

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.08.008

± 800 kV天中特高压直流送端系统安全稳定性分析

巩晓玲¹, 樊艳芳¹, 钟显¹, 郑少鹏², 常喜强³

(1. 新疆大学电气工程学院, 乌鲁木齐 830047; 2. 国网新疆电力科学研究院, 乌鲁木齐 830011; 3. 国网新疆电力调度控制中心, 乌鲁木齐 830002)

摘要: 为分析天中特高压直流送端电网安全稳定性, 基于有效短路比(OESCR)、投切滤波器和直流单(双)极闭锁故障分析不同直流运行工况对送端电网的影响, 在此基础上分析疆内电网一次调频作用下直流系统的频率特性、配套机组跳闸与单极闭锁故障下直流孤网运行特性。结果表明, 直流配套火电6/8台机可建立工况运行, 直流联网运行下其频率特性受疆内电网调频影响较大; 直流孤网运行时, 在配套机组跳闸或单极闭锁故障后无控制措施情况下, 均易引起直流系统频率稳定和暂态过电压问题, 此时须考虑稳控切机或直流功率紧急控制提升直流系统安全稳定性。

关键词: 特高压直流; 安全稳定; 送端系统; 运行工况; 孤网

Analysis on Security and Stability of ± 800 kV Tianzhong UHVDC Sending Grid

GONG Xiaoling¹, FAN Yanfang¹, ZHONG Xian¹, ZHENG Shaopeng², CHANG Xiqiang³

(1. School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China; 2. State Grid Electric Power Company Xinjiang Institute of Science, Urumqi 830011, China; 3. State Grid Xinjiang Communication Center for Power Dispatching, Urumqi 830002, China)

Abstract: In order to analyze the security and stability of Tianzhong UHVDC sending grid, this paper analyzes the influence of different DC operating conditions based on effective short circuit ratio (OESCR), filter switching and DC single (double) pole lock failure. Then analyzes the impact of frequency adjuster which is at Xinjiang grid on system frequency characteristic; And the influence on UHVDC stability when generator cutting or DC pole blocking faults under the DC isolated operation. The study results show that the operating conditions of the 6 or 8 generators of the DC auxiliary power station can be set up, and the frequency of DC operation is large affected by the frequency adjuster of power grid. But, the DC isolated system frequency stability and transient overvoltage problems are easy to be caused by the DC generator cutting and DC single pole lock failure when considering non control measures. Therefore, it should take stability control strategies or DC power emergency control to enhance the security and stability of the UHVDC system.

Key words: UHVDC; security and stability; sending grid; operating condition; island system

0 引言

± 800 kV 天中(哈密—郑州)特高压直流输电工程是疆电外送第1条特高压直流输电工程, 也是中国第1个风火打捆直流送出工程。其在大容量、远距离输电中发挥优势, 担任“西电东送”的重要作

用。随着 ± 800 kV 特高压直流送端系统配套火电的陆续投运及新能源发电的快速增长, 加上与特高压750 kV 交流系统的耦合, 直流外送系统的安全稳定性问题变得尤为复杂。因此, 有必要对特高压直流送端系统的安全稳定性进行分析^[1-2]。

目前, 对于直流系统接入电网的稳定性问题已展开了一些相关研究。文[3-8]分析了直流闭锁故障

收稿日期: 2017-03-18; 修回日期: 2017-05-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(51467019)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (NSFC) (51467019).

对特高压直流馈入受端电网的稳定性影响,从系统调峰能力、网架结构强弱、电力负荷水平方面校核受端电网的稳定水平;文[9]针对直流故障对交流系统的影响,建立了直流停运故障树,并基于子系统划分的时间频率法评估运行可靠性,指出需适当考虑负荷模型对系统稳定的影响;文[10-13]针对特高压直流发生闭锁故障,为减小对交流冲击性影响,从稳控方案展开讨论,提出综合考虑直流送端系统火电、新能源的切机方案,满足电网安全约束条件下提高系统的稳定性;文[14-17]针对多直流接入对交流系统影响,当双极闭锁故障导致系统失稳时,利用直流系统的过载能力提出直流功率紧急支援控制策略,提高系统的暂态稳定;文[18-21]针对大规模“风火打捆”直流外送系统直流闭锁故障,提出改变直流传输功率与调节风机的有功出力,减小系统的不平衡功率;以及追踪风功率波动的控制策略来提升系统暂态稳定性。

可见,目前针对特高压直流受端电网稳定性研究,主要基于稳控方案、网源协调、直流功率紧急支援等提出一系列稳定性控制措施。而对于新能源出力间歇性、直流配套火电投运初期不稳定性的特高压直流送端电网,交、直流混联耦合关系越来越强,运行控制复杂,尤其是直流故障导致无功功率转移、联络线功率振荡、枢纽变电站电压越限及直流近端大规模风电脱网问题日益突出,亟需进一步对特高压直流送端系统的安全稳定性进行分析。

文中结合新疆 ± 800 kV 特高压直流输电系统,从直流运行工况、直流系统频率特性以及孤网运行下分析配套机组跳闸、直流单极闭锁故障对其稳定性影响3个方面展开讨论,以期为高特高压直流输电系统送端电网安全稳定运行提供一定借鉴。

1 网架结构与直流送端电网潮流控制

1.1 特高压直流送端电网网架结构

± 800 kV 天中(哈密—郑州)特高压直流输电工程是双极直流系统,送端哈密换流站换流母线额定运行电压 530 kV,近区配套电源直接通过 500 kV 线路接入换流站,受端郑州换流站换流母线额定运行电压为 525 kV。其接入送端电网示意图见图 1。

1.2 天中直流配套电源情况

随着 ± 800 kV 天中直流传输功率的提升,预计2015年底直流近区配套火电厂3座,装机容量 5 280 MW (8×660 MW);配套新能源(风电、光伏)4 690 MW,集中接入在三塘湖、哈密北、烟墩南3大新能源集群区域,其直流近端配套电源接入情况见

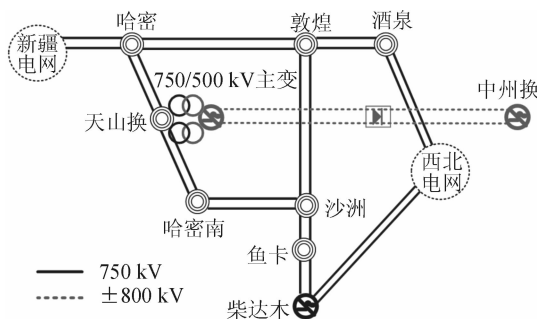


图1 特高压直流接入送端电网结构示意图

Fig. 1 Sketch of UHVDC connected to sending grid

图2。

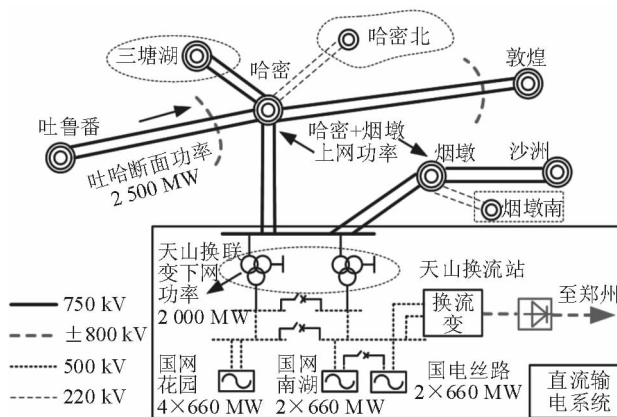


图2 天中直流近区配套电源示意图

Fig. 2 Schetch of matching power for Tianzhong UHVDC

1.3 直流输电送端电网潮流控制

根据2015年冬小负荷运行方式,在满足新疆主网750 kV与220 kV潮流分布合理的条件下,根据直流配套电源投运情况,直流送端电网潮流控制如下:750 kV交流系统吐哈断面上网功率2500 MW,直流配套新能源出力通过750 kV烟墩和哈密上网,750 kV天山换流站联变下网功率2000 MW,考虑直流配套火电8台机组运行,直流外送能力7000 MW。

2 系统模型与安全稳定计算说明

2.1 系统模型

采用中科院综合稳定分析软件(PSASP),基于2015年特高压直流输电系统送端电网结构,选取2015年冬小负荷运行方式为计算基础数据。

1)发电机模型。主要发电机采用 E_d 、 E_q 变化详细模型,并考虑励磁、PSS和调速系统;

2)负荷模型。常规电力负荷采用60%旋转阻抗+40%恒阻抗模型,高载能负荷(如炼铝厂)采用90%恒阻抗模型;

3)直流输电系统模型。采用综稳程序中的1型

准稳态模型;

4)故障模拟。考虑特高压直流输电系统单(双)极闭锁及配套机组跳闸故障类型。

2.2 安全稳定计算条件

当同时满足以下 3 个条件, 认为系统稳定, 否则认为系统不稳定。稳定判据为:

1)功角稳定。系统在遭受大扰动后, 非同调发电机的功角摇摆曲线收敛, 功角摇摆曲线计算时间 30 s, 要求功角摇摆曲线呈减幅趋势, 扰动后阻尼比应达到 3%;

2)电压稳定。系统内中枢点电压不低于 80% U_n , 并持续时间不超过 1 s, 并且电压为减幅振荡, 振荡逐步衰减消失;

3)频率稳定。系统低频率时, 正常情况下应不导致低频率减负荷装置动作, 特殊情况下可以考虑低频率减负荷装置动作, 但系统不能发生频率崩溃, 即系统最低频率不应低至低频率减负荷装置最低频率轮频率值(47.5 Hz); 系统高频率时, 最高频率不应高于电网中发电机组高频率保护最低频率整定值, 一般应不高于 50.5~51 Hz。

2.3 交直流系统运行性能评估参考指标

在交直流混联电网中, 系统稳定性常用“短路比(SCR)”和“有效短路比(ESCR)”指标反映交直流系统间相对强弱程度、过电压及谐波谐振等问题^[15-16]。由于天中直流系统处于不同运行阶段, 其输送功率均低于额定水平, 故可采用“运行短路比(OSCR)”和“有效运行短路比(OESCR)”指标分析系统安全性, 进而评价交直流送端电网运行性能(规定: $SCR < 2$ 时, 极弱交流系统; $2 < SCR < 3$ 时, 弱交流系统; $SCR > 3$ 时, 强交流系统)。

$$OSCR = S_{sc} / P_{dc}; \quad (1)$$

$$OESCR = (S_{sc} - S_{qc}) / P_{dc}。 \quad (2)$$

式(1)、(2)中: S_{sc} 为短路容量; P_{dc} 为直流传输实际功率; S_{qc} 为补偿无功容量。

3 送端系统安全稳定性分析

根据 2015 年运行方式, 在直流配套电源不同投运阶段, 集中对直流送端电网运行工况、直流系统频率特性及直流配套机组跳闸和闭锁故障对孤网直流系统的影响进行分析讨论。

3.1 直流送端系统运行工况分析

3.1.1 直流送端系统强弱性分析

考虑直流配套火电 0、6、8 台机不同运行阶段, 计算换流站短路容量结果见表 1。

根据哈郑(天中)直流成套设计的要求, 换流站

表 1 直流系统运行工况分析

Table 1 Analysis of UHVDC operating conditions

运行工况	P_d /MW	S_{sc} /MVA	S_{qc} /MVA	I_s /kA	OSCR	OESCR
配套 0 机	2 000	8 860	1 040	9.8	4.43	3.91
配套 6 机	4 000	19 230	2 000	22.4	4.81	4.31
配套 8 机	7 000	23 550	3 880	26.7	3.36	2.81

交流系统母线短路电流范围是 16.7~63 kA。由表 1 中结果看出, 当直流系统配套火电 0 机时换流站短路电流较低, 不满足设计要求。随着配套火电容量的增加(6 台机与 8 台机运行时), 其短路电流水平有所提升; 当直流 6 台机运行时, $OESCR > 3$, 属于强交流系统, 但直流传输功率提升空间仍较大; 当直流 8 台机运行时, 虽直流传输功率提升, 但 $OESCR < 3$, 属于弱交流系统。

3.1.2 直流换流站电压影响分析

1)稳态电压分析: 根据配套火电 0、6、8 台机的不同运行阶段, 通过投切滤波器(一组 270 Mvar)对直流换流站稳态电压进行分析, 见表 2。根据哈郑(天中)直流成套设计要求换流站交流 500 kV 母线电压波动在 5 kV 内。

表 2 直流换流站 500 kV 母线电压影响分析

Table 2 Analysis of 500 kV bus voltage at UHVDC

运行工况	初始电压/kV	converter station		电压波动/kV	是否满足要求
		滤波器投退/Mvar	滤波器投退电压/kV		
配套 0 机	532.4	投 270 切 270	542.0 522.2	+9.6 -10.2	不满足
配套 6 机	527.0	投 270 切 270	531.0 522.2	+4.0 -4.8	满足
配套 8 机	521.9	投 270 切 270	523.7 521.2	+1.8 -0.7	满足

2)暂态电压分析: 在配套火电不同运行阶段, 当直流单极、双极闭锁故障时(故障 0 s 开始, 0.3 s 结束)分析换流站电压变化见图 3。图 3 仿真结果显示, 无论天中直流在何种运行工况下, 单双极闭锁故障均造成了直流换流站 500 kV 母线暂态过电压, 其中单极闭锁故障 500 kV 母线电压升从 29.8 kV→79.7 kV, 双极闭锁故障 500 kV 母线电压升从 62.7 kV→169.6 kV。可见, 随着直流配套电源容量增大与直流传输功率的增加, 闭锁故障后暂态过电压程度加深。

综上, 通过对直流配套火电不同投运阶段分析可知, 当直流配套火电 0 机运行时不满足天中直流设计要求; 当直流配套火电 8 机运行时交流系统表现为弱系统, 需加强直流近端电源建设; 当直流配套火

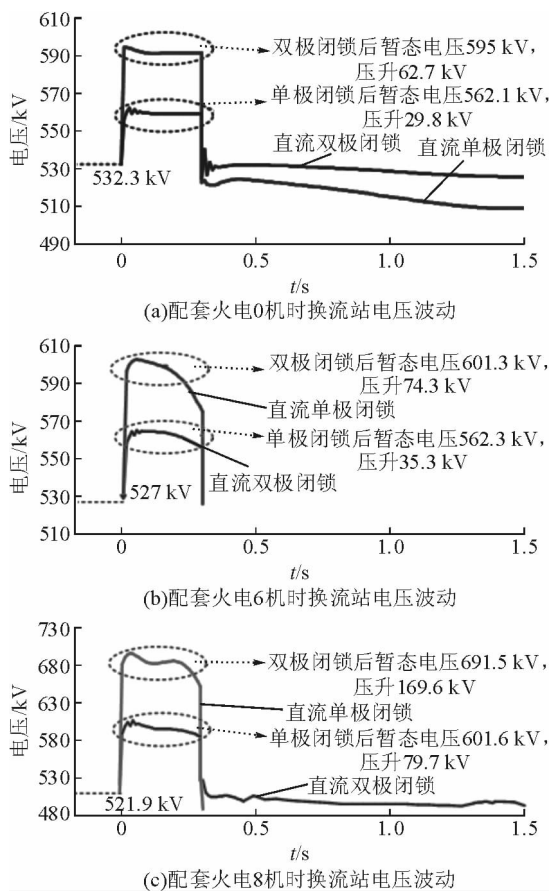


图3 换流站电压波动曲线

Fig. 3 Curve of converter station voltage fluctuation

电6、8机运行时换流站500 kV母线稳态电压波动较小,满足要求,但直流闭锁故障后暂态电压出现过压情况。

3.2 天中直流系统频率特性分析

在直流配套火电8机运行,直流传输功率7 000 MW时,分析直流发生双极闭锁故障后疆内电网一次调频对直流系统频率特性的影响。

1)疆内电网一次调频全部投入时:天中直流1.0 s发生双极闭锁后,延迟0.2 s切直流换流站滤波器,延迟0.3 s切直流配套机组和网内机组共2 600 MW,仿真结果见图4。

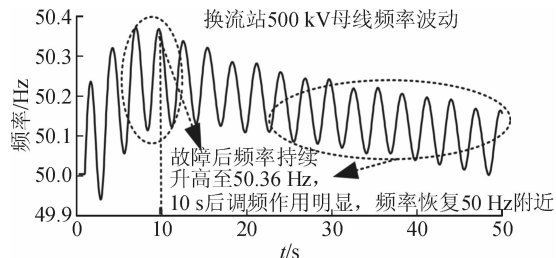


图4 一次调频投入时换流站母线频率波动曲线

Fig. 4 Curve of converter station bus frequency fluctuation with the first frequency adjuster put in

图4结果显示,直流系统发生故障后,前10 s内由于有功功率大量剩余,使得系统频率持续升高至50.36 Hz,10 s之后调频作用逐渐体现,系统频率恢复至50 Hz附近,在合理范围内小幅波动。

2)疆内电网一次调频不投入时:天中直流1.0 s发生双极闭锁后,延迟0.3 s切除直流配套机组共2 600 MW,仿真结果见图5。

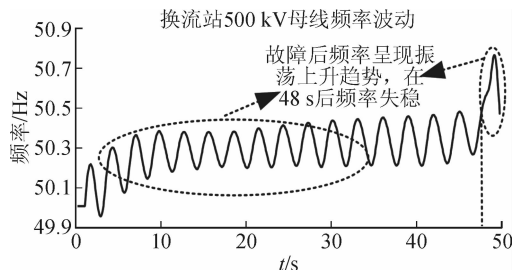


图5 一次调频未投入时换流站母线频率波动曲线

Fig. 5 Curve of converter station bus frequency fluctuation without the first frequency adjuster put in

图5结果显示,直流系统发生故障后,由于有功功率大量剩余,且网内一次调频未投入运行,频率呈现振荡上升趋势,在48 s后频率失稳,系统无法正常运行。可见,在直流双极闭锁故障后相同稳控切机策略下,网内机组调速系统对天中直流故障后电网稳定运行有较大的影响,一次调频系统不投入将会造成电网失稳。故在网内一次调频性能不完善时,应适当提高直流故障时的切机量,以保证电网安全稳定运行。

3.3 天中直流孤网运行分析

考虑直流系统孤网运行时,配套火电8机运行(其中国网4台,国电2台,国投2台),直流传输功率5 000 MW。当直流配套机组跳闸后分析配套机组一次调频对直流孤网系统频率特性与孤网系统稳定性的影响,以及直流发生单极闭锁故障后分析直流孤网系统稳定性。

3.3.1 直流孤网下配套机组跳闸后稳定性分析

当配套机组发生单机跳闸(容量660 MW)时,其他配套机组一次调频在投入与否的情况下,仿真结果见图6(a),在不采取任何措施下其他配套机组母线电压变化曲线见图6(b)。图6(a)结果显示,直流配套机组单机跳闸后,直流孤网系统频率出现较大跌落。当配套有关机组参与一次调频作用后,频率最终能够维持稳定运行在49.68 Hz;但配套机组不参与一次调频时,直流系统频率继续下降,无法维持稳定运行,此时采用直流功率控制策略来保证电网稳定运行;图6(b)显示,直流孤网电压跌落有限,最低至502 kV。此时,须采取速降直流功率措施解决

配套机组跳闸故障后直流孤网频率稳定问题。

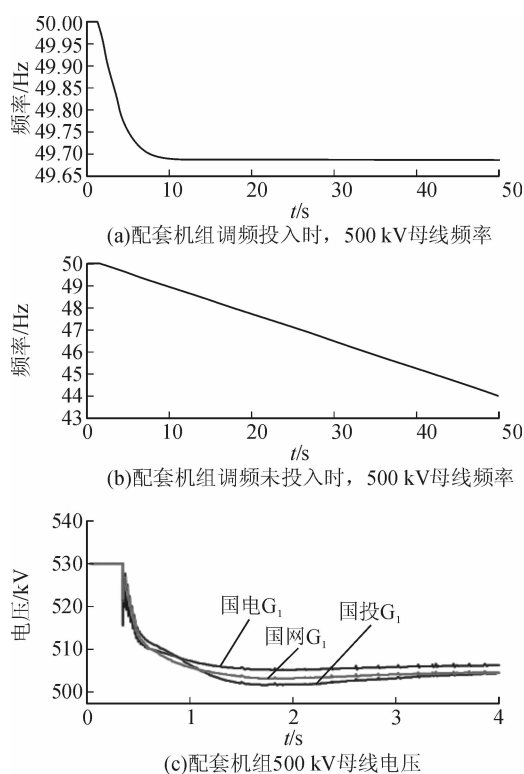


图6 直流孤网下配套机组跳闸后稳定性分析

Fig. 6 The stability of UHVDC isolated operating under power trip

3.3.2 直流孤网下单极闭锁故障后稳定性分析

当天中直流发生单极闭锁故障后,在不采取任何措施的情况下,直流孤网系统频率和电压变化见图7。

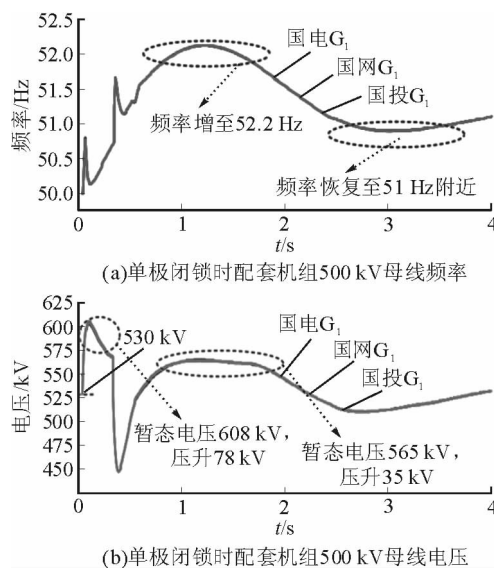


图7 直流孤网下单极闭锁故障后稳定性分析

Fig. 7 The stability of UHVDC isolated operating under DC unipolar blocking

由图7可以看出,直流单极闭锁故障后不采取

控制措施下,一是孤网频率增加速度较快,最大可增至 52.2 Hz,随后恢复至 51 Hz 附近;二是直流孤网稳态压升 35 kV,但暂态压升 78 kV,暂态过电压问题比较突出。此时,也须采取稳控切机或直流功率紧急提升等措施解决直流单极闭锁故障后直流孤网频率稳定问题。

4 结论

通过 ± 800 kV 天中特高压直流送端交直流电网的安全稳定性分析,可得出以下结论:

1)随着直流配套机组的投运 6、8 台机组运行,一是换流站 500 kV 母线短路电流超过 16.7 kA。二是投切一组滤波器换流站 500 kV 交流母线稳态电压满足波动约束条件,虽然暂态易出现过电压问题,但综合分析天中直流在配套火电 6、8 台机稳定性,此时直流可建立工况运行;

2)天中直流系统频率特性受调速系统影响较大,一是联网下疆内电网一次调频有助于直流系统频率稳定,否则频率易振荡失稳。二是孤网下直流配套机组调频作用后频率最终能够维持稳定运行,否则频率大幅跌落失稳。然而,当出现机组一次调频性能不完善时,应适当提高直流发生闭锁故障时的稳控切机量,以保证电网稳定运行;

3)天中直流系统孤网运行下,一是天中直流配套单机(容量 660 MW)故障跳闸后,天中直流孤网的频率问题须采取速降直流功率控制措施。二是天中直流单极闭锁故障后,直流孤网的频率稳定问题会导致换流站 500 kV 母线暂态过电压问题突出,须采取稳控切机或直流功率紧急提升措施。

因此,文中对提高 ± 800 kV(天中)特高压直流安全稳定运行,及特高压直流输电系统送端电网的安全稳定性具有重要的工程应用参考。

参考文献:

- [1] 刘振亚,舒印彪,张文亮,等. 直流输电系统电压等级列研究[J]. 中国电机工程学报,2008,28(10):128-135.
LIU Zhengya, SHU Yinbiao, ZHANG Wenliang, et al. Study on voltage class series for HVDC transmission system[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(1): 128-35.
- [2] 汤涌. 电力系统安全稳定综合防御体系框架[J]. 电网技术, 2012, 36(8): 1-5.
TANG Yong. Framework of comprehensive defense architecture for power system security and stability[J]. Power System Technology, 2012, 36(8): 1-5.
- [3] 张鹏望,李浩. ± 800 kV 普侨直流一起直流线路故障导致直流闭锁原因分析[J]. 高压电器, 2015, 51(4): 194-199.

- ZHANG Pengwang, LI Hao. Analysis of an HVDC transmission line fault leading to blocking converter in ± 800 kV Puer-Qiaoxiang EHV DC system[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(4): 194-199.
- [4] 叶圣永, 王云玲, 唐 权, 等. ± 1100 kV“疆电入川”特高压直流输电对四川电网安全稳定影响[J]. 电网技术, 2013, 37(10): 2726-2731.
- YE Shengyong, WANG Yunling, TANG Quan, et al. Impact of ± 1100 kV UHVDC power transmission project from Xinjiang to Sichuan on security and stability of Sichuan power grid[J]. Power System Technology, 2013, 37(10): 2726-2731.
- [5] 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 Xiaocong, SHI Zhengchai, et al. Impact of ± 800 kV Yibin-Jinhua DC bipolar block fault on Zhejiang power grid[J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering, 2014, 30(11): 47-51.
- [6] 钟 胜, 郭相国, 田 昕, 等. 哈密至郑州特高压直流对受端电网影响分析[J]. 中国电力, 2012, 45(11): 47-51.
- ZHONG Sheng, GUO Xiangguo, TIAN Xin, et al. Influences of the UHVDC project from Hami to Zhengzhou on central China power grid[J]. Electric Power, 2012, 45(11): 47-51.
- [7] 杨雄平, 罗向东, 李扬絮, 等. 南方电网直流闭锁故障时受端系统电压稳定问题分析[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(22): 40-43.
- YANG Xiongping, LUO Xiangdong, LI Yangxu, et al. Voltage stability analysis of receiving-end system in China south power grid under the DC block faults[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(22): 40-43.
- [8] 李国栋, 皮俊波, 郑 力, 等. ± 500 kV 林枫直流双极闭锁故障案例仿真分析[J]. 电网技术, 2014, 38(4): 877-881.
- LI Guodong, PI Junbo, ZHENG Li, et al. Simulation analysis on case of bipolar blocking in ± 500 kV EHVDC power transmission line from tuanlin to fengjing[J]. Power System Technology, 2014, 38(4): 877-881.
- [9] TIAN Xia, QI Xiao, LI Jun, et al. Modeling & simulating of Hami-Zhengzhou UHVDC transmission project and security & stability analysis of send-side power system[J]. Advanced Materials Research, 2015(2014): 790-796.
- [10] 郑传材, 管 霖. 云广特高压直流故障特性及其强迫停运对受端系统影响评估[J]. 电网技术, 2012, 36(1): 32-38.
- ZHENG Chuancai, GUAN Lin. Assessment on fault characteristics of Yunnan to Guangdong UHVDC transmission and the influence of forced outage on power system at receiving end[J]. Power System Technology, 2012, 36(1): 32-38.
- [11] 陈 虎, 张英敏, 贺 洋, 等. 特高压交流对四川电网多送出直流输电系统影响评估[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(7): 136-141.
- CHEN Hu, ZHANG Yingmin, HE Yang, et al. Impact assessment of UHVAC on multi-send HVDC systems of Sichuan power grid[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(7): 136-141.
- [12] 陈树勇, 逢 博, 陈得治, 等. 新疆电网多送出直流输电系统运行特性分析[J]. 中国电力, 2014, 47(4): 102-107.
- CHEN Shuyong, PANG Bo, CHEN Dezhi, et al. Analysis on operating characteristics of the multi-send HVDC system in Xinjiang power grid[J]. Electric Power, 2014, 47(4): 102-107.
- [13] 钟 显, 樊艳芳, 王一波, 等. 含高密度风电、交直流送端电网直流闭锁故障稳控方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 130-138.
- ZHONG Xian, FAN Yanfang, WANG Yibo, et al. Research of stability control strategies for high density wind power, AC-DC sending grid bipole trip[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 130-138.
- [14] 徐 政, 胡永瑞, 傅 闯. 并联型多端直流输电系统的控制策略与故障特征[J]. 高电压技术, 2013, 39(11): 2721-2729.
- XU Zheng, HU Yongrui, FU Cheng. Control strategy and fault characteristics of parallel MTDC transmission systems[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(11): 2721-2729.
- [15] 袁旭峰, 文劲宇, 程时杰. 多端直流输电系统中的直流功率调制技术[J]. 电网技术, 2007, 31(14): 57-61.
- YUAN Xufeng, WEN Jinyu, CHENG Shijie. DC power modulation in multi-terminal HVDC transmission system[J]. Power System Technology, 2007, 31(14): 57-61.
- [16] 齐以涛, 彭慧敏, 杨 莹, 等. 三华电网特高压交直流输电系统交互影响及控制策略[J]. 中国电力, 2014, 47(7): 51-56.
- QI Yitao, PENG Huimin, YANG Ying, et al. Control strategies and interactions of UHVAC and UHVDC transmission systems in north China-central China-east China power grid[J]. Electric Power, 2014, 47(7): 51-56.
- [17] 樊艳芳, 钟 显, 常喜强, 等. 频率的时空分布对低频减载的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 55-60.
- FAN Yanfang, ZHONG Xian, CHANG Xiqiang, et al. Research of the UFLS under the frequency characteristics of temporal and spatial distribution[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 55-60.
- [18] 郭小江, 马世英, 申 洪, 等. 大规模风电直流外送方案与系统稳定控制策略[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(15): 107-115.
- GUO Xiaojiang, MA Shiyong, SHEN Hong, et al. HVDC grid connection schemes and system stability control strategies for large-scale wind power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(15): 107-115. (下转第 54 页)

- SGCC, The technical specification of equipment of Sanghaimiao-Shandong ± 800 kV UHVDC project thyristor valve[S]. Beijing: SGCC, 2013: 1-60.
- [14] GB/T 20990.1—2007 高压直流输电晶闸管阀第一部分: 电气试验[S]. 2007.
- GB/T 20990.1—2007 HVDC thyristor valves Part 1: Electrical testing[S]. 2007.
- [15] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004: 340-343.
- ZHAO Wanjun. HVDC engineering[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004: 340-343.
- [16] SHI Weiping, LIU Jianguo, KAKANI N, et al. A fast hierarchical algorithm for three-dimensional capacitance extraction[J]. IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 2002, 21(3): 32-38.
- [17] IEEE Task Force 01. Voltage and current stress on HVDC valves[J]. Electra, 1989, 125(7): 56-87.
- [18] SHI Weiping, YU Fangqing. A divide-and-conquer algorithm for 3-D capacitance extraction[J]. IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 2004, 23(8): 64-68.
- [19] 崔东, 冯建强, 贾涛, 等. ± 500 kV HVDC换流阀冲击试验技术[J]. 电力设备, 2006, 7(3): 30-32.
- CUI Dong, FENG Jianqiang, JIA Tao, et al. ± 500 kV HVDC valve impact test technology[J]. Electrical Equipment, 2006, 7(3): 30-32.
- [20] 张小勇, 李博, 李侠, 等. 基于模拟负载法 ± 800 kV换流阀多重阀绝缘试验技术研究[J]. 高压电器, 2012, 48(5): 20-25.
- ZHANG Xiaoyong, LI Bo, LI Xia, et al. Study on the dielectric test techniques for MVU of ± 800 kV thyristor valves based on simulation load method[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(5): 20-25.
- 马元社(1983—), 男, 工程师, 主要从事高压直流换流阀电气设计。
- 苟锐锋(1959—), 男, 教授级高级工程师, 主要从事高压直流输电系统研究和轻型直流输电管理和研究工作。
- 刘宁(1961—), 男, 教授级高级工程师, 主要从事高压直流换流阀设计。
- 姜彦涛(1982—), 男, 工程师, 主要从事高压直流输电工程直流换流阀设计和绝缘配合研究。
- 李亮(1990—), 男, 助理工程师, 主要从事高压直流输电工程直流换流阀设计。

(上接第48页)

- [19] 李生福, 张爱玲, 李少华, 等. “风火打捆”交直流外送系统的暂态稳定控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 108-114.
- LI Shengfu, ZHANG Ailing, LI Shaohua, et al. Study on transient stability control for wind-thermal-bundled power transmitted by AC/DC system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 108-114.
- [20] 张爱玲, 李少华, 张崇见, 等. “风火打捆”孤岛特高压直流送端电压和频率控制[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(3): 29-35.
- ZHANG Ailing, LI Shaohua, ZHANG Chongjian, et al. Voltage and frequency control of wind-thermal-bundled island transmission by UHVDC system[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2015, 27(3): 29-35.
- [21] 陈树勇, 陈会元, 唐晓骏, 等. 风火打捆外送系统暂态稳定切机控制[J]. 电网技术, 2013, 37(2): 514-519.
- CHEN Shuyong, CHEN Huiyuan, TANG Xiaojun, et al. Generator tripping control to uphold transient stability of power grid outwards transmitting thermal-generated power bundled with wind power[J]. Power System Technology, 2013, 37(2): 514-519.
- 巩晓玲(1989—), 女, 硕士研究生, 研究方向为高压直流输电稳定与控制研究。
- 樊艳芳(1971—), 女, 副教授, 硕士生导师, 主要从事新能源并网技术及电力系统保护与控制研究(通信作者)。
- 钟显(1989—), 男, 硕士研究生, 研究方向为集群风电并网技术及其继电保护研究。