

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181316

## 多直流馈入的特高压环网安全稳定控制措施研究

张正卫<sup>1,2</sup>, 陈得治<sup>2</sup>, 卜广全<sup>2</sup>, 郭京谊<sup>3</sup>, 许占科<sup>1,2</sup>, 宋云亭<sup>2</sup>, 吉平<sup>2</sup>, 李立新<sup>2</sup>, 王青<sup>2</sup>

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206; 2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192;  
3. 东北电力设计院有限公司, 吉林 长春 130021)

**摘要:** 山东—河北特高压环网建成导致华北电网网架结构变化较大, 运行风险突出, 亟需对系统安全稳定控制措施进行研究。基于网架结构特点提出了交直流系统安控分析流程。重点研究了特高压交流系统三永  $N-2$  故障下的两类主要电网稳定问题及相应控制措施, 包括特高压交直流系统广域耦合问题和多馈入直流与受端电网耦合的电压崩溃问题。在此基础上提出了减小切负荷量的优化措施。结果表明所提安控措施可有效支撑特高压环网工程建设后电网稳定运行。

**关键词:** 特高压环网; 多馈入直流; 安控措施; 功角失稳; 电压崩溃

### Research on safety and stability control measures of UHV loop network with multiple DC feeding

ZHANG Zhengwei<sup>1,2</sup>, CHEN Dezhi<sup>2</sup>, BU Guangquan<sup>2</sup>, GUO Jingyi<sup>3</sup>, XU Zhanke<sup>1,2</sup>,  
SONG Yunting<sup>2</sup>, JI Ping<sup>2</sup>, LI Lixin<sup>2</sup>, WANG Qing<sup>2</sup>

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 3. Northeast Electric Power Design Institute Co., Ltd., Changchun 130021, China)

**Abstract:** The construction of Shandong — Hebei UHV loop network will lead to great changes in the grid structure of North China Power Grid and the operation risk is outstanding, it is urgent to study the system safety and stability control measures. The safety and stability control analysis process of UHV AC/DC system is proposed based on the characteristics of grid structure. Two types of major power grid stability problems and corresponding control measures under  $N-2$  faults of UHV AC system are mainly studied, including the wide-area coupling problem of UHV AC-DC system and the voltage collapse problem of multi-infeed DC coupled with receiving power grid. On this basis, the optimization measures to reduce load shedding are put forward. The results show that the proposed safety control measures can effectively support the stable operation of the power grid after the construction of the UHV loop network.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51777196) and Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. XT-71-18-036).

**Key words:** UHV loop network; multi-infeed HVDC; safety control measures; power angle instability; voltage collapse

## 0 引言

随着锡盟—济南、蒙西—天津南、榆横—潍坊等特高压交流输电工程的建成投运, 华北电网形成“两横一纵”的特高压网架<sup>[1]</sup>。上海庙—临沂、扎鲁特—青州等特高压直流工程投入运行后, 山东电网将凸显“强直弱交”网架结构特征, 动态无功支撑能力不足, 特高压线路故障后交直流系统间相互

影响, 系统安全稳定运行存在较大风险。

为了保障多馈入大容量直流安全稳定运行, 需加强山东电网网架结构, 通过建设山东—河北环网特高压交流工程, 将形成石家庄—泉城—潍坊—临沂—枣庄—菏泽—石家庄双回 1 000 kV 特高压交流大环网, 可提高山东电网抵御严重事故的能力, 有利于华北电网负荷中心构建坚强电力交换平台, 提高华北电网运行灵活性、可靠性。

目前, 交直流互联系统安全性研究主要集中在直流换相失败、闭锁引发大规模潮流转移冲击弱交流断面, 导致系统解列、电压失稳<sup>[2-11]</sup>。文献[2]

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(51777196); 国家电网公司科技项目资助(XT-71-18-036)

基于联络线功率波动理论研究并量化相关因素对华北—华中特高压交流通道潮流转移特性的影响, 提出一种交直流协调控制策略, 能有效减少切负荷量; 文献[3]基于三区域交直流互联系统进行大规模交直流互联系统受端故障引发送端稳定破坏的机理分析; 已有文献对山东—河北交流受电断面输电能力进行了前期研究<sup>[12]</sup>, 文献[13]详细研究了山东—河北交流断面演化发展的各阶段输电能力并提出提高充电能力的措施。

本文基于 PSD-BPA 软件对 2019 年华北电网丰大典型方式开展主要计算, 研究山东交流受电断面输电极限方式下特高压线路  $N-2$  问题及安控措施。针对特高压交直流广域耦合引起的长南线解列及送端机组暂态功角失稳问题, 提出长南线功率预控及切除送端失稳机组措施; 针对海河—泉城特高压线路  $N-2$  故障导致山东电网电压崩溃问题, 提出交直流功率预控和切机切负荷紧急控制措施, 对于切机切负荷量过大问题, 从引发电压失稳本质出发, 主要从山东电网优化开机、直流换流站加装调相机两方面分析减少切负荷量方法, 优化安控手段, 提升环网工程投运后交直流系统安全稳定性。

## 1 网架格局及典型潮流分布

### 1) 网架格局

近年来随着清洁能源发展、大气污染防治计划推进, 华北电网已建和将要建成多个特高压交直流工程<sup>[14-16]</sup>, 网架结构如图 1 所示。2019 年末, 馈入山东三条直流, 分别是鲁固、昭沂特高压分层直流以及银东超高压直流, 输送功率合计 24 000 MW, 特高压环网的建设增强了山东受端电网的强度, 可支撑昭沂、鲁固特高压直流高、低端分层馈入 1 000 kV、500 kV 交流电网, 有利于潮流疏散及直流稳定运行。为满足华北京津冀鲁地区负荷发展及蒙西、锡盟、榆横等地能源外送的需求, 建成“两横一纵”特高压网架, 其中两横分别为: 蒙西—晋北—保定—海河和榆横—晋中—石家庄—泉城, 一纵为: 锡盟—廊坊—海河—泉城; “保定—海河—泉城—石家庄”特高压小环网可加强两横线路之间的联络; 华北—华中两区域间通过单回特高压长南线实现同步联网, 长南线静稳极限较低, 故障时容易受扰解列, 为区域间弱联络线。

“两横”特高压电源基地配套电源规划详情如表 1 所示, 其送出电力按照点对网通道约束的单永故障以及近区的三永  $N-1$  故障约束来安排较大功率外送, 为山东、京津冀等负荷中心提供电力。

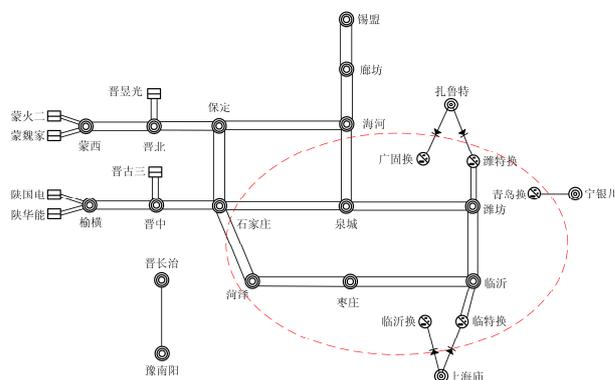


图 1 华北电网特高压网架结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of North China UHV Power Grid

表 1 “两横”特高压电源基地配套电源规划情况  
Table 1 Planning of supporting power plants for “two horizontal” ultra high voltage power supply base

特高压站	电厂名称	2018 年前已有/ MW	2019 年新增/ MW	共计/ MW
蒙西	蒙火二	—	3×1 000	4 320
	蒙魏家	2×660	—	
晋北	晋显光	2×350+2×320	—	1 340
榆横	陕国电	2×1 000	1×1 000	5 000
	陕华能	2×1 000	—	
晋中	晋古三	2×660	—	1 320

山东对外联络断面由三回直流和六回特高压交流组成, 三回直流分别为昭沂、鲁固、银东特高压/超高压直流, 输送功率总和达 24 000 MW, 1 000 kV/500 kV 电磁环网解环后山东交流受电断面由海河—泉城、石家庄—泉城和石家庄—菏泽共六回特高压线路组成。随着交直流输送功率的增加, 山东电网安全稳定运行风险加大。

### 2) 典型潮流分布

计算基于 2019 年丰大典型方式开展, 山东电网负荷大小约 56 000 MW, 典型方式的电力组织、方式安排特点总结如下。

(1) 山西 500 kV 通道外送华北主网约 12 500 MW, 内蒙 500 kV 通道外送华北主网约 4 400 MW。

(2) 锡盟基地外送华北主网约 6 400 MW, “蒙西—晋北—保定”、“榆横—晋中—石家庄”两横特高压通道送出电力, 受点对网通道单永故障以及近区的三永  $N-1$  故障约束, 分别为 3 900 和 4 300 MW。

(3) 华北—华中区域间通过单回特高压长南线实现同步联网, 丰水期采用华中水电北送华北方式, 长南线北送 5 500 MW。

(4) 按照上述通道的功率安排, 如仍存在电力不平衡, 可通过河北南网或京津唐来组织调整电力。

典型方式下三大直流满功率运行, 山东对外交流断面 1 000 kV/500 kV 电磁环网解环, 受泉城一台主变三永  $N-1$  后, 另外一台主变达到热稳限值 3 500 MW 的约束, 山东交流受电断面输电极限为 9 523 MW, 其中海河—泉城为 4 180 MW, 石家庄—泉城为 3 123 MW, 石家庄—菏泽为 2 220 MW, 输电极限方式下潮流分布如图 2 所示。

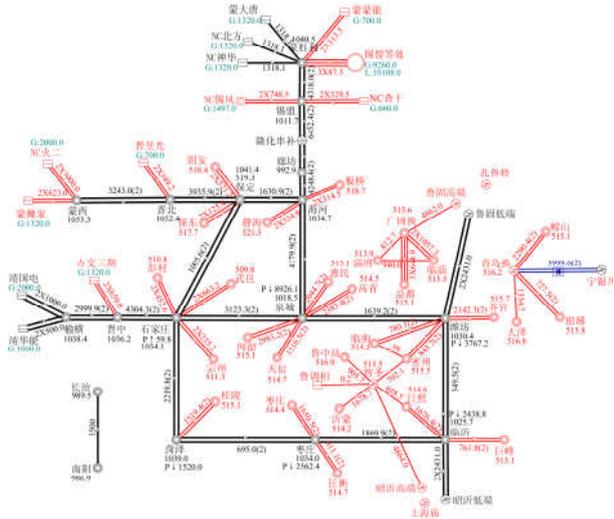


图 2 山东交流断面输电极限方式下潮流分布图

Fig. 2 Power flow distribution diagram under limit of Shandong AC transmission section

## 2 特高压交直流系统安控分析流程

针对多直流集中馈入受端系统, 为了保证系统安全稳定运行, 提出特高压交直流系统安控分析流程如下:

- 1) 在目标水平年电网数据基础上, 计算关键断面输电极限;
- 2) 在上述极限方式下对输电线路进行  $N-2$  故障扫描, 分析故障后系统安全稳定情况;
- 3) 对于系统失稳情况, 根据失稳类型研究并采取相应安全稳定控制措施;
- 4) 判断常规切机切负荷措施是否过大, 若不是则转步骤 6), 否则转步骤 5);
- 5) 根据系统失稳机理研究减小切机切负荷量的优化措施;
- 6) 判断是否扫描完所有故障, 若不是则转步骤 2)扫描下一个故障, 否则结束。

特高压交直流系统安控分析流程如图 3 所示。

## 3 多直流馈入的特高压环网安控措施

典型方式下落点山东电网的三大直流满功率运行, 山东交流受电断面输电极限为 9 523 MW,

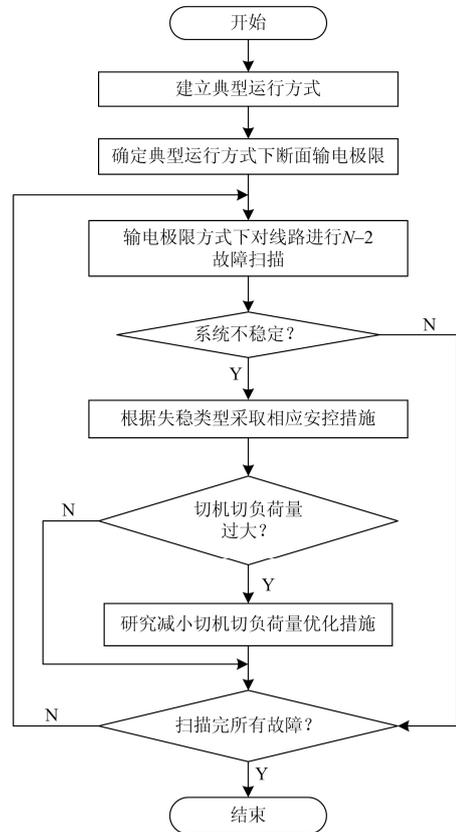


图 3 特高压交直流系统安控分析流程

Fig. 3 Safety control analysis process of UHV AC/DC system

在该极限方式下通过  $N-2$  故障扫描对系统进行安全稳定分析, 主要存在如下两类问题。

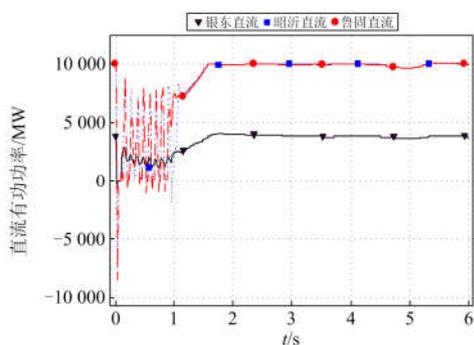
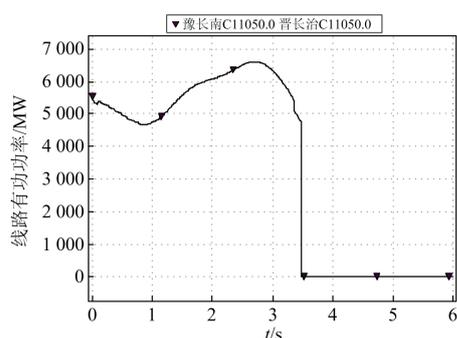
### 3.1 特高压交直流系统广域耦合问题及安控措施

#### 1) 区域间弱联络线与多馈入直流耦合

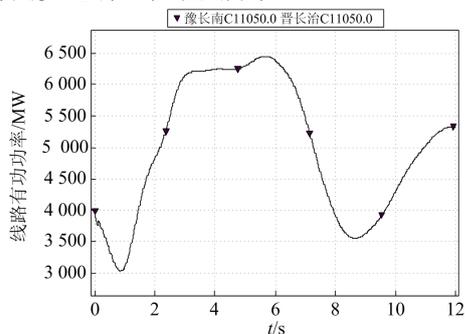
泉城—潍坊特高压线路首端 $N-2$ 后, 特高压环网解环, 山东电网对特高压直流运行支撑作用减小, 三大直流相继或同时发生多次换相失败, 如图4所示。换相失败累积的暂态不平衡能量冲击弱交流断面, 导致长南线功率大幅振荡, 母线电压下降, 当电压低于0.64 p.u.时低压解列装置动作断开长南线, 引发华北—华中系统解列, 功角失步, 如图5所示。

多直流换相失败导致长南线解列与两个因素密切相关: 一是换相失败累积的暂态不平衡能量的冲击强度; 二是长南线的承载能力。

对于第一个因素, 为了降低冲击强度, 最直接的方式是降低换相失败的直流功率, 从而减小多回直流换相失败累积的不平衡能量, 但无法发挥特高压直流大功率输电优势, 降低系统运行经济性。此外, 可以通过增强交流电网, 逆变站安装动态无功补偿装置等方式增强电压支撑能力, 减小故障后直流换相失败次数, 从而降低冲击强度。

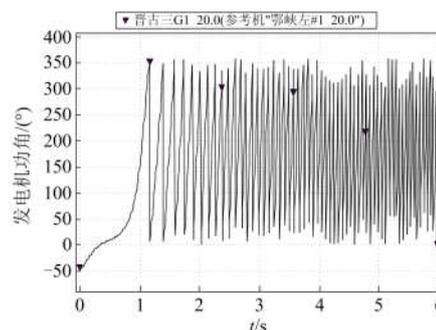
图4 泉城—潍坊线路  $N-2$  后三大直流功率曲线Fig. 4 Three DC power curve after  $N-2$  of Quancheng — Weifang line图5 泉城—潍坊线路  $N-2$  后长南线低压解列Fig. 5 Under voltage separation of Changnan line after  $N-2$  of Quancheng — Weifang line

对于第二个因素, 华北—华中区域间单回特高压联络线为弱交流断面, 需加强该薄弱点承载能力, 如降低长南线初始功率或增强长南线强度。当降低长南线北送功率至4 000 MW以下时, 泉城—潍坊特高压线路 $N-2$ 后, 长南线能够承受山东电网多回直流换相失败带来的不平衡功率冲击, 华北—华中电网保持同步运行, 如图6所示。

图6 泉城—潍坊线路  $N-2$  后长南线功率曲线Fig. 6 Power curve of Changnan line after  $N-2$  of Quancheng — Weifang line

2) 点对网外送系统与多馈入直流耦合  
“蒙西—晋北—保定”及“榆横—晋中—石家

庄”均为点对网外送系统, 保定—石家庄特高压线路石家庄侧发生三永 $N-2$ 故障时, “榆横—晋中—石家庄”点对网外送通道母线电压降低, 由于特高压电气距离较近, 电压降低可传导到山东特高压交流环网, 从而增大两条分层接入的昭沂、鲁固特高压直流换相失败的风险, 同时与山东500 kV交流电网耦合, 进一步引发受端集中馈入的三条特/超高压直流(计及银东直流)多次换相失败, 山东受端电网母线电压降低幅度进一步增大, 又反作用于“榆横—晋中—石家庄”点对网外送通道, 使其电压降低幅度也进一步增大, 点对网长距离外送系统网架结构弱, 故障期间的连锁反应大幅降低了通道的电压, 送端电源基地积聚了大量加速能量, 故障切除后的减速能量无法平衡掉加速能量, 导致送端发电机组功角失稳, 如图7所示。

图7 保定—石家庄线路  $N-2$  后送端机组功角振荡Fig. 7 Power angle oscillation of sending end unit after  $N-2$  of Baoding — Shijiazhuang line

采取0.3 s切除失稳机组措施后, 送端两横电源基地剩余机组能够平稳运行, 系统母线电压和功率能恢复到稳定运行状态。

### 3.2 多馈入直流与受端环网耦合的电压崩溃问题及安控措施

正常情况下, 山东交流受电断面的海河—泉城双回线路潮流偏重, 海河—泉城线路泉城侧三永 $N-2$ 故障后, 大量过剩功率通过断面剩余特高压线路转移, 由于山东电网动态无功电压支撑能力较弱, 大容量功率转移将会引发山东电网电压暂降, 从而导致多回直流同时换相失败, 并且换相失败期间, 直流控制系统为了尽快恢复正常运行, 大幅增加从交流系统中吸收的无功功率, 进一步加剧电压降落, 多馈入直流与受端环网间耦合作用, 最终导致电压崩溃, 直流闭锁无法运行, 如图8、图9所示。

为了避免山东电网电压崩溃严重工况发生, 考虑采取交直流功率预控及主动切机切负荷紧急控制措施。

#### 1) 交流断面功率预控

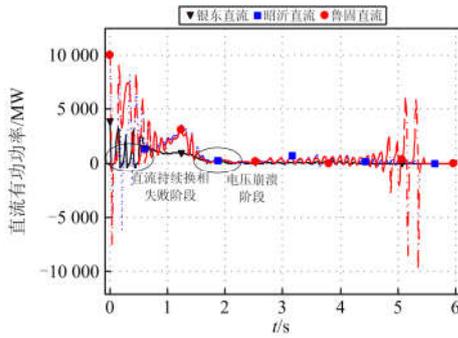


图 8 海河—泉城线路 N-2 后三大直流功率曲线  
Fig. 8 Three DC power curve after N-2 of Haihe — Quancheng line

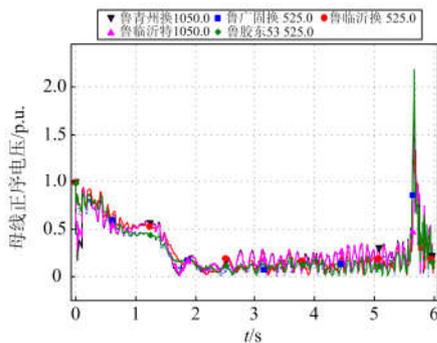


图 9 海河—泉城线路 N-2 后山东电网电压崩溃  
Fig. 9 Voltage collapse of Shandong Power Grid after N-2 of Haihe — Quancheng line

采取降低山东对外交流断面功率的预控措施，故障时能减小功率转移量，且山东电网增加开机，其无功电压支撑能力增强，故障时可有效防止电压失稳。当降低交流断面功率至8 300 MW以下时，海河—泉城特高压线路N-2后山东电网电压恢复稳定，如图10所示。

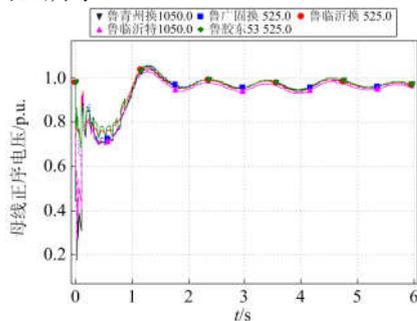


图 10 海河—泉城线路 N-2 后山东电网电压恢复稳定  
Fig. 10 Voltage recovery stability of Shandong Power Grid after N-2 of Haihe — Quancheng line

### 2) 直流功率预控

特高压环网运行特性与馈入山东的三大直流耦合紧密，多馈入直流有效短路比(MESCR)是定性衡

量受端电网支撑多馈入直流运行强度的指标，考虑并联无功补偿影响，多馈入直流有效短路比定义为<sup>[17-18]</sup>

$$MESCR_i = \frac{S_{aci} - Q_{ci}}{P_{deqi}} = \frac{1/|Z_{eqii}| - 1/|Z_{ci}|}{P_{di} + \sum_{j=1, j \neq i}^n \left| \frac{Z_{eqij}}{Z_{eqii}} \right| P_{dj}} \quad (1)$$

式中： $i$ 为直流回路编号； $S_{ac}$ 为直流馈入换流母线短路容量； $P_{deq}$ 为考虑其他直流影响后的等值直流功率； $P_d$ 为额定直流功率； $Z_{eqij}$ 为从各直流换流母线看进去的等值节点阻抗矩阵 $Z_{eq}$ 的第*i*行、*j*列元素； $Z_c$ 为直流并联无功补偿的等值阻抗。

当三大直流满功率运行(昭沂、鲁固各10 000 MW、银东4 000 MW)时，多馈入直流有效短路比都小于3，为弱交流系统。优先降低有效短路比较小的直流功率，当昭沂、鲁固直流功率同时降至7 000 MW时，三大直流多馈入有效短路比都大于3，为强交流系统，结果如表2所示。

表 2 三大直流不同功率下多馈入有效短路比  
Table 2 Multi-infeed effective short-circuit ratio of three DC under different power levels

直流	直流满功率/MW	有效短路比	直流降功率/MW	有效短路比	
昭沂直流	高端	5 000	2.03	3 500	3.01
	低端	5 000	2.19	3 500	3.25
鲁固直流	高端	5 000	2.06	3 500	3.06
	低端	5 000	2.32	3 500	3.48
银东直流	—	4 000	2.58	4 000	3.35

多馈入有效短路比都大于3时，交流电网对直流稳定运行具有更强的支撑能力，当海河—泉城特高压线路N-2故障后，山东电网电压能较快恢复稳定，直流系统保持平稳运行。

### 3) 切机切负荷紧急控制措施

切机、切负荷为第二道安控防线，海河—泉城特高压线路N-2故障后，0.3 s启动切除输送给山东电力的两横电源基地机组及山东电网负荷的安控措施，结果如表3所示。

表 3 切机切负荷紧急控制措施列表  
Table 3 List of emergency control measures for cutting machine and load shedding

紧急控制措施	切负荷量/MW	切机量/MW	效果
切负荷	2 800	—	电压稳定
切机	—	7 600	电压稳定，长南线解列
切机+切负荷	1 120	3 010	解列

由表3可知, 切负荷为防止电压失稳最直接有效的手段, 但需要切除山东全网5%共计2 800 MW 负荷, 电压才能够恢复稳定, 切负荷量较大。对于切机以及切机切负荷组合措施, 虽然可以减少切负荷量, 但需要切除送端两横电源基地全部或部分机组, 切机量过大, 效果不好, 且机组切除后会带来因功率缺额而导致的长南线解列及低频问题。

#### 4 减小切负荷量优化措施

针对海河-泉城特高压线路泉城侧三永  $N-2$  山东电网电压失稳, 直流无法运行的严重工况, 需要切除 2 800 MW 负荷, 切负荷量过大, 影响严重。考虑采取山东电网优化开机或加装调相机增强直流近区无功电压支撑能力, 减轻交直流间相互作用, 减少换相失败次数, 从而达到减小切负荷量目的。

##### 4.1 山东电网优化开机

通过增加直流近区开机, 可增强交流系统对直流稳定运行的电压支撑能力, 降低故障期间交流电压跌落幅值及恢复时间, 从而减少多回直流换相失败次数。考虑采取山东电网优化开机方案如下: 关停距离直流受端换流站较远机组, 相应开启直流近区相同容量机组, 且优先开启接入500 kV电压等级的机组。

考虑到山东电网整体电压稳定性, 可关机总量有限, 可按照总计多开3 000 MW容量的机组, 相应关停距离直流较远的相同容量机组, 保持山东电网开机总量不变。结果表明在三大直流附近同时增加开机情况下, 直流附近电压支撑能力显著增强, 海河-泉城线路 $N-2$ 故障后只需要切除山东全网1%共计500 MW负荷, 就能保证电压不失稳, 可有效减小切负荷量。

##### 4.2 直流换流站加装调相机

调相机在系统电压较大幅度降低时, 能够利用短时强励能力(强励电压为 2 倍额定励磁电压, 强励允许时间为 10 s)提供动态无功支撑, 有助于系统电压恢复, 提高系统电压稳定性<sup>[19-20]</sup>。可在三回直流 500 kV 受端换流站临沂换、广固换及青岛换分别或同时安装调相机, 如图 11 所示。

实际系统中昭沂直流 500 kV 临沂换流站已配置 3 台 300 Mvar 调相机, 因此通过在广固换和青岛换两个 500 kV 换流站分别或同时安装调相机进行仿真实验, 计算结果如表 4 所示。结果表明广固换和青岛换分别安装 900 Mvar 和 600 Mvar 容量调相机为防止电压失稳的最小容量配置方案。当海河-泉城线路泉城侧  $N-2$  故障后, 调相机可在换流母线电压降低时通过短时增发大量无功功率维持交流电压稳定, 如图 12 所示, 从而减少直流换相失败次数,

银东直流、昭沂直流、鲁固直流分别换相失败 1 次、2 次和 1 次, 无需切负荷措施, 山东电网能够保持稳定运行, 如图 13 所示。

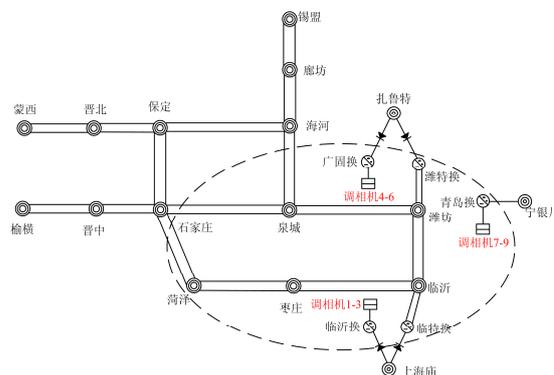


图 11 山东电网加装调相机后网架示意图

Fig. 11 Shandong Power Grid diagram after adding phase modifier

表 4 直流换流站安装调相机计算结果

Table 4 Calculation results after adding phase modifiers in DC converter stations

方案	调相机安装换流站	安装容量/Mvar	结果
1	广固换	900	电压失稳
2	青岛换	900	电压失稳
3	广固换和青岛换	900+600	电压稳定

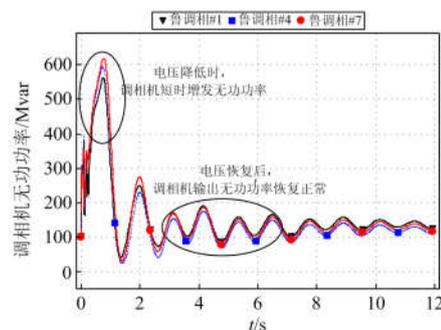


图 12 故障期间调相机无功功率曲线

Fig. 12 Reactive power of phase modifier during the failure period

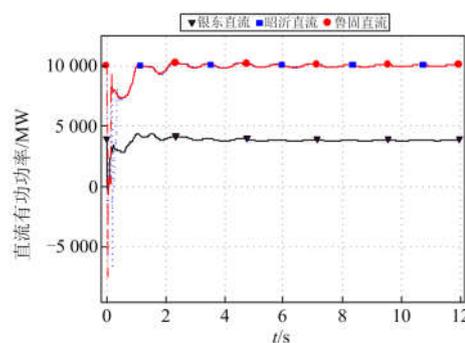


图 13 加装调相机后直流功率曲线

Fig. 13 DC power curve after adding phase modifiers

## 5 结语

本文对山东交流受电断面输电极限方式下特高压线路  $N-2$  问题进行了研究, 主要存在两大类问题: 一类是交直流广域耦合的华北—华中系统解列及送端机组功角暂态失稳问题; 另一类是多馈入直流与受端电网耦合的电压崩溃问题。

针对交直流广域耦合问题, 采取长南线功率预控或切除送端失稳机组安控措施; 针对山东电网电压失稳问题, 采取交直流功率预控或切机切负荷紧急控制措施; 针对切机切负荷量过大问题, 根据失稳机理考虑采取调整山东电网开机和直流换流站加装调相机优化措施, 能减小甚至避免切负荷, 可显著提高受端电网抵御严重故障的能力。

为了保证特高压交直流混联背景下电网安全稳定运行, 提出如下几点建议:

1) 长南线北送功率及“两横”电源基地送出电力按照  $N-2$  故障约束安排, 以防止严重故障下长南线解列或送端机组功角失稳;

2) 山东交流受电断面输送功率按照特高压线路  $N-2$  故障电网维持稳定的约束来安排, 可降低交直流耦合运行风险;

3) 三大直流功率按照多馈入有效短路比大于 3 来安排, 且优先降低短路比较低的直流功率, 可防止严重故障下山东电网电压失稳;

4) 如三大直流满功率运行, 且山东交流断面输送功率大于  $N-2$  约束的输电极限, 则当发生  $N-2$  故障时可采取切机、切负荷措施, 为了防止切负荷量过大, 可采取山东电网优化开机及进一步在直流换流站加装调相机措施。

## 参考文献

- [1] 刘振亚, 张启平. 国家电网发展模式研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(7): 1-10.  
LIU Zhenya, ZHANG Qiping. Study on the development mode of National Power Grid of China[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(7): 1-10.
- [2] 李晶, 李晓珺, 唐晓骏, 等. 基于联络线功率波动理论的华北—华中特高压交直流联网系统安全稳定控制策略[J]. 电网技术, 2015, 39(12): 3327-3332.  
LI Jing, LI Xiaojun, TANG Xiaojun, et al. Security and stability control strategy of North China-Central China UHV AC/DC power grid based on tie-line power oscillation theory[J]. Power System Technology, 2015, 39(12): 3327-3332.
- [3] 胡晓飞, 陈得治, 张垠, 等. 多直流换相失败对弱交流断面的冲击特性及应对措施[J]. 中国电力, 2017, 50(5): 26-32, 51.  
HU Xiaofei, CHEN Dezhi, ZHANG Yin, et al. Impact of multi-HVDC commutation failure on weak AC section and its countermeasures[J]. Electric Power, 2017, 50(5): 26-32, 51.
- [4] 李晓珺, 周剑, 唐晓骏, 等. 南方电网多通道受电断面失步振荡及解列措施[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(20): 163-167.  
LI Xiaojun, ZHOU Jian, TANG Xiaojun, et al. Out-of-step oscillation and splitting measures of multi-channel receiving section in Southern Power Grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(20): 163-167.
- [5] 凌卫家, 孙维真, 叶琳, 等. 浙江交直流混联受端电网静态稳定分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(15): 164-170.  
LING Weijia, SUN Weizhen, YE Lin, et al. Static stability analysis of Zhejiang hybrid ultra-high voltage AC/DC receiving power grid[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(15): 164-170.
- [6] 屠克哲, 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.
- [7] 苏寅生, 陈董秀, 鲍颜红, 等. 应对直流连续换相失败的紧急控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(4): 126-131.  
SU Yinsheng, CHEN Dongxiu, BAO Yanhong, et al. An emergency control strategy coping with continuous commutation failure in DC system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(4): 126-131.
- [8] 陈晖, 朱政光. 基于静态安全域的交直流协调安全控制[J]. 广东电力, 2017, 30(10): 63-69.  
CHEN Hui, ZHU Zhengguang. AC/DC coordinated security control based on static security region[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(10): 63-69.
- [9] REN Chao, XU Yan, ZHANG Yuchen. Post-disturbance transient stability assessment of power systems towards optimal accuracy-speed tradeoff[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 194-203. DOI: 10.1186/s41601-018-0091-3.
- [10] 袁森, 陈得治, 罗亚洲, 等. 直流闭锁冲击弱交流通道的稳定特性及多资源协调控制措施[J]. 电力自动化设

- 备, 2018, 38(8): 203-210.
- YUAN Sen, CHEN Dezhi, LUO Yazhou, et al. Stability characteristics and coordinated control measures of multi-resource for DC blocking fault impacting weak AC channel[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(8): 203-210.
- [11] 于强, 孙华东, 仲悟之, 等. 扎鲁特—青州特高压直流输电工程投运后东北电网的稳定特性及控制措施研究[J]. 电网技术, 2018, 42(7): 2023-2029.
- YU Qiang, SUN Huadong, ZHONG Wuzhi, et al. Stability characteristics and control measures of Northeast Power Grid integrated with Zhalute-Qingzhou UHVDC Transmission Project[J]. Power System Technology, 2018, 42(7): 2023-2029.
- [12] 贺庆, 张宝家, 易俊, 等. 蒙西—天津南特高压交流输电工程系统调试中电网稳定特性与运行方式[J]. 电网技术, 2017, 41(9): 2749-2754.
- HE Qing, ZHANG Baojia, YI Jun, et al. Power grid stability and operation modes in commissioning tests of Mengxi-Tianjinnan UHV AC Transmission System[J]. Power System Technology, 2017, 41(9): 2749-2754.
- [13] 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.
- [14] 刘光晔, 杨以涵. 电力系统电压稳定与功角稳定的统一分析原理[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(13): 135-149.
- LIU Guangye, YANG Yihan. Theoretical foundation of power system voltage and angle stability unified analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(13): 135-149.
- [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] 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] 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.
- [18] 刘青, 廖诗武, 姚伟, 等. 计及并联电容器补偿的多馈入交直流系统改进有效短路比指标[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(8): 7-15.
- LIU Qing, LIAO Shiwu, YAO Wei, et al. An improved effective short circuit ratio of multi-infeed AC/DC power system considering shunt capacitors[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(8): 7-15.
- [19] 王雅婷, 张一弛, 周勤勇, 等. 新一代大容量调相机在电网中的应用研究[J]. 电网技术, 2017, 41(1): 22-28.
- WANG Yating, ZHANG Yichi, ZHOU Qinyong, et al. Study on application of new generation large capacity synchronous condenser in power grid[J]. Power System Technology, 2017, 41(1): 22-28.
- [20] 杨燕, 林勇, 徐蔚, 等. 乌东德多端直流输电对广东电网安全稳定的影响[J]. 广东电力, 2017, 30(11): 44-50.
- YANG Yan, LIN Yong, XU Wei, et al. Influence of wudongde multi-terminal HVDC on security and stability of guangdong power grid[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(11): 44-50.
- [21] 赵婉君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.

收稿日期: 2018-10-23; 修回日期: 2018-12-12

作者简介:

张正卫(1991—), 男, 硕士研究生, 研究方向为柔性直流输电、电力系统分析与控制; E-mail: 779072469@qq.com

陈得治(1974—), 男, 通信作者, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向为电力系统分析与控制; E-mail: chendz@epri.sgcc.com.cn

卜广全(1962—), 男, 教授级高级工程师, 研究方向为电力系统仿真分析和运行控制技术。

(编辑 许威)