

DOI: 10.7667/PSPC171816

# 晋北-南京特高压直流输电工程安稳系统及其控制策略研究

艾红杰<sup>1</sup>, 方扬<sup>2</sup>, 陈大鹏<sup>1</sup>, 李平伟<sup>3</sup>, 吴金波<sup>1</sup>, 王祺元<sup>1</sup>

(1. 许继电气直流输电系统公司, 河南 许昌 461000; 2. 国家电网公司运行分公司上海管理处, 上海 201600;  
3. 国网山西省电力检修公司, 山西 太原 030024)

**摘要:** 在晋北-南京直流工程安稳系统原有功能基础之上, 增加了短时间内相继发生手动停运和故障跳闸时损失功率识别的方法。在发生连续的功率损失时, 安控系统能够准确识别并动作, 使得安控系统功能及其控制策略更加完善。详细介绍了南京站接入的华东频率协控系统组成和功能, 以及当某条直流线路闭锁出现功率缺额时, 频率协控系统应采取的动作策略。通过频率协控装置站系统试验和系统试验, 验证了华东频率协控系统及其控制策略的有效性和准确性, 并就目前频率协控系统的不足提出了优化建议。

**关键词:** 特高压直流; 安稳系统; 频率协控; 快速功率提升; 切负荷

## Study on stability system and control strategy in Jinbei-Nanjing HVDC project

AI Hongjie<sup>1</sup>, FANG Yang<sup>2</sup>, CHEN Dapeng<sup>1</sup>, LI Pingwei<sup>3</sup>, WU Jinbo<sup>1</sup>, WANG Qiyuan<sup>1</sup>

(1. XJ Electric Corp., Ltd, Xuchang 461000, China; 2. Shanghai Management Office of Grid Operation Branch of SGCC, Shanghai 201600, China; 3. Maintenance Branch of State Grid Shanxi Electric Power Company, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** On the basis of the security system original function, the Jinbei-Nanjing HVDC project increases a new recognition method of power loss, when sequential manual outage and fault tripping occur in a short time. In the event of continuous power loss, safety control system can accurately identify it and then act, the new control strategy makes the safety control system more perfect. The paper introduces the composition and function of frequency control system of East China in detail, also introduces what action strategy should be taken when the power shortage is caused by the blocking of one of the HVDC lines. The effectiveness and accuracy of the East China frequency coordination control system and its control strategy are verified by the system test, and the optimization suggestions on the shortcomings of current frequency association control system are proposed.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 52094016000X).

**Key words:** HVDC; stability system; association control system; fast power boost; load shed

## 0 引言

随着山西晋北—江苏南京±800 kV 直流输电工程建成投运, 华东地区已经接入了四条常规直流和五条特高压直流, 并且规划中的锡盟—泰州±800 kV 直流工程和昌吉—古泉±1 100 kV 直流工程按计划在系统调试和施工当中。华东地区直流网络密集, 交直流交叉纵横。随着直流线路越来越多, 直

流线路之间, 直流网络与交流网络之间的相互影响越来越大<sup>[1-4]</sup>。

如果晋南直流在大功率运行时一旦发生双极闭锁停运, 送端和受端的功率平衡失衡, 对两侧电网系统潮流、频率、电压将产生较大冲击<sup>[5-10]</sup>。在电力系统装设安全稳定紧急控制装置, 是提高电力系统安全性, 防范电网稳定事故, 防止发生大面积停电事故的有效措施<sup>[11-16]</sup>。所以安全稳定控制系统精确、快速、稳定的发挥作用, 对华北、华东电网的安全运行至关重要<sup>[17-25]</sup>。

基金项目: 国家电网公司科技项目资助(52094016000X)

## 1 晋南工程安稳控制策略

本文中所述的晋南工程安稳系统是一个广义的概念,既包括雁门关站配置的安控系统及控制策略,又包括淮安站的频率协调控制系统及控制策略。安控系统作用是在晋南直流发生功率损失,且损失量大于切机阈值时产生切机组命令,由明海湖变进行切机,保持送端电网安全;当明海湖变连接电厂及备用电厂出现故障时,安稳系统下达直流系统功率回降或闭锁直流指令,以保证送端和受端功率平衡。安稳系统与控制保护系统中的直流站控(DCSC)通过光

纤传输数据,数据传输协议为通用的 IEC60044-8。

频率协控系统文献[5]设想的初步实现。当某一条直流线路发生直流闭锁或紧急功率速降时,可以通过协同的非故障直流线路紧急提升功率、抽蓄站切泵、负荷控制中心切负荷的方式,减小送端、受端网内电压、频率波动,降低闭锁或功率速降对整个电网的冲击,避免故障扩大造成电网安全事故。

按照分层控制架构设计,华东频率协控系统主要由华东电网频率协控总站、直流协调控制总站(以下简称直流主站)、抽蓄切泵控制主站和负荷控制主站四大部分组成,其总体构架如图1所示。

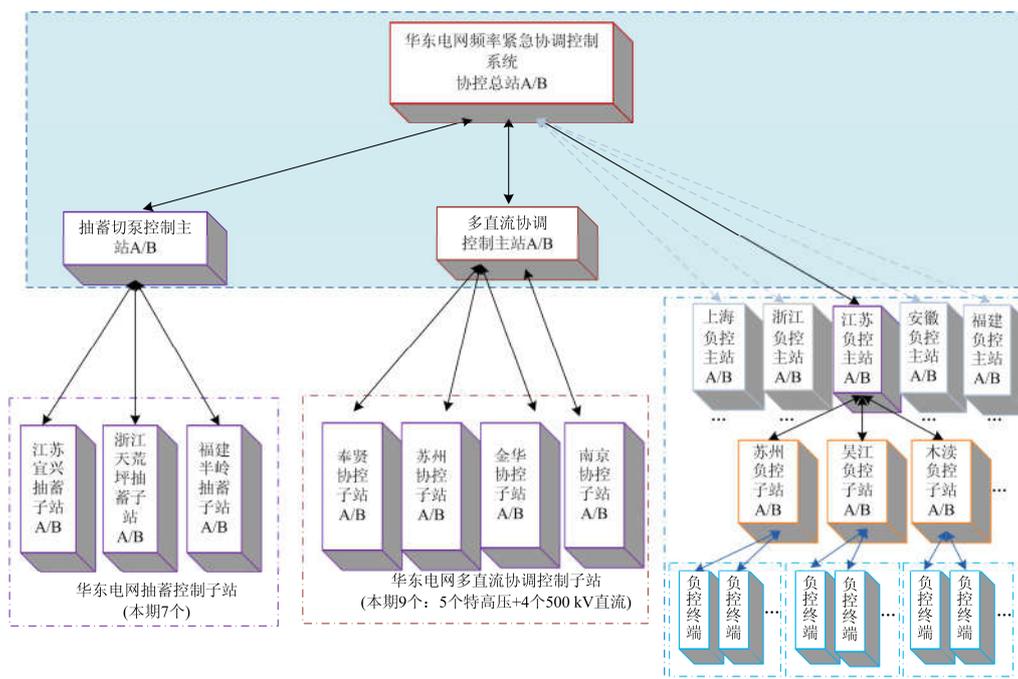


图1 协控系统通道配置

Fig. 1 Channel configuration of association control system

上述四大组成部分均配置 A/B 两套系统互为冗余。华东电网频率协控总站是协控系统的决策中心,按照既定的控制策略,协调、调度直流主站、抽蓄切泵控制主站和负荷控制主站顺序动作;直流总站,负责多回直流紧急控制措施的协调;抽蓄切泵控制主站,负责抽蓄切泵控制措施的协调;各省(市)负荷控制主站,负责切除大规模可中断负荷控制措施的协调。需要说明的是目前只配置了江苏负荷控制中心,其余四省市正在建设当中。

系统的主要功能:监测各回直流、所有抽蓄机组及大量可控负荷的实时运行状态,当直流故障闭锁或功率紧急速降而导致电网出现大功率缺额时,按照既定的策略,首先进行协同的非故障直流线路功率紧急提升,弥补功率缺额;协同提升功率容量

不足时再进行抽蓄切泵,快速切除可中断负荷作为第三级控制措施,最后执行。这样配置控制策略的目的就是在保证电网稳定的前提下,尽可能地减少切负荷,有效降低华东电网频率崩溃引发大面积停电的风险。

## 2 安控试验

### 2.1 常规试验

为验证安控系统及其控制策略的功能,晋南工程系统调试期间,安控试验进行了安稳启动直流功率回降、绝对最小滤波器不满足降功率、双极平衡降功率、全压运行,换流器闭锁、降压运行,换流器闭锁、孤岛试验等六大类 44 小项常规试验。44 项试验与预期结果一致,安稳系统能够准确判断直

流系统降功率，并执行相应的动作策略；模拟连接明海湖变发电厂机组出力受限，安稳系统下达降功率指令；模拟晋北换流站处于孤岛运行时，安稳系统下达闭锁直流指令，直流控保系统均执行正确。

### 2.2 专项试验

宾金直流在现场试验期间，发生手动闭锁极 1 低端阀组时，极 2 高端阀组故障跳闸，手动闭锁和故障跳闸时间相隔较近，安控系统不能正确判断实际功率损失量，造成了安稳系统应对措施不足，对送端网内造成较大冲击，存在安全隐患。针对此种情况，根据安控装置的运行周期(5 s)，晋南工程专门制定了相应的闭锁配合策略：

1) 如果先手动停运换流器，10 s 内如果发生另外的换流器异常闭锁，则站控向安稳系统发送异常闭锁换流器的“非正常停运信号”的同时，向安稳系统发送先前手动停运换流器的“非正常停运信号”，即之前手动停运阀组的功率也计在异常损失之内；

2) 如果先发生换流器异常闭锁，站控立即向安稳系统发送异常闭锁换流器的“非正常停运信号”，6 s 内如果发生另外的换流器手动停运，则手动闭锁阀组功率也计算在总的功率损失之内，站控发送手动停运换流器的“非正常停运信号”。

根据修改的安控策略，通过 RTDS 仿真系统进行了“晋南直流手动闭锁、异常闭锁配合及安控装置功率损失计算逻辑验证”试验。由于安控装置执行周期为 5 s，先手动闭锁一个阀组，10 s 后故障跳闸一个阀组和先故障跳闸一个阀组、6 s 后手动闭锁一个阀组，这两种情况安控均能准确识别，分别在不同的执行周期计算损失功率，根据计算的功率损失分步采取对应的措施。重点需要验证的是 5 s 内接连发生手动闭锁和故障跳闸情况时，安控系统能够准确识别故障信号以及对损失功率的计算是否准确。重点进行了以下两类试验：1) 手动停运一个阀组，10 s 内故障闭锁一个阀组；2) 故障闭锁一个阀组，6 s 内手动停运一个阀组。

第 1 个重点试验为晋南直流极 1 极 2 均双极功率控制，功率 8 000 MW，先手动闭锁极 1 高端阀组，3 s 之后故障跳极 2 高端阀组，图 2 为控制保护系统录波，图 3 为安控装置事件记录。从录波可以看出双极功率由 8 000 MW 减至 4 200 MW 左右(1.05 倍过负荷)，实际损失功率为 3 800 MW。图 3 中事件显示安稳装置收到两次功率损失信号，计算的功率损失为 3 688 MW，与实际功率损失基本对应。

第 2 个重点试验为晋南直流极 1 极 2 均双极功率控制，功率 8 000 MW，先故障跳极 1 低端阀组，

3 s 后手动闭锁极 2 低端阀组。图 4 和图 5 分别为控制保护系统录波和安控装置事件记录。

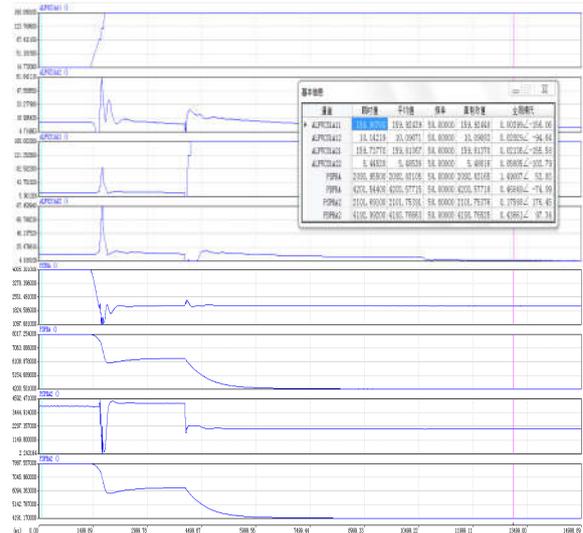


图 2 控制保护系统录波 1

Fig. 2 TFR 1 of DC control and protection system



图 3 安稳装置事件记录 1

Fig. 3 SER list 1 of stabilization plant

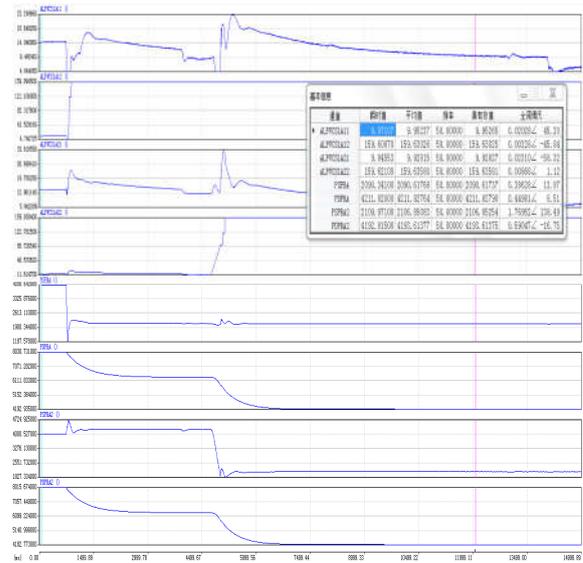


图 4 控制保护系统录波 2

Fig. 4 TFR 2 of DC control and protection system

```

打印时间: 2017-04-13 17:41:26
事件报告打印:
动作时间:2017-04-13 17:41:14:320 共 11 条信息
01-...320-装置启动
02-...420-极 I 低端换流变故障
03-...420-换流器闭锁后直流功率可转带极 I 高端换流器(2100MW)
04-...420-换流器闭锁后直流功率可转带极 II 高端换流器(2100MW)
05-...420-换流器闭锁后直流功率可转带极 II 低端换流器(2100MW)
06-...420-直流总损失功率(1600MW)
07-...4660-极 II 低端换流变故障
08-...4660-换流器闭锁后直流功率可转带极 I 高端换流器(2100MW)
09-...4660-换流器闭锁后直流功率可转带极 II 高端换流器(2100MW)
10-...4660-直流总损失功率(3700MW)
11-10225-事件结束

```

图 5 安稳装置事件记录 2

Fig. 5 SER list 2 of stabilization plant

录波文件图 4 显示双极功率由 8 000 MW 减至 4 200 MW 左右(1.05 倍过负荷), 实际损失功率为 3 800 MW。图 5 中事件显示安稳装置准确识别两次功率损失信号, 计算的功率损失为 3 700 MW, 与

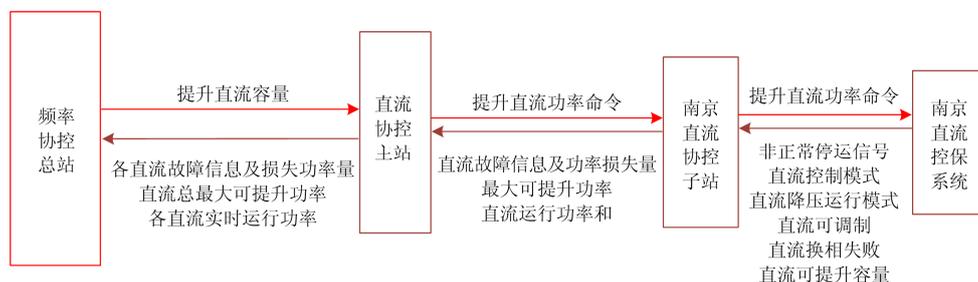


图 6 南京站与协控系统数据传输流程及内容

Fig. 6 Data transmission process between association control system and Nanjing station

南京协控子站接收直流控保系统发送的非正常停运信号、直流控制模式、直流降压运行模式、直流可调制、直流换相失败、直流可提升容量等信息; 协控子站发送功率提升命令到直流控制保护系统。同时协控子站采集换流变的三相电压、电流等模拟量。

如果晋南直流发生故障, 南京协控子站根据接收控保系统的信息判断本站直流故障(含直流闭锁及功率突降), 计算直流双极功率损失量, 并将功率损失量送至直流协控主站。

损失功率计算如式(1)所示。

$$\Delta P = \sum P_{200\text{ms}} - \sum P_{Y,t} - \sum P_{N,-200\text{ms}} \quad (1)$$

式中:  $\Delta P$  为直流故障后损失功率;  $\sum P_{200\text{ms}}$  为事故前 200 ms 所有运行换流器的输送功率和;  $\sum P_{Y,t}$  为事故后所有可转带的换流器极限功率和;  $\sum P_{N,-200\text{ms}}$  为事故后所有不可转带的换流器的事故前功率和。

直流协控总站将晋南直流故障信息和损失、非故障直流线路可提升功率等送至频率协控总站。频率协控总站按照既定的控制策略动作。

实际损失功率基本对应。

本次还进行不同工况, 不同功率损失间隔的验证试验共 17 项。仿真试验表明, 安稳系统能够准确识别短时内连续发生功率损失的情况, 计算结果正确。当出现此类状况时, 安稳系统能够有效应对。

### 3 南京站协控系统及其试验

#### 3.1 南京站与协控总站的连接

南京换流站控制保护系统通过光纤与南京协控子站进行数据交互, 传输协议为通用的 IEC60044-8。南京协控子站接入直流协控主站, 然后再通过直流协控主站接入控制策略执行中心华东电网频率协控总站, 其传输路径如图 6 所示。其中频率协控总站、直流协控总站以及抽蓄切泵总站设置在苏州换流站。

如果协控系统内某条直流线路发生故障造成功率损失, 而晋南直流在运。则频率协控总站下达直流功率紧急提升指令, 通过直流协控总站、南京直流协控子站送至南京站直流控保系统, 控保系统按照自身最大可提升功率定值, 进行紧急功率提升。在这个过程中当提升指令到达南京协控子站时, 需要结合低频动作条件进行判断, 当没有出现低频动作时, 才会发送提升功率指令到直流控保系统。否则功率提升指令在协控子站不会出口。直流协控子站采集换流变交流电压、电流的目的就是判断交流系统频率。

需要特别指出的是, 各个直流最大可提升功率是按照各个直流满负荷运行时还可以提升的功率, 是一个固定值。目前看, 各个直流可提升功率定值较小, 趋于保守。这样做的目的在于频率协控应用初期, 各项参数的设置必须完全可靠, 能够充分保证非故障的其他直流线路、华东电网的频率、关键潮流断面等安全稳定, 不受故障直流线路冲击。否则因为参数设置不当, 一回直流线路故障, 造成其他直流故障事故扩大, 华东电网内出现连锁反应,

这就违背了协控系统设计的初衷。

### 3.2 验证试验

2017年4月—5月华东网调中心组织各相关单位进行了华东频率协控系统的验证试验。试验分为两部分：站系统调试和系统调试。以晋南工程为例，站系统调试时断开南京站协控子站与直流协控总站的连接，由南京协控子站装置模拟提升功率(提升功率100 MW)，观察直流系统响应结果是否与预期一致；系统调试即实际的试验，苏州换流站手动紧急停运，直流功率损失3 000 MW，检查协控系统是否按既定策略进行协同直流的功率提升、抽蓄主站切泵和切除可中断负荷。

图7为站系统试验时，南京协控子站模拟功率提升，晋南直流控制保护系统的响应结果录波。录波中显示，功率参考值SP\_REF由399.5 MW升至500 MW，实际功率SP\_ACT从398.9 MW升至507 MW，过冲回调之后约4.5 s，功率稳定在500 MW。实际结果与预期一致。

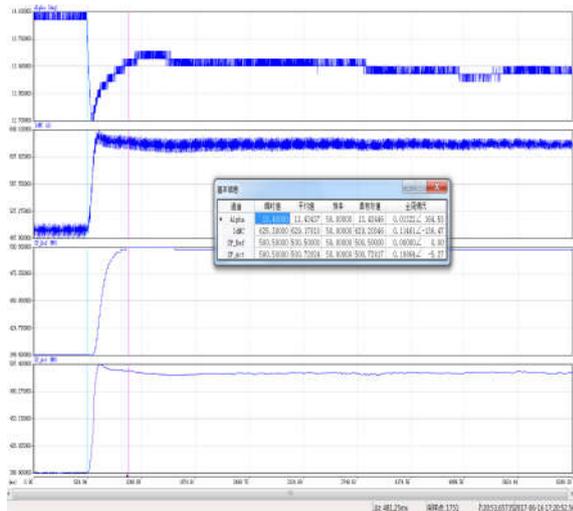


图7 协控系统动作事件列表1

Fig. 7 SER list 1 of association control system

2017年5月24日，进行了协控系统的系统试验，锦苏直流双极紧急闭锁，功率损失3 000 MW。既定的控制策略如表1所示，由于系统试验时华东电网实际工况限制，非故障直流提升预计680 MW，抽蓄切泵预计切除2 025 MW，切可中断负荷275 MW，总计2 980 MW。剩余的20 MW缺额华东电网能够安全消纳，不会造成频率、电压等波动。图8和图9为系统试验时协控总站动作事件列表。

事件列表显示功率损失后90 ms，协控装置执行动作策略完成，动作后果为：非故障直流提升功率680 MW，抽蓄切泵2 250 MW，切除可中断负荷

275 MW。三者相加为2 980 MW，与损失的总功率3 000 MW基本一致，与既定的控制策略吻合。

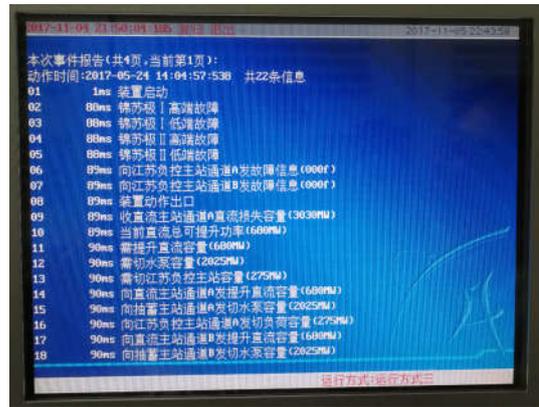


图8 协控系统动作事件列表1

Fig. 8 SER list 1 of association control system

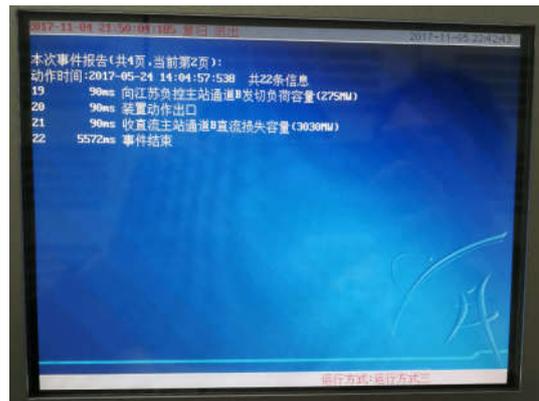


图9 协控系统动作事件列表2

Fig. 9 SER list 2 of association control system

因系统试验时晋南工程正处于工程调试阶段，没有参与协控系统试验。本文调取了系统试验同一时刻宾金直流的录波文件。图10为苏州站闭锁时金华换流站录波，苏州站闭锁前宾金直流功率BP\_ACT为2 480 MW，苏州站闭锁后宾金直流功率BP\_ACT为2 579.6 MW，功率提升99.6 MW，除去采样误差，动作结果与既定目标一致。录波文件显示宾金直流功率开始提升至稳定的时间约为4.5 s，与站系统试验响应时间基本相同。对比其他直流线路功率提升开始至稳定，也基本在4.5 s左右。因此，4.5 s作为一个经验值，可以视作频率协控系统总的响应时间。除宾金直流外，其他几回参与协调控制的直流均准确动作，分别按照表1的功率值进行了紧急功率提升。

系统试验表明协控系统能够应对单条直流出现紧急停运后功率缺额问题，有效避免华东网内电压、

频率、功率断面等波动, 实现华东电网相对平稳运行, 降低网内冲击, 有效减小停电的范围和规模。



图 10 宾金直流功率紧急提升录波

Fig. 10 TFR of Bin-Jin HVDC project

表 1 执行顺序及功率值分配表

Table 1 Execution order and power distribution table

执行序号	功率缺额弥补措施及大小		总计	
1	直流可提升功率	复奉直流	190 MW	2 980 MW
		宜华直流	90 MW	
		林枫直流	90 MW	
		龙政直流	90 MW	
		葛南直流	20 MW	
		宾金直流	100 MW	
		灵绍直流	100 MW	
	小计	680 MW		
2	抽蓄切泵	2 025 MW		
3	切负荷	275 MW		

## 4 结论

安稳试验结果表明, 送端安控系统和受端频率协控系统能够按照既定的控制策略, 分步有序动作, 保证电网安全。特别是首次应用的频率协控系统, 在出现功率缺额时, 通过协同直流功率紧急提升、抽蓄切泵和切负荷的阶梯方式, 多手段、多层次地保证华东电网安全稳定运行。但随着电网规模不断扩大, 交直流混联电网相互影响越来越大, 肯定将出现新的稳定控制问题, 安稳系统也将完善新的应对措施。

根据协控系统控制策略参数设置、动作后果以及系统试验结果来看, 目前, 协控系统还有需要继续优化和完善的地方有:

1) 各直流线路的最大可提升功率是按其满负荷时还能提升的功率来设定, 是一个固定值。可根

据本直流线路实际运行功率大小, 整流侧机组出力约束、交流线路功率限制、关键潮流断面限额等条件, 协控系统智能决策, 设置一个弹性可变的功率提升定值。当出现大额功率损失时, 协控系统根据现有运行方式, 功率水平, 各非故障直流线路的最大提升功率值等综合决策, 最大限度地提高非故障直流线路利用率, 增大协同直流紧急提升功率值, 尽可能地减少切负荷。

2) 协控系统增加线路重启协调控制。根据协控装置的配置情况和功能说明, 协控系统有功率转带和换相失败识别功能, 即虽然发生闭锁但功率转带另一极或发生换相失败, 此时协控系统不动作。但协控系统没有考虑线路故障重启情况。长距离的直流线路容易发生线路重启, 在线路重启时闭锁协控动作还是进行其他动作措施, 都需要进行详细的研究和论证。

3) 多条直流连续出现功率损失时, 协控系统动作结果验证。目前只做了单一某条直流线路出现紧急停运, 协控系统的动作结果验证。但还需验证多条直流连续出现功率损失, 协控系统动作策略的稳定性和准确性。

## 参考文献

- [1] 许爱东, 柳勇军, 吴小辰.  $\pm 800$  kV 云广特高压直流安全稳定控制策略研究[J]. 南方电网技术, 2008, 2(5): 14-18.  
XU Aidong, LIU Yongjun, WU Xiaochen. Study on security and stability control strategy for  $\pm 800$  kV Yun-Guang UHVDC Transmission[J]. Southern Power System Technology, 2008, 2(5): 14-18.
- [2] 李兆伟, 刘福锁, 崔晓丹, 等. 计及电力安全事故风险的电网动态分区与切负荷协调控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 35-40.  
LI Zhaowei, LIU Fusuo, CUI Xiaodan, et al. Coordinate control study for dynamic division and load shedding considering electrical security accident risk[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 35-40.
- [3] 董希建, 杨海, 刘平, 等. 电力系统事故过负荷的识别及紧急控制[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 44(21): 165-169.  
DONG Xijian, YANG Hai, LIU Ping, et al. Criterion of accident overload and emergency control[J]. Power System Protection and Control, 2017, 44(21): 165-169.
- [4] 夏澍, 葛晓琳, 季海华, 等. 基于机会约束规划的电力电量平衡分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(21): 102-107.

- XIA Shu, GE Xiaolin, JI Haihua, et al. Power supply-demand balancing analysis based on chance-constrained programming[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(21): 102-107.
- [5] 冯长有, 陈刚, 许涛, 等. 高压直流输电系统故障后电网安全控制装置调制策略[J]. 电网技术, 2012, 36(9): 88-93.
- FENG Changyou, CHEN Gang, XU Tao, et al. Novel modulation strategy of stability controlling device after failure occurred in HVDC power transmission system[J]. Power System Technology, 2012, 36(9): 88-93.
- [6] 隋国平. 云广特高压直流输电线路双极闭锁时安稳装置的动作分析[J]. 高电压技术, 2012, 38(2): 421-426.
- SUI Guoping. Power safe system analysis of  $\pm 800$  kV Yun-Guang UHVDC when bipole blocking[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(2): 421-426.
- [7] BAI Feifei, LIU Yong, LIU Yilu, et al. A measurement-based approach for power system instability early warning[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 17-25. DOI: 10.1186/s41601-016-0014-0.
- [8] 王伟, 陈军, 余锐, 等. 区域型安全稳定控制装置无故障跳闸判据运行分析[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(2): 120-124.
- WANG Wei, CHEN Jun, YU Rui, et al. Analysis of non-fault tripping criterion operation for area-based stability control device[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(2): 120-124.
- [9] 张文朝, 商显俊, 李轶群, 等. 互联电网动态稳定安控策略优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(19): 99-105.
- ZHANG Wenchao, SHANG Xianjun, LI Yiqun, et al. Optimization method of security control strategy for dynamic stability in interconnected power grid[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(19): 99-105.
- [10] 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 UHVDC on voltage stability of Henan Power Grid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(21): 147-153.
- [11] 罗煦之, 张健, 贺静波, 等. 计及暂态过电压约束的直流闭锁安控与极控协调控制研究[J]. 电网技术, 2015, 39(9): 2526-2531.
- LUO Xuzhi, ZHANG Jian, HE Jingbo, et al. Coordinated control research of stability control system and pole control system under DC system block considering transient overvoltage[J]. Power System Technology, 2015, 39(9): 2526-2531.
- [12] 徐式蕴, 吴萍, 赵兵, 等. 提升风火打捆哈郑特高压直流风电消纳能力的安全稳定控制措施研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(13): 92-99.
- XU Shiyun, WU Ping, ZHAO Bing, et al. Study on the security and stability control strategy enhancing the wind power consuming ability of the wind-thermal power combining Ha-zheng UHVDC system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(13): 92-99.
- [13] 梁少华, 夏尚学, 霍超, 等. 青藏直流稳控与极控系统的接口及协调控制方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(8): 125-128.
- LIANG Shaohua, XIA Shangxue, HUO Chao, et al. Interface and coordination control method between Qinghai-Tibet DC stability control system and pole control system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(8): 125-128.
- [14] 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, 45(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, 45(13): 130-138.
- [15] 张立平, 马进霞, 吴小辰, 等. 高压直流极控系统与安全稳定控制装置接口方案[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(2): 102-106.
- ZHANG Liping, MA Jinxia, WU Xiaochen, et al. Coordinated-control modes for interconnected AC/DC power system in HVDC projects[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(2): 102-106.
- [16] 李德胜, 罗剑波. 特高压直流配套安全稳定控制系统的典型设计[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(14): 151-157.
- LI Desheng, LUO Jianbo. Typical design of security and stability control system for UHVDC transmission[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(14): 151-157.
- [17] 朱益华, 郭琦, 徐光虎, 等. 天广直流稳控系统极控系统控制时序配合方法仿真研究[J]. 南方电网技术, 2017, 11(8): 8-15.
- ZHU Yihua, GUO Qi, XU Guanghu, et al. Simulation

- study on control sequence coordination method between security and stability control system and pole control system of Tianshengqiao-Guangzhou HVDC project[J]. Southern Power System Technology, 2017, 11(8): 8-15.
- [18] 赵燕, 张文朝, 李轶群, 等. 电力系统通用安控策略整定方法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 45(4): 102-107.  
ZHAO Yan, ZHANG Wenchao, LI Yiqun, et al. Research on the general control strategy of power system tuning method[J]. Power System Protection and Control, 2015, 45(4): 102-107.
- [19] 邱丽萍, 陈向宜, 马世英, 等. 直流调制对大型交直流互联电网安控的影响[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(2): 89-91, 102.  
QIU Liping, CHEN Xiangyi, MA Shiyong, et al. Impact of DC modulation on safety and stability strategy in AC/DC hybrid system[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2015, 27(2): 89-91, 102.
- [20] 王建明, 孙华东, 张健, 等. 锦屏—苏南特高压直流投运后电网的稳定特性及协调控制策略[J]. 电网技术, 2012, 36(12): 66-70.  
WANG Jianming, SUN Huadong, ZHANG Jian, et al. Stability characteristics and coordinated control strategy of interconnected grid integrated with UHVDC Transmission Line from Jinping to Sunan[J]. Power System Technology, 2012, 36(12): 66-70.
- [21] 杨昊, 杨健. 基于移相器的多电压等级潮流断面输电能力优化方法研究[J]. 陕西电力, 2017, 45(5): 42-47.  
YANG Hao, YANG Jian. Optimization of transmission capability of multi voltage power flow section based on phase Shifter[J]. Shaanxi Electric Power, 2017, 45(5): 42-47.
- [22] 余文辉, 王凯琳, 高松川, 等. 供电可靠性关键指标分析方法及应用[J]. 广东电力, 2017, 30(7): 121-125.  
YU Wenhui, WANG Kailin, GAO Songchuan, et al. Analysis method for critical indicators of power supply reliability and its application[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(7): 121-125.
- [23] 杨苹, 叶超. 风电优先上网的风水火电力系统联合优化调度[J]. 广东电力, 2017, 30(4): 31-36.  
YANG Ping, YE Chao. Combined optimal dispatching of wind-hydro-thermal power system with wind power priority in accessing to power grid[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(4): 31-36.
- [24] 邓刘毅, 杨永, 郭焱林, 等. 现有有功-无功资源配置下的分布式发电消纳问题研究[J]. 供用电, 2017, 34(5): 76-83.  
DENG Liuyi, YANG Yong, GUO Yanlin, et al. Research on distributed power integration problem integration under existing active-reactive power allocation[J]. Distribution & Utilization, 2017, 34(5): 76-83.
- [25] 方燕琼, 艾芊, 范松丽, 等. 虚拟电厂研究综述[J]. 供用电, 2016, 33(4): 8-13.  
FANG Yanqiong, AI Qian, FAN Songli, et al. A review on virtual power plant[J]. Distribution & Utilization, 2016, 33(4): 8-13.

收稿日期: 2017-12-15; 修回日期: 2018-03-01

作者简介:

艾红杰(1983—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 工程师, 主要从事直流输电控制保护系统研究开发; E-mail: xiaoi1983@163.com

方扬(1982—), 男, 本科, 工程师, 主要从事直流输电控制保护运维管理; E-mail: yang-fang@sgcc.com.cn

陈大鹏(1970—), 男, 本科, 高级工程师, 主要从事直流输电控制保护系统研发。E-mail: chendapeng@sohu.com

(编辑 周金梅)