

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191340

# 直流馈入受端电网“空心化”形势下的 稳定特性分析及解决措施

边宏宇<sup>1</sup>, 徐友平<sup>1</sup>, 邵德军<sup>1</sup>, 潘晓杰<sup>1</sup>, 党杰<sup>1</sup>, 李程昊<sup>2</sup>

(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所, 河南 郑州 450052)

**摘要:** 随着国家对“西电东送”战略逐步重视以及清洁能源大范围优化配置能力的持续提升, 特高压多直流馈入后替代受端电网常规电源而导致受端“空心化”趋势可能成为一个较为普遍的问题。主要以青豫直流馈入河南及华中电网为例, 分析了直流馈入受端电网后的潮流疏散、电压稳定、功角稳定、小干扰动态稳定及多馈入短路比等主要特性变化。计算结果表明, 直流工程可有效提升受端电网供电能力及电力互济能力, 但直流落点近区可能存在潮流疏散不均衡、暂态电压、功角及系统动态稳定性降低, 及现有跨区直流多馈入有效短路比降低等问题。针对上述问题提出合理安排运行方式及受端交流网架加强工程与直流工程同步的建议, 并验证了建议的有效性。研究结果对规划、运行及国内同类直流工程设计都具有较强的参考价值。

**关键词:** 特高压直流; 电网空心化; 电压稳定; 功角稳定; 多馈入短路比

## Analysis of stability characteristics and solutions with the hollowing of a DC feed power grid

BIAN Hongyu<sup>1</sup>, XU Youping<sup>1</sup>, SHAO Dejun<sup>1</sup>, PAN Xiaojie<sup>1</sup>, DANG Jie<sup>1</sup>, LI Chenghao<sup>2</sup>

(1. Central China Branch, State Grid Corporation of China, Wuhan 430077, China;

2. State Grid Henan Electric Power Research Institute, Zhengzhou 450052, China)

**Abstract:** With increasing attention being paid to the national strategy of "west-to-east power transmission" and the continuous improvement of the wide-ranging and optimal allocation of clean energy, it will become a common problem for multi-DC to replace the conventional power supply. This will bring about the terminal hollowing of the power grid. This paper mainly takes the Henan power grid and central China power grid as examples to analyze the main characteristics of power flow evacuation, voltage stability, power angle stability, small disturbance stability and multi-feed short-circuit ratio. As the results show, after the above projects are put into operation, the power supply capacity of the receiving grid and the flexibility of the mutual aid between different areas can be greatly improved. However, there may be some problems such as the imbalance of power flow evacuation, the decrease of transient voltage, power angle and system dynamic stability, and the decrease of the effective short-circuit ratio of the DC multi-feed across the region. In view of the above problems, this paper puts forward some suggestions on how to arrange the operation mode reasonably and strengthen the synchronization between the AC grid and the DC project, and the effectiveness of the proposal is also verified. This study could be referred to for power grid planning, power grid operation and other similar HVDC transmission projects.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 521700190010) "Study and Demonstration of Application Key Technologies of Electrochemical Energy Storage Power Plant Clusters in UHV AC/DC Hybrid Receiving-end Power Grid".

**Key words:** UHVDC; hollowing of power grid; voltage stability; power angle stability; multi-feed short circuit ratio

## 0 引言

近年来, 随着国家“西电东送”战略的逐步深

入, 清洁能源大规模优化配置能力持续提升, 国网系统基本形成了东北、西北和西南三个大送端电网, 以及华北、华东和华中三个大受端电网。特高压直流输电工程作为成熟、可靠、大容量、低损耗、远距离的输电技术, 在我国跨区联网以及实现清洁能源大范围优化配置中发挥了重要作用, 对其关注度日益提升<sup>[1-11]</sup>。

**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与示范”

特高压直流可有效提高受端电网供电能力, 但直流馈入若替代受端常规电源, 将引起受端电网的“空心化”趋势, 带来直流近区潮流疏散重载及调节能力、电压支撑能力、功角稳定特性、动态稳定振荡阻尼比以及多馈入直流短路比等电网特性降低等问题, 逐渐成为国内外电力工业界和学术界关注的热点<sup>[12-17]</sup>。文献[18]以天中特高压直流接入工程为研究对象, 详细分析了直流系统控制方式与受端电网电压稳定性的关系, 揭示了不同的控制方式影响换流站交流母线电压稳定性的规律, 并结合河南电网进行仿真和验证。文献[19]以金沙江一期、锦屏梯级水电基地外送采用特高压直流输电方案为依托, 研究了大容量直流馈入华东、华中、华北交流同步电网对处于交直流并列运行系统的安全稳定影响。文献[20]研究了±800 kV 祁韶特高压直流投运后的湖南电网负荷中心暂态电压稳定性, 同时从实际电网运行需求出发, 提出一种保证直流受端电网暂态电压稳定的运行控制实用方法, 并将该方法应用于制定湖南电网运行控制策略。

本文主要以青豫直流馈入河南及华中电网为例, 分析了受端电网的潮流疏散、电压稳定、功角稳定、小干扰动态稳定及多馈入短路比等主要特性变化。研究结果对于保障多直流馈入受端电网的安全稳定运行具有重要的现实意义, 对电网规划、运行及同类直流受端电网分析具有较强的参考价值。

## 1 直流受端潮流疏散分析

电网发展历程中, 通常受端电网的初始规划及实施普遍以接纳电力并通过变压器下网至负荷侧为主要目标, 加之近年来很多新建线路均以同杆并架为主, 线路  $N-1$  或  $N-2$  故障后容易出现剩余线路过载情况。特高压直流馈入后, 需要通过多级断面实现潮流疏散, 任一级断面卡口均可能反约束直流馈入能力, 导致直流功率“流不动”的现象。另外, 直流馈入后若替代受端机组, 造成受端“空心化”特性, 将一定程度降低重载线路调节能力, 进一步制约直流馈入能力。

本文以河南电网为例, 说明青豫直流馈入后可缓解河南供电压力的效果以及产生的潮流疏散问题。青豫直流接入河南电网示意图如图 1 所示, 其额定输电能力 8 000 MW, 分高低端各 4 000 MW 分层馈入河南东南部的驻马店片区。直流馈入电力主要在驻马店及信阳片区消纳, 同时需要通过灊变电站转送至湖北东部。

河南电网潮流分布主要呈现“西电东送、北电南送”的特点, 由于豫东南地区供电压力较为明显,

图 1 中的邵-螺-嵛-灊通道长期重载运行。青豫直流及其配套的南驻交流投运后, 河南电网南北互济、东西互济的灵活性大幅提升, 主要体现在以下两方面。

1) 河南北电南送潮流压力减轻: 邵-螺-嵛呀-灊通道长期重载问题可有效缓解, 正常方式下潮流可减轻约 1 000~2 600 MW。

2) 河南西电东送潮流减轻: 正常方式下香-鄆、湛-鄆等线路潮流可减轻约 500~1 700 MW。

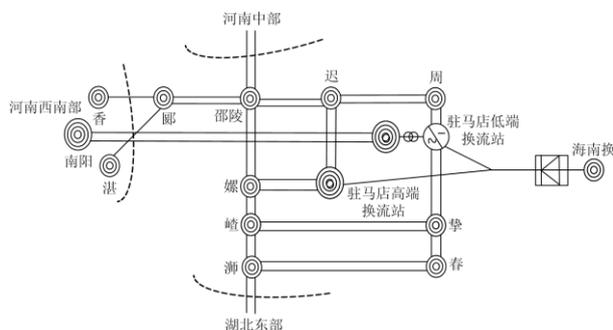


图 1 青豫直流接入河南电网示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the Henan power grid after the UHVDC project put into production

青豫直流接入驻马店电网后, 潮流疏散可能存在不均衡的问题, 需要反约束青豫直流低端馈入功率, 主要体现在以下两方面。

1) 青豫直流高端落点一级断面由直流换流站至迟、螺各 2 回线路构成, 两通道潮流可能分布不均衡, 河南东南部送湖北功率较大时上述线路潮流分布比例可达 1:4, 导致高端落点一螺的双回 500 kV 线路功率达到 3 200 MW, 线路  $N-1$  后另一回线路容易过载。

2) 青豫直流低端落点一级断面由交流换流站至周、摯各 2 回构成, 两通道潮流分布不均衡, 河南东南部送湖北功率较大时潮流分布比例最高可达 1:6, 导致低端落点一摯的双回 500 kV 线路功率达到 3 400 MW 以上, 线路  $N-1$  后另一回线路容易过载。

基于以上分析, 需要根据负荷变化合理安排河南以及湖北东部电网最小开机等运行方式, 避免青豫直流电力大量转送湖北东部, 增强重载线路调节能力, 同时建议青豫直流高低端馈入点近区疏散线路应设计为非同杆架设, 以减轻上述 500 kV 线路  $N-1$  后的过载风险。

## 2 直流受端电压稳定分析及改善措施

### 2.1 受端电网电压稳定分析

电压稳定是保障电网稳定运行的一个重要指

标, 运行电压主要取决于无功功率平衡, 发电机是最重要的无功支撑, 以单机对无穷大系统说明发电机无功与系统电压之间的关系, 如图 2 所示。

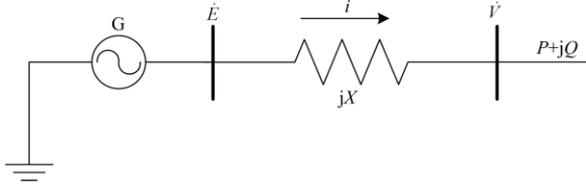


图 2 单机对无穷大系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of a single machine to infinite size system

图中,  $\dot{E}$  为发电机机端电势,  $\dot{V}$  为系统电压,  $X$  为发电机与系统的联系电抗。

$$P = VI \cos \theta = \frac{EV}{X} \sin \delta \quad (1)$$

$$Q = VI \sin \theta = \frac{EV}{X} \cos \delta - \frac{V^2}{X} \quad (2)$$

将式(1)代入式(2), 可得式(3)。

$$Q = \sqrt{\left(\frac{EV}{X}\right)^2 - P^2} - \frac{V^2}{X} \quad (3)$$

当电源机端电势固定时,  $Q$  与  $V$  的函数是向下开口抛物线, 如图 3 所示。任一时刻电源发出的无功功率与负荷消耗及网损无功功率之和抵消。图中电源无功功率曲线 1 与负荷无功功率曲线 1 相交于 a 点, 系统运行电压为  $V_a$  的两条曲线交点 a 确定了系统电压, 电源无功与负荷无功达到平衡。

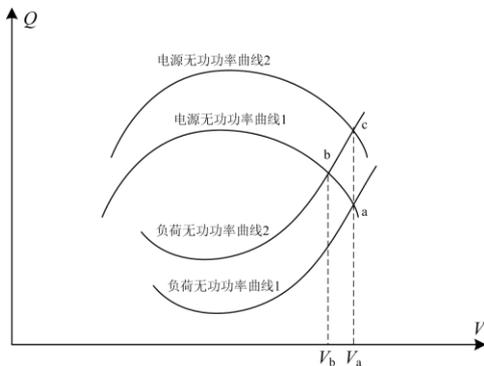


图 3 电源无功曲线与负荷无功曲线

Fig. 3 Power reactive power curve and load reactive power curve

交流短路故障后, 直流换相失败及感应电动机电流增大, 需要系统提供的暂态无功功率增加, 若电源发出无功功率不变, 电源无功功率曲线 1 与负荷无功功率曲线 2 相交于点 b, 系统运行电压降低至  $V_b$ 。此时, 若要保持系统电压不变, 则需增加电

源发出的无功功率, 使得电源无功功率特性变为曲线 2, 与负荷无功曲线 2 相交于 c 点, c 点电压与 a 点电压一致, 恢复至故障前电压。

直流馈入能力与受端交流电网的电压稳定支撑性密切相关<sup>[21]</sup>。直流馈入后若替代受端常规电源开机容量, 将导致受端电网产生“空心化”趋势, 无功支撑减少, 式(3)中的发电机机端电势  $E$  和系统电压  $V$  的恢复能力降低, 进而降低受端电网的暂态电压稳定特性。

本文以河南电网为例进行说明。河南电网火电机组装机容量占全省装机容量之比超过 80%, 青豫直流投运后, 若替代部分火电开机, 将导致受端暂态电压稳定特性降低。青豫直流投运前后, 河南交流故障后东南部电压恢复过程对比结果如图 4 所示, 电压稳定特性有所降低。

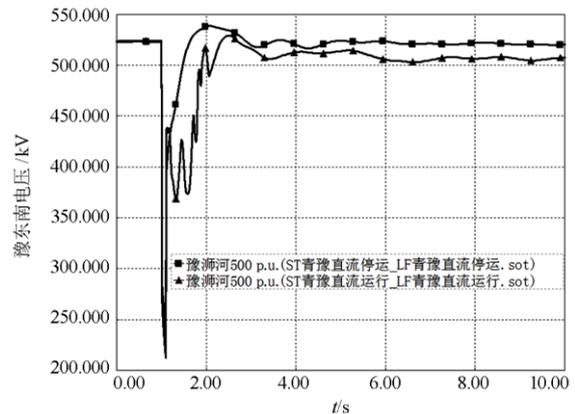


图 4 青豫直流投运前/后河南东南部电压曲线

Fig. 4 Voltage curve of southeast Henan before and after the Qing-Yu project put into production

## 2.2 提高直流受端电压稳定特性措施

根据 2.1 节中的分析结果, 提高直流受端电压稳定性主要有以下两种措施:

1) 提高发电机机端电势  $E$  和系统电压  $V$  的恢复能力。可采取的措施主要包括增加常规电源开机容量以增加电源的无功储备。另外, 调相机作为集中式无功补偿措施, 其无功功率最大支撑能力可达额定容量的 2 倍以上, 对提高发电机机端电势  $E$  和系统电压  $V$  的恢复能力效果显著<sup>[22-24]</sup>。以河南电网为例, 邵陵 2 台调相机将与 2020 上半年投运, 额定容量均为 3 000 Mvar, 邵陵调相机投运前后的调相机无功功率曲线及河南东南部电压恢复曲线分别如图 5、图 6 所示。

2) 减小式(3)中的联系电抗  $X$ 。主要通过加强受端电网的电气联系可减小  $X$ , 在受端电压跌落恢复过程中可以跨地区进行无功功率支援, 进而提高受

端电压恢复特性。例如南阳-驻马店特高压交流配套工程可有效加强河南西南部和东南部的电气联系, 对提高青豫直流接入后河南电压稳定性作用明显, 南阳-驻马店特高压交流运行和停运方式对河南东南部电压支撑效果如图 7 所示。

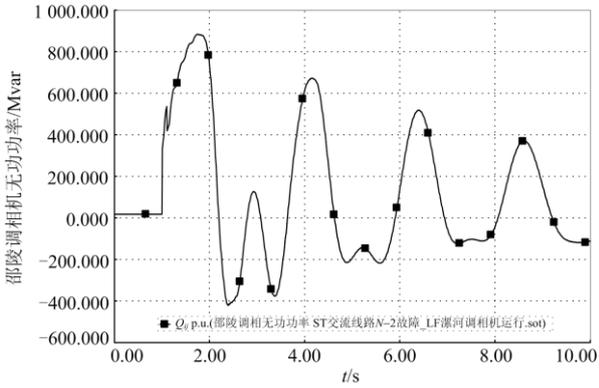


图 5 邵陵调相机无功功率曲线

Fig. 5 Reactive power curve of Shaoling synchronous condenser

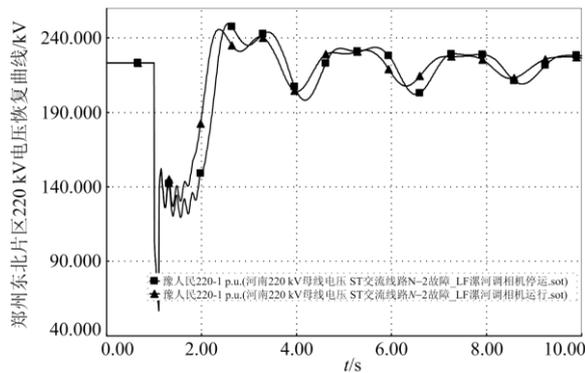


图 6 邵陵调相机停运和运行河南东南电压对比曲线

Fig. 6 Comparison of the voltage curve of southeast Henan before and after Shaoling synchronous condenser put into production

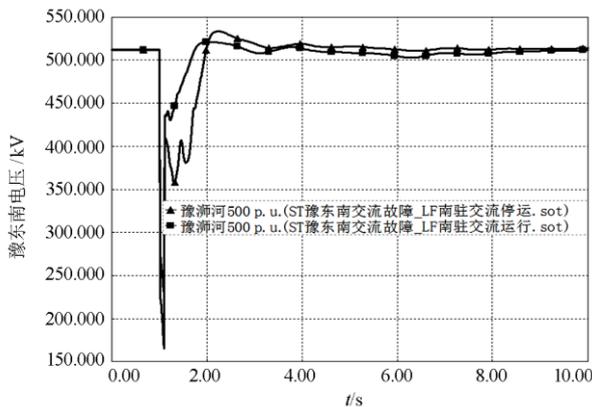


图 7 南驻交流运行/停运方式河南东南部电压曲线

Fig. 7 Voltage curve of southeast Henan before and after the project of the Nanyang-Zhumadian UHVAC put into production

### 3 功角暂态稳定分析

若直流馈入造成受端电网“空心化”, 则式(3)中的发电机机端电势  $E$  和系统电压  $V$  的恢复能力降低, 同时由于电源减少导致系统等值导纳矩阵中的节点自导纳和互导纳减小, 进而降低了联系电抗  $X$ , 容易引起暂态功角稳定性下降的问题。

针对青豫直流投运前后对比华中-华北功角稳定特性如图 8 所示, 可见青豫直流投运后华中电网功角稳定特性降低。需要根据负荷变化合理安排最小开机方式, 尽量降低上述影响。

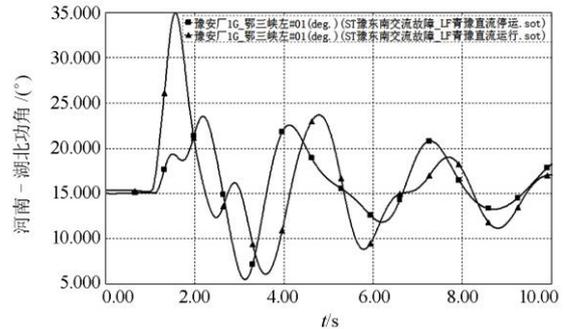


图 8 青豫直流投运前后的华中-华北功角曲线

Fig. 8 Power angle stability curve of central China-northern China before and after Qing-Yu project put into production

### 4 直流受端动态稳定分析及改善措施

若直流馈入点位于受端电网中部, 则受端“空心化”后容易引起动态稳定过程中由于缺少中部惯量支撑而产生的阻尼比下降的问题。

本文以华中电网为例, 针对青豫直流投运前后计算得到的华中电网 3 个主要区域振荡模式, 其频率和阻尼比如表 1 所示。

表 1 青豫直流投运前后的低频振荡模式

Table 1 Power system inertial modes before and after Qing-Yu project put into production

振荡模式	青豫直流投运前		青豫直流投运后	
	频率/Hz	阻尼比/%	频率/Hz	阻尼比/%
江西-湖南	0.489	5.9	0.501	5.7
江西-河南	0.439	8.2	0.456	7.5
三峡-湖南	0.668	5.6	0.687	5.2

计算结果表明, 在青豫直流投运后, 由于替代了部分华中电网中部开机容量, 导致华中电网中部开机惯量减小, 主要跨省振荡模式频率提高, 阻尼比略有降低。需要根据负荷变化合理安排开机方式, 尽量降低上述影响。

## 5 多馈入有效短路比分析

多馈入直流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<sup>[25-30]</sup>，其计算公式为

$$MSCR_i = \frac{S_{aci}}{P_{deqi}} = \frac{U_i^2 / |Z_{eqii}|}{P_{di} + \sum_{j=1, i \neq j}^n |Z_{eqij} / Z_{eqii}| P_{dj}} \quad (4)$$

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，得到的值为各直流的多馈入有效短路比。

新直流馈入后，由于式(4)中的分母增大及受端“空心化”造成的机组电压 $U_i$ 的支撑作用减小，原有直流的多馈入直流有效短路比降低。仍以华中电网为例，天中、祁韶及青豫等特高压直流的多馈入有效短路比结果如表2所示。青豫直流投运后，天中直流多馈入有效短路比降低0.4，祁韶直流多馈入有效短路比仅降低0.1，但天中、祁韶及青豫直流多馈入短路比均超过3，在规定范围内。

表2 青豫直流投运前后主要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 Qing-Yu project put into production

多馈入有效短路比	天中	祁韶	青豫
青豫直流投运前	4.6	5.4	—
青豫直流投运后	4.2	5.3	3.6

## 6 结论

本文主要针对特高压多直流馈入受端电网后替代常规电源而导致的受端“空心化”趋势，结合青豫直流接入河南电网的实例，计算分析了潮流疏散、电压稳定、功角稳定、小干扰稳定及多馈入有效短路比等主要电网特性，主要结论如下：

1) 直流馈入后可有效缓解受端电网供电压力并提高潮流大范围互济能力，但直流馈入点的多级疏散线路应以非同杆架设为主，以减轻线路*N-1*后其他运行线路的过载风险。

2) 若直流馈入功率替代受端常规电源开机造成“空心化”趋势，将导致受端电网无功调节能力降低，需根据不同直流功率对受端电网的电压支撑敏感机组提出最小开机要求，以保证足够的无功支撑能力。同时应配套加强受端交流网架，以加强电气联系，有助于直流换相失败等电压恢复过程中进行跨地区无功功率支援。

3) 若直流馈入功率替代受端常规电源开机，将

导致受端系统电压恢复能力降低，同时系统联系电抗减小，容易引起暂态功角稳定性下降的问题，需根据负荷变化合理安排开机方式。

4) 若直流馈入点位于受端电网中部，容易引起受端电网动态稳定过程中由于缺少中部惯量支撑而产生的阻尼比下降的问题，需根据电网实际开机变化变化合理安排运行方式。

5) 新建直流一方面会分摊受端电网对原有直流的支撑作用，同时若新直流馈入功率替代受端常规电源开机，将导致受端系统对原有直流的支撑作用及多馈入直流有效短路比进一步降低，需根据电网实际开机变化合理安排运行方式。

## 参考文献

- [1] 李婧靓, 黄伟煌, 刘涛, 等. 特高压多端混合直流输电系统的控制策略研究[J]. 南方电网技术, 2018, 12(2): 47-55.  
LI Jingliang, HUANG Weihuang, LIU Tao, et al. Research on control strategy of multi-terminal hybrid UHV DC transmission system[J]. Southern Power System Technology, 2018, 12(2): 47-55.
- [2] 习工伟, 胡涛, 朱艺颖, 等. 基于新型交直流协调控制抑制电力系统低频振荡的仿真试验[J]. 电网与清洁能源, 2019, 35(4): 8-15, 22.  
XI Gongwei, HU Tao, ZHU Yiyang, et al. Simulation test of low frequency oscillation suppression in power system based on new AC-DC coordinated control[J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(4): 8-15, 22.
- [3] 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.
- [4] 郑晓冬, 邵能灵, 杨光亮, 等. 特高压直流输电系统的建模与仿真[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(7): 10-14.  
ZHENG Xiaodong, TAI Nengling, YANG Guangliang, et al. Modeling and simulation of UHVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(7): 10-14.
- [5] 潘学萍, 李乐, 黄华, 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.  
PAN Xueping, LI Le, HUANG Hua, 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.
- [6] 吕思卓, 舒展, 宋新甫, 等. 柔性直流接入对弱受端电网恢复特性的影响及优化措施[J]. 电力工程技术, 2020, 39(1): 31-37.  
LÜ Sizhuo, SHU Zhan, SONG Xinfu, et al. Influence of VSC-HVDC interconnection on recovery characteristics of weak receiving-end grid fault and optimization measure[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(1): 31-37.
- [7] 张晶, 刘晓巍, 张松涛, 等. 全球能源互联网标准体系优先领域研究[J]. 供用电, 2018, 35(8): 61-66, 72.  
ZHANG Jing, LIU Xiaowei, ZHANG Songtao, et al. Studies on priority areas of standard system for global energy interconnection (GED)[J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(8): 61-66, 72.
- [8] 武利会, 黄辉, 范心明, 等. 交直流混联配电网换流变压器零序保护优化配置[J]. 供用电, 2018, 35(8): 41-46, 79.  
WU Lihui, HUANG Hui, FAN Xinming, et al. Optimal configuration of zero-sequence protection for converter transformer in AC/DC hybrid distribution network[J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(8): 41-46, 79.
- [9] 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.
- [10] 冯长有, 姚伟锋, 江叶峰, 等. 特高压直流运行风险评估技术研究及应用[J]. 智慧电力, 2020, 48(7): 30-37.  
FENG Changyou, YAO Weifeng, JIANG Yefeng, et al. Study and application of UHVDC operation risk evaluation[J]. Smart Power, 2020, 48(7): 30-37.
- [11] 范璇, 张玉红, 苏丽宁, 等. 多直流馈入受端电网短路电流控制水平研究[J]. 智慧电力, 2018, 46(3): 61-67.  
FAN Xuan, ZHANG Yuhong, SU Lining, et al. Research on short circuit current control in multi-infeed DC receiving power grid[J]. Smart Power, 2018, 46(3): 61-67.
- [12] LI Bin, HE Jiawei, LI Ye, et al. A review of the protection for the multi-terminal VSC-HVDC grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(4): 239-249. DOI: 10.1186/41601-019-0136-2.
- [13] 胡林献, 陈学允. 崩溃点法交直流联合系统电压稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 1997, 17(6): 395-398.  
HU Linxian, CHEN Xueyun. Point of collapse method applied to voltage stability analysis of AC/DC power system[J]. Proceedings of the CSEE, 1997, 17(6): 395-398.
- [14] 屠竞哲, 张健, 王建明, 等. 大规模直流异步互联系统受端故障引发送端稳定破坏的机理分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(21): 5492-5499.  
TU Jingzhe, ZHANG Jian, WANG Jianming, et al. Mechanism analysis on the sending-side instability caused by the receiving-side contingencies of large-scale HVDC asynchronous interconnected power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(21): 5492-5499.
- [15] 蔡晖, 万振东, 孙文涛, 等. 高受电比例受端电网的输电电网网架结构优化技术研究[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(12): 6-13, 26.  
CAI Hui, WAN Zhendong, SUN Wentao, et al. Research on optimization technologies for transmission grid structures in the high-proportion receiving-end power[J]. Power System and Clean Energy, 2018, 34(12): 6-13, 26.
- [16] 朱益华, 郭琦, 李威, 等. 含柔性直流输电系统的电网安全稳定特性和控制策略研究[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(12): 20-26.  
ZHU Yihua, GUO Qi, LI Wei, et al. Research on security and stability characteristics and control strategy of power grid with VSC-HVDC[J]. Power System and Clean Energy, 2018, 34(12): 20-26.
- [17] 李越, 刘崇茹, 赵云灏, 等. 两种可适用于分层接入的特高压直流输电控制系统[J]. 现代电力, 2017, 34(5): 1-6.  
LI Yue, LIU Chongru, ZHAO Yunhao, et al. Two types of UHVDC control system suitable for hierarchical connection to AC power grid[J]. Modern Electric Power, 2017, 34(5): 1-6.
- [18] 胡艳梅, 吴俊勇, 李芳, 等.  $\pm 800$  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  $\pm 800$  kV Ha-Zheng UHV DC on voltage stability of Henan Power Grid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(21): 147-153.
- [19] 齐旭, 曾德文, 史大军, 等. 特高压直流输电对系统安全稳定影响研究[J]. 电网技术, 2006, 30(2): 1-6.  
QI Xu, ZENG Dewen, SHI Dajun, et al. Study on impacts of UHV DC transmission on power system stability[J]. Power System Technology, 2006, 30(2): 1-6.
- [20] 邱威, 贺静波, 于钊, 等. 特高压直流馈入湖南电网的暂态电压稳定分析[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(10): 168-173.  
QIU Wei, HE Jingbo, YU Zhao, et al. Transient voltage stability analysis of Hunan Power Grid with infeed UHVDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019,

- 39(10): 168-173.
- [21] 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.
- [22] 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 condensers influences on receiving-end provincial grid and its control strategy[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(20): 25-32.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [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] 林伟芳, 汤涌, 卜广全. 多馈入交直流系统短路比的定义和应用[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(31): 1-8.  
LIN Weifang, TANG Yong, BU Guangquan. Definition and application of short circuit ratio for multi-infeed AC/DC power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(31): 1-8.
- [28] 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.
- [29] 徐政, 唐庚, 黄弘扬, 等. 消解多直流馈入问题的两种技术[J]. 南方电网技术, 2013, 7(1): 6-14.  
XU Zheng, TANG Geng, HUANG Hongyang, et al. Two new technologies for eliminating the problems with multiple HVDC in-feeds[J]. Southern Power System Technology, 2013, 7(1): 6-14.
- [30] 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: 2019-10-28; 修回日期: 2020-02-13

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

徐友平(1970—), 男, 硕士研究生, 教授级高级工程师, 主要从事电力系统稳定管理工作;

邵德军(1981—), 男, 博士研究生, 教授级高级工程师, 主要从事电力系统稳定计算及管理工作。

(编辑 葛艳娜)