

# 电力系统宜用磁阀式可控电抗器进行无功调节

陶梅<sup>1</sup>, 江钧祥<sup>2</sup>, 葛敏<sup>3</sup>, 江文生<sup>4</sup>

(1. 安徽电力科学研究院, 安徽 合肥 230022; 2. 合肥华威自动化有限公司, 安徽 合肥 230011;  
3. 铜陵供电公司, 安徽 铜陵 244002; 4. 淮南供电公司, 安徽 淮南 232007)

**摘要:**通过对几种无功补偿容量的调节方法进行分析与比较后, 认为采用 MCR 来调节无功输出容量具有平滑连续、不产生过电压、投资省、维护简单、且有双向无功补偿等优点, 能实现实时无功功率就地平衡的目标, 是提高电网电压质量、降低线损的有效技术措施, 适宜逐步推广应用。

**关键词:**磁阀式可控电抗器 (MCR); 静止无功补偿装置 (SVC); 调节; 无功输出容量

**中图分类号:** TM47 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-1757(2011)03-0018-04

Power System s Magnetic Valve Controllable Reactor for Reactive Power Regulation

TAOMei, JIANG Jun.xiang, GEMin, JIANG Wen.sheng

(1. Anhui Electric Power Research Institute, Hefei 230022, China; 2. Hefei Huawei Automation Co., Ltd. Hefei 230011, China; 3. Tongling Power Supply Company, Tongling 244002, China; 4. Huainan Power Supply Company, Huainan 232007, China)

**Abstract:** It is thought through analyzing and comparing several methods of regulating the reactive power compensation capacity that to adopt MCR to regulate the reactive power output capacity has such advantages as smooth and successive modulation, no overvoltage, low invest, simple maintenance and bidirectional reactive power compensation. Additionally, the realization the object of achieving appropriately reactive power to be balanced on site is the effective measures to improve quality of network voltage and reduce the line loss and the MCR technology is applied gradually.

**Keywords:** magnetic valve controllable reactor (MCR); static var compensator (SVC); adjustment; reactive output capacity

## 0 引言

电压质量是电能质量的重要指标之一, 电力系统的无功补偿和无功平衡是保证电压质量的基本条件, 对保证电力系统的安全稳定与经济运行起着重要的作用。加强电力系统无功管理可以稳定电网电压, 提高功率因数与降低损耗, 提高供电质量水平<sup>[1-2]</sup>。

国家电网公司电力系统电压质量和无功电力

管理规定中要求: 电网的无功补偿配置应能保证在系统有功负荷高峰和低谷运行方式下, 分(电压)层和分(供电)区无功平衡。分层平衡的重点是 220 kV 及以上电压等级层面的无功平衡, 分区就地无功平衡主要是 110 kV 及以下配电系统的无功平衡。同时要求: 35 ~ 220 kV 变电站在主变最大负荷时, 其一次侧功率因数应不低于 0.95, 在低谷负荷时功率因数应不高于 0.95。

为了达到国网公司的上述要求, 各省电力部

收稿日期: 2011-03-14

作者简介: 陶梅 (1964—), 女, 工程师, 主要从事电容器检测、无功补偿装置技术研究工作。

门加强了电压无功管理工作,开发了无功管理软件,在变电站里安装了并联电容器组、有载调压变压器、静止无功补偿装置 (static var compensator, SVC)、电压无功控制 (voltage quality control, VQC)、自动电压控制 (automatic voltage control, AVC) 等无功补偿设备和自动调压系统,电压质量有了明显的提高。但是,由于目前电容无功补偿装置输出容量的调节手段尚存在不足之处,不能实现实时无功就地平衡,使并联电容器组或自动调压系统未能发挥应有的作用,不能充分满足电压无功综合控制的需要,未能达到预期的目标。因此,研究新的方法来改进电容无功补偿装置输出容量的调节手段是十分必要的。

## 1 目前常采用的几种输出容量调节方法

### 1.1 电容器组分组投切

这是目前所采用的一种主要调节方法。它是将电容器组分为若干分组,分组容量有等容的,也有不等容的;分组数量为 2 个分组或更多分组 (例如 8 个分组或更多),然后根据系统的无功需要,决定投切电容器分组的数量,这种分组投切的方法具有投资省、接线简单的优点,但存在以下不足之处:

1) 不管分组有多少,它的无功容量的调节均是阶梯式的,因此不可能与系统的无功需要实现实时无功就地平衡。

2) 电容器组的投切是靠操作开关来实现的,而开关在分断过程中若出现重击穿则极易引起电容器故障。所以高压并联电容器的 IEC 标准和国家标准均要求使用无重击穿开关。但绝对无重击穿的开关是没有的,实际上只能采用重击穿几率小的开关。

目前并联电容器组的操作开关大量采用真空断路器或真空接触器,其在合闸和分闸过程中均可能发生弹跳。合闸时发生弹跳,将使过电压倍数可达 2 倍以上,涌流倍数亦相应增大;分闸时发生弹跳,使重燃率提高,北京供电局和华北电力试验研究院在试验中所测到的最大弹跳达 8 mm,重燃率达 30% 左右,最大过电压达  $4.8 U_n^{[3]}$ 。

3) 目前电力系统已投入的无功电压自动控制 (AVC) 系统使电容器组频繁地投切,这不仅

使电容器由于过电压而影响其工作寿命,而且开关发生故障的几率大为增加,威胁系统运行的安全。用不重击穿的断路器来投切电容器组,通常会产生第 1 个峰值不超过  $2\sqrt{2}$  倍的过电压,根据 GB/T 11024—2011 允许该种断路器每年可以切合 1000 次,平均每天不到 3 次,不能满足 AVC 的需要。

### 1.2 调压式电压无功自动调节装置

根据公式  $Q = U^2 \omega C$  可知,用改变电容器的运行端电压同样可以进行无功输出容量的调节。

调压式电压无功调节装置主要由并联电容器组、电压调节器及控制器组成,电压调节器初级接于母线,其次级接入并联电容器组。装置工作时由控制器根据系统的电压无功参数,按照九区图控制原理,调节电压调节器的分接头,也就是改变施加于电容器的端电压,对电容器组的无功输出进行调节,及时调整母线电压与功率因数在合格范围内<sup>[4]</sup>。

装置在调节过程中不需要对电容器组进行投切,不会产生过电压,而且电容器的实际运行电压不会超过允许值,保证了电容器组的运行安全,延长了使用寿命。因此,用调压式电压无功自动调节装置的输出容量调节方法与电容器组分组投切的方法相比较,已有了很大的改进,但尚存在以下不足之处:

1) 尽管电压调节器的分接头较多,其无功容量的调节仍是阶梯式的,因此不能真正与系统的无功需要实现实时无功就地平衡。

2) 容量调节范围受到一定限制,不能实现全容量调节,调节范围为 100% ~ 36%。

3) 目前电压调节器 (自耦变压器) 的电压等级最高为 35 kV 而并联电容器组的电压等级已向 110 kV 及以上等级发展,要生产满足所有电压等级的电压调节器可能存在一定的困难。

### 1.3 TCR 型 SVC 装置

该装置主要由晶闸管控制电抗器 (TCR) 与电容器组一起组成,称静止无功补偿装置 (SVC)。其电抗器与电容器组并联连接,通过对其感性或容性电流的调整,维持或控制其与电网连接点的某些参数 (例如控制母线电压)。图 1 为某变电站的 SVC 接线。

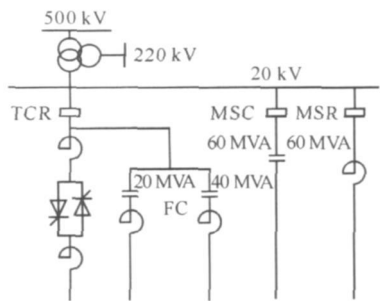


图 1 某变电站 SVC 接线  
Fig 1 SVC wiring of a certain substation

TCR型 SVC装置能够根据系统的无功需要,快速进行无功容量的调节。由于其不是阶梯式的调节,而是平滑、连续的调节,所以能实现实时无功就地平衡。根据 GB/T 20298—2006《静止无功补偿装置(SVC)功能特性》的要求:SVC控制系统的响应时间不大于 15 ms;SVC系统响应时间为 30~50 ms。由于 TCR型 SVC装置在调节过程中基本上不需要投切电容器组,也减少了发生过电压的机会。同时,TCR型 SVC装置还可以根据系统需要,输出感性无功容量。TCR型 SVC装置也存在以下不足之处<sup>[5]</sup>:

1) 晶闸管控制电抗器(TCR)本身是一个谐波源,它必需与滤波装置(FC)同时运行,图 1 中的 FC 就是一个滤波装置,滤波装置不仅增加了投资,也增加了占地面积。图 2 是 TCR 工作时的原理接线。

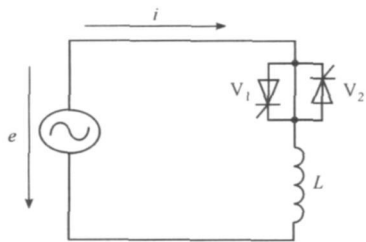


图 2 相控电抗器接线原理  
Fig 2 Wiring principle of phase controlled reactor

2) 由于晶闸管阀与电抗器处于同一电压下,电压高、电流大、功率大,所以需要专门的冷却系统来冷却。在 GB/T 20298—2006 中对冷却系统提出了要求<sup>[6]</sup>。

3) 对于 110 kV 及以上并联电容器组采用 TCR 来调节可能存在一定困难。

## 2 磁阀式可控电抗器 (MCR)

### 2.1 MCR 简介

近年来, MCR 已在我国电力系统中得到实际应用, MCR 与传统的饱和电抗器有所不同,传统的饱和电抗器,由于响应速度慢、噪音大、谐波大等缺点,长期以来没有得到广泛的应用。MCR 的铁心,其中有截面积减小的 1 段,在 MCR 的整个容量调节范围内(从最小到额定容量)只有截面积减小的一段铁心饱和,其余均处于未饱和线性状态,改变截面积小的一段铁心的饱和程度,就能调节 MCR 的容量,这就是“磁阀式”名称的由来。“磁阀”概念的提出大大改善了饱和电抗器在损耗、噪音以及谐波等方面的性能。

与其他可控电抗器一样, MCR 也是借助控制回路直流电流的大小来控制直流磁通来改变铁心饱和度,从而达到平滑调节无功输出的目的。MCR 作为连续可调的无功电源可用于任何电压等级的电网,在 500 kV 电网中已得到实际的应用。

### 2.2 MCR 的工作原理

图 3 为 MCR 的结构原理图(单相)<sup>[7]</sup>。

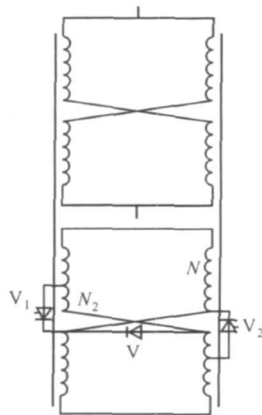


图 3 磁阀式可控电抗器的结构原理图(单相)  
Fig 3 Structure principle of MCR

电抗器的主铁心一分为二,每一半铁心的中部都有一个小截面段。每一半铁心柱上分别对称地绕有匝数相同的绕组,上下两绕组各有一个抽头,其间接有可控硅。不同铁心的上下两个绕组交叉连接后并至电网,续流二极管 V 横跨在交叉端点上。在工频电源的一个周期中,可控硅  $V_1$ 、

$V_2$  轮流导通, 在绕组回路中产生一定大小的直流电流, 通过控制  $V_1$ 、 $V_2$  导通角即可控制直流激磁电流的大小, 改变铁心的饱和度, 从而可以连续、平滑地调节 MCR 输出容量。

### 2.3 MCR 的各项性能

#### 2.3.1 控制性能

MCR 的输出容量可以通过控制可控硅  $V_1$ 、 $V_2$  的导通角来调节, 导通角越小, 直流激磁电流越大, 铁心饱和度越高, MCR 的感抗越小, 基波电流越大, 也就是输出容量越大, 反之亦然。

图 4 为 MCR 的控制特性, 其横坐标为可控硅控制角度, 纵坐标为 MCR 在额定电压下的基波电流幅值相对于额定基波电流幅值的标么值。

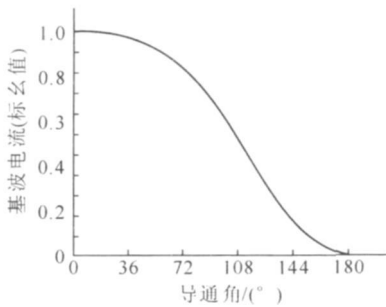


图 4 MCR 的控制特性  
Fig 4 Control characteristic of MCR

#### 2.3.2 伏安特性

MCR 具有较好的线性伏安特性<sup>[56]</sup>, 如图 5 所示, 在一定的导通角下, 其电抗值基本不变。

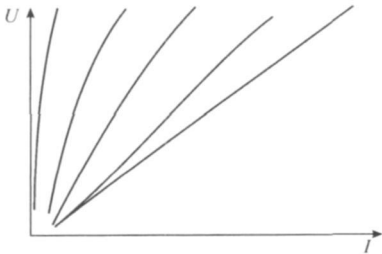


图 5 磁阀式可控电抗器伏安特性  
Fig 5 Volt-ampere characteristics of MCR

#### 2.3.3 MCR 的谐波特性

MCR 具有良好的谐波特性, 其产生的谐波较少, 图 6 示出了在整个容量调节范围内, MCR 产生的谐波电流 (标么值), 基准值为额定基波电流。

由图 6 可知, 其最大 3 次谐波电流为 7% 左右, 5 次为 2.5% 左右, 7 次为 1.3% 左右。

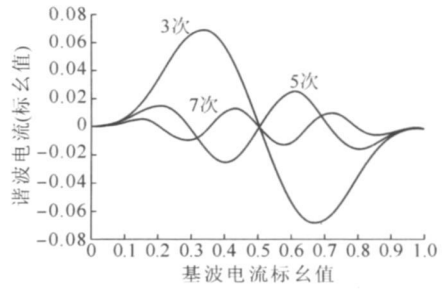


图 6 MCR 谐波电流  
Fig 6 Harmonic current of MCR

MCR 在达到额定磁饱和度极限时, 其所产生的谐波电流大大减少, 这时的最大谐波含有率见表 1 (3 及 3 的倍数次谐波电流由三角形绕组所抑制, 一般不会输出)。

表 1 MCR 最大谐波电流  
Tab 1 Maximum harmonic current of MCR

谐波次数	5	7	11	13	17	19
谐波含有率 / %	1.60	0.86	0.35	0.25	0.15	0.12

#### 2.3.4 MCR 的容量调节速度 (响应时间)

MCR 的容量响应时间约为 300 ms, 图 7 为 MCR 在电压一定时的输出电流 (容量) 从空载增加到额定值的过渡过程波形<sup>[6]</sup>。



图 7 MCR 电流过渡过程  
Fig 7 Current transition process of MCR

### 2.4 用 MCR 来调节无功输出容量

MCR 与并联电容器组共同组成的成套的装置称为 MCR 型 SVC (静止无功补偿装置)。MCR 与变电站的并联电容器组 (或集合式并联电容器) 并联, 共同接于同一补偿母线后, 即可对无功输出容量进行调节。如果该母线上接有谐波源, 则 MCR 同样可与滤波装置 (FC) 并联, 根据系统对无功的需要进行调节。MCR 由于产生的谐波电源电流很小, 本身并不需要滤波装置进行滤波。

图 8 为 MCR 的接线示意图。

MCR 容量的选择应满足该变电站所需的无功负荷的变化容量。当系统的无功需要发生变化时, 不需要投切并联电容器组, 只要控制 MCR 的可控硅的导通角就可以改变流过 MCR 的电流, 也就是改变 MCR 的输出容量, 就能使输出的无功补

偿容量作出相应的变化,从而维持系统的相关参数(母线电压或功率因数)不变。例如当母线电压增大时,可控制导通角减小,流过 MCR 的电流就增大,感性无功输出容量增大,输出的无功补偿容量相应减少,从而维持电压不变,反之亦然。

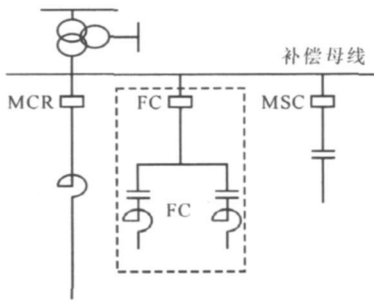


图 8 MCR 的接线示意图  
Fig 8 Wiring diagram of MCR

MCR 与并联电容器组一起组成的静止无功补偿装置 SVC 可以实现从最大容性无功输出到最大感性无功输出的连续调节,实现适时无功就地平衡。

采用 MCR 来调节无功输出容量与其他调节方法相比较:

- 1) 调节无功输出容量时,不会产生过电压。这比分组投切的调节方法有很大的改进。
- 2) 调节无功输出容量是连续、平滑的,可以实现从最大容性无功输出到最大感性无功输出,从而实现适时无功就地平衡。这一点就优于分组投切与调压式电压无功调节装置的调节方法。
- 3) 与 TCR 型 SVC 相比, MCR 产生的谐波电流较小,本身不需要滤波装置,可控硅元件的功率与工作电压仅为电抗器额定功率和电压的 0.5% ~ 1% 左右,不需要专门的冷却系统,具有占地少、可靠性高、损耗小、投资省等优点,容易推广。
- 4) MCR 可以满足某些无功负荷变化较大、且有谐波分量的这类负荷(如电铁牵引站等)的无功容量调节需要,目前已取得较明显的效果。
- 5) MCR 已有 110 kV 及以上电压等级的产品,可以满足目前各种电压等级的无功输出容量调节需要<sup>[7-10]</sup>。

### 3 结论

通过对目前采用的几种无功补偿输出容量的调节方法进行比较与分析,用 MCR 来调节输出容量,具有平滑连续、不产生过电压、投资省、维护简单、且有双向无功补偿等优点,能实现实时无功功率就地平衡的目标,是提高电网电压质量、降低线损等积极有效的技术措施,因此认为,逐步推广采用 MCR 来进行无功补偿容量的调节是适宜的。

### 参考文献:

- [1] 徐晓静,孙明灿,陈庆春.同步关合技术在无功补偿中的应用[J].高压电器,2007,43(5):333-335  
XU Xiaojing, SUN Mingcan, CHEN Qingchun. Application of synchronous closing technology for var compensation[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(5): 333-335
- [2] 金立军,安世超,廖黎明,等.国内外无功补偿研发现状与发展趋势[J].高压电器,2008,44(5):463-465  
JIN Lijun, AN Shichao, LIAO Liming et al. Present situation and development of reactive power compensation both at home and abroad[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(5): 463-465
- [3] 无功补偿装置专家工作组秘书处.提高电容器装置运行可靠性的若干措施[J].无功补偿装置,2001(2):10-23  
Secretariat of the expert panel for var compensation devices. Measures for improving the reliability of capacitor device running[J]. Reactive Power Compensation Device, 2001(2): 10-23
- [4] 陶梅,江钧祥.电容无功补偿装置输出容量方法的改进[A]//电力电容器无功补偿技术论文集(2007年),2007:55-57.  
TAO Mei, JIANG Junxiang. Improvements for capacitor var compensator's capacity output[A]//Proceedings Power Capacitor Var Compensation Technology(2007), 2007: 55-57.
- [5] 唐寅生,曲振军.基于 MCR 的 SVC 及其广阔前景[J].电力电容器,2003(1):1-5  
TANG Yinsheng, QU Zhenjun. MCR-based SVC and its brilliant prospect[J]. Power Capacitor, 2003(1): 1-5
- [6] GB/T 20298-2006 静止无功补偿装置(SVC)功能特性[S]. (下转第 69 页)

荷运行。这对直流的经济运行是一个很大的影响。因此建议增加 1 组 A 型滤波器构成冗余备用。

2) 10 个小组的交流滤波器共有电容 3 140 台, 电抗 54 台, 电阻 30 只, 设备较多, 加之滤波器的运行工况瞬息万变, 靠人工用红外成像仪进行监视滤波器的运行状态既不科学, 也不经济。建议增加 1 套设备在线监测系统, 实现对滤波器运行工况的实时监测。

3) 由于油浸式电容器在爆裂时极易发生火灾, 滤波器没有设计自动灭火系统, 一旦发生火灾, 短时间内无法对其进行灭火, 贻误了处理时间, 会导致事故扩大。建议后续直流工程的滤波器设计中考虑自动灭火系统或者采用 SF<sub>6</sub> 绝缘、单体容量较大的电容器。

#### 参考文献:

- [ 1 ] 浙江大学. 高压直流输电 [ M ]. 北京: 电力工业出版社, 1982
- [ 2 ] 超高压输电公司天生桥局. 兴仁换流站运行规程 [ Z ]. 2009
- [ 3 ] P. Zimmer. GuiGuang II line DC transmission project converter study report [ R ].
- [ 4 ] 赵晓君. 高压直流输电工程技术 [ M ]. 北京: 中国电力出版社, 2004
- [ 5 ] 张杰, 曹继丰, 蒙健明, 等. 兴仁换流站 500 kV SF<sub>6</sub> 断路器异常声响事故分析 [ J ]. 贵州电力技术, 2009, 12(2): 52-54

- [ 6 ] M. Sudā. GuiGuang II line DC transmission project thyristor valve maintenance manual [ Z ].
- [ 7 ] U. Weingarten. GuiGuang II line DC transmission project overpad study report [ R ].
- [ 8 ] 超高压输电公司天生桥局. 天生桥换流站运行规程 [ S ]. 2008
- [ 9 ] 周登洪. 直流输电用并联及交流滤波电容器装置综述 [ J ]. 电力电容器, 2006(1): 5-10  
ZHOU Deng hong. A summary of shunt and AC filtering capacitor installation used in HVDC transmission devices [ J ]. Power Capacitor, 2006(1): 5-10
- [ 10 ] 徐玲玲, 张国威, 王世民, 等. 直流输电换流站电容器运行情况分析及改进措施 [ J ]. 电力电容器, 2007, 28(1): 1-4  
XU Ling ling, ZHANG Guo wei, WANG Shi min, et al. Operation analysis and improvement suggestion for HVDC converter station power capacitors [ J ]. Power Capacitor, 2007, 28(1): 1-4
- [ 11 ] 周登洪, 苏开云, 张欣维. 天生桥——广州直流输电工程并联电容器装置技术改进与运行效果 [ J ]. 电力电容器与无功补偿, 2008, 29(1): 10-12  
ZHOU Deng hong, SU Kai yun, ZHANG Xin wei. Technology improvement and operation effect of shunt capacitor installation for "Tianshengjiao-Guangzhou" HVDC projects [ J ]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2008, 29(1): 10-12
- [ 12 ] P. Zimmer. GuiGuang II line DC transmission project AC filter performance and rating report [ R ].
- [ 13 ] P. Zimmer. GuiGuang II line DC transmission project shunt capacitors report [ R ].

(上接第 22 页)

GB/T 20298-2006 The functional specification of static var compensator [ S ].

- [ 7 ] 刘涤尘, 陈伯超, 田翠华, 等. 新型可控电抗器在电网中的应用与选型分析 [ J ]. 电网技术, 1999, 23(2): 52-56  
LIU Di chen, CHEN Bai chao, TIAN Cui hua, et al. Application and type selection analysis of new type controlled reactor in power system [ J ]. Power System Technology, 1999, 23(2): 54-56
- [ 8 ] 付炜平, 赵京武, 霍春燕. 一起 35 kV 干式电抗器故障原因分析 [ J ]. 2011, 32(1): 59-62  
FU Wei ping, ZHAO Jing wu, HUO Chun yan. Reason analysis for a 35 kV dry type reactor fault [ J ]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2011, 32(1):

59-62

- [ 9 ] 夏长根. 一起 35 kV 干式并联空心电抗器故障分析 [ J ]. 电力电容器与无功补偿, 2009, 29(5): 43-45  
XIA Chang gen. Analysis of fault of a 35 kV dry type air core shunt reactor [ J ]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2009, 29(5): 43-45
- [ 10 ] 刘全峰, 李勤, 姚恩祥. 电容器组串联用干式半铁心电抗器磁场分布特性的研究 [ J ]. 电力电容器与无功补偿, 2010, 30(2): 21-24  
LIU Quan feng, LI Qin, YAO En xiang. Study on the magnetic field distribution of dry type half iron core reactor for series connection of capacitor bank [ J ]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2010, 30(2): 21-24