

# 基于轨迹灵敏度的多回直流紧急功率提升策略

王兴刚<sup>1</sup>, 张虹<sup>1</sup>, 徐政<sup>2</sup>, 翁华<sup>3</sup>, 许烽<sup>2</sup>

(1. 云南电网公司, 云南 昆明 650011; 2. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027;  
3. 国网浙江省电力公司经济技术研究院, 浙江 杭州 310008)

**摘要:** 直流闭锁故障后, 需要择优选择参与紧急功率提升的直流, 为此提出一种基于轨迹灵敏度选择最优直流进行紧急功率提升的方法。首先确定各回直流线路故障后对应的领先机组, 然后通过计算提升非故障直流线路功率对稳定性改善的灵敏度确定最优的直流功率提升措施, 配合直流送端发电机组励磁控制, 可以取得良好的控制效果。利用该方法, 进一步给出云电外送5回直流的紧急功率提升策略。仿真计算表明, 所提方法可以大幅减少直流闭锁故障后的切机量, 显著提高系统稳定水平。

**关键词:** 直流输电; 灵敏度分析; 轨迹; 直流紧急功率提升; 发电机; 励磁控制; 闭锁; 稳定性

**中图分类号:** TM 721.3

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.10.014

## 0 引言

超高压、特高压直流系统输送容量大, 故障情况下直流紧急闭锁会对联网交直流系统产生很大的功率冲击, 对系统稳定性影响很大。为了提高直流闭锁故障后的稳定水平, 除了传统的稳控措施以外, 非故障直流的紧急功率提升功能也引起了高度重视, 对此学者们开展了大量研究工作<sup>[1-6]</sup>。文献[1-3]通过等面积法则从理论上证明了直流紧急功率提升对提高直流闭锁故障后南方电网稳定性的作用, 并且给出了仿真算例分析。文献[5-6]给出了无功电压对直流紧急功率提升的影响, 提出了通过加装静止无功补偿器、发电机励磁控制等措施进行无功补偿的建议。

南方电网已经构建了复杂的交直流混联电网, 随着西电东送规模不断扩大, 未来几年南方电网陆续有 $\pm 800$  kV 糯扎渡直流、 $\pm 500$  kV 溪洛渡直流同塔双回、 $\pm 500$  kV 金中直流等多回特高压、超高压直流建成投运, 运行方式更加复杂。南方电网某回直流闭锁故障后有多回直流可以提供紧急功率支援, 但是文献[3]的研究表明, 为了避免系统电压恶化, 参与紧急提升功率的直流并非越多越好, 而是需要择优选择。现有研究成果并没有给出科学定量的选择方法, 只能凭经验判断, 缺乏可操作性。

本文提出了一种基于轨迹灵敏度选择最优直流进行紧急功率提升的方法, 配合直流送端发电机组励磁控制, 可以取得良好的控制效果。利用该方法, 本文进一步给出了云电外送5回直流的紧急功率提升策略。仿真计算表明, 该策略可以大幅减少直流闭锁故障后的切机量, 显著提高系统稳定水平。

## 1 直流紧急功率提升的无功限制及措施

无功限制是影响直流紧急功率提升效果的关键

因素<sup>[5-6]</sup>, 本文首先提出经济可行的换流站无功电压支撑方法, 作为后续轨迹灵敏度分析的基础条件。

图1给出了典型特高压直流换流器无功功率消耗随有功功率变化的曲线(有功、无功均为标幺值, 以直流额定输送功率为基准), 可以看出换流站的无功消耗基本与直流输送功率成正比, 因此特高压直流功率紧急提升后换流站的无功消耗也将快速上升。

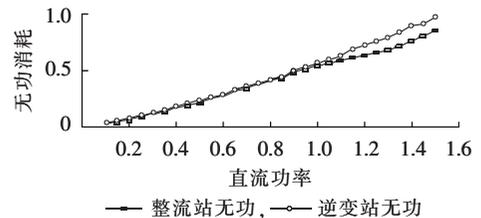


图1 换流器无功消耗与直流输送功率的关系  
Fig.1 Relations between inverter reactive power consumption and DC transmission power

直流功率紧急提升后换流站消耗的无功增加, 有可能恶化系统电压; 恶化的电压(如整流侧交流母线电压过低)可能会导致直流整流侧定电流控制切换到定 $\alpha_{\min}$ 控制( $\alpha_{\min}$ 为整流站最小的触发延迟角), 限制直流有功的提升, 此时逆变侧自动转为定电流控制, 其整定值比整流侧整定值小0.1 p.u.。

假定图2所示云电外送5回直流的整流站不提供额外的无功支持(不装设静止无功补偿器、同步调相机等无功补偿设备), 直流整流站送端临近机组的励磁采用常规控制机端电压(不实行强励), 且5回直流线路均采用整流站定电流、逆变站定电压控制方式, 各回直流线路初始运行状态见表1。对云电外送5回直流进行扫描测试, 测试条件为金中直流双极闭锁(直流换流站正常运行时都配有大量的无功补偿滤波器, 直流线路发生双极闭锁时为了防止出现过电压, 一般都将在故障直流换流站内的滤波器全部快速切除, 这里在金中直流双极闭锁0.2 s后切除直流全部

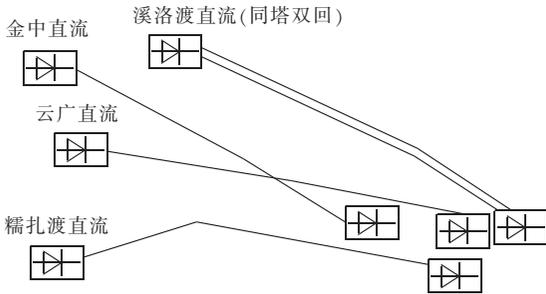


图 2 云电外送 5 回直流示意图

Fig.2 Schematic diagram of 5 HVDCs of Yunnan Power

表 1 5 回直流线路初始运行状态

Table 1 Initial operating states of 5 HVDCs

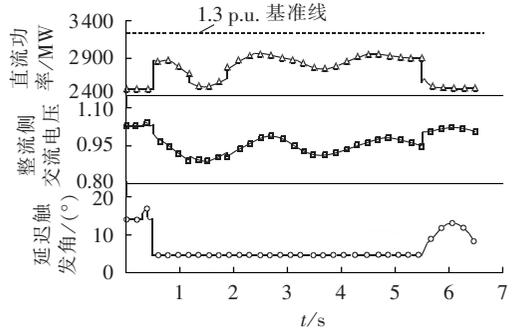
参数	云广	金中	糯扎渡	溪洛渡(双回)
额定电压/kV	±800	±500	±800	±500
额定功率/MW	2500×2	1500×2	2500×2	1600×4
实际输送功率/MW	2500×2	1500×2	2500×2	1600×4
整流无功补偿/Mvar	3010	1600	2500	2700
延迟触发角/(°)	14.15	16.54	15.69	14.56
逆变无功补偿/Mvar	3000	1900	3000	3970
越前触发角/(°)	19.19	19.54	19.71	19.03

滤波器),提升其余未发生故障的直流功率,附加功率指令为 30% 的额定功率,功率提升保持时间为 4 s,测试直流实际输送有功能否迅速跟随功率指令,图 3 给出了测试结果(整流侧交流电压为标么值)。

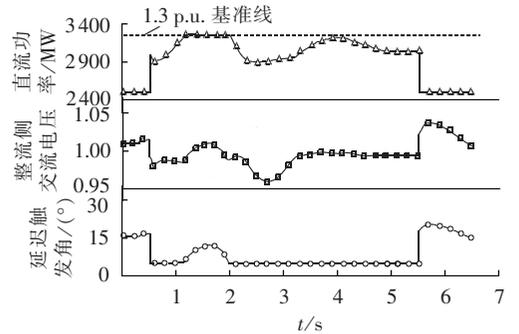
由图 3 可知,在金中直流双极闭锁后,即使给出直流功率提升指令使另外 4 回直流的期望输送功率为 1.3 p.u.,被施加提升功率指令的直流的实际输送功率也达不到提升指令值。主要原因在于:在一条直流双极闭锁后,闭锁直流输送的大容量的有功向交流通道转移,导致通道上无功消耗也增加,电压下降;即使送端机组较多,短时间内也无法提供足够无功支撑;此时再快速提升未故障直流的输送功率会使直流控制模式切换到定  $\alpha_{\min}$  控制,根据直流电流  $I_d$  与直流两侧交流电压  $U_{dor}$ 、 $U_{doi}$  以及延迟触发角  $\alpha$ 、越前触发角  $\gamma$  的关系

$$I_d = \frac{U_{dor} \cos \alpha - U_{doi} \cos \gamma}{R_{cr} + R_L + R_{ci}} \quad (1)$$

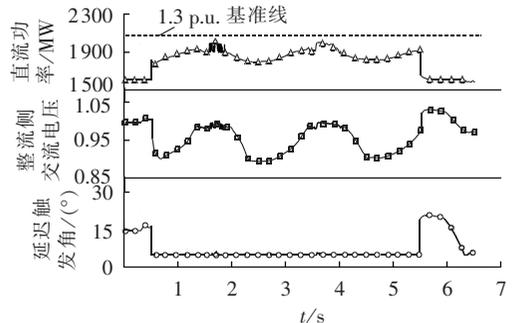
可知直流电流无法提升,也就造成直流功率提升不上去。其中,  $R_{cr}$ 、 $R_L$ 、 $R_{ci}$  分别为直流整流侧等值换相电阻、直流线路电阻和直流逆变侧等值换相电阻。根据式(1),要提升直流电流,可以从提高整流侧交流母线电压和提高越前关断角两方面入手,但越前关断角过大会造成直流逆变侧无功增加。所以要保证直流输送功率能达到指令给定值,有效措施是提高整流站交流



(a) 金中直流双极闭锁后提升云广直流功率时功率与电压的关系



(b) 金中直流双极闭锁后提升糯扎渡直流功率时功率与电压的关系



(c) 金中直流双极闭锁后提升溪洛渡直流(双回任一回)功率时功率与电压的关系

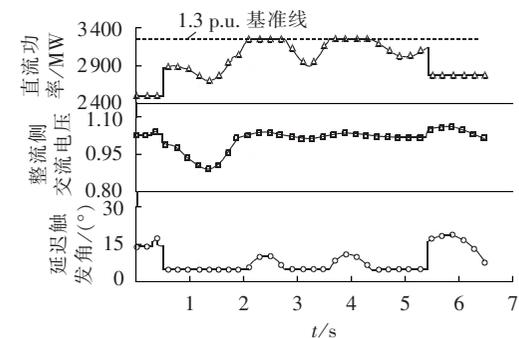
图 3 测试结果(1)

Fig.3 Test results(1)

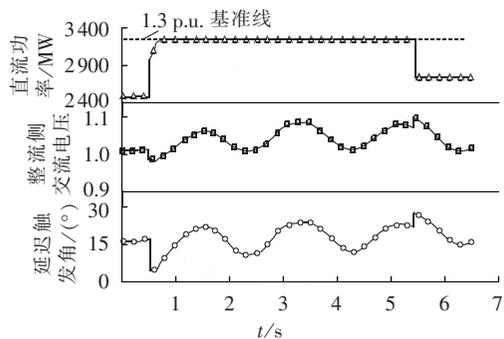
母线的电压,而提高整流站交流母线电压的最直接经济的措施是对整流站交流母线附近的大容量发电机组实行强励,防止整流站母线电压过低。

采用如下励磁配合控制策略进行测试:在金中直流双极闭锁后,分别提升其他 4 回直流功率的同时,整流站附近电厂增加 0.1 p.u. 的励磁阶跃,在直流暂时过负荷结束后使得整流站附近的各个发电机励磁参考值维持在 1.05 p.u.。对于闭锁故障的直流线路,在故障前,无功补偿装置按额定方式运行;在故障后,无功补偿装置全部退出运行。对于采取直流功率紧急提升措施的直流线路,在进行直流功率紧急提升前后,无功补偿装置均按额定运行方式运行。图 4 给出了测试结果(整流侧交流电压和机端电压为标么值)。

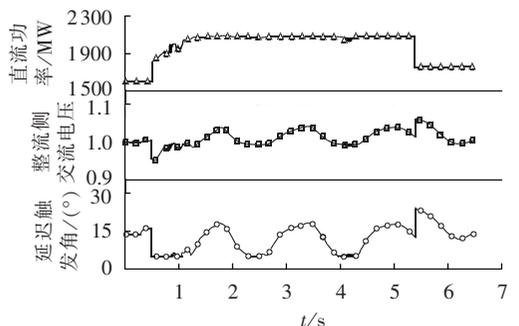
将图 3 与图 4 作比较可以看出,采取发电机励磁



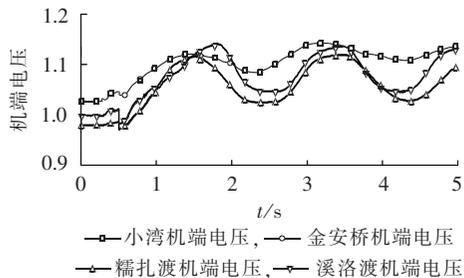
(a) 采取强励措施下金中直流双极闭锁后提升云广直流功率时功率与电压的关系



(b) 采取强励措施下金中直流双极闭锁后提升糯扎渡直流功率时功率与电压的关系



(c) 采取强励措施下金中直流双极闭锁后提升溪洛渡直流(双回任一回)功率时功率与电压的关系



(d) 采取强励措施下金中直流双极闭锁后提升各直流功率时送端电厂机端电压

图 4 测试结果(2)

Fig.4 Test results(2)

与直流紧急功率提升相配合后,直流线路输送功率在接受紧急功率提升指令后能得到有效的提升。与图 3 相比,图 4 中增加了整流站附近电厂强励措施,使得金中直流双极闭锁故障后整流站交流母线电压有一定的升高,有效避免了非故障直流整流侧定电流控制切换到定  $\alpha_{\min}$  控制,从而能有效地使直流实际输送

功率达到功率指令值。具体而言,图 4(b)和图 4(c)中糯扎渡直流和溪洛渡直流功率有效达到功率指令值,所以仿真结果直流功率很平稳;而图 4(a)中虽然云广直流功率相比图 3(a)要显著提高,但是结合图 4(a)中的延迟触发角仿真曲线可知,云广直流整流侧定电流控制还是会在定  $\alpha_{\min}$  控制和定电流控制 2 种模式之间切换,使得直流功率大幅波动。由图 4(d)可以看出,发电机励磁强励期间,各发电机机端电压均在 1.2 p.u. 以下,不会使发电机定子过电压。

## 2 基于轨迹灵敏度制定多回直流紧急功率提升策略

由于直流紧急提升功率需要大量无功支撑,为了避免系统电压恶化,也为了简化控制策略,参与紧急提升功率的直流并非越多越好,而是需要择优选择。本文提出了一种基于轨迹灵敏度的方法来制定多回直流紧急功率提升策略。

轨迹灵敏度是针对包含连续动态过程、离散动态过程、离散事件、不连续动作和跳变现象的混杂系统的一种分析手段,属于非线性动力学的研究方法,已被用于电力系统稳定性分析<sup>[15-16]</sup>。

本文方法的详细计算过程如下。

**a.** 假定系统有  $1 \sim n$  回直流,记为  $D_1 \sim D_n$ 。依次仿真计算各回直流双极闭锁故障对应的机组功角曲线,分别把最先失去稳定的发电机组确定为各回直流故障后对应的“领先机组”,领先机组在  $t$  时刻与参考机组之间的相角差计为  $\delta(t, 0)$ 。

**b.** 首先针对直流  $D_1$  进行计算; $D_1$  双极闭锁后,若紧急提升直流  $D_i$  的功率(提升量为  $\Delta P$ ),同时提升  $D_i$  附近机组的励磁电压,得到机组功角曲线,计算出此时领先机组在  $t$  时刻与参考机组之间的相角差  $\delta(t, \Delta P)$ 。则  $D_1$  双极闭锁后, $D_i$  紧急提升功率值对于提高送端领先机组稳定性的灵敏度  $S(1, i)$  的计算公式如下:

$$S(1, i) = [\delta(t, \Delta P) - \delta(t, 0)] / \Delta P \quad (2)$$

**c.** 依次针对  $1 \sim n$  回直流求解,得到全部直流双极闭锁后其余直流紧急提升功率的灵敏度集合:  $\{S(j, i) | j = 1 \sim n, i = 1 \sim n\}$ 。

**d.** 一旦发生直流闭锁故障,根据直流紧急协调控制策略表启动直流紧急协调控制;优先启动策略表上灵敏度最高的直流功率提升,同时向该直流附近机组发出提升机组励磁电压参考值的信号;若机组强励失败导致直流功率提升无法完成,则启动策略表上灵敏度第二高的直流功率提升,同时向该直流附近机组发出提升励磁电压信号;依此类推。

## 3 云电外送 5 回直流紧急功率提升策略

假设南方电网运行在 2015 年汛期典型大方式

下,5 回直流全功率运行。

### 3.1 计算领先机组

计算领先机组的结果如表 2 所示。

表 2 各回直流故障后对应的领先机组  
Table 2 Corresponding leading generator for different faulty HVDCs

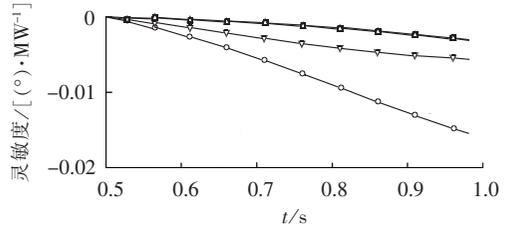
故障直流	领先机组
金中直流	梨园电站
云广直流	金安桥电站
溪洛渡直流(同塔双回)	溪洛渡电站
糯扎渡直流	糯扎渡电站

### 3.2 计算轨迹灵敏度

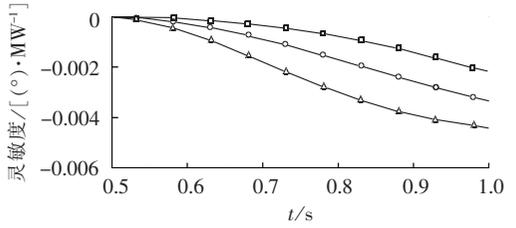
分别计算各回直流双极闭锁后其余直流紧急提升功率值对于提高送端领先机组稳定性的灵敏度。

金中直流闭锁 0.2 s 后,分别提升云广、溪洛渡、糯扎渡直流功率,计算提升直流功率对缓解送端领先机组(梨园机组)功角首摆的灵敏度,如图 5(a)所示。云广直流闭锁 0.2 s 后,分别提升金中、溪洛渡、糯扎渡直流功率,计算提升直流功率对缓解送端领先机组(金安桥机组)功角首摆的灵敏度,如图 5(b)所示。溪洛渡直流闭锁 0.2 s 后,分别提升金中、另一回溪洛渡、糯扎渡、云广直流功率,计算提升直流功率对缓解送端领先机组(溪洛渡机组)功角首摆的灵敏度,如图 5(c)所示。糯扎渡直流闭锁 0.2 s 后,分别提升金中、溪洛渡、云广直流功率,计算提升直流功率对缓解送端领先机组(糯扎渡机组)功角首摆的灵敏度,如图 5(d)所示。

可以看出,当金中直流双极闭锁时,提升云广直流的输送功率对缓解送端功角领先的梨园机组的失步效果最明显;当云广直流闭锁时,提升溪洛渡直流的输送功率对缓解送端功角领先的金安桥机组的失



(c) 溪洛渡直流双极闭锁后,不同直流紧急功率提升时溪洛渡机组功角的轨迹灵敏度



(d) 糯扎渡直流闭锁后,不同直流紧急功率提升时糯扎渡机组功角的轨迹灵敏度

图 5 轨迹灵敏度计算

Fig.5 Calculation of trajectory sensitivity

步效果最明显;当溪洛渡直流双极闭锁时,提升另一回溪洛渡直流的输送功率对缓解送端功角领先的溪洛渡机组的失步效果最明显;当糯扎渡直流双极闭锁时,提升云广直流的输送功率对缓解送端功角领先的糯扎渡机组的失步效果最明显。

最终形成如表 3 所示的策略表。

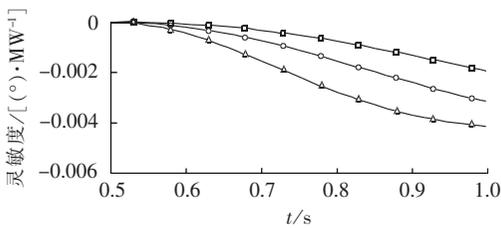
表 3 云电外送 5 回直流紧急功率提升策略表  
Table 3 Strategy of emergency DC power support for 5 HVDCs of Yunnan Power

故障直流	优先控制/强励机组	次优控制/强励机组	最后控制/强励机组
金中直流	云广直流/金安桥、小湾	溪洛渡直流/溪洛渡	糯扎渡直流/糯扎渡
云广直流	溪洛渡直流/溪洛渡	金中直流/梨园、阿海	糯扎渡直流/糯扎渡
溪洛渡直流(同塔双回)	溪洛渡直流/溪洛渡	云广直流/金安桥、小湾	金中直流/梨园、阿海
糯扎渡直流	云广直流/金安桥、小湾	溪洛渡直流/溪洛渡	金中直流/梨园、阿海

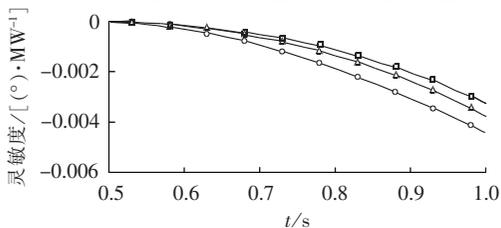
### 3.3 控制措施及控制效果

具体控制措施如下:故障直流双极闭锁 0.2 s 后,提升优先控制直流的强励机组励磁电压参考值 0.1 p.u.,并提升控制直流功率指令值 0.3 p.u.,持续 3 s 后,将直流提升功率指令值降为 0.1 p.u. 长期运行。对于闭锁故障的直流线路,在故障前,无功补偿装置按额定方式运行;在故障后,无功补偿装置全部退出运行。对于采取直流功率紧急提升措施的直流线路,在进行直流功率紧急提升前后,无功补偿装置均按额定运行方式运行。

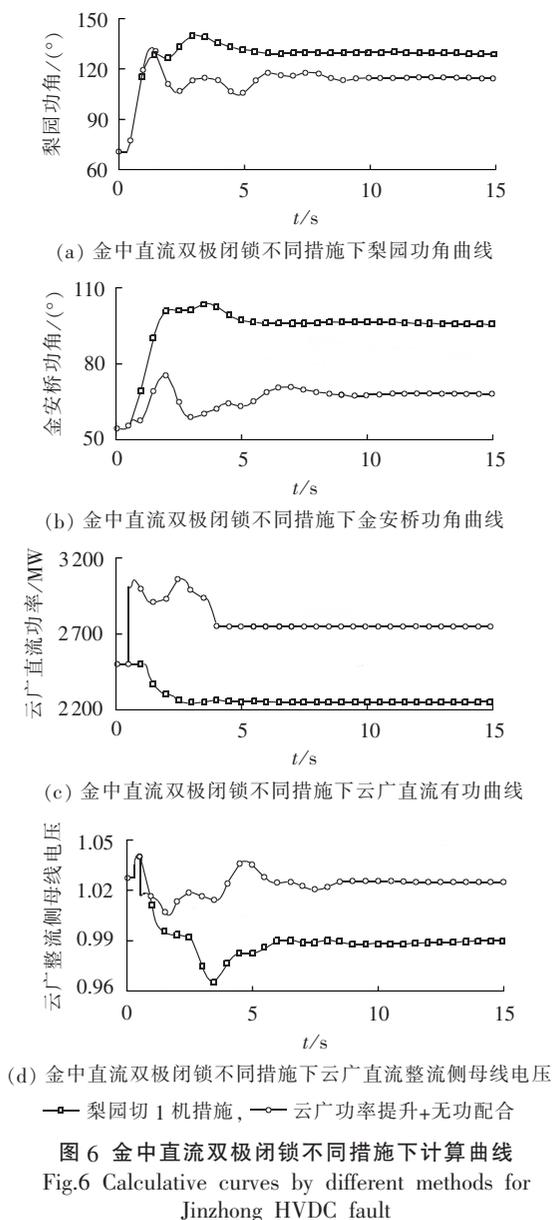
图 6 给出了金中直流闭锁故障后,采用本文方法和传统稳控切机措施时的计算曲线(云广整流侧母线



(a) 金中直流双极闭锁后,不同直流紧急功率提升时梨园机组功角的轨迹灵敏度



(b) 云广直流双极闭锁后,不同直流紧急功率提升时金安桥机组功角的轨迹灵敏度



电压为标幺值),其余直流闭锁故障后的计算曲线与此类似。

该方法与传统稳控措施的控制效果对比见表4,可以看出:该方法不仅可以大幅减少直流闭锁故障后的切机量,而且能够显著提高系统稳定水平。

表4 本文方法与传统稳控措施的效果对比  
Table 4 Comparison of results between proposed method and traditional stability control method

故障直流	传统稳控措施 (仅切机)	本文方法
溪洛渡直流	切溪洛渡2机	另一回溪洛渡功率提升+励磁配合; 不需切机; 稳定裕度提高
云广直流	切金安桥、小湾各2机 (600 MW×2+700 MW×2)	溪洛渡功率提升+励磁配合; 切金安桥2机; 稳定裕度提高
糯扎渡直流	切糯扎渡4机 (650 MW×4)	云广功率提升+励磁配合; 切糯扎渡2机
金中直流	切梨园1机 (600 MW×1)	云广功率提升+励磁配合; 不需切机; 稳定裕度提高

## 4 结论

本文提出了一种基于轨迹灵敏度选择最优直流进行紧急功率提升的方法,配合直流送端发电机组励磁控制,可以取得良好的控制效果。该方法物理意义明确,便于工程实施,经济性强。利用该方法,本文进一步给出了云电外送5回直流的紧急功率提升策略。仿真计算表明,该策略可以大幅减少直流闭锁故障后的切机量,显著提高系统稳定水平。

## 参考文献:

- [1] 徐政,高慧敏,杨靖萍. 南方电网中直流紧急功率调制的作用[J]. 高电压技术,2004,30(11):24-26.  
XU Zheng,GAO Huimin,YANG Jingping. Effect of HVDC emergent power modulation in South China Power System [J]. High Voltage Engineering,2004,30(11):24-26.
- [2] 杨卫东,薛禹胜,荆勇,等. 南方电网中直流输电系统对交流系统的紧急功率支援[J]. 电力系统自动化,2003,27(17):68-72.  
YANG Weidong,XUE Yusheng,JING Yong,et al. Emergency DC power support to AC power system in the South China Power Grid [J]. Automation of Electric Power Systems,2003,27(17):68-72.
- [3] 谢惠藩,张尧,夏成军. 特高压紧急直流功率支援策略研究[J]. 电力自动化设备,2008,28(8):1-7.  
XIE Huifan,ZHANG Yao,XIA Chengjun. Study of UHV emergency DC power support strategy [J]. Electric Power Automation Equipment,2008,28(8):1-7.
- [4] 陈汉雄,胡劲松. 金沙江一期送端特高压直流输电系统的协调控制[J]. 电网技术,2008,32(8):10-14.  
CHEN Hanxiong,HU Jingsong. Coordinated control of UHVDC transmission system at sending end of first phase Jinsha River project [J]. Power System Technology,2008,32(8):10-14.
- [5] 丁理杰,华文,徐政. 紧急直流功率支援时的无功功率配合研究[J]. 广东电力,2012,25(1):13-18.  
DING Lijie,HUA Wen,XU Zheng. Study on reactive power coordination during emergency DC power support [J]. Guangdong Electric Power,2012,25(1):13-18.
- [6] 谢惠藩,张尧,夏成军. SVC对特高压紧急直流功率支援的影响[J]. 电力自动化设备,2009,29(1):6-10.  
XIE Huifan,ZHANG Yao,XIA Chengjun. Influence of SVC on UHV emergency DC power support [J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(1):6-10.
- [7] 王珂,杨胜春,姚建国,等. 考虑无功功率协调控制的并行直流系统紧急功率支援[J]. 电力系统自动化,2011,35(18):103-107.  
WANG Ke,YANG Shengchun,YAO Jianguo,et al. Emergency DC power support with reactive power coordinated control for multi-circuit HVDC systems [J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(18):103-107.
- [8] 龙锦壮,韩民晓,郭小江,等. 多回直流紧急功率支援与电压稳定控制[J]. 现代电力,2010,27(1):30-34.  
LONG Jinzhuang,HAN Minxiao,GUO Xiaojiang,et al. Strategy of emergency power support and voltage stability control with HVDCs [J]. Modern Electric Power,2010,27(1):30-34.
- [9] 余涛,沈善德,任震. 华中—华东多回HVDC紧急功率转移控制

- 的研究[J]. 电网技术,2004,28(12):1-4.
- YU Tao, SHEN Shande, REN Zhen. Research on emergency power shifting control of multi-circuit HVDC systems from central China Power Grid to East China Power Grid[J]. Power System Technology, 2004, 28(12): 1-4.
- [10] 段瑶, 陈龙, 张步涵, 等. 华中电网的直流紧急功率支援问题[J]. 电网技术, 2012, 36(2): 104-108.
- DUAN Yao, CHEN Long, ZHANG Buhuan, et al. Research on emergency DC power support in Central China Power Grid[J]. Power System Technology, 2012, 36(2): 104-108.
- [11] 谢惠藩, 张尧, 夏成军. 基于 EEAC 的紧急直流功率支援优化策略[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2008, 36(6): 127-132.
- XIE Hui fan, ZHANG Yao, XIA Cheng jun. Optimization strategy of emergency DC power support based on extended equal area criterion[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2008, 36(6): 127-132.
- [12] 李皇. 区域交流互联电网中的直流紧急功率支援仿真研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
- LI Huang. The simulation study on emergency DC power support in regional power grid integrated with AC line[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009.
- [13] 翁华, 徐政, 许烽, 等. 基于广域测量信息的 HVDC 鲁棒控制器设计[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(4): 103-109.
- WENG Hua, XU Zheng, XU Feng, et al. Robust design of HVDC supplementary controllers based on WAMS signals[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(4): 103-109.
- [14] 杨卫东, 徐政, 韩祯祥. 混合交直流电力系统的非线性调制策略[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(7): 1-6.
- YANG Weidong, XU Zheng, HAN Zhenxiang. A nonlinear modulation strategy for hybrid AC/DC power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(7): 1-6.
- [15] 马进, 王景钢, 贺仁睦. 电力系统动态仿真的灵敏度分析[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(17): 20-27.
- MA Jin, WANG Jinggang, HE Renmu. Sensitivity analysis of power system dynamic simulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(17): 20-27.
- [16] 房大中, 秦益飞. 应用轨迹灵敏度计算临界切除时间新方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(14): 19-25.
- FANG Dazhong, QIN Yifei. A new trajectory sensitivities approach for CCT assessment[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(14): 19-25.

#### 作者简介:



王兴刚

王兴刚(1979—),男,云南绿春人,高级工程师,博士,主要研究方向为电力系统安全稳定分析、直流输电、电网规划、新能源并网(**E-mail**: wxg\_sunny@126.com);

张虹(1964—),女,陕西铜川人,教授级高级工程师,主要研究方向为电网规划

(**E-mail**: zhanghong0340@163.com);

徐政(1962—),男,浙江海宁人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为大规模交直流电力系统分析、直流输电与柔性交流输电、电力谐波与电能质量、风力发电技术与风电场并网技术(**E-mail**: hvdc@zju.edu.cn);

翁华(1986—),男,浙江衢州人,博士研究生,研究方向为电力系统稳定与控制(**E-mail**: wenghua@zju.edu.cn);

许烽(1988—),男,浙江绍兴人,博士研究生,研究方向为大规模交直流电力系统电磁暂态分析、直流输电系统(**E-mail**: xuf\_1988@zju.edu.cn)。

## Emergency power support for multiple DCs based on trajectory sensitivity

WANG Xinggang<sup>1</sup>, ZHANG Hong<sup>1</sup>, XU Zheng<sup>2</sup>, WENG Hua<sup>3</sup>, XU Feng<sup>2</sup>

(1. Yunnan Power Grid Corporation, Kunming 650011, China;

2. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

3. Economy Research Institute of State Grid Zhejiang Electric Power Company, Hangzhou 310008, China)

**Abstract:** A method based on trajectory sensitivity is proposed for the emergency DC power support during DC blocking fault, which determines the corresponding leading generator of faulty DC link, calculates the sensitivity of each healthy DC link to the improvement of system stability by its DC power increase, works out the emergency DC power support strategy by selecting the optimal DC links, and cooperates with the generator excitation control to achieve an excellent control performance. A strategy of emergency DC power support is given for 5 HVDCs of Yunnan Power. Results of simulative calculation show that, the proposed method can greatly reduce the amount of post-fault generator trip and significantly improve the system stability.

**Key words:** DC power transmission; sensitivity analysis; trajectory; emergency DC power support; electric generators; excitation control; blocking; stability