

# 调相机与静态无功补偿装置的容量配置和协调控制策略

朱宏超<sup>1</sup>, 沈轶君<sup>2</sup>, 熊鸿韬<sup>2</sup>, 徐春建<sup>1</sup>, 王亚婧<sup>1</sup>

(1. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 211106; 2. 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院, 浙江 杭州 310007)

**摘要:**调相机无功响应快、无功调节范围大, 满足高压直流输电系统对动态无功支撑需求大的要求。然而, 调相机稳态无功出力较大时其暂态无功出力会受到限制。在此背景下, 为了充分发挥调相机暂态无功输出能力, 增大其暂态无功调节裕度, 为调相机配置静态无功补偿装置——电容器 & 电抗器(该静态无功补偿装置不是换流站内的滤波器组)。首先, 提出调相机与电容器 & 电抗器的容量配置和协调控制策略。然后, 协调控制使得两类无功补偿装置响应频带错开, 从而充分利用静态无功补偿装置的稳态无功输出能力和调相机的暂态无功支撑能力。最后, 在PSCAD 仿真平台搭建调相机应用于高压直流输电系统的模型, 验证容量配置和协调控制策略的有效性。

**关键词:**调相机; 高压直流输电; 静态无功补偿装置; 容量配置; 协调控制

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2021.06.006 中图分类号:TM711 文章编号:1673-9140(2021)06-0047-09

## Capacity configuration and coordinated control strategy of synchronous condensers and static reactive power compensation devices

ZHU Hongchao<sup>1</sup>, SHEN Yijun<sup>2</sup>, XIONG Hongtao<sup>2</sup>, XU Chunjian<sup>1</sup>, WANG Yajing<sup>1</sup>

(1. NARI Technology Development Co., Ltd., Nanjing 211106, China; 2. Electric Power Science Research Institute, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310007, China)

**Abstract:** Synchronous condenser (SC) has a fast reactive power response and extensive reactive power adjustment range, which is suitable for China HVDC transmission system that has a great demand for dynamic power support. However, when the steady-state reactive power output of the SC is large, its transient reactive power output will be limited. In order to make full use of the SC's transient reactive power output capability and increase its transient reactive power margin, the SC is configured with static reactive power compensation devices—capacitors and reactors, which are different from filter banks in the HVDC converter station. In addition, the SC's capacity configuration and coordinated control strategy with capacitors and reactors are proposed. Coordinated control makes the response frequency bands of two types of reactive power compensation devices different to make full use of the steady-state reactive power output capacity of capacitors and reactors and the SC's transient reactive power supporting capability. Finally, the model of an HVDC transmission system with SCs is constructed on the PSCAD platform, and the effective-

收稿日期:2020-03-29; 修回日期:2020-10-26

基金项目:国网浙江省电力有限公司科技项目(5211DS18002X)

通信作者:朱宏超(1981-),男,硕士,高级工程师,主要从事同步发电机励磁控制及电力电子在电力系统中的应用研究;E-mail:zhu-hongchao@sgepri.sgcc.com.cn

ness of the capacity configuration and coordinated control strategy is verified.

**Key words:** synchronous condenser; HVDC; static reactive power compensation device; capacity configuration; coordinated control

高压直流输电换流站在运行中需要消耗大量无功功率且换流站的无功波动将对直流送受端交流系统的电压稳定性带来较大影响<sup>[1]</sup>。直流换流站需加装无功补偿装置,来实现系统稳态无功平衡和换流站的动态无功支撑。

目前,世界上已有换流站的无功补偿装置主要有三大类:机械投切式电容器和电抗器、静止无功补偿装置、调相机。其中,机械投切式电容器和电抗器经济性最优,是常规换流站最常使用的无功补偿装置,目前常规换流站使用电容器和电抗器组成的滤波器组来补偿换流站的稳态无功需求。换流站在故障情况下,无功需求变化较快,仅由站内滤波器组进行无功补偿,无法满足系统的动态无功需求。针对换流站在故障期间的动态无功需求问题,已有文献研究了换流站配置动态无功补偿装置。文献[2]利用 SVC 实现换流站无功的动态支撑,进一步研究了特高压直流换流站中 SVC 和滤波器组的协调控制;文献[3]提出了一种基于 STATCOM 和电容器组相互协调的多模式协调控制策略。虽然 SVC 和 STATCOM 具备在一定范围调节无功输出、抑制电压波动的能力,但并网点电压过低时 SVC 和 STATCOM 的无功输出反而减少,存在进一步恶化系统电压的风险,且 SVC 在运行过程中产生的谐波含量较大。文献[4-5]比较了新一代大容量调相机与目前电网中应用较多的 SVC、STATCOM 的差异。对比分析结果表明,新一代调相机作为同步旋转设备具有更强的动态无功支撑能力与暂态电压调节能力,更适合于中国当前高压直流工程输送容量大的电网结构特点。

综合考虑调相机和其他无功补偿装置的性能和经济性,采用调相机配置电容器组和电抗器组的策略,从而满足换流站稳态和动态的无功需求。换流站无功补偿装置的容量配置原则和协调控制策略是根据控制目标来确定的。文献[6]以动态无功补偿效果和成本为目标函数,建立降低直流换相失败风险的动态无功配置优化模型,来优化无功补偿装置

的类型和安装容量;文献[7]提出一种暂态电压稳定评价指标,并以最小化该指标为目标函数确定调相机配置容量。文献[6-7]主要关注的是调相机的容量配置,没有考虑换流站无功补偿装置在运行时的协调控制,而且仅关注了直流换相失败这一工况,未考虑稳态电压情况;文献[8]提出了调相机与特高压直流换流站交流滤波器的一种稳态无功功率协调控制策略,直流控制系统调用调相机稳态无功容量的一部分与换流站交流滤波器配合进行无功功率平衡控制,充分发挥了调相机的无功补偿作用;文献[9]针对配置了新一代调相机的高压直流送端系统,以抑制送端电网暂态过电压、减小事故后稳态电压越限水平以及减少换流变分接开关动作次数为目标,制定换流站无功协调控制策略。

该文针对高压直流输电换流站动态无功补偿问题,为高压直流换流站中调相机配置电容器和电抗器,基于此分析调相机及无功补偿装置的配置和协调原理;进一步提出相应的容量配置和协调控制的策略;最后,在 PSCAD 仿真平台搭建高压直流输电系统,进行算例仿真,验证该文提出的策略在稳态和暂态无功补偿上相对于调相机传统无功补偿策略的优越性。

## 1 调相机配置静态无功补偿装置的原理分析

随着电网跨区输送容量不断提升,交直流之间相互影响的特征愈加显著。有别于传统交流电网,交直流电网呈现出动态无功支撑不足的特征。针对当前高压直流输电系统中的问题,可以归纳出直流换流站对动态无功补偿装置的需求:毫秒级无功响应能力;长时间、大容量的无功输出能力。

新型调相机具有快速的瞬时无功支撑能力,作为同步旋转设备,与电网电磁耦合,在电压突变时,能够根据电压状况产生几乎无延时的自发无功响应。根据某新型调相机单机无穷大系统的仿真结

果,调相机在暂态和稳态的无功出力特性(标么值)如图 1 所示,可以看出,新型调相机在电压跌落瞬间,产生自发无功响应,暂态过程中电压强迫励磁倍数大,能在系统故障期间迅速输出大量无功功率,起到对系统电压的支撑作用。

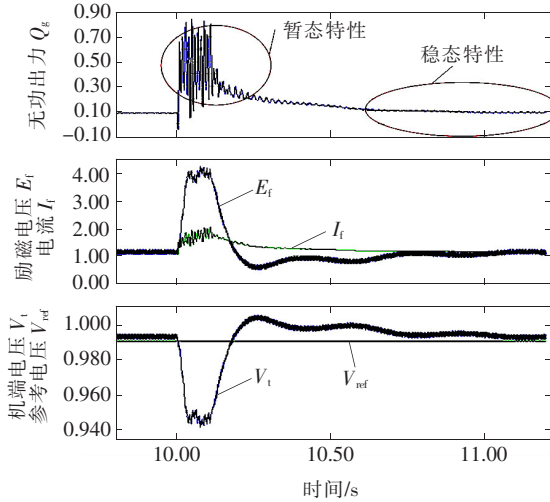


图 1 调相机的响应特性

Figure 1 Response characteristics of the SC

调相机的电气相量如图 2 所示,  $U$  为调相机升压变高压侧电压,  $U_t$  为机端电压,  $\delta$  为功角, 则  $U_d = U \sin \delta$ ,  $U_q = U \cos \delta$ 。调相机升压变短路电抗为  $X_k$ ,  $X_d$ 、 $X_q$  分别为  $d$ 、 $q$  轴同步电抗,  $E_Q$ 、 $E_q$  分别为  $q$  轴虚拟、感应电动势,  $I_d$ 、 $I_q$  分别为定子电流  $I$  的  $d$ 、 $q$  轴分量。

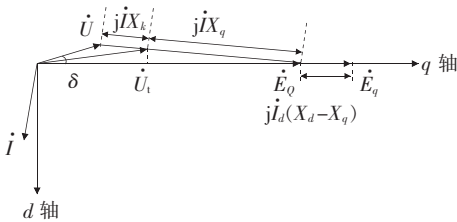


图 2 调相机的电气相量示意

Figure 2 Electrical phasor diagram of the SC

根据调相机动态特性<sup>[10]</sup>,调相机向系统输出的无功功率:

$$Q = U_q i_d - U_d i_q \quad (1)$$

调相机从电网吸收的有功功率仅用于克服机械摩擦转矩和定转子损耗,运行时通常不大于 1.4%, 因此,  $\delta \approx 0$ ,  $U_d \approx 0$ ,  $U_q \approx U$ 。调相机输出的无功功率可简化为

$$Q \approx U_q i_d \approx U i_d \quad (2)$$

系统故障时的高压侧母线电压变化量为  $\Delta U$ , 故障后的母线电压为  $U$ , 则故障时的调相机的无功输出增量为

$$\begin{aligned} \Delta Q &= Q - Q_0 = U i_d - U_0 i_{d0} \approx \\ &(U_0 + \Delta U)(i_{d0} + \Delta i_d) - U_0 i_{d0} = \\ &U \Delta i_d + \Delta U i_{d0} \end{aligned} \quad (3)$$

其中,  $d$  轴电流增量  $\Delta i_d$  与调相机参数密切相关,  $d$  轴电流初始值  $i_{d0}$  与故障前调相机的初始工况即稳态无功输出量有关。当电压跌落时,  $\Delta U < 0$ , 此时  $i_{d0} > 0$ , 调相机输出无功功率, 式(3)中的  $\Delta U i_{d0}$  会减少无功输出, 因此, 当  $i_{d0}$  越接近于 0 时, 越有利于调相机向系统提供滞相无功支撑。

因此, 综合考虑无功补偿需求和经济性, 采用机械投切式电容器、电抗器作为静态无功补偿装置, 置换调相机的稳态无功输出, 提升其暂态无功支撑能力。电容器和电抗器成本较低, 响应速度较慢, 无法连续调节无功出力, 投切过程中可能会造成电压波动, 其无功出力随着电压降低或升高而平方倍波动<sup>[11]</sup>。

调相机与电容器 & 电抗器的配置和协调方案, 需综合考虑 2 种无功补偿装置的无功出力特性, 以直流输电换流母线交流电压平稳为控制目标, 进行无功补偿装置的容量配置和协调控制。调相机与电容器 & 电抗器控制作用的时间尺度分析如图 3 所示。在暂态过程中, 主要由调相机进行无功补偿; 在稳态过程中, 电容器和电抗器起无功补偿的主要作用。

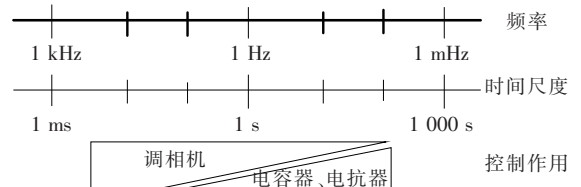


图 3 调相机与电容器 & 电抗器控制作用的时间尺度分析

Figure 3 Time scale analysis of the control effect of the SC with capacitors and reactors

直流输电的送端和受端交流系统发生短路故障时, 交流电压会迅速跌落。为了维持电压稳定, 此时直流换流站需要快速且大量的无功功率支撑。基于调相机和电容器、电抗器的无功出力特性, 在短路故障期间, 尽可能发挥调相机的暂态无功支撑能力, 避免直流换流站发生换相失败等严重故障。

为了保证调相机在暂态发挥最大无功出力,需留有稳态无功裕度。调相机没有对换流站滤波器组的控制权,所以给调相机配置电容器、电抗器,使其稳态无功出力可以部分置换到电容电抗器的无功出力上,减少调相机的稳态无功分配量。同时,换流站的滤波器组投切对无功的调整量是非连续的,会带来调整后电压与目标值的偏差,目前,直流系统的常规做法是通过换流站控制变化来消除该偏差。若采用调相机来提供连续无功补偿,可以使整流器触发角和逆变器关断角维持不变,有利于直流系统稳定运行。调相机和电容器 & 电抗器的接线如图4所示。通过无功补偿装置在稳态和暂态的配合,灵活地给系统提供无功支撑,维持直流输电系统交流电压稳定。

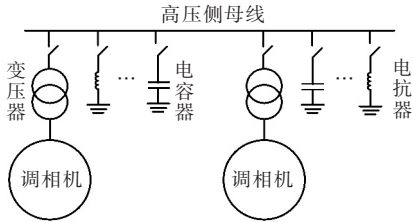


图4 调相机和静态无功补偿装置的接线示意

Figure 4 Wiring diagram of SCs with capacitors and reactors

## 2 调相机与静态无功补偿装置的容量配置

国网公司为解决高压直流输电提出推广的新型调相机较传统调相机有巨大的变化,经全新设计后的额定容量达300 MVar,这也是国内可生产的单机最大容量。选用该新型调相机,单台额定容量为300 MVar。调相机的容量配置主要考虑故障情况下调相机瞬时无功支撑能力和直流输电系统的动态无功需求的匹配。

文献[10]给出了调相机在机端短路故障下无功电流的瞬时增量公式:

$$\Delta i_d = \frac{\Delta U}{X_d'' + X_k} \quad (4)$$

结合式(3)可得电网故障时调相机的瞬时无功:

$$\Delta Q = \frac{-U\Delta U}{X_d'' + X_k} + \Delta U i_{d0} \quad (5)$$

式中  $X_d''$  为调相机  $d$  轴次暂态电抗;  $X_k$  为调相机升压变短路电抗。

文献[12]给出了直流动态无功需求峰值的快速近似计算方法,根据公式可以得到故障下逆变器的动态无功需求  $Q_{di}$ , 即

$$Q_{di} = 1.35nE_i \cdot (k_2 \cos \alpha_i + k_3 k_5 I_{d,s} I_{d,base} - k_3 \cos \gamma_{ref}) \cdot \sqrt{1 - \left( \frac{k_5 I_{d,s} I_{d,base} - 2 \cos \alpha_i}{2} \right)^2} \quad (6)$$

进而求出换流站在故障下的动态无功需求峰值  $Q_{max}$ 。式(6)中的参数均可通过系统参数计算得到。

假设逆变器动态无功需求被完全补偿,逆变器无功需求稳态值为  $Q_{ds}$ , 则调相机的安装容量的上限为

$$Q_{SCmax} = Q_{max} - Q_{ds} \quad (7)$$

该文采用的调相机容量计算公式不需要搭建复杂的仿真模型即可确定调相机配置台数  $N$ 。

电容器、电抗器的容量配置需考虑多个方面。

1) 为了减小换流站内滤波器组不连续无功投入带来的电压冲击和静态误差,初步设定电容器总容量  $Q_C$  和电抗器总容量  $Q_R$  均为略大于换流站内单个滤波器组容量  $Q_{filter}$  的一半,即

$$\begin{cases} Q_C = \frac{1}{2} Q_{filter} + Q_{\Delta} \\ Q_R = \frac{1}{2} Q_{filter} + Q_{\Delta} \end{cases} \quad (8)$$

$Q_{\Delta}$  为电容器和电抗器的无功裕度,该容量选取使得调相机平滑滤波器组不连续无功后的稳态输出能够转移到电容器或电抗器上,同时留有适当裕度,避免换流站内滤波器组的频繁投切。

2) 考虑直流输电系统的运行方式。当直流大功率运行时,由于电容器、电抗器将补偿换流站滤波器不连续无功补偿的偏差,  $N$  台调相机允许输出的最大稳态无功功率仅需为电容器容量的一半,允许吸收的最大稳态无功功率仅需为电抗器容量的一半。当直流大功率运行时,单台调相机允许输出无功功率  $Q_{SC}$  的范围为

$$|Q_{SC}| \leq \frac{1}{4N} Q_{filter} + \frac{1}{2N} Q_{\Delta} \quad (9)$$

当直流小功率运行时,需要考虑直流输电系统



最小直流功率方式运行时最小滤波器组提供的过剩的无功。最小滤波器组是为满足滤波性能要求最少需要投入的滤波器数量,其容量约占换流容量的 30%。由于小功率运行时,直流换相失败不会造成系统大的有功缺额,这也降低了换流站动态无功需求,因此充分发挥调相机稳态无功吸收能力。设定单台调相机允许吸收的最大稳态无功功率为 100 MVar(单台调相机额定进相能力为 150 MVar),允许输出的最大稳态无功功率仍然为  $\frac{1}{4N}Q_{\text{filter}} + \frac{1}{2N}Q_{\Delta}$ 。当直流小功率运行时,单台调相机允许输出无功功率  $Q_{\text{sc}}$  的范围为

$$-100 \leq Q_{\text{sc}} \leq \frac{1}{4N}Q_{\text{filter}} + \frac{1}{2N}Q_{\Delta} \quad (10)$$

如果调相机进相运行吸收的无功功率能够消除最小

直流功率方式运行时的过剩无功,则不再调整电抗器组的容量,否则适当增大电抗器组的容量。

### 3 调相机与静态无功补偿装置的协调控制

为了实现稳态无功控制和暂态无功控制多个控制目标,该文提出的调相机和无功补偿装置的协调策略,综合考虑稳态无功控制和暂态无功控制两方面,通过设计调相机励磁 AVR 控制和静态无功补偿装置控制的控制方式和控制参数,实现两者控制的工作频带在高频(对应暂态性能)和低频(对应稳态性能)上相互错开。协调控制框图如图 5 所示。调相机静止励磁 AVR 控制和静态无功补偿装置控制均以系统电压和其电压设定值的偏差为输入。

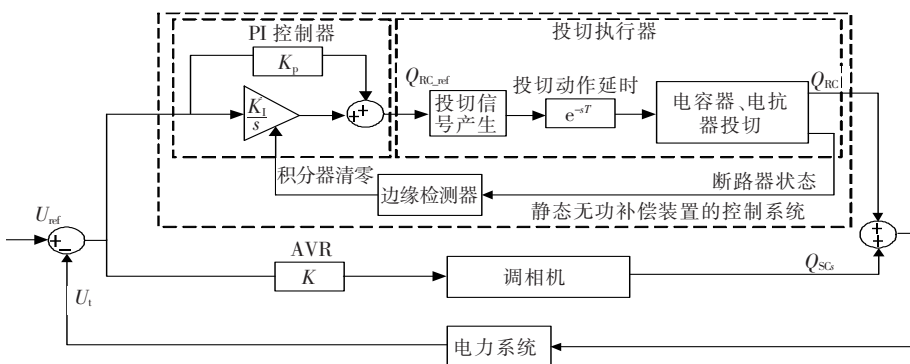


图 5 调相机与静态无功补偿装置的协调控制策略示意

Figure 5 Coordinated control strategy's principle of SCs with static reactive power compensation devices

静态无功补偿装置的控制分为两部分:静态无功补偿装置的电压偏差控制;静态无功补偿装置的投切执行器。静态无功补偿装置的电压偏差控制设置为 PI 环节,系统电压偏差量经过 PI 环节得到需要电容器和电抗器补偿的无功功率为  $Q_{\text{RC\_ref}}$ 。根据容量配置原则得到需配置  $m$  台容量相等的电容器,总容量为  $Q_C$ ,  $n$  台容量相等的电抗器,总容量为  $Q_R$ 。电容器和电抗器投切信号产生逻辑:当  $Q_{\text{RC\_ref}} \geq Q_C/m$  时,若有电抗器已投入,则切除一台电抗器,否则投入一台电容器;当  $Q_{\text{RC\_ref}} \leq -Q_R/n$  时,若有电容器投入,则切除一台电容器,否则投入一台电抗器。当边缘检测器检测到电容器或电抗器的断路器动作时,边缘检测器产生脉冲信号,使 PI

控制回路的积分器清零,避免积分值累加导致断路器频繁动作。在电压偏差输入后添加非线性增益环节,使得当电压偏差小于允许范围内时,PI 控制的输入为 0,避免当电压偏差达到要求时,PI 控制输出仍然存在,并逐渐增大,最终导致电容器、电抗器频繁投切。由于电容器充放电以及断路器投切均需要一定时间,投切信号产生后,经过一定时长的延时后,断路器投切开始动作。

调相机控制系统包括励磁 AVR 控制和调相机电机系统两部分。设置 AVR 为比例环节,系统电压偏差量经过比例环节输出需要调相机提供的无功功率,经过调相机电机系统作用输出无功功率。静态无功补偿装置输出的无功功率  $Q_{\text{RC}}$  和调相机输出

的无功功率  $Q_{SCs}$  共同作用于电力系统,从而调节系统母线电压。

通过设置合理的控制参数,协调控制使得当输入电压偏差处于稳态或暂态时,电容器、电抗器和调相机控制特性有明显差异,利用该差异实现2种无功补偿装置在稳态和暂态的协调控制。根据系统的动态无功需求,毫秒级和秒级的暂态无功需求主要由调相机承担,长时间的稳态无功需求主要由电容器、电抗器承担。根据无功需求的时间尺度,设计控制器的频域特性。在高频段,调相机励磁 AVR 控制的响应性能应明显强于电容器和电抗器 PI 控制,由此设定 1 Hz 处调相机控制幅频特性幅值比电容器和电抗器控制高约 20 dB。在低频段,电容器和电抗器 PI 控制的响应性能应明显强于调相机 AVR 控制,由此设定  $10^{-2}$  Hz 处电容器和电抗器控制幅频特性幅值比调相机控制高约 20 dB。调相机励磁控制 AVR 和静态无功补偿装置 PI 控制的伯德示意如图 6 所示。

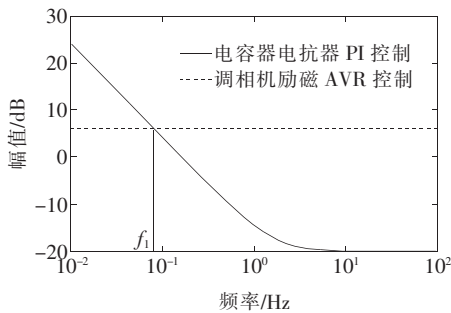


图 6 调相机励磁 AVR 控制和电容器、电抗器控制的伯德示意

Figure 6 Bode diagrams of the AVR control of SCs and the control of capacitors and reactors

#### 1) 稳态无功控制特性。

根据图 6,当频率小于  $10^{-2}$  Hz 时,电容器、电抗器 PI 控制伯德图幅值远大于调相机 AVR 控制伯德图幅值。当换流母线电压偏离换流站目标控制电压时,稳态无功补偿主要由电容器和电抗器提供。由于调相机励磁系统此时处于电压控制,不主动更改其此时的无功输出,电容器、电抗器投切后的无功稳态偏差自动由调相机来平滑。同时,调相机能够减小电容器、电抗器投切过程带来的电压波动。

#### 2) 暂态无功控制特性。

根据图 6,当频率大于 1 Hz 时,电容器、电抗器 PI 控制伯德图幅值远小于调相机 AVR 控制伯德图幅值,此时主要由调相机来补偿系统暂态无功缺额。暂态无功控制应用于换流母线电压出现快速大幅度波动的工况。暂态控制模式下,调相机根据系统的暂态无功缺额,自动调节无功输出,充分发挥其无功支撑能力,避免直流系统出现换相失败或者直流闭锁等故障。

## 4 仿真算例研究

### 4.1 算例系统

该文算例仿真系统为高压直流输电系统。在 PSCAD 软件中搭建 HVDC 输电系统模型。送端交流系统的额定电压为 330 kV,受端交流系统的额定电压为 500 kV。换流站均采用 12 脉波的整流桥即双桥串联结构,直流双极运行额定容量为 4 000 MW,直流额定电压为  $\pm 660$  kV。整流侧采用带有最小触发角限值的定电流控制,逆变侧采用定熄弧角控制。整流站内和逆变站内均接有滤波器组提供换流站稳定运行时的无功补偿。

为了验证该文提出的调相机与静态无功补偿装置容量配置方法和协调控制策略的优越性,对无功补偿方案在受端交流系统短路故障工况下的控制性能进行对比分析。

1) 采用调相机作为无功补偿装置。换流站仅配置调相机进行无功补偿。

2) 采用调相机与静态无功补偿装置协调控制策略。换流站配置容量合理的调相机和电容器 & 电抗器,采用该文设计的协调控制策略。

### 4.2 直流换流站无功需求分析

直流受端交流系统短路故障导致逆变侧换流母线电压降低进而导致直流换相失败是直流输电系统最常见的故障之一。该文设置直流系统逆变侧 5 s 时发生短路故障,持续时间 100 ms。仿真运行期间,换流变压器分接头不参与调节。故障前、后换流站逆变侧交流母线电压波动曲线如图 7 所示。稳态时逆变侧交流母线电压较额定电压偏低,需要稳态无功补偿,额定电压为 1.000 p. u.,稳态运行电压

为 0.980 p. u.;故障期间,电压大幅度跌落,最低跌落至 0.650 p. u.,故障期间需要快速和大量的动态无功支撑;7 s 时电压恢复至稳态电压。

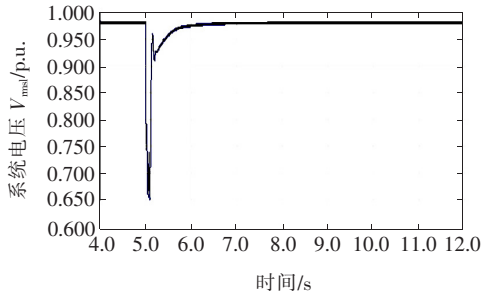


图 7 故障期间换流站交流电压波动曲线

Figure 7 AC voltage fluctuation curve of converter station during fault

#### 4.3 仅应用调相机的无功补偿效果分析

在短路故障工况下,在逆变侧换流站应用 2 台新型调相机,由调相机进行稳态和动态无功补偿,仿真结果如图 8 所示。

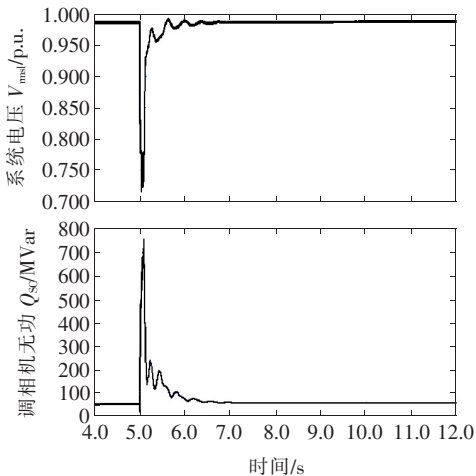


图 8 换流站交流电压和调相机无功出力曲线  
(加调相机)

Figure 8 AC voltage fluctuation curve of converter station and reactive power output of SC (with SC)

由图 8 可知,在故障前,稳态时 2 台调相机输出无功功率 47.483 MVar,逆变侧交流母线稳态电压由文 4.2 中的 0.980 提升至 0.984 p. u.;在故障期间,调相机提供瞬时无功电压支撑,无功出力是稳态无功出力的数倍,2 台调相机无功出力最大为 753.414 MVar,使得电压跌落最低值由 0.650 增大至 0.715 p. u.,跌落程度减小了 0.065 p. u.;在故

障恢复后,调相机的稳态无功输出为 51.907 MVar,与故障前调相机的稳态无功出力基本相同。6.6 s 时电压恢复稳定,相较于安装调相机前电压恢复时间缩短了 0.4 s。

#### 4.4 应用调相机与静态无功补偿装置的无功补偿效果分析

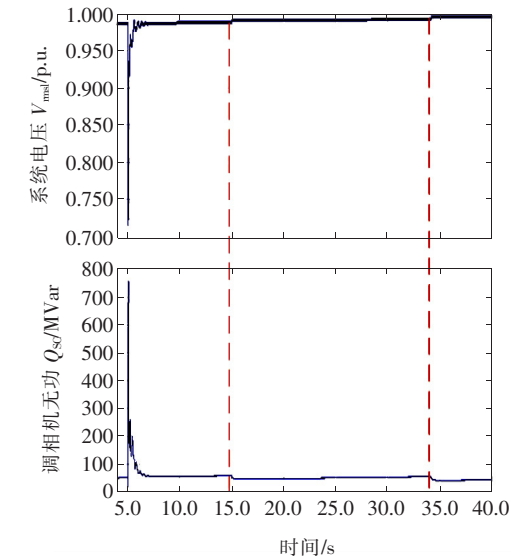
在短路故障工况下,应用调相机与静态无功补偿装置容量配置和协调控制策略,由调相机和电容器、电抗器提供无功补偿。

根据容量配置原则式(5)计算出单台调相机瞬时无功出力为 781 MVar(假设  $\Delta U=0.5$  p. u.,  $i_{d0}=0$  p. u.)。根据式(6)计算出直流逆变站动态无功需求峰值为 4 092 MVar,逆变站稳态无功需求为 1 866 MVar,则换流站无功被完全补偿时动态无功需求量为 2 226 MVar。综合考虑调相机的经济性和无功补偿效果,直流输电系统受端配置 2 台 300 MVar 新型调相机。逆变站内滤波器组单组容量为 150 MVar,配置电容器组(2 台)总容量为 80 MVar,电抗器组(2 台)总容量为 80 MVar,经计算可以满足直流大功率和小功率运行要求。

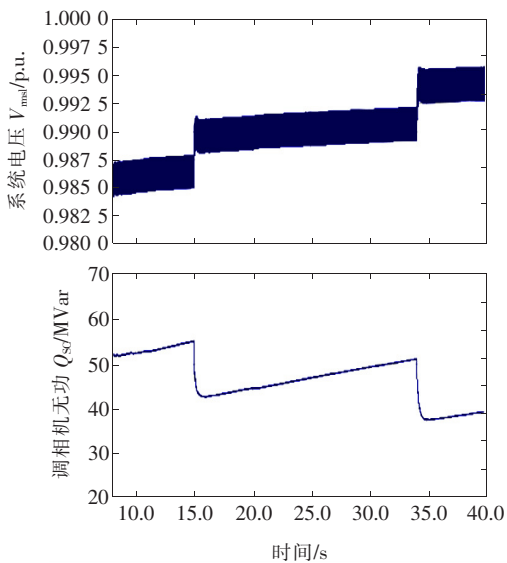
根据协调控制策略原理,设置静态无功补偿装置 PI 控制参数  $K_P=2$ ,  $K_I=100$ ,调相机励磁 AVR 控制参数  $K=60$ ,经过验证,2 种无功补偿装置控制的频域特性在稳态和暂态上相互错开。

仿真结果如图 9 所示,故障期间调相机提供瞬时无功支撑,输出大量无功功率,减小电压跌落程度;故障消除后系统逐渐稳定,通过协调控制策略,稳态时电容器和电抗器参与无功平衡,14.98、34.13 s 时系统各投入一台 40 MVar 的电容器,此时调相机的大部分稳态无功出力转移到由电容器承担,电容器组输出无功功率 80 MVar,调相机稳态无功输出相应减小。同时,电容器的投入使得逆变侧交流母线稳态电压由 0.984 提高至 0.995 p. u.,与额定电压的偏差减小了 0.011 p. u.。

仿真中协调控制实现目标:调相机提供瞬时无功支撑,减小了故障期间电压跌落程度;减小了调相机稳态无功出力,为调相机下一次暂态无功输出留有较大裕度;减小了母线电压稳态偏差。通过时域



(a)故障前、后全过程(0~40 s)



(b)故障恢复后过程(7.5~40 s)

图9 换流站交流电压波动曲线和调相机无功出力  
(加调相机和电容器、电抗器)

Figure 9 AC voltage fluctuation curve of converter  
station and reactive power output of SC  
(with SC, capacitors and reactors)

仿真,验证了调相机和静态无功补偿装置的协调控制策略能够实现该文提出的稳态和暂态的无功控制目标,相对传统无功补偿策略具有优势。

## 5 结语

根据调相机和静态无功补偿装置的无功出力特性及直流换流站的无功需求特性,为调相机配置电容

器和电抗器,进行调相机与电容器 & 电抗器的容量配置,确定调相机在直流不同运行方式下的输出范围,提出了调相机与电容器 & 电抗器的协调控制策略,并设定控制参数使得两类无功补偿装置在稳态响应和暂态响应上相互配合。仿真结果表明,该文提出的调相机与静态无功补偿装置的容量配置与协调控制策略,实现了暂态时调相机发挥主要无功补偿作用,稳态时电容器和电抗器参与无功调节的目标,能够转移调相机的稳态无功出力,充分发挥调相机的暂态无功支撑能力,减小母线电压的稳态偏差,改善事故后稳态电压水平,适应于高压直流输电换流站的动态无功需求特点。

## 参考文献:

- [1] 苏海林,朱林,高琴,等.基于换流母线视角的交直流系统交互无功功率动态特性分析[J].电力科学与技术学报,2017,32(2):126-133.  
SU Hailin,ZHU Lin,GAO Qin,et al. Dynamic reactive power analysis of AC/DC systems based on the perspective of converter buses[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2017,32(2):126-133.
- [2] 熊红德.特高压直流输电换流站中的 SVC 控制策略[D].广州:华南理工大学,2012.
- [3] 李祖明,徐光福,陈俊,等.大型光伏电站快速无功控制系统研制及应用[J].中国电力,2020,53(3):177-184.  
LI Zuming,XU Guangfu,CHEN Jun,et al. Development and application of fast reactive power control system for large-scale PV power plant[J]. Electric Power,2020,53(3):177-184.
- [4] 金一丁,于钊,李明节,等.新一代调相机与电力电子无功补偿装置在特高压交直流电网中应用的比较[J].电网技术,2018,42(7):2095-2102.  
JIN Yiding,YU Zhao,LI Mingjie,et al. Comparison of new generation camera and power electronic reactive power compensation device in UHV AC/DC power grid [J]. Power System Technology, 2018, 42 ( 7 ) : 2095-2102.
- [5] 索之闻,刘建琴,蒋维勇,等.大规模新能源直流外送系统调相机配置研究[J].电力自动化设备,2019,39(9):



- 124-129.
- SUO Zhiwen, LIU Jianqin, JIANG Weiyong, et al. Research on camera tuning configuration of large-scale new energy DC delivery system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(9): 124-129.
- [6] 周仕豪. 多馈入直流系统动态无功补偿优化研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2018.
- [7] 张潮. 多直流馈入系统动态无功优化配置研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.
- [8] 孙巍峰, 崔晨, 周晓风, 等. 调相机与特高压直流换流站交流滤波器的协调控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(7): 182-187.
- SUN Weifeng, CUI Chen, ZHOU Xiaofeng, et al. Coordinated control strategy for synchronous condenser and AC filter in UHVDC converter station[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(7): 182-187.
- [9] 刘增训, 李晓飞, 刘建琴. 含调相机的高压直流送端换流站无功协调控制策略研究[J]. 电网技术, 2020, 44(10): 3857-3865.
- LIU Zengxun, LI Xiaofei, LIU Jianqin. HVDC converter station reactive power coordinated control strategy with synchronous condenser[J]. Power System Technology, 2020, 44(10): 3857-3865.
- [10] 李志强, 蒋维勇, 王彦滨, 等. 大容量新型调相机关键技术参数及其优化设计[J]. 大电机技术, 2017(4): 15-22.
- LI Zhiqiang, JIANG Weiyong, WANG Yanbin, et al. Key technical parameters and optimization design of large capacity new camera[J]. Large Electric Machine Technology, 2017(4): 15-22.
- [11] 时鑫. ±660 kV 直流输电系统换流站无功补偿方案优化设计与仿真[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2013.
- [12] 夏成军, 蓝海文, 杜兆斌, 等. HVDC 逆变器动态无功需求峰值的快速近似计算[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2017, 45(4): 8-14+29.
- XIA Chengjun, LAN Haiwen, DU Zhaobin, et al. Fast approximate calculation of peak dynamic reactive power demand of HVDC inverter[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2017, 45(4): 8-14+29.
- 
- (上接第39页 Continued from page 39)
- [15] 李文芮. 电力系统未来发展形态的综合评价体系研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2019.
- [16] Paolo C, Vito L, Massimo M. Model for cascading failures in complex networks[J]. Physical Review E, 2004, 69(4): 045104.
- [17] Vito L, Massimo M. Efficient behavior of small-world networks[J]. Physical Review Letters, 2001, 87(19): 198701.
- [18] Karakis H, Chedid R B, Ramadan R. Probabilistic performance assessment autonomous solar-wind energy conversion systems[J]. IEEE Transactions Energy Conversion, 1999, 14(3): 766-772.
- [19] 李志铿, 王钢, 杨掌林, 等. 计及故障重构的含分布式电源配电网可靠性评估[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(17): 1-6.
- LI Zhikeng, WANG Gang, YANG Zhanglin, et al. Reliability evaluation for distribution system with distributed generations considering reconfiguration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(17): 1-6.
- [20] 王睿. 考虑不确定性因素的配电网运行风险评估[D]. 长沙: 湖南大学, 2017.
- [21] Li J, Fang J, Zeng Q, et al. Optimal operation of the integrated electrical and heating systems to accommodate the intermittent renewable sources[J]. Applied Energy, 2016, 167(10): 244-254.
- [22] 黄伟军, 钱远驰, 吕志来. 闭环运行方式城市配电网接线模式的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(24): 123-127.
- HUANG Weijun, QIAN Yuanchi, LV Zhilai. Research of city distribution network layouts for closed-loop system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(24): 123-127.