

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191517

多直流馈入背景下的河南电压稳定分析及改善措施研究

边宏宇¹, 潘晓杰¹, 刘芳冰², 高泽², 黄畅想³, 吕鹏⁴

(1. 国家电网公司华中分部, 湖北 武汉 430077; 2. 国网河南省电力科学研究院, 河南 郑州 450052;
3. 南瑞集团, 江苏 南京 210000; 4. 北京科东电力控制系统有限公司, 北京 100192)

摘要: 为提高西北电网清洁能源消纳能力和华中电网供电能力, 青海—河南特高压直流低端及其配套的南阳—驻马店特高压交流工程将于2020年接入河南电网。主要分析以上工程投运后河南电网电压稳定特性及其改善措施。计算结果表明, 若青海—河南特高压直流工程馈入河南电网功率替代河南电网常规电源, 将导致河南电网动态无功支撑能力降低, 部分负荷中心近区发生交流故障后郑州东北片区暂态电压无法恢复, 需要对河南电网火电机组及调相机开机方式提出要求。针对上述问题提出南阳—驻马店特高压交流工程与青海—河南特高压直流工程同步投运、郑州火电机组取旋转备用等建议, 并验证了建议的有效性。研究结果对电网规划、运行及国内同类直流工程设计都具有参考价值。

关键词: 特高压直流; 河南电网; 电压稳定; 调相机; 旋转备用; 多馈入短路比

Study on voltage stability analysis and improvement measures for Henan province with a background of multiple DC feeding

BIAN Hongyu¹, PAN Xiaojie¹, LIU Fangbing², GAO Ze², HUANG Changxiang³, LÜ Peng⁴

(1. Central China Branch of China State Grid Corp, Wuhan 430077, China; 2. State Grid Henan Electric Power Research Institute, Zhengzhou 450052, China; 3. NARI Group Corporation, Nanjing 210000, China; 4. Beijing Kedong Electric Power Control System Co., Ltd., Beijing 100192, China)

Abstract: In order to improve the clean energy absorption capacity of the northwest China power grid and the power supply capacity of the central China power grid, the UHVDC project between Qinghai and Henan and the UHVAC project between Nanyang and Zhumadian will be put into operation in 2020. This paper mainly analyzes the voltage stability characteristics of and improvement measures for the Henan power grid after the above projects are put into operation. The calculation results show that, if the UHVDC project between Qinghai and Henan replaces the conventional power supply, the dynamic reactive power support capacity of the Henan power grid will be reduced, and the transient voltage in the northeast area of Zhengzhou cannot be recovered after AC failure in the near area of part of the load center. It is necessary to put forward requirements for the thermal power units and the synchronous condenser start-up mode in the Henan power grid. In view of the above problems, this paper proposes that the UHVAC project and the UHVDC project should be put into operation synchronously, and thermal power units in the Zhengzhou areas should possess spinning reserve capacity. The effectiveness of the proposal is also verified. This study has reference value for power grid planning and operation and other similar HVDC transmission projects.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 521700190010) "Key Technologies Research and Demonstration of Electrochemical Energy Storage Substation Clusters Applied in UHVAC/DC Hybrid Connected Receiving-end Power Grid".

Key words: UHVDC; Henan power grid; voltage stability; synchronous condenser; spinning reserve capacity; multi-feed short circuit ratio

0 引言

河南电网位于华中电网北部, 其煤炭资源相对

丰富, 火电装机占全省装机比重超过 80%, 60% 以上的煤炭和 50% 以上的火电机组分布在北部和西部, 但 2/3 的用电负荷分布在中部、东部及南部。电源和负荷分布不均衡造成了主要输电方向为“西电东送、北电南送”, 以驻马店、信阳等片区为代表的负荷中心供电压力逐年增大, 对电力资源跨区调剂的需求逐年增加。

基金项目: 国家电网有限公司科技项目资助(521700190010)
“电化学储能电站群在特高压交直流混联受端电网应用关键技术研究及示范”

特高压直流输电技术作为成熟、可靠、大容量、低损耗、远距离输电的技术,在我国跨区联网以实现清洁能源大范围优化配置中发挥了重要作用,对其关注程度日益提升^[1-8]。为提高河南负荷中心供电能力,青海—河南特高压直流低端(以下简称青豫直流低端)及其配套的 1 000 kV 南阳—驻马店特高压交流工程(以下简称南驻交流)将于 2020 年投运,额定输电容量 4 000 MW,该跨区直流对提高驻马店、信阳片区供电能力作用明显。但若青豫直流送入功率替代河南火电机组,将导致系统动态无功支撑能力降低,部分负荷中心发生交流故障后,暂态电压可能无法恢复,需研究并提出解决措施。

研究青豫直流投运后河南电网的电压稳定问题,对于保障河南乃至华中电网安全稳定运行具有

重要的现实意义,对电网规划、运行及国内同类受端直流接入具有较强的参考价值^[9-11]。

1 河南电网结构简介

目前,河南—华北经特高压长南线互联;河南—西北经灵宝直流、天中特高压直流互联,送电主方向为西北送华中,与湖北电网经 5 回交流联络线互联。

河南电网主要分为:焦新安濮鹤片区、三洛济片区、郑州西南片区、郑州东北片区、开商片区、南阳片区、平顶山片区、许漯周片区、驻信片区,各片区之间已实现 500 kV/220 kV 电磁环网解环,其跨区、跨省及跨片区互联示意图如图 1 所示,青豫直流及其配套工程以虚线表示。

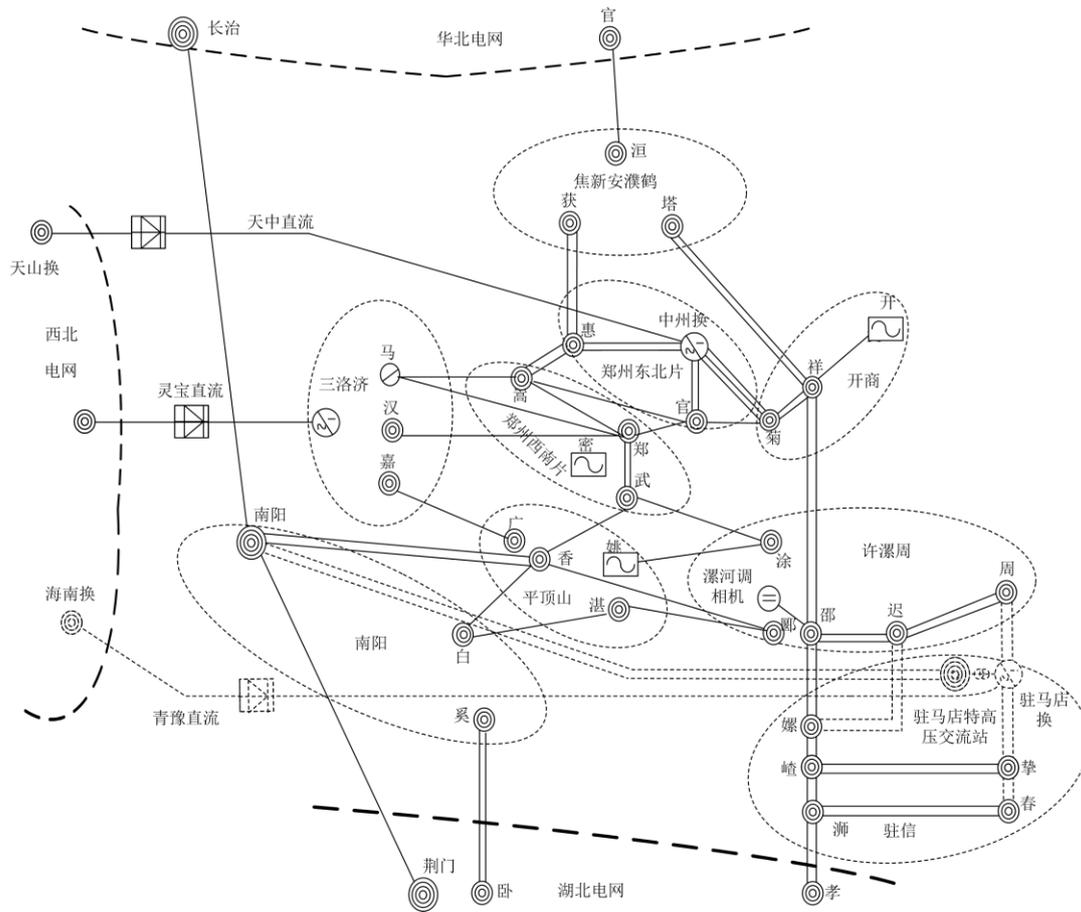


图 1 河南电网示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Henan power grid

2 青豫直流及其配套工程简介

青豫直流: 额定电压±800 kV, 额定输送容量 800 万 kW, 接入驻马店信阳片区, 其直流高端通过驻马店直流换流站至迟、螺各 2 回 500 kV 线路接入,

直流低端与驻马店交流特高压 500 kV 站合建, 通过交流换流站至周、挚各 2 回 500 kV 线路接入。南驻交流: 新建驻马店特高压变电站及南阳—驻马店 2 回 1 000 kV 线路。青豫直流及其配套工程示意图如图 2 所示。

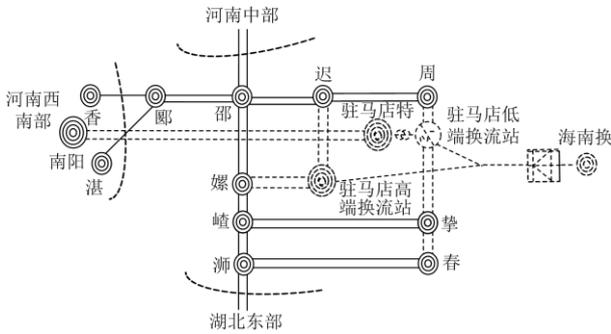


图2 青豫直流及其配套工程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of UHVDC project of Qinghai-Henan and its supporting projects

3 安全稳定研究的条件及原则

以青豫直流投产后的 2020 年为计算水平年, 采用某研究院开发的电力系统综合分析程序(Power System Analysis Software Package, PSASP), 建立了交直流系统机电暂态仿真模型, 通过暂态稳定程序进行计算分析^[12]。

本文考虑系统的功角、电压和频率均稳定则系统稳定。

(1) 功角稳定判据: 故障清除后同步系统中任意两台机组相对功角摇摆不失步且呈减幅振荡。

(2) 电压稳定判据: 故障清除后负荷母线电压能在 10 s 内恢复至 0.80 p.u. 以上, 中长期电压能保持或恢复到 0.9 p.u. 以上。

(3) 频率稳定判据: 系统切机、切负荷措施后系统频率不发生崩溃, 并能恢复至正常范围(50±0.5) Hz。

4 电压稳定分析

电压稳定性主要与电网结构、动态无功功率支撑等因素相关^[13-19], 河南电网主要动态无功功率支撑为火电机组及漯河调相机, 因此青豫直流低端投运后的电压稳定问题主要与南驻交流及河南火电机组及调相机的开机方式强相关。

4.1 河南电网电压稳定机理分析

以郑州片区发生某 500 kV 同杆并架交流线路 N-2 故障为例(以下仿真均为该交流故障), 故障时刻各变电站电压迅速降低, 故障切除后, 若交流系统动态无功功率支撑能力不足, 可能导致天中直流、青豫直流发生连续换相失败, 如图 3、图 4 所示, 并从系统吸收大量无功功率。

另外, 由于电压降低, 感应电动机负荷电流增大, 从系统吸收大量无功功率, 以郑州北片区某 110 kV 变电站为例, 其感应电动机消耗无功功率如图 5 所示, 故障恢复后该站感应电动机消耗无功功

率由 0.4 Mvar 最大增加至 1.4 Mvar, 进一步降低了系统电压恢复特性, 进而导致电压失稳, 如图 6 所示。

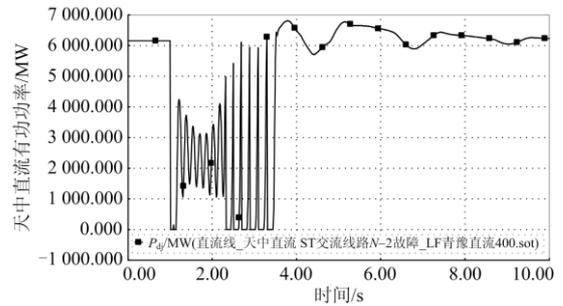


图3 天中直流换相失败曲线

Fig. 3 Commutation failure curve of UHVDC between Tianshan and Zhongzhou

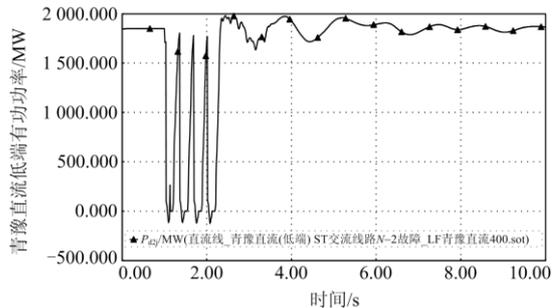


图4 青豫直流低端换相失败曲线

Fig. 4 Commutation failure curve of the UHVDC between Qinghai and Henan

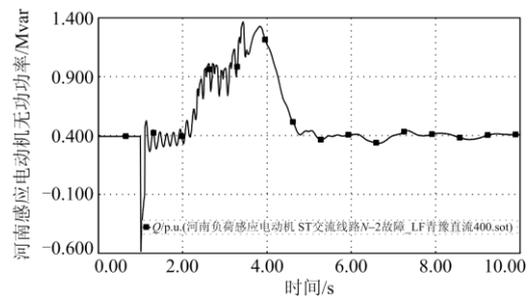


图5 感应电动机负荷无功功率曲线

Fig. 5 Load reactive power curve of induction motor

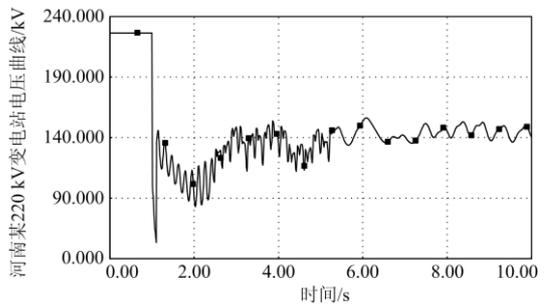


图6 河南电压失稳曲线

Fig. 6 Instability voltage curve of Henan province

4.2 河南电网电压薄弱点分析

以河南电网 4.5 GW 的平均大负荷水平为例,各片区负荷及其占比、装机容量及其与负荷的差值如表 1 所示。河南电网负荷分布较为均衡,但郑州东北片区装机容量远小于负荷,也未配置调相机等动态无功补偿装置。

郑州东北片区有功功率可通过其他片区较远距离支援,但无功功率无法实现大容量、远距离互济,因此该片区是河南电网电压稳定性薄弱点。

表 1 河南不同片区负荷及装机容量对比

Table 1 Comparison of the load and capacity of thermal power unit in different areas of Henan province

	三洛 济	焦新安 濮鹤	郑州 西南	郑州 东北	开商	许漯周 驻信	南阳平 顶山
片区 负荷	600	1 080	468	312	400	940	600
负荷 占比	14	24	11	7	9	21	14
常规电 源容量	1 560	2 070	833	166	460	956	818
容量与负 荷差值	960	990	365	-146	60	16	218

为进一步确定河南电网电压稳定薄弱片区,针对上述同杆并架线路 N-2 对比河南不同区域典型 220 kV 变电站电压曲线如图 7 所示,其中电压恢复特性较差的 220 kV 变电站在郑州东北片区,进一步印证了上述判断的正确性。

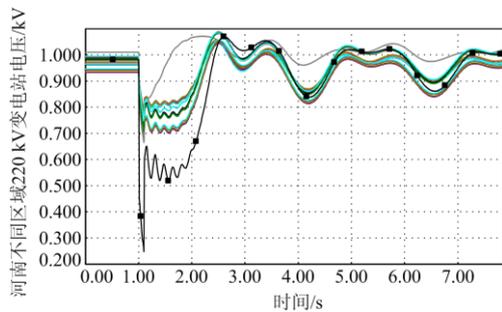


图 7 河南不同片区 220 kV 电压恢复曲线

Fig. 7 220 kV voltage recovery curve in different areas of Henan province

4.3 提高河南电压稳定性措施分析

为提高河南电网电压稳定性,主要可采取以下三种措施:

- 1) 加强电网结构,缩短电气距离,可提高暂态电压恢复过程中的无功功率跨地区支援。
- 2) 常规机组留旋转备用,可提高暂态过程中机组的无功功率支撑能力。

3) 加装调相机,可有效提高暂态电压恢复能力。

4.3.1 南驻交流可提高电压稳定性

南驻交流投运可加强河南西南部和东南部的电气联系,在暂态电压恢复过程中可以跨地区进行无功功率支援,对提高河南电压稳定性作用明显,南驻交流运行和停运方式下郑州片区 220 kV 变电站暂态电压恢复曲线如图 8 所示。

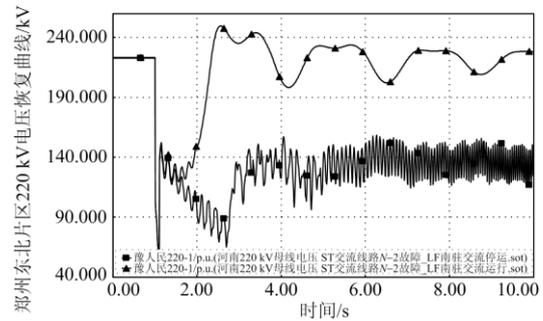


图 8 南驻交流运行/停运方式郑州电压对比曲线

Fig. 8 Voltage curve of Zhengzhou before and after the project of UHVAC project between Nanyang and Zhumadian put into production

4.3.2 机组留旋转备用可提高电压稳定

以郑州东北片区仅有的 2 台额定容量均为 600 MW 火电机组为例,该机组距离电压薄弱点最近,无功支撑效果最好。2 台机组均满出力和留 40% 旋转备用方式下,上述交流故障后该片区暂态电压恢复特性如图 9 所示,结果表明机组留旋转备用可有效提高郑州东北片区的电压稳定性。

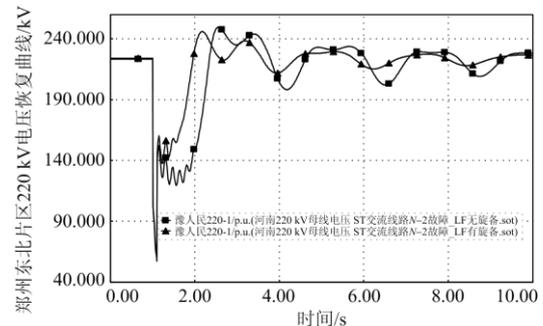


图 9 无旋转备用和 40% 旋转备用方式下郑州东北片区电压对比曲线

Fig. 9 Voltage comparison curve of the Northeast area of Zhengzhou without spinning reserve capacity and 40% spinning reserve capacity

4.3.3 调相机可提高电压稳定性

调相机接入后可以有效提升电压支撑能力,显著增强电网强度^[20-24],许漯周片区 2 台额定容量为 300 Mvar 的调相机将先于青豫直流低端投运,上述

交流故障后该调相机无功功率如图 10 所示,其暂态过程所发无功功率由最大可由 0 Mvar 增加至 800 Mvar 以上,具备良好的暂态无功功率支撑能力。

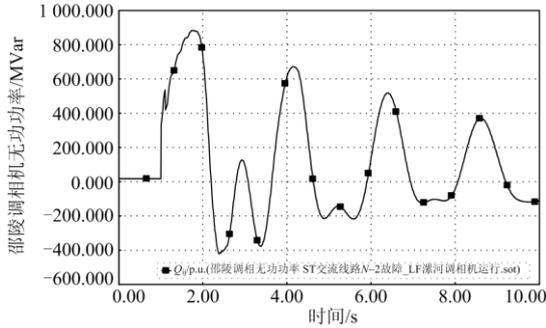


图 10 漯河调相机无功功率曲线

Fig. 10 Reactive power curve of the synchronous condenser in Luohe

调相机停运和运行方式下, 郑州东北片电压恢复特性如图 11 所示, 结果表明该调相机对提高郑州东北片暂态电压恢复作用明显。

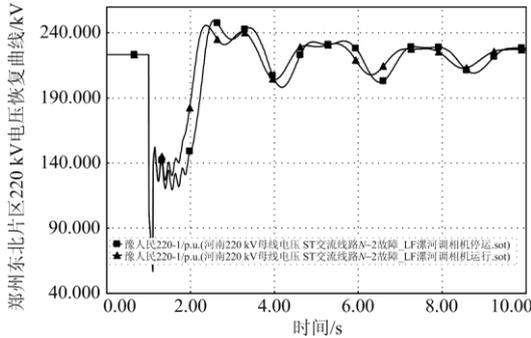


图 11 调相机停运和运行郑州东北片区电压对比曲线

Fig. 11 Comparison of voltage curve in the Northeast area of Zhengzhou whether the synchronous condenser running or not

4.4 多馈入有效短路比计算分析

直流多馈入短路比主要衡量受端网架结构对直流馈入能力的支撑强度^[23-26], 其计算公式如式(1)所示。

$$MSCR_i = \frac{S_{aci}}{P_{deqi}} = \frac{U_i^2 / |Z_{eqii}|}{P_{di} + \sum_{j=1, i \neq j}^n |Z_{eqij} / Z_{eqii}| P_{dj}} \quad (1)$$

式中: S_{aci} 为换流母线处的短路容量; U_i 为换流母线 i 的电压; P_{di} 、 P_{dj} 为直流运行功率; Z_{eqii} 为多端口戴维南等值模型中的自阻抗; Z_{eqij} 为换流母线间的互阻抗。式中去掉 S_{aci} 包含的直流滤波器容量, 得到的值为多馈入有效短路比。

在典型潮流方式下, 天中、祁韶及青豫直流馈入华中电网的多馈入有效短路比如表 2 所示。可见青豫直流投运后, 天中直流多馈入有效短路比降

低 0.5, 祁韶直流多馈入有效短路比仅降低 0.1, 但以上直流多馈入短路比均超过 3。

表 2 青豫直流投运前后跨区直流多馈入有效短路比

Table 2 Multi-feed effective short circuit ratio of the UHVDC before and after the project put into production

多馈入有效短路比	天中	祁韶	青豫低端
青豫直流低端投运前	4.6	5.4	无
青豫直流低端投运后	4.1	5.3	3.6

5 结论

本文对青豫直流低端及其配套工程投运后的河南电网电压稳定特性进行了计算和分析, 并提出了改善电压稳定性措施, 主要结论如下。

1) 河南电网负荷分布较为均衡, 但装机容量与负荷逆向分布, 郑州东北片区呈现无功功率“硬缺”特性, 是河南电网电压稳定的薄弱点。

2) 若青豫直流送入河南电网功率替代河南火电机组, 将导致交流系统动态无功支撑能力降低, 交流故障导致天中直流、青豫直流发生连续换相失败并从系统吸收大量无功功率, 同时由于电压降低, 感应电动机负荷电流增大, 从系统吸收无功功率大幅增加, 将进一步降低河南电网的电压稳定性甚至导致电压失稳。

3) 南驻交流投运可加强河南电网内部的电气联系, 缩短电气距离, 在电压恢复过程中可以提高跨区、省及片区进行无功功率支援的能力, 对提高河南电压稳定性作用明显, 建议与青豫直流同步投运。

4) 郑州东北片区敏感机组留旋转备用及许漯周片区的调相机均可有效提高郑州东北片区的电压恢复水平。

5) 青豫直流低端投运将导致目前在运的天中、祁韶等跨区特高压直流的多馈入有效短路比小幅降低, 但各直流多馈入短路比均可满足要求。

参考文献

[1] 翟海保, 李兆伟, 黄慧, 等. 特高压直流分层接入电网的落点选择研究[J]. 电力工程技术, 2018, 37(1): 65-71. ZHAI Haibao, LI Zhaowei, HUANG Hui, et al. Terminal location selection study for UHVDC hierarchical connection to power grid[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(1): 65-71.

[2] 刘凯, 张庆武, 侍乔明, 等. 灵绍±800 kV 特高压直流协调频率控制功能应用[J]. 电力工程技术, 2018, 37(4): 14-20. LIU Kai, ZHANG Qingwu, SHI Qiaoming, et al. Application of coordinated frequency control function in lingshao ±800 kV UHVDC project[J]. Electric Power

- Engineering Technology, 2018, 37(4): 14-20.
- [3] 刘振亚, 张启平, 董存, 等. 通过特高压直流实现大型能源基地风、光、火电力大规模高效率安全外送研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2513-2522.
LIU Zhenya, ZHANG Qiping, DONG Cun, et al. Efficient and security transmission of wind, photovoltaic and thermal power of large-scale energy resource bases through UHVDC projects[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2513-2522.
- [4] 贺庆, 张宝家, 马士聪, 等. 特高压交直流接入下山东断面输电能力提高措施[J]. 电网技术, 2018, 42(1): 126-132.
HE Qing, ZHANG Baojia, MA Shicong, et al. Research on measures increasing transmission capacity of Shandong section under UHV AC/DC access[J]. Power System Technology, 2018, 42(1): 126-132.
- [5] 王永平, 赵文强, 杨建明, 等. 混合直流输电技术及发展分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(7): 156-167.
WANG Yongping, ZHAO Wenqiang, YANG Jianming, et al. Hybrid high-voltage direct current transmission technology and its development analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(7): 156-167.
- [6] 屠竞哲, 张健, 曾兵, 等. 交直流换相失败及恢复过程暂态无功特性及控制参数影响[J]. 高电压技术, 2017, 43(7): 2131-2139.
TU Jingzhe, ZHANG Jian, ZENG Bing, et al. HVDC transient reactive power characteristics and impact of control system parameters during commutation failure and recovery[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(7): 2131-2139.
- [7] 杨欢欢, 蔡泽祥, 朱林, 等. 直流系统无功动态特性及其对受端电网暂态电压稳定的影响[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(10): 86-92.
YANG Huanhuan, CAI Zexiang, ZHU Lin, et al. Dynamic characteristic of HVDC reactive power and its influence on transient voltage stability of receiving-end power grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(10): 86-92.
- [8] 杨健, 洪潮, 张野, 等. 不同控制策略下混合多端直流输电的交流故障响应对比[J]. 南方电网技术, 2017, 11(7): 39-44, 50.
YANG Jian, HONG Chao, ZHANG Ye, et al. Comparison on AC fault response of hybrid multi-terminal HVDC with different control strategies[J]. Southern Power System Technology, 2017, 11(7): 39-44, 50.
- [9] 胡艳梅, 吴俊勇, 李芳, 等. ± 800 kV 哈郑特高压直流控制方式对河南电网电压稳定性影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(21): 147-153.
HU Yanmei, WU Junyong, LI Fang, et al. Impacts of DC system control mode for ± 800 kV Ha-Zheng UHV DC on voltage stability of Henan Power Grid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(21): 147-153.
- [10] 白岩, 陈辉祥, 王仲鸿. 直流双极闭锁故障下提高暂态电压稳定性策略探讨[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(15): 93-96.
BAI Yan, CHEN Huixiang, WANG Zhonghong. Discussion on strategies to enhance the system transient voltage stability under the DC bi-polar block fault[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(15): 93-96.
- [11] 高强, 张小聪, 施正钊, 等. ± 800 kV 宾金直流双极闭锁故障对浙江电网的影响[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(11): 47-51.
GAO Qiang, ZHANG Xiacong, SHI Zhengchai, et al. Impact of ± 800 kV Yibin-Jinhua DC bipolar block fault on Zhejiang power grid[J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(11): 47-51.
- [12] 电力系统安全稳定导则: DL/T 755—2001[S]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
Guide on security and stability for power system: DL/T 755—2001[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2001.
- [13] 索之闻, 陈启超, 李晖, 等. 混合直流输电系统送端交流暂态电压特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(17): 125-132.
SUO Zhiwen, CHEN Qichao, LI Hui, et al. Research on sending end AC transient voltage characteristics of hybrid HVDC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(17): 125-132.
- [14] 肖繁, 王涛, 高扬, 等. 基于特高压交直流混联电网的调相机无功补偿及快速响应机制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(17): 93-100.
XIAO Fan, WANG Tao, GAO Yang, et al. Research on reactive power compensation and fast response mechanism of synchronous condenser based on UHVAC/DC hybrid grid[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(17): 93-100.
- [15] 林伟芳, 汤涌, 卜广全. 多馈入交直流系统电压稳定性研究[J]. 电网技术, 2008, 32(11): 7-12.
LIN Weifang, TANG Yong, BU Guangquan. Study on voltage stability of multi-infeed HVDC power transmission system[J]. Power System Technology, 2008, 32(11): 7-12.
- [16] 杨欢欢, 朱林, 蔡泽祥, 等. 直流控制对直流系统无功动态特性的影响分析[J]. 电网技术, 2014, 38(10): 2631-2637.
YANG Huanhuan, ZHU Lin, CAI Zexiang, et al. Influence

- of HVDC control on HVDC reactive power dynamic characteristic[J]. Power System Technology, 2014, 38(10): 2631-2637.
- [17] 周勤勇, 张彦涛, 贺海磊, 等. 多直流馈入电网动态无功补偿选点实用方法[J]. 电网技术, 2014, 38(7): 1753-1757.
- ZHOU Qinyong, ZHANG Yantao, HE Hailei, et al. A practical site selection method for dynamic reactive power compensation in multi-infeed DC power grid[J]. Power System Technology, 2014, 38(7): 1753-1757.
- [18] 袁志昌, 刘文华, 宋强, 等. 基于暂态电压稳定指标的动态无功优化配置方法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(14): 17-21.
- YUAN Zhichang, LIU Wenhua, SONG Qiang, et al. Optimal al-location method of dynamic var compensation based on transient voltage stability index[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(14): 17-21.
- [19] 冀肖彤. 抑制 HVDC 送端交流暂态过电压的控制策略优化[J]. 电网技术, 2017, 41(3): 721-728.
- JI Xiaotong. Optimization of HVDC control system for mitigating AC transient overvoltage on rectifier station[J]. Power System Technology, 2017, 41(3): 721-728.
- [20] 赵静波, 孟侠, 朱鑫要. 同步调相机对受端省级电网运行影响及控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(20): 25-32.
- ZHAO Jingbo, MENG Xia, ZHU Xinyao. Research on synchronous condenser's influences on receiving-end provincial grid and its control strategy[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(20): 25-32.
- [21] 石祥建, 牟伟, 韩焦, 等. 大型同步调相机控制策略研究[J]. 中国电力, 2017, 50(12): 44-50.
- SHI Xiangjian, MU Wei, HAN Jiao, et al. Research on control strategy of large synchronous condensers[J]. Electric Power, 2017, 50(12): 44-50.
- [22] 崔挺, 沈阳武, 张斌, 等. 300 MVar 级同步调相机对湖南电网稳定的影响研究[J]. 湖南电力, 2016, 36(3): 1-5.
- CUI Ting, SHEN Yangwu, ZHANG Bin, et al. Influences of 300 MVar synchronous condensers on the stabilities of Hunan power grid[J]. Hunan Electric Power, 2016, 36(3): 1-5.
- [23] 金一丁, 于钊, 李明节, 等. 新一代调相机与电力电子无功补偿装置在特高压交直流电网中应用的比较[J]. 电网技术, 2018, 42(7): 2096-2103.
- JIN Yiding, YU Zhao, LI Mingjie, et al. Comparison of new synchronous condenser and power electronics reactive-power compensation devices in applications of UHV DC/AC grid[J]. Power System Technology, 2018, 42(7): 2096-2103.
- [24] 李志强, 蒋维勇, 王彦滨, 等. 大容量新型调相机关键技术参数及其优化设计[J]. 大电机技术, 2017(4): 15-22.
- LI Zhiqiang, JIANG Weiyong, WANG Yanbin, et al. Key technical parameters and optimal design of new types of large capacity synchronous condense[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2017(4): 15-22.
- [25] 邵瑶, 汤涌. 多馈入直流系统交互作用因子的影响因素分析[J]. 电网技术, 2013, 37(3): 794-799.
- SHAO Yao, TANG Yong. Analysis of influencing factors of multi-infeed HVDC system interaction factor[J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 794-799.
- [26] 杨卫东, 徐政, 韩祯祥. 多馈入交直流电力系统研究中的相关问题[J]. 电网技术, 2000, 24(8): 13-17.
- YANG Weidong, XU Zheng, HAN Zhenxiang. Special issues and suggestion on multi-infeed AC/DC power systems[J]. Power System Technology, 2000, 24(8): 13-17.
- [27] 黄弘扬, 徐政, 许烽. 多馈入直流输电系统短路比指标的有效性分析[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(11): 46-50.
- HUANG Hongyang, XU Zheng, XU Feng. Effectiveness of short circuit ratio index for multi-infeed HVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(11): 46-50.
- [28] MAGDY G, SHABIB G, ELBASET A A, et al. Optimized coordinated control of LFC and SMES to enhance frequency stability of a real multi-source power system considering high renewable energy penetration[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(4): 407-421. DOI: 10.1186/s41601-018-0112-2.
-
- 收稿日期: 2019-12-08; 修回日期: 2020-01-16
- 作者简介:
- 边宏宇(1983—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 主要从事电力系统稳定计算及管理工作; E-mail: bianhongyu1@163.com
- 潘晓杰(1976—), 男, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事电力系统稳定计算及管理工作;
- 刘芳冰(1992—), 女, 硕士研究生, 助理工程师, 主要从事电力系统稳定计算及管理工作。
- (编辑 葛艳娜)