

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181459

# 特高压直流接入江西电网后的故障影响分析及其应对措施

舒展<sup>1</sup>, 张伟晨<sup>2</sup>, 王光<sup>3</sup>, 熊永新<sup>2</sup>, 姚伟<sup>2</sup>, 文劲宇<sup>2</sup>, 杨越<sup>1</sup>, 陶翔<sup>1</sup>

(1. 国网江西省电力有限公司电力科学研究院, 江西 南昌 330096; 2. 强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学电气与电子工程学院), 湖北 武汉 430074; 3. 国网江西省电力有限公司, 江西 南昌 330096)

**摘要:** 江西电网计划于 2020 年建成首条±800 kV 特高压直流输电工程, 西南电网大容量清洁能源将通过特高压直流输入江西电网, 同时江西受端系统安全稳定将面临挑战。为研究受端系统故障对交直流混联系统暂态稳定性的影响, 提出了一套离线仿真的分析方法。该方法涵盖了交直流混联系统可能存在的换相失败、闭锁以及连续换相失败后闭锁的运行风险分析, 并基于分析结果提出相应的安全控制措施。以雅中—江西±800 kV 特高压直流输电工程为例, 分析了直流阀直接闭锁和连续换相失败后闭锁两类故障, 对比两类故障对江西电网安全稳定运行造成的影响, 提出了配套的应对措施。仿真研究表明, 所提评估分析方法能有效指导电网运行与控制, 所提安全稳定控制措施能有效提高电力系统应对紧急事故的能力。

**关键词:** 特高压直流输电; 直流闭锁; 换相失败; 安控措施

## Fault analysis and its countermeasures of Jiangxi Provincial Grid after UHVDC line connection

SHU Zhan<sup>1</sup>, ZHANG Weichen<sup>2</sup>, WANG Guang<sup>3</sup>, XIONG Yongxin<sup>2</sup>, YAO Wei<sup>2</sup>, WEN Jinyu<sup>2</sup>, YANG Yue<sup>1</sup>, TAO Xiang<sup>1</sup>

(1. Electric Power Research Institute of State Grid Jiangxi Electric Power Company, Nanchang 330096, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology (Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, China; 3. State Grid Jiangxi Electric Power Co., Ltd., Nanchang 330096, China)

**Abstract:** The first ±800 kV UHVDC transmission project of Jiangxi Power Grid is planning to be built in 2020. The large scale of renewable energy in Southwest China will be input into Jiangxi Power Grid through UHVDC, thus, the safety and stability of Jiangxi Power Grid will face challenges. In order to study the influence of receiving side AC system's fault on the transient stability of AC/DC hybrid system, this paper proposes an offline simulation analysis method, which covers the influence analysis of possible commutation failure, blocking and continuous commutation failure of AC/DC hybrid system. Moreover, the appropriate safety and stability control measures are proposed based on the analysis. Taking the Yazhong-Jiangxi ±800 kV UHVDC transmission project as an example, the two types of faults of DC valve direct locking and continuous commutation failure are analyzed. The effects of two types of faults on the safe and stable operation of Jiangxi Power Grid are compared. The corresponding response measures are proposed. Simulation results show that the proposed method in this paper can effectively guide the operation and control of the power grid, and the proposed safety and stability control measures can effectively improve the ability of the power system to respond to emergencies.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51577075).

**Key words:** HVDC; DC blocking; commutation failure; security measures

## 0 引言

近年来, 随着江西经济的快速发展, 省内用电量也在稳步增长, 预计 2020 年全网最大负荷将达到

25 000 MW。江西电网“十三五”规划中, 计划 2018 年新建四川雅中—江西±800 kV 特高压直流输电工程(简称雅中直流), 该工程投运后将缓解江西省内电力供应不足问题<sup>[1]</sup>, 在华中特高压交流环网投运前, 江西电网呈现出明显的“强直弱交”特征。

随着特高压工程不断加速推进, 特高压接入后

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51577075)

省级电网适应性评估已成为研究热点。文献[2]分析了影响受端电网直流接入能力的主要因素，总结现有直流及新能源接入能力研究方法；文献[3]研究了特高压直流接入后湖北电网的消纳能力及稳定性分析；文献[4]研究了特高压交直流接入江西电网后，电网的短路电流变化特性；文献[5]在分析了特高压交直流系统运行特性的基础上，提出了一套特高压输电系统接入后的适应性评估方法。由于直流输电系统自身结构特征与运行特性，直流换相失败以及闭锁时常发生。在特高压直接接入背景下，电网的暂态稳定性分析方面，文献[6]在分析了直流送端系统的安全稳定性的基础上，从电气距离角度分析直流换相失败故障下风机暂态过电压问题；文献[7-9]分析了直流发生闭锁后电网的功角、电压、频率稳定以及联络线功率转移等问题，但是未考虑电网发生严重故障引发的直流持续换相失败后闭锁的情况。

对于特高压直流接入后，电网暂态稳定性的特殊性与复杂性，一部分研究从暂态特性恢复的角度，研究交直流混联系统发生故障后的应对措施，强化电网故障恢复能力，一部分研究从抑制换相失败控制策略的角度，避免直流阀发生换相失败及闭锁，从而提升电网的暂态稳定性。文献[10]分析了酒湖直流接入湖南电网后现有稳控措施的有效性，并提出切负荷与直流功率紧急控制协调配合的措施；文献[11-13]分别针对送、受端系统频率动态特性进行研究，文献[11-12]针对送端系统切机控制策略展开研究，文献[13]采取多直流紧急支援、精准切负荷等多措施协调控制的方法；在换相失败抑制方面，文献[14]研究利用直流功率速降以降低连续换相失败的技术措施；文献[15]提出一种基于虚拟换相面积缺乏量的换相失败抑制策略。文献[16]分析了调相机、大容量 SVG 对抵御直流持续换相失败的影响以及优化控制保护策略对换相失败的改善。现有的关于直流系统故障电网应对措施的研究多为针对直流直接闭锁故障，对于系统发生严重故障导致直流持续换相失败进而闭锁的故障类型研究较少。

基于特高压直流输电系统可能存在的运行风险等问题，本文提出了一套受端系统严重故障分析方法，该方法包括电网网架结构分析、严重故障校验和安全稳定措施校核。以雅中±800 kV 特高压直流输电工程为案例，利用离线仿真软件电力系统分析综合程序(Power System Analysis Software Package, PSASP)分析了江西电网在特高压直流投入后可能面临的运行风险，并针对严重故障提出相应的安全稳定控制措施，保障电力系统的安全稳定和运行。

## 1 特高压直流输电系统严重故障暂态稳定性分析方法

特高压直流输电具有传输容量大、传输距离长、线路损耗小等优点<sup>[17-18]</sup>，特高压直流输电系统接入电网后，网架结构发生变化，受端交流系统通过特高压直流线路注入大量功率，但是直流换流阀存在的换相失败、闭锁等因素则会影响混联系统的安全稳定运行。

本文建立了一套针对交直流混联系统暂态稳定性的研究分析方法，包含直流阀直接闭锁、连续换相失败后闭锁两类闭锁问题。在分析网架结构的基础上，通过离线仿真的方式分析各类故障严重程度，针对性地设计相应的安控措施，并应用于实际运行中作控制措施匹配。研究流程如图 1 所示。

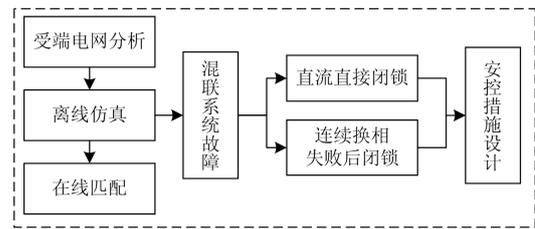


图 1 特高压直流接入严重系统故障研究流程图

Fig. 1 Flow chart of research on severe system failure after UHVDC access

### 1.1 受端电网分析

目前，国内的特高压直流输电系统主要采用常规接入模式或分层接入模式。特高压直流输电系统接入后，需基于新的网架结构、省间联络线及省内各线路输电能力等因素确定合理的潮流运行方式，并确定省内开机容量及负荷水平。

### 1.2 故障仿真分析

在电网运行中，直流换流阀可能会出现直接的单极/双极闭锁、换相失败以及连续换相失败后闭锁的风险。特高压直流线路向受端交流系统注入大量功率，而混联系统存在的这些运行风险则可能伴有大量潮流转移，电压及频率的抖动、失稳等问题。因此，有必要对特高压直流接入后的交直流混联系统进行暂态稳定性分析，分析混联系统可能存在的运行风险，并提出具有针对性的安全保护措施。

### 1.3 系统故障校验及安控措施设计流程

系统故障校验及安控措施设计流程图如图 2 所示。离线仿真详细流程如下。

步骤 1：基于实际电网运行数据确定典型潮流边界条件。

步骤 2：对直流系统进行直接闭锁故障分析，

故障类型包括直流单极闭锁、直流双极闭锁。若校验通过则继续步骤 3, 否则投入安全控制措施, 再重新进行步骤 2。

步骤 3: 对电网进行严重故障校验, 包括三永 N-2 故障、开关拒动故障的故障校验, 校验直流线路是否会发生换相失败以及持续的换相失败后闭锁。若校验通过则继续步骤 4, 否则投入安全控制措施, 再重新进行步骤 3。

步骤 4: 整理最终应对直流直接闭锁、直流持续换相失败后闭锁的安控措施, 结束计算。

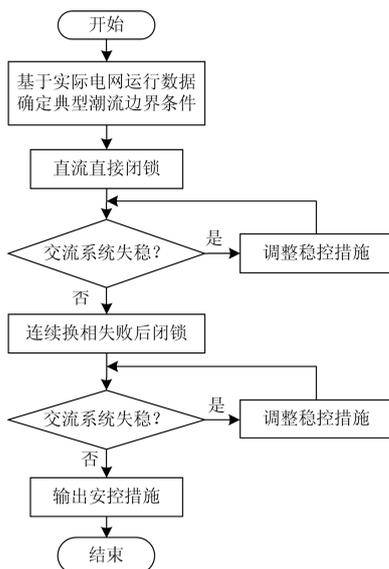


图 2 直流故障校验及安控措施设计流程图

Fig. 2 Flow chart of DC fault verification and safety control measures design

## 2 江西受端电网网架结构

江西电网同华中主网由鄂赣 3 回 500 kV 交流线路连接, 同川渝电网由雅中±800 kV 特高压直流双回线路互联, 特高压直流采用分层接入方式, 高压侧接入 500 kV 交流电网, 低压侧接入 1 000 kV 交流电网。江西电网网架结构如图 3 所示。

考虑雅中直流投运初期, 武汉至南昌、长沙至南昌 1 000 kV 交流线路未建成投运, 江西 1 000 kV 交流系统还未成熟的过渡阶段, 特高压直流双极均只有高压阀组接入江西 500 kV 交流系统, 低压阀组未投入运行。

基于 2020 年丰平大潮流数据, 江西电网总负荷量为 25 404 MW, 总开机功率为 20 721 MW, 鄂赣联络线磁湖-永修单回 500 kV 线路输出 1.8 MW, 咸宁-梦山双回 500 kV 线路输入 384.2 MW。特高压直流落地功率为 4 620 MW, 占江西电网总负荷量的 22%, “强直弱交”特征显著<sup>[19]</sup>。



图 3 江西电网网架结构示意图

Fig. 3 Structure diagram of Jiangxi Power Grid

## 3 故障特性分析及其应对措施研究

本文中采用中国电科院开发的 PSASP 仿真程序, 版本号 7.32, 数据模型采用江西 2020 年丰平大数据, 内含雅中直流网架结构。通过 PSASP 中暂态仿真环节, 设置换流阀闭锁模拟直流直接闭锁故障, 设置省内电网三永 N-2 故障及开关拒动类故障模拟连续换相失败导致闭锁的故障类型。

### 3.1 特高压直流闭锁后电网稳定性分析

雅中直流双回线路传输功率为 5 000 MW, 江西受端电网的落地功率为 4 620 MW。特高压直流输电功率大, 一旦发生故障, 如直流单极、双极闭锁, 江西受端系统将面临大量功率转移, 交流系统电压、频率波动, 江西电网的安全稳定性面临考验。

#### 3.1.1 功率转移

雅中直流双回线路向江西省内输入大量功率, 直流闭锁将会带来大量功率转移, 表 1 为雅中直流分别发生单极闭锁、双极闭锁时, 主要潮流断面功率转移情况。

表 1 江西省内部分潮流断面

Table 1 Power flow section of Jiangxi Power Grid

名称	线路名称	送电功率/MW		
		无故障	单极闭锁	双极闭锁
鄂赣联络线	咸宁—梦山(双回)	384	1 843	3 284
	磁湖—永修(单回)	1.9	924	1 886
直流落点	昌换—东乡(双回)	2 541	1 311	86
	昌换—南昌东(双回)	2 086	1 000	-86

正常运行状态, 雅中直流输入功率分别向东乡和南昌方向分配 55%、45% 功率, 单极闭锁后, 直流传输功率只有正常运行条件下的一半功率, 直流落点功率分配比例未有明显波动; 雅中直流发生闭锁造成江西电网大量有功缺失, 缺额功率全部由湖北、华中电网经三回 500 kV 联络线补充进来, 如表 1 所示, 雅中直流单极、双极闭锁, 江西电网分别从湖北电网输入 2 767 MW、5 170 MW。

### 3.1.2 电压特性

直流逆变侧换流器闭锁后, 释放出大量无功, 无功功率流入交流系统, 省内各等级母线电压都出现电压突增现象。如图 4 所示, 雅中直流发生单极闭锁、双极闭锁后, 江西省内 500 kV 母线最高瞬时电压均发生在东乡 500 kV 母线, 分别达到 1.05 p.u.、1.12 p.u.。

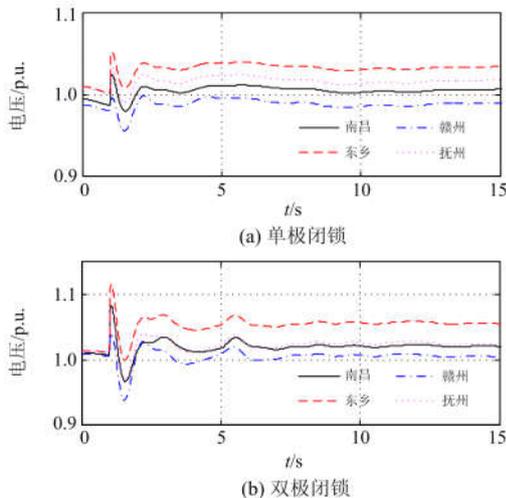


图 4 特高压直流闭锁后 500 kV 母线电压变化曲线  
Fig. 4 500 kV bus voltage following UHVDC block

### 3.1.3 频率特性

雅中直流线路发生闭锁故障, 省内瞬时大量有功缺失。在闭锁瞬间, 频率出现大幅抖动, 其中单极闭锁、双极闭锁后省内频率最低点分别达到 49.18 Hz、48.53 Hz, 而后逐渐趋于平稳。如图 5 所示。

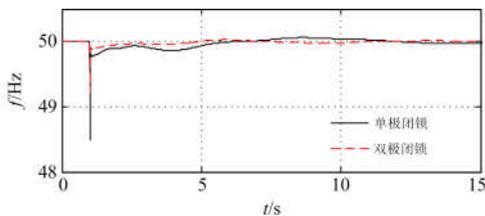


图 5 特高压直流闭锁后频率变化曲线  
Fig. 5 Frequencies following UHVDC block

分析了雅中直流双回线路分别发生单极闭锁、双极闭锁后江西电网的暂态稳定特性: 当雅中直流

发生闭锁故障后, 缺失功率可通过鄂赣联络线从华中主网补充; 各等级母线电压出现轻微抖动, 未出现过电压; 瞬时的功率波动会使得江西电网出现频率波动, 瞬时极值超出允许的 $\pm 0.2$  Hz 波动范围, 但持续时间极短, 频率瞬间恢复至 49.8 Hz 以上。总的来说, 江西电网在出现特高压直流闭锁故障后, 可实现安全运行。

### 3.2 连续换相失败致直流闭锁

交流系统故障可能会引起直流换流阀发生换相失败。现行电力系统具有较强的稳定性,  $N-1$  故障下电网可以保证不失稳不损失负荷。但是当交流侧发生三永  $N-2$  或开关拒动等严重故障时, 直流系统可能出现换相失败, 甚至连续的换相失败问题, 在故障清除后若直流换流阀仍未能恢复正常导通, 直流系统将触发闭锁保护。

本小节中介绍一种中开关拒动故障类型, 该类型故障对交直流混联系统的暂态稳定性带来巨大考验, 极易导致换流阀出现换相失败甚至闭锁。以特高压雅中直流近区站点: 南昌 500 kV 变电站为例, 分析了在交流系统故障变电站开关拒动后江西电网的暂态稳定性。

#### 3.2.1 中开关拒动故障定义及故障设置

为保障供电可靠性, 500 kV 变电站主接线一般采用 3/2 接线方式。当某串发生一回线三相故障、中开关单相或三相拒动导致同串另一回线路或元件跳闸的情况称为中开关单相或三相拒动严重故障<sup>[20-21]</sup>。如图 6 所示为某 500 kV 变电站主接线方式。

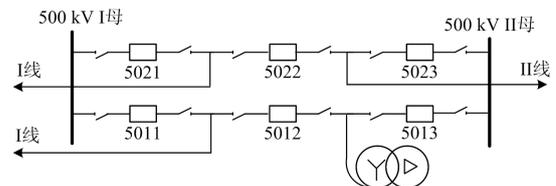


图 6 变电站接线图

Fig. 6 Substation wiring

500 kV 中开关三相拒动故障动作时序如表 2 所示。

表 2 中开关拒动故障动作时序

Table 2 Medium switch refusal fault action timing

过程	501 串	502 串
故障时刻	1 s	
主保护动作	1.09 s 跳本侧三相开关	
后备保护动作时间	1.3 s 跳同串本侧三相开关	
	1.3 s 跳下网变压器	1.4 s 跳对侧出线

#### 3.2.2 中开关拒动故障分析

南昌 500 kV 变电站采用 3/2 接线方式, 501 串

I 线为南昌-进贤 I 回(后称南进 I 回), 当南进 I 回发生三相短路接地故障, 变电站 5012 中开关拒动, 故障发生后江西电网与华中主网自动解列, 解列时间: 1.82 s 咸梦 II 回线解列, 2.12 s 磁永线解列。南昌换流站(后称赣昌换)母线长时间处于低压状态, 雅中直流双回线路发生多次换相失败, 在 3.71 s 触发闭锁保护。

图 7(a)为雅中直流功率, 图 7(b)为直流落点赣昌换母线电压。南昌 5012 中开关拒动故障过程中, 江西电网各等级母线电压出现不同程度的失压并伴有小幅振荡; 省内各发电机功角出现小幅振荡, 未出现机组功角失稳; 鄂赣联络线解列, 雅中直流双回线路闭锁, 省内出现大量功率缺额。

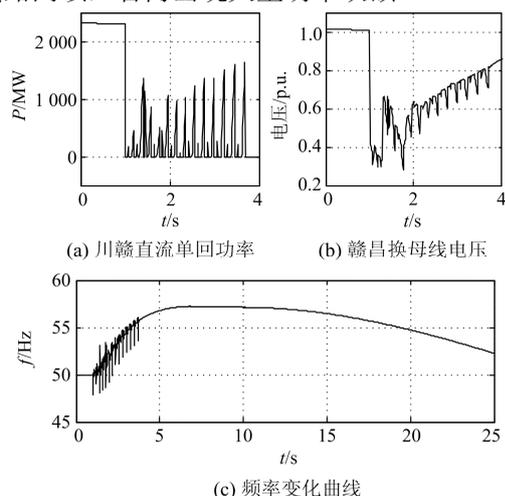


图 7 南昌 5012 中开关拒动后系统暂态特性

Fig. 7 Transient characteristics of the system after the switch rejected in Nanchang 5012

南昌站中开关拒动故障发生后, 江西电网电压偏低, 发电机节点电磁功率迅速下降, 发电机转速升高, 江西电网频率也就持续增加, 随着故障的发展, 江西电网频率在增加至最高点后持续下降。

特高压直流近区发生变电站中开关拒动故障, 江西电网的暂态稳定性受到极大冲击。故障后江西电网脱离华中主网, 雅中直流双回线路换流阀在发生多次换相失败后出现闭锁, 省内大量有功缺额, 各级母线电压均出现失压, 频率短时大幅上升而后持续跌落, 江西电网接近崩溃。

### 3.3 安全稳定控制措施设计

上文中先后分析了特高压直流输电系统在发生直接闭锁和连续换相失败后闭锁时江西受端电网的暂态稳定特性。研究中发现, 江西电网及华中主网足够坚强, 可以抵御特高压直流阀组直接单极闭锁和直接双极闭锁故障, 电网在瞬时波动后可自行恢

复平稳运行。但是当交流系统发生严重故障, 直流阀组发生连续换相失败进而触发闭锁保护时, 江西电网不能自行恢复, 且面临崩溃风险, 需采取应对措施以避免大面积停电事故。

针对中开关拒动故障江西电网失稳的问题, 本节中提出一套应对特高压直流输电系统发生连续换相失败导致特高压直流阀闭锁的安全稳定控制措施。

#### 3.3.1 切负荷策略

常规的切负荷控制策略采取低压或低频减载方式。对于中开关拒动故障, 故障发生后短小时内频率出现短时迅速增加而后降低的趋势, 如图 7(c)所示。低频减载在故障初期的 1~2 s 内不能触发动作, 不适用于暂态快速动作。

在暂态过程中, 江西电网持续低压状态, 采取低压减载的切负荷策略可有效地实现短时触发动作, 达到抬升电压的目的。

在中开关拒动故障中, 换流站母线电压长时间未能恢复至较高水平, 直流出现持续换相失败进而闭锁。相较于常规的低压减载切负荷策略, 需着重增加换流站近区的切负荷量。根据距离换流站电气距离的远近, 优先切除电气距离较近的地区负荷, 使换流站母线电压得到迅速抬升, 直流线路快速恢复, 实现正常导通。低压减载动作时序如表 3 所示。

表 3 低压减载动作时序

Table 3 Low pressure load shedding timing

轮次	启动电压/p.u.	延时/s
特殊轮	0.7	0.4
第一轮	0.82	5
第二轮	0.8	2
第三轮	0.8	1

#### 3.3.2 联络线解列策略

常规的联络线解列策略采取振荡解列的方式, 可实现两侧交流系统失步开断。对于中开关拒动类及其他严重故障类型, 江西电网与华中主网间出现严重摆动, 现有的解列策略不能够及时切断两侧的交流联系, 江西电网交流故障将加重整个华中主网的负担<sup>[22]</sup>。

为避免故障范围的扩大, 缩短特高压直流恢复时间, 提出联络线快速解列优化策略, 参数设置如表 4 所示。

1) 校验全网各站点中开关拒动故障, 记录可能触发联络线解列的故障类型, 并通过对应故障点开关动作情况确定故障位置。

2) 为避免一回(两回)线路动作, 而另外两回(一回)线路未动作或延迟动作, 快速解列方案采取一处

触发、三回线路同时动作的方式。

3) 当系统检测到发生对应的开关拒动等严重事故, 联络线解列装置启用快速解列配置参数, 实现提前动作; 未检测到严重故障类型, 则仍采用原解列方案。

表 4 联络线解列参数设置

方案	解列方式	启动电压	振荡次数	延时
原方案	振荡解列	0.5 p.u.	2	0
快速解列方案	振荡解列	0.5 p.u.	1	0.3 s

### 3.4 安全稳定控制措施设计

#### 3.4.1 中开关拒动故障安控措施校验

应对措施投入后, 江西电网的暂态特性得到明显提升。表 5 为部分严重中开关拒动故障的校验结果。

表 5 应对措施投入后系统切机切负荷量

站点	开关	切机量/MW	切负荷量/MW
南昌	5012	1 376	2 180
	5042	1 376	2 200
进贤	5012	756	2 064
	5022	756	2 180
永修	5012	—	2 180
	5032	—	2 180
	5052	—	1 580

表 5 中各中开关拒动故障发生后均启用联络线快速解列方案, 直流线路在多次换相失败后可恢复正常导通。各组措施中, 江西电网切机量均少于切负荷量, 出现不同程度的功率“盈余”; 在暂态恢复的过程中, 省内各台发电机的机械功率下降, 相应的有功输出也都有不同程度的降低, 功率降低总量约与盈余功率总量相当。

在中开关拒动故障中, 应对措施投入后, 江西电网各等级母线电压可快速恢复至额定电压, 如图 8 为措施投入后江西部分 500 kV 母线电压。

严重中开关拒动故障在配备了相应的应对措施后, 鄂赣联络线在短时间内主动解列, 使江西电网

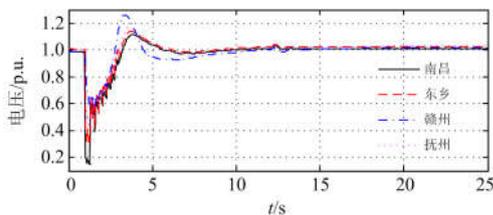


图 8 应对措施投入后 500 kV 母线电压变化曲线  
Fig. 8 500 kV bus voltage after control measures

与华中主网断开, 雅中直流双回线换流阀在经历了若干次换相失败后皆可恢复正常导通, 避免了直流闭锁对江西电网带来的冲击。

图 9 为江西省内部分节点频率曲线, 图 10 为雅中直流线路功率曲线。如图 9 所示, 在故障瞬间, 南昌 500 kV 母线频率达到 53 Hz 并在短时间内出现剧烈振荡, 频率的剧烈波动主要与雅中直流双回线路出现多次换相失败有关: 鄂赣联络线在 1.6 s 时断开, 雅中直流双回线路在恢复正常导通前发生多次换相失败, 大量的有功波动使江西省内各节点频率也出现大幅波动现象。

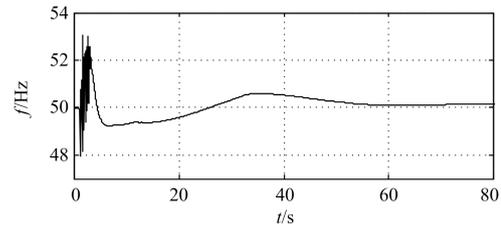


图 9 应对措施投入后系统频率变化曲线  
Fig. 9 Frequencies after control measures

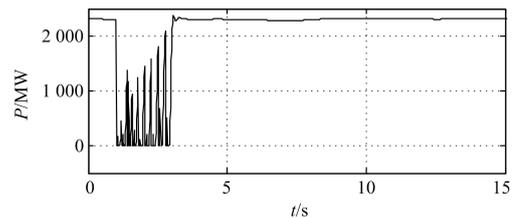


图 10 应对措施投入后直流功率变化曲线  
Fig. 10 UHVDC power after control measures

#### 3.4.2 联络线快速解列策略验证

以南昌 5012 中开关拒动故障为例, 设置两组对照方案算例, 方案如下。

方案 1: 联络线解列方式采取现有的振荡解列方式(咸梦双回线路 1.8 s 触发解列, 磁永线 2.1 s 触发解列), 切机切负荷策略与原方案一致;

方案 2: 联络线解列采取时间控制解列, 在故障后 0.8 s 完成解列, 切机切负荷策略与原方案一致;

方案 3: 联络线解列采取快速解列方案。

方案 1、2 中仅对联络线解列方式进行对比分析, 切机切负荷策略与原方案一致。措施效果如表 6 所示。

经仿真验证, 在与表 5 中南昌 5012 中开关措施同等切机切负荷条件下, 方案 1 和方案 2 中雅中直流双回线路都在约 3.7 s 时触发闭锁。相同切负荷策略, 江西电网未能恢复稳定。

进一步增加切负荷量, 方案 2 中当江西电网整体切负荷量达到 3 500 MW 时, 雅中直流可恢复导通;

表6 不同联络线解列时间切负荷措施对比

Table 6 Different tangent times correspond to the amount of load shedding

方案编号	故障时刻/s	联络线解列时间	控制措施切负荷量/MW	直流状态
1	1	咸梦线 1.8 s 磁永线 2.1 s	3 760	闭锁
2	1	1.8 s	3 450	闭锁
3	1	三回线 1.6 s	2 180	3.6 s 恢复

方案1中切负荷量达到5 800 MW时,雅中直流可恢复导通,而此时的切负荷量已超出雅中直流额定传输功率。因此,在中开关拒动二类故障中采取联络线快速解列的控制策略,可有效减小江西电网的切负荷量。

#### 4 结论

本文针对特高压直流输电系统接入后,直流换流阀存在的换相失败及闭锁对交直流混联系统暂态稳定性的影响,提出一套针对交直流混联系统暂态稳定性的研究分析方法。基于该方法分析了雅中特高压直流接入后江西电网的暂态稳定特性,并提出具有针对性的安全保护措施。主要结论如下:

1) 江西电网足够坚强以抵御特高压直流直接单极/双极闭锁故障,但是存在部分严重交流故障导致直流的持续换相失败并闭锁,江西电网不能自行恢复;

2) 对于中开关拒动等严重故障类型,在切除一定的负荷及失稳机组,部分故障需配合联络线快速解列措施后,江西电网可较快恢复平稳运行;

3) 对于中开关拒动类型故障,在研究故障应对措施的同时,也应从保护系统本身出发,优化保护动作逻辑,缩短故障切除时间。

#### 参考文献

- [1] 陈波,周宁,舒展,等. 雅中—江西特高压直流接入对江西电网影响分析[J]. 江西电力, 2016, 40(4): 13-17.  
CHEN Bo, ZHOU Ning, SHU Zhan, et al. Yazhong-Jiangxi UHVDC access impact on Jiangxi Power Grid[J]. Jiangxi Electric Power, 2016, 40(4): 13-17.
- [2] 李兆伟,翟海保,刘福锁,等. 多馈入交直流混联受端电网直流接入能力研究评述[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8): 142-148.  
LI Zhaowei, ZHAI Haibao, LIU Fusuo, et al. DC access capability study for multi-infeed HVDC power transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 142-148.
- [3] 舒东胜,王甜,徐箭,等. 湖北电网消纳蒙鄂特高压直

流能力研究[J]. 电力建设, 2015, 36(3): 59-64.

SHU Dongsheng, WANG Tian, XU Jian, et al. Accommodating power ability of UHVDC transmission lines from Mengxi to Hubei Province[J]. Electric Power Construction, 2015, 36(3): 59-64.

- [4] 陈波,舒展,周宁,等. 计及短路电流直流分量的断路器实际开断能力分析[J]. 江西电力, 2017, 41(4): 17-20, 26.

CHEN Bo, SHU Zhan, ZHOU Ning, et al. Analysis of actual breaking capacity of circuit breaker considering DC component of short-circuit current[J]. Jiangxi Electric Power, 2017, 41(4): 17-20, 26.

- [5] 唐晓骏,谢岩,罗红梅,等. 特高压接入后省级电网适应性评估的方法和实例[J]. 电网技术, 2017, 41(5): 1476-1483.

TANG Xiaojun, XIE Yan, LUO Hongmei, et al. Assessment method and instance of provincial grid adaptation after UHV line connection[J]. Power System Technology, 2017, 41(5): 1476-1483.

- [6] 潘捷,郑惠萍,张红丽,等.  $\pm 800$  kV 雁淮特高压直流送端电网安全稳定特性及控制策略[J]. 中国电力, 2018, 51(4): 7-14.

PAN Jie, ZHENG Huiping, ZHANG Hongli, et al. Security stability analysis and control strategy of sending-end power grid of  $\pm 800$  kV Yan-Huai UHVDC[J]. Electric Power, 2018, 51(4): 7-14.

- [7] 杨雄平,罗向东,李扬絮,等. 南方电网直流闭锁故障时受端系统电压稳定问题分析[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(22): 40-43.

YANG Xiongping, LUO Xiangdong, LI Yangxu, et al. Voltage stability analysis of receiving-end system in China South Power Grid under the DC block faults[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(22): 40-43.

- [8] 郝梦竹,王青,李文启,等. 不同直流闭锁故障对弱交流联络线功率波动影响机制[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(19): 88-94.

HAO Mengzhu, WANG Qing, LI Wenqi, et al. Power fluctuation influence mechanism of weak AC tie-line caused by different DC block[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(19): 88-94.

- [9] 卫鹏,周前,汪成根,等.  $\pm 800$  kV 锦苏特高压直流双极闭锁对江苏电网受端系统稳定性的影响[J]. 电力建设, 2013, 34(10): 1-5.

WEI Peng, ZHOU Qian, WANG Chenggen, et al. Impact of bipolar blocking in  $\pm 800$  kV Jinsu UHVDC power transmission system on stability of Jiangsu Grid's receiving-end system[J]. Electric Power Construction, 2013, 34(10): 1-5.

- [10] 芮虎, 李晨坤, 崔挺, 等. 酒泉—湖南特高压直流对湖南电网稳控策略的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(18): 114-119.  
GUO Hu, LI Chenkun, CUI Ting, et al. Influence of the UHVDC project from Jiuquan to Hunan on stability control[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(18): 114-119.
- [11] 陈懿, 刘涤尘, 吴军, 等. 异步联网送端系统紧急切机控制方法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(8): 131-137.  
CHEN Yi, LIU Dichen, WU Jun, et al. Emergency generator tripping control method for sending end of asynchronous interconnection system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(8): 131-137.
- [12] 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.
- [13] 董希建, 罗剑波, 李雪明, 等. 交直流混联受端电网频率紧急协调控制技术及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(18): 59-66.  
DONG Xijian, LUO Jianbo, LI Xueming, et al. Research and application of frequency emergency coordination and control technology in hybrid AC/DC power grids[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(18): 59-66.
- [14] 张玉红, 姜懿郎, 秦晓辉, 等. 改善直流因连续换相失败导致闭锁的功率指令速降措施研究[J/OL]. 电网技术: 1-8 [2018-10-31]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2410.TM.20180726.1156.009.html>.  
ZHANG Yuhong, JIANG Yilang, QIN Xiaohui, et al. The research on the countermeasure via fast decrease of DC power reference to alleviate DC block down risk due to successive commutation failure[J/OL]. Power System Technology: 1-8 [2018-10-31]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2410.TM.20180726.1156.009.html>.
- [15] 刘磊, 林圣, 何正友. 基于虚拟换相面积缺乏量的 HVDC 系统连续换相失败抑制策略[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(18): 5361-5368.  
LIU Lei, LIN Sheng, HE Zhengyou. A novel method based on virtual commutation area insufficient to mitigate the continuous commutation failure for HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(18): 5361-5368.
- [16] 付俊波, 凌卫家, 邓晖, 等. 抵御浙江电网多馈入直流系统持续换相失败措施[J]. 电力建设, 2017, 38(8): 102-108.  
FU Junbo, LING Weijia, DENG Hui, et al. Measures for continuous commutation failures of multi-infeed HVDC system in Zhejiang Power Grid[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(8): 102-108.
- [17] ZOU Guibin, HUANG Qiang, SONG Shenglan, et al. Novel transient-energy-based directional pilot protection method for HVDC line[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 159-168. DOI: 10.1186/s41601-017-0047-z.
- [18] RAHMAN M H, XU Lie, YAO Liangzhong. Protection of large partitioned MTDC networks using DC-DC converters and circuit breakers[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 170-178. DOI: 10.1186/s41601-016-0030-0.
- [19] 郑超, 马世英, 申旭辉, 等. 强直弱交的定义、内涵与形式及其应对措施[J]. 电网技术, 2017, 41(8): 2491-2498.  
ZHENG Chao, MA Shiyong, SHEN Xuhui, et al. Definition, connotation and form of strong HVDC and weak AC and countermeasures for stable operation of hybrid power grid[J]. Power System Technology, 2017, 41(8): 2491-2498.
- [20] 张建新. 广东电网 2015 年中开关拒动影响分析[J]. 科技信息, 2010(25): 768-769.  
ZHANG Jianxin. Influence of breaker in the middle rejection in Guangdong power grid in 2015[J]. Science & Technology Information, 2010(25): 768-769.
- [21] 李明节. 大规模特高压交直流混联电网特性分析与运行控制[J]. 电网技术, 2016, 40(4): 985-991.  
LI Mingjie. Characteristic analysis and operational control of large-scale hybrid UHV AC/DC power grids[J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 985-991.
- [22] 陈浩, 申屠刚, 曹路, 等. 交流特高压电网投产初期第二、三道防线建设与思考[J]. 华东电力, 2014, 42(12): 2770-2775.  
CHEN Hao, SHEN Tugang, CAO Lu, et al. Construction of the second and third defense lines of UHV AC grid[J]. East China Electric Power, 2014, 42(12): 2770-2775.

收稿日期: 2018-11-21; 修回日期: 2019-02-20

作者简介:

舒展(1977—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统运行与控制; E-mail: shuzhan2003@126.com

张伟晨(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为特高压交直流混联系统稳定分析; E-mail: m201771316@hust.edu.cn

姚伟(1983—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为大电网稳定性分析与控制、柔性直流输电系统及其控制等。E-mail: w.yao@hust.deu.cn

(编辑 葛艳娜)