

大规模“风火打捆”直流外送系统稳定性研究

文/国网甘肃省电力公司电力科学研究院 周治伊
甘肃电力科学研究院技术中心有限公司 孙贺斌
中国石油兰州石化公司 周治宇

针对酒泉直流送端过渡期的典型方式，分析投运后送端近区的潮流分布特性和重要交直流通道输电能力，分析酒泉直流发生闭锁故障、换相失败或再起对送端系统安全稳定性的影响，提出酒泉直流送端系统应对严重故障并受多种因素约束的协调控制措施。

大规模“风火打捆”直流外送系统中风电、火电和直流之间交互影响，其安全稳定运行需要火电支撑。送端系统缺少火电装机或直流配套火电投产滞后时，短路电流电压支撑不足，交直流发生严重故障时引起风电、直流动态响应，恶化系统的安全稳定，进一步引发连锁故障。

酒湖特高压直流送端电网“强直弱交”系统安全稳定问题突出。酒泉换流站位于甘肃河西750 kV通道上，该通道承担着大规模新能源外送的任务，但直流配套常规电源尚未建成，无法及时提供足够电源支撑，该直流影响了西北与新疆联网通道的潮流分布与输电能力。同时，该工程邻近天中直流和酒泉、哈密两大风电基地，与天中直流及酒泉、哈密风电运行存在一定相关性。

本文采用仿真软件研究酒泉直流发生闭锁故障以及酒泉直流发生换相失败或再起对可能引起的安全风险；考虑与风电功率波动特性的配合，研究稳态下直流与风电功率波动相适应的协调控制方法；研究受各种条件约束的酒湖特高压直流的输电能力；分析酒泉直流发生闭锁故障、换相失败或再起对送端系统安全稳定性的影响。掌握酒湖直流发生闭锁故障、换相失败或再起对送端系统安全稳定性的影响规律，确保工程的顺利运行。

大规模“风火打捆”直流外送系统安全稳定特性

1) 潮流、短路电流分析。配套电源4机方式下，若配套电源满发4 000 MW，酒湖直流功率8 000 MW，新疆外送断面功率为3 000 MW，敦煌、桥湾风电上网分别为4 200 MW、4 000 MW，敦煌、桥湾、泉鱼和河鱼断面功率分别为7 400 MW、7 400 MW、7 500 MW和7 600 MW。配套电源4机、近区全接线及N-1检修方式，酒泉换流站短路电流均大于24 kA。酒泉换流站短路电流见表1。

表1 酒泉换流站短路电流

方式	短路电流/kA	短路容量/MV·A
全接线	27.15	37 625
桥湾-酒泉换N-1	25.74	35 663
敦煌-桥湾N-1	24.47	33 903
桥湾-酒泉N-1	25.63	35 514

2) 投切滤波器电压波动。在酒泉换流站投切一组滤波器325 Mvar（考虑两组SVC）后，酒泉换流站稳态电压变化约为3 kV，稳态电压变化率约为0.4%。其电压波动如图1所示。

3) 近区交流故障功角稳定特性。配套电源4机和0机方式，敦煌-桥湾750 kV线路发生异名相N-2故障，采取现有的切机3400 MW+切负荷900 MW的最大安控措施后，系统功角稳定，柴达木330 kV

母线电压在315 kV以上。其功角曲线如图2所示。

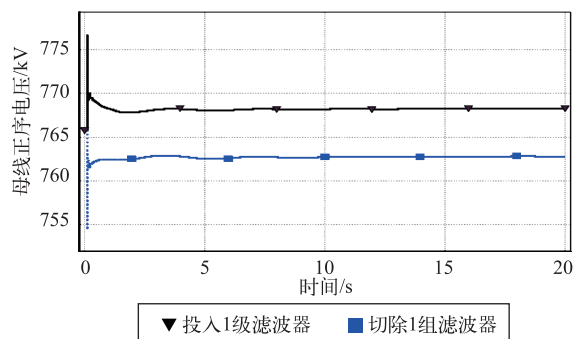


图1 酒泉换流站投切滤波器电压波动

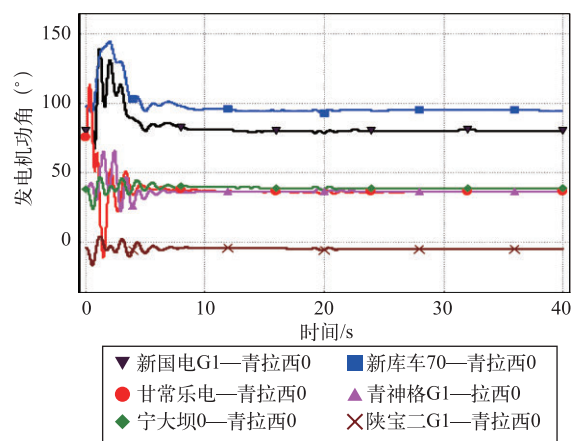


图2 敦煌-桥湾异名相N-2切机3 400 MW+切负荷900 MW西北机组功角曲线

4) 直流闭锁故障功角稳定特性。配套电源4机和0机方式，若酒湖直流8 000 MW满送，酒湖直流发生双极闭锁故障，大量盈余功率转移到新疆-西北联网通道，可能引起新疆电网与西北主网功角失稳。如图3所示，需要采取切除部分机组的安控措施。

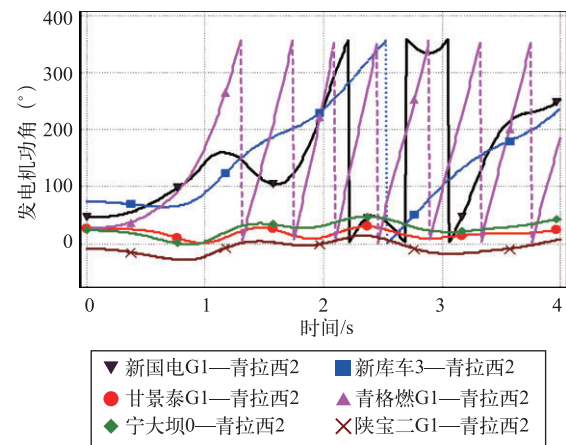


图3 酒湖直流双极闭锁，不采取措施，西北机组功角曲线

5) 直流换相失败和再起功角稳定特性。配套电源4机和0机方式，若酒湖直流8 000 MW满送，酒湖直流发生换相失败或再起，扰动期间直流功率短时中断，将对新疆—西北联网通道造成能量冲击，可能引起新疆电网与西北主网功角失稳，如图4、图5所示，需要采取闭锁直流和切机的安控措施。

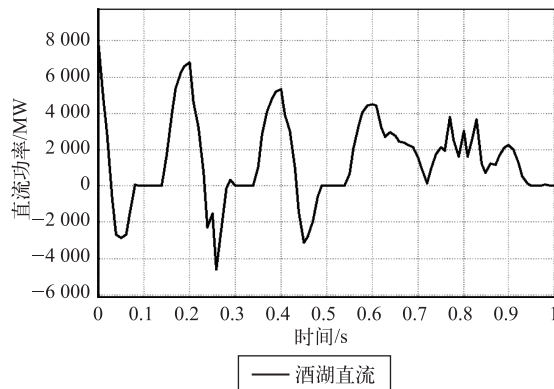


图4 酒湖直流连续换相失败，酒湖直流功率曲线

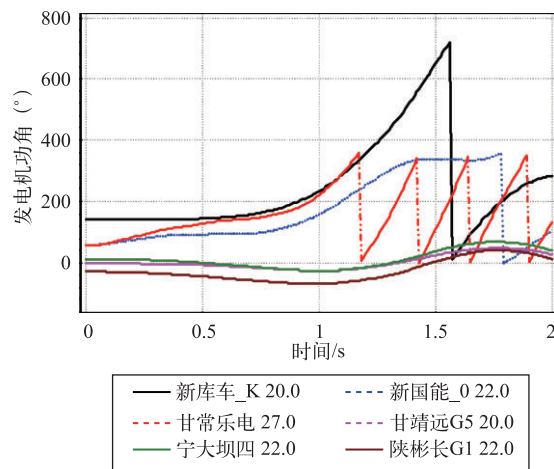


图5 酒湖直流连续换相失败，西北机组功角曲线

交流系统、直流和风电的相互影响分析

1. 直流和风电的相互制约关系

若保持风电并网容量不变，直流输送功率越大，则送端换流站投入的滤波器组数越多，直流发生闭锁故障或换相失败后的瞬时无功盈余越大，近区暂态电压升高越大，直流故障引发风机高压脱网的问题越严重。

若保持直流输送功率不变，风电并网容量越大，则各风电场投入的无功补偿越多，直流发生闭

锁故障或换相失败后，电容器助增暂态电压进一步升高的效应越明显，直流故障引发风机高压脱网的问题越严重。

因此，直流输送功率和风电并网容量存在相互制约关系，为保证直流闭锁故障或换相失败后不引发风机高压脱网，在直流大功率外送情况下需要限制风电并网容量，而在风电大容量并网情况下需要限制直流输送功率。

在酒湖直流送端算例中，酒湖直流满送功率8 000 MW，桥湾风电并网容量4 000 MW。为保证酒湖直流换相失败后桥湾风电机组端暂态电压升高不超过0.2 (pu)，若保持桥湾风电并网容量4000 MW不变，则需要限制酒湖直流输送功率不超过7 000 MW；若保持酒湖直流满送功率8 000 MW不变，则需要限制桥湾并网容量不超过3 000 MW，见表2。

表2 不同直流、风电组合情况下桥湾风电暂态压升

直流输送功率/MW	风电并网容量/MW	风电机组端暂态压升 (pu)
8 000	4 000	0.22
7 000	4 000	0.20
8 000	3 000	0.20

由此可知，受桥湾风电暂态电压升高约束的酒湖直流输送功率和桥湾风电并网容量存在相互制约的关系，需要协调控制直流输送功率和风电并网容量。若按照更严格的标准，即考虑风电机组端暂态电压升高不超过0.1 (pu)，则需进一步限制直流输送功率或风电并网容量。

2. 火电对直流和风电的支撑作用

对于“风火打捆”直流外送系统而言，直流和风电建立稳态运行工况需要系统提供一定的短路容量，同时在故障后恢复稳定运行也需要系统提供必要的电压支撑，近区火电机组可以提供系统稳定运行所需的短路容量和电压支撑。

“风火打捆”直流外送系统近区火电机组主要包括直流配套电源及部分主网机组，由于直流配套电源投产存在不确定性，在过渡期可能出现配套电源投产滞后的情况，直流外送功率部分需要依靠主网组织汇集，引起的远距离输电降低系统稳定水平。

直流闭锁故障或换相失败引发风机高压脱网本质上是一个大容量无功扰动引发的过电压问题，而火电机组在动态无功备用充裕的情况下具有较强的

动态无功调节能力，因此直流配套电源的开机台数对抑制直流故障后风电机组端暂态电压升高有重要作用。

在酒湖直流送端算例中，分别考虑直流配套电源投产2、4、6机的情况。保持桥湾风电并网容量4 000 MW不变，为保证酒湖直流换相失败后桥湾风电机组端暂态电压升高不超过0.20 (pu)，在配套电源2、4、6机情况下，需要限制酒湖直流输送功率不超过4 000、6 000和7 000 MW，见表3。

表3 不同配套电源台数情况下桥湾风电暂态压升

配套电源台数	酒湖直流功率/MW	风电机组端暂态压升 (pu)
2	4 000	0.20
4	6 000	0.20
6	7 000	0.20

由此可知，配套电源开机台数越多，火电对直流和风电的支撑作用越显著，受桥湾风电机组端暂态电压升高约束的酒湖直流输电能力越大。同样地，配套电源开机台数越多，可以接纳的桥湾风电容量也越大。

3. 对提高风电耐高压能力的需求

由上述分析可知，弱送端电网由于缺乏火电支撑，为保证直流故障后不引起风机高压脱网，只能采取限制直流输送功率或风电并网容量的措施。

目前已有的风机并网标准只要求风电机组具有1.1 (pu) 的耐受高压能力。在酒湖直流送端算例中，若将风电并网耐受高压标准提高到1.3 (pu)，则可以同时满足酒湖直流功率满送8 000 MW和桥湾风电最大并网4 000 MW（受主变压器容量约束）的需求。

故障后送端系统协调控制措施

配套电源4机风电大发方式，酒湖直流功率8 000 MW，酒湖直流发生双极闭锁故障，若考虑直流紧急控制功能，为保证系统稳定运行，可以采取提升天中、准东直流功率1 000 MW+切除配套电源3机3 000 MW+切除近区风电200 MW的安控措施，由此可见，考虑联网通道直流紧急功率提升后，可以有效减少安控切机量。

直流连续换相失败2次，配套电源4机风电大发方式下，酒湖直流功率8 000 MW，酒湖直流发生

(下转第29页)

五个地市公司完成了盘点任务。拉萨公司下发任务78条；日喀则公司下发任务9条；山南公司下发任务2条；林芝公司下发任务10条；那曲公司下发任务3条。共计102条盘点任务，涉及40 273只计量箱，计量箱资产盘点准确率为100%，高效准确地完成了智能管理便携式应用试点。应用便捷式计量资产管理将营销业务系统按照批次发起计量箱、电能表、互感器、采集终端资产盘点任务及实物资产清单，闭环移动作业终端接收任务，提高了计量资产盘点人员的工作效率和质量，降低了计量资产的盘点周期。另一方面优化了电力用户的服务体验，提高了用户的满意度并增强了用户的粘性度，提高了供电企业的营销业务水平和服务质量。计量资产便携式盘点的应用最大限度地降低了出工次数，节约了人力成本，提高了供电企业的经济效益。

结束语

随着现代技术和信息化的建设，便捷式电能计量资产盘点设备将逐渐推广应用。供电企业对电能计量资产盘点的信息化管理应用到创新改进的App，实现盘点现场数据同系统数据同步更新，保持一致性。电能计量资产是关系着发电企业、供电企业和电力用户之间信任关系的关键信息，对整个电力行业具有重要作用。电能计量资产管理决定着电网企业的信誉度和影响力。利用现代化技术将电能计量资产盘点现场的操作流程简化，保证数据的准确性，增强电能计量盘点现场数据与供电企业营销业务数据的同步共享，高度配合现代化营销建设方案，提高供电企业的运营效益，提升电力用户的满意度，进而推动电网行业的可持续发展。EA

(上接第26页)

连续2次换相失败，系统功角稳定，柴达木330 kV电压在315 kV以上，不需要采取安控措施。直流连续换相失败3次配套电源4机风电大发方式下，酒湖直流功率8 000 MW，酒湖直流发生连续3次换相失败，采取切除配套电源3机3 000 MW+切除近区风电5 000 MW的最大切机安控措施后（切机量不超过直流输送功率），系统仍然功角失稳。

结束语

本文针对酒湖特高压直流工程系统研究了大规模风电打捆直流外送系统安全稳定特性，交直流系统与风电的相互影响规律，交流、直流故障送端系统协调控制措施以及直流换流失败和再起启动影响协同控制措施，得到以下主要结论和建议：

1) 近区750 kV线路发生N-2故障，采取现有的切机切负荷安控措施后，系统可以保持稳定运行；酒湖直流发生闭锁故障，可能引起新疆电网与西北主网功角失稳、柴拉直流功率大幅波动、750 kV稳态过电压和近区风电高压脱网等问题；酒湖直流发生换相失败或再起启动，可能引起新疆电网与西北

主网功角失稳、近区风电高压脱网等问题。

2) 直流发生闭锁故障和换相失败，风机低电压穿越无功盈余、滤波器无功盈余和风电场无功补偿电压效应等因素导致了风机高压脱网；直流输送功率和风电并网容量相互制约并均依赖于配套电源支撑；酒湖直流受暂态过电压约束的输电能力与风电开机位置、风机初始电压、调相机和风机无功出力等主要因素相关。

3) 新疆-西北联网一通道750 kV线路发生N-2故障，需要采取切除新疆机组和甘青负荷的安控措施，桥湾—酒泉换750 kV线路发生N-2故障，不需要采取安控措施；酒湖直流发生闭锁故障，需要采取切除配套电源和近区风电（或新疆火电+主网火电）的安控措施。

4) 酒湖直流发生连续换相失败，需要采取闭锁直流并切除配套电源和近区风电的安控措施；酒湖、天中直流同时发生相继换相失败，需要采取闭锁两回直流并切除配套电源和近区风电的安控措施；酒湖直流发生再起启动故障，需要采取切除配套电源和近区风电的安控措施。EA