

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.250735

调相机参与特高压直流换流站无功控制策略研究

艾红杰¹, 黄金海¹, 靳红杰², 王祺元¹, 连耀盛¹, 李志阳¹, 秦家林¹

(1. 许继电气直流输电公司, 河南 许昌 461000; 2. 中建八局第一建设有限公司, 山东 济南 250000)

摘要: 换流器在运行过程中, 其所消耗的无功功率主要由交流滤波器和并联电容器提供。调相机作为直流换流站配套无功补偿设备的一种, 主要承担对换流站的动态无功支撑功能。然而, 目前调相机基本处于独立运行状态, 未参与换流站稳态无功控制, 导致在稳态运行过程中换流站无功功率均由配套的交流滤波器(包含并联电容器)提供。为此, 提出一种调相机参与特高压直流换流站稳态无功控制策略, 明确了调相机参与换流站无功控制的约束条件、二者之间的连接方式和交互数据, 详细阐述了控制策略。通过仿真试验验证了所提策略的有效性。结果表明, 该策略能够动态减少系统交换无功, 实现系统无功平衡, 同时能够减少滤波器投切次数, 延长交流滤波器使用寿命。最后, 对当前控制策略的进一步优化方向提出了建议。

关键词: 直流换流站; 调相机; 约束条件; 协调控制; 无功平衡

Reactive power control strategy for synchronous condenser in HVDC converter station

AI Hongjie¹, HUANG Jinhai¹, JIN Hongjie², WANG Qiyuan¹, LIAN Yaosheng¹, LI Zhiyang¹, QIN Jialin¹

(1. DC Transmission Company of XJ Electric Co., Ltd., Xuchang 461000, China; 2. The First Company of China Eighth Engineering Bureau Ltd., Jinan 250000, China)

Abstract: The reactive power consumed by converters during operation is mainly provided by AC filters and shunt capacitors. As a supporting reactive power compensation device in HVDC converter stations, synchronous condensers mainly provide dynamic reactive power support. However, at present, synchronous condensers generally operate independently and do not participate in the steady-state reactive power control of converter stations. As a result, under steady-state conditions, the reactive power demand of converter stations is entirely supplied by the associated AC filters (including shunt capacitors). To address this issue, this paper proposes a strategy for synchronous condensers to participate in steady-state reactive power control of UHVDC converter stations. The constraint conditions for synchronous condenser participation, the connection configuration, and the interactive data exchange between the synchronous condenser and the converter station are clearly defined. The coordinated control strategy for integrating synchronous condensers into the station's reactive power control framework is elaborated in detail. Simulation results verify the effectiveness of the proposed strategy. The findings show that the strategy can dynamically reduce reactive power exchange with the system, achieve reactive power balance, decrease the switching frequency of AC filters, and thereby extend their service life. Finally, potential directions for further optimization of the current control strategy are discussed.

This work is supported by the Key Research and Development Project of Henan Province (No. 231111240100).

Key words: HVDC converter station; synchronous condenser; constraint conditions; coordinated control; reactive power balance

0 引言

当今我国特高压直流发展迅速, 已建成数十条直流线路^[1-4], 特高压换流器在工作过程中需要消耗大量无功, 从无功需求角度分析, 换流器无功消耗占输送功率的40%~60%^[5-9]。根据无功补偿“分层

分区、就地平衡”的原则, 换流站的无功需求必须就地满足; 换流站的无功补偿装置可分组投切运行, 以适应各种直流运行方式。常规做法是在换流站配置足够数量和种类的交流滤波器组, 以满足换流站无功需求^[10-12]。

新一代大容量调相机既能为系统提供短路容量, 又具有更好的无功出力特性, 在降低直流送端暂态过电压、抑制直流受端换相失败、利用强励提

基金项目: 河南省重点研发专项资助(231111240100)

高系统稳定性等方面具备独特优势^[13-15], 目前在众多直流换流站均有配置。

但目前调相机应用研究多集中于抑制直流换相失败、紧急协调控制、为直流换流站提供动态无功支撑等方面, 主要解决系统故障扰动下的无功需求及响应问题, 其与直流换流站稳态无功控制之间并无协调, 调相机挂网运行与直流系统无功交换基本为 0, 未能充分发挥新一代调相机可动态平滑实现无功控制的优势。

本文考虑将调相机纳入换流站稳态无功控制范围, 调相机在保持一定的无功储备基础上, 协调换流站无功控制。通过调相机进相和迟相运行, 动态线性调整无功输出, 以保持系统交换无功平稳, 降低滤波器投切对交流电网的冲击, 在逆变侧降低换相失败的几率, 同时减少滤波器投切次数, 提高滤波器利用率。

1 换流站工程无功控制基本策略

图 1 为特高压直流控制系统工程无功控制总体逻辑框图, 基本控制功能描述如下。

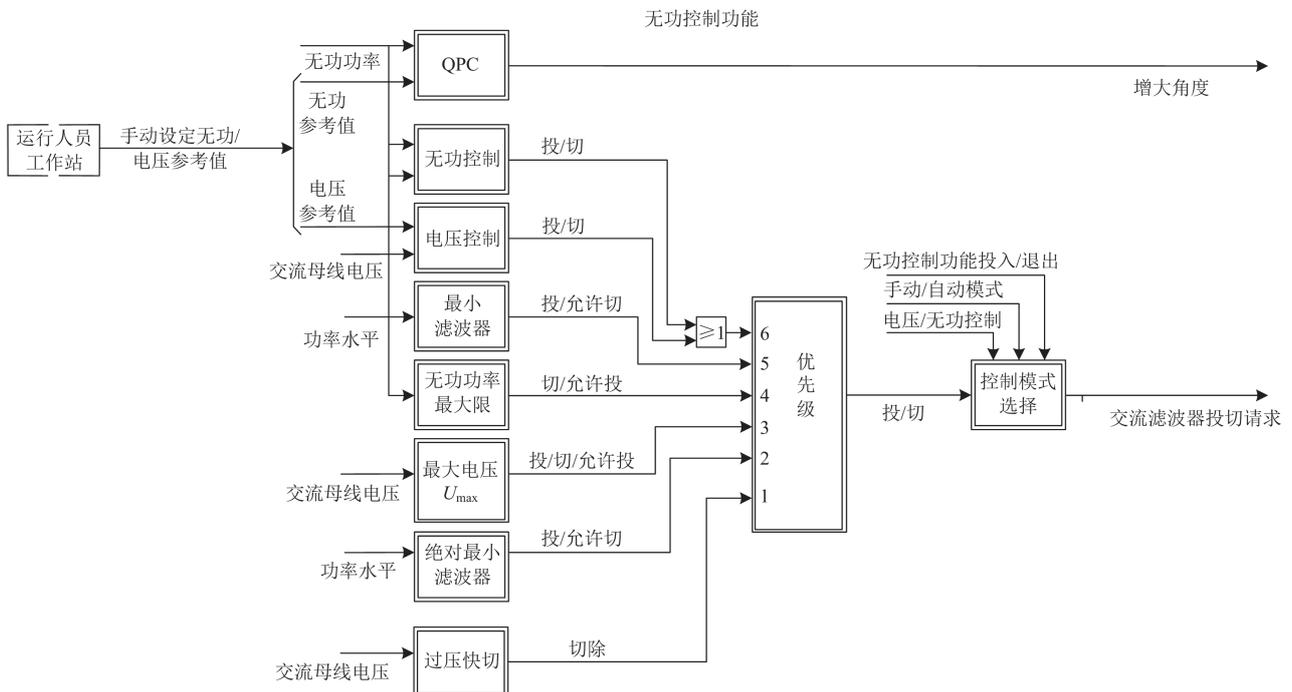


图 1 无功控制逻辑图

Fig. 1 Reactive control logic diagram

2 调相机参与换流站无功控制约束条件

将调相机纳入换流站无功控制策略就是在某些

过电压控制: 交流滤波器母线电压 $U_{ac} > 1.1 \text{ p.u.}$ 时, 每隔 8 s 切除 4 小组; 当 $U_{ac} > 1.2 \text{ p.u.}$ 时, 每隔 1 s 切除 4 小组; 当 $U_{ac} > 1.3 \text{ p.u.}$ 时, 每隔 250 ms 切除 4 小组。直至最小功率下的绝对最小滤波器数量, 以维持滤波器母线电压在合理范围之内。

Abs Min Filter: 绝对最小滤波器容量限制, 为了防止滤波设备过负荷所需投入的绝对最小滤波器组数。任何情况下, 该条件必须满足。

U_{max} : 最高电压限制, 监视交流母线的稳态电压, 避免稳态过电压引起保护动作。

Q_{max} : 最大无功交换限制, 根据当前运行状况, 限制投入滤波器组的数量, 限制稳态过电压。

Min Filter: 最小滤波器容量要求, 为满足滤除谐波的要求需投入的最小滤波器组。

$Q_{control}/U_{control}$: 无功交换控制/电压控制(可切换), 控制换流站和交流系统的无功交换量为设定的参考值, 控制换流站交流母线电压为设定的参考值。

QPC: 通过增大点火角/熄弧角来增大换流站对无功的消耗, 避免换流站与交流系统的无功交换量超过限制值。

功率点需要投入或切除滤波器时, 由调相机通过进相或迟相运行提供相应的无功功率代替, 平衡系统无功交换, 减少滤波器投切, 提高调相机利用率。

但由于调相机的主要作用是对近区交流电压提供动态支撑，而交流故障随时可能发生，所以考虑交流系统故障或电压异常波动导致调相机退出换流站稳态无功控制功能后，直流系统仍能安全稳定运行，不会发生较大波动，更不允许出现极端情况，如功率回降、直流闭锁等情况。

考虑到换流站无功控制限制，将调相机纳入换流站无功控制策略，需满足一定的系统条件，调相机柔性出力替代滤波器投切时需满足：

- 1) 投入/切除的非绝对最小滤波器组；
- 2) 投入/切除的非最小滤波器组；
- 3) 交流滤波器母线电压在正常范围之内；
- 4) 在调相机自身限制之内。

2.1 绝对最小滤波器约束

绝对最小滤波器是直流系统运行的必要条件，其必须被满足^[16-18]。如果绝对最小滤波器不满足，则直流系统会解锁不成功，若运行过程中出现了任一组在投的绝对最小滤波器不可用，则会在 500 ms 内投入同类型滤波器组，如果无可用同类型滤波器组，则 30 s 后控制系统将强制降功率，直到绝对最小滤波器个数与功率水平匹配，如果绝对最小滤波器个数始终不满足则闭锁直流。强制降功率是直流功率以阶跃的方式速降，此过程对系统冲击很大。如果不降功率仍保持当前功率水平，则将出现交流滤波器组因过负荷发热甚至损毁的情况，同时换流变和换流阀也会承受一定程度的电压应力，危害设备正常运行，对设备安全影响极大。

所以绝对最小滤波器投入时必须按需求投入相应类型和数量的交流滤波器组，不能以调相机出力代替。

2.2 最小滤波器约束条件

虽然最小滤波器不满足不会导致降功率或者直流系统闭锁，但此时滤波性能会降低，交流系统中会产生大量 $12n$ 次谐波^[19-20]。大量谐波电压电流在电网中积累叠加会导致线路损耗增加、电力设备过热，噪声增大，从而加速绝缘老化，大大缩短变压器的使用寿命。对于交流滤波器断路器开断谐波含量较高的电流时，其遮断能力将大大降低，可能造成电弧重燃、短路，甚至断路器爆炸。谐波分量极易构成串联或并联的谐振条件，当电网参数配合不利时，在一定的频率下可能造成谐波振荡，产生过电压或过电流，危及电力系统的安全运行。

所以直流系统在需要投入最小滤波器组时，必须按需求投入相应类型的交流滤波器组，以满足系统滤波需求，不能以调相机出力代替，即调相机仅参与系统无功控制，不影响原有滤波策略。

2.3 滤波器母线电压限制

交流母线电压过高则会导致设备损坏、线路过热、能耗增加；交流母线电压过低同样会造成设备损坏、工作效率降低、设备工作不稳定，从而引发故障。因此，无功控制策略中配置有 U_{\max} 功能，用于限制交流稳态电压过高或者过低。

U_{\max} 共有 4 个功能：要求分组切除的最大电压(必切)、限制分组投入的最大电压(禁投)、要求分组投入的最小电压(禁切)、限制分组切除的最小电压(必投)，具体如表 1 所示。以逆变侧为例，实际运行交流电压额定值为 525 kV，当稳态母线电压高于 550 kV 时强制切除滤波器组，当稳态母线电压高于 540 kV 时系统禁止投入滤波器组，当稳态母线电压低于 510 kV 时由于电压过低则禁止切除滤波器组，当稳态母线电压低于 500 kV 时将强制投入滤波器组，以保持交流母线稳态电压在合理范围之内。

表 1 U_{\max} 定值

Table 1 U_{\max} setting

电压控制功能	kV	
	整流侧	逆变侧
要求分组切除的最大电压(必切)	750	500
限制分组投入的最大电压(禁投)	800	550
要求分组投入的最小电压(禁切)	790	540
限制分组切除的最小电压(必投)	750	510
	740	500

由上述描述可知，当交流母线电压超出禁投或禁切的范围后，由于调相机随时会进行动态电压支撑而退出无功控制逻辑，所以此时必须切除或者投入相应的滤波器组，不能用调相机出力来代替。

因此，调相机参与换流站无功控制时交流母线电压须在禁投和禁切之间。以 500 kV 交流电网为例，交流母线稳态电压处于 510~540 kV 之间时，调相机才允许参与换流站无功控制。

2.4 调相机出力限制条件

调相机励磁系统采用“快速电压环+慢速无功环”相结合的控制策略，不同励磁控制模式之间快速切换。稳态时，调相机运行在“慢速无功环”参与换流站无功控制，当近区交流系统发生故障时，调相机励磁系统快速切换至“电压环”对交流母线电压进行支撑^[21-22]。

调相机无功出力限制有两个：调相机本体原因和人为设置的出力限制。

1) 调相机因油系统、冷却系统、电气系统以及本体原因产生最大励磁电流限制、励磁电流反时限限制、定子电流过励限制、无功过励限制等限制因素时^[23]，将退出换流站无功控制。

2) 调相机主要功能是提供动态无功支撑, 以提高近区电压稳定水平, 抑制暂态过电压与电压跌落。为保证充足的无功动态储备, 即使参与换流站无功控制其出力也会被限制在一定范围之内。根据相关研究, 调相机出力在 ± 80 Mvar 范围内为宜^[24]。

3 调相机参与换流站无功控制策略

根据第 2 节的描述, 制定调相机参与换流站无功控制策略如图 2 所示。调相机参与换流站无功控制需在交流母线电压正常范围内, 绝对最小滤波器和最小滤波器满足需求, 只有当 Q 控需要投切时调相机才会柔性出力, 同时调相机出力在限制范围之内, 以保持系统无功平衡, 减少交流滤波器投切频次。

协调控制策略的表达式如式(1)和式(2)所示。式(1)表示当换流器消耗与滤波器提供的无功功率之差达到了死区下限, 即滤波器提供的少而换流器消

$$Q_{sc} > 0, \text{当 } Q_{sum} - Q_{conv} - Q_{reactor} < -Q_{deadzone} \text{ 且 } N_{acf_on} > N_{abs} \text{ 且 } N_{acf_on} > N_{min} \text{ 且 } U_{pro_off} < U_{ac} < U_{pro_on} \quad (1)$$

$$Q_{sc} < 0, \text{当 } Q_{sum} - Q_{conv} - Q_{reactor} > Q_{deadzone} \text{ 且 } N_{acf_on} > N_{abs} \text{ 且 } N_{acf_on} > N_{min} \text{ 且 } U_{pro_off} < U_{ac} < U_{pro_on} \quad (2)$$

式中: Q_{sc} 为调相机出力, 其大于 0 为输出容性无功, 小于 0 则表示吸收容性无功; Q_{sum} 为在投滤波器无功功率之和; Q_{conv} 为在运换流器消耗的无功功率; $Q_{reactor}$ 为在投电抗器消耗的无功功率(若有); $Q_{deadzone}$ 为 Q 控投切滤波器的死区; N_{acf_on} 为在投滤波器个数; N_{abs} 为所需绝对最小滤波器个数; N_{min} 为所需最小滤波器个数; U_{pro_off} 为滤波器禁止切除电压; U_{pro_on} 为滤波器禁止投入电压。

直流控制系统根据当前运行工况和功率值, 自动判断绝对最小和最小滤波器个数。当投入的滤波器个数大于绝对最小和最小滤波器个数后, 调相机介入换流站无功控制使能, 当 Q 控到达死区, 需要投入或者切除滤波器时, 调相机开始出力。以某工程功率正送、双极四阀组功率为 1.2 p.u. 为例, 图 3 给出了直流功率升至 1.2 p.u. 后滤波器投入顺序及数量的录波, 共投入 20 组交流滤波器。表 2 为此工况下不同功率点对应绝对最小和最小滤波器需求个数对照表。双极四阀组在 1.2 p.u. 时, 绝对最小滤波器需要 9 组(7 组 HP12/24 和 2 组 HP3), 最小滤波器需要 10 组(8 组 HP12/24 和 2 组 HP3)。因此, 第 10 组之后投入的滤波器均为 Q 控投入, 即使出现第 11—20 组滤波器全部丢失的情况, 也只是系统交换无功不平衡, 不会影响直流功率和滤波性能。需要特别说明的是, 前 10 组交流滤波器中有 5 组为绝对最小滤波器投入, 5 组为 Q 控投入, 虽然是 Q 控投入, 但其也具备绝对最小和最小滤波器的功能, Q 控

耗的多, 则调相机开始输出无功功率。式(2)表示当换流器消耗与滤波器提供的无功功率之差达到了死区上限, 即滤波器提供的无功功率有盈余, 则调相机开始吸收无功功率。

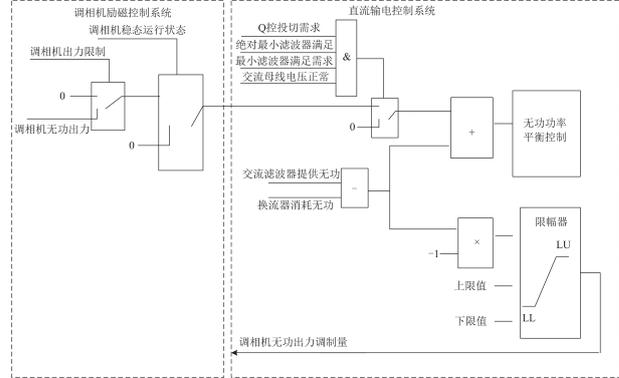


图 2 调相机参与换流站无功控制策略图

Fig. 2 Diagram of reactive power control strategy with SC

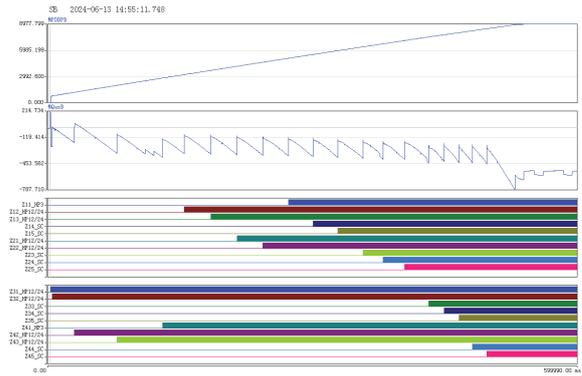


图 3 直流功率升至 1.2 p.u. 后交流滤波器投入顺序及数量

Fig. 3 The sequence and quantity of AC filter switch on when DC power up to 1.2 p.u

表 2 各功率点对应滤波器个数

Table 2 Number of filters of each power point

功率正送全压双极四阀组			
绝对最小滤波器		最小滤波器	
所需滤波器数量/个	功率点/MW	所需滤波器数量/个	功率点/MW
1	0	1	0
2	1200	2	1200
3	2000	3	2000
4	2800	4	2400
5	4000	5	3600
6	5600	6	5200
7	7200	7	6800
8	8400	8	8000
9	9600	9	8800
10	—	10	9600

提前投入，等功率到了要投入最小或者绝对最小滤波器时，系统会判断为已满足要求。而第 10 组滤波器之后完全由 Q 控投入，此时调相机开始参与换流站无功控制。

直流控制保护系统根据在运阀组个数(1 到 4 个阀组)和直流电压等级(全压、降压和半压)，将特高压直流输电系统分为双极全压、双极半压、双极混合压等 12 种运行工况。同理，这 12 种工况下任一功率点均按照此策略执行。

3.1 功率上升时策略

升功率过程中，当满足投入条件时，调相机开始参与换流站无功控制，随着功率上升直流系统无功需求增加，调相机输出容性无功直到上限。如果功率在达到下个投入点前停止，则构成交流滤波器、调相机与换流器的无功平衡。如功率继续上升到达了下一个投入点，则投入滤波器组，调相机按照一定速率退出稳态无功控制。换流站采用 $Q_{control}$ 策略时，为避免无功小组的频繁投切操作，允许实际无功交换与计划无功交换之间存在一定的偏差，该偏差值至少应大于滤波器小组容量的一半。

$$Q_{deadzone} = \frac{K \times Q_{filter}}{2} \quad (3)$$

式中： Q_{filter} 为单组滤波器容量；考虑避免无功小组频繁投切的需要，这里 K 取 1.4~1.6。可简单理解为 Q 控投切死区为小组容量的 0.7~0.8 倍。以某工程为例，共配置 16 组交流滤波器，每组容量均为 320 Mvar，则投切死区为 $320 \times K/2 = 224 \sim 256$ Mvar，取中间数且实际应用中会取整为 240 Mvar。即投入滤波器组后无功是过剩的，多出 80 Mvar 左右；调相机退出后，既可保证无功基本平衡，又能使调相机恢复到额定的动态无功储备，为下次无功调节做好准备。

3.2 功率下降时策略

功率下降过程中分为两种情况：1) 调相机已参与稳态无功控制；2) 调相机未参与稳态无功控制。

在调相机已参与的情况下，随着功率下降，首先由调相机在 $[-80, 80]$ Mvar 范围内调节无功出力，直到下限，即调相机由输出无功功率减至 0，进而转为吸收无功功率。如果本次功率调整没有达到滤波器投切点，则由调相机调节无功平衡。如果功率继续下降，并到达了下一个滤波器投切点，则切除滤波器组。由于单组滤波器容量大于投切死区，所以滤波器切除后系统交换无功为负值，此时调相机从吸收无功状态按一定速度恢复到零状态。

在调相机未参与的情况下，则功率下降需要 Q

控切除滤波器时，首先由调相机介入，吸收容性无功直至下限。如果功率持续降低，系统交换容性无功增大，需要继续切除滤波器组，则进入第一种情况。

3.3 调相机归零的条件

所谓归零是指在调相机已参与换流站稳态无功控制时，由于滤波器组的投入或退出，为保持系统无功平衡，而将调相机无功功率调整为 0 的过程。

考虑将下一次滤波器投切命令和下一次滤波器已投入或切除状态作为调相机归零的使能信号，其表示为

$$\begin{cases} Q_{sc} = 80 \text{ Mvar}, F_{cmd_on} = 1 \text{ 且 } F_{staus_on} = 1 \\ \text{或} \\ Q_{sc} = -80 \text{ Mvar}, F_{cmd_off} = 1 \text{ 且 } F_{staus_off} = 1 \end{cases} \quad (4)$$

式中： F_{cmd_on} 为下一组滤波器投入命令； F_{staus_on} 为下一组滤波器投入状态； F_{cmd_off} 为下一组滤波器切除命令； F_{staus_off} 为下一组滤波器退出状态。即 Q_{sc} 输出容性无功到上限，且当下一组滤波器投入后，调相机按一定速率归零暂时退出稳态无功控制，或者 Q_{sc} 吸收容性无功到下限，当下一组滤波器切除后，调相机按一定速率归零。

4 调相机与直流控制系统连接

4.1 连接结构

调相机控制系统结构如图 4 所示，DPU 组成的 DCS 系统为控制的中枢，由 DCS 与同期、保护、PMU、励磁等子系统交互信息，实现调相机的控制与保护。调相机分散控制系统用于调相机组各系统和设备实时监测与控制，采用分散控制、集中管理的工作模式。

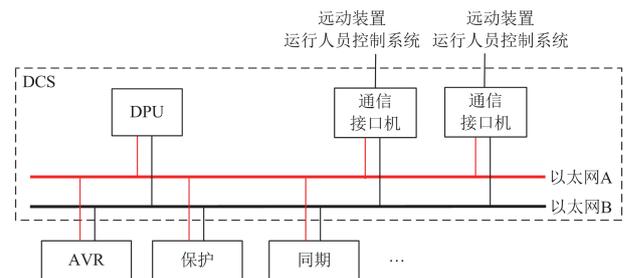


图 4 调相机二次系统示意图

Fig. 4 Schematic diagram of secondary system of the SC

由于换流站无功控制为秒级动作，对实时性要求相对不高，考虑直流控制系统与 DCS 采用交叉冗余连接方式，采用 IEC 61850 标准中定义的 GOOSE 通信协议通信，传输速率宜为 100 Mbps 或 1000 Mbps，接口形式宜为 LC 或 ST。连接方式结

构简单、互为冗余, 数据传输安全, 调相机与直流控制保护通信方式见图 5。

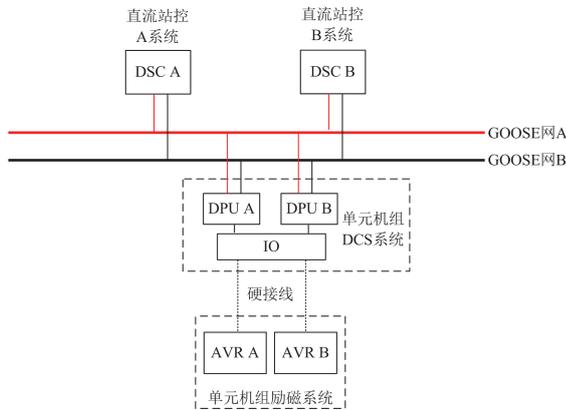


图 5 调相机 DCS 与直流控制通信框图

Fig. 5 Diagram of communication between the DCS and the DC control system

4.2 交互数据

调相机纳入换流站无功控制策略之后, 调相机 DCS 与直流控制系统会产生大量重要数据交互, 交互数据主要用于功能投退、故障检测、出力限制等。

直流控制系统发送调相机信号: 值班信号(主从信号)、解锁、调相机无功控制投入信号、调相机无功功率指令、滤波器投入/切除命令、通道故障、数据无效、心跳信号等。

调相机发送直流控制系统信号: DCS 不可用信号、心跳信号、调相机组并网开关信号、调相机组实时无功功率、调相机励磁系统调节模式、调相机励磁系统单向增闭锁信号、调相机励磁系统单向减闭锁信号等。

5 仿真试验

利用某在建特高压直流工程控制保护系统与 RTDS 搭建仿真系统, 反复进行双极四阀组功率升降试验, 统计有无调相机参与换流站无功控制两种工况下, 系统交换无功变化情况和滤波器投切状况。其中 S1 为不带调相机方案(梅红色虚线), S2 为带调相机方案(红色实线)。

根据功率升降试验数据, 对方案 S1 和 S2 进行仿真计算, 结果见图 6—图 8 和表 3。图 6 为系统进行升功率过程中有无调相机条件下系统交换无功录波, 图 7 为系统进行降功率过程中有无调相机条件下系统交换无功录波。以图 6 为例, 升功率过程中当功率大于 0.3 p.u.之后, 投入的滤波器组数大于功率点对应的绝对最小和最小滤波器数, 调相机介入换流站无功平衡, 可以看到方案 S2 下系统交换无功

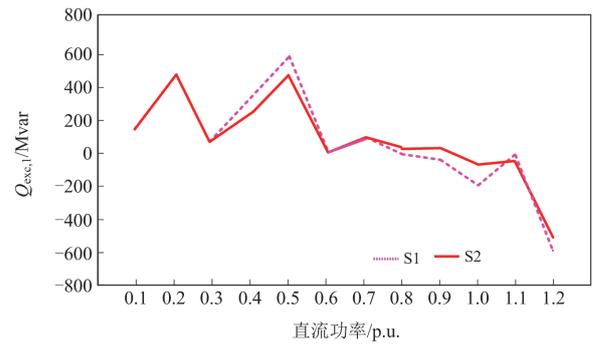


图 6 升功率过程系统交换无功

Fig. 6 System exchange reactive power when DC power rises

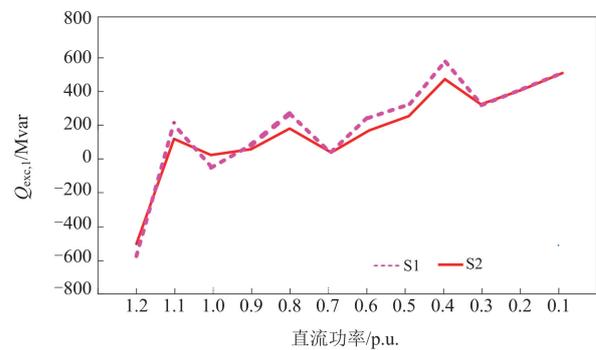


图 7 降功率过程系统交换无功

Fig. 7 System exchange reactive power when DC power reduces

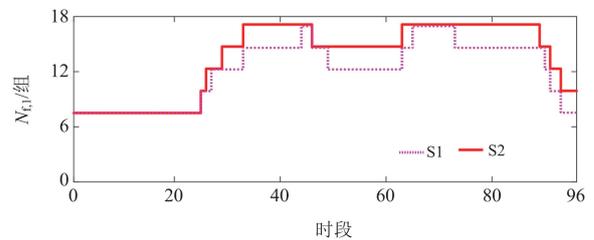


图 8 滤波器投切组数对比

Fig. 8 Number of AC filter switch on/off about S1 and S2

表 3 方案 1 和方案 2 仿真结果

Table 3 Simulation result of scheme 1 and 2

方案	换流站	H_1	H_2	H_3
S1	1#500 kV	12	2	85
	2#500 kV	9	2	169
S2	1#500 kV	10	2	44
	2#500 kV	8	2	107

变化更平缓。降功率过程中情况类似, 方案 S2 系统交换无功要更少。

图 8 为两种方案多天不同功率计划反复升降, 交流滤波器投切次数平均结果。特别说明的是正常情况下, 调度中心调节功率每 15 min 一个点, 横轴

为一天功率点数,共 96 个,纵轴为滤波器投切次数。

表 3 为根据仿真结果统计出来的每日投切次数和平均无功交换值对比, H_1 、 H_2 分别表示交流滤波器和并联电容器的日动作次数; H_3 表示全天换流站交换无功绝对值的平均值,单位为 Mvar。

由表 3 可知,对比方案 S1 不考虑调相机的协调作用,方案 S2 使得 1#交流网中交流滤波器日动作次数和全天交直流系统交换无功绝对值的平均值分别由 12 次和 85 Mvar 减小至 10 次和 44 Mvar。2#交流网中交流滤波器日动作次数和全天交直流系统交换无功绝对值的平均值分别由 9 次和 169 Mvar 减小至 8 次和 107 Mvar。反复进行功率升降会在某些功率点减少滤波器投切。

综上所述,采用本文所提的协调控制策略, S2 方案滤波器投切次数和系统交换无功功率较 S1 要有所减少和降低,符合之前的预期。

6 结论

根据调相机特性和目前换流站无功控制策略,在必须的约束条件下进行仿真试验,对新策略进行验证。试验结果表明,在不影响调相机动态无功储备的情况下,调相机参与换流站无功控制可以有效减小直流系统与交流滤波器的无功交换,有利于近区电压平稳,同时可以一定程度上减少滤波器投切次数,提高系统运行稳定性和滤波器的使用效率。

但如果调相机参与换流站无功控制,考虑到实际应用还有需要继续优化和完善的地方:

1) 调相机参与换流站无功控制约束条件及控制策略需要细化,如 DCS 与直流控制系统通道故障、或 DCS 心跳信号丢失,已经投入的调相机如何动作,直流控制系统如何应对;

2) 换流站一般配置两台调相机,这就涉及到两台调相机与换流站无功配合顺序问题,需制定调相机投入退出优先级策略。

参考文献

- [1] 徐政. 交直流电力系统动态行为分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [2] 赵畹君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [3] 杨欢欢, 朱林, 蔡泽祥, 等. 直流控制对直流系统无功动态特性的影响分析[J]. 电网技术, 2014, 38(10): 2631-2637.
- YANG Huanhuan, ZHU Lin, CAI Zexiang, et al. Influence of HVDC control on HVDC reactive power dynamic characteristic[J]. Power System Technology, 2014, 38(10): 2631-2637.

- [4] ZENG Z, ZHAO J, ZHANG S, et al. Sensitivity analysis of different controller parameters on the stability of the weak-grid-tied interlinking VSC[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2025, 10(1): 40-51.
- [5] ZHAO S, SHAO C, DING J, et al. Unreliability tracing of power systems for identifying the most critical risk factors considering mixed uncertainties in wind power output[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2024, 9(5): 96-111.
- [6] 赵琪龙. 大直流弱送端系统的调相机关键参数及无功策略优化方案研究[J]. 长春工程学院学报(自然科学版), 2018, 19(1): 35-39.
- ZHAO Qilong. The study on key parameters and reactive power strategy optimization to a weak sending system in large direct current condenser[J]. Journal of Changchun Institute of Technology (Natural Sciences Edition), 2018, 19(1): 35-39.
- [7] ZHANG Tian, YAO J, LIN Y, et al. Impact of control interaction of wind farm with MMC-HVDC transmission system on distance protection adaptability under symmetric fault[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2025, 10(2): 83-101.
- [8] 郭一兵, 凌在汛, 崔一铂, 等. 特高压交直流系统动态无功支撑用大型调相机运行需求分析[J]. 湖北电力, 2016, 40(5): 1-4, 34.
- GUO Yibing, LING Zaixun, CUI Yibo, et al. Characteristics analysis of large synchronous condenser for UHVDC project[J]. Hubei Electric Power, 2016, 40(5): 1-4, 34.
- [9] 许国瑞, 范士雄, 罗超龙, 等. 用于直流换流站动态无功补偿的调相机与 SVC 运行特性对比[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2019, 46(1): 47-53.
- XU Guorui, FAN Shixiong, LUO Chaolong, et al. Operation characteristic of synchronous condenser and SVC for dynamic reactive power compensation of DC converter station[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2019, 46(1): 47-53.
- [10] 易建波, 王泽宇, 胡维昊, 等. 新型同送同受路径的多回直流系统交互影响及协调恢复分析[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(15): 146-157.
- YI Jianbo, WANG Zeyu, HU Weihao, et al. Analysis of the interaction impacts and coordinated recovery of new multi-UHVDC system with similar sending and receiving paths[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(15): 146-157.
- [11] 肖红燕, 钟康骅, 樊玮, 等. 海上风电场并网点无功趋优控制区间整定[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(10): 23-32.
- XIAO Hongyan, ZHONG Kanghua, FAN Wei, et al. Reactive power optimization control interval setting for offshore wind farm grid connection points[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(10): 23-32.

- [12] 李建勋, 王子强. 基于 LCC 换流器高压直流输电系统的无功功率控制监视方法[J]. 南方电网技术, 2019, 13(9): 19-24.
LI Jianxun, WANG Ziqiang. Reactive power control monitoring method of HVDC transmission system based on LCC converter[J]. Southern Power System Technology, 2019, 13(9): 19-24.
- [13] 李兆伟, 吴雪莲, 曹路, 等. 抑制直流连续换相失败的调相机紧急控制[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(22): 91-101.
LI Zhaowei, WU Xuelian, CAO Lu, et al. Emergency control of synchronous condenser to suppress DC continuous commutation failure[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(22): 91-101.
- [14] 马睿聪, 邹世豪, 曹永吉, 等. 基于灵敏度分析的同步调相机及其励磁系统参数分类辨识方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(4): 26-37.
MA Ruicong, ZOU Shihao, CAO Yongji, et al. Sensitivity analysis-based classification and identification method of a synchronous condenser and its excitation system parameter[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(4): 26-37.
- [15] 纪会争, 张帆, 康春雷, 等. 风火打捆直流送出系统电压稳定控制策略[J]. 电力建设, 2020, 41(4): 126-132.
JI Huiheng, ZHANG Fan, KANG Chunlei, et al. Voltage stability control strategy of wind-thermal-bundled power generation and DC transmission system[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(4): 126-132.
- [16] 韩璐, 尹纯亚, 戴晨, 等. 高比例新能源送端系统暂态电压运行风险分析[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(1): 23-34.
HAN Lu, YIN Chunya, DAI Chen, et al. Transient voltage operational risk of a high-proportion new energy sending system[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(1): 23-34.
- [17] 王雅婷, 张一驰, 周勤勇, 等. 新一代大容量调相机在电网中的应用研究[J]. 电网技术, 2017, 41(1): 21-28.
WANG Yating, ZHANG Yichi, ZHOU Qinyong, et al. Study on application of new generation large capacity synchronous condenser in power grid[J]. Power System Technology, 2017, 41(1): 21-28.
- [18] 卢东斌, 薛海平, 沈全荣, 等. 基于滤波规则的 HVDC 交流过电压快切滤波器控制策略[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(15): 192-199.
LU Dongbin, XUE Haiping, SHEN Quanrong, et al. Filtering-rule-based control strategy of switching-off AC filters for over voltage in HVDC transmission[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(15): 193-199.
- [19] 孔祥平, 雷霄, 刘琳, 等. 输送风电的特高压直流频率调制和无功控制策略研究[J]. 电工电能新技术, 2020, 39(7): 30-36.
KONG Xiangping, LEI Xiao, LIU Lin, et al. Adaptive frequency and reactive power control strategy of UHVDC system for large-scaled wind power transmission[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2020, 39(7): 30-36.
- [20] 邹洪森, 惠子珈, 刘志远, 等. 直流送端换流站无功控制策略的优化研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2019, 40(5): 66-73.
ZOU Hongsen, HUI Zijia, LIU Zhiyuan, et al. Study on optimization of reactive power control strategy for DC sending converter station[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2019, 40(5): 66-73.
- [21] 骆悦, 姚骏, 张田, 等. 大规模风电直流外送系统单极闭锁场景下送端系统协调控制策略[J]. 电工技术学报, 2019, 34(19): 4108-4118.
LUO Yue, YAO Jun, ZHANG Tian, et al. Coordinated control strategy of large-scale wind power generation sending system under mono-polar block fault[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(19): 4108-4118.
- [22] 吴跨宇, 房乐, 卢岑岑, 等. 大型调相机励磁与无功电压协调控制策略探讨[J]. 浙江电力, 2018, 37(2): 36-41.
WU Kuayu, FANG Le, LU Cencen, et al. Discussion on coordinated control strategy for large synchronous compensator and reactive power[J]. Zhejiang Electric Power, 2018, 37(2): 36-41.
- [23] 袁彬, 李辉, 向学位, 等. 考虑调相机饱和参数的分阶段励磁控制优化策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(15): 42-54.
YUAN Bin, LI Hui, XIANG Xuewei, et al. Optimization strategy of phased excitation control considering phase modulator saturation parameters[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(15): 42-54.
- [24] 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.

收稿日期: 2025-07-05; 修回日期: 2025-09-16

作者简介:

艾红杰(1983—), 男, 通信作者, 高级工程师, 从事直流输电控制保护系统研究开发工作; E-mail: xiaoi1983@163.com

黄金海(1975—), 男, 高级工程师, 研究方向为直流输电控制保护系统。E-mail: huangjinhaigood@163.com

(编辑 魏小丽)