

# 渝鄂柔性直流输电交直流动态特性及控制保护策略研究

朱琳<sup>1</sup>, 寇龙泽<sup>1</sup>, 刘栋<sup>2</sup>

(1. 直流电网技术与仿真北京市重点实验室(全球能源互联网研究院有限公司), 北京市 昌平区 102209;

2. 先进输电技术国家重点实验室(全球能源互联网研究院有限公司), 北京市 昌平区 102209)

## Research on Transient Characteristics of AC-DC System and Control and Protection Strategy for Chongqing-Hubei Project

ZHU Lin<sup>1</sup>, KOU Longze<sup>1</sup>, LIU Dong<sup>2</sup>

(1. Beijing Key Laboratory of DC Grid Technology and Simulation (Global Energy Interconnection Research Institute Co., Ltd.), Changping District, Beijing 102209, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Power Transmission Technology (Global Energy Interconnection Research Institute Co., Ltd.), Changping District, Beijing 102209, China)

**Abstract:** The Chongqing-Hubei VSC-HVDC back-to-back project is the first VSC-HVDC project in the world for the interconnection of asynchronous large-scale power grid. After the project is put into operation, it can optimize the distribution of system power flows in the southwest and central China power grid, increase the voltage and frequency stability level, but at the same time bring new problems to the system, such as reduced the rotational inertia and dynamic damping. Therefore, from the point of view of the system and the equipment, analyzing the interaction effects of AC and DC system, respectively. Firstly, the VSC-HVDC need1 to fully invoke the ability of its fast power regulation, and improve the stability of the power grid; Secondly, based on the withstand voltage and current level of the equipment, serious faults in the immediate area are identified. A fault ride-through strategy is proposed, ensures the safe and reliable operation of the equipment, and reduces the impact on the AC system. The proposed fault ride-through strategy is tested in real-time simulator and the effectiveness of the strategy is verified. The above analyses have improved system stability and provided technical support for engineering operation.

**Keywords:** Chongqing-Hubei VSC-HVDC; grid stability; additional control; fault ride through strategy

**摘要:** 渝鄂柔性直流背靠背工程是世界首个用于异步大型电网互联的柔性直流工程, 工程投运后, 能够优化西南与

华中电网的系统潮流分布, 提高电压和频率稳定水平, 但同时会带来系统转动惯量和动态阻尼减小等新的问题。因此分别从系统及设备的角度出发, 分析工程接入系统后的交互影响。首先, 充分调用柔直自身快速功率调节能力, 提高接入后电网的稳定性; 其次, 基于设备的耐压耐流水平, 针对近区严重故障, 提出了故障穿越策略, 保证了设备的安全可靠运行, 减少了对交流系统的冲击。对所提的故障穿越策略进行实时仿真测试, 验证了策略的有效性。上述所做分析, 提高了系统的稳定性, 为工程运行提供了技术支持。

**关键词:** 渝鄂直流; 电网稳定; 附加控制; 故障穿越策略

## 0 引言

目前, 渝鄂断面通过九盘一龙泉、张家坝一恩施2个500 kV双回输电通道连接, 西南与华中电网维持交流互联格局。渝鄂背靠背柔性直流联网工程利用现有渝鄂断面2个500 kV双回输电通道, 分别建设南、北通道2座容量为2500 MW的柔性直流背靠背换流站, 南北通道输电规模均为 $2 \times 1250$  MW, 柔直换流单元采用对称单极接线, 直流电压 $\pm 420$  kV, 直流电流1488 A, 工程示意图见图1。

渝鄂柔性直流背靠背工程是世界首个用于异步大型电网互联的柔性直流工程, 工程投运后, 四川境内三大特高压直流(锦苏、复奉、宾金)换相失败对渝鄂断面的冲击将得到有效抑制, 系统短路电流将

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0900900)。

National Key Research and Development Program of China(2016YFB0900900).



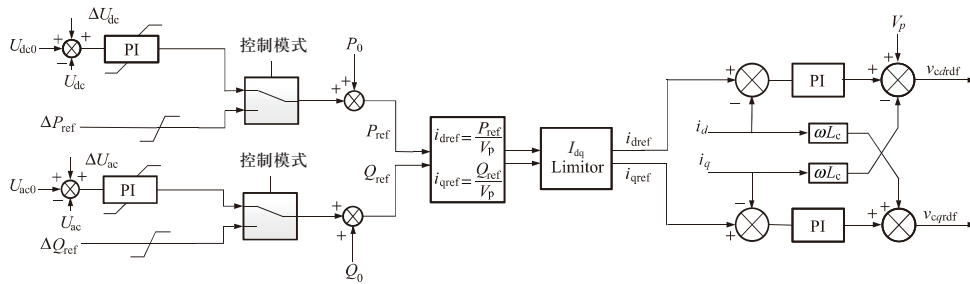


图3 控制系统模型

Fig. 3 PSASP-UD model of VSC-HVDC control system

用于大型电网异步互联的柔直附加控制策略及详细参数。本文的附加控制策略包含附加频率控制与功率紧急控制，附加控制策略如图4所示。前者主要针对频率稳定问题，控制速度为秒级；后者主要针对功角稳定问题，控制速度为百毫秒，两者配合使用。

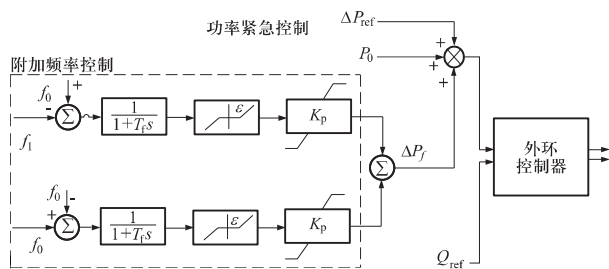


图4 附加控制策略

Fig. 4 Additional control strategy

在附加频率控制中， $f_1$ 、 $f_2$ 分别是两侧电网实测频率； $f_0$ 是基准频率50 Hz； $T_f$ 为滤波时间常数， $K_p$ 是比例增益。柔直的控制系统自动检测两侧交流系统频率，当任一侧交流系统频率发生波动时，控制器即调节柔直传输的有功功率，实现两侧系统的有功支援。当送受端交流系统频率波动方向相同时，自动闭锁频率控制器。

功率紧急控制主要针对系统大功率波动导致的功角稳定问题，此时柔直可通过功率紧急控制动作，实现对系统功率缺额调节。功率紧急控制参数的设定主要考虑两点：一是同时考虑对送受端电网的冲击不能超过规定范围，二是充分发挥柔直可控性强、调节速度快的优势。

该策略应根据安稳分析结果的事件触发，依照预先计算完成的策略表迅速改变直流功率给定值，因此响应速度快于附加频率控制。渝鄂柔直联网后系统的安稳分析和策略表正在制定中，本文仅按照基于现有数据的多次仿真优化的结果直接给出功率调节量。

### 1.3 控制参数设定

#### 1) 附加频率控制参数。

根据湖北、重庆的电网调频能力，设定频率控制器中的 $K_p$ 和 $T_f$ 取值。通常，水轮机调差系数为25~50，汽轮机调差系数为20~33.3，结合全网频率特性与模型测试情况，在调频能力较强、水电较多的湖北侧设定 $K_p=20$ ，重庆侧 $K_p=10$ 。 $T_f$ 考虑采样延时设为10 ms。

#### 2) 功率紧急控制参数。

按照2016年夏平运行方式，西南电网一旦双极直流闭锁，功率缺额最大可达8000 MW，为最大化减小切机量，应尽可能增大柔直调节能力。考虑到特高压直流频率调制能力约为±10%，即8000 MW工程的总调节量为800 MW，而渝鄂柔直总传输量5000 MW，当设定为±20%时，调节量可略高于特高压直流。仿真表明，柔直最大调节能力设定为±20%时，特高压直流闭锁导致的频率变化可以降低0.1~0.2 Hz。基于2016年夏平和冬平运行方式，柔直也具备±20%的功率调节能力，因此设定功率控制器最大可调节±20%额定有功功率，作用于重庆侧，死区设置为±0.1 Hz。

### 1.4 控制策略验证

对应不同的故障位置及工况，需分别启动不同的附加控制增加稳定性。以渔峡—兴隆N-2为例，在交流联网2016年夏平方式下，渔峡—兴隆为三回线，紧邻南通道，近区有大量小水电机组，电气接线图如图5所示。在交流联网夏平方式下，一侧交流系统故障可借助另一侧交流系统惯量抑制故障扰动，维持稳定。渝鄂背靠背柔直接入系统后，需启动附加控制策略。

#### 1) 柔直定功率。

柔直采用定功率，设置在10 s发生N-2故障，故障持续100 ms后，继电保护动作，线路两端断路器开断，切除故障线路。故障发生后，如图6(a)、(b)所示，换

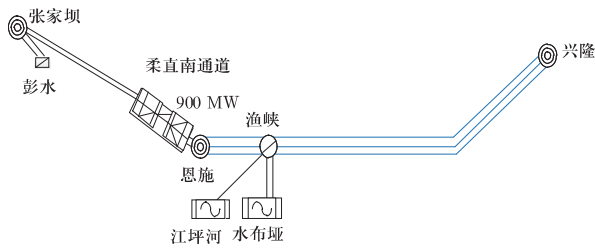


图 5 渔峡—兴隆近区电气接线图  
Fig. 5 Electrical diagram of Yuxia-Xinglong

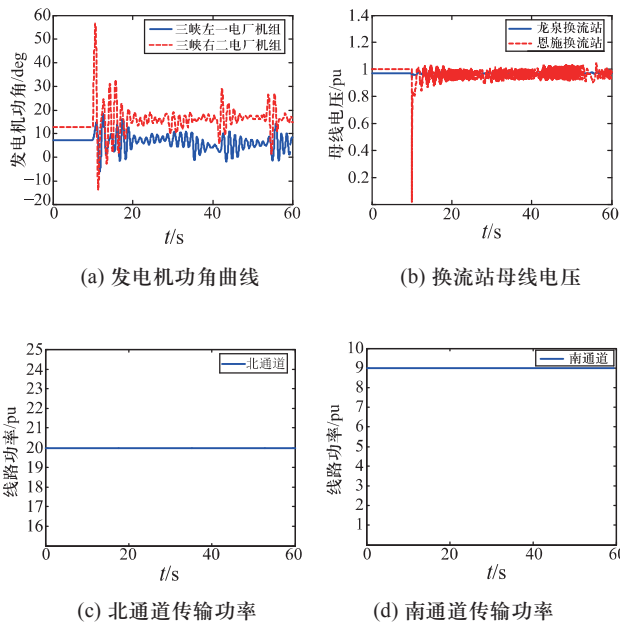


图 6 柔直定功率系统响应曲线  
Fig. 6 System response of constant power system

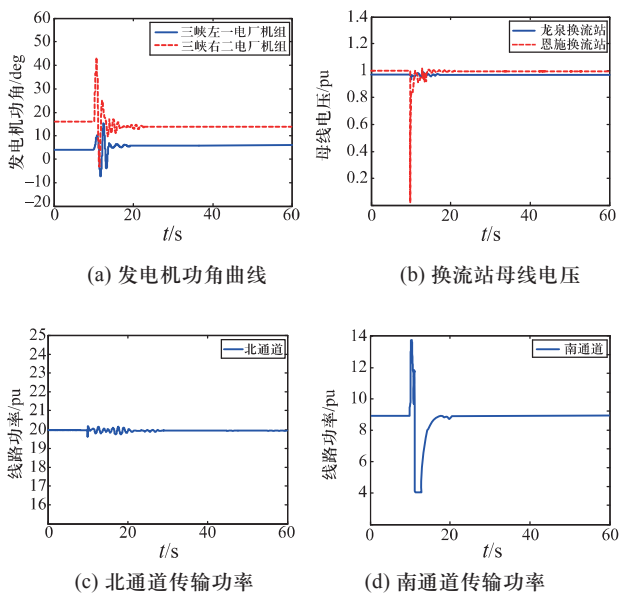


图 7 附加频率控制系统响应曲线  
Fig. 7 System response of additional frequency control

流站近区龙泉、恩施母线电压失稳，三峡电厂机组功角失稳。由于柔直定功率，有效隔离了故障，故重庆侧频率、电压均没有波动，在此不再详述。

2) 柔直附加频率控制。

启动附加频率控制，故障后，系统在10 s后恢复稳定。图7为附加频率控制系统响应曲线，由图7(d)可以看出，柔直南通道张家坝到恩施有功功率最大调节达到限幅500 MW，随着湖北侧频率逐渐稳定，柔直重新定功率运行。渔峡—兴隆N-2故障通过附加频率或者功率紧急控制均可恢复稳定，本文只介绍附加频率控制。

2 渝鄂工程控制保护功能测试

为了进一步分析交直流系统的相互影响，确保设备的安全可靠运行，如柔性直流近区PCC点交流母线发生故障时系统的动态响应，尤其是柔性直流对交流不对称故障的穿越能力，本文基于RT-LAB开发了渝鄂背靠背柔直系统的实时数字仿真模型，结合实际的极控制保护装置和阀基控制系统进行了数模混合硬件在环仿真。仿真平台的整体结构如图8所示。

如果交流系统发生故障，会引起柔直近区交流母线电压的跌落，从而导致故障电流进入换流阀，桥臂电流迅速增大。如果桥臂电流值大于保护阈值，则会引起柔直换流阀的闭锁跳闸，柔直失去功率传输的能力<sup>[13-15]</sup>。柔直长时间的闭锁会导致交流系统功率的不平衡，对交直流系统的暂态稳定性产生影响。针对以上问题，本节介绍了两种故障穿越策略：暂时性闭锁策略和分桥臂闭锁策略。这两种策略能够提高柔性直流输电系统的故障穿越能力，避免故障电流过大导致换流阀永久闭锁，同时使柔直能够在交流故障期间仍然保留一定的有功功率传输能力。

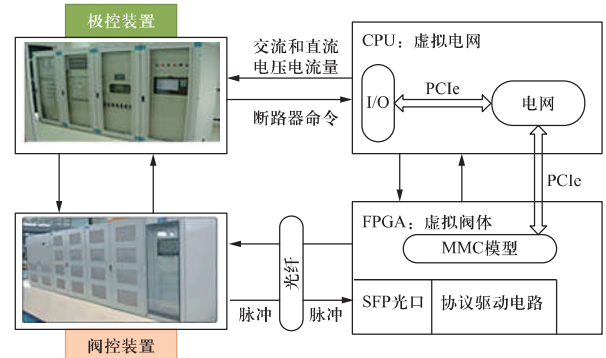


图 8 仿真平台架构  
Fig. 8 Simulation platform architecture

## 2.1 暂时性闭锁策略

基于暂时性闭锁的故障穿越策略：①当检测到换流阀近区发生交流系统故障后，有功功率给定值按照故障侧正序电压幅值进行等比例限制；②采用负序电流控制，目标是对故障时交流线路上的负序电流进行抑制；③渝鄂工程额定功率运行时桥臂电流峰值达到了1800 A，按照故障电流最大上升率1 kA/ms进行计算，结合IGBT及并联二极管的瞬态热阻曲线和最大结温限制，设置桥臂过流暂时性闭锁的保护定值为2100 A，判定时间为60  $\mu$ s，永久闭锁的保护定值为2600 A<sup>[18]</sup>；④如果任一桥臂电流超过保护阈值并触发闭锁指令，则有功功率指令置0，同时闭锁换流阀，经过25 ms之后再重新解锁换流阀。以上策略在闭锁换流阀一定时间之后再重新解锁换流阀，能够减少因有功传输中断引起的功率缺额，避免因功率不平衡引起的交流电网失稳或者振荡。在交流故障时对有功功率的传输进行限制，可以有效抑制故障电流的大小和上升速率，避免触发永久性闭锁，同时减少重新解锁时的电流冲击，保证系统的持续运行。

仅考虑渝鄂工程北通道的单条柔直线路，设置系统的运行工况为：渝侧向鄂侧输送1250 MW的额定有功功率，两侧换流站分别向交流电网输送520 Mvar的无功功率。在系统运行过程中设置鄂侧PCC点两相相间金属性短路故障，故障持续时间为100 ms。图9所示为故障发生和恢复后鄂侧换流站的动态响应。由图可知，故障发生后桥臂电流迅速增大，A相上桥臂的电流首先超过过流保护阈值并触发闭锁。在闭锁阶段，鄂侧换流站不再向交流系统输送有功功率，从而造成了一定时间的有功功率缺额。在闭锁25 ms之后换流阀重新解锁，系统的有功功率逐渐上升到限幅值。虽然负序电流控制器能够将负序电流抑制到零，但是由于阀侧电压存在负序电压分量，因此系统的有功功率中存在二倍频波动。当故障清除之后，系统的有功功率逐渐恢复到故障前的水平。

## 2.2 分桥臂闭锁策略

基于分桥臂闭锁的故障穿越策略：策略①、②和③与基于暂时性闭锁的故障策略相同；策略④的不同点在于，如果有桥臂检测到电流超过保护阈值，则仅闭锁过流的桥臂，其他未过流的桥臂保持正常运行。

设置相同的运行工况和故障条件，图10所示为分桥臂闭锁策略下故障发生和恢复后鄂侧换流站的动态响应。由图10可知，故障发生后A相上桥臂因桥臂过

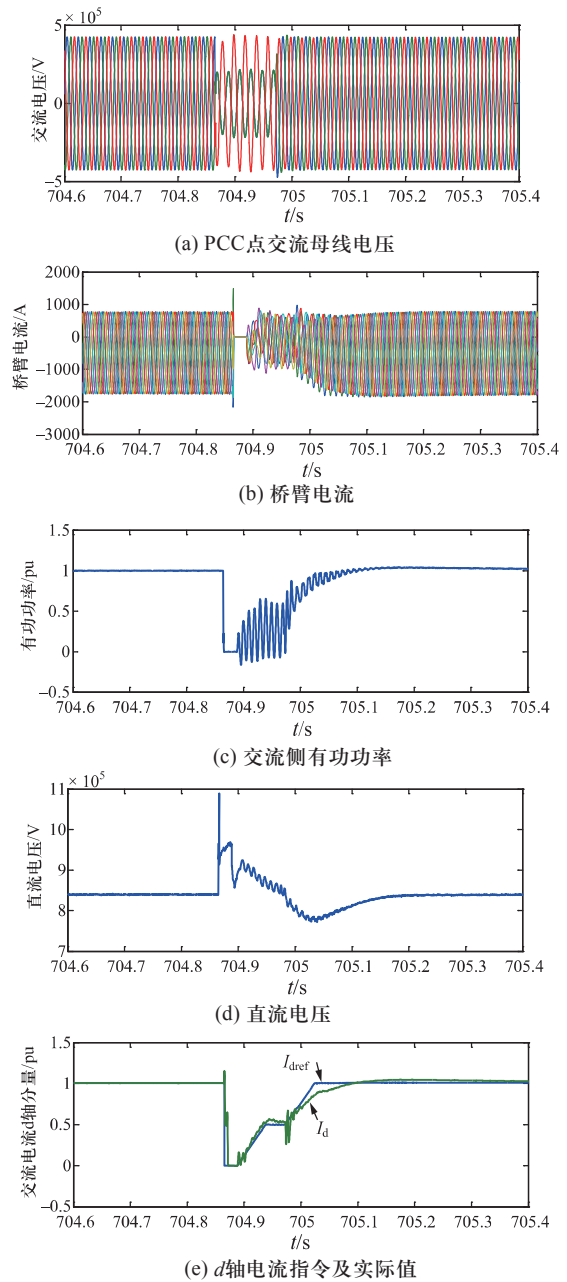


图9 暂时性闭锁策略下两相相间短路故障波形

Fig. 9 Waveform to two phase short circuit under transient block strategy

流闭锁，A相下桥臂以及B、C两相的桥臂保持正常运行。为了避免更多的桥臂闭锁，在故障期间对传输的有功功率进行了限幅，与交流故障电压的正序分量成正比。当故障清除之后，系统的有功功率逐渐恢复到故障前的水平。对比图10(c)和图10(d)可知，相比于换流阀整体闭锁方案，分桥臂闭锁策略能够保证换流阀在交流故障期间传输更多的有功功率。

以上实验结果表明，采用合理的故障穿越策略，能够在有效保护换流阀的同时避免换流阀的闭锁停运，有效提高换流阀的故障穿越能力，在一定程度上

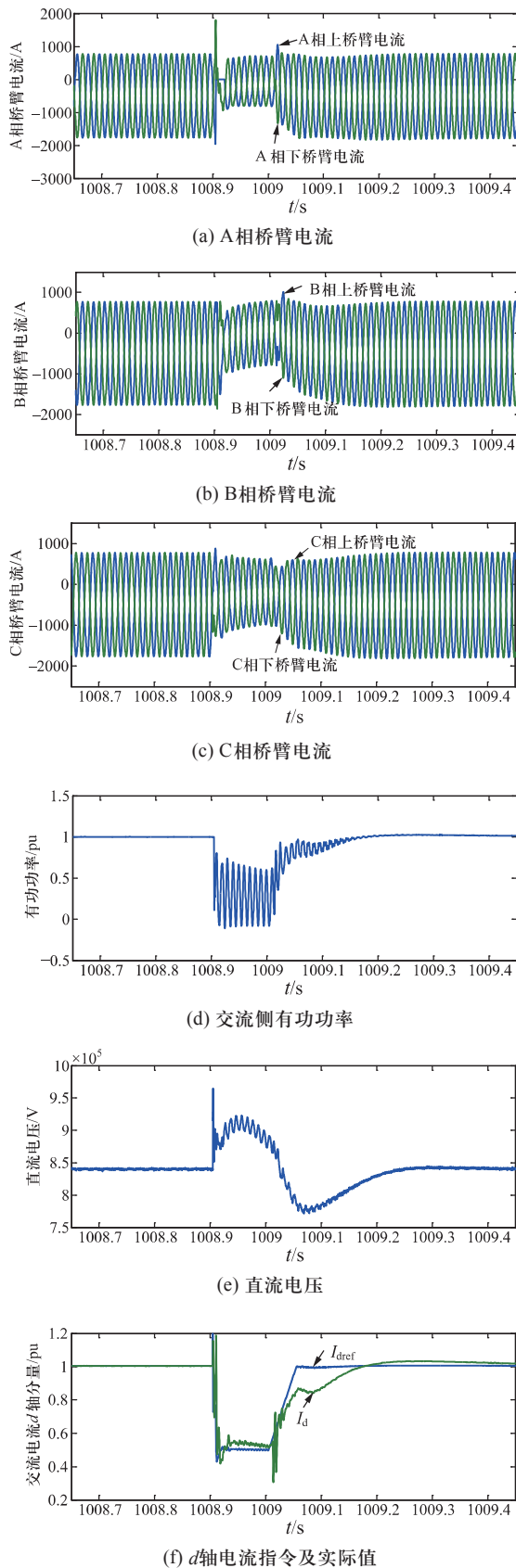


图 10 分桥臂闭锁策略下两相相间短路故障波形

Fig. 10 Waveform to two phase short circuit under independent arm block strategy

减小故障期间柔直传输的有功功率缺额, 从而减小对交流系统的冲击, 保证交直流系统的安全运行。相比暂时性闭锁, 分桥臂闭锁方案在故障期间能够传输更多的有功功率, 从而进一步降低交流故障对柔性直流换流器和交流系统的影响。

### 3 结语

本文根据渝鄂工程实际运行工况, 提出了柔直附加控制策略和故障穿越策略, 针对典型故障, 在两种仿真平台上分别进行了仿真, 得到如下结论:

1) 离南北通道较近的渔峡—兴隆线路发生 $N-2$ 故障, 在交流联网情况下, 一侧交流系统故障可借助另一侧交流系统惯量抑制故障扰动, 维持稳定; 柔直接入定功率运行, 会导致系统失稳, 需要充分调动柔直功率快速响应特性, 通过启动附加频率控制, 增加系统惯量, 维持系统稳定。

2) 柔直附加控制可参与系统安全稳定控制策略制定, 进一步提高互联系统稳定性。但由于实际系统运行的复杂性, 所提策略的参数仍需要在多种工况下进行实用性验证。

3) 采用合理的故障穿越策略, 能够在有效保护换流阀的同时避免换流阀的闭锁停运, 提高换流阀的故障穿越能力, 在一定程度上减小故障期间柔直传输的有功功率缺额, 从而减小对于交流系统的冲击, 保证交直流系统的安全运行。

### 参考文献

- [1] 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: 1-27.  
Tang Guangfu. High Voltage Direct Current Technique Based on Voltage Source Converter[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2010: 1-27(in Chinese).
- [2] 徐政. 柔性直流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012: 1-45.  
Xu Zheng. Flexible HVDC Transmission System[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2012: 1-45(in Chinese).
- [3] Kou L, Zhu L, Li F. Electromechanical Modelling of Modular Multilevel Converter Based HVDC System and Its Application[C]// Energy Internet and Energy System Integration (EI2). Beijing: IEEE Conference on, 2017.
- [4] 刘昇, 徐政, 唐庚, 等. VSC-HVDC机电暂态仿真建模及仿真[J]. 电网技术, 2013, 37(6): 1672-1677.  
Liu Sheng, Xu Zheng, Tang Geng, et al. Electromechanical Transient Modeling and Simulation for Voltage Source

- Converter Based HVDC Power Transmission[J]. Power System Technology, 2013, 37(6): 1672-1677(in Chinese).
- [5] Meshram, P. M., V. B. Borghate. A Simplified Nearest Level Control (NLC) Voltage Balancing Method for Modular Multilevel Converter (MMC). IEEE Transactions on Power Electronics 30.1(2015): 450-462.
- [6] 李国庆, 江守其, 辛业春, 等. 柔性高压直流输电系统数字物理混合仿真功率接口及其算法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1915-1924.  
Li Guoqing, Jiang Shouqi, Xin Yechun, et al. A Novel Interface Algorithm of Power Hardware-in-the-loop Simulation for MMC-HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1915-1924 (in Chinese).
- [7] 辛业春, 江守其, 李国庆, 等. 柔性直流输电系统数字物理混合仿真改进阻抗接口算法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(2): 90-97.  
Xin Yechun, Jiang Shouqi, Li Guoqing, et al. Improved Damping Impedance Interface Algorithm of Power Hardware-in-the-loop Simulation for Flexible DC Transmission Systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(2): 90-97 (in Chinese).
- [8] 辛业春, 江守其, 李国庆, 等. 电力系统数字物理混合仿真接口算法综述[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(15): 159-167.  
Xin Yechun, Jiang Shouqi, Li Guoqing, et al. Review on Interface Algorithms of Power Hardware-in-the-loop Simulation for Power Systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(15): 159-167 (in Chinese).
- [9] Saad, Hani, Xavier Guillaud, Jean Mahseredjian, et al. MMC Capacitor Voltage Decoupling and Balancing Controls. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(2): 704-712.
- [10] 李柏青, 秦晓辉. 现代交直流混合电网安全稳定智能协调控制系统框架探讨[J]. 全球能源互联网, 2018, 1(1): 275-282.  
Li Baiqing, Qin Xiaohui. Discussion on the Framework of Smart and Coordinated Control System for Security and Stability of Modern AC/DC Hybrid Power Grid[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2018, 1(1): 275-282(in Chinese).
- [11] 朱瑞可, 王渝红, 李兴源, 等. 用于VSC-HVDC互联系统的附加频率控制策略[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(16): 81-87.  
Zhu Ruike, Wang Yuhong, Li Xingyuan, et al. An Additional Frequency Control Strategy for Interconnected Systems Through VSC-HVDC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(16): 81-87(in Chinese).
- [12] 潘晓杰, 张顺, 文汀, 等. 渝鄂异步互联对华中电网运行特性的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(19): 157-162.  
Pan Xiaojie, Zhang Shun, Wen Ting, et al. Operation Characteristic Analysis of Central China Power Grid in Unsynchronized Interconnection of Chongqing and Hubei Power Grid[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(19): 157-162(in Chinese).
- [13] 徐友平, 张珂, 潘晓杰, 等. 渝鄂背靠背柔性直流附加阻抗控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(18): 163-169.  
Xu Youping, Zhang Ke, Pan Xiaojie, et al. Damping Control Based on Back to Back VSC-HVDC Connecting Chongqing and Hubei Power Grid[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(18): 163-169(in Chinese).
- [14] 郑超, 刘柏私, 摆世彬, 等. 直异步互联后送端区域电网动态特性变化及稳定控制[J]. 全球能源互联网, 2018, 1(2): 129-136.  
Zheng Chao, Liu Bosi, Bai Shibin, et al. Study on the Dynamic Characteristic and Stability Control Measures for Asynchronous Interconnection Regional Power Grid With VSC-HVDC[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2018, 1(2): 129-136 (in Chinese).
- [15] 阳岳希, 杨杰, 贺之渊, 等. 基于MMC的背靠背柔性直流输电系统控制策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(4): 120-157.  
Yang Yuexi, Yang Jie, He Zhiyuan, et al. Control Strategy of MMC Based Back to Back HVDC Transmission System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(4): 120-157(in Chinese).
- [16] 裘鹏, 章姝俊, 黄晓明, 等. MMC-HVDC系统中阀侧交流母线故障保护策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(19): 150-154.  
Qiu Peng, Zhang Shujun, Huang Xiaoming, et al. Research on the Protection Strategies of Internal AC Bus Fault Based on MMC-HVDC [J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(19): 150-154(in Chinese).
- [17] 吴庆范, 付艳, 张克辉, 等. 柔性直流输电系统交流母线差动保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(3): 100-104.  
Wu Qingfan, Fu Yan, Zhang Kehui, et al. Research on AC Bus Differential Protection of Flexible DC Transmission System[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(3): 100-104(in Chinese).
- [18] 李强, 庞辉, 贺之渊. 模块化多电平换流器损耗与结温的解析计算方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(4): 85-91.  
Li Qiang, Pang Hui, He Zhiyuan. Analytic Calculation Method for Loss and Junction Temperature of Modular Multilevel Converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(4): 85-91(in Chinese).

收稿日期: 2018-07-04; 修回日期: 2018-07-30。



朱琳

作者简介:

朱琳(1986), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统及柔性直流仿真技术, E-mail:zhulin@geiri.sgcc.com.cn。

寇龙泽(1989), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统及柔性直流仿真技术, E-mail:koulongze@geiri.sgcc.com.cn。

(责任编辑 赵杨)