

DOI: 10.7667/PSPC171268

抽蓄电站和经多端柔性直流电网接入的大规模 新能源间的协调互补优化控制方案

李文锋, 张健, 卜广全, 王晖, 赵兵

(中国电力科学研究院, 北京 100192)

摘要: 目前多端柔性直流电网多用于海上风电, 但多端柔直本质上并不能抑制新能源出力波动。介绍了一种抽蓄电站和经多端柔性直流电网接入的大规模新能源间的协调互补优化控制方案。在网省调度中心设置控制主站, 抽蓄电站内设置执行子站。主站担任主要数据分析、抽蓄电站有功调整指令发布等功能, 并具备不同的控制模式。子站担任接收主站发布抽蓄电站有功调整指令, 根据抽蓄电站内的实时运行工况, 对每台机组的调速器发出实际执行指令。该系统主要用于解决跨区新能源消纳和风电光伏接入系统后对系统稳定性的影响, 同时系统还具备应急功率波动控制功能, 在华北电网出现大量功率缺额时提供紧急频率支援。仿真结果表明, 协调互补优化控制方案能够有效地抑制新能源出力波动, 降低新能源波动对华北电网的冲击, 实现新能源的友好送出。

关键词: 多端柔直; 互补优化; 新能源波动; 主站; 子站

A coordinate complementary optimization control scheme between pumped storage station and large-scale new renewable integrated through VSC-MTDC

LI Wenfeng, ZHANG Jian, BU Guangquan, WANG Hui, ZHAO Bing
(China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: Multi-terminal high voltage DC transmission with voltage source converter (VSC-MTDC) is mainly used in off-shore wind farms at present, but VSC-HVDC cannot essentially suppress renewable energy power fluctuation. A coordinate complementary optimization control scheme between pumped storage station and large-scale new renewable integrated through VSC-MTDC is proposed. Master station is set up in grid level dispatch center and execution slave station is built in the pumped storage station. Master station is mainly assigned for data analysis, pumped storage station active power instruction release and other functions, meanwhile it has different control modes. Slave station is assigned for receiving pumped storage station active power instruction from master station and issuing actual execution instruction to each unit's governor in consideration of actual situation in pumped storage station. This system is mainly for solving trans-provincial renewable energy accommodation problem and influence on system stability due to wind and solar integrated in grid. Meanwhile, this system is equipped with emergency power fluctuation control, which can provide emergency frequency support when North China Power Grid appears a lot of power shortages. Simulation results show that wide area governor control can effectively suppress renewable energy power fluctuation, reduce impulse impact on North China Power Grid because of renewable energy power fluctuation and send out renewable energy with friendly power supply.

This work is supported by National Key R & D Program of China (No. 2016YFB0900605) and Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. XT71-16-035).

Key words: VSC-HVDC; complementary optimization; renewable energy fluctuation; master station; slave station

0 引言

2016 年全球可再生能源电力新增容量再创新高,

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFB0900605); 国家电网公司科技项目 (XT71-16-035)

达到 161 吉瓦(GW), 全球累计装机近 2017 GW, 较 2015 年增幅约 9%, 2016 年度全球可再生能源新增装机容量持续超过化石能源装机容量, 其中, 太阳能光伏在年新增电力容量中占比最高, 约为 47%; 其次为风电, 占比为 34%; 水电占比为 15.5%^[1]。由于可再生能源成本价格的持续走低、电力需求连

续增长和政策落实, 可再生能源在数量上和空间分布上都保持快速增长。

随着新能源的大规模接入, 新能源的消纳成了急需解决的问题, 中国在全国弃风总电量达到 339 亿 kWh, 平均弃风率达 15%, 弃光总电量 46.5 亿 kWh, 弃光率达 11%^[2]。电力系统的稳定性和可靠性也面临了巨大的风险, 风电反调峰的特性使得负荷等效峰谷差增大, 电网的调峰问题更加严重, 风电多在夜间高发, 而夜间负荷较少, 因而风电多在夜间发生弃风现象^[3-5]。

目前国内外许多学者提出采用风光互补^[6-7], 风光火打捆外送^[8-9], 安装储能装置^[10]等来平抑新能源出力波动的问题, 采用储能装置是目前平抑新能源波动比较有效的一种方法, 由于抽水蓄能电站相比于其他的储能方式具有容量大、寿命长、灵活度高和技术较为成熟等优点, 因此抽水蓄能电站正在受到越来越多的关注^[11]。传统的抽水蓄能电站只能采取满抽满发的模式, 不能实现连续控制, 可变速抽水蓄机组能够实现发电时的连续控制, 对新能源的消纳具有更广泛的意义^[12]。

1990 年由加拿大 McGill 大学提出了基于电压源型换流器高压直流输电 (Voltage Sourced Converter HVDC, VSC-HVDC) 技术, 并由 ABB 公司于 1997 年在赫尔斯扬完成了首条商业化运行的 VSC-HVDC 工程^[13]。与传统的基于线换向换流器高压直流输电 (Line Commuted Converter HVDC, LCC-HVDC) 技术相比, VSC-HVDC 具有不存在换相失败危险、可实现有功无功快速解耦控制、输出电压谐波含量低和潮流翻转时电压极性不改变等诸多优点^[14-15], 因此其更适合于构建多端直流输电及直流电网。随着经济发展和电网大规模建设, 以及分布广泛的大规模新能源并网送电, 传统的点对点功率传输形式已经不能满足大规模大区域电网互联的需求, 这就要求电网实现多源供电和多落点受电^[16-19]。多端柔性直流输电系统 (Multi-Terminal VSC-HVDC system, VSC-MTDC) 以其可实现多源供电和可靠性高等特点, 正在受到广泛的关注^[20]。

本文提出了一种抽蓄电站和经多端柔性直流电网接入的大规模新能源间的协调互补优化控制方案 (以下简称协调互补优化控制方案), 在网省调度中心设置协调互补优化控制主站, 抽蓄电站内设置执行子站。通过测量丰宁—金山岭联络线上的功率和频率差值进行计算, 调节连接在柔性直流电网上的抽蓄电站的功率输出来实现优化运行, 充分发挥风光与抽蓄联合发电的互补优势, 在考虑到抽蓄机组限制的情况下, 其负荷调节的响应速度可以跟踪平

衡新能源的变化速度, 平衡风电和光伏功率的随机多变性对电网的不利影响, 保证电网的电能质量。

1 张北四端柔直电网

2018 年将建成世界首个 ± 500 kV 直流电网—张北 ± 500 kV 柔性直流电网示范工程 (以下简称张北柔直电网工程), 首次实现 500 kV 直流断路器等关键设备及技术示范应用, 完成多种可再生能源经柔直电网接入华北交流电网, 输送能力可达 3000 MW, 为多种形式的大规模可再生能源发电的广域互联和送出消纳提供高效的传输平台, 如图 1 所示, 其中新能源送端为张北换流站和康保换流站, 配套风光分别为 3000 MW 和 1500 MW, 受端为北京电网, 受端功率为 3000 MW, 丰宁换流站为平衡站, 张北四端柔直电网工程通过丰宁换流站丰宁—金山岭三回联络线与华北电网相连, 丰宁抽蓄与丰宁—金山岭联络线 π 入丰宁换流站 500 kV 交流母线。张北柔直电网工程将承担 2022 年北京—张家口冬季奥运会供电项目, 实现冬季奥运会全部由可再生能源供电。

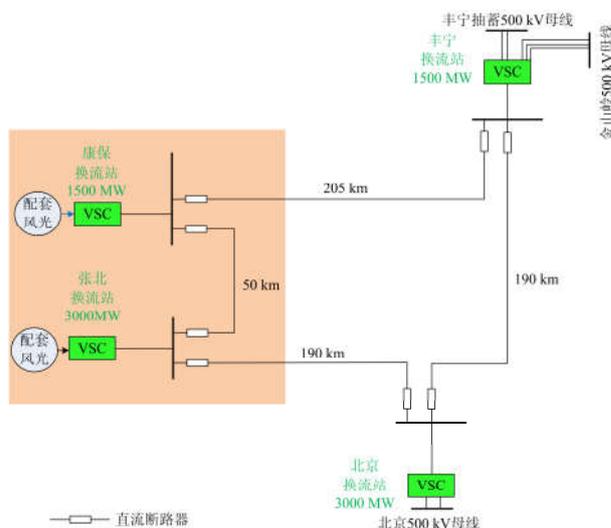


图 1 张北柔直电网工程示意图

Fig. 1 Schematic of Zhangbei VSC-MTDC project

2 协调互补优化控制方案介绍

在网省调度中心设置协调互补优化控制主站, 抽蓄电站内设置执行子站, 主站担任主要数据分析、抽蓄电站有功调整指令发布等功能, 并具备不同的控制模式; 子站担任接收主站发布抽蓄电站有功调整指令, 根据抽蓄电站内的实时运行工况, 对每台机组的调速器发出实际执行指令。通过测量丰宁—金山岭联络线上的功率和频率差值进行计算, 调节连接在柔性直流电网上的抽蓄电站的功率输出来实现优化运行, 充分发挥风光与抽蓄联合发电的互补

优势, 实现了多端柔性直流电网的协调互补优化控制, 有效地平抑了风电与光伏发电分钟级的波动特性, 实现新能源友好送出, 如图 2 所示。

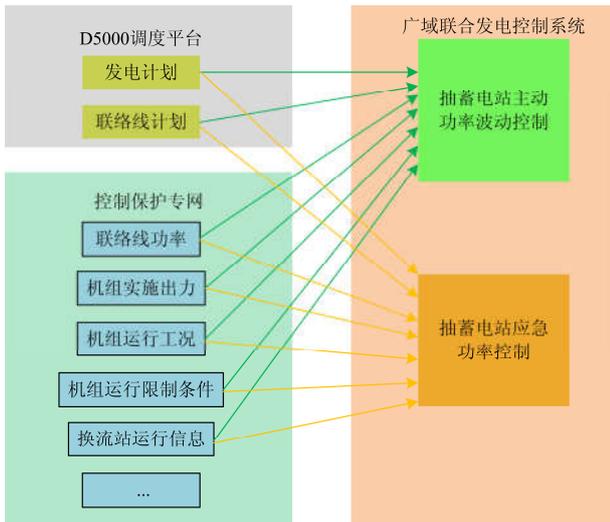


图 2 协调互补优化控制方案示意图

Fig. 2 Schematic of coordinate complementary optimization control scheme

该系统主站采集各测量站实时出力信息, 通过对受端交流联络线的计划功率与柔直电网送出的实时出力对比计算, 得到丰宁抽蓄电站需要调整的功率给定值, 通过水电机组调速器动作实现多端柔直电网协调互补优化控制, 减小新能源波动对华北电网的冲击。本系统结构图如图 3 所示。

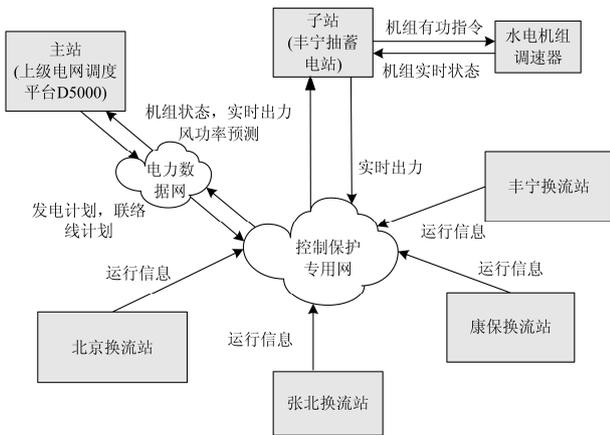


图 3 协调互补优化控制系统结构图

Fig. 3 Structure of coordinate complementary optimization control system

2.1 协调互补优化控制方案采集信号

协调互补优化控制主站需采集的信息内容如下: 对于接入康保换流站的风电场/光伏汇集站(或风电场、光伏电站)、接入张北换流站的风电场/光

伏汇集站(或风电场、光伏电站), 需采集的信息为 220 kV 交流出线的运行状态信息(包括三相电压、电流、有功、无功、频率)和故障信息; 对于张北换流站、丰宁换流站、北京换流站和康保换流站, 需采集的信息为各换流站运行状态信息, 包括双极运行状态、实时功率、极最大运行功率、故障信息以及丰宁—金山岭联络线的频率、功率和电压等信息。

2.2 协调互补优化控制方案功能

抽蓄电站主动功率波动控制: 选取丰宁部分机组或全部机组参与本系统功能实现, 控制目标为保证风电、光伏等新能源发电的最大出力的同时, 调节抽蓄电站出力, 尽量平抑风电、光伏等新能源发电产生的波动, 使柔直电网提供的电力呈现电网“友好型”。

抽蓄电站应急功率波动控制: 根据系统需求进行控制, 当华北电网频率出现波动较大时, 本系统控制目标调整为调整抽蓄电站出力以加速系统频率恢复正常; 当华北电网调峰容量不足时, 本系统可接受调度信号, 闭锁实时调整功能以保证不影响调峰调度。

2.3 实时附加计划功率计算

如图 4 所示, f 和 P_1 分别为丰宁—金山岭联络线功率和频率, f_n 和 P_g 分别为额定频率和联络线目标功率。在没有华北网调调度信号的参与时, 该控制系统工作在主动功率波动控制状态下, 主动调节联络线功率到目标功率; 在华北电网出现大规模频率波动时, 华北网调发出应急功率支援信号, 此时控制系统根据华北电网频率和频率死区, 主动调节联络线功率到目标功率, 使华北电网频率恢复正常。

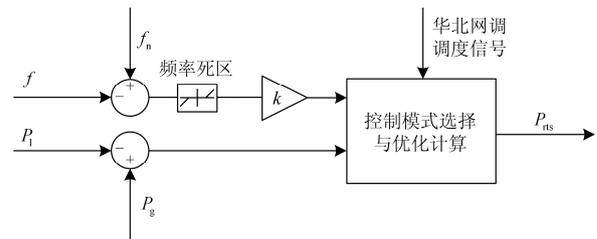


图 4 实时附加计划功率计算

Fig. 4 Real-time additional schedule power calculation

在主动功率波动控制状态下, 系统输入信号为联络线功率, 经过控制模式选择和优化计算, 考虑到抽蓄机组的各种运行限制, 得出抽蓄机组的实时附加计划, 实时附加计划与抽蓄机组的日前计划相叠加即为抽蓄电站的实际出力。

3 算例仿真

引入以下目标函数

$$\min C = \int |P_l| dt + \int k \cdot |\Delta f| dt \quad (1)$$

式中: P_l 为联络线功率; Δf 为华北电网频率差; k 为等效功率系数, 等同于华北电网的系统单位调节功率值; $|P_l| + k \cdot |\Delta f|$ 表示等效功率。前项积分表示柔直电网自身的功率稳定性, 后项积分表示柔直电网对华北电网稳定性的影响。 C 为目标等效电量, C 值越小, 表示张北四端柔直供电系统稳定性越高。

仿真工具采用 PSDEdit, 仿真模型采用张北柔直电网工程, 仿真时间设置为 620 s, 目前抽蓄日前计划一般为每天 96 个点, 即 15 min 一个点, 在仿真时间 620 s 内假设抽蓄日前计划保持不动。其中送端风电和光伏出力如图 5 所示, 该波动取自张北某新能源汇集站实际数据经比例变化而来, 10 min 内最大波动幅度大约为 500 MW, 同时最大波动速率为 220 MW/min。北京换流站为定功率控制, 受端功率保持 3000 MW 不变, 如图 6 所示。

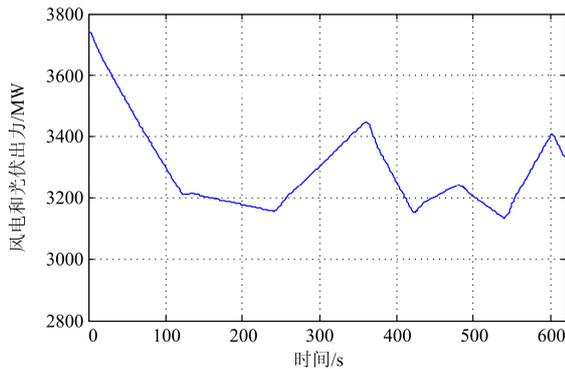


图 5 新能源出力波动

Fig. 5 Renewable energy power fluctuation

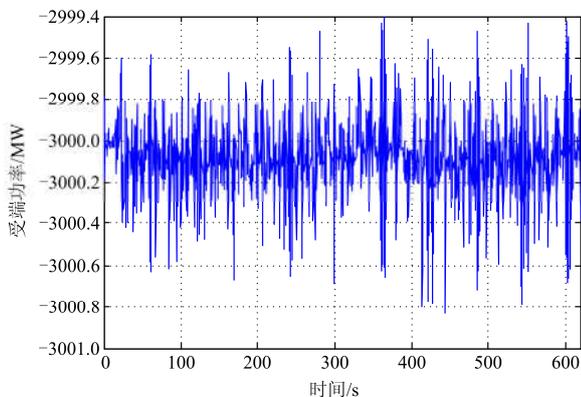


图 6 北京受端下网功率

Fig. 6 Beijing receiving-end power

联络线功率如图所示, 若不加协调互补优化控制时, 张北新能源出力波动经丰宁—金山岭联络线注入华北电网的功率最大达到 550 MW, 风电和光伏出力波动经联络线全部注入华北电网, 加入协调互补优化控制后, 该波动被限制在 240 MW 以内, 并且联络线上功率波动速度降低。抽蓄日前计划在本次仿真时间内设置为 75 MW, 在仿真时间内保持不变, 抽蓄电站共有 6 台装机容量为 330 MW 的抽蓄机组, 其功率变化速度限制为 15%Sn/min, 如图所示, 抽蓄机组出力变化趋势基本与新能源出力相反, 实现风电与光伏的友好送出。

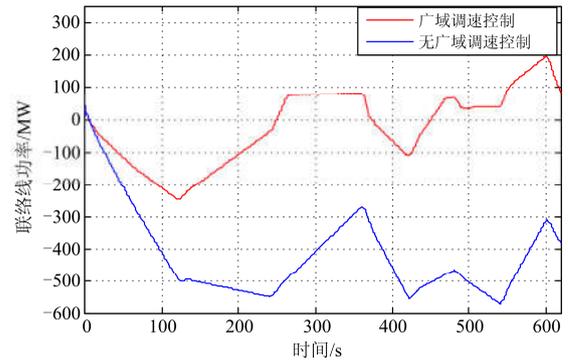


图 7 丰宁—金山岭联络线功率

Fig. 7 Fengning-Jinshanling tie line power

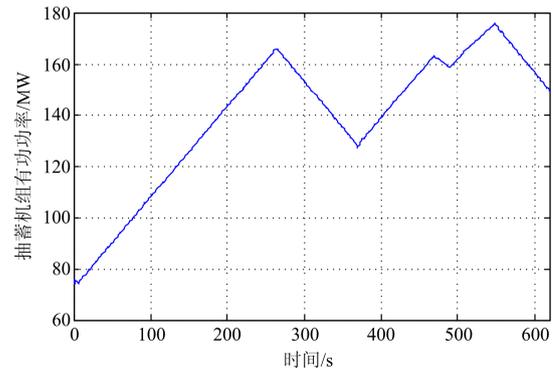


图 8 抽蓄机组功率

Fig. 8 Pumped storage unit power

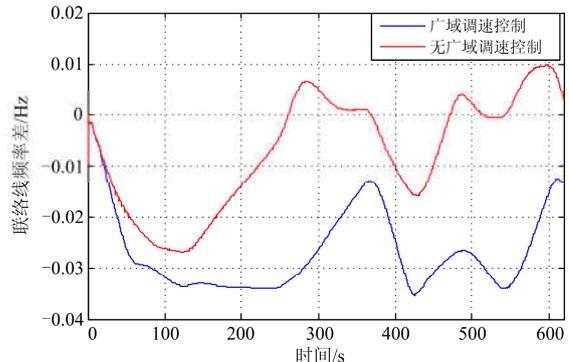


图 9 丰宁—金山岭联络线频率差

Fig. 9 Fengning-Jinshanling tie line frequency difference

由图可知无抽蓄机组时,风电和光伏的出力波动引起系统频率变化最大为 -0.0352 Hz,由于一般情况下国内常规水电机组一次调频死区为 ± 0.033 Hz,无协调互补优化控制时新能源的正常波动会引起常规机组的调速器作用;当有6台抽蓄机组时,华北电网频率变化为 -0.0269 Hz,不会引起常规机组的一次调频,增加了华北电网系统的稳定性。

等效功率如图10所示, k 取华北电网的单位调节功率 $11\ 400$ MW/Hz,在同时考虑到丰宁—金山岭联络线功率和华北电网频率差时,无协调互补优化控制的等效功率进一步加大,峰值达到 935 MW,在加入协调互补优化控制后等效功率幅值为 530 MW,并且在 200 s后等效功率变化很小,根据式(1),得出无协调互补优化控制时的目标等效电量 C 为 $128\ 820.93$ kWh,加入协调互补优化控制时,目标等效电量降低到 $33\ 519.45$ kWh,张北柔直电网和华北电网的稳定性都有所提高。

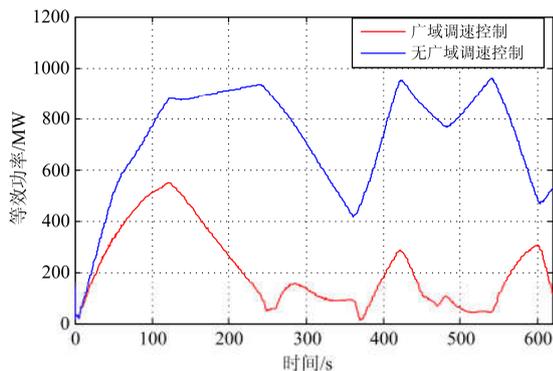


图10 等效功率

Fig. 10 Equivalent power

4 结论

本文介绍了一种抽蓄电站和经多端柔性直流电网接入的大规模新能源间的协调互补优化控制方案。在网省调度中心设置协调互补优化控制主站,抽蓄电站内设置执行子站。主站担任主要数据分析、抽蓄电站有功调整指令发布等功能,并具备不同的控制模式;子站担任接收主站发布抽蓄电站有功调整指令,根据抽蓄电站内的实时运行工况,对每台机组的调速器发出实际执行指令。该系统主要用于解决跨区新能源消纳和风电光伏接入系统后对系统稳定性的影响。

(1) 提出了抽蓄电站和经多端柔性直流电网接入的大规模新能源间的协调互补优化控制方案的典型设计。仿真结果表明,该系统能够有效地抑制新能源出力波动,实现新能源的友好送出。

(2) 在没有应用本文中提出的协调互补优化控

制方案时,张北和康保的新能源波动会经过丰宁—金山岭联络线全部传到华北电网。应用该方案后,可减小新能源出力波动对华北电网的稳定性影响。

(3) 可变速抽蓄机组能够实现发电时的连续控制,可以适应协调互补优化控制方案应用后抽蓄机组功率的频繁调节。

参考文献

- [1] JENNY C, RABIA F, MATT J, et al. Renewables 2017 global status report Paris: REN21 Secretariat, 2017[EB/OL]. [2017-08-09]. http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2017/06/17-8399_GSR_2017_Full_Report_0621_Opt.pdf.
- [2] 张琳. 关于我国新能源发展的思考[J]. 电气时代, 2017(2): 29-32.
ZHANG Lin. Consideration on renewable energy in China[J]. Electric Age, 2017(2): 29-32.
- [3] 周强, 汪宁渤, 何世恩, 等. 高弃风弃光背景下中国新能源发展总结及前景探究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(10): 146-154.
ZHOU Qiang, WANG Ningbo, HE Shien, et al. Summary and prospect of China's new energy development under the background of high abandoned new energy power[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(10): 146-154.
- [4] 王铭. 风光储接入对电力系统稳定性的影响分析[D]. 太原: 太原理工大学, 2016.
WANG Ming. Stability analysis of power system integrated with wind farm, energy storage system and photovoltaic system[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2016.
- [5] 郝元钊, 李培强, 李欣然, 等. 风电机组对电力系统暂态稳定性影响分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24(2): 41-46.
HAO Yuanzhao, LI Peiqiang, LI Xinran, et al. Analyzing the impact of wind plant on power system transient stability[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2012, 24(2): 41-46.
- [6] DALWADI P, MEHTA C. Feasibility study of solar-wind hybrid power system[J]. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, 2012, 2(3): 125-128.
- [7] 郭创新, 张理, 张金江, 等. 风光互补综合发电系统可靠性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 102-108.
GUO Chuangxin, ZHANG Li, ZHANG Jinjiang, et al. Reliability analysis of wind and photovoltaic integrated generating system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(1): 102-108.

- [8] 吴萍, 陈昊, 赵兵, 等. 风光火打捆交直流混联外送系统交互影响及稳定性研究[J]. 电网技术, 2016, 40(7): 1934-1942.
WU Ping, CHEN Hao, ZHAO Bing, et al. Study on interaction and stability characteristics of bundled wind-PV-thermal power transmitted with AC/DC system[J]. Power System Technology, 2016, 40(7): 1934-1942.
- [9] 韩柳, 庄博, 吴耀武, 等. 风光水火联合运行电网的电源出力特性及相关性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(19): 91-98.
HAN Liu, ZHUANG Bo, WU Yaowu, et al. Power source's output characteristics and relevance in wind-solar-hydro-thermal power system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(19): 91-98.
- [10] 刘世林, 文劲宇, 孙海顺, 等. 风电并网中的储能技术研究进展[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(23): 145-153.
LIU Shilin, WEN Jinyu, SUN Haishun, et al. Progress on applications of energy storage technology in wind power integrated to the grid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(23): 145-153.
- [11] 肖白, 丛晶, 高晓峰, 等. 风电-抽水蓄能联合系统综合效益评价方法[J]. 电网技术, 2014, 38(2): 400-404.
XIAO Bai, CONG Jing, GAO Xiaofeng, et al. A method to evaluate comprehensive benefits of hybrid wind power-pumped storage system[J]. Power System Technology, 2014, 38(2): 400-404.
- [12] 王婷婷, 赵杰君, 王朝阳. 我国电网对抽水蓄能电站变速机组的需求分析[J]. 水力发电, 2016, 42(12): 107-110.
WANG Tingting, ZHAO Jiejun, WANG Chaoyang. Demand analysis of variable speed units of pumped-storage power station in power grid of China[J]. Water Power, 2016, 42(12): 107-110.
- [13] 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.
- [14] 徐政, 薛英林, 张哲任. 大容量架空线柔性直流输电关键技术及前景展望[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5051-5062.
XU Zheng, XUE Yinglin, ZHANG Zheren. VSC-HVDC technology suitable for bulk power overhead line transmission[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5051-5062.
- [15] 赵畹君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [16] LU W, OOI B T. Premium quality power park based on multi-terminal HVDC[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2): 978-983.
- [17] 陈树勇, 徐林岩, 孙栩, 等. 基于多端柔性直流输电的风电并网控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(增刊 1): 32-38.
CHEN Shuyong, XU Linyan, SUN Xu, et al. The control of wind power integration based on multi-terminal high voltage DC transmission with voltage source converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(S1): 32-38.
- [18] GNANARATHNA U N, GOLE A M, JAYASINGHE R P. Efficient modeling of modular multilevel HVDC converters (MMC) on electromagnetic transient simulation programs[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(1): 316-324.
- [19] 王杨宁. 论多端直流输电与直流电网技术[J]. 低碳世界, 2014(7): 60-61.
WANG Yangning. Discussion on multi-terminal HVDC and DC-grid technology[J]. Low Carbon World, 2014(7): 60-61.
- [20] 付艳, 黄金海, 吴庆范, 等. 基于 MMC 多端柔性直流输电保护关键技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(18): 133-139.
FU Yan, HUANG Jinhai, WU Qingfan, et al. Key technologies research based on multi-terminal MMC-HVDC protection[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(18): 133-139.

收稿日期: 2017-08-22; 修回日期: 2017-10-06

作者简介:

李文锋(1979—), 男, 通信作者, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向为电力系统建模、仿真、网源协调技术; E-mail: liwenfeng@epri.sgcc.com.cn

张健(1993—), 男, 硕士, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制。E-mail: zhangjian_cepri@163.com

(编辑 张爱琴)