

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2018.09.032

特高压交直流输电系统暂态混合仿真研究

王亮¹, 荆澜涛¹, 姚晔², 许东³, 许晓峰¹, 梁海超⁴

(1. 沈阳工程学院电力学院, 沈阳 110136; 2. 国网辽宁省电力有限公司检修分公司, 沈阳 110003;
3. 国网辽宁省电力有限公司实业分公司, 沈阳 110004; 4. 国网吉林省电力有限公司检修公司, 长春 130000)

摘要: 随着电力系统发展, 纯机电暂态和电磁暂态仿真在分析大规模特高压交直流混合电网时已呈现明显不足。为了准确分析特高压交直流输电系统的动态特性, 文中基于电力系统全数字实时仿真平台(ADPSS)搭建了特高压交直流输电系统的机电—电磁暂态混合仿真模型, 并对整流侧和逆变侧交流母线故障进行了仿真分析。结果表明通过机电—电磁暂态混合模型仿真结果输出, 能够有效体现直流系统整体以及局部的各个元器件的详细动态过程, 为特高压交直流系统的稳定控制提供技术理论支撑。

关键词: 特高压交直流系统; 分层接入方式; 机电暂态仿真; 电磁暂态仿真; 机电—电磁暂态混合仿真

Transient Hybrid Simulation of UHV AC/DC Power Transmission System

WANG Liang¹, JING Lantao¹, YAO Ye², XU Dong³, XU Xiaofeng¹, LIANG Haichao⁴

(1. Institute of Electric Power, Shenyang Institute of Engineering, Shenyang 110136, China; 2. Maintenance Company, Liaoning Electric Power Company Limited, Shenyang 110003, China; 3. Industrial Branch, Liaoning Electric Power Company Limited, Shenyang 110004, China; 4. Maintenance Company, Jilin Electric Power Company Limited, Changchun 130000, China)

Abstract: With the development of power systems, the electromechanical transient simulation and electromagnetic transient simulation have become insufficient for large-scale UHV AC/DC hybrid power grids. In order to accurately analyze the dynamic characteristics of UHV AC/DC transmission systems, this paper builds an electromechanical and electromagnetic transient hybrid simulation model for an UHV AC/DC transmission system based on the advanced digital power system simulator (ADPSS), and simulates the AC-bus faults on rectifier side and inverter side. The results show that the output of the electromechanical and electromagnetic transient hybrid model can effectively reflect the detailed dynamic process of whole or partial DC system. This study may provide theoretical and technical support for the stability control of the UHV AC/DC system.

Key words: UHV AC/DC system; hierarchical connection mode; electromechanical transient simulation; electromagnetic transient simulation; electromechanical and electromagnetic transient hybrid simulation

0 引言

特高压输电系统具有输送距离远、容量大、损耗小等特点, 对中国大规模可再生能源的送出及消纳具有重要作用。特高压交直流输电工程相继投入运行, 电网的一体化特征不断加强, 电压和频率稳定性问题日益突出, 运行特性发生深刻变化^[1-3]。电力系统仿真是认识研究现代电网运行机理、分析

系统动态特性以及稳定性的有效技术手段。通过对特高压电网各相关电气元件的建模和仿真, 可以模拟和再现电源与电网的动态特性和功率调节特性, 指导装置的运行和控制。采用机电—电磁暂态混合仿真方法研究特高压交直流混合输电系统, 同时实现大规模特高压输电系统的机电暂态仿真结果输出和局部系统的电磁暂态仿真结果输出, 对详细分析特高压交直流输电系统的动态特性具有重要意义^[4-5]。

收稿日期: 2018-03-09; 修回日期: 2018-05-12

基金项目: 辽宁省教育厅科学研究项目(L201613); 博士启动基金项目(LGBS-1601)。

Project Supported by Scientific Research Projects in Liaoning Province Department of Education(L201613), Dr. Initial Funding Project (LGBS-1601).

文中通过研究特高压交直流输电系统基本原理,在基于电力系统全数字实时仿真平台(ADPSS)基础上,建立特高压交直流输电系统的机电—电磁暂态混合仿真模型,并对整流侧和逆变侧交流母线故障进行了仿真分析。结果表明通过机电—电磁暂态混合模型仿真结果输出,可以有效体现直流系统整体以及局部的各个元器件的详细动态过程,为特高压交直流系统的稳定控制提供技术理论支撑。

1 机电—电磁暂态混合仿真的原理

大规模电力电子器件广泛应用引起的波形畸变以及其快速暂态过程对特高压交直流复杂电力系统系统机电暂态过程的影响越发显著,极大地增加了电网分析、运行和控制的复杂度。电力系统机电暂态仿真以基波、单相和相量模拟技术为主要特征,在进行换流装置和FACTS等电力电子装置的快速暂态特性仿真方面不能满足仿真的精确性;而电磁暂态仿真程序受模型、算法等多方面因素的限制,在进行仿真时要对电力系统进行等值简化。单独的机电暂态仿真和单独的电磁暂态仿真难以适应现代电力系统尤其是规划初期的特高压交直流混合系统仿真的要求。因此,需要将电磁暂态程序和机电暂态结合起来进行混合仿真,从而有效指导系统规划、建设和运行^[6-9]。

电力系统机电—电磁暂态混合仿真技术同时具有机电暂态仿真和电磁暂态仿真的优点,通过电磁暂态和机电暂态分网,对大规模常规电力系统进行机电暂态仿真并且能避免对电力系统进行等值,就可以实现对其中重点关注的局部区域或者特定元件进行电磁暂态仿真。该技术可以较好的协调系统仿真的规模、精确性和快速性等问题,为大规模电力系统的稳定性、动态特性分析和研究提供了新的方法和途径。混合仿真的基本原理见图1。

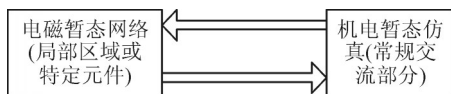


图1 机电—电磁暂态混合仿真原理图

Fig. 1 Schematic diagram of electromechanical-electromagnetic transient hybrid simulation

接口技术是机电—电磁混和仿真中的关键技术,主要包括接口位置的合理选择、机电子网和电磁子网两侧等值电路的形式以及两侧的数据交互方式、数据转换、电磁子网的仿真数值提取和数值稳定性、实时性等问题^[10-11]。文[11]中指出接口位置的选择应充分考虑接口处畸变波形包含的谐波分量、非周期分量等电气量对机电—电磁混合仿真结果的影响。对于特高压交直流网络,考虑到电磁暂

态仿真比较详细,为缩小仿真范围、减轻计算负担、提高仿真效率、保证仿真精度并且将换流装置、FACTS等电力电子器件包含在电磁暂态仿真程序中,通常选取高压或者特高压直流中换流变压器交流侧母线处或者FACTS等电力电子装置连接变压器侧母线处^[12-13]。当系统发生故障时,扰动引起波形畸变比较严重,仿真准确性降低,可以考虑将接口位置延伸到交流系统内部来降低波形畸变程度,从而提高仿真的精确性^[14]。目前主要将接口选在有充足无功备用容量的母线上,使接口处母线电压以及支路电流波形畸变保持在一定的限度内。混和仿真中需要对网络进行等值化处理,当进行电磁暂态仿真计算时,对机电暂态网络进行戴维南等值,对机电暂态网络进行计算时,需对电磁暂态网络进行诺顿等值,其等值电路图见图2。

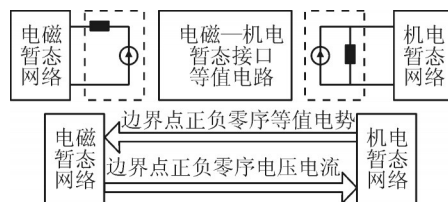


图2 机电—电磁暂态接口等值电路

Fig. 2 Interface equivalent circuit of electromechanical-electromagnetic transient

大电网机电—电磁暂态混合仿真,通常分为以下几个步骤^[15-17]:

- 1)确定需要仿真分析的目标网架结构及其相关参数,根据实际情况建特高压交直流电网的机电暂态仿真模型,并进行潮流计算分析。
- 2)根据潮流的计算分析结果以及目标网架的具体情况确定分网方案和接口,利用手工分网方法将目标网架合理划分机电暂态子网和电磁暂态子网。
- 3)搭建电磁暂态仿真模型,并添加机电暂态接口和电磁暂态接口,然后按步骤1)潮流计算结果填写电磁暂态子网初始潮流分布。
- 4)提交机电暂态子网和电磁暂态子网任务和作业,执行机电—电磁暂态混和仿真计算,并对其结果进行输出。

2 特高压交直流输电系统暂态混合仿真建立

电力系统全数字仿真装置(advanced digital power system simulator, ADPSS)是中国电力科学研究院自主研发的能够现对大规模复杂电力系统的机电暂态和电磁暂态的实时和超实时仿真。文中以ZQ特高压直流系统和规划的特高压交流电网为研究对象,主要研究方式为2020年基础运行方式。基于上述机电—电磁暂态混合仿真原理,应用电力系

统全数字实时仿真平台(ADPSS)搭建特高压交直流系统的机电暂态模型和特高压直流分层接入的电磁暂态模型^[18]。

2.1 特高压交直流系统混合仿真模型机电暂态部分

特高压交直流系统机电暂态模型采用某电网规划数据搭建,其模型采用的是国内某电网的孤网模型,模型中的特高压交直流系统参数采用规划数据,500 kV 及以下电压等级的各元件均与电网内实际运行参数保持一致,其具体结构见图3。

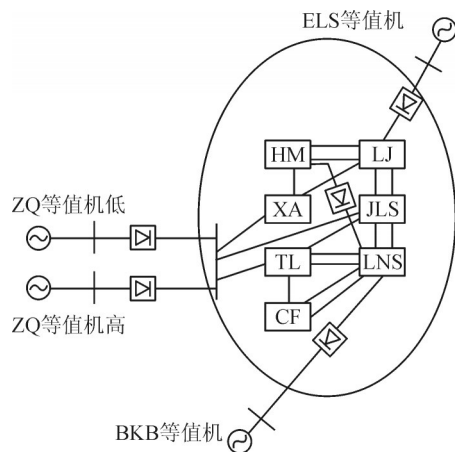


图3 特高压交直流系统机电暂态模型
Fig. 3 Electromechanical transient model of UHV AC/DC system

2.2 特高压直流系统混合仿真模型电磁暂态部分

在仿真软件 ETSDAC 中搭建电磁暂态模型,具

有分层结构的特高压直流输电系统包括整流站、两个逆变站、交流滤波器、直流滤波器、平波电抗器、接地极和相应的控制系统。

2.2.1 特高压直流一次系统建模

特高压直流输电工程一次设备主要包括整流站、两个逆变站、交流滤波器、直流滤波器、平波电抗器、接地极,其主要参数见表1。

表1 ZQ特高压直流输电工程主要设备参数
Table 1 Main equipment parameters of ZQ UHVDC transmission system project

参数	ZLT 换流站	ZQ低换	LQZ换
交流侧额定运行电压 U_d/kV	530	1 050	525
换流变压器漏抗 $X_d/\%$	21	20	20
换流变压器变比 T_n	530/172.9	1 050/168	525/168
换流变压器单极容量 S/MVA	6 112	5 832	5 832
直流线路电阻 R/Ω	5.75	5.75	5.75

直流系统在实际运行过程中需要大量的无功功率,其比例大约占输送有功功率的40%~60%,这些无功补偿装置交流滤波器和并联电容器共同组成^[19]。交流滤波器模型的搭建采用串联RLC元件,其接线图见图4。

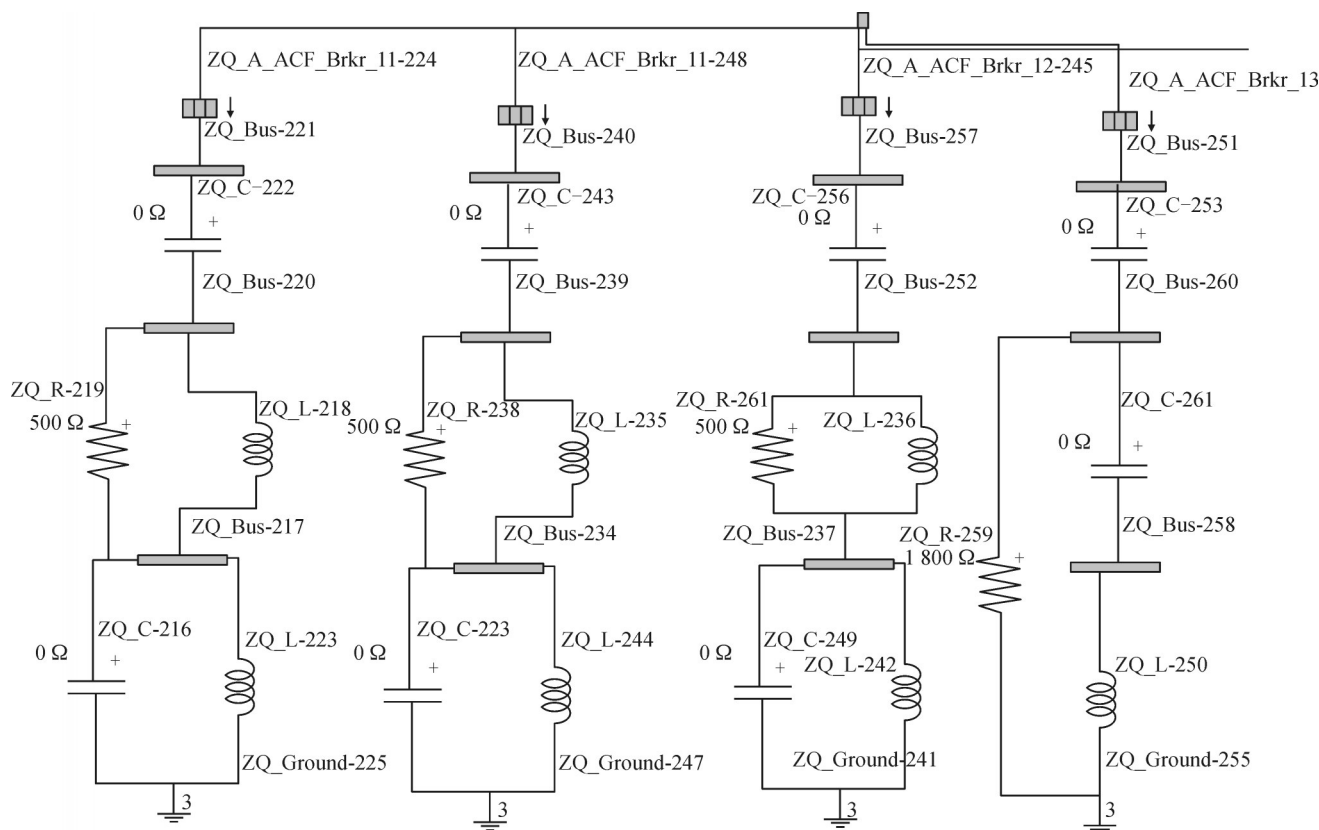


图4 交流滤波器模型图
Fig. 4 The model diagram of AC filter

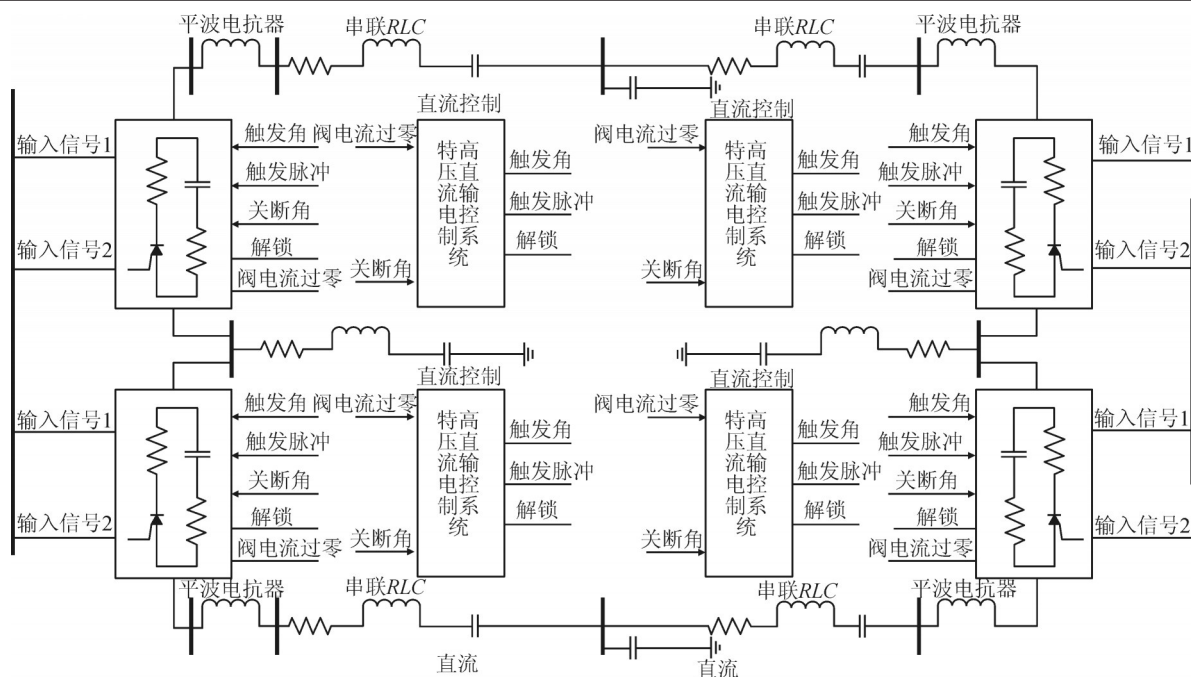


图7 特高压直流输电系统电磁暂态模型

Fig. 7 Electromagnetic transient model of UHVDC transmission

3.2 仿真结果及分析

逆变侧交流母线短路故障仿真分析:考虑直流逆变侧交流母线三相短路故障,故障发生时刻为8 s,持续时间0.5 s,90 ms切除近端线路,100 ms切除远端线路,分别对实际算例进行机电—电磁暂态混合

仿真计算和纯机电暂态仿真。进行机电—电磁暂态混合仿真时,直流逆变侧交流母线三相短路故障工况下的两侧换流器电流、电压及换流阀触发角的仿真波形分别见图8、9;进行纯机电暂态仿真时,各电气量的波形见图10。

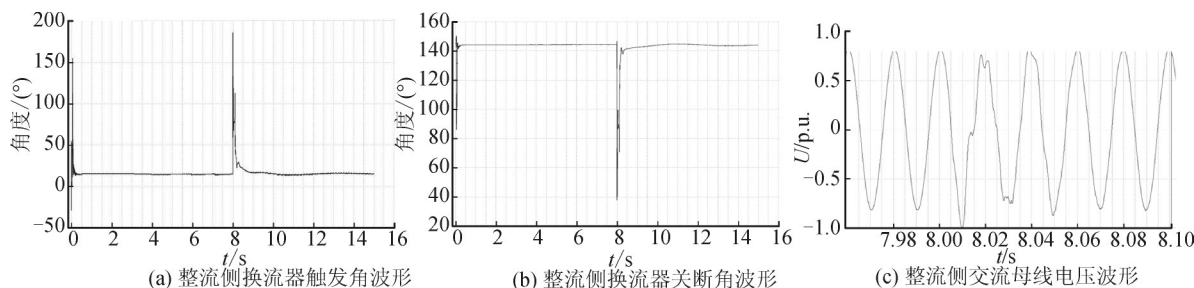


图8 整流侧各电气量仿真波形

Fig. 8 Simulation waveforms of each electrical quantity on the rectifier side

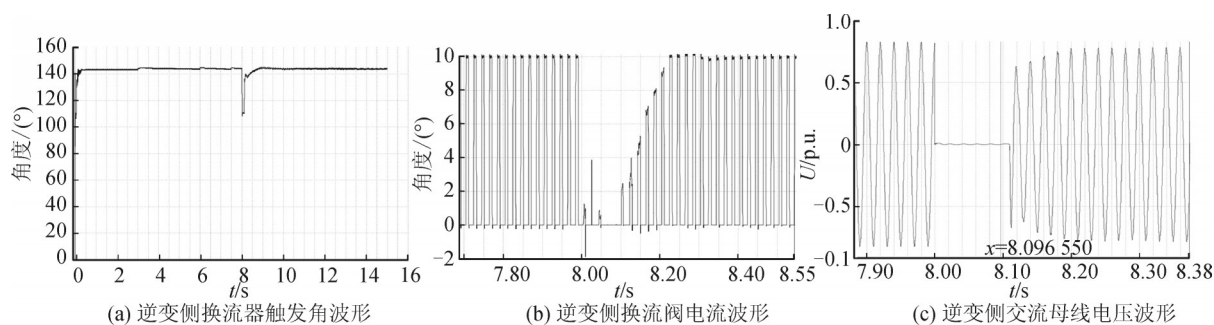


图9 逆变侧各电气量仿真波形

Fig. 9 Simulation waveforms of each electrical quantity on the inverter side

仿真结果表明,机电—电磁混合仿真在仿真期间存在接口间的数据交互,针对特高压交直流输电工程,混合仿真方法是有效的,能同时兼顾机电暂

态与电磁暂态的优点,更好体现故障期间的暂态过程,其仿真结果与实际故障工况比较接近。混合仿真中能同时实现机电暂态仿真结果输出,机电—电

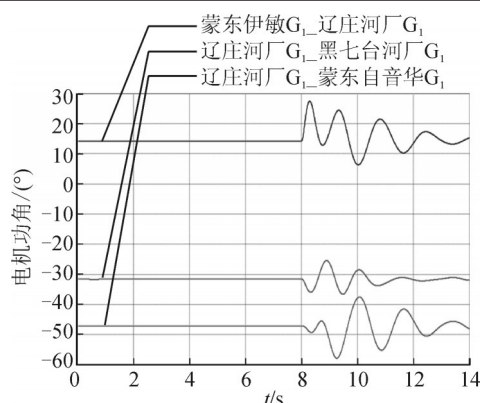


图10 纯机电暂态仿真各电气量仿真波形

Fig. 10 Electromechanical transient simulation waveforms of each electrical quantity on the each side

磁暂态混合仿真整体或局部的仿真结果输出,可以有效掌握直流系统内部器件的详细动态过程,并且为特高压交直流系统的稳定控制提供技术支撑和理论指导。

4 结语

文中通过对电力系统电磁暂态与机电暂态混合仿真机理及关键接口技术的研究,为准确分析特高压交直流输电系统的动态特性,以某实际特高压交直流输电系统为背景,在基于电力系统全数字实时仿真平台(ADPSS)的基础上,建立了特高压交直流输电系统的机电—电磁暂态混合仿真模型,并对逆变侧交流母线故障进行了仿真分析。仿真结果表明机电—电磁暂态混合仿真模型对大规模电网的电磁暂态过程动态分析细节描述效果明显,适合研究特高压交直流输电系统快速变化的暂态过程,能够准确真实地反映特高压交直流输电系统的实际运行情况,为今后开展静止无功补偿器、特高压直流电网分层接入交流系统、分布式发电、微电网等方面的仿真研究工作,提供有力的技术理论支撑。

参考文献:

- [1] 程改红,陆韶琦,邵冲,等. 大规模交直流电力系统电磁暂态仿真高效建模方法[J]. 电网技术, 2017, 41(6): 1920-1926.
CHENG Gaihong, LU Shaoqi, SHAO Chong, et al. A high efficiency modeling method for electromagnetic transient simulation of large scale AC/DC power system[J]. Power System Technology, 2017, 41(6): 1920-1926.
- [2] 王哲,张豪. 电力系统机电-电磁暂态混合仿真接口技术[J]. 电力科学与工程, 2009, 25(4): 5-10.
WANG Zhe, ZHANG Hao. Technology of interfaces for hybrid simulation of power system electromagnetic-electromechanical transient process[J]. Electric Power Science and Engineering, 2009, 25(4): 5-10.
- [3] 赵云灏. 高压直流系统动态相量建模与控制策略研究[D]. 北京:华北电力大学, 2017.
ZHAO Yunhao. Research on dynamic phasor modelling and control strategy of high voltage direct current system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [4] 岳程燕,田芳,周孝信,等. 电力系统电磁-机电暂态混和仿真接口原理[J]. 电网技术, 2006, 30(1): 23-27.
YUE Chengyan, TIAN Fang, ZHOU Xiaoxin, et al. Principle of interfaces for hybrid simulation of power system electromagnetic-electromechanical transient process[J]. Power System Technology, 2006, 30(1): 23-27.
- [5] 丁平,安宁,赵敏. 一种实用的电压源型换流器及直流电网机电暂态建模方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(10): 70-76.
DING Ping, AN Ning, ZHAO Min. A practical modeling method of VSC-HVDC and DC-grid electromechanical transient[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(10): 70-76.
- [6] 岳程燕,田芳,周孝信,等. 电力系统电磁暂态-机电暂态混和仿真接口应用[J]. 电网技术, 2006, 30(11): 1-5.
YUE Chengyan, TIAN Fang, ZHOU Xiaoxin, et al. Application of hybrid simulation of power system electromagnetic-electromechanical transient process[J]. Power System Technology, 2006, 30(11): 1-5.
- [7] 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.
- [8] 杨洋,肖湘宁,陶顺,等. 一种机电—电磁暂态混合仿真外部系统各序等值及实现方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(21): 71-76.
YANG Yang, XIAO Xiangning, TAO Shun, et al. A three-sequence external system equivalent and its realization for electrometrical and electromagnetic hybrid simulation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(21): 71-76.
- [9] 闫凯,张保会,翟继平,等. 光伏发电系统暂态建模与等值[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 1-8.
YAN Kai, ZHANG Baohui, QU Jiping, et al. Photovoltaic power system transient modeling and equivalents[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 1-8.
- [10] 柳勇军. 电力系统机电暂态和电磁暂态混和仿真技术的研究[D]. 北京:清华大学, 2006.
LIU Yongjun. Study on power system electromechanical transient and electromagnetic transient hybrid simulation[D]. Beijing: Tsinghua University, 2006.
- [11] 梁国开,夏成军. 电力系统机电暂态和电磁暂态数字混和仿真研究[J]. 陕西电力, 2014, 42(3): 40-44.

- LIANG Guokai, XIA Chengjun. Study on power system electromechanical transient and electromagnetic transient hybrid simulation[J]. Shaanxi Electric Power, 2014, 42(3): 40-44.
- [12] 朱雨晨, 赵冬梅, 刘世良, 等. 基于机电-电磁暂态混合仿真的电网合环分析计算系统[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(23): 73-79.
- ZHU Yuchen, ZHAO Dongmei, LIU Shiliang, et al. Loop closing analytical calculation system based on electromagnetic-electromechanical transient simulation for power network[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(23): 73-79.
- [13] WATSON N R, ARRILLAGA J. Power systems electromagnetic transients simulation[M]. London: The Institution of Electrical Engineers, 2003.
- [14] REEVE J, ADAPA K. A new approach to dynamic analysis of AC networks incorporating detailed modeling of DC systems. Part I: Principles and implementation[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1988, 3(4): 2005-2011.
- [15] 朱旭凯, 周孝信, 田芳, 等. 基于电力系统全数字实时仿真装置的大电网机电暂态-电磁暂态混和仿真[J]. 电网技术, 2011, 35(3): 26-31.
- ZHU Xukai, ZHOU Xiaoxin, TIAN Fang, et al. Hybrid Electromechanical-electromagnetic transient simulation to transient process of large-scale power grid on the basis of ADPSS[J]. Power System Technology, 2011, 35(3): 26-31.
- [16] 陈磊, 张侃君, 夏勇军, 等. 基于ADPSS的高压直流输电系统机电-电磁混合仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(12): 136-142.
- CHEN Lei, ZHANG Kanjun, XIA Yongjun, et al. Electromechanical-electromagnetic transient hybrid simulation on HVDC power transmission system based on ADPSS[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(12): 136-142.
- [17] 丁茂生, 王辉, 舒兵成, 等. 含风电场的多直流送出电网电磁暂态仿真建模[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 63-70.
- DING Maosheng, WANG Hui, SHU Bingcheng, et al. Electromagnetic transient simulation model of multi-send HVDC system with wind plants[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 63-70.
- [18] 中国电力科学研究院. 电力系统全数字仿真装置用户手册[Z]. 北京: 中国电力科学研究院, 2015.
- China Electric Power Research Institute. Advanced digital power system simulator[Z]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2015.
- [19] 李兴源. 高压直流输电系统的运行和控制[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- LI Xingyuan. Operation and control of HVDC transmission system[M]. Beijing: Science Press, 1998.
- [20] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- ZHAO Wanjuan. HVDC transmission engineering technology [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2011.
- [21] 刘振亚. 特高压交直流电网[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
- LIU Zhenya. UHV AC/DC grid[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2013.
- [22] 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.
- XU Zheng. Analysis of dynamic behavior of AC and DC power systems[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2004.

王亮(1983—), 男, 博士研究生, 研究方向为配电自动化新技术及其应用。

荆澜涛(1985—), 女, 博士研究生, 主要从事电力系统运行控制与分析等研究工作。

(上接第201页)

- [20] 曹荣江, 顾霓鸿. 交流高压断路器参数选用导则[M]. 北京: 中国电力出版社, 1997.
- CAO Rongjian, GU Nihong. Guide for parameter selection of AC HV circuit breaker[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1997.
- [21] 曹荣江, 顾霓鸿, 盛勇. 电力系统潜供电弧直灭特性的模拟研究[J]. 中国电机工程学报, 1996, 16(2): 73-78.
- CAO Rongjiang, GU Nihong, SHENG Yong. Test study on self-extinction behavior of secondary arc on power system[J]. Proceedings of the CSEE, 1996, 16(2): 73-78.
- [22] 陈水明, 许伟, 何金良. 1 000 kV交流输电线路的工频暂态过电压研究[J]. 电网技术, 2005, 29(19): 31-35.
- CHEN Shuiming, XU Wei, HE Jinliang. Research on power frequency transient overvoltage in 1000 kV UHV AC transmission line[J]. Power System Technology, 2005, 29(19): 31-35.
- 李山(1982—), 男, 硕士生, 工程师, 主要研究方向为电力系统分析和电磁暂态仿真。
- 张媛(1988—), 女, 硕士生, 工程师, 主要研究方向为电力系统分析和电磁暂态仿真。
- 周利兵(1988—), 男, 硕士生, 工程师, 主要研究方向为开关专业。
- 刘振国(1989—), 男, 硕士生, 助理工程师, 主要研究方向为开关。
- 王建(1986—), 男, 硕士生, 工程师, 主要研究方向为输变电设备状态检测和诊断专业。