

几种静止型动态无功补偿(SVC)装置的性能及应用场合分析

江少成¹, 常宇²

(1. 温州电力局, 浙江 温州 325000; 2. 山东泰开电力电子有限公司, 山东 泰安 271000)

摘要:详细分析了目前国内无功功率补偿领域广泛使用的3种典型静止型动态无功功率补偿装置—SVC的原理及性能特点,同时分析了几种典型的大功率负荷的无功功率变化特点,并针对该类负荷的无功功率变化特点,总结了适用的SVC装置。

关键词:无功功率; 补偿; SVC; TCR; TSC; MCR

中图分类号: TM714.3

文献标识码: B

文章编号: 1007-1881(2009)05-0032-05

Performance and Applied Fields of Several Static-type Dynamic Static Var Compensators

JIANG Shao-cheng¹, CHANG Yu²

(1. Wenzhou Electric Power Bureau, Wenzhou Zhejiang 325000, China;

2. Shandong Taikai Power Electronic Co. Ltd., Tai'an Shandong 271000, China)

Abstract: The operating principles and characteristics of several typical static-type dynamic static var compensators inboard have been analyzed in detail. As well, the varying characteristics of several typical high power var power have been analyzed. Aimed at the different characteristics of var power variation, this paper has found the proper SVC system.

Key word: static var; compensation; SVC; TCR; TSC; MCR

随着国民经济和科技水平的发展,大容量非线性用电负荷急剧增加,这些负荷在工作中除了产生大量的谐波电流外,还导致从系统吸收的有功、无功功率的大幅度变化而造成电压跌落和波动,给供电系统带来了日益严重的“污染”;另一方面,这些负荷也对供电电能质量有很高的要求。

无功补偿及谐波治理技术在提高电网供电质量、电力净化及提高电网电能输送能力方面有重要作用。用电设备工作状态的复杂性和多变性导致传统的固定电容器补偿及谐波抑制装置性能不佳或者无法起到预先设计的作用。以电力电子器件作为无触点开关为核心的静止型动态无功补偿装置(SVC),在抑制电压波动与闪变、平衡三相电流、提高和稳定功率因数、谐波电流吸收等方面起到了非常好的作用。

目前应用的SVC装置主要分为3种类型:

TCR型、MCR型及TSC型。其中,TCR+FC型是目前国内应用最广的一种SVC装置,而MCR型和TSC型也已占据了相当的市场。以下对这3种产品的性能及其应用场合进行详细的分析,在实际应用中应根据负荷性质选择最优的SVC设备,达到优化投资和节省运行成本,提高设备效率的目的。

1 SVC产品性能分析

1.1 TCR型SVC原理及性能分析

TCR一般与固定电容器组(FC)配合使用。由固定电容器组提供最大无功补偿功率,而由晶闸管控制相控电抗器在计算调节单元的控制下,实时吸收固定电容器组提供的无功补偿功率与系统需要的无功功率的差额,做到实时调节无功的目的,如下式表示。

$$Q_R = Q_C - Q_L + \Delta Q$$

式中： Q_c 为固定电容器组能够提供的最大无功补偿功率； Q_L 为用电负荷特定时刻吸收的无功功率； Q_R 为晶闸管控制相控电抗器吸收的无功功率。

ΔQ 是为了保证 SVC 装置与用电负荷并联后，其并联阻抗呈阻感负载而添加的，有利于系统稳定。为了兼顾吸收谐波电流的作用，固定电容器组在设计时一般设计成电容器与线性度较好的空心电抗器串联，使得其阻抗特性对某次或某几次谐波电流呈现低阻抗，达到滤除该谐波电流的目的。

由其工作原理可以分析出 TCR 型 SVC 工作性能的几个特点：

(1) TCR 装置自身为谐波源。晶闸管通过控制相控电抗器的导通时刻，达到控制通过相控电抗器电流的目的。对该电流波形进行傅立叶分解，可得到所含谐波电流的次数及其所占比例。特定次数的谐波电流在不同触发角度下，其所占比例不同。TCR 装置在实时调节 SVC 装置输出无功功率时，自身产生的谐波电流会加重滤波器的负担。

(2) 负荷轻载或退出运行时，SVC 能耗最大。因固定电容器组一般采用机械开关(断路器或接触器投切)，动作速度慢。在负荷轻载或暂时退出运行时，切除电容器的策略一般不被采用，而是由 TCR 装置完全吸收 FC 部分的容性无功功率。此时，通过 TCR 的电流最大，故电抗器、晶闸管阀组耗能非常大。当负荷瞬间无功冲击非常大而持续时间非常短暂时，SVC 装置自身消耗了相当的有功功率。据有关资料统计，TCR 型 SVC 的最大能耗功率大约在其补偿容量的 3% [2]。以一套补偿容量 100 MVA 的 TCR 型 SVC 为例，其最大能耗功率约为 3 MVA，如果负荷有 50% 的时间处于轻负荷状态，则 SVC 装置的平均能耗达到 1.5 MW，年最大损耗为 1.3×10^7 kWh，电价按 0.5 元/kWh 计算，一年为 SVC 装置消耗的电费达到 650 万人民币，这是一个非常可观的数字。

(3) 占地面积大，电磁辐射影响较大。由于 TCR 装置本身产生了相当量的谐波电流，在很多情况下，即使用电负荷自身不产生或产生非常少的谐波电流时，其合成谐波电流也经常超过国家

标准的要求。特别是用于相控的电抗器为了满足其线性输出感性无功功率的目的，通常采用干式空心电抗器结构，这些电抗器体积较大，需要较大的面积去摆放。同时，幅值达到或接近 SVC 装置额定值的电流经常流过电抗器，因相控电抗器的电感值较大，故电抗器附近的区域存在很强的电磁场，可能干扰周围的各种用电设备。

(4) 响应速度快。在保证控制器计算调节处理速度的前提下，控制器的响应时间不超过 10 ms 是完全可能的，TCR 的整机响应时间也完全可以控制在 15 ms 以内 [1]，系统稳定时间一般不会超过 3 个工频电压周期，即 60 ms。图 1 为国内某公司生产的 TCR 装置输出电流的控制响应波形。从图中可以看出，TCR 第一次输出已可超过稳定电流的 0.9，在 3 个工频电压周期内完全稳定下来。这个响应速度对目前绝大多数用电负荷都能满足要求。

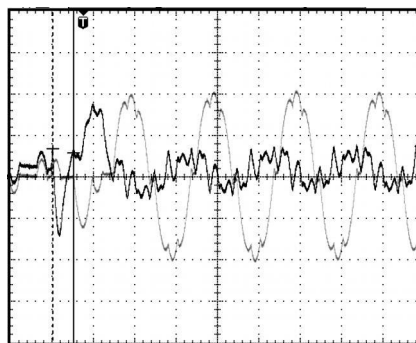


图 1 TCR 阶跃负荷电流响应波形

(5) 可分相、连续调节输出的无功功率。TCR 型 SVC 装置的 TCR 部份通常设计成 Δ 接线，需要时，可单独对每相 TCR 支路的触发延时角进行控制，从而达到分相调节无功的目的。由于 TCR 的触发延时角是连续可调的，故理论上 TCR 型 SVC 输出的无功功率也是连续无级可调的。

(6) 晶闸管使用的数量随着电压等级的升高而增加。因晶闸管阀关断后，TCR 装置直接承受系统电压，晶闸管阀的电压耐受水平需与系统电压等级匹配。如此众多的晶闸管串联在一起，不仅增加了晶闸管阀的生产成本，而且增大了 TCR 的故障几率。因此，TCR 型 SVC 一般直挂于 35 kV 及以下电压等级；当系统电压更高时，装置

一般安装于系统变压器的低压侧(35 kV 及以下电压等级), 当安装点不存在变压器或不便于安装在变压器低压侧时, 需在装置与系统之间增添降压变压器, 使 SVC 的工作电压降至 35 kV 以下。

1.2 MCR 型 SVC 原理及性能分析

与 TCR 型 SVC 类似, 也需要与 FC 配合使用。由电容器提供最大无功补偿功率, 而由磁阀控制相控电抗器。在计算调节单元的控制下, 实时吸收固定电容器组提供的无功补偿功率与系统需要的无功功率的差额, 做到实时调节无功的目的。MCR 装置与 TCR 装置的不同之处在于控制电抗器输出电流的方式不同。TCR 是控制电抗器的导通角, 对电抗器的要求是线性度好, 不能饱和; 而 MCR 正是利用了电抗器在不同的饱和度下表现出不同的感抗来实现的, 图 2 为 MCR 的电路原理图。MCR 电抗器为铁芯结构, 控制铁芯饱和度电路的取能采用了自耦变压器原理, 由晶闸管和二极管构成的整流电路在控制器的控制下, 调节晶闸管的触发延时角达到改变整流电路输出的直流电压幅值的目的, 由于线圈的直流电阻值为定值, 故通过改变整流电路的输出电压幅值即可达到控制流过线圈的直流励磁电流大小的目的, 而铁芯的饱和度正是由流过线圈的电流决定的。

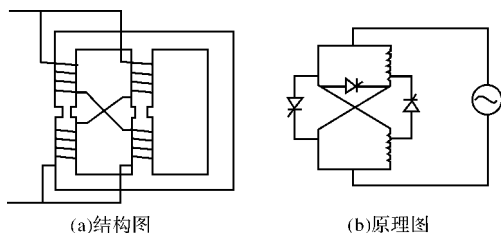


图 2 MCR 的结构及电路图

MCR 型 SVC 装置的工作性能:

(1) MCR 装置自身为谐波源。电抗器线圈中流过的电流为直流与工频交流的叠加, 故铁芯的饱和度在一个一个工频周期的不同时刻实际是不同的, 铁心饱和度的变化导致电抗器对外表现的感抗也是一个变化的值, 因而通过电抗器的电流不是标准的正弦波。大量的试验结果表明, 磁控电抗器产生的谐波含量较相控电抗器要小。通过

对多套 MCR 的测试结果, 同等容量下的 MCR 的谐波发生量为 TCR 的 $1/3 \sim 1/2$ 左右。

(2) 负荷轻载或退出运行时, SVC 能耗最大。因 MCR 型 SVC 的补偿原理也是由电容器提供最大无功补偿功率, 通过电抗器感抗的变化吸收电容器提供的多余的无功功率。在用电负荷轻载或退出运行时, 电抗器工作在最大电流状态。据有关资料显示, MCR 装置的功耗要比同等容量和电压等级的 TCR 装置小很多。原因在于, 磁控电抗器采用的晶闸管承受电压仅为系统电压的 $1\% \sim 3\%$, 串连数量少或者不需要串连, 故晶闸管阀的功耗非常小, MCR 装置的功耗大小基本由电抗器决定。

(3) 结构紧凑、占地面积小, 电磁辐射小。与空心电抗器不同, MCR 装置的电抗器的磁芯由高导磁率的硅钢片组成, 电抗器的磁通绝大多数通过硅钢构成磁通回路, 仅有极少数的漏感磁通通过空气构成磁通回路。由于磁路导磁效率高, 故电抗器可设计的较为紧凑, 占地面积少, 且通过电抗器周围空气的漏磁通比例甚小, 故 MCR 电抗器在运行中对周围环境的电磁影响较小, 可参照同等容量和同等电压等级的电力变压器的电磁影响去评估。

(4) 响应速度慢。磁控电抗器是控制通过线圈的直流电流达到改变电抗器等效电感值的目的。尽管线圈的电感不影响稳定的直流电流, 但在电流值改变调整时, 电感值却对其稳定时间有很大影响。当给定整流电路的触发延时角后, 采用 matlab/simulink 的 POWSYSTEM 工具箱仿真的电抗器的稳态电流过渡过程如图 3 所示^[3]。理论分析和试验研究结果表明, 自 MCR 接收到无功

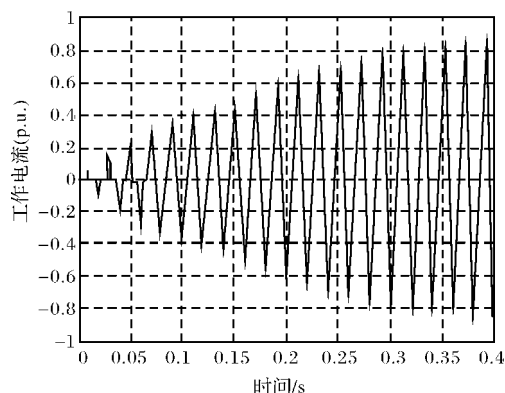


图 3 MCR 稳态电流过渡过程仿真波形

调节变化信号(对应特定的整流电路输出电压)至MCR输出容量调节到计算值的90%的稳定时间为200~300 ms,比TCR装置的稳定时间慢许多。对电压闪变和波动的治理效果较TCR型SVC差。

(5)可分相、连续无级调节输出无功功率。其工作情况与TCR型SVC相似。

(6)晶闸管阀使用晶闸管数目少。晶闸管阀的工作电压为系统电压的1%~3%,因此晶闸管一般不需要串连或只需要很少的串连数,故MCR型SVC可直挂于110 kV及以上电压等级使用而无需降压变压器。

1.3 TSC型SVC原理及性能分析

TSC是晶闸管投切电容器的英文缩写。在工程实际应用中一般将电容器分组,可以根据电网的无功需求投入或切除一组或几组电容器,达到实时满足电网无功需求的目的。

与上述两种SVC相比,TSC有其自身的特点:

(1)运行时不产生谐波电流。通过精确控制晶闸管的触发时刻,TSC可以实现无过渡过程投入和切除。例如可以采用电容器预充电至电网电压峰值,在电网电压达到峰值时触发晶闸管,则通过电容器的电流波形为自零开始增长的正弦波而没有任何谐波,如图4所示。

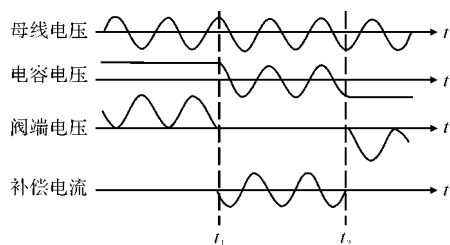


图4 TSC装置开断电压电流响应波形

(2)TSC损耗小。当TSC补偿无功增加时,TSC投入使得晶闸管的电流随之增加,从而加大晶闸管的发热功率;当负荷轻载或系统无功需求少时,TSC装置退出,晶闸管不再消耗有功功率。特别是,TSC装置不需要大容量的相控电抗器或磁控电抗器,而电抗器的损耗在SVC中的损耗比重是很高的,故TSC的损耗非常小。

(3)结构紧凑、占地面积小且无电磁辐射影

响。这是因为TSC装置不需电抗器,且无谐波电流产生,在多数情况下,仅需给电容器串连电感值很小的铁芯电抗器抑制谐波电流即可,电磁辐射非常小。

(4)响应速度快。TSC装置仅有两种工作状态:投入和退出。当控制器计算出需要投入或退出的电容器组数时,下达TSC的投入或退出命令即可。在保证控制器的运算速度的前提下,试验证明整机的响应时间不超过20 ms,稳定时间不超过60 ms。

(5)可分相补偿,但不能无级连续调节输出无功功率。TSC一般为 Δ 接法,很容易实现分相补偿;但是其补偿精度受电容器的分组数限制。当电网电压稳定时,每组电容器的补偿容量是固定的,分组数越多,调节精度越高,但是成本也越大。因此,电容器组不易分得过多。

(6)晶闸管使用数量多。与TCR类似,TSC晶闸管阀的耐受电压需与电网电压一致,特别是每设置1个TSC支路就需要增加1套晶闸管阀系统。例如,对于10 kV电压等级而言,一般需10对耐压5 600 V的晶闸管串连而成,因增加1个TSC支路而增加的晶闸管数量是60支,这个数量是非常可观的,故TSC支路不宜设置过多。

2 SVC应用领域分析

SVC的一个应用领域为配电网,用于满足用电负荷对快速变化的无功功率需求。那些无功需求大且频繁变化的场合,有时伴随着谐波电流的产生,要求SVC在快速调节输出无功的同时,具备谐波电流滤除或抑制作用。如冶炼行业的电弧炉、各种轧机,采矿业的矿井提升机,港口的大型门型提升机,电气化铁路的牵引变等均需安装SVC用于提高供电网质量,提高产品质量等;SVC的另一应用领域为输电网,用于调节电网系统阻抗,提高系统运行的稳定性。

2.1 无功需求无规律迅速变化的用电负荷

以电弧炉为代表的供电负荷在运行中,对无功的需求是在一个最小值和最大值之间连续无规律的变化。图5所示为某电弧炉工作中的无功变化曲线。尽管在某个阶段,其无功需求在一个固定值范围内变化,但存在无功需求大幅连续变化的情况。这类负荷性质为高度非线性,不仅表现

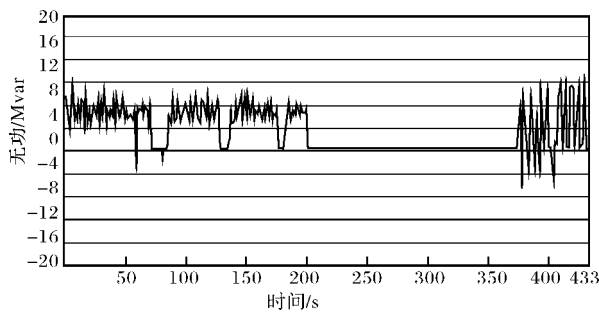


图5 电弧炉工作周期内无功变化曲线

为无功需求的急剧变化,同时还伴随着大比例的负序电流和频谱很宽的谐波电流产生。该负荷性质要求无功补偿装置能够输出动态连续可调的无功功率,且必须进行专门的谐波电流滤除设计。在这几种形式的SVC产品中,TCR型SVC能够更好地满足上述要求。

2.2 无功需求阶梯状迅速变化的负荷

以矿井提升机和轧机为代表的负荷呈现出另外的特性,图6为某煤矿矿井提升机无功变化波形。从图中可看出无功功率表现为明显的阶梯状态。轧机、港口门型提升机负荷、电气化铁路牵引变等负荷的无功变化与之类似。因这类负荷的电机大都采用整流供电,故功率因数较低,需进行无功补偿。

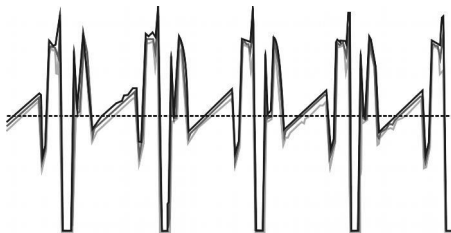


图6 矿井提升机负荷无功功率波形

例如,在电力机车为进入牵引变的供电范围时,牵引变基本处于空载状态;当机车滑进牵引变的供电臂时,需牵引变立刻提供与机车匹配的有功和无功功率,机车离开牵引变的供电范围时,牵引变又迅速进入空载状态;表现为明显的阶梯状动态无功功率需。TSC型SVC响应速度快,负荷空载或轻载时会退出运行,有功损耗非常小,设备占地面积小,在这类负荷的无功补偿中更占优势。

2.3 无功需求无规则较缓慢变化的负荷

该类负荷尽管需要提供能够无级连续调节的无功补偿装置,但其对无功补偿的速度要求并不高。以多馈线变电站的无功补偿为例,尽管某一路馈线负荷的无功功率可能变化频繁,但考虑到各馈线的相互弥补作用,特别是在各馈线负荷安装有各种形式的无功补偿装置后,母线的无功功率发生瞬间大幅度变化的情况可能并不多。这类负荷的无功功率变化有一定规律,例如白天无功需求高,夜间无功需求低等。近几年来,大型风电场获得了迅猛发展。风力发电中大量的整流逆变电路决定了其在发电过程中吸收大量的无功,同时需要安装无功补偿装置。该类负荷对无功功率的需求变化与风速、风向等有密切关系。因为风速、风向有一定惯性,变化较为缓慢,对无功功率的需求变化相对较慢,MCR型SVC可以很好的满足这方面的要求。

2.4 以提高电网运行稳定性为目的的SVC

由于电网中用电负荷种类多、数量大,且运行状态各不相同。特别是由于系统庞大,发生各种故障的概率也大。为了提高因用电负荷的运行状态变化和故障造成的电网运行隐患,在关键位置安装SVC装置,能大幅提高电网运行稳定性。当控制器监测到电网存在运行隐患时,迅速改变SVC的等效阻抗,从而改变电网系统阻抗,使其远离故障隐患的阻抗点,提高系统运行稳定性。以提高电网运行可靠性为目的SVC要求具备其具备快速响应的能力并且其阻抗连续可调。在这几种形式的SVC产品中,TCR型SVC可以很好的满足这方面的要求。

3 结语

针对目前国内无功功率补偿行业使用静止型动态无功功率补偿装置的现状进行了详细的分析,并总结了常用的TCR、TSC及MCR型SVC装置的不同特点。通过对响应速度、自身有功损耗、谐波发生量及制造成本等方面的比较,得出了适合各种SVC的装置的应用领域,可供SVC产品选择时参考。

(下转第44页)

是比较合适的,与燃气轮机组发电相比仍具有较强的市场竞争能力。

两部制电价改革能够使溪口抽水蓄能电站的经营状况得到改善,企业能够投入更多资金进行技术改造,及时做好设备维修维护工作,提高设备的可用率,更好地服务于电网。而且可以按照不同季节,高峰、平常和低谷各时段核算电网经济成本,根据最经济和最合理原则,对电站进行综合调度、优化调度,以体现全社会整体效益的最大化。同时溪口抽水蓄能电站采用独立发电商管理体制通过自主经营、独立核算,可以有效减轻抽水蓄能电站的经营压力。无论采取何种运营模式,溪口抽水蓄能电站的生存与发展都取决于较好的市场经济环境、合理的电价机制。未来电价机制的改革方向必然是如何合理计价,保证除削峰填谷外,更好发挥其它的辅助服务,实现调频、调相、事故备用、黑启动等动态效益。

3 结语

根据分析,结合宁波地区电网电源结构和系统规模,溪口抽水蓄能电站采用独立发电商管理体制,经营上采用两部制电价模式是可行的,而且符合国家电力体制改革的方向,股东能取得合

理的回报,企业可以走上良性、可持续的发展轨道。宁波电网可以在优化运行调度的前提下,充分发挥抽水蓄能电站的综合效益,电网的安全稳定、经济运行等可以得到更好的保证。

参考文献:

- [1] 宁波电业局电网控制科技小组. 宁波电网抽水蓄能电站的经济运行与控制研究课题[G]. 2008.
- [2] 巢兆荣. 对沙河抽水蓄能电站经营模式的思考[J]. 水力发电, 2007, 33(9):53-54.
- [3] 朱美芳, 姚 瑜. 现有抽水蓄能电站电价机制及经营模式的探究[J]. 华东电力, 2007, 35(5):65-67.
- [4] 陈雪青, 阮前途. 有抽水蓄能电站的联合电力系统优化调度模型和算法[J]. 中国电机工程学报, 1995, 15(4): 274-280.
- [5] 于文革. 抽水蓄能电站运行方式和电网经济效益分析[J]. 水力发电, 2002, (4):57-58.

收稿日期: 2008-11-25

作者简介: 李丰伟(1975-), 男, 浙江宁波人, 工程师, 从事电力系统调度运行工作。

黄森炯(1982-), 男, 浙江诸暨人, 助理工程师, 从事电力系统调度运行工作。

(本文编辑: 陆 莹)

(上接第 36 页)

参考文献:

- [1] 钢铁企业电力设计手册编委会. 钢铁企业电力设计手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1996.
- [2] 田广青. 晶闸管控制型静止补偿器的损耗评价[J]. 电力电容器, 1995, 2:28-35.
- [3] 田铭兴, 励庆孚. 磁饱和式和变压器式可控并联电抗器[J]. 高电压技术, 2003, 26(7):26-53.
- [4] 陈振虎, 梁继勇. 基于磁控电抗器的电力系统动态无功补偿装置的设计及应用[J]. 电网技术, 2005, 26(7): 82-84.
- [5] 谷永刚, 肖国春. 晶闸管投切电容器(TSC)技术的研究

现状与发展[J]. 电力电子技术, 2003, 37(2):85-88.

- [6] 王兆安. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.

收稿日期: 2009-04-27

作者简介: 江少成(1979-), 男, 浙江龙游人, 工程师, 从事电力系统调度工作。

常 宇(1977-), 男, 辽宁锦州人, 工程师, 从事电力系统无功补偿与滤波技术研究工作。

(本文编辑: 杨 勇)

加强电力需求侧管理