Modeling and Simulation 建模与仿真, 2019, 8(2), 73-83
Published Online May 2019 in Hans. http://www.hanspub.org/journal/mos
https://doi.org/10.12677/mos.2019.82010

Optimization Research on Reactive Compensation of ±500 kV Baoji Converter Station

Min Liu[1], Junling Liu[2], Xin Wang[1], Xianju Kang[1], Bo Song[2,3]

[1]State Grid Shaanxi Electric Power Maintenance Company, Xi'an Shaanxi
[2]Xi'an University of Technology, Xi'an Shaanxi
[3]Xi'an Haina Transmission and Distribution Equipment Co., Ltd., Xi'an Shaanxi
Email: 1183765482@qq.com

Received: May 8th, 2019; accepted: May 21st, 2019; published: May 28th, 2019

Abstract

According to the actual situation of Baoji Converter Station, starting from the reactive power demand system and combining the current ability of the system to provide reactive power, the simulation analysis of the compensation mode in the station is carried out to find the defects of the existing switching mode and reactive compensation device through theoretical calculation and analysis, which proposes two schemes to improve the existing reactive compensation switching strategy and add SVC (TSC + TCR) reactive compensation device. The two schemes are modeled and simulated respectively, and the simulation results verify the feasibility of the scheme. Comparing before and after the introduction of SVC (TSC + TCR), the most suitable scheme for reactive compensation of Baoji Converter Station is obtained, which provides a basis for the improvement of reactive compensation device of Baoji Converter Station.

Keywords

Reactive Power Compensation, Switching Principle, SVC (Tsc + Tcr), Smooth Continuous Adjustment

±500 kV宝鸡换流站无功补偿的优化研究

刘　敏[1]，刘俊玲[2]，王　欣[1]，康咸菊[1]，宋　波[2,3]

[1]国网陕西省电力公司检修公司，陕西　西安
[2]西安理工大学，陕西　西安
[3]西安海纳输配电设备有限责任公司，陕西　西安
Email: 1183765482@qq.com

收稿日期：2019年5月8日；录用日期：2019年5月21日；发布日期：2019年5月28日

文章引用: 刘敏, 刘俊玲, 王欣, 康咸菊, 宋波. ±500 kV 宝鸡换流站无功补偿的优化研究[J]. 建模与仿真, 2019, 8(2): 73-83. DOI: 10.12677/mos.2019.82010

摘 要

针对宝鸡换流站的实际情况，从系统需求的无功功率入手，基于系统目前所能提供无功功率的能力，通过理论计算与分析研究，对站内的补偿方式进行仿真分析，发现现有投切方式和无功补偿装置的不足，提出改进现有无功补偿投切策略与增设SVC (TSC + TCR)无功补偿装置两种方案。分别对这两种方案进行建模仿真，仿真结果验证了方案的可行性。对引入SVC (TSC + TCR)前后进行比较，得出适合宝鸡换流站无功补偿的最优方案，为宝鸡换流站无功补偿装置改造提供了依据。

关键词

无功补偿，投切原则，SVC (TSC + TCR)，平滑连续调节

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

宝鸡换流站是国内首座交流 750 kV 变电站和直流±500 kV 换流站同址合建的换流变电站，是陕甘青宁电网东西部之间水火电功率交换的枢纽变电站；是西北(陕西)与华中(四川)直流联网西北侧的支撑点和出入口；是陕西省关中西部地区电源送出的汇集点。宝鸡换流站的建成投运，极大增强了西北电网与华中电网之间的电力交换能力，对于实现西北电网发展的外向型、送出型、规模型具有深刻的现实意义[1]。

宝鸡换流站无功配置包括确定交流系统无功能力、配置换流站无功补偿设备、确定直流系统的无功补偿和电压控制策略[2] [3]等，实现无功补偿配置的平衡和调节与控制方面的要求[4] [5]。本文针对宝鸡换流站的实际情况，从系统需要的实际无功功率入手。基于系统目前所能提供无功功率的能力，研究与类比其他已经运行换流站的无功补偿方案[6] [7] [8]，通过理论计算与分析研究，结合无功补偿的基本原理[9]-[14]，对站内的补偿方式进行仿真分析，验证电压是否满足要求。由仿真结果可知，现存的补偿方式能满足电压质量的要求，但存在一些不足，如容量无法实现连续调节、可能出现过补偿等。

针对以上的问题，本文改进投切策略和加入静止无功补偿器 SVC。增添 SVC (晶闸管控制无功发出或吸收、迅速响应系统无功需求，对系统提供动态无功支持[10])无功补偿装置，并对其进行仿真，验证优化方案的可行性。比较现有的补偿装置和加入静止无功补偿器 SVC 装置后两者的性能，得出最适合宝鸡换流站无功补偿的方案。

2. 宝鸡换流站无功补偿的配置

本站 330 kV 交流场配置有交流滤波器和并联电容补偿，交流滤波器共三大组，每大组包含 2 组交流滤波器(ACF)，3 组并联电容器装置(SC)，每小组无功补偿容量 120 Mvar，无功补偿容量总计 1800 Mvar。站内交流滤波器和并联电容主电路结构及分组情况如图 1。

3. 宝鸡换流站无功补偿的现状

3.1. 滤波器组和电容补偿的投切原则

在 330 kV 交流场功率变化的过程中，投切交流滤波器组要遵循相关规定。一般，交流滤器的安全运

行是首要条件，可由绝对最小滤波器控制实现；其次，考虑到站内谐波对交流系统的影响，可由最小滤波器容量要求控制实现；此外，换流站与交流系统的无功功率交换应在允许范围之内或交流母线电压应在安全运行范围之内，可由最大无功功率限制、交流过电压控制、最高或最低电压限制、无功交换控制或电压控制等来实现。

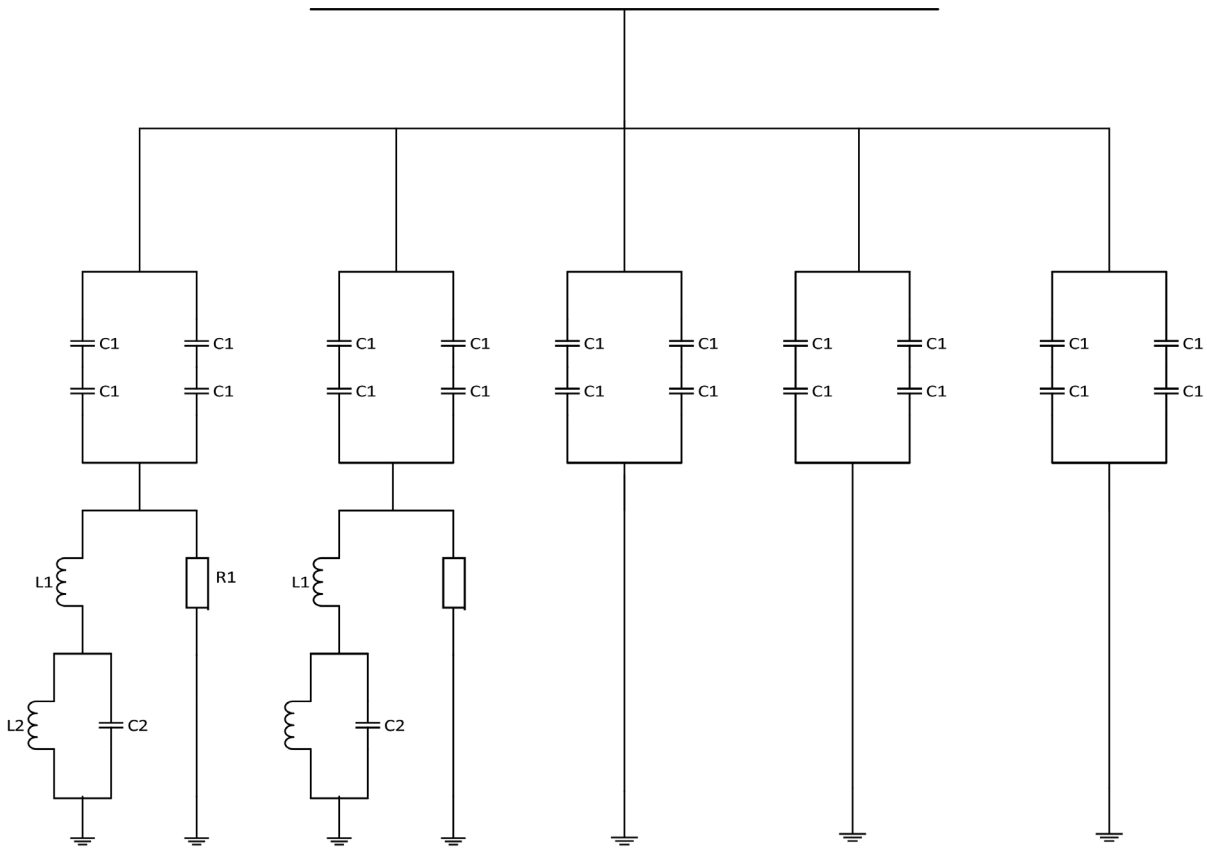


Figure 1. Circuit structure diagrams of capacitor and AC filters
图 1. 电容和交流滤波器的电路结构图

3.2. 暂态电压变化率要求

根据《高压直流换流站无功补偿与配置技术导则》[12]，无功小组投切导致的电压变化率一般应不大于 1.5%~2%；无功大组切除导致的换流站母线暂态电压变化率一般不应大于 5%~6%。换流站投切无功分组容量与换流站交流母线的暂态电压变化率关系为：

$$\Delta U = \frac{\Delta Q_{filter}}{s_d - \sum Q_{filter}} \tag{1}$$

式中：ΔU 为换流站交流母线的暂态电压变化率；ΔQ_{filter} 为换流站投切的无功分组容量，Mvar；s_d 为换流站交流母线的短路容量，MVA。

以宝鸡换流站为例，根据式(1)，一小组滤波器投入系统，电压变化率约为 1.3%；一大组滤波器被切除，最大电压变化率约为 5.8%。满足暂态电压变化率的标准要求。但由于宝鸡换流站附近区域有较重的负荷、较差的动态无功支撑能力、低电压问题使电网面临的主要问题，切除大组滤波器使得暂态电压有较大波动，这对陕西电网的运行是非常不利的。因此，在现有滤波器配置基础上，减小切除大组滤波器

对交流系统及站内交流滤波设备的影响应该重点加以考虑。

3.3. 现有无功装置补偿

在 Matlab/Simulink 环境下对宝鸡换流站无功补偿进行仿真，分析补偿前后对母线电压的影响。宝鸡换流站 330 kV 母线电压合格范围：345~360 kV，允许最高运行电压：363 kV，国调规定极解锁前电压不得高于 358 kV，解锁后电压控制在 340 kV~355 kV。下面对宝鸡换流站的实际运行情况进行仿真，分析投入不同容量的无功补偿对母线电压的影响。

3.3.1. 无功补偿仿真分析

将整个输出等效为一综合负荷，八回出线的等效有功功率为 194.7 MW，无功功率为 249.7 Mvar。3 大组无功补偿装置装设在逆变侧交流母线上，每大组配置双调谐滤波器两组共 240 Mvar，以及并联电容器三组共 360 Mvar，直流侧配置了 12/24 次直流滤波器。

1) 330 kV 交流场的拓扑图(图 2)

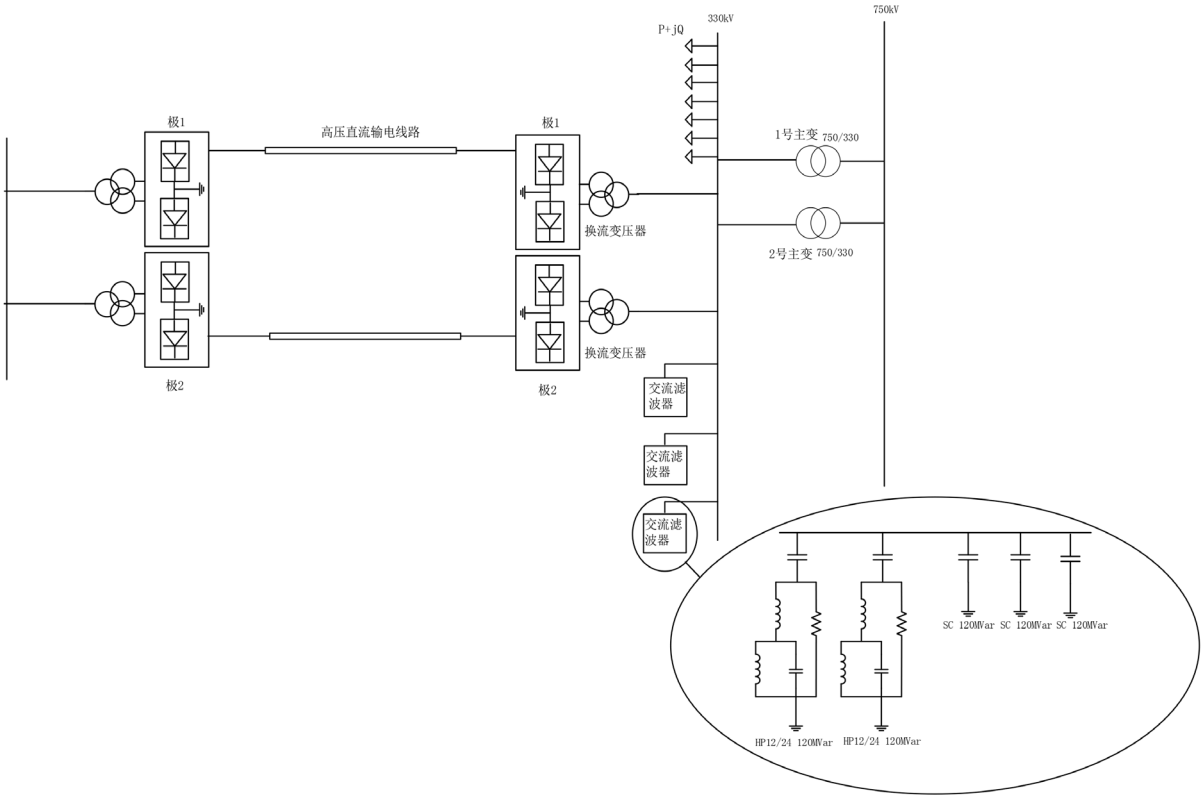


Figure 2. 330 kV topology
图 2. 330 kV 拓扑图

2) 仿真结果分析

由图 3~4 可知，随着投入无功补偿容量的增加，电压也随之升高。投入一大组交流滤波器(600 MVA)，电压升高了 4.12%；投入两大组交流滤波器(1200 MVA)，电压升高了 8.50%；三大组交流滤波器(3600 MVA)全部投入，电压升高了 13.14%。因此，投入一大组交流滤波器(600 MVA)，达不到电压的要求值(345 kV~360 kV)；投入两组交流滤波器，电压满足运行要求；三大组交流滤波器全部投入，此时电压大于 360 kV，母线电压值将超过允许值，这种方案属于无功功率过补偿。当母线电压高于允许值时，则不能再投

入无功补偿装置，再投入补偿装置会使电压更高，高电压会给交流滤波器带来冲击，影响其使用寿命，同时还会给其他用电设备带来冲击，威胁电力系统的平稳运行，因此不宜长期使用。此外，交流滤波器组的投入需要一定的时间，反应速度慢，且投入补偿时电压波动较大。

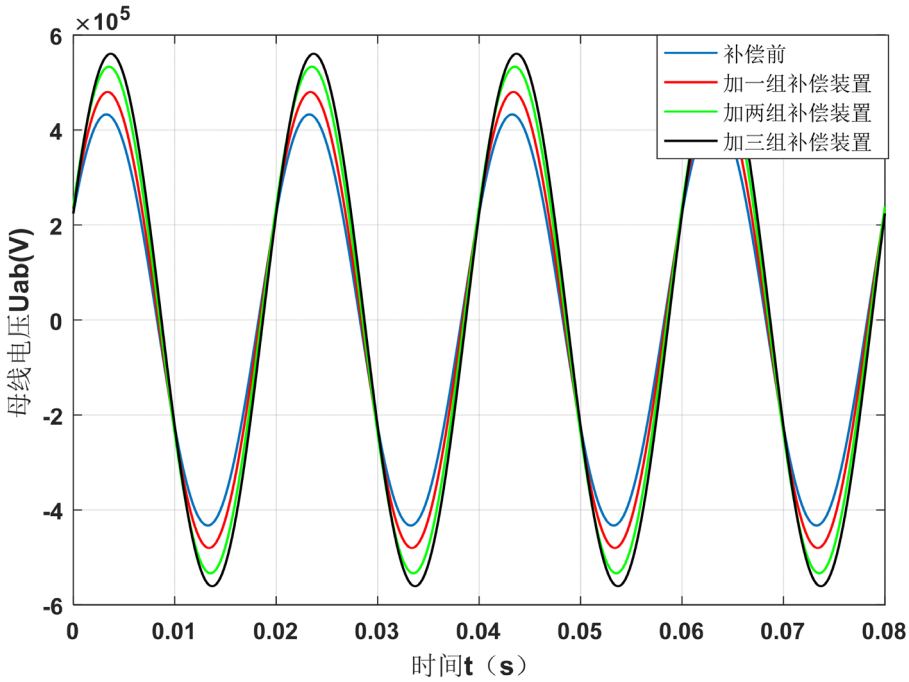


Figure 3. Waveform diagram of 330 kV bus-voltage Uab after reactive power with different capacities
图 3. 投入不同容量的无功后 330 kV 母线电压 Uab 的波形图

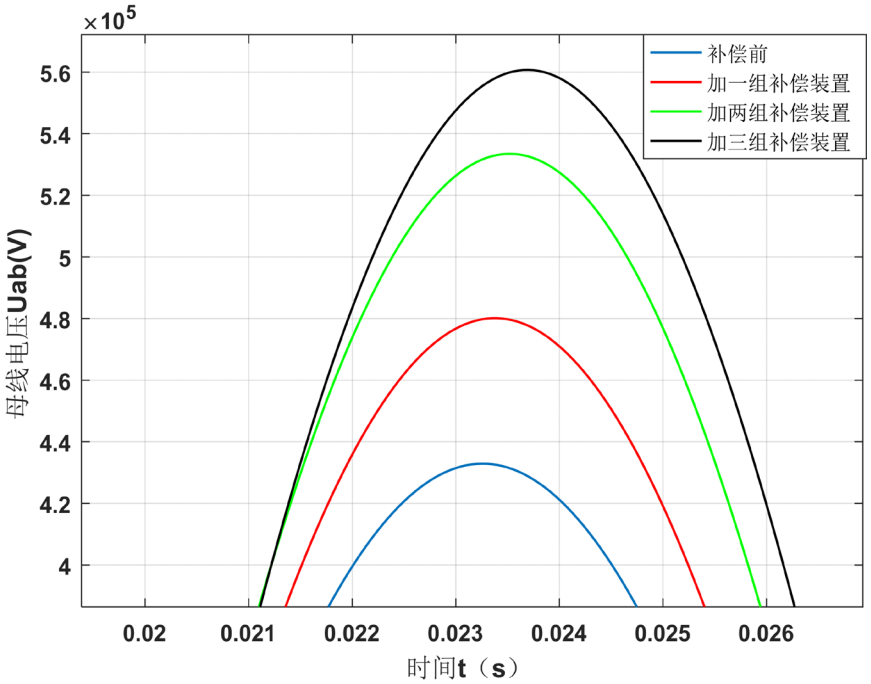


Figure 4. Waveform after amplification of Figure 3's marked part
图 4. 图 3 标注部分放大后的波形图

3.3.2. 现有无功补偿装置存在的问题

宝鸡换流站中 6 组 HP12/24 型滤波器被平均分配至 3 个滤波器大组中；9 组 C 型电容器被平均分配至 3 个滤波器大组中。此分组方式保证了系统运行在大功率方式下(除电容器组外的交流滤波器全部投入)时，不会发生某一大组滤波器被切除时，绝对最小滤波达不到要求而引起功率降低。滤波器的投入按每一大组来考虑，优先投入一大组滤波器后再考虑下 1 个大组滤波器的投入。每次投入的容量是固定的，不能根据所需投入相应的容量，补偿后电压尽管能满足要求，但并不是最优；甚至有时不能满足要求。此外，现使用的无功补偿装置反应慢、补偿不连续效、产生大量谐波和可能会出现电压波动与闪变。

因此，本文提出了两种优化方案。一，在现有无功补偿装置的基础上，对投切策略进行改进；二，引入 SVC，可以实现动态快速连续投切无功，根据所需投入相应的容量，使电压满足运行规范要求，并对增添 SVC 前后的系统性能进行比较。

4. 宝鸡换流站无功补偿的优化

4.1. 投切策略的改进

论改变滤波器组投入方式(1 大组滤波器优先投完)，首先将六小组交流滤波器(720 Mvar)全部投入，然后再一小组一小组(120 Mvar)的投入并联电容器，并对其进行仿真分析，结果如图 5~6 下所示。

图 5~6 分别为投入六小组交流滤波器(720 MVar)和三小组并联电容器(360 MVar)，投入六小组交流滤波器(720 MVar)和四小组并联电容器(480 MVar)，以及投入六小组交流滤波器(720 MVar)和六小组并联电容器(720 MVar)的仿真波形图。由图可知，前两种组合电压满足要求，后一组电压超过允许范围。

投切交流滤波器和电容器需要一定的时间，使启动速度相对较慢。由于电容器的特性，并联电容器无功补偿调节灵活性和精度差，调节范围只能超前，具有负电压调节效应且控制方式不连续。因此，宝鸡换流站投入六小组交流滤波器后，再根据需要投入相应组数的并联电容器，电压能达到要求，并提高电网的功率因数、降低变压器、线路损耗和用电成本，但不能实现快速连续地调节无功功率。

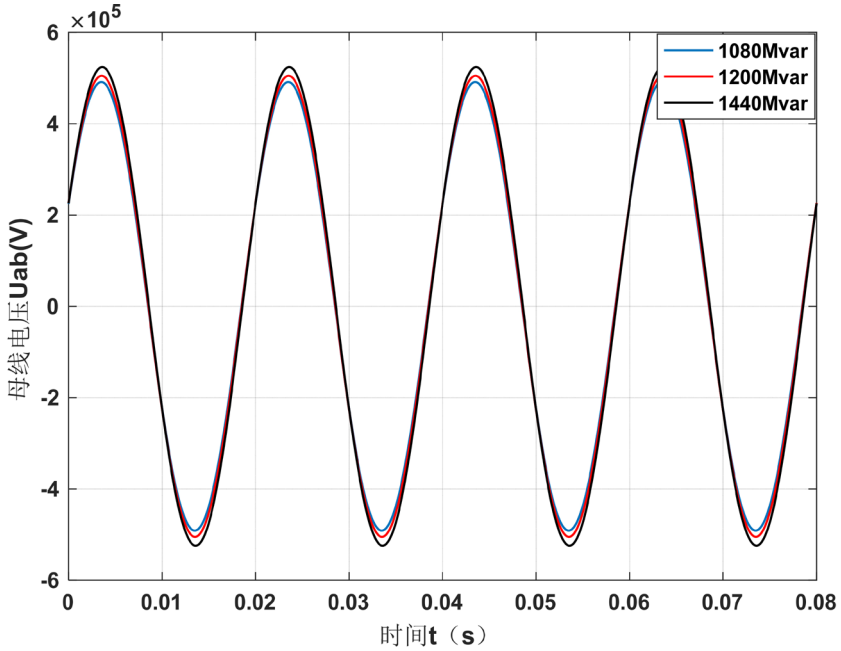


Figure 5. Waveform diagram of 330 kV bus-voltage Uab after reactive power with different capacities
图 5. 投入不同容量的无功后 330 kV 母线电压 Uab 的波形

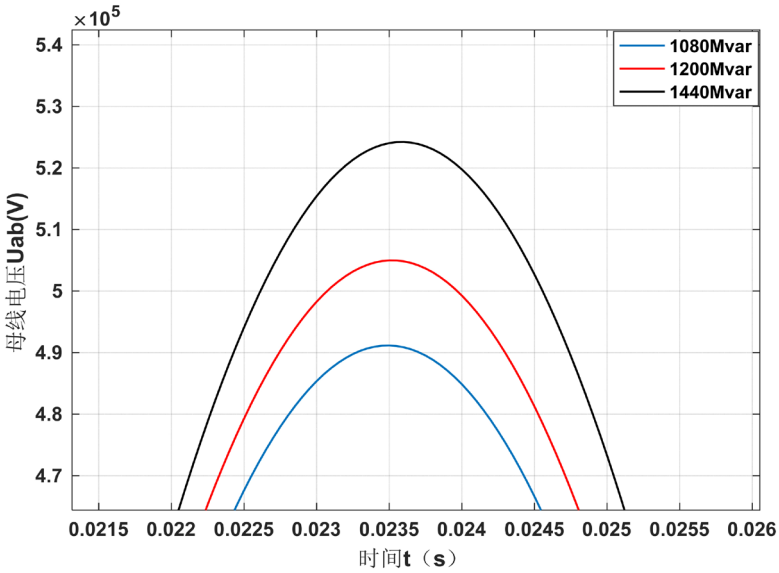


Figure 6. Waveform after amplification of Figure 5's marked part
图 6. 图 5 标注部分放大后的波形图

4.2. 增设 SVC 无功补偿装置

晶闸管控制型 SVC 的优点是反应快速、补偿和节能效果显著，同时能较好的解决功率因数低、谐波、电压波动与闪变等问题。晶闸管控制型 SVC 分为晶闸管控制电抗器(TCR)型、晶闸管投切电容器(TSC)型、以及这两者的混合装置 TCR + TSC 型等。TSC + TCR 型可动态连续调节补偿装置的无功功率，可根据电压的变化投切相应的无功功率，同时能较好的解决功率因数低、谐波、电压波动与闪变等问题。

本文把 TSC + TCR 型的 SVC 装置用于宝鸡换流站，对无功补偿进行优化。建立仿真模型，并对其进行仿真，验证优化方案的可行性。

4.2.1. SVC (TSC + TCR)仿真图和控制模块

如图 7~9。

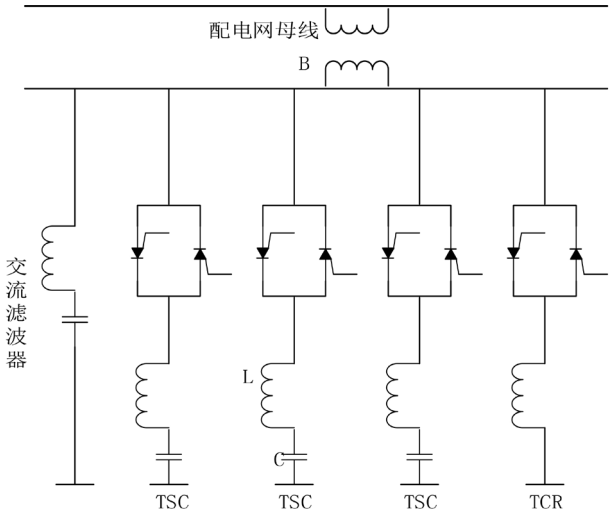
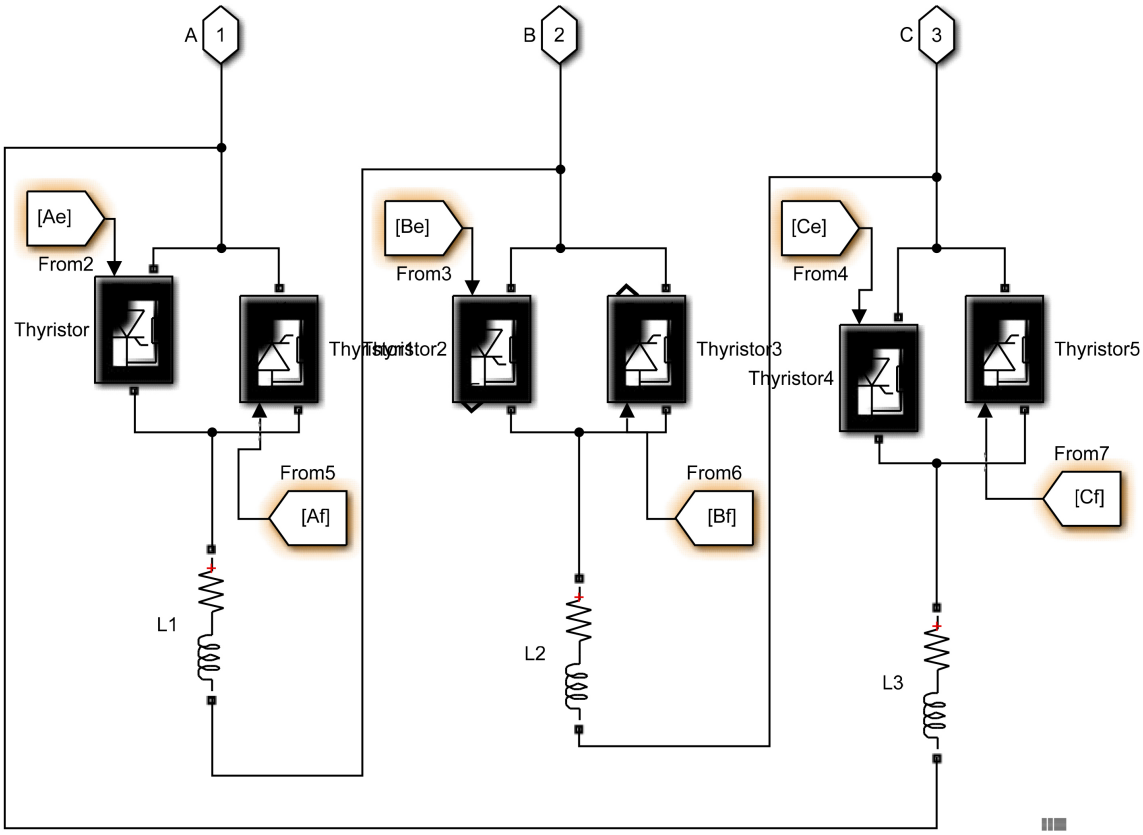
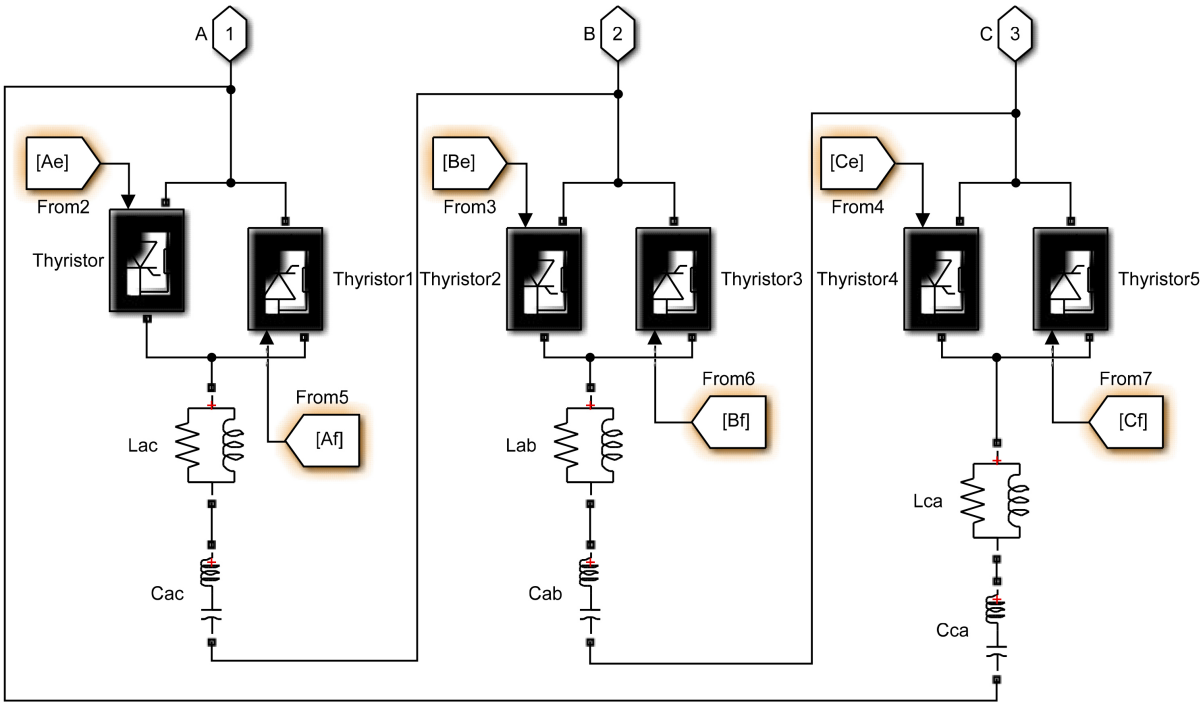


Figure 7. SVC (TSC + TCR) three-phase circuit schematic
图 7. SVC (TSC + TCR)三相电路原理图



(a) TCR 的仿真模型



(b) TSC 的仿真模型

Figure 8. Simulation model of TSC + TCR type SVC
图 8. TSC + TCR 型 SVC 的仿真模型

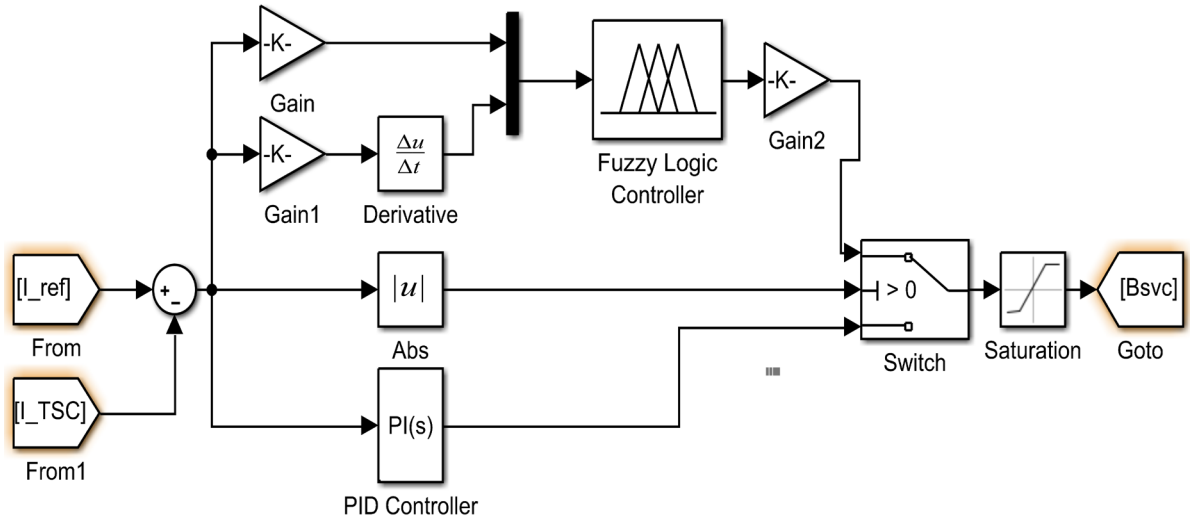


Figure 9. Control module
图 9. 控制模块

4.2.2. 仿真分析

由图 10 可知，随着补偿容量的连续增加母线电压逐渐升高，但电压波动较大，反应速度较慢。

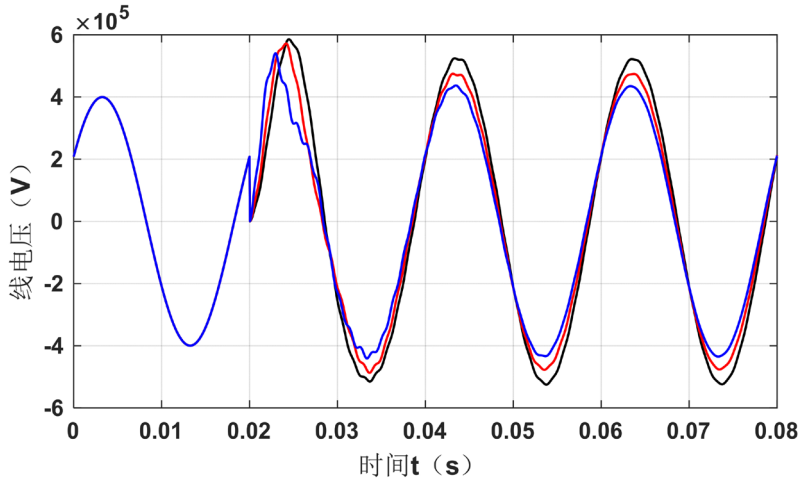


Figure10. Line voltage waveform diagram under different capacities
图 10. 不同容量下的线电压 Uab 的波形图

由图 11~12 可知，SVC (TSC + TCR)的启动速度和反应速度快、调节精度高，具有正的电压调节效应，补偿后的系统电压波动小，可动态平滑连续调节无功功率，使补偿达到最优。如在 0.02 s 投入该无功补偿装置，电压立即随之改变，且电压波动很小，调节 SVC 的容量可使 330 kV 母线电压为 350 kV。此外，SVC (TSC + TCR)自身损耗小，从而降低损耗，经济性好，并可解决供电系统的功率因数低、电压波动、谐波治理等问题。

4.3. 优化前后性能比较

章节宝鸡换流站 330 kV 交流场，在现有无功补偿装置对系统进行无功补偿时，投切原则是一大组一大组的投切，补偿是定容量的断续补偿。甚至随着负荷的变化，可能会出现投人两大组交流滤波器后，

电压仍达不到要求的最小值，而投入三大组交流滤波器电压又超过要求的最大值。因此，把滤波器和并联电容分开，先投滤波器，随之再投入相应的电容，能解决上述问题。但这种投切仍是固定容量的，不能做到动态连续的调节无功。

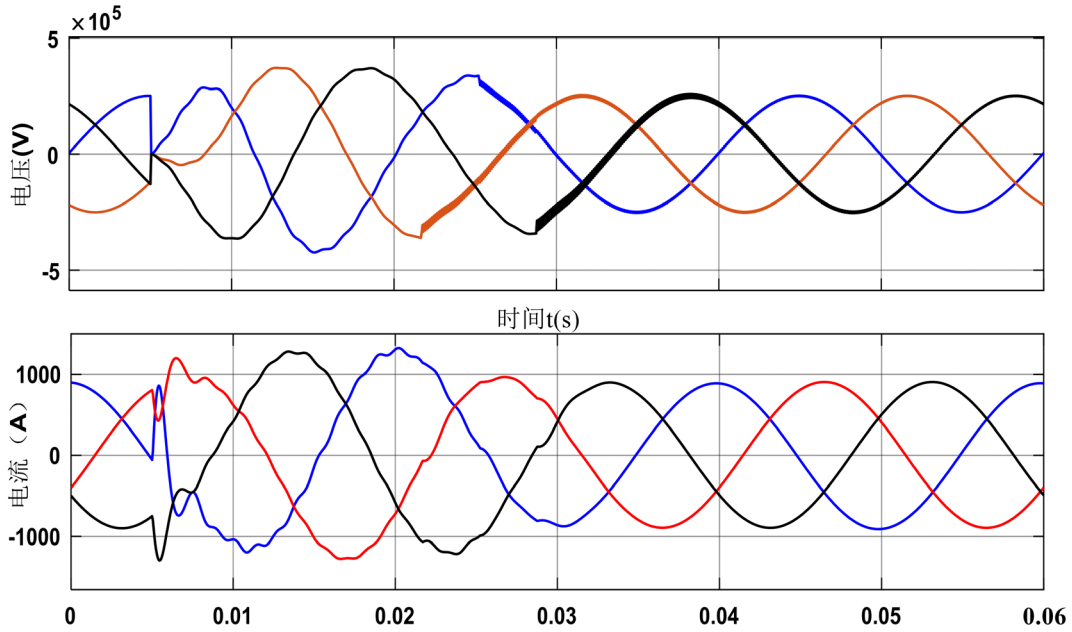


Figure 11. 330 kV bus-voltage and current waveform diagram when AC filter compensation
图 11. 交流滤波器组补偿时 330 kV 母线电压电流波形图

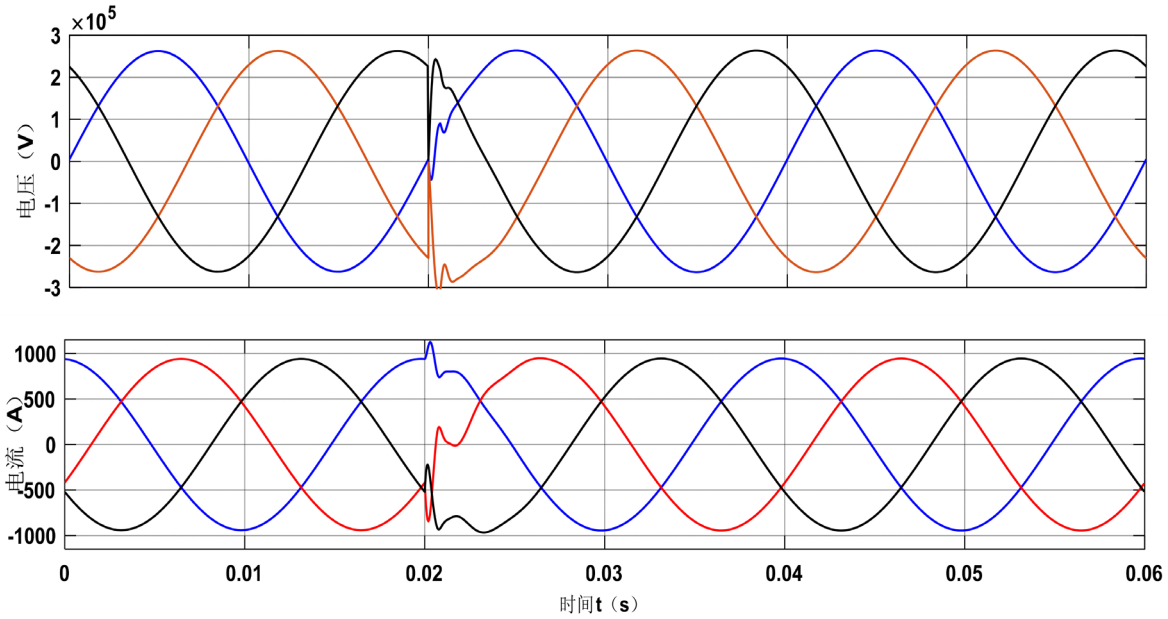


Figure 12. 330 kV bus-voltage and current waveforms when SVC compensation is added
图 12. 增添 SVC 补偿时 330 kV 母线电压电流波形图

在现有无功补偿装置中增添 SVC，由于 SVC 能连续投切无功，则整个无功补偿装置能实现平滑动态连续的调节无功功率，解决了上述的问题，同时能较好的解决如：功率因数较低和谐波以及电压闪变等

问题，以便提高系统的运行性能。所以，在宝鸡换流站增添 SVC 是一种较好的无功补偿优化方案。

并联电容器单位容量的投资低，操作简便，易于维护，但对电网中的高次谐波潮流产生影响，甚至使谐波电流放大。另外，并联电容器合闸时会产生很大的合闸涌流，有时甚至激发谐振过电压。虽然 SVC 价格高于电容器，但它能动态跟踪无功变化，响应时间可达 20 ms，不发生过补偿、无投切振荡、无冲击投切和减小无功冲击造成的电压波动与闪变。从长远的眼光和对系统的综合影响考虑，具有 SVC 的无功补偿装置有更好的运行性能和经济性。

5. 结束语

本文对宝鸡换流站实际运行情况，在现有无功补偿装置的基础上进行仿真，分析现有投切策略的缺点，并对其进行改进优化，提出加入 SVC 无功补偿装置优化方案，并进行仿真验证。结果表明在宝鸡换流站增设 SVC 可以对站内的工作电流和电压进行连续调节及控制，进而来控制 SVC 发出相应的无功功率，实现平滑动态连续调节无功补偿，提高系统运行性能，为改进宝鸡换流站现有无功补偿装置或增设无功补偿装置提供了依据。

基金项目

基金资助项目：陕西省重点研发计划(2018ZDXM-GY-169)。

参考文献

[1] 张忠华, 胡杰. SVC 与固定无功补偿设备协调控制实用效果分析[J]. 吉林电力, 2015, 43(6): 28-31.

[2] 吴蓉. 变电站无功补偿策略研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2011.

[3] 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]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2013.

[4] 文继锋, 陈松林, 李海英, 张宏波, 刘伟. 交流滤波器保护配置和实现[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(2): 109-112.

[5] 岳彬. SVC 在电力系统中的应用及其对电力系统稳定性的影响[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京理工大学, 2012.

[6] 文卫兵, 刘菲, 官澜, 康鹏, 胡君慧, 赵娟. 特高压交流变电站无功补偿装置直接接入 500 kV 母线方案研究[J/OL]. 中国电力: 1-7, 2019-05-27.

[7] 李辉, 徐浩, 郭思源, 吴晋波, 刘海峰, 欧阳帆. ±800 kV 湘潭换流站交流滤波器投切策略及优化[J]. 电力电容器与无功补偿, 2017, 38(3): 36-42.

[8] 陈宇飞. 静止无功补偿装置动态无功补偿技术探讨[J]. 供用电, 2007, 24(3): 60-62.

[9] 陈建军. 变电站 10 kV 动态无功补偿方案设计[J]. 华北电力技术, 2007(4): 52-54.

[10] 刘福宁. SVG 与 SVC 无功补偿容量的仿真对比研究[J]. 机电信息, 2017(24): 25+27.

[11] 李诚. 风力发电系统静止无功发生器在线监测系统的设计与实现[D]: [硕士学位论文]. 上海: 华东理工大学, 2016.

[12] 于琳琳, 刘君, 裴彦东, 赵睿. 静止无功补偿装置(SVC)在东鞍山 220 kV 变电站的应用[J]. 电气应用, 2013, 32(S1): 479-481+495.

[13] Lu, L., Wang, N.B., Ma, Y.H. and He, S. (2013) Comprehensive Solution for Jiuquan Large-Scale Wind Power Integration. *Electric Power Construction*, **34**, 7-11.

[14] Wang, H. (2011) Research on Reactive Power and Voltage Regulation of DFIG Based Farms. M.A Dissertation, Department of Electric Engineering, North China Electric Power University, Beijing.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD
   下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2324-8696，即可查询
2. 打开知网首页 http://cnki.net/
   左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：http://www.hanspub.org/Submission.aspx
期刊邮箱：mos@hanspub.org