补偿网络,可以避免重复投资。

采用晶闸管过零投切电容器组的方式,响应速度快,可达毫秒级,因此,消弧线圈在平时可置于最大过补偿状态,只有在检测到有故障时才进行跟随调节。由于采用随调式,消弧线圈不加阻尼电阻也不会产生过电压。

电容器组采用过零投切方式,不产生谐波,没有合闸过电压,对电容器组和电网几乎没有影响。

2.2.2 参数设计及器件选择

调容式消弧线圈电容器的选择和分组根据消弧线圈一次绕组容量、二次绕组电压、调节精度(与残流要求相关)等参数设计。

设消弧线圈一次绕组额定电压为 U_1 ,额定电流为 I_1 ,最大补偿范围为 K_b ($0 < K_b < 1$),折合到一次侧的补偿电流精度要求为 I_d ,最小组电容器容量为 C_{min} 。电容器总容量 C_z 及其每级电容器 C_b 容量的计算如下:

$$C_z = U_1 I_1 K_b$$

$$C_b \cong C_{min} = U_1 I_d$$

设消弧线圈一次额定电压 6 062 V,额定电流 50 A,最大补偿范围 K_b 为 0.6,补偿电流精度要求为 I_d 2A,则电容器总容量 C_z 为:

$$C_z = U_1 I_1 K_b = 6\ 062\ \text{V} \times 50\ \text{A} \times 0.6 = 180\ \text{kVar}$$

每级电容器容量 C_b 为:

$$C_b \cong C_{min} = U_1 I_d = 6\ 062\ \text{V} \times 2\ \text{A} = 12\ 124\ \text{kVar} \approx 12\ \text{kVar}$$

根据以上计算可知,电容器总容量取 180 kVar,每级容量取 12 kVar 则可以满足要求。另外,一般情况下电容器分组按照 2^N 的方式或者部分 2^N 的方式则可以尽量减少电容器的个数从而减小整个补偿装置的体积。

比如,上述消弧线圈 180 kVar 电容器可分为 $180\ \text{kVar} / 12\ \text{kVar} = 15$ 组,按照 1 2 4 8 的方式分成 4 组即可满足要求。在实际系统设计中,电容器的分组主要考虑电容器的体积、价格和晶闸管的价格几个方面。电容器分组越多则体积越大,因此电容器分组不易过多;电容器的价格主要由容量决定,由于消弧线圈中电容器的容量已经选定,因此电容器的价格基本确定了;晶闸管的价格主要由晶闸管的额定电压和电流决定,二次电压确定后,晶闸管的价格主要由电流值决定,一般情况下,平均电流 100 A 以下的晶闸管用量较多价格也较便宜。假设消弧线圈二次绕组的额定电压为 400 V,则最大的一组电容器电流为 240 A,综合考虑性价比,最大组电流应该在 60 A 左右比较合适,因此采用 1 2 2.. 的方式对电容器分组,分组方式如表 1。

表 1 电容器组表

Tab 1 Capacitor groups

电容分组	1	2	3	4	5	6	7	8
容量 /kVar	12	24	24	24	24	24	24	24
控制分组	1	2	3	4	5	6	7	8
电流 /A	2.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0

从表 1 可以看出, 180 kVar 电容器共分成 8 组, 每组电容器额定电流最大为 60 A, 每级电容器的调节范围为 12 kVar, 这种分组方法晶闸管的容量较小, 规格单一, 有利于提高装置的性能比。

3 控制实现

控制系统与其它控制装置类似, 主要包括数据采集、数据处理判断、人机接口、通信和控制输出等几部分。控制系统根据需要采集不同状态的系统中性点电流、电压等数据, 计算出电容电流和不平衡电压, 以及残流、脱谐度等系统参数; 然后判断是否投入电容器组或是接地告警, 需投入电容器时计算出补偿的容量; 另外控制器定时将系统的运行状态如中性点电压、中性点电流、不平衡电压、电网电容电流、失谐度等显示输出; 电容器的投切使用独立的过零检测触发模块进行, 触发模块接收到控制输出指令后可自动的根据晶闸管两端的电压过零投切电容器组。此处不再详细叙述控制器软硬件的具体设计, 以下给出电容电流检测及控制部分的控制流程。

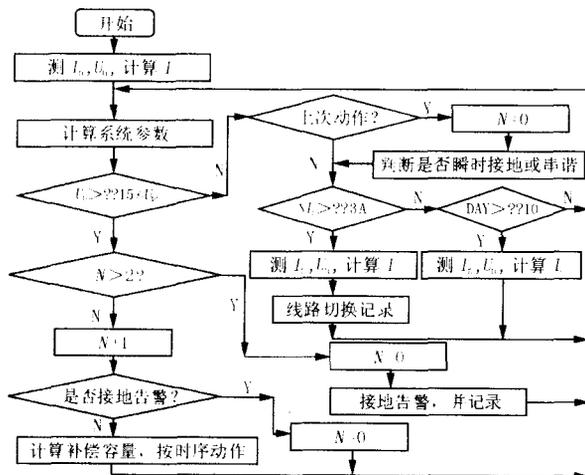


图 5 电容电流检测及控制流程图

Fig 5 Flow chart of capacitive current detecting and controlling

4 结论

中性点不接地系统中消弧线圈使用越来越多, 晶闸管控制的调容式消弧线圈由于采用电力电子技术、过零触发技术及微机控制等先进技术, 因此调容式消弧线圈具有以下特点: 响应速度快, 可达毫秒级; 采用过零触发, 对电网无污染, 对电容器组无冲

击; 采用大功率晶闸管, 可靠性高; 采用随调式可不装阻尼电阻, 节省投资; 采用微控制器技术可以准确计算电容电流, 准确控制补偿; 并且, 调容式消弧线圈特别适合于发展中的补偿网络, 可以避免重复投资。因此, 调容式自动消弧线圈是现在较理想的有较好前景的补偿装置。

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, 2000.
YAO Huan-nian, CAO Mei-yue Resonant Grounding of Power System [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2000.
- [2] 徐玉琴, 陈志业, 李鹏. 晶闸管投切电容器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.
XU Yu-qin, CHEN Zhi-ye, LI Peng Design and Application Research on Arc Suppression Coil with Thyristor Series Capacitors [J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25 (13): 38-41.
- [3] 蔡旭, 李伟民. 自动跟踪电容电流动态补偿系统的研究 [J]. 电力系统自动化, 1995, 19 (19): 57-61.
CAI Xu, LI Wei-min A Study on the Capacitive Current Compensation System Following the Tracks of Operating Condition of Electric Network [J]. Automation of Electric Power Systems, 1995, 19 (19): 57-61.
- [4] 高元楷. 电力系统运行操作和计算 [M]. 辽宁: 辽宁科学技术出版社, 1996.
GAO Yuan-kai Power System Operating and Computing [M]. Liaoning: Liaoning Science and Technology Publishing House, 1996.
- [5] 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, 8 (14): 50-54.
ZHAO Mu-han, JI Yan-chao Study of Automatically Tuning Principle of Arc Suppression Coil [J]. Proceedings of the EPSA, 2002, 8 (14): 50-54.

收稿日期: 2004-05-19; 修回日期: 2004-08-12

作者简介:

裴志宏 (1976 -), 男, 硕士研究生, 主要从事电力电子在电力系统中的应用研究; E-mail: peizhihong@sina.com

文劲宇 (1970 -), 男, 博士, 副教授, 主要从事电力电子在电力系统中的应用及电力系统分析与计算等方面的教学与研究工作。

集中分层式安全稳定控制系统的开发 及其在贵州电网中的应用

王恒¹, 谢小荣¹, 童陆园¹, 王晓波², 张涛²

(1. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京 100084; 2. 北京四方继保自动化有限公司, 北京 100085)

摘要: 结合贵州省 500 kV 电网稳定控制系统的改造和重建工程, 给出了在线安全稳定控制系统的体系结构及关键技术。系统采用集中分层式设计, 通过获取整个电网运行信息, 更新控制策略。基于采集到的电网实时数据, 在线完成贵州省 500 kV 电网控制系统对策表的计算和刷新, 周期为 5 min 左右。

关键词: 电力系统; 暂态稳定控制; 电力稳定; 策略表; 区域稳定控制

中图分类号: TM761 **文献标识码:** B **文章编号:** 1003-4897(2005)02-0075-04

0 引言

随着电网规模的扩大, 负荷水平的增长, 电网互联程度的加强, 以及对电网的安全可靠性要求的提高, 电力系统暂态稳定性问题得到了越来越多的重视。我国现有的安全稳定控制系统大多为分散就地控制模式, 由于受本地信息量的限制, 其确立的控制策略往往不能适应整个电网系统结构的变化, 不能从整个电网运行的角度选取最优控制策略。

自上个世纪 90 年代以来, 计算技术和在线暂态稳定分析理论都有了新发展, 国内外在如何实现电网安全稳定的在线实时或者准实时控制积累了不少宝贵经验^[1,2], 这些都为提高安全稳定和设计高性能的安全稳定控制系统提供了新思路。

“在线生成策略表, 实时匹配”的集中分层式区域稳定控制系统, 是当前技术条件所能做到的电网安全稳定控制的最高形式。本文所讨论的控制系统这种设计思想, 其理想工作过程是: 根据从数据采集系统和 EMS 获得的电网实时信息, 对可能出现的严重扰动情况制定最优的控制措施, 并下发到主站和

子站刷新稳定控制装置的策略表, 刷新周期大约为 5 min, 实时检测电网扰动, 自动评估扰动的严重程度, 控制装置从策略表中选择最优的控制措施, 给分散的控制装置发送控制命令。

贵州电网是西电东送的主要电源之一, 根据贵州电网的需要, 现配有的稳定控制措施已不满足电网安全稳定运行的要求。鉴于此种形式, 贵州电网委托北京四方继保自动化有限公司对现在运行的稳定控制装置进行改造和重建, 以满足贵州电网乃至南方电网安全稳定运行的需要, 该项目目前已取得了阶段性成果, 并已在贵州电网的 500 kV 枢纽变电站投入运行。

1 系统体系结构及关键技术

系统采用集中分层式^[3]设计, 其体系结构如图 1 所示。整个系统按照控制过程可以划分为上层预决策系统, 中层控制系统和下层执行系统三个部分, 同时按照控制结构又可分解为若干相对独立的区域控制系统。

Design of capacitor tuning arc-suppression reactor

PEI Zhi-hong, WEN Jin-yu

(Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The research and application of power grid grounding by arc-suppression coil are introduced, and the merits of capacitor-tuning arc-suppression coil based on switching capacitors by thyristor are pointed out. The main circuit of capacitor-tuning arc-suppression coil is discussed, and the method of capacitor and thyristor selecting are discussed in detail. Then, the principle of capacitive current compensating and the method of parameters calculating are presented, furthermore, the structure of control system and the flow chart of control are describe. At last, the characteristics of capacitor tuning arc-suppression reactor are summarized, which draws a conclusion that capacitor-tuning arc-suppression coil has a good application prospect.

Key words: capacitor tuning; arc-suppression coil; auto-compensation