

文章编号:1001-1609(2003)02-0049-04

综述

晶闸管投切电容器技术的进展

谷永刚, 肖国春, 王兆安

(西安交通大学, 陕西 西安 710049)

DEVELOPMENT OF THYRISTOR SWITCHED CAPACITOR TECHNOLOGY

GU Yong-gang, XIAO Guo-chun, WANG Zhao-an

(Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

摘要: 介绍了用于配电系统动态无功补偿的晶闸管投切电容器(TSC)的基本原理、分类、主电路形式、控制物理量的检测、控制策略及最新的研究进展等。

关键词: 晶闸管投切电容器; 无功补偿; 微机控制

中图分类号: TM761.1 **文献标识码:** A

Abstract: The paper introduces the technology of thyristor switched capacitor (TSC) used in the distribution systems to compensate dynamic reactive power. It also discusses the fundamental compensation principle, classification, configuration of the main circuit, detection of control parameters, control strategies and the recent development of TSC.

Key words: TSC; reactive power compensation; microcomputer control

1 引言

随着电力电子技术及计算机控制技术的发展,各种新型的自动、快速无功补偿装置相继出现,晶闸管投切电容器就是一种广泛应用于配电系统的动态无功补偿装置。

电容器的分组投切在较早的时候大都是用断路器或接触器来实现的,这就是机械投切电容器(MSC)装置。当使用断路器或接触器将电容器突然投入电网时,会产生很大的冲击电流,而将电容器从电网中切除时,则有可能产生拉弧等现象。这是由于机械触头动作速度与工频电压和电流的变化速度不匹配,最快的机械触头动作时间(约0.05 s)大约是工频周期的2.5倍,加上机械触头动作时间的分散性,使得MSC在运行中难以实现同步投切,不可避免地产生过渡过程,不能实时跟踪系统无功的变化,从而不能实现快速动态无功补偿。

与机械投切电容器相比,晶闸管的开、关是无触点的,其操作寿命几乎是无限的,而且晶闸管的投切

时刻可以精确控制,能快速无冲击地将电容器接入电网,大大减小了投切时的冲击电流和操作困难,其动态响应时间约为0.01~0.02 s。TSC能快速跟踪冲击负荷的突变,随时保持最佳馈电功率因数,实现动态无功补偿,减小电压波动,提高电能质量,节约电能。

2 基本原理

TSC的基本原理见图1,(a)是其单相电路图,其中的两个反并联晶闸管起着将电容器接入电网或从电网断开的作用,而串联的电感主要用来抑制电容器投入电网时可能造成的冲击电流,还可抑制高次谐波。因此,当电容器投入时,TSC的电压-电流特性就是该电容的伏安特性,即如图1(b)中OA所示。在工程实际中一般将电容器分成几组,每组都可由晶闸管投切。根据电网的无功需求投切这些电容器,TSC实际上就是断续可调的提供容性无功功率的动态无功补偿器。

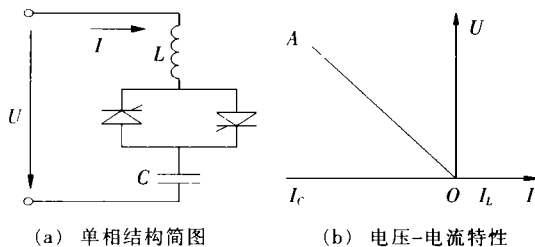


图1 TSC的基本原理

当TSC用于三相电路时可以是 Δ 接法,也可以是Y接法。每一相都可设计成分组投切,以提高静态补偿精度。电容器分组的具体方法比较灵活,一般希望能组合产生的电容值级数越多越好,但是综合考虑系统复杂性以及经济性,多数采用二进制的方案。

3 TSC 的分类

TSC系统是一个对供电网络波动无功进行动态

收稿日期:2002-10-21

补偿的相对独立系统,其应用形式有很大的灵活性,可按电压等级划分和按应用范围划分。

3.1 按电压等级划分

(1) 低压补偿方式:适用于 1 kV 及其以下电压的补偿。使用单一晶闸管阀即可满足耐压要求,可直接接入低压系统进行补偿。

(2) 高压补偿方式:即补偿系统直接接入电网进行高压补偿。关键问题是要解决补偿装置晶闸管阀的耐压,即多个晶闸管串联的均压及晶闸管触发控制的同步性。主电路接线有直接补偿、降压补偿和调压补偿 3 种方式。

3.2 按应用范围划分

(1) 负荷补偿方式:直接对某一负荷进行针对性补偿。可以对电网中频繁启动的运转负荷进行动态补偿,消除对电网的无功冲击。

(2) 集中补偿方式:对电网供电采取系统补偿的方法来解决整个电网的各种无功功率的波动问题,一般为高压补偿方式。

4 主电路

4.1 晶闸管阀

主电路中,晶闸管阀常见的接线方式有两种:晶闸管与二极管反并联接线和晶闸管反并联接线。

采用晶闸管与二极管反并联方式,投资小。只要电容器在电源峰值时投入,晶闸管在电流过零时自动切断,无论电容器的投或切,都不会产生冲击电流和过电压,控制简便,电容器无需放电即可重新投入,从而实现电容器的频繁投切。该接线方式存在的问题是,晶闸管承受的最大反向电压为电源电压峰值的 2 倍。而采取晶闸管反并联方式,在晶闸管阀关断时,如果采取措施将电容器的残压放掉,晶闸管阀承受的最大反向电压为电源电压的峰值。晶闸管反并联方式可靠性高,即使某相损坏 1 个晶闸管,也不会导致电容器误投入,但投资较大,控制较复杂。晶闸管和二极管反并联方式的响应速度比两晶闸管反并联方式稍差。

在主电路中,晶闸管阀还并联有 RC 吸收电路,用于吸收浪涌电流和抑制过电压。要求比较高时,设置氧化锌压敏电阻以吸收操作过电压,保护电容器。

4.2 串联电感

为了限制因晶闸管误触发或事故情况下引起的合闸涌流,抑制高次谐波,限制短路电流,主电路中应加装串联电抗器。当串联电抗器是以抑制谐波放大为主要目的时,其参数应根据实际存在的谐波情况进行选择。若选择的电抗值使电容器回路在最低

次谐波频率下呈现出感性,则可消除谐波放大现象。

目前,国内并联电容器配置的电抗器,其电抗率主要有以下 4 种类型: $<0.5\%$, 4.5% , 6% 和 $12\% \sim 13\%$ 。配置 $<0.5\%$ (有时到 $0.01\% \sim 0.02\%$)电抗率的电抗器,主要目的是限制电容器的合闸涌流;采用电抗率为 4.5% 或 6% 的串联电抗器,可抑制 5 次以上的谐波电流;采用电抗率为 $12\% \sim 13\%$ 的串联电抗器,可抑制 3 次以上的谐波电流。

由于串联电抗器后,电容器端电压有所提高,所以应选择电容器的额定电压高于电网的额定电压,以确保并联电容器能够长期安全运行。由于空心电抗器限流效果好,造价较高,而铁心电抗器限流效果较差,但造价低,所以在串联电抗器选型时,应通过技术经济比较来确定。

4.3 TSC 主接线

Δ 接法只适用于三相共补电路。如果三相负荷不平衡、三相的功率因数角和电流差异较大,TSC 主电路就只能采用 Y 接法,以满足分相补偿的要求。但是,TSC 采用 Δ 接线方式,也有一定的优势:①可以降低晶闸管阀的电流容量;②电源电压比较能够保证;③避免中线电流。如果采用 Y 接法,那么晶闸管阀中电流为 Δ 接法的 $\sqrt{3}$ 倍,而且在投切过程中可能有较大的中线电流,将产生较大的电压漂移,影响投入时的准确角度,可能会产生投切冲击电流。

TSC 常见的主接线方式有以下几种(以晶闸管反并联方式的晶闸管阀为例)。

(1) 三相控制的 Δ 接线方式,见图 2(a)。在晶闸管重投时,需要考虑电容器的残压,当系统电压和电容器残压相等时(允许有一个小范围差值),就是晶闸管阀投入的触发点。否则,由于电容器两端电压不能突变,系统电压和电容器残压的差值较大时触发晶闸管会产生很大的冲击电流,会直接损坏晶闸管。

增大串联电抗器可以降低冲击电流,或者选择大的晶闸管,但都需要增加投资,因此只有在控制上设法解决问题。为了确定触发的合适时刻,需要预先测量电容器的残压,这通常不太容易做到。为解决这一问题,可选择脉冲序列作为晶闸管的触发信号。另外,无论电容器残压多高,它总是小于等于电源电压幅值的。在 1 个周期中,晶闸管总有处于零压或反压的时刻。每次触发晶闸管时,选择其承受反压的时刻作为触发脉冲序列的开始,这样当晶闸管由反向转为正向偏置时就自动进入平稳导通状态,也就解决了电容残压测量的问题^[1]。

采用二极管与晶闸管反并联方式的晶闸管阀,每次切除电容器时,电容电压总是保持电源电压幅

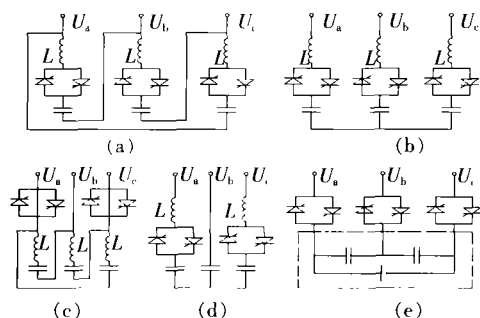


图2 TSC常见的主接线方式

值。这样,晶闸管投入时,只要脉冲序列从系统电压峰值开始触发就可以保证平稳过渡。其缺点是第一次送电时仍会发生电流冲击。为解决这个问题,主回路中可设置预充电回路,给电容器预充电保持电源电压幅值。

(2)采用两个晶闸管阀实现对一组 Δ 接线电容器的投切,见图2(c)^[2]。为了提高运行的可靠性,防止电容器和晶闸管阀损伤,晶闸管投入时有过零检测,即只有当晶闸管两端的电压接近零时才允许该晶闸管被触发。当晶闸管两端的电压过大时,该晶闸管的触发信号被闭锁。在晶闸管阀端电压过零点附近触发晶闸管,电流有一个暂态过渡过程。如果电源的等值电抗和串联电抗等参数配合较为合理,则这个暂态过程的持续时间不长、幅值也不大,并且很快过渡到稳定状态。值得注意的是,晶闸管阀切除后,补偿电容上的残压超过了线电压峰值,这不仅对并联补偿电容器的耐压提出了更高的要求,而且对晶闸管的耐压也提出了更高的要求。

(3)采用Y接线方式,见图2(b)。晶闸管电压定额可以降低,但电流定额增大了。电容器电压降低会提高其单位价格,同时,投入时会产生短时不平衡中线电流。

(4)Y接线,但没有B相晶闸管阀,只控制A,C两相的接线方式,见图2(d)。由于电容器剩余电压的不确定性,晶闸管承受的最大电压和图2(a)相同。可采用最普通的三相电容器组,又可少用晶闸管,但需要零电压触发电路。

另外,由于三相电容器的封装问题,一般不推荐 Δ 接线方式(即图2(a)和图2(c)),否则,需要采用单相电容器或定制三相电容器,这样就增加了电容器接线复杂程度和造价。但是,若在低压系统(400V)中采用Y型接线,经济上是很不合算的。因此,对于低压配电网,一般采用图2(e)所示的接线。

5 控制器

近年来,国内已研制并生产了各种无功补偿的

控制器,这些控制器在控制上一般采用8位单片机(如MCS-51系列)、16位单片机(如MCS-96系列)及工业PC机为核心进行自动控制。

5.1 控制物理量的测量及算法

(1)相位差检测原理:一种常用的测量方法。只要测得电网电压和电流的过零时间差,即可求得功率因数角和相应的功率因数值。相位差采样是用过零采样电路结合计算机定时完成的,当电压信号正向过零时,将向单片机发出中断申请信号,单片机响应中断,其内部定时器开始记数,当电流信号正向过零时,定时器停止记数,显然此时定时器数值与两者的过零时间差,即相位差成正比。定时器数值不仅反映功率因数角的大小,而且还可以判断系统无功负载的性质,即可判断是欠补偿还是过补偿。

(2)无功电流的检测:一种瞬时值检测方法。在相电压由正到负过零瞬间,相电流的瞬时值恰好就是该相无功电流的最大值。将相电压由正到负过零信号(单相比较器的输出信号)作为采样保持器的采样开关,采样保持器的输出信号就是对应的无功电流的最大值。根据所测得的无功电流,计算出需投切的电容器容量。其优点是简单、快速,每相在一个周期内只采样一次,即可满足动态补偿快速测量的要求。

(3)无功功率的计算:任取两时刻的电压、电流作为一组数据,就能把无功功率检测出来。这样取若干组数据,即可计算出若干无功功率值,再经数字滤波后,就可以把半个工频周期内无功功率值既准确又快速地检测出来。

5.2 控制物理量的选取及控制策略

控制方式一般分为按功率因数补偿和按无功功率补偿两种,有的还辅以电压控制。每一种单独的控制方式均有其不足之处。例如,单独按功率因数补偿,在负载电流较小时,常会发生投切振荡。计算机作为控制元件,为实现多变量控制提供了可能性。比较合理的补偿应该做到以下几点:最大限度地利用补偿设备提高电网的功率因数;不发生过补偿;无投切振荡;无冲击投切;反应灵敏、迅速。

(1)按功率因数 $\cos\varphi$ 控制:根据存入计算机中的整定功率因数 $\cos\varphi_1$,由检测到的运行参数 $\cos\varphi$ 控制所需的补偿电容器容量。电容器组投入后,只有当 $\cos\varphi_2 < \cos\varphi < \cos\varphi_1$ ($\cos\varphi_1, \cos\varphi_2$ 分别为整定功率因数的上、下限),且电压不超过允许值时,才能运行于稳定区。

(2)按无功功率控制:根据所测得的电压、电流,计算出无功功率和应该投入的电容器容量。在电容器组合方式中选出一种最接近,但又不会过补偿的

组合方式,电容器投切一次到位。如果计算值小于最小一组电容器的容量(下限值),则应保持补偿状态不变。只有当所需容量大于或等于下限值时,才执行相应的投切。

(3)综合控制:充分发挥计算机强大的存储、计算、逻辑判断功能,以功率因数控制为基础,以无功功率控制避免投切振荡,及以电网电压上限值和负载电流下限值作为控制电容器组投切的约束条件,实现电容器组的智能综合控制。

在控制器的控制物理量方面,从单一按功率因数自动投切的产品,向多参数过渡。现已有了带逻辑电路“先投先切、后投后切”的等容量分组方式的控制器,以使各组并联电容器投入运行的时间大致均等,并可减少增减补偿容量过程中电容器的投切次数。

(4)模糊控制^[1,3]:当以系统运行工况为参数时,无功补偿电容器的输出容量正比于端电压的平方,而且并联电容器的端电压与系统功率因数的关系是一簇曲线,这给无功补偿电容器的自动控制带来了困难。

由于TSC无功补偿装置是采用分级投切电容器的方法来调节无功功率的,不能连续调节,调节量不必分的太细,这恰好适应了模糊控制的特点。综合考虑以上非线性因素以及多值函数的影响后,运用模糊逻辑推理的方法,能够既简单又迅速地算出应当投入补偿的容量。

TSC模糊控制器的输入量可以是负荷的无功功率、结点电压、功率因数。根据专家控制策略(模糊规则),将输入量的取值范围划分为若干区域,确定各区域的隶属度,以获得最佳的控制效果。

6 研究动向

晶闸管投切电容器具有优良的动态无功功率补偿性能,近年来在低压配电网中得到了迅速的推广应用。该技术在以下几个方面的发展动向值得注意。

(1)进一步提高TSC产品的可靠性,降低产品成本。TSC产品是集强电(晶闸管、电容器等)与弱电(微处理器、存储器等)于一体,它们间的电磁干扰是非常严重的。合理选择电子器件及设计控制器电路,合理选择检测物理量和控制算法,进一步提高产品的可靠性和抗干扰能力,减小投切的振荡,降低产品成本,提高产品的竞争力是今后的一个研究方向。

(2)无功参量的快速检测及控制新方法。快速准确地检测系统的无功参数,是TSC进行快速动态补偿的前提条件。虽然目前提出了一些检测方法,如测

无功、相位差、瞬时无功电流等,但对于三相不平衡系统、存在谐波的系统的无功功率的定义及无功参数的测量还值得研究。随着计算机数字控制技术和智能控制理论的发展,一些先进的控制方法引入TSC控制,提高其智能控制水平也是一项非常有意义的工作。

(3)研制兼具补偿无功和抑制谐波的多功能产品。TSC实现了电容器快速、无冲击投切,但当供电系统或负荷中存在大量谐波时,往往由于谐波放大导致电容器损坏或晶闸管烧毁。研制开发兼有TSC与电力滤波器双重优点的晶闸管开关滤波器(TSF-Thyristor Switched Filter),将成为改善系统功率因数、抑制谐波、稳定系统电压、改善电能质量的有效手段^[4]。

(4)高压系统中的TSC技术。由于受到晶闸管耐压水平的限制,目前用于高压系统的TSC是通过变压器降压接入的,如用于电气化铁道牵引变电所中的TSC^[5]。研制直接接入高压电网(如10kV)进行高压动态无功补偿的装置具有重要意义^[6]。该方式的关键问题是要解决补偿装置可控硅和二极管的耐压,即多个晶闸管元件串联及均压、触发控制的同步性等。

7 结论

晶闸管投切电容器装置具有优良的动态无功功率补偿性能,特别适合于冲击性负荷及经常波动性负荷的场所,对提高配电系统的功率因数,稳定系统电压,降低能耗,具有重要的作用。

参考文献:

- [1] 石新春. 一种采用零压型开关的TSC低压无功补偿装置[J]. 电网技术, 2000(12): 41-44.
- [2] 戴朝波. 晶闸管投切电容无功补偿角形接线方案的研究[J]. 电工技术杂志, 2001(3): 5-7.
- [3] 马瑞军. 运用模糊控制理论的并联电容器投切方式[J]. 华北电力大学学报, 1998(3): 24-28.
- [4] 赵刚. 晶闸管投切电力滤波器组的工程应用[J]. 电工技术, 2001(2): 4-6.
- [5] 张丽, 李群湛. TSC在牵引变电所无功补偿中的应用[J]. 铁道学报, 2000(4): 20-23.
- [6] 刘会金. 电容器并补大功率晶闸管阀的研究[J]. 电力系统及其自动化, 2001(1): 31-34.

作者简介:谷永刚(1976-),男,硕士生,主要研究方向为无功功率补偿。