

特高压规划电网安全稳定研究

张晋华, 蒋卫平, 印永华, 胡 涛, 王晶芳, 陈凌芳, 李新年, 谢国平, 刘 云
(中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192)

Security and Stability Study on Planned Ultra High Voltage Power Grid

ZHANG Jin-hua, JIANG Wei-ping, YIN Yong-hua, HU Tao,
WANG Jing-fang, CHEN Ling-fang, LI Xin-nian, XIE Guo-ping, LIU Yun
(China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China)

ABSTRACT: In 2018, according to the transmission planning scheme evaluated in 2005, a large amount of hydro power in southwest China is projected to transmit to east and central China through four ± 800 kV ultra high voltage direct current (UHVDC) links and some parallel 1 000 kV ultra high voltage alternating current (UHVAC) transmission lines. In order to examine the technical feasibility of this scheme, a series of study were carried out using a hybrid real-time simulator. The network performance based on minor and severe emergencies was investigated. The interactions among ± 800 kV DC links, connected AC system and the impact of multi-infeed DC power on east-China network were analyzed. The results show that the 2018 power grid scheme is feasible from the transmission system security and stability perspective. However, some areas of the transmission system reflected lower than anticipated voltage when ± 800 kV UHVDC bipolar emergency outage occurs. It is recommended that reactive power compensation can be installed for voltage improvement. This feasibility study also revealed that when high enough over-voltage occurs at rectifier commutation bus, it may result in commutation failure at the inverters. Hence, for three of the UHVDC links mentioned in this paper (whose locations of rectifier stations are close in proximity), when bipolar emergency outage occurs at one of them, it could lead to commutation failure at other two inverters due to the over-voltage at commutation buses of the rectifiers.

KEY WORDS: ultra high voltage direct current; ultra high voltage alternating current; hybrid real-time simulation; security and stability; multi-infeed DC power system; commutation failure

摘要: 为了对 2018 水平年国家特高压规划电网的输电网络结构进行检查和考核, 该文应用数模混合式电力系统实时仿真装置, 进行多项 $N-1$ 故障和 $N-2$ 故障的实时仿真试验, 对

± 800 kV 直流系统与送受端交流系统的相互影响进行深入研究。研究结果表明, 从系统安全稳定角度出发, 该网架结构可行; ± 800 kV 直流发生双极闭锁故障时, 特高压交流通道部分母线电压偏低, 建议通过加强无功补偿装置等手段来改善故障后系统的电压水平。研究还发现, 因向家坝—南汇、溪落渡左—株洲、溪落渡右—浙西这 3 回特高压直流送端换流站距离很近, 任一直流发生双极闭锁时整流站换流母线的暂态过电压均会导致其它 2 回直流发生换相失败, 建议设立专题对此进行深入研究。

关键词: 特高压直流; 特高压交流; 数模混合实时仿真; 安全稳定; 多馈入直流系统; 换相失败

0 引言

2004 年底, 国家电网公司制定了 1 000 kV 级交流和 ± 800 kV 级直流的特高压发展战略, 以促进跨大区、跨流域水火互济, 引导煤电的合理布局与集约化发展, 实现资源在更大范围内优化配置。根据初步规划, 2018 年金沙江一期工程与锦屏电站共 25 200 MW 水电将通过 4 回特高压直流线路输送到华中与华东电网, 金沙江一期工程的溪洛渡电站、向家坝电站及位于雅砻江上的锦屏 I、II 级电站将与四川电网通过 500 kV 线路实现互联, 而四川西部水电将通过 1 000 kV 级特高压线路送往华中及华东地区, 如此, 特高压交直流间将通过 500 kV 线路形成并列运行, 这将是我国有史以来最大规模的交直流并列运行^[1-8], 如图 1 所示。

特高压电网输送容量大, 覆盖范围广, 与原有最高电压等级电网联系紧密, 另外, 华东电网存在多回直流逆变站落点密集的情况, 因此一旦出现危及系统安全稳定的事故, 其危害性更大^[8-14]。本文基于 2018 年国家特高压电网丰大方式, 对金沙江一期和雅砻江水电外送的系统安全稳定特性进行实时

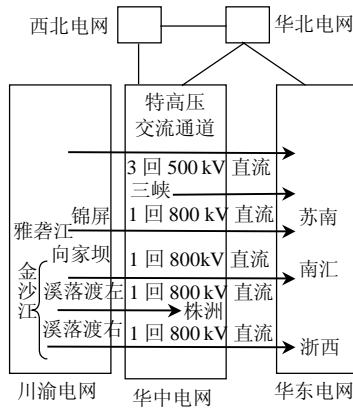


图 1 西电东送交直流并列运行示意图

Fig. 1 UHV backbone sketch in 2018 state power grid

仿真试验研究。

1 模型建立与网络等值

为掌握±800 kV级直流系统与送/受端交流系统的相互影响，本文采用数模混合仿真系统对此进行仿真研究。在仿真模型中，交流系统的线路、变压器及恒阻抗负荷等无源元件由物理模型模拟；发电机及动态负荷由数字模型模拟；所有发电机均包含调速器与励磁系统，一些发电机还包含稳定器。所有直流系统均由物理模型模拟，并连接有与实际工程相一致的控制系统。

由于混合仿真装置对仿真规模的限制，按照如下原则对规划网架进行等值简化：①保留川渝、华中和华东的 1 000 kV特高压交流线路；②保留下列 7 回双极直流系统：向家坝—南汇(±800 kV直流双极 6 300 MW)、溪洛渡左—株洲(±800 kV直流双极 6 300 MW)、溪洛渡右—浙西(±800 kV直流双极 6 300 MW)、锦屏—苏南(±800 kV直流双极 6 300 MW)、葛洲坝—南桥(±500 kV直流双极 3 000 MW)、三右—上海(±500 kV直流双极 3 000 MW)、三左—常州(±500 kV直流双极 3 000 MW)；③特高压直流送端保留一定的 500 kV交流线路及重要机组以便进行直流双极闭锁时的稳控措施研究；④华东受端直流多馈入电网保留一定规模的 500kV交流线路，便于对多馈入系统特性进行研究；⑤其余电网进行简化或消除。经检验，简化网的潮流、动态特性、短路电流等都与原网有较好的一致性^[15]。图 2 给出了溪洛渡、向家坝、锦屏送出直流输电系统方案示意图^[16]。

2 稳定性研究分析

2.1 交流系统单一故障试验

交流系统单一故障试验用来考核系统承受单

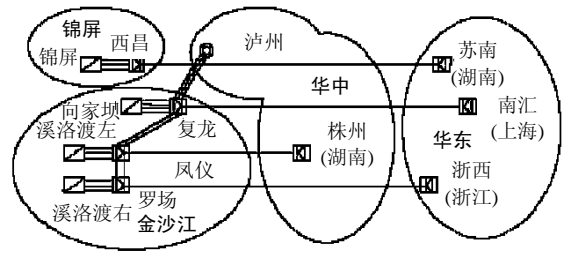


图 2 溪洛渡、向家坝、锦屏输电系统示意图

Fig. 2 Transmission system of Xiluodu, Xiangjiaba and Jinping hydropower stations

一故障的能力，检验电网结构是否满足《电力系统安全稳定导则》的要求。本次研究选取三相永久故障进行试验，故障时序为：故障后 0.09 s跳开故障侧三相开关，0.1 s跳开对侧三相开关。故障位置选取分为 4 类：①特高压直流整流站附近，主要包括复龙、凤仪、罗场等换流站附近节点间的交流线路；②送端特高压交流线路，指雅安、乐山、重庆、恩施、荆门、武汉等 1 000 kV站之间的特高压交流线路；③受端交流特高压线路，指芜湖、南京、无锡、上海北、上海西、杭北、金华等受端 1 000 kV站之间的交流线路；④直流逆变站出线交流线路，指特高压直流逆变站出线的 500 kV交流线路。

试验结果表明：

(1) 对于三相永久故障，系统均能保持稳定，不需采取安稳措施。

(2) 在受端特高压交流线路发生三相永久故障，会导致多条直流同时发生换相失败，甚至全部直流发生换相失败，在交流故障清除后直流恢复正常换相；功率恢复至故障前额定功率 90%的时间在 50~490 ms之间。

(3) 在直流逆变站出线发生三相永久故障，会导致故障点附近的 1 条直流或多条直流发生换相失败，在交流故障清除后直流恢复正常换相；功率恢复至故障前额定功率 90%的时间在 10~240 ms之间。

(4) 在特高压直流整流站附近和西电东送通道的送端和中部发生三相永久故障，故障期间直流输送功率下降，在整流站附近的故障会使直流功率降为 0，在交流故障清除后 300 ms内直流功率均能恢复至额定功率的 90%。

(5) 规划电网满足安全稳定导则对于单一故障的稳定要求。

2.2 重要同杆并架交流输电线路发生异名相故障跳双回线路试验

异名相故障跳双回线路试验属于N-2类型的故

障。根据《电力系统安全稳定导则》，对于此类故障，系统在采取相应的安全稳定措施后，应能保持稳定运行。由于在同杆并架的两回线路间发生相间故障，故障的双回线被同时切除，因此对系统的功率分布影响较大，可对结构变化的系统稳定性进行检验。

故障地点主要有特高压交流通道、送端交流出线 and 受端交流出线。故障时序为：故障后 90 ms 跳开双回线路故障侧的三相断路器，100 ms 跳开对端的三相断路器。

试验结果表明，系统在发生异名相故障跳双回线路时基本都能保持稳定，仅有送端溪落渡左—凤仪线路故障需要采取切除溪落渡左两台机、溪落渡右—罗场线路故障需要采取切除溪落渡右 3 台机的措施。逆变站在故障点附近的直流都发生了换相失败，但能恢复，没有发生直流停运的情况。

异名相故障跳双回线路虽然仅有两相故障，但由于跳开双回线路对系统结构的影响较大，使系统潮流重新分布，通常要 20~30 s 才能达到新稳态。部分送端的线路故障需要切机以保持系统稳定，符合安全稳定的要求。

2.3 重要交流输电线路发生三相永久故障单相开关拒动试验

三相永久故障单相开关拒动试验属于 N-2 类型的故障，系统在采取相应的安全稳定措施后，应能保持稳定运行。由于最终靠后备保护动作切除故障，系统承受故障时间较长，可对系统在严重故障下稳定性进行检验。

故障地点主要是特高压交流输电通道、送端交流线路和受端交流线路。故障时序为：故障后 90 和 100 ms 分别跳开故障线路故障侧的两相和对侧的三相断路器，故障侧的一相开关拒动，故障后 340 ms 由失灵保护跳开拒动相和相邻线路。

试验结果表明：

(1) 在系统受端交流线路上发生此类故障时，逆变站在故障点附近的直流都发生了换相失败，但都能恢复，没有发生直流停运的情况。系统经过 15~20 s 到达稳态。

(2) 此类故障的持续时间对系统稳定性有显著影响。如恩施—荆门线荆门侧故障如果开关动作时间从 90 ms 增至 100 ms，则需要三峡地下和荆门火电分别多切 2 台和 1 台机组才能稳定。其它线路上的故障也有类似情况。

(3) 故障后若能让直流运行在过负荷状态也可减少切机的容量。如向家坝左—复龙线电站侧故

障，故障后直流单极过负荷 10% 运行就可使向家坝左少切 1 台机。

(4) 此类故障是比较严重的故障，由于故障时间较长，不采取措施有可能使系统失稳。但在采取切机、直流闭锁、直流过负荷运行等措施的条件下，系统都能保持稳定，符合安全稳定的要求。

2.4 直流系统闭锁故障试验

在 4 回特高压直流系统的任一个单极紧急停运时，在不采取任何措施的情况下系统都能趋于稳定。在任何一个双极发生故障而紧急停运时，均需采取安全稳定措施才能保持系统稳定。文中以向家坝—南汇双极直流闭锁故障为例进行分析。

在向家坝—南汇双极直流闭锁故障发生时，直流无法送出，由于金沙江送端与四川主网通过 500 kV 线路相连，向家坝电站功率将主要流向四川主网、川渝断面、重庆主网、渝鄂断面、鄂湘断面、湖南主网及华东电网；如果不采取任何措施，将导致系统失稳。可采取的稳态措施为：直流双极闭锁后，0.2 s 联切向家坝 4 台 750 MW 机组 (3 000 MW 左右)，约 20 s 以后，系统振荡趋于平息。交流系统部分节点电压与线路功率如图 3 所示，图中 $U_1 \sim U_5$ 分别为雅安、乐山、重庆、恩施、荆门母线电压； $P_1 \sim P_5$ 及 $Q_1 \sim Q_5$ 分别为雅安—乐山、乐山—重庆、重庆—恩施、恩施—荆门、荆门—长沙的线路有功及无功功率。其中电压基准值为 1 050 kV，功率基准值为 3 000 MW。

切机后向家坝剩余电力主要转移到川渝—华中—华东的交流特高压通道，相关断面潮流增加，系统无功损耗增加导致电压降低，送受端电网电压

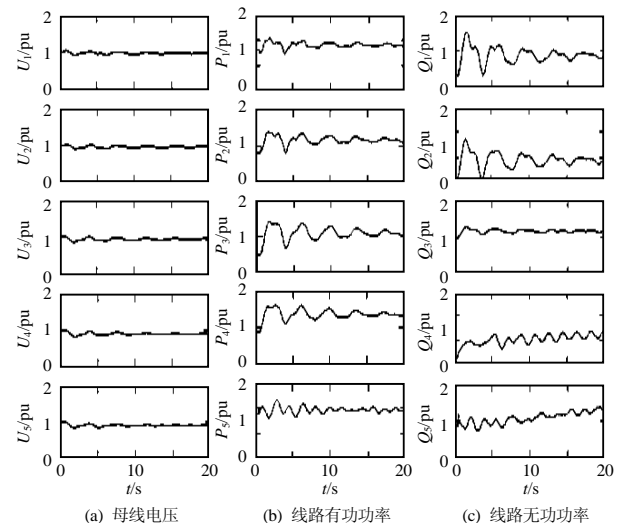


图3 向家坝直流双极闭锁时交流系统的试验波形

Fig. 3 AC curves after XJB-Nanhai bipolar emergency outage

水平均有不同程度的下降，故障后特高压通道节点电压在 0.90~0.99 之间，受端华东 500 kV 节点电压在 0.92~0.96 之间。振荡平息后其余发电机的出力基本没有变化。趋于稳态的频率变化也不明显。

向家坝—南汇双极直流闭锁故障发生后，溪落渡左换流母线电压短时间内在 1.1~0.9 之间波动，株洲换流母线在 0.95~1.05 之间波动，逆变侧发生换相失败，直流恢复至故障前功率输送水平 90% 的时间约 90 ms；溪落渡右换流母线电压短时间内在 1.08~0.9 之间波动，浙西换流母线在 0.86~0.97 之间波动，逆变侧发生换相失败，直流恢复至故障前功率输送水平 90% 的时间约 100 ms。图 4 所示为时间轴放大后的溪落渡左—株洲直流系统的波形。图中交流电压基准值为 500 kV，直流电压基准值为 800 kV，直流电流基准值为 4 kA，直流功率基准值为 6400 MW，触发角基准值为 1°。

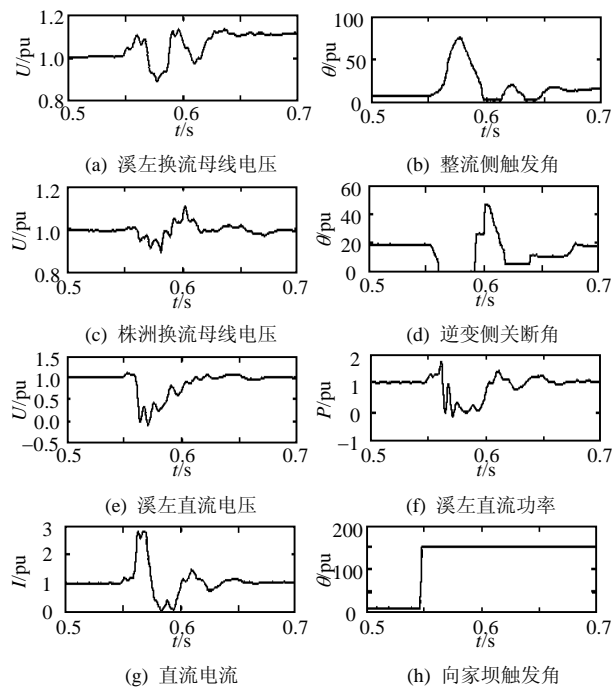


图 4 向家坝直流双极闭锁故障时溪落渡左—株洲直流系统的试验波形

Fig. 4 Curves at XLDZ-Nanhu UHVAC system after XJB-Nanhu bipolar emergency outage

向家坝直流系统双极闭锁后，向家坝换流母线电压瞬时升高，由于向家坝换流站与溪落渡左、右的两个换流站电气距离非常近，因此这两个换流母线的电压也随之升高，导致这两回直流的电流升高，进一步引起两个逆变站的关断角减小，从而导致两回直流都发生换相失败。

锦屏特高压直流及 3 回超高压直流均没有发生换相失败，扰动较小。

当任一回特高压直流系统紧急双极闭锁时其余 3 回是否发生换相失败如表 1 所示。

表 1 一回直流双极闭锁对其余直流的影响

Tab. 1 Effect of bipolar emergency outage on other UHVDC systems

故障地点	故障类型	直流是否换相失败			
		向家坝—南汇	溪左—湘中	溪右—浙西	锦屏—苏南
向家坝	双极闭锁	—	是	是	否
溪落渡左	双极闭锁	是	—	是	否
溪落渡右	双极闭锁	是	是	—	否
锦屏	双极闭锁	否	否	否	—

2.5 采用直流附加控制

本文对交直流系统故障时直流附加控制的作用做了试验研究。溪右直流双极闭锁后，需要在 0.2 s 联切溪右电站 6 台 700 MW 机组(4 200 MW 左右)才可保持系统稳定；但在联切溪右电站机组的同时，向家坝—南汇、溪左—株洲两回直流发出功率快速提升 10% 的指令，溪右电站可少切 2 台机组 (1 400 MW)，即只切 4 台机组就可保持系统稳定。

3 结论

本文在数模混合式电力系统实时仿真装置上对 2018 年特高压规划电网的安全稳定性能进行了一系列仿真试验研究，得出了如下结论：

(1) 对于三相永久故障，故障发生在受端特高压交流线路和直流逆变站出线时，会导致多条直流同时换相失败，个别故障会引起全部直流换相失败。但三永故障后发生换相失败的直流能恢复输送功率，交直流系统均能保持稳定，不需要采取安稳措施。

(2) 对于重要同杆并架交流输电线路的异名相故障，基本上在切除故障线路后系统能保持稳定，个别线路故障时在采取切机措施后可保持系统稳定。上述故障下，故障点附近的逆变站会发生换相失败，但故障清除后直流系统能很快恢复正常运行，交直流系统能保持稳定。

(3) 对于交流输电线路发生三永故障单相开断拒动，故障后均可保持系统稳定。故障发生在送端 500 kV 线路时，多数需要采取安稳措施；发生在特高压交流通道时，多数不需要采取安稳措施；发生在受端时，不需要采取安稳措施。

(4) 任一回特高压直流发生双极闭锁时，若不采取措施，都将引起系统失稳；通过联切送端发电机组的措施系统都能保持稳定。

(5) ±800 kV 直流发生双极闭锁故障时，受端电网系统部分变电站母线电压较正常水平偏低，可通过

加强和优化无功补偿装置及建立电压无功自动控制系统等手段来改善故障后系统的电压运行水平。

(6) 当一回特高压直流发生双极闭锁时, 如果其它直流采取快速功率提升措施, 可达到在送端少切机组的效果。一回特高压直流双极闭锁后, 如果能利用其他 3 回特高压直流 10% 的长期过载能力, 可减轻交流输电通道的压力, 有助于系统电压水平的提高。

(7) 该特高压规划电网在安全稳定方面是可行的。

(8) 向家坝—南汇、溪落渡左—株洲、溪落渡右—浙西这 3 回特高压直流中的任一回发生双极闭锁时, 其他两回都发生了换相失败, 建议设立专题对此现象进行深入研究, 探讨如何通过控制策略与控制参数的优化来避免这种现象的发生。

参考文献

- [1] Shu Yinbiao. Development of ultra high voltage transmission technology in China[C]. The XIVth International Symposium on High Voltage Engineering, Beijing, 2005.
- [2] 郭强, 张运洲, 吕健. 我国未来同步电网构建研究[J]. 电网技术, 2005, 29(22): 14-18, 60.
Guo Qiang, Zhang Yunzhou, Lü Jian. Study on scheme for structure and construction of synchronous power grid in China from 2010 to 2020[J]. Power System Technology, 2005, 29(22): 14-18, 60(in Chinese).
- [3] 舒印彪, 刘泽洪, 高理迎, 等. ± 800 kV 6 400 MW 特高压直流输电工程设计初探[J]. 电网技术, 2006, 30(1): 1-8.
Shu Yinbiao, Liu Zehong, Gao Liying, et al. A preliminary exploration for design of ± 800 kV UHVDC project with transmission capacity of 6 400 MW[J]. Power System Technology, 2006, 30(1): 1-8(in Chinese).
- [4] 申洪, 黄斌, 赵良. 锦屏外送特高压直流系统安全稳定性研究[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2007.
- [5] 张晋华, 余军. 直流系统运行电压与单回输送容量的确定[J]. 高电压技术, 2006, 32(9): 67-70.
Zhang Jinhua, Yu Jun. Optimization study on voltage and capacity of HVDC systems for Jinsha river[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(9): 67-70(in Chinese).
- [6] Liang X M, Liu Z H, Wang S W, et al. Planning of UHVDC transmission system in China[C]. IEEE Asia Pacific Region T&D Conference, Dalian, China, 2005.
- [7] 黄莹, 徐政, 曾德文, 等. 西电东送纯直流输电方案[J]. 电网技术, 2004, 28(19): 1-4.
Huang Ying, Xu Zheng, Zeng Dewen, et al. Study on pure DC transmission scheme for future power transmission from west China to east China[J]. Power System Technology, 2004, 28(19): 1-4(in Chinese).
- [8] TransGrid Solutions Inc. HVDC transmission at 800 kV[C]. International Workshop for 800 kV HVDC Systems, New Delhi, 2005.
- [9] Krishnappa P C S. Some considerations on proposed 800 kV HVDC system in India[C]. International Workshop for 800 kV HVDC Systems, New Delhi, 2005.
- [10] Nayak R N, Sasmal R P, Sehgal Y K, et al. AC/DC interactions in multi-infeed HVDC scheme: a case study[C]. Power India Conference, IEEE, India, 2006.
- [11] 林凌雪, 张尧, 钟庆, 等. 多馈入直流输电系统中换相失败研究综述[J]. 电网技术, 2006, 30(17): 40-46.
Lin Lingxue, Zhang Yao, Zhong Qing, et al. A survey on commutation failures in multi-infeed HVDC transmission systems[J]. Power System Technology, 2006, 30(17): 40-46(in Chinese).
- [12] 陈树勇, 李新年, 余军, 等. 基于正余弦分量检测的高压直流换相失败预防方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(14): 1-6.
Chen Shuyong, Li Xinnian, Yu Jun, et al. A method based on the sin-cos components detection mitigates commutation failure in HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(14): 1-6(in Chinese).
- [13] 徐政. 含多个直流换流站的电力系统中交直流相互作用特性综述[J]. 电网技术, 1998, 22(2): 16-19.
Xu Zheng. AC/DC and DC/DC interactions of multiple HVDC links terminating in the same AC system[J]. Power System Technology, 1998, 22(2): 16-19(in Chinese).
- [14] Kirschen D, Strbac G. Tracing active and reactive power between generators and loads using real and imaginary currents[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1999, 14(4): 1312-1319.
- [15] 张晋华, 胡涛, 王晶芳, 等. ± 800 kV 级直流系统与送受端交流系统相互影响的实时仿真试验研究[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2007.
- [16] 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 UHVDC transmission on power system stability[J]. Power System Technology, 2006, 30(2): 1-6(in Chinese).



张晋华

收稿日期: 2008-06-25.

作者简介:

张晋华(1966—), 女, 高级工程师, 研究方向为高压直流输电与电力系统仿真, zhangjh@epri.ac.cn;

蒋卫平(1953—), 男, 教授级高级工程师, 研究方向为高压直流输电与电力系统仿真;

印永华(1949—), 男, 教授级高级工程师, 研究方向为电力系统分析与规划;

胡涛(1977—), 男, 工程师, 研究方向为高压直流输电与电力系统仿真;

王晶芳(1977—), 女, 工程师, 研究方向为高压直流输电与电力系统仿真;

陈凌芳(1962—), 女, 工程师, 研究方向为高压直流输电与电力系统仿真;

李新年(1977—), 男, 工程师, 研究方向为高压直流输电与电力系统仿真;

谢国平(1977—), 男, 工程师, 研究方向为高压直流输电与电力系统仿真;

刘云(1974—), 女, 工程师, 研究方向为高压直流输电与电力系统仿真。

(编辑 谷子)