

DOI: 10.7667/PSPC160619

渝鄂背靠背柔性直流附加阻尼控制策略研究

徐友平¹, 张珂², 潘晓杰¹, 奚江惠¹, 邵德军¹, 唐卫华³, 孙海顺²

(1. 国家电网公司华中分部, 湖北 武汉 430077; 2. 强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学), 湖北 武汉 430074; 3. 中国能源建设集团湖南省电力设计院有限公司, 湖南 长沙 410007)

摘要: 针对渝鄂异步互联北通道及三峡近区大机组与常规直流和柔性直流强耦合动态问题, 建立了包含三峡左一电厂、渝鄂背靠背柔性直流以及龙政直流外送通道的简化等值系统及其详细电磁暂态数学模型。仿真研究了暂态扰动下换流站近区机组的动态稳定特性。提出采用柔性直流有功无功解耦控制回路附加阻尼控制的方法平抑扰动后机组持续缓慢衰减的功率振荡问题, 分别设计了基于有功调制和无功调制的阻尼控制控制器, 比较研究了两者的作用效果。研究表明, 采用有功和无功协同调制的阻尼控制策略可同时快速平抑功率振荡和电压波动, 提高系统的动态稳定性, 可为工程应用提供参考。

关键词: 柔性直流输电; 异步互联; 功率振荡; PQ解耦控制; 阻尼控制器

Damping control based on back to back VSC-HVDC connecting Chongqing and Hubei Power Grid

XU Youping¹, ZHANG Ke², PAN Xiaojie¹, XI Jianghui¹, SHAO Dejun¹, TANG Weihua³, SUN Haishun²

(1. Central China Branch of State Grid Corporation of China, Wuhan 430077, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 3. Hunan Electric Power Design Institute Corporation Ltd., China Energy Engineering Group, Changsha 410007, China)

Abstract: With the scheduled back to back VSC-HVDC based unsynchronized interconnection between Chongqing and Hubei power grid, the dynamic of such hybrid AC-DC power system consist of large capacity hydro-generator units and both LCC and VSC based HVDC is of serious concern. An equivalent system and the detailed time domain model are established including Three Gorge Power Plant No. 1 located at left bank, the back to back VSC-HVDC and the Long-Zheng LCC-HVDC. Transient simulation is undertaken which demonstrates post fault power oscillation of the hydro-generator units with poor damping. It is proposed that damping controllers can be added to either the active or reactive control loop of VSC-HVDC to improve the damping of the power oscillation. These two ways of damping control design are studied and validated. Results show that combination of both design, i.e., damping controls based on active control and reactive control, could fast decrease power oscillation as well as stabilize voltage variation.

Key words: VSC-HVDC; unsynchronized interconnection; power oscillation; PQ decoupled control; damping controller

0 引言

华中电网目前包括川渝电网和华中东四省鄂豫湘赣电网, 其中, 川渝电网通过南北两个通道的双回交流联络线与三峡近区湖北电网相联, 进而通过鄂豫互联和特高压 1 000 kV 联络线与华北电网构成一种近似链型网架结构。这种电网结构在实际运行中遇到一些稳定性问题, 对于西南地区水电外送产生了限制作用。因此国家电网公司规划将重庆电网与湖北电网的南北两个交流互联通道改为异步互联, 并倾向于采用背靠背柔性直流技术。按照这样

的规划, 三峡近区包括南北两回柔直馈入, 龙政宜华江城等多直流送出, 加上三峡电站机群, 将形成大容量机组集群与不同类型多换流站间相互耦合的复杂交直流动态系统, 其暂态和动态稳定特性和相关控制策略是需要关注的重要课题^[1-2]。

自从模块化多电平(MMC)电压源型换流器技术提出后, 基于电压源型换流器的柔性直流输电系统(VSC-HVDC)在电力系统中获得了快速的应用, 国内代表性的工程有南澳和舟山多端柔性直流输电系统, 目前最大容量和电压等级是在建的厦门柔性直流输电^[3-5]。与常规直流相比, VSC-HVDC 通过 dq

解耦控制, 实现有功、无功功率的快速、独立控制, 不存在换相失败问题和无功补偿要求; 既可以实现类似常规直流输电的附加有功调制, 又能够实现与 STATCOM 相似的附加无功调制, 通过配置阻尼控制, 从而能够提高系统阻尼, 抑制系统振荡。VSC-HVDC 具有快速的功率控制能力, 能够在故障发生后, 实现对直流功率的紧急调节, 从而减少扰动对系统的冲击影响^[6-20]。

本文以规划建设的渝鄂异步互联北通道三峡近区为例, 建立了包含三峡左岸电厂、渝鄂背靠背柔性直流以及龙政直流外送通道的等值系统, 通过等值系统的详细电磁暂态数学建模和仿真^[11], 分析三峡机组与柔性直流换流器和常规直流换流器间存在的相互影响, 研究暂态扰动下系统的动态稳定特性; 针对机组存在的持续功率振荡现象, 提出利用柔性直流附加阻尼控制快速平抑系统功率振荡, 分别基于柔性直流有功无功解耦控制回路设计了阻尼控制器, 比较研究了基于有功调制和无功调制阻尼控制的作用效果。

1 等值系统及其电磁暂态建模

等值系统主要用于研究渝鄂异步互联北通道三峡近区机组与柔性直流和常规直流之间的相互影响, 如图 1 所示。

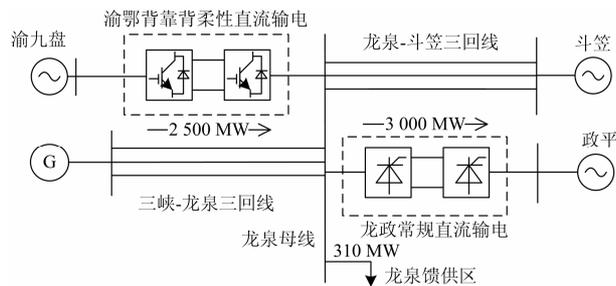


图 1 渝鄂异步互联北通道三峡近区等值系统结构
Fig. 1 Structure of simplified equivalent system

其中, 渝鄂异步互联北通道背靠背柔性直流接入 500 kV 龙泉站, 额定输送功率 2 500 MW, 渝侧送端电网采用等值电源; 三峡左岸电厂 8 台机组(额定功率 760 MW×8)通过三回 500 kV 线路接入龙泉站; 斗笠站以外华中系统采用等值电源。

对上述系统在 PSCAD/EMTDC 中建立详细电磁暂态仿真模型。其中, 三峡左一电厂 8 台发电机采用凸极发电机详细模型, 考虑水轮机及其调速系统、励磁系统和 PSS, 模型及参数按实际机组配置情况设置; 龙政直流输电系统采用双极性接线方式, 其整流侧和逆变侧各由两组 12 脉动换流器串联而

成, 额定输送功率为 3 000 MW, 整流侧控制方式采用定电流控制, 逆变侧控制方式采用定熄弧角控制以及含低电压限流环节的定电流控制; 交流输电线路采用分布参数模型; 等值电源内阻抗根据对应运行方式下母线的短路电流水平确定。柔性直流系统及附加阻尼控制模型下一节详细介绍。

系统大负荷方式下龙泉站累计功率馈入 8 580 MW, 通过龙政直流外送 3 000 MW, 其余经龙斗三回 500 kV 交流线路送出以及供应部分就地负荷。与全网综合程序仿真对比表明, 简化等值系统基本保留了原系统中北通道三峡近区电网的动态特性。

2 柔性直流输电模型及附加阻尼控制策略

渝鄂北通道背靠背柔性直流输电系统由两个电压源型换流站组成, 换流站直流侧直接相连, 交流侧分别连接两个不同的交流系统, 背靠背柔性直流输电系统的额定传输功率为 2 500 MW, 直流电压等级为±400 kV。

2.1 换流器平均值模型

从研究系统问题的角度出发, 为了便于研究, 渝鄂背靠背柔性直流输电系统中的换流站均采用图 2 所示的平均值模型。

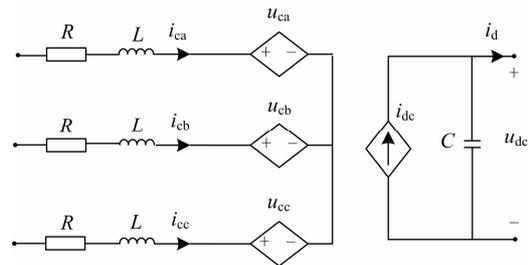


图 2 电压源型换流器的平均值模型
Fig. 2 Average value mode for two-level voltage source converter

图中 R 、 L 为变压器等效电阻和电感, 记 A、B、C 三相的每相调制比为 m_A 、 m_B 、 m_C , 则三相桥臂输出的基波交流电压为

$$\begin{cases} u_{cA} = m_A U_{dc} / 2 \\ u_{cB} = m_B U_{dc} / 2 \\ u_{cC} = m_C U_{dc} / 2 \end{cases} \quad (1)$$

交流侧输入到直流侧的有功功率为

$$P_{ac} = u_{cA} i_{cA} + u_{cB} i_{cB} + u_{cC} i_{cC} = u_{dc} i_{dc} \quad (2)$$

将式(1)带入式(2), 可得受控直流电流源的值为

$$i_{dc} = 0.5(m_A i_{cA} + m_B i_{cB} + m_C i_{cC}) \quad (3)$$

图 2 所示的平均值模型运行时将根据控制环节

输出的 m_A 、 m_B 、 m_C 、测量所得的换流器直流侧电压 u_{dc} 及三相交流电流 i_A 、 i_B 、 i_C ，通过式(1)产生受控电压源 u_{cA} 、 u_{cB} 、 u_{cC} 的值，受控直流电流源的值通过式(3)产生^[12]。

2.2 柔性直流主控制模型

电压源型换流器的控制采用功率/电压外环和电流内环的双环控制结构，其中电流内环控制器采用 dq 解耦控制，其原理在于将 abc 三相静止坐标系下的三相电流变换到 dq 同步旋转坐标系下，通过控制流过电抗器的交流电流的 dq 轴分量而控制换流器的调制度和输出相角，实现有功、无功电流分量的解耦控制。外环控制器采用定直流电压控制、定有功功率控制和定无功功率控制。

在本文所示简化等值模型中，背靠背柔性直流输电系统的整流侧控制直流侧电压，逆变侧控制注入龙泉 500kV 母线的有功功率，整流侧和逆变侧的双环控制器结构如图 3 和图 4 所示。

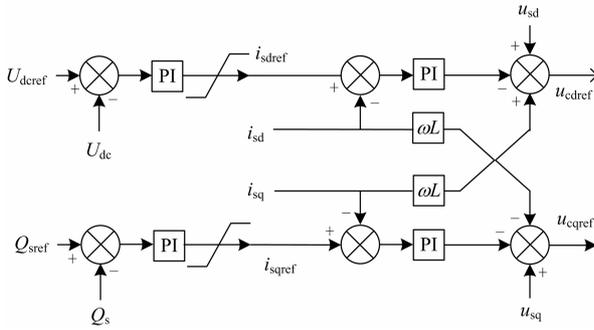


图 3 整流侧双环控制器结构

Fig. 3 Double-loop controller at rectifier side

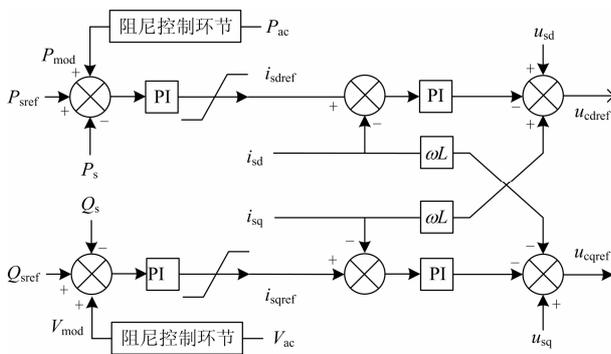


图 4 逆变侧双环控制器结构

Fig. 4 Double-loop controller at inverter side

其中： U_{dcref} 、 P_{sref} 、 Q_{sref} 和 U_{dc} 、 P_s 、 Q_s 分别为直流电压指令值、有功功率指令值、无功功率指令值和实际测量； i_{sdref} 、 i_{sqref} 和 i_{sd} 、 i_{sq} 分别为有功电流、无功电流指令值和实际测量； U_{cdref} 和 U_{csref} 分别为换

流器交流侧期望输出的基波电压 dq 轴分量； U_{sd} 和 U_{sq} 分别为 PCC 点处交流电压的 dq 轴分量。 P_{mod} 和 Q_{mod} 代表附加控制信号。

2.3 柔性直流输电系统的附加阻尼控制策略

渝鄂背靠背柔性直流输电逆变侧接入龙泉 500 kV 站，换流器采用定功率控制，包括相互解耦的有功控制环路和无功控制环路，因此，可以在两个控制环路中加入阻尼控制器，用于快速平息故障后的功率振荡^[13-15]。

(1) 基于有功功率调制的 d 轴附加阻尼控制

基于有功功率调制的 d 轴附加阻尼控制器实测交流线路有功功率信号 P_{ac} ，通过附加阻尼控制环节输出调制信号 P_{mod} ，叠加到 d 轴的有功功率控制回路的有功指令值上(如图 4 所示)，对 VSC-HVDC 逆变输出有功进行调制，用于平抑功率振荡。

附加阻尼控制器的结构如图 5 所示，其中 K_{s1} 为阻尼控制器增益， T_w 为阻尼控制器隔直环节参数， T_1 、 T_2 为阻尼控制器超前滞后环节参数^[14]。

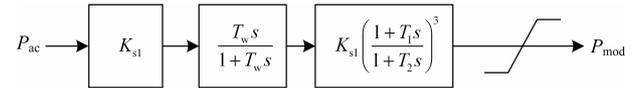


图 5 d 轴附加阻尼控制器结构

Fig. 5 Power oscillation damping controller at d -axis

(2) 基于无功功率调制的 q 轴附加阻尼控制

基于无功功率调制的 q 轴附加阻尼控制类似 STATCOM 补偿控制^[15]，以换流器交流侧电压 V_{ac} 为反馈输入，通过附加阻尼控制环节输出对交流电压振荡的抑制信号 V_{mod} ， V_{mod} 与原无功指令叠加(如图 4 所示)，输入换流器 q 轴的无功功率控制环节。

附加阻尼控制器结构如图 6 所示，其中各参数的定义参考 d 轴附加阻尼控制器。

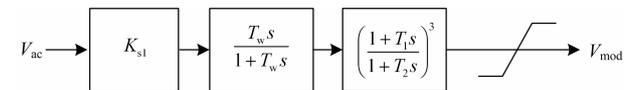


图 6 q 轴附加阻尼控制器结构

Fig. 6 Voltage oscillation damping controller at q -axis

(3) 附加阻尼控制器参数设计

本文中所搭建阻尼控制器模型如表 1 所示。

表 1 附加阻尼控制器参数

Table 1 Parameters of additional damping controller

参数	K_{s1}	T_w	T_1	T_2
d 轴	1	10	0.05	0.02
q 轴	3	10	0.05	0.02

3 仿真分析

在 PSCAD/EMTDC 下建立了本文等值系统电磁暂态仿真模型,开展了如下仿真研究:(1) 暂态扰动下近区大机组、柔性直流输电系统以及常规直流输电系统的动态响应特性;(2) 基于有功功率调制的 d 轴附加阻尼控制策略验证;(3) 基于无功功率调制的 q 轴附加阻尼控制策略验证;(4) 基于有功功率和无功功率协同调制的附加阻尼控制策略验证。

初始稳态时三峡左一电厂机组额定满功率输出,渝鄂背靠背输入 2 500 MW,龙政直流外送 3 000 MW,龙泉就地负荷 310 MW。仿真设定 2.0 s 时,龙泉-斗笠三回线中的一回线路中点发生三相接地短路,2.1 s 时,线路两端断路器开断,切除故障线路。

3.1 暂态扰动下交直流系统动态响应特性

图 7 反映了等值系统在交流输电线三相短路故障扰动下系统的动态响应特性。图中 P_{gen} , P_{vsc} , P_{lcc} 和 P_{inf} 分别代表三峡左一电厂输出有功功率,柔直逆变侧有功功率,龙政直流功率,以及等值系统接收的有功功率。

由图 7(a)~(d)所示的系统响应可看出,系统故障后三峡左一电厂机组出现较大幅度持续功率振荡,相应地换流站 500 kV 母线电压也持续波动。VSC-HVDC 直流功率经历一个暂态反调很快恢复初始功率,龙政直流由于整流移相触发角跟随电压波动快速调节,经历一个功率暂降后功率也很快恢复,在初始功率附近呈现较小幅度振荡。

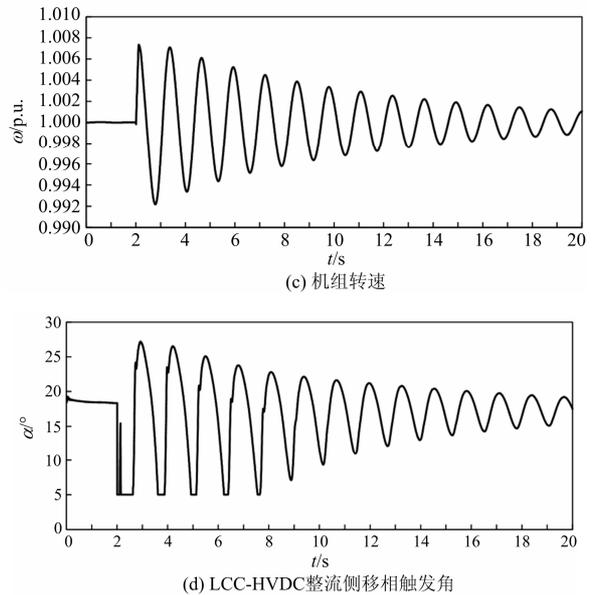


图 7 系统故障响应特性

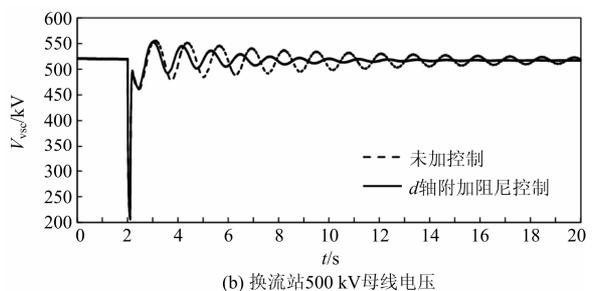
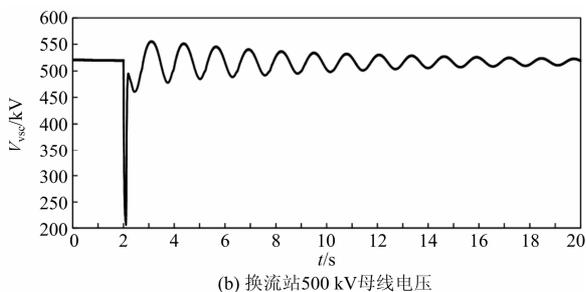
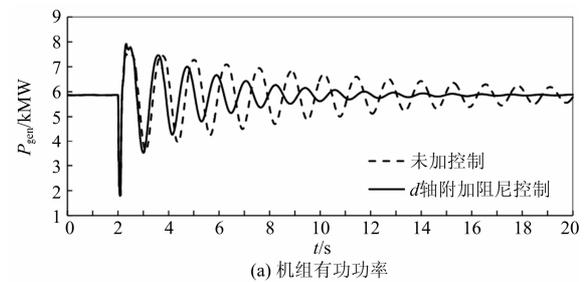
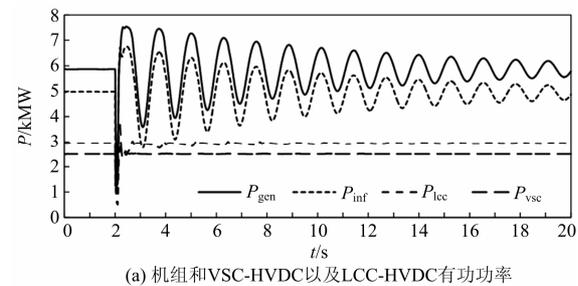
Fig. 7 System fault response characteristics

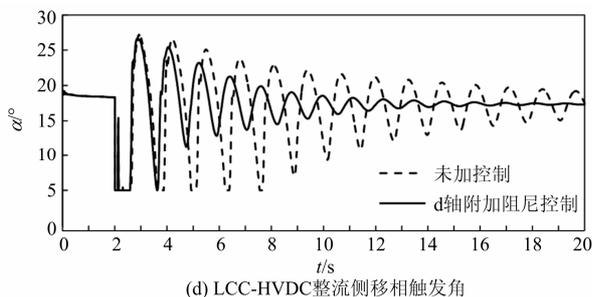
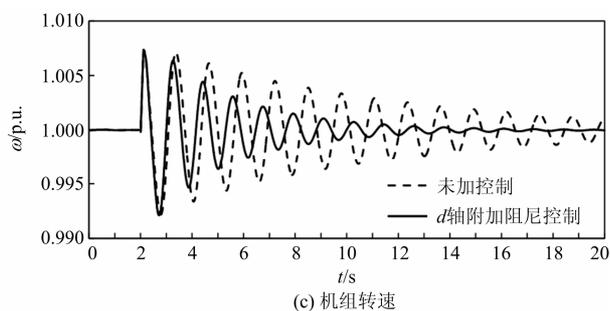
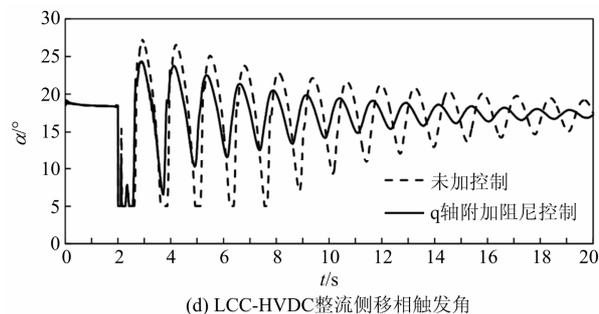
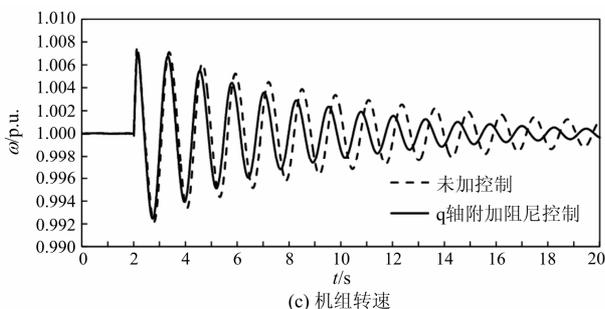
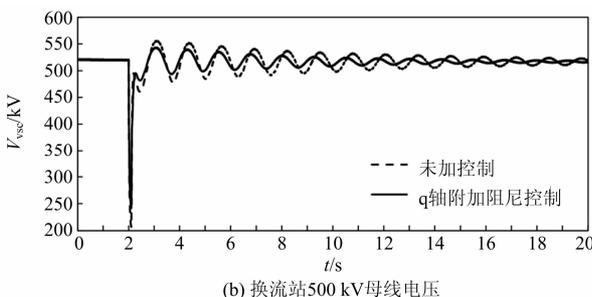
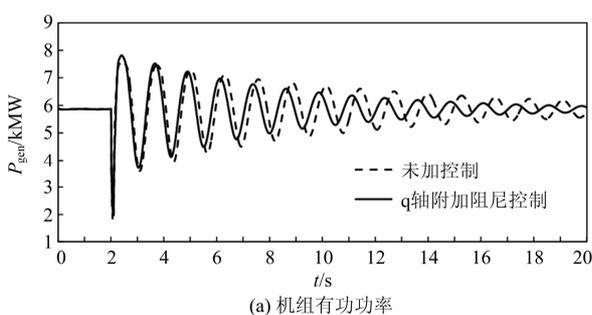
3.2 基于有功功率调制的 d 轴附加阻尼控制作用

图 8 所示为在 d 轴有功附加阻尼控制,系统中交流线路发生三相接地故障时的响应特性,故障设置同 3.1 节。仿真结果表明:采用 d 轴有功附加阻尼控制的系统阻尼显著增加,系统振荡能够快速平抑。

3.3 基于无功功率调制的 q 轴附加阻尼控制作用

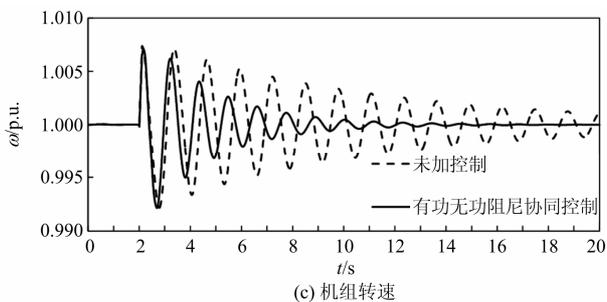
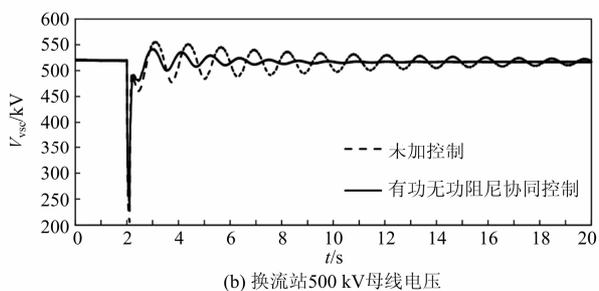
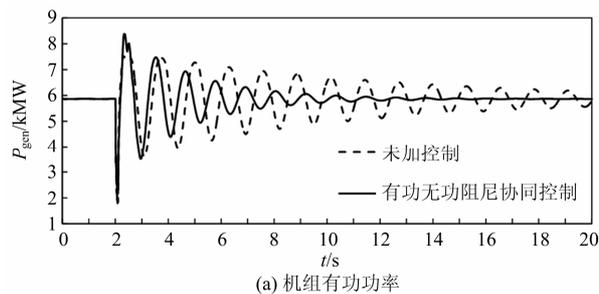
图 9 所示为在 q 轴有功附加阻尼控制的系统响应特性。仿真结果表明:采用 q 轴有功附加阻尼控制的系统阻尼显著增加,系统振荡能够快速平抑。



图 8 d 轴有功阻尼控制仿真结果Fig. 8 Simulation results of damping controller at d -axis图 9 q 轴无功阻尼控制仿真结果Fig. 9 Simulation results of additional damping control at q -axis

3.4 有功无功协同阻尼控制策略

图 10 是采用 dq 轴有功无功阻尼协调控制系统的响应特性。比较图 10 和图 8 采用 d 轴有功阻尼控制以及图 9 采用 q 轴无功阻尼控制的作用效果, 结果表明, 采用 dq 轴有功无功阻尼协调控制策略的系统振荡能够快速平抑, 且平抑速度、效果均优于仅仅采用 d 轴有功阻尼控制策略或 q 轴无功阻尼控制策略的系统, 同时电压波动也得到很好的抑制。



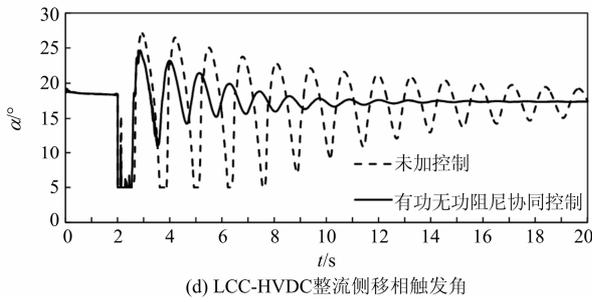


图 10 dq 轴有功无功阻尼协调控制仿真结果

Fig. 10 Simulation results of active and reactive power coordinative damping control

4 结论

本文针对渝鄂背靠背柔性直流联网规划工程，建立了包含大机组、柔性直流输电和常规直流输电的局部等值系统，研究了暂态扰动下系统动态响应特性，以及基于柔性直流输电的阻尼控制策略，主要研究结果包括：

(1) 渝鄂异步互联后，三峡近区局部出现大机组和柔性直流与常规直流混合运行的场景，暂态扰动下，机组呈现持续缓慢的摇摆振荡，柔性直流和常规直流由于其控制响应快速，呈现较好的暂态恢复特性。

(2) 由于柔性直流换流器的有功功率和无功功率独立控制，可以分别设计基于有功功率调制和基于无功功率调制的附加阻尼控制器，用于快速平抑三峡左一电厂机组的功率振荡。

(3) 仿真比较研究表明，采用有功功率调制或无功功率调制的阻尼控制均可以有效阻尼机组功率振荡，并且，同时采用有功功率调制和无功功率调制的协同阻尼控制可同时平抑功率振荡和电压波动，具有更好的控制效果。

以上研究结果，对于渝鄂异步互联后的三峡近区系统稳定运行与控制具有较好的参考意义。

参考文献

[1] 宋艺航. 中国电力资源跨区域优化配置模型研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.

[2] 华中电网有限公司. 华中电网“十二五”发展规划[R]. 武汉: 华中电网有限公司, 2011.

[3] RAO Hong. Architecture of Nan'ao multi-terminal VSC-HVDC system and its multi-functional control[J]. CSEE Journal of Power & Energy Systems, 2015, 1(1): 9-18.

[4] 李亚男, 蒋维勇, 余世峰, 等. 舟山多端柔性直流输电工程系统设计[J]. 高电压技术, 2014, 40(8): 2490-2496. LI Yanan, JIANG Weiyong, YU Shifeng, et al. System

design of Zhoushan multi-terminal VSC-HVDC transmission project[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8): 2490-2496.

[5] 蒋冠前, 李志勇, 杨慧霞, 等. 柔性直流输电系统拓扑结构研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 145-153. JIANG Guanqian, LI Zhiyong, YANG Huixia, et al. Research review on topological structure of flexible HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 145-153.

[6] 马为民, 蒋维勇, 李亚男. 大连柔性直流输电工程的系统设计[J]. 电力建设, 2013, 34(5): 1-5. MA Weimin, JIANG Weiyong, LI Yanan. System design for Dalian VSC-HVDC power transmission project[J]. Electric Power Construction, 2013, 34(5): 1-5.

[7] HAMMAD A E. Stability and control of HVDC and AC transmissions in parallel[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14(4): 1545-1554.

[8] MITHULANANTHAN N, CANIZARES C, REEVE J, et al. Comparison of PSS, SVC, and STATCOM controllers for damping power system oscillations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(2): 786-792.

[9] PIPELZADEH Y, CHAUDHURI B, GREEN T C. Control coordination within a VSC HVDC link for power oscillation damping: a robust decentralized approach using homotopy[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2013, 21(4): 1270-1279.

[10] 汤广福, 罗湘, 魏晓光. 多端直流输电与直流电网技术[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 8-17. TANG Guangfu, LUO Xiang, WEI Xiaoguang. Multi-terminal HVDC and DC-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 8-17.

[11] 于亚男, 金阳忻, 江全元, 等. 基于 RT-LAB 的柔性直流配电网建模与仿真分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(19): 125-130. YU Yanan, JIN Yangxin, JIANG Quanyuan, et al. RT-LAB based modeling and simulation analysis of flexible DC distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(19): 125-130.

[12] 周诗嘉, 林卫星, 姚良忠, 等. 两电平 VSC 与 MMC 通用型平均值仿真模型[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(12): 138-145. ZHOU Shijia, LIN Weixing, YAO Liangzhong, et al. Generic averaged value models for two-level VSC and MMC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(12): 138-145.

- [13] 刁倩, 陆康. 差模有源阻尼在 PWM 变流器中的应用分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 108-114.
DIAO Qian, LU Kang. Analysis of differential mode active damping application in PWM converter[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 108-114.
- [14] 郑超, 周孝信. 基于电压源换流器的高压直流输电小信号动态建模及其阻尼控制器设计[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(2): 7-12.
ZHENG Chao, ZHOU Xiaoxin. Small signal dynamic modeling and damping controller designing for VSC based HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(2): 7-12.
- [15] 高磊, 刘玉田, 汤涌, 等. 提升系统阻尼的多 STATCOM 阻尼控制器协调控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(25): 68-77.
GAO Lei, LIU Yutian, TANG Yong, et al. Research on the coordinated control among multiple STATCOMs based on damping controllers[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25): 68-77.
- [16] 鲍正杰, 李生虎. 基于 VSC-HVDC 有功支援和自适应低频减载的区域电网频率控制[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(20): 32-37.
BAO Zhengjie, LI Shenghu. Frequency control for regional system based on active power support from VSC-HVDC and adaptive under-frequency load shedding[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(20): 32-37.
- [17] 温家良, 吴锐, 彭畅, 等. 直流电网在中国的应用前景分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(13): 7-12.
WEN Jialiang, WU Rui, PENG Chang, et al. Analysis of DC grid prospects in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(13): 7-12.
- [18] 宋瑞华, 周孝信. 基于电压源换流器的高压直流输电系统的阻尼特性与阻尼控制[J]. 电网技术, 2008, 32(5): 17-21.
SONG Ruihua, ZHOU Xiaoxin. Research on VSC-HVDC damping characteristics and damping control[J]. Power System Technology, 2008, 32(5): 17-21.
- [19] 姚伟, 文劲宇, 程时杰, 等. 考虑时滞影响的 SVC 广域附加阻尼控制器设计[J]. 电工技术学报, 2012, 27(3): 239-246.
YAO Wei, WEN Jinyu, CHENG Shijie, et al. Design of wide-area supplementary damping controller of SVC considering time delays[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(3): 239-246.
- [20] 汤广福. 基于电压源换流器的高压直流输电技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010: 121-151.
- [21] 罗永捷, 李耀华, 王平, 等. 多端柔性直流输电系统下垂控制 P-V 特性曲线时域分析[J]. 电工技术学报, 2014, 29(增刊 1): 408-415.
LUO Yongjie, LI Yaohua, WANG Ping, et al. Time-domain analysis of P-V characteristic for droop control strategy of VSC-MTDC transmission system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(S1): 408-415.
- [22] 楚遵方, 李耀华, 王平, 等. 柔性直流输电系统中模块化多电平变流器的直流侧充电策略分析[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 136-142.
CHU Zunfang, LI Yaohua, WANG Ping, et al. Analysis of charging strategy by DC grid for modular multilevel converter in high voltage direct current transmission system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 136-142.

收稿日期: 2016-04-29; 修回日期: 2016-08-04

作者简介:

徐友平(1971-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电网运行分析和管理工作; E-mail: xuyy@cc.sgcc.com.cn

张珂(1992-), 女, 硕士研究生, 研究方向为直流电网控制策略、优化潮流分析; E-mail: vivian92@hotmail.com

潘晓杰(1976-), 男, 博士(后), 工程师, 研究方向为电力系统稳定与控制; E-mail: pxj76@163.com

(编辑 张爱琴)