

宝鸡换流站交直流系统无功补偿建模与仿真

焦宇峰¹, 刘敏¹, 韩军¹, 杨松^{2,3}, 宋波^{2,3}

(1.国网陕西省电力公司检修公司, 陕西 西安 710045; 2.西安理工大学水利水电学院, 陕西 西安 710048;
3.西安海纳输配电设备有限责任公司, 陕西 西安 710032)

摘要: 宝鸡换流站交直流系统的实际设备参数和运行状况, 由于在传统电网换相换高压直流输电系统中, 换流站的换流过程需要消耗大量的无功功率, 合理的无功补偿至关重要。介绍了交直流系统的等效模型, 分析了换流站无功消耗及分组的计算方法, 论述了换流器无功补偿的原则, 并采用PSCAD分别对换流站的稳态运行情况和无功补偿装置投入对换流母线电压的影响情况进行了仿真, 验证了模型的正确性以及分组投入的可行性, 为进一步研究交、直流系统的相互影响奠定基础。

关键词: 高压直流输电; 无功补偿; 交流滤波器; 电压控制

Modeling and simulation of reactive power compensation for Baoji AC and DC system based on PSCAD

JIAO Yufeng¹, LIU Min¹, HAN Jun¹, YANG Song^{2,3}, SONG Bo^{2,3}

(1. State Grid Shanxi Electric Power Maintenance Company, Xi'an 710045, China; 2. Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 3. Xi'an Haina Transmission and Distribution Equipment Co., Ltd., Xi'an 710032, China)

Abstract: According to the actual equipment parameters and operating conditions of the Baoji AC and DC system, combined with the typical control mode of the HVDC transmission system, due to a large amount of reactive power consumed by the converter station during the commutation process, reasonable AC filter configuration is critical. The reactive power consumption of the converter station and the switching condition of the filter are analyzed in different operation modes. The electromagnetic simulation software PSCAD is used to simulate the steady-state operation of the converter station and the process of switching the AC filter. The simulation results verify the correctness of the model and the feasibility of reactive group switching, which lays a foundation for further study of the interaction between AC and DC systems.

Key words: HVDC transmission; reactive power compensation; AC filter; voltage control

0 引言

宝鸡换流站是我国也是世界上第一座将交流变电站和直流换流站同址合建的换流变电站, 它的建成投运增强了区域电网之间的电力交换能力, 使得西北电网与华中电网两大电网进入了水火互济和风光互补的新阶段, 具有深刻的现实

意义。

宝鸡换流站的直流输电系统在带来巨大经济效益的同时, 也产生了一系列新问题^[1], 而电力电子技术的发展大大推进了交直流输电中一些关键问题的解决。在对系统进行建模时, 如果系统要求的准确度并不是很高, 常常会对一些交直流输

电系统模型进行简化处理,以缩短仿真的时间^[2]。文献[3]介绍了利用电力系统实时数字仿真器RTDS搭建向家坝—上海特高压直流输电系统的建模仿真过程,对比实际工程,验证了该直流输电模型的正确性,同时说明了控制系统部分的通用性,为研究其他工程或科研项目提供了实验依据。文献[4-7]利用PSCAD搭建了高压直流输电系统的仿真模型,详细介绍了直流输电换流器的开关特性和换相过程,同时分析了系统故障后主要电气量的变化情况,为模型的分析研究提供了依据。文献[8-9]详细介绍了糯扎渡和溪洛渡高压直流输电工程的无功补偿控制问题。

本文根据宝鸡换流站的实际运行情况建立了交直流输电系统仿真模型,对变电站和换流站内的一次设备进行了详细建模。直流系统模型主要包括换流站的换流器、换流变压器、无功补偿设备、滤波设备和控制系统;交流系统模型主要

包括电源和负荷,一般采用动态等值方法进行简化。换流站在工作过程中需要消耗大量的无功功率,为保证直流系统的稳定运行和交流母线的电压在允许范围,交流滤波器配置至关重要,通过分析换流站的无功消耗情况,结合无功控制要求和交流滤波器的分组投切原则,建立仿真模型并验证其正确性和可行性。

1 交直流输电系统简介

1.1 换流站的基本结构

宝鸡换流站投运后,对西北地区电网的运行、频率和有功/无功动态稳定等各个方面都产生了不同程度的影响。宝鸡变电站交流系统有3个电压等级,分别为750 kV、330 kV和66 kV。在直流系统中,通过控制策略整流站可将交流转换为直流,逆变站可将直流转换为交流^[6]。图1为交直流系统的主拓扑图。

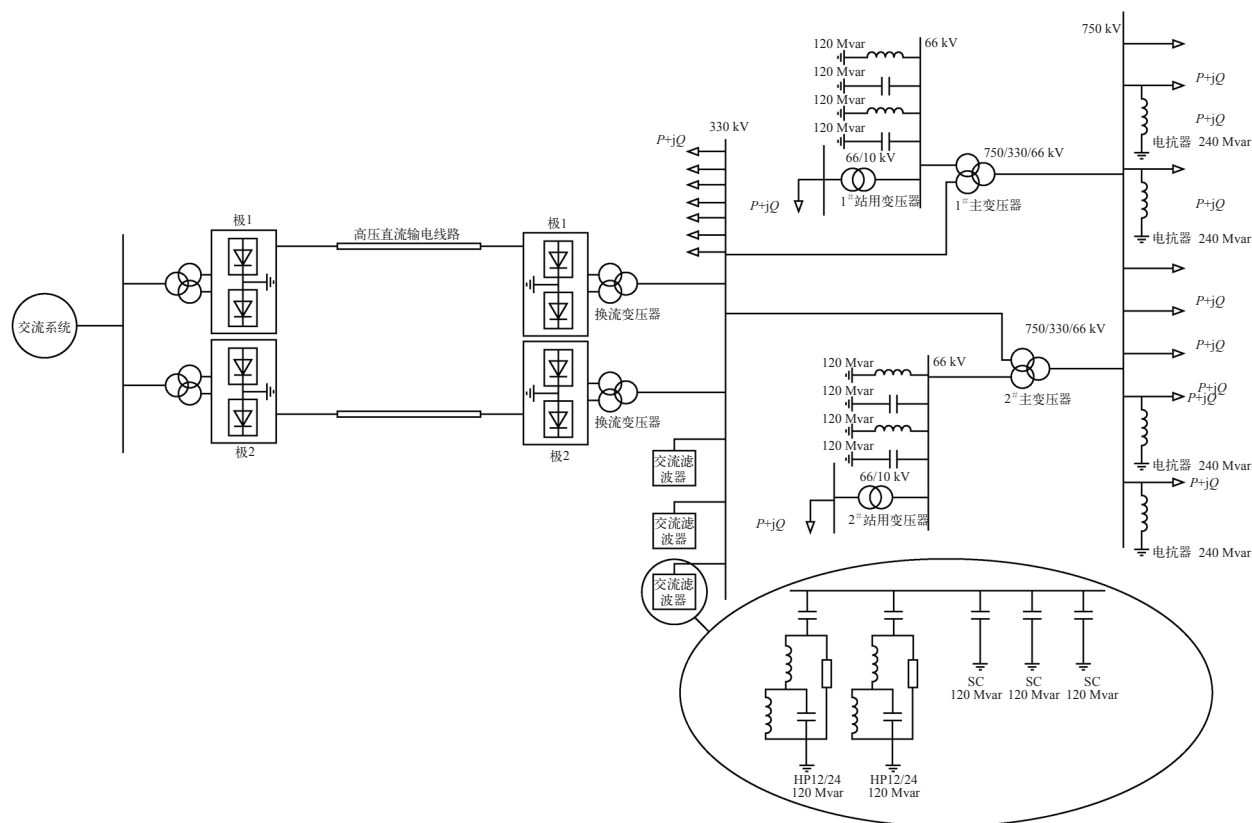


图1 交直流系统的主拓扑图

Fig. 1 Main topology diagram of AC and DC system

1.2 换流站中主要设备的配置

(1) 交流系统的主要设备

750 kV设备设计2条母线，主接线采用3/2接线方式，主变压器2组（容量为 $2 \times 2\ 100\ \text{MV} \cdot \text{A}$ ），8回出线。330 kV设备设计2条母线，主接线均采用3/2接线方式。66 kV设备设计4条母线，主接线均采用单母线接线方式，66 kV并联电抗器8台，并联电容器8台。

(2) 直流系统的主要设备

换流站运行直流电压为双极 $\pm 500\ \text{kV}$ ，每极采用12脉动换流阀组，共计2组，每极额定电流为3 000 A，功率为1 500 MW，共计3 000 MW。14台油浸单相双绕组换流变压器（含2台备用）；

直流滤波器4组（每极2组）；交流滤波器组3大组（6组交流滤波器、9组电容器）；换流站的交流侧电压等级为330 kV。

1.3 换流站一次设备模型

根据换流站的实际运行情况，分别对750 kV、330 kV和66 kV进行等效，不同的季节西北和西南的负荷消耗情况不同，德宝直流输电线路潮流的方向不同，因此宝鸡换流站既可以工作在整流状态也可以工作在逆变状态，此时交流系统的性质不同。当宝鸡换流站工作在逆变模式时，交流系统相当于负荷；当宝鸡换流站工作在整流模式时，交流系统相当于电源。交流系统的等效模型如图2所示。

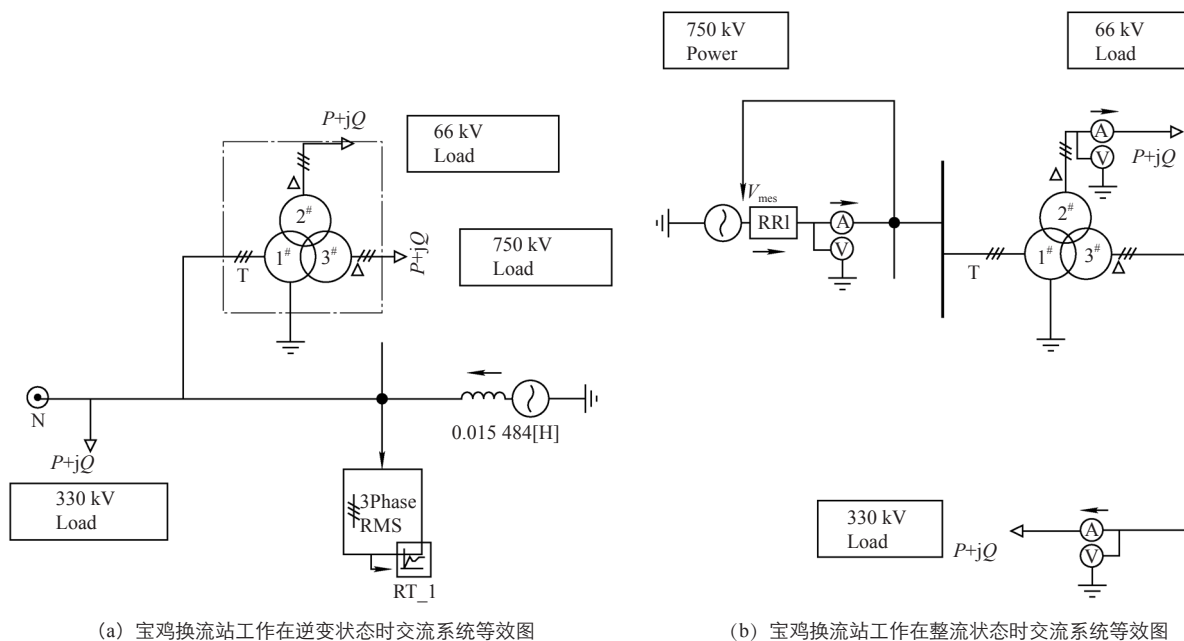


图2 交流系统等效图

Fig. 2 Equivalent diagram of AC system

宝鸡换流站为传统 LCC-HVDC，它以电网换相为基础，以由晶闸管组成的三相全波桥式电路为基本模块，即6脉动换流电路。本站采用12脉动换流电路，即由两个6脉动换流电路串联而成。根据系统的要求，通过控制晶闸管的触发角，使晶闸管按照一定的顺序导通。其原理接线如图3所示。

LCC-HVDC采用电流源换流器作为换流单

元，换流过程需要消耗大量的无功功率。换流站在合理利用交流系统提供的无功功率的同时，不足的部分则由无功补偿设备来提供，无功补偿多采用就地平衡方式^[6]。直流系统所需的无功功率一般由交流滤波器和并联电抗器提供，合理的无功补偿既可以使交流母线电压稳定在合理的范围内，还可以减少系统产生的谐波。根据工程实际要求，本站采用3大交流滤波器组来补偿系统的

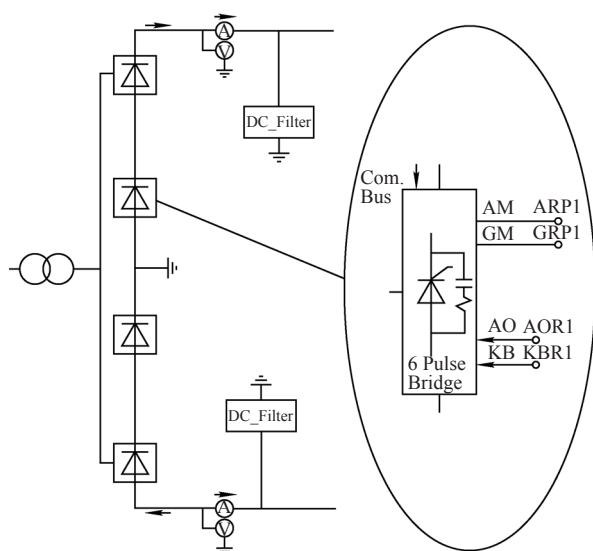


图3 换流器原理接线图

Fig. 3 Principle wiring diagram of the inverter

无功，同时滤除换流器产生的12、24次谐波，交流滤波器组的主要参数如表1所示，结构如图4所示。

表1 交流滤波器组的主要参数

Tab. 1 Main parameters of the AC filter bank

类型	额定功率/ Mvar	电容器 C_1	电容器 C_2	电抗器 L_1/mH	电抗器 L_2/mH	电阻器 R_1/Ω	组数/ 组
HP12/24	120	33.72	5.9	11.282	6.139	300	6
SC	120	33.72	—	—	—	—	9

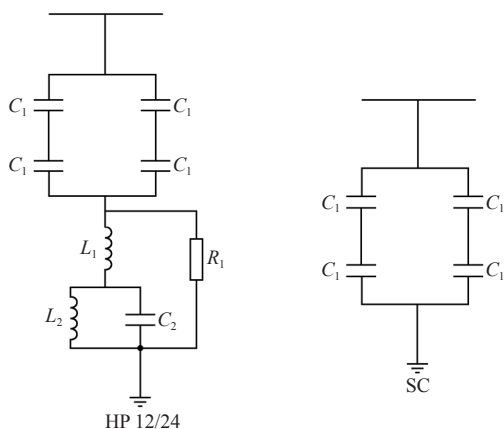


图4 双调谐交流滤波器与电容器结构图

Fig. 4 Configuration of double tuned AC filter and capacitor

2 换流站无功消耗分析

2.1 换流器功率因数

基于电流源的换流阀，考虑触发角 α 和换相角后，整流站交流侧电流相位滞后于电压相位，因此交流系统需要提供容性无功，而直流系统则相当于无功负荷。通常整流站消耗的无功功率占40%~50%，逆变站消耗的无功功率占50%~60%。换流阀正常运行时，整流器和逆变器的功率因数计算如下^[10]。

(1) 整流器功率因数近似为

$$\varphi_R \approx 12\cos\alpha + \cos\alpha + \mu_R \quad (1)$$

功率因数角近似为

$$\varphi_R \approx \alpha + \mu_R \quad (2)$$

(2) 逆变器功率因数近似为

$$\cos\varphi_I \approx 12\cos\gamma + \cos\gamma + \mu_I \quad (3)$$

功率因数角近似为

$$\varphi_I \approx \gamma + \mu_I^2 \quad (4)$$

式中， φ_R 、 φ_I 分别为整流器和逆变器的功率因数角。

由式(1)、式(3)可知，换流器的功率因数与 α 和 γ 有关， α 和 γ 越大，整流侧的功率因数越小，输送相同的有功功率吸收的无功越多，即消耗的无功越多^[11]。

2.2 换流器消耗的无功功率

为补偿换流站消耗的大量无功，换流站需投入大量的无功补偿设备，无功变化必定会引起交流侧电压的变化。已知系统参数，整流侧的触发角与逆变侧的关断角略有不同，换流器工作过程中所需的无功功率也不同，以本站整流侧消耗的无功功率为例，计算换流站所消耗的无功功率(对于逆变侧， α 应换成 γ)为^[12-13]

$$Q_R = P \tan\varphi \quad (5)$$

$$\tan\varphi = \frac{\frac{\pi\mu}{180} - \sin\mu\cos(2\alpha + \mu)}{\sin\mu\sin(2\alpha + \mu)} \quad (6)$$

$$\mu = \cos^{-1}[U_d/U_{d0} - (X_c/\sqrt{2})(I_d/E_{II})] - \gamma \quad (7)$$

式中， Q_R 为整流器(或逆变器)消耗的无功功

率； P 为直流输送的有功功率； φ 为功率因数角； U_d 为直流电压； U_{d0} 为理想直流空载电压； X_c 为每相换相电抗； E_{11} 为换流变压器阀侧绕组空载电压有效值； I_d 为直流运行电流。

3 换流站的无功补偿

3.1 换流站无功补偿原则

交直流系统的稳定运行与无功控制有较大关系，为满足交流系统和直流系统的共同要求，必需设置一定的原则，在满足无功控制优先级和滤波器投切原则前提下投切无功补偿装置。

无功控制是整个直流控制系统中一个重要的集合功能模块，每个模块根据预先设定的优先级完成换流站交直流系统无功的计算、交换和控制，通过控制投切的交流滤波器，保证换流器交流侧的谐波水平在允许范围内，其控制参数为交流侧母线电压或是交直流系统间无功功率的交换值。无功控制包含5项功能，其具有一定的控制优先级别，依次是绝对最小滤波器组数、最高/最低电压限制、最大无功交换限制、最小滤波器组数以及无功交换控制/电压控制^[12]，5个功能模块的优先级逐次降低，如产生冲突应首先保证上一级的优先级。

滤波器在投切过程中应遵循一定的原则，首先交流滤波器较并联电容器优先投入，切除时则相反；同类型无功元件应满足“先投先切”原则，所有无功元件的投切应尽可能均衡；当直流输电线路上传送的功率发生变化时，滤波器组的投切应遵循一定的类型顺序，保证所投入的无功单元具备良好的滤波性能^[13-14]。

3.2 换流站无功分组

为了适应直流系统的各种运行方式和减小无功补偿装置在投切过程中给系统带来的冲击，一般对无功补偿装置进行分组投切。当换流站所需的总无功补偿容量一定时，为了节省投资和减少占地面积，分组越少越好^[15-16]。无功分组的投切势必会引起换流母线电压的变化，根据我国电网的技术规程要求，投切无功小组时所引起的换流母

线暂态电压变化率一般不超过2%，稳态电压变化率一般不超过1%；投切无功大组时所引起的换流母线暂态电压变化率一般不超过6%^[12]。

换流站换流母线的暂态电压变化率与换流站投切无功分组容量的关系为

$$\Delta U = \Delta Q / S_d \tag{8}$$

式中， ΔU 为换流站换流母线暂态电压变化率，%； ΔQ 为换流站投切的无功大组或小组容量，Mvar； S_d 为换流站换流母线的短路容量，MV·A。

根据上述无功分组要求，综合经济性和技术性要求，本站330 kV交流场配置交流滤波器共3大组，每组包含2组交流滤波器（ACF），3组并联电容器装置（SC）。无功小组通过断路器接在无功大组母线上，无功大组通过断路器接入换流母线上。交流滤波器配置如表2所示。

表2 交流滤波器配置

Tab. 2 Configuration of AC filter

大组编号	类型	额定容量/Mvar	额定电压/kV
WA-Z1	HP12/24	120	345
	HP12/24	120	345
	SC	120	345
	SC	120	345
	SC	120	345
WA-Z2	HP12/24	120	345
	HP12/24	120	345
	SC	120	345
	SC	120	345
	SC	120	345
WA-Z3	HP12/24	120	345
	HP12/24	120	345
	SC	120	345
	SC	120	345
	SC	120	345

在双极全压运行方式下，换流站消耗的无功功率按输送有功功率的50%计算。表3分析了直流输送2 800 MW和3 000 MW功率时，无功补偿装置投切策略。

表3 双极全压运行方式下无功补偿装置投切策略

Tab. 3 Switching strategy of reactive power compensation device under bipolar full-pressure operation mode

换流站工作在整流模式		换流站工作在逆变模式	
直流功率/MW	滤波器组合	直流功率/MW	滤波器组合
2 800	6A+6B	2 800	6A+6B
3 000	6A+7B	3 000	6A+7B

注：A代表HP12/24双调谐滤波器，B代表并联电容器。

4 换流站交直流系统仿真

本文在参考国际大电网会议 (CIGRE) 直流输电第一标准测试系统的控制策略基础上, 结合宝鸡换流站的实际运行参数搭建仿真模型, 交流系统的等效结构和换流器的原理结构分别见图2、图3, 换流站工作在不同状态时的仿真参数如表4所示。换流母线电压的允许波动范围为345~360 kV, 允许的最高运行电压为363 kV。直流极母线电压的额定值为500 kV, 最大值为 ± 515 kV, 最小值为 ± 485 kV。换流器触发角 α 的额定值为 15° , 允许的波动范围为 $12^\circ \sim 17^\circ$; 关断角 γ 的额定值为 17° , 允许的偏移范围为 $\pm 1^\circ$ 。

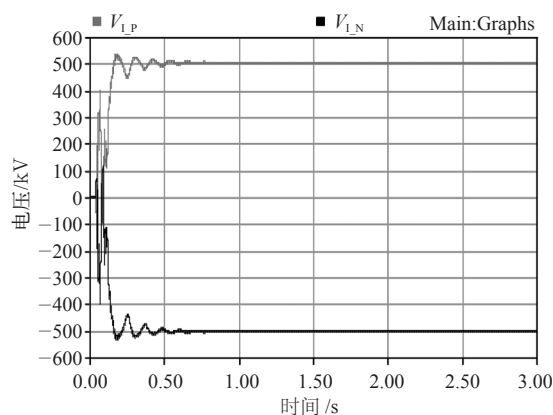
表4 仿真参数
Tab. 4 Parameters of simulation

工作状态	宝鸡站换流变压器的电压比/kV	容量/MV·A	正序漏阻抗标幺值
整流状态	345/218.190	937.7	0.18
逆变状态	345/221.618	940.2	0.18

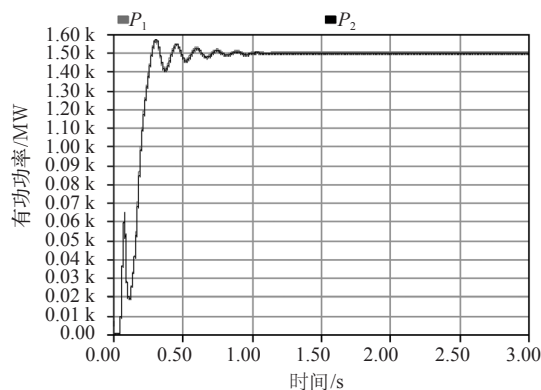
4.1 换流站工作在逆变状态时的运行分析

1) 直流系统输送3 000 MW额定功率, 功率方向为德阳换流站到宝鸡换流站, 此时宝鸡换流站工作在逆变状态, 双极全电压运行, 仿真时间为3 s。综合考虑所需补偿的无功容量、投切影响、无功平衡和电压控制等要求, 通过计算得出需投入13组无功补偿装置, 包括6组交流滤波器和7组电容器, 考虑直流线路的功率损耗, 送到逆变侧的有功功率约为2 928 MW, 换流母线电压为348.2 kV, 在规定的电压范围内。因此, 在满足无功平衡要求下, 仿真验证了宝鸡换流站能够实现直流系统功率的稳定输送。双极直流输电线上的电压、有功功率和换流母线电压的有效值如图5所示。

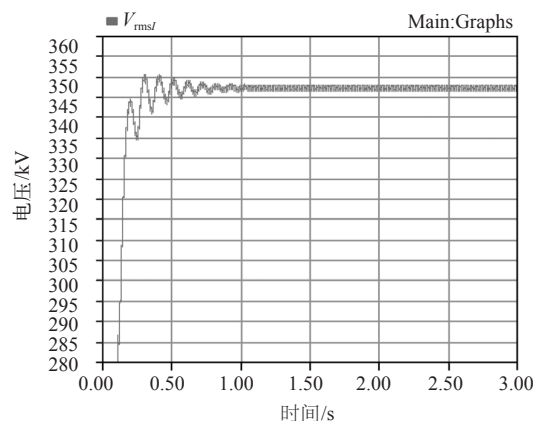
2) 双极全压运行方式下, 直流输送的有功功率约为2 847 MW时, 为满足绝对最小滤波器组数要求, 首先保证系统中有4组交流滤波器。根据先投交流滤波器再投电容器的原则, 分别在0.5 s时投入2组交流滤波器, 1 s时投入2组两组电容器, 1.5 s时投入2组电容器, 2 s时投入2电容器, 共12组, 分别检测不同投入情况下换流母线电压的波动情况, 计算每阶段的换流母线电压变化率未超过规



(a) 逆变侧双极上的直流电压



(b) 直流输送的有功功率



(c) 换流母线电压的有效值

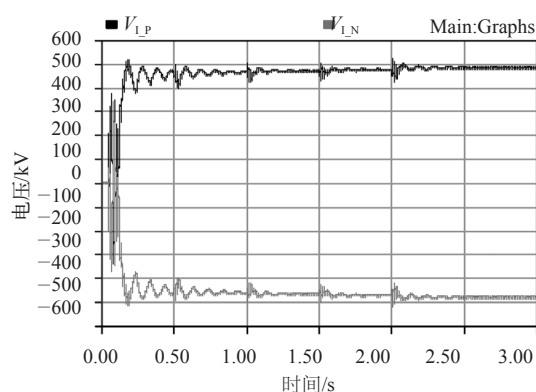
图5 换流站工作在逆变状态 (额定功率)

Fig. 5 Converter station works in inverter state (rated power)

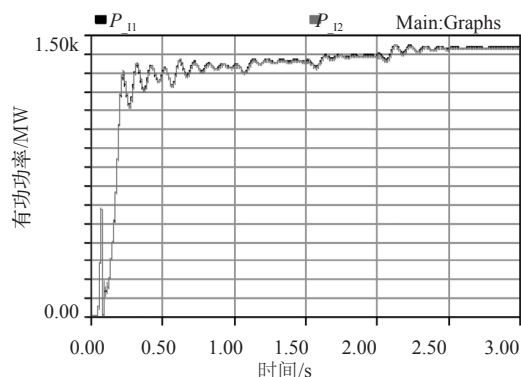
定值, 且投入组数与表3相符, 说明这种投入方式可行。仿真结果如图6所示。

4.2 换流站工作在整流状态时的运行分析

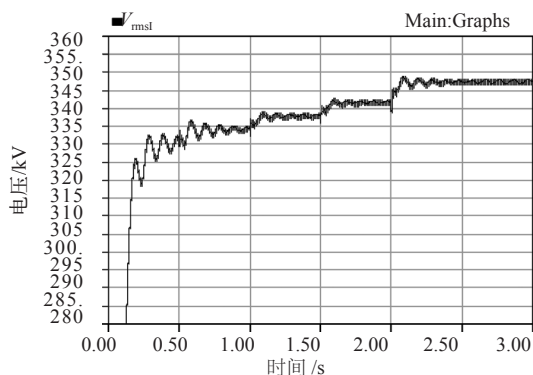
1) 直流系统输送3 000 MW额定功率, 功率方向是宝鸡换流站向德阳换流站, 此时宝鸡换流站工作在整流状态, 通过计算需要投切13组无功补偿装置, 根据前面的原则, 应包括6组交流滤波器



(a) 逆变侧双极上的直流电压



(b) 直流输送的有功功率



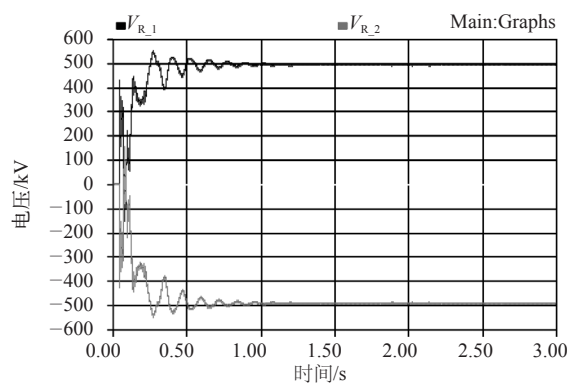
(c) 换流母线电压有效值

图6 换流站工作在逆变状态（非额定功率）

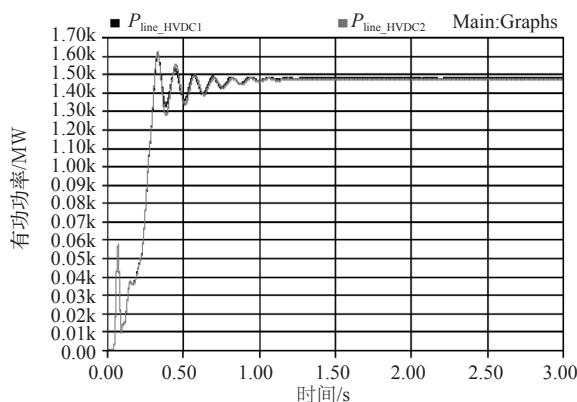
Fig. 6 Converter station works in inverter state (non-rated power)

和7组电容器，在无功补偿足够且合理的情况下，双极直流输电线路上的电压、有功功率和换流母线电压有效值如图7所示。

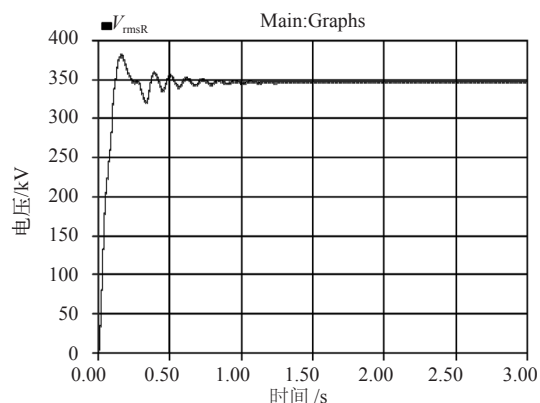
2) 双极全压运行方式下，直流系统输送约为2 858 MW的有功功率时，首先满足绝对最小滤波器组数要求，即系统中已有4组交流滤波器。根据先投交流滤波器再投电容器的原则，分别在1 s时投入2组交流滤波器，1.5 s时投入2组电容器，2 s时投入2组电容器，2.5 s时再投入2组电容器，检测



(a) 整流侧双极上的直流电压



(b) 直流输送的有功功率



(c) 换流母线电压的有效值

图7 换流站工作在整流状态（额定功率）

Fig. 7 Converter station works in rectified state (rated power)

不同投切情况下换流母线电压的变化情况，计算每阶段换流母线电压的变化率未超过规定要求，且投入组数与表3相符，说明这种投入顺序可行。直流输电线路上的电压、传输的功率和换流母线电压如图8所示。

5 结束语

根据宝鸡换流站的工程实际数据，在PSCAD中建立了换流站在整流和逆变两种不同工作模式

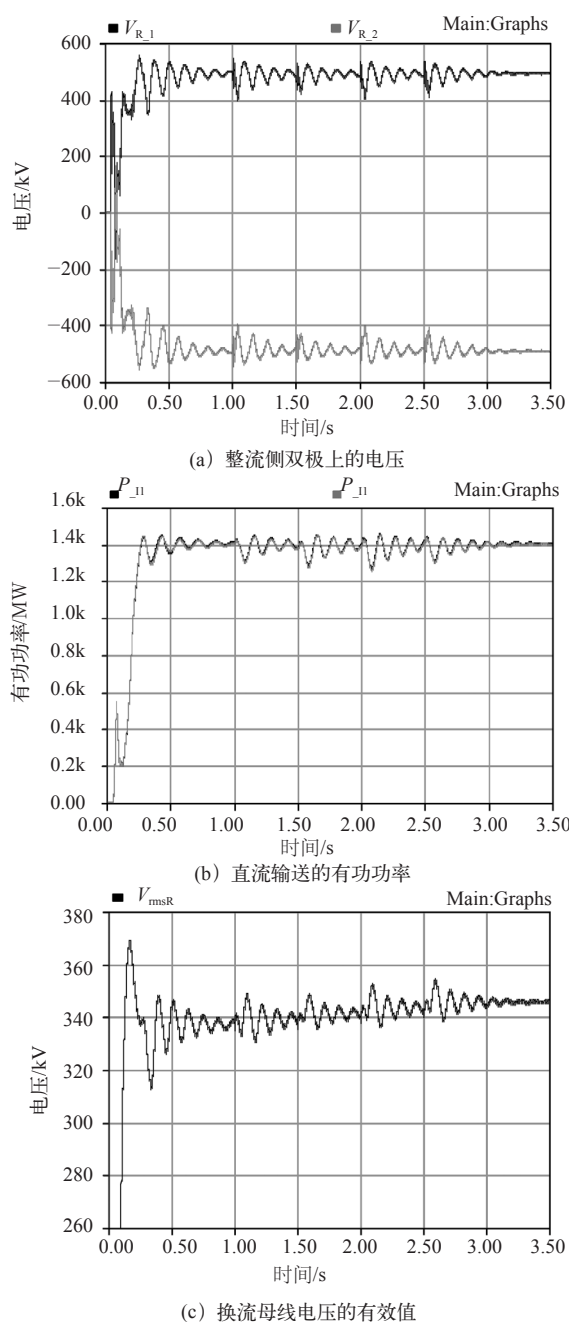


图8 换流站工作在整流状态(非额定功率)

Fig. 8 Converter station works in rectified state (non-rated power)

时的模型,分析了换流站的无功消耗情况及换流站的无功补偿原则和无功分组情况。通过仿真验证了换流站在整流模式和逆变模式时,稳态工作情况下所需投入的滤波器组数,以及分组投入无功补偿装置对换流母线电压的影响,能够保证换流母线电压在允许范围内,且能够使站内无功达到平衡。

参考文献

- [1] 刘振亚. 特高压交直流电网[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
- [2] 梁旭明, 张平, 常勇. 高压直流输电技术现状及发展前景[J]. 电网技术, 2012, 36(4): 1-9.
LIANG Xuming, ZHANG Ping, CHANG Yong. Recent advances in high-voltage direct-current power transmission and its developing Potential[J]. Power System Technology, 2012, 36(4): 1-9.
- [3] 王祥旭, 郭春林, 肖湘宁, 等. 基于RTDS±800 kV的特高压直流输电系统的建模与仿真[J]. 华东电力, 2011, 39(3): 335-338.
WANG Xiangxu, GUO Chunlin, XIAO Xiangning, et al. RTDS-based modeling and simulation of ± 800 kV UHVDC transmission system[J]. East China Electric Power, 2011, 39(3): 335-338.
- [4] 郑晓冬, 邵能灵, 杨光亮, 等. 特高压直流输电系统的建模与仿真[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(7): 10-14, 61.
ZHENG Xiaodong, TAI Nengling, YANG Guangliang, et al. Modeling and simulation of UHVDC system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(7): 10-14, 61.
- [5] 尚肖肖. 高压直流输电系统控制策略仿真模型的研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2018.
SHANG Xiaoxiao. Research on the model of HVDC transmission control system[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2018.
- [6] 王昊. 基于PSCAD的呼辽直流系统建模及仿真研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
WANG Hao. Research on modeling and simulation of Hu-Liao DC system based on PSCAD[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.
- [7] 赵向磊. 基于PSCAD的宁东直流输电系统建模与仿真分析[D]. 济南: 山东大学, 2014.
ZHAO Xianglei. Modeling and simulation analysis

- of Ning Dong HVDC system based on PSCAD[D]. Jinan: Shandong University, 2014.
- [8] 涂仁川, 王胜, 关红兵, 等. 糯扎渡特高压直流输电工程无功控制策略研究[J]. 南方电网技术, 2013, 7(6): 31-36.
- TU Renchuan, WANG Sheng, GUAN Hongbing, et al. Research of the reactive power control strategy in Nuozhadu UHVDC project[J]. Southern Power System Technology, 2013, 7(6): 31-36.
- [9] 罗敬华, 汪娟娟, 梁泽勇, 等. 溪洛渡同塔双回直流输电工程无功平衡与补偿方案 [J]. 广东电力, 2014, 27(2): 93-99.
- LUO Jinghua, WANG Juanjuan, LIANG Zeyong, et al. Reactive power balance and compensation scheme for Xiluodu double circuits on the same tower DC power transmission engineering [J]. Guangdong Electric Power, 2014, 27(2): 93-99.
- [10] 朱晟毅. 串联多端直流输电无功补偿及控制策略研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.
- ZHU Shengyi. Research on reactive power compensation and control strategy for series MTDC transmission systems [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012.
- [11] 郭春义, 赵剑, 刘炜, 等. 抑制高压直流输电系统换相失败方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(增刊1): 1-10.
- GUO Chunyi, ZHAO Jian, LIU Wei, et al. A review of methods to mitigate the commutation failure for LCC-HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(Sup1): 1-10.
- [12] 高压直流换流站无功补偿与配置技术导则: GB/T 31460—2015[S].
- Technical guide for reactive power compensation and allocation of HVDC converter stations; GB/T 31460—2015[S].
- [13] 邓鸿强, 王渝红, 李兴源, 等. 高压直流换流站无功消耗及站内补偿装置配置综述[J]. 华东电力, 2012, 40(3): 382-387.
- DENG Hongqiang, WANG Yuhong, LI Xingyuan, et al. Overview of reactive power consumption and compensation device configuration in HVDC converter station[J]. East China Electric Power, 2012, 40(3): 382-387.
- [14] 邓艳平, 杨秀, 张美霞, 等. ± 800 kV向上直流换流站交流滤波器的配置与控制[J]. 高压电器, 2017, 53(2): 8-13.
- DENG Yanping, YANG Xiu, ZHANG Meixia, et al. Configuration and control of AC filter for converter station of Xiangjiaba-Shanghai ± 800 kV DC power transmission project[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(2): 8-13.
- [15] 汪娟娟, 梁泽勇, 李子林, 等. 高压直流输电系统低功率运行的无功控制策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(6): 154-158.
- WANG Juanjuan, LIANG Zeyong, LI Zilin, et al. Reactive power control strategy for low power operation of HVDC transmission system[J]. Automation of Electric Power, 2017, 41(6): 154-158.
- [16] 丁立国, 沈阳武, 许加柱, 等. 连接弱交流系统的高压直流换流站无功补偿协调控制策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(8): 22-29.
- DING Liguang, SHEN Yangwu, XU Jiazhu, et al. Coordinated control strategy of reactive compensation for HVDC converter station connected to weak AC system[J]. Automation of Electric Power, 2017, 41(8): 22-29.

作者简介



焦宇峰

焦宇峰 (1973—), 男, 高级工程师, 主要从事超高压电网运检管理工作。

(收稿日期: 2019-03-06) **EA**