

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190604

调相机与特高压直流换流站交流滤波器的协调控制策略

孙巍峰, 崔晨, 周晓风, 李星奎, 付艳, 李传西, 雷玉磊, 戴国安, 康建爽

(许继集团有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 在特高压直流换流站配置同步调相机可以给交流电网提供动态支撑、提高系统稳定性, 但当前调相机与换流站交流滤波器均为单独控制, 两者之间缺乏合理的协调配合。针对此问题, 考虑调相机与换流站交流滤波器现有的控制策略及特性, 提出一种稳态无功功率协调控制策略。于两者控制系统之间实现数据交互, 在确保不影响调相机对交流电网动态支撑作用的前提下, 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。最后, 通过仿真验证了该策略的有效性。

关键词: 特高压直流换流站; 同步调相机; 动态支撑; 交流滤波器; 稳态; 协调控制; 数据交互; 无功功率平衡控制

Coordinated control strategy for synchronous condenser and AC filter in UHVDC converter station

SUN Weifeng, CUI Chen, ZHOU Xiaofeng, LI Xingkuai, FU Yan, LI Chuanxi, LEI Yulei, DAI Guo'an, KANG Jianshuang
(XJ Group Corporation, Xuchang 461000, China)

Abstract: Equipped with synchronous condenser in UHVDC converter station can provide dynamic support for AC network and improve system stability, but the current synchronous condenser and the AC filter in converter station are controlled separately, and there is no logical coordination between them. In view of this problem, considering the existing control strategies and characteristics of synchronous condenser and AC filter in converter station, a steady state reactive power coordinated control strategy is proposed. The data exchange between the control systems of them is realized. On the premise of ensuring that the dynamic support function of the synchronous condenser to AC network is not affected, the DC control system calls part of the steady-state reactive power capacity of the synchronous condenser to make it cooperate with the AC filter in converter station for reactive power balance control, thus giving full play to the role of reactive power compensation of the synchronous condenser. Finally, the strategy is validated by the simulation test.

This work is supported by Science and Technology Project of the Headquarters of State Grid Corporation of China (No. 52153218000H).

Key words: UHVDC converter station; synchronous condenser; dynamic support; AC filter; steady state; coordinated control; data exchange; reactive power balance control

0 引言

近年来, 特高压直流输电方式因在远距离大容量送电方面更具有优势而得到快速发展^[1-4]。然而, 随着我国多回特高压直流输电工程建成投运, 特高压电网过渡期“强直弱交”的问题凸显^[5-7]。特高压直流输电系统正常运行时需要吸收其输送功率约40%~60%的无功功率^[7-12], 其主要靠换流站内配置的交流滤波器提供。当交流或直流系统发生故障时,

会引起交流母线电压的大幅波动, 若电网局部动态无功补偿能力不足, 则大幅增加电压失稳风险, 危及整个交、直流系统的安全稳定运行^[12-16]。

调相机的励磁系统能够通过自动调节励磁电流, 改变无功功率的性质和大小, 灵活快速地给电网系统提供动态无功支撑。同时, 调相机作为旋转设备, 与 SVC、STATCOM 等基于电力电子技术的动态无功补偿装置相比, 既能为系统提供短路容量, 又具有过载能力强、暂态性能更好等优点^[14-24], 在降低直流送端暂态过电压、抑制直流受端换相失败^[11]、提高系统稳定性等方面具备独特优势。

目前, 已有多条特高压直流工程的送、受端换流站部署了调相机。但调相机和换流站交流滤波器均为单独控制, 两者之间缺乏合理的协调配合, 无法充分发挥调相机在特高压直流输电系统中的无功补偿作用。本文结合调相机和换流站交流滤波器现有的控制策略及特点, 提出一种稳态无功功率协调控制策略, 以期实现调相机与换流站交流滤波器配合进行无功功率平衡控制, 且确保调相机对交流电网的动态支撑作用不受负面影响。

1 现有控制策略

1.1 调相机控制策略

部署在特高压直流换流站的调相机通常使用的是无功-电压协调控制的综合控制方式, 采用双环控制模式。

内环是机端电压闭环控制, 以调相机的机端电压作为调节变量, 目的是维持机端电压与设定的电压参考值一致。当换流站交、直流系统发生故障进入暂态工况时, 调相机由机端电压闭环控制对励磁电流进行快速的强励或者强减, 抑制交流电网电压的剧烈波动, 维持电网系统的稳定性。

外环是高压母线电压控制和无功功率控制的联合控制, 实现对母线电压和调相机无功功率的稳态调节。设置有可调节的权重系数, 以达到稳态时兼容系统母线电压和调相机无功功率的目的。同时增加无功快速调节功能, 通过投切开关控制, 达到快速调节调相机输出无功功率的目的, 配合换流站的滤波器投切, 实现无功灵活控制的效果。

在 $dq0$ 坐标系下, 调相机的无功功率 Q_{sc} 的计算公式为

$$Q_{sc} = U_q \times I_d \quad (1)$$

式中: U_q 为调相机机端电压的 q 轴分量; I_d 为调相机定子电流的 d 轴分量。

1.2 换流站交流滤波器控制策略

直流输电控制系统中配置无功控制功能可以对换流站交流滤波器进行自动投切控制, 以满足滤除交流谐波的需求, 并控制换流站与交流系统的无功交换量在允许的范围内。

无功控制有若干子功能, 其中, 无功交换量控制用于控制换流站与交流系统的无功交换量 Q_{exc} 为运行人员设定的参考值 Q_{ref} 。为了防止交流滤波器的频繁反复投切, 设置有投切死区值 Q_{dz} , 通常为单组滤波器容量的 65%~80%, 运行人员可以修改设定 Q_{dz} 的大小。

换流站与交流系统的无功交换量 Q_{exc} 由式(2)一

式(4)计算得到。

$$Q_{exc} = Q_{filt} - Q_{conv} \quad (2)$$

$$Q_{filt} = \sum \left(\frac{U_{ac}}{U_{acN}} \right)^2 \times Q_{filtN} \quad (3)$$

$$Q_{conv} = P \times \frac{(\pi/180) \times \mu - \sin \mu \times \cos(2\alpha + \mu)}{\sin \mu \times \cos(2\alpha + \mu)} \quad (4)$$

式中: Q_{filt} 为所有已投入的交流滤波器提供的无功功率值; Q_{conv} 为换流器消耗的无功功率值; U_{ac} 为交流电压实际值; U_{acN} 为交流电压额定值; Q_{filtN} 为单组交流滤波器额定无功功率值; P 为换流器直流传输有功功率值; μ 为换相角; α 为整流器阀组点火角。

当 $Q_{exc} > Q_{ref} + Q_{dz}$ 时, 无功交换量控制延时发出切除交流滤波器的指令; 当 $Q_{exc} < Q_{ref} - Q_{dz}$ 时, 无功交换量控制延时发出投入交流滤波器的指令。

2 无功功率协调控制策略

由于直流输电无功控制功能的动作启动延时较长, 在换流站交、直流系统发生故障的过程中无法及时响应, 导致交流滤波器无法及时投退, 而调相机可在此暂态工况下进行快速强励或强减以稳定交流电压, 因此考虑两者的协调控制策略只针对稳态工况下的无功功率平衡, 暂态工况则由调相机单独响应。

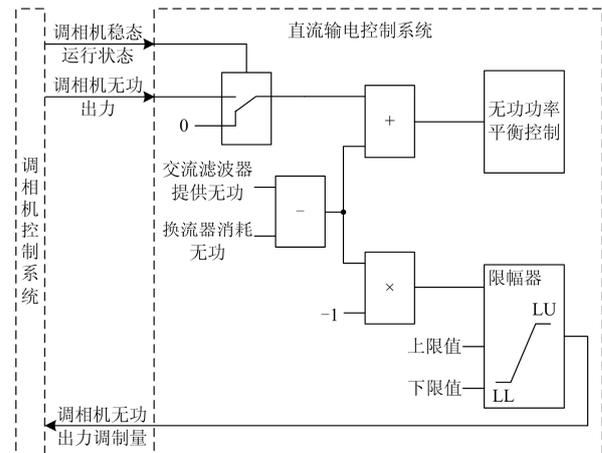


图1 无功功率协调控制策略框图

Fig. 1 Block diagram of reactive power coordinated control strategy

在特高压直流输电控制系统和调相机控制系统之间建立实时数据交互通道, 数据传输模式有硬接线、光纤、以太网等多种可选。

直流输电控制系统通过通信实时获取调相机的运行状态及无功出力, 不考虑暂态工况, 只取其

稳态运行时的无功出力 Q_{sc} ，与站内换流器消耗的无功 Q_{conv} 和所有已投入的交流滤波器提供的无功 Q_{filt} 一起计算换流站与交流系统的实时交换无功功率总额 Q'_{exc} ，以此控制交流滤波器的投入数目，使交换无功总额 Q'_{exc} 处于运行人员设定的控制范围内。 Q'_{exc} 的计算公式为

$$Q'_{exc} = Q_{sc} + Q_{filt} - Q_{conv} \quad (5)$$

同时，直流输电控制系统根据换流器与交流滤波器的实时无功功率总额 Q_{exc} ，计算出送给调相机控制系统的无功出力调制量。为保证调相机预留有足够的动态无功功率储备，该调制量被限制在预先设定好的调相机稳态无功出力范围之内。调相机控制系统接收到该调制量指令后，将其引入到外环控制中的无功功率控制中，快速调节调相机的稳态无功出力 Q_{sc} ，使换流站与交流系统的实时交换无功功率总额 Q'_{exc} 趋向为零。

由于调相机的无功出力是可调节的，且调节速度要远快于直流输电控制系统操作固定容量的交流滤波器，因此当换流站与交流系统的交换无功功率总额发生变动时，首先由调相机在设定的无功出力范围内进行平衡调节，使交换无功总额趋向为零。当达到调相机无功出力界限后，再由直流输电控制系统操作交流滤波器来控制交换无功总额处于运行人员设定的控制范围内。可以预见，实现上述调相机与换流站交流滤波器的无功功率协调控制策略后，在保证预留有足够的动态无功功率储备的前提下，调相机能够充分参与换流站的稳态无功平衡控制，并且可以推后换流站操作交流滤波器的时机，在一定程度上减少交流滤波器的投退动作次数。

3 仿真实验

以扎鲁特-青州±800 kV 特高压直流输电工程作为仿真算例。扎青直流工程额定输送功率为 10 000 MW，额定直流电压±800 kV，额定直流电流 6 250 A。扎鲁特换流站换流变交流网侧额定电压 530 kV，配置 20 组交流滤波器/并联电容器，总额定无功容量为 6 665 Mvar。青州换流站采用分层接入方案，低端换流变交流网侧额定电压 1 050 kV，配置 12 组交流滤波器/并联电容器，总额定无功容量为 3 240 Mvar；高端换流变交流网侧额定电压 525 kV，配置 12 组交流滤波器/并联电容器，总额定无功容量为 3 270 Mvar^[25]。另外，扎鲁特换流站交流母线装设 2 台调相机，单台额定容量 300 Mvar。

基于 RTDS 实时数字仿真平台建立扎青直流工程的仿真模型，并在模型中添加调相机控制模块。

3.1 无功功率平衡控制实验

无功功率平衡控制实验用于验证稳态工况下协调控制策略是否正确有效。

以提升功率过程中扎鲁特站无功功率平衡控制实验为例说明。设置实验条件为功率正送模式，扎鲁特站接入调相机，无功控制自动模式，直流输电控制系统送出的调相机无功出力调制量的限制范围为 (0 Mvar, 80 Mvar)。直流系统双极四换流器解锁并将直流功率稳定在 5 300 MW，将直流功率以 600 MW/min 的速率升至 5 800 MW/min。

图 2 为该实验过程录波波形。波形图中，PactSA 为扎鲁特侧交流电网有功功率，QexSA 为扎鲁特侧交流电网无功功率，QrefA 为扎鲁特站直流控制系统送出的调相机无功出力调制量，QTXJ5A 为扎鲁特站调相机稳态无功出力，FLTAW1#0-FLTAW2#9 为扎鲁特站 20 组交流滤波器的投入状态。

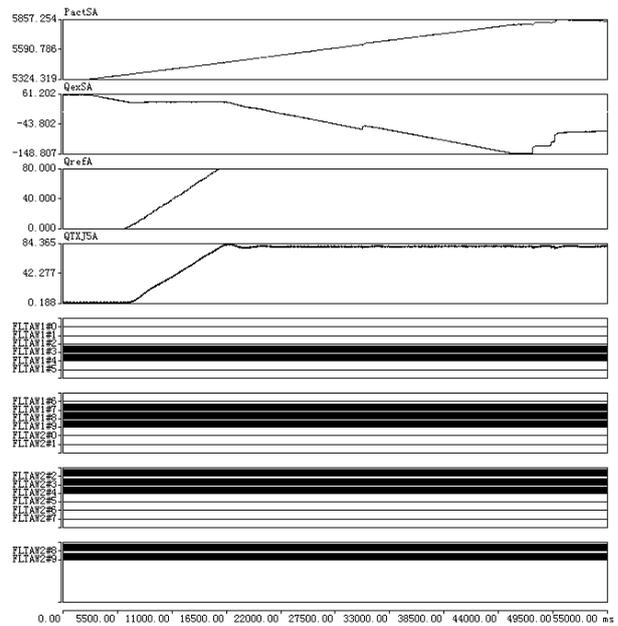


图 2 无功功率平衡控制实验波形
Fig. 2 Experimental waveform of reactive power balance control

由图 2 可以看出：在直流功率上升过程中，扎鲁特站流入交流电网的无功功率逐渐下降。在下降到阈值之前，直流控制系统发出的调相机无功出力调制量保持为 0 Mvar；当流入交流电网的无功降到阈值后，无功出力调制量由 0 Mvar 平滑升至 80 Mvar，调相机介入无功调节，随之发出对应的无功出力，期间流入交流电网的无功维持在阈值不变；当调相机无功出力达到上限后，流入交流电网的无功重新开始逐渐下跌。由于调相机参与无功调节并提供了

80 Mvar 的无功, 导致此次功率上升过程中系统交换无功下跌量减少, 未超出控制范围, 扎鲁特站交流滤波器无投退动作。

3.2 接入调相机的换流站交流系统故障实验

接入调相机的换流站交流系统故障实验用于验证交流系统故障前有不同稳态无功出力的调相机对交流电网的动态支撑作用有何种影响。

以扎鲁特站交流系统发生瞬时三相短路接地故障实验为例说明。设置实验条件为功率正送模式, 扎鲁特站接入两台调相机。双极四换流器解锁并将直流功率稳定在 10 000 MW, 调节两台调相机稳态无功出力各为 0 Mvar; 在 RTDS 模拟扎鲁特站交流母线三相短路接地故障 100 ms, 接地电抗值为 0.001 H。系统稳定后调节两台调相机稳态无功出力各为 50 Mvar; 再次在 RTDS 模拟扎鲁特站交流母线三相短路接地故障 100 ms, 接地电抗值为 0.001 H。

图 3、图 4 为该实验过程录波波形。波形图中, PactSA 为扎鲁特侧交流电网有功功率, S1)UALA11、S1)UBLA11、S1)UCLA11 为扎鲁特站交流电网三相电压, UacApu 为扎鲁特站交流电压有效值的标么值, QTXJ1Aflt、QTXJ2Aflt 为扎鲁特站两台调相机实际无功出力。

由图 3 和图 4 对比可以看出: 换流站交流母线发生瞬时三相短路接地故障时, 交流电压急剧跌落。在调相机具有不同初始无功出力的情况下, 故障期间交流电压的波动幅值基本相同; 调相机提供的暂

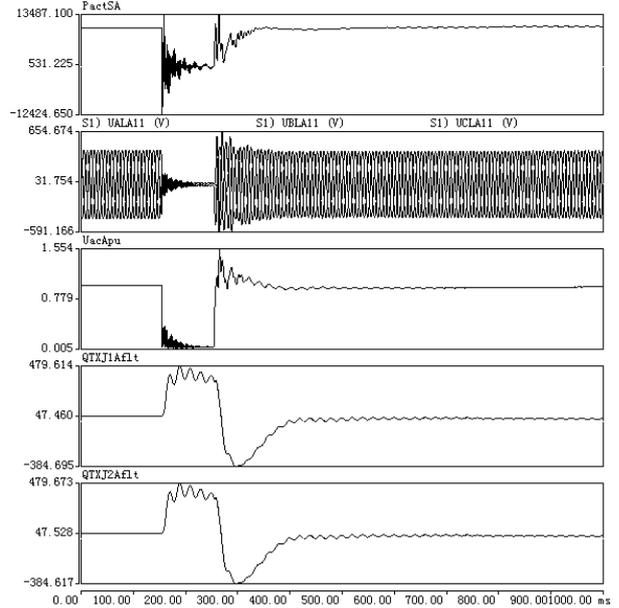


图 4 接入调相机的换流站交流系统故障实验波形-50 Mvar
Fig. 4 Experimental waveform of AC system fault in converter station connected with synchronous condenser -50 Mvar

态无功出力变化量也大致相同, 均能够在交流故障期间起到动态支撑交流电压的作用。

3.3 接入调相机的换流站直流系统故障实验

接入调相机的换流站直流系统故障实验用于验证直流系统故障前有稳态无功出力的调相机对直流保护系统的正确动作有何种影响。

以直流线路发生瞬时接地故障实验为例说明。设置实验条件为功率正送模式, 扎鲁特站接入两台调相机。极 1 双换流器解锁并将直流功率稳定在 5 000 MW, 调节两台调相机稳态无功出力各为 50 Mvar; 在 RTDS 模拟极 1 直流线路首端接地故障, 故障时间 100 ms, 接地电阻 0.01 Ω 。

图 5 为该实验过程录波波形。波形图中, PactSA 为扎鲁特侧交流电网有功功率, S1)UALA11、S1)UBLA11、S1)UCLA11 为扎鲁特站交流电网三相电压, UacApu 为扎鲁特站交流电压有效值的标么值, S1)UDLA1 为扎鲁特站极 1 直流母线电压, IDLHA1 为扎鲁特站极 1 直流母线电流, QTXJ1Aflt、QTXJ2Aflt 为扎鲁特站两台调相机实际无功出力。

由图 5 可以看出: 换流站直流线路首端发生接地故障 100 ms 后, 在调相机具有一定初始无功出力的情况下, 直流线路保护正确动作, 直流系统原压重启一次成功。在故障及直流重启期间, 扎鲁特站交流系统电压陡降后又速升, 调相机的暂态无功出力则对应变化, 对交流电压起到动态支撑作用。

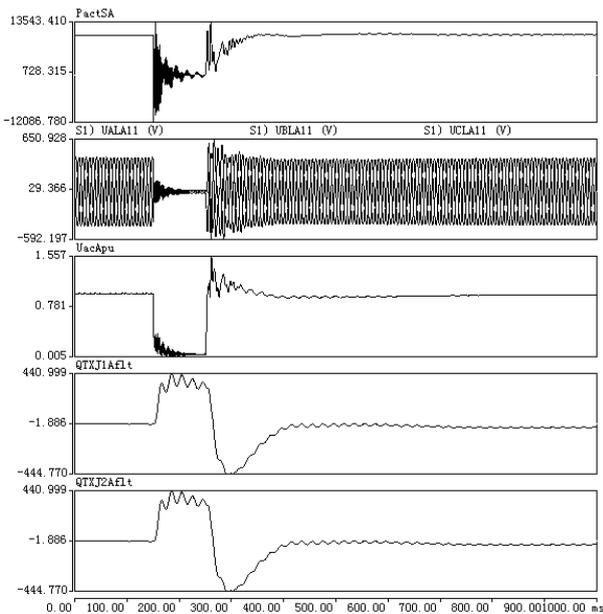


图 3 接入调相机的换流站交流系统故障实验波形-0 Mvar
Fig. 3 Experimental waveform of AC system fault in converter station connected with synchronous condenser -0 Mvar

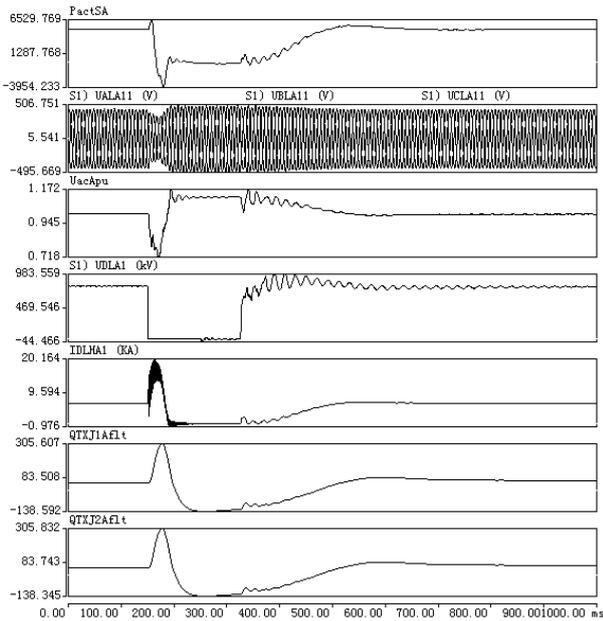


图5 接入调相机的换流站直流线路故障实验波形

Fig. 5 Experimental waveform of DC line fault in converter station connected with synchronous condenser

4 结论

实验结果表明, 调相机及换流站交流滤波器的无功功率协调控制策略可靠有效, 既保证了调相机对交流电网的动态支撑作用不受负面影响, 又充分发挥了调相机在特高压直流输电系统中的无功补偿作用, 使其深度参与了换流站稳态无功功率平衡控制, 并推后了换流站操作交流滤波器的时机, 在一定程度上能够减少交流滤波器的动作频次, 从而提升相关设备的使用寿命。

该协调控制策略可提升特高压直流输电系统的经济性和可靠性, 在已有和新建的配置有同步调相机的特高压换流站都具备良好的工程实用价值。

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] 黄俊辉, 汪惟源, 王海潜, 等. 基于模拟退火遗传算法的交直流系统无功优化与电压控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(10): 37-43.
HUANG Junhui, WANG Weiyuan, WANG Haiqian, et al. Study of hybrid genetic algorithm and annealing algorithm on reactive power optimization and voltage control in AC/DC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(10): 37-43.
- [4] ZOU Guibin, HUANG Qiang, SONG Shenglan, et al. Novel transient-energy-based directional pilot protection method for HVDC line[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(1): 12017, 2(2): 159-168. DOI: 10.1186/s41601-017-0047-z 5.
- [5] 李明节. 大规模特高压交直流混联电网特性分析与运行控制[J]. 电网技术, 2016, 40(4): 985-991.
LI Mingjie. Characteristic analysis and operational control of large-scale hybrid UHV AC/DC power grids[J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 985-991.
- [6] 张彦凯, 魏久升, 史玉杰. 新型同步调相机动态无功特性分析研究[J]. 信息技术与网络安全, 2019, 38(1): 82-86.
ZHANG Yankai, WEI Jiusheng, SHI Yujie. Analysis talk on dynamic reactive power characteristic of new type synchronous condenser[J]. Information Technology and Network Security, 2019, 38(1): 82-86.
- [7] 罗军, 闫昊辉, 王天一, 等. 新一代调相机保护配置及运行方式研究[J]. 河北电力技术, 2019, 38(1): 13-16.
LUO Jun, LÜ Haohui, WANG Tianyi, et al. Study on relay protection scheme and operation mode of new generation synchronous condenser[J]. Hebei Electric Power, 2019, 38(1): 13-16.
- [8] 殷威扬, 杨志栋. 特高压直流工程无功平衡和补偿策略[J]. 高电压技术, 2006, 32(9): 50-54.
YIN Weiyang, YANG Zhidong. Study on reactive power balance and compensation strategy for UHVDC project[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(9): 50-54.
- [9] 张爱玲, 姚致清, 涂仁川, 等. 云广特高压直流输电工程站控系统的设计缺陷及改进分析[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(4): 117-123.
ZHANG Ailing, YAO Zhiqing, TU Renchuan, et al. Design limitation and improvement of station control system in Yunguang UHVDC project[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(4): 117-123.
- [10] 涂仁川, 赵成功, 刘志军, 等. 减小交直流电网无功交换的无功控制策略研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2018, 39(1): 17-22, 27.
TU Renchuan, ZHAO Chengong, LIU Zhijun, et al. Study on reactive power control strategy for reducing reactive power exchange between AC and DC power grids[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2018, 39(1): 17-22, 27.
- [11] ALI A, QIAO Li, GUO Chunyi, et al. Impact of synchronous condenser on the dynamic behavior of LCC-based UHVDC system hierarchically connected to AC system[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2019, 5(2): 190-198.
- [12] 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.

- [13] 郑涛, 余青蔚, 詹荣荣, 等. 调相机接入对发电机失磁保护的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(4): 50-56. ZHENG Tao, YU Qingwei, ZHAN Rongrong, et al. Impact of synchronous condenser access on generator loss of excitation protection[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(4): 50-56.
- [14] 马一鸣, 周理兵, 王晋, 等. 新型调相机接入对特高压直流输电线路动态过程的影响分析[C]//超/特高压直流输电技术会议论文集, 全球能源互联网发展合作组织, 山东大学:《全球能源互联网》编辑部, 2018: 9. MA Yiming, ZHOU Libing, WANG Jin, et al. Analysis for influence of novel synchronous condenser access on dynamic process of UHVDC transmission lines[C]// Proceedings of Conference on HVDC Transmission Technology, Global Energy Interconnection Development and Cooperation Organization, Shandong University: Global Energy Interconnection Editorial Office, 2018: 9.
- [15] 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.
- [16] MA Yiming, RUAN Ling, XIAO Yang, et al. Modelling and analysis of the UHVDC transmission receiving system considering 300 Mvar novel synchronous condenser[J]. The Journal of Engineering, 2019(16): 955-960.
- [17] WANG Qiang, LI Tianran, TANG Xiaobo, et al. Study on the site selection for synchronous condenser responding to commutation failures of multi-infeed HVDC system[J]. The Journal of Engineering, 2019(16): 1413-1418.
- [18] 刘振亚, 张启平, 王雅婷, 等. 提高西北新甘青 750 kV 送端电网安全稳定水平的无功补偿措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(5): 1015-1022. LIU Zhenya, ZHANG Qiping, WANG Yating, et al. Research on reactive compensation strategies for improving stability level of sending-end of 750 kV Grid in Northwest China[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(5): 1015-1022.
- [19] 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): 22-28. 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): 22-28.
- [20] 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.
- [21] 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 synchronous condenser and power electronic reactive-power compensation devices in application in UHV DC/AC grid[J]. Power System Technology, 2018, 42(7): 2095-2102.
- [22] 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.
- [23] 常海军, 霍超, 刘福锁, 等. 提高弱送端电网暂态电压稳定水平的调相机优化配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(6): 90-95. CHANG Haijun, HUO Chao, LIU Fusuo, et al. Research on optimal allocation method of synchronous condensers for improving transient voltage stability level of weak sending-end power grid[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(6): 90-95.
- [24] 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.
- [25] 扎鲁特-青州±800 kV 特高压直流输电工程成套设计书: 111-B3441415G006-BDC-01-02-001[S]. Design of ±800 kV UHVDC transmission project from Zhalute to Qingzhou: 111-B3441415G006-BDC-01-02-001[S].

收稿日期: 2019-05-27; 修回日期: 2019-07-22

作者简介:

孙巍峰(1979—), 男, 本科, 工程师, 研究方向为高压直流输电工程控制系统研究与设计; E-mail: sunweifeng@sina.com

崔晨(1990—), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为高压直流输电工程控制系统研究与设计; E-mail: cuichen_xj@163.com

周晓风(1988—), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为高压直流输电工程控制系统研究与设计。E-mail: zhouxiaofengxj@126.com

(编辑 姜新丽)