

DOI: 10.7667/PSPC180558

特高压交直流接入对江西电网暂态稳定的影响分析

辛建波^{1,2}, 王玉麟¹, 舒展², 陈波², 程思萌²

(1. 南昌大学信息工程学院, 江西 南昌 330031; 2. 国网江西省电力科学研究院, 江西 南昌 330096)

摘要: 雅中特高压直流及华中特高压交流环网接入江西电网后, 电网特性发生根本性变化, 暂态稳定约束成为江西电网运行及控制主要约束条件。深入研究交直流混联背景下江西电网暂态稳定水平及其影响因素具有现实指导意义。基于 PSASP 程序建立江西电网 220 kV 以上交流系统及±800 kV 分层直流模型, 仿真分析了直流系统典型故障、直流近区交流系统典型故障及交流环网对电网暂态稳定的影响。提出了提升暂态稳定水平的控制策略及应对措施, 为特高压入赣后电网安全稳定运行奠定了基础。

关键词: 特高压直流; 暂态稳定; 控制策略; 交流环网

Transient stability impact analysis of UHV AC/DC access to Jiangxi power grid

XIN Jianbo^{1,2}, WANG Yulin¹, SHU Zhan², CHEN Bo², CHENG Simeng²

(1. School of Information Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China;
2. State Grid Jiangxi Electric Power Research Institute, Nanchang 330096, China)

Abstract: Since the Yazhong UHVDC and Huazhong UHVAC ring networks are connected to Jiangxi power grid, power grid characteristics have changed completely. Transient stability constraints become the main reason of constraints for operation and control of Jiangxi power grid. Under the background of AC-DC hybrid, it has practical significance that studying deeply on the transient stability level and its influenced factors of Jiangxi power grid. Based on the PSASP program, this paper establishes a voltage level above 220 kV system and a ±800 kV layered DC model in Jiangxi power grid. It simulates and analyses typical faults in DC systems, typical faults in DC near-area AC systems, and effects of AC ring network on grids transient stability, presenting control strategies and countermeasures to improve the level of transient stability, which lays the foundation for safe and stable operation of UHV AC/DC access to Jiangxi power grid.

This work is supported by National Major Research and Development Program of China (No. 2018YFB0904001).

Key words: UHVDC; transient stability; control strategy; AC ring network

0 引言

近年来随着江西经济的高速发展, 全省用电量不断攀升, 预计 2020 年全网最大负荷将达到 2 500 万 kW, 负荷高峰期存在电力供应不足问题。与此同时, 为实施“西电东送”国家战略, 促进跨大区、跨流域的资源优化配置^[1-3], 规划 2018 年新建四川雅中至江西南昌±800 kV 特高压直流输电工程, 2020 年投入运行。届时在充分利用西南水电, 减少弃水的同时, 也缓解了江西电网负荷高峰时的供电压力。

雅中特高压直流投运后, 将替代部分江西本地

常规机组。导致受端电网系统转动惯量下降, 系统调频容量减少, 电网频率特性恶化。另外, 由于直流系统的无功源-荷转换特性^[4], 特高压直流故障过程中需要从系统吸收大量无功, 造成电压波动变大。同时, 由于直流传输功率较大, 直流系统故障后的功率大量缺额将不可避免地江西受端电网的稳定性造成巨大的冲击。所以, 分析特高压直流接入对江西电网暂态稳定的影响尤为重要。

随着特高压输电在我国不断加速推进, 特高压接入后对省级电网产生的影响逐渐成为研究热点。文献[5-7]分析了特高压直流双极闭锁故障对系统稳定的影响。文献[8-10]研究了特高压接入后省级电网输电能力及断面潮流转移能力。文献[11-16]研究了特高压接入后系统电压无功特性。文献[17]研究了提

基金项目: 国家重大研究发展计划项目资助(2018YFB0904001)

高断面输电能力的措施及控制策略，文献[18]主要研究了直流故障对暂态电压影响及控制策略。文献[19-22]研究了调相机对省级电网的支撑作用。以上研究主要集中在电网负荷较大，交流联系较强的地区。江西电网本身负荷较小，峰谷差较大，与外界交流联系弱，有一定的特殊性。本文在基于江西电网特殊性的条件下，分析特高压交直流接入对江西受端电网的影响，主要从直流故障、交流故障、特高压交流环网敏感性分析特高压接入可能对江西电网暂态稳定性造成的影响及解决措施。

1 特高压交直流接入系统方案

江西电网位于华中电网末端，目前江西电网仅有磁湖—永修线，咸宁—梦山 I、II 线三回 500 kV 联络线与湖北相连，最大受电能力 380 万 kW，交流联系较弱，属于典型的受端电网。

雅中—南昌特高压直流与其配套的南昌—武汉、南昌—长沙特高压交流线路合站建设，分层接入。特高压直流双极满送功率 1 000 万 kW，输入功率按 1:1 分别接入 1 000 kV 南昌特高压交流站、500 kV 南昌换流站。特高压接入后江西电网 500 kV 及其以上电压等级网架结构如图 1 所示。

雅中—南昌特高压直流输电线路全长 1 702 km，

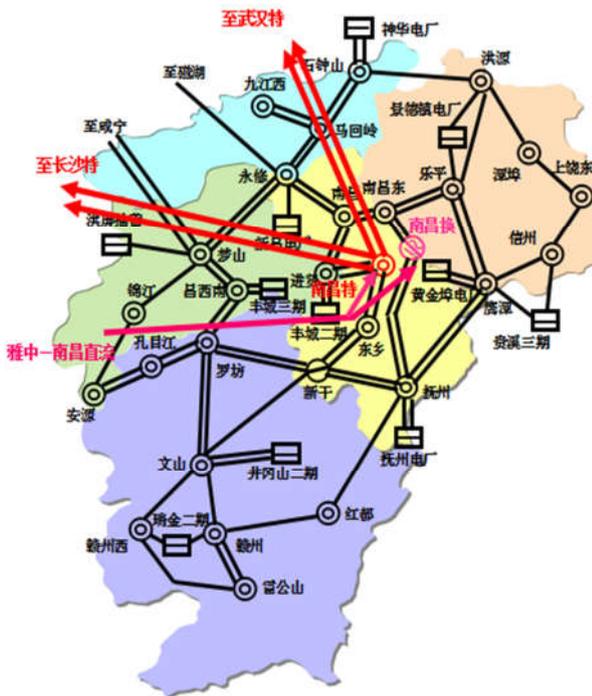


图 1 2020 年江西 500 kV 及以上规划电网结构
Fig. 1 Planning of Jiangxi 500 kV and above power grids in 2020

线路阻抗为 $5.15+j1.66$ 。特高压主变三侧电抗分别为 $X_1=0.0067$ 、 $X_2=-0.00067$ 、 $X_3=0.014$ 。大负荷 2 500 万 kW，小负荷 1 500 万 kW，负荷模型中电动机和恒定阻抗比例为 1:1。雅中—南昌特高压直流采取分层接入方式，高端 500 kV 侧滤波器 12 组，每组 280 Mvar；低端 1 000 kV 滤波器 20 组，每组 160 Mvar。分层接入方式可以引导直流功率在 1 000 kV 和 500 kV 间的分布，充分发挥两级电网输电能力，使网架结构和潮流分布更加合理。具体分层接入模型如图 2 所示。

2 直流故障对电网暂稳的影响及控制策略

2.1 典型直流故障影响分析

江西电网最大负荷在 2020 年预计将到达 2 500 万 kW，雅中直流满送功率 1 000 万 kW，四回特高压交流联络线和三回 500 kV 交流联络线功率结零。利用电力系统分析综合程序(PSASP)分别在大、小负荷方式下，研究双极闭锁、单极闭锁、换相失败几种典型直流故障方式对暂稳的影响，结果如表 1 所示。

表 1 典型运行方式直流故障对暂稳的影响

Table 1 Effect of DC fault on transient stability in typical operation mode

直流故障类型	负荷水平/(万 kW)	直流功率/(万 kW)	省内开机/(万 kW)	电压稳定性	功角稳定性	频率稳定性
换相失败	2 500	1 000	1 500	稳定	稳定	稳定
	1 500	1 000	500	稳定	稳定	稳定
单极闭锁	2 500	1 000	1 500	稳定	稳定	稳定
	1 500	1 000	500	稳定	稳定	稳定
双极闭锁	2 500	1 000	1 500	稳定	稳定	稳定
	1 500	1 000	500	不稳定	不稳定	不稳定
	1 500	800	700	稳定	稳定	稳定

结果表明直流故障对暂态稳定的影响与负荷水平和省内开机容量有关。在小负荷方式下，由于省内发电机组开机较少，当发生严重的直流故障时，由于无功调节能力有限，难以支撑系统电压，容易导致电压失稳。而不同直流故障对系统影响程度不同，故障程度相对较轻的换相失败和单极闭锁故障在大、小负荷水平下均未导致系统失稳。

2.2 双极闭锁对电网暂态稳定的影响

双极闭锁是直流故障中最严重的故障形式，直流功率闭锁将对系统造成巨大的冲击。针对江西电网小负荷方式，1 s 设置直流双极闭锁故障，1.3 s 后切除相应滤波器。由于有四回特高压交流联络线和三回 500 kV 交流联络线对功率缺额的补充，七回

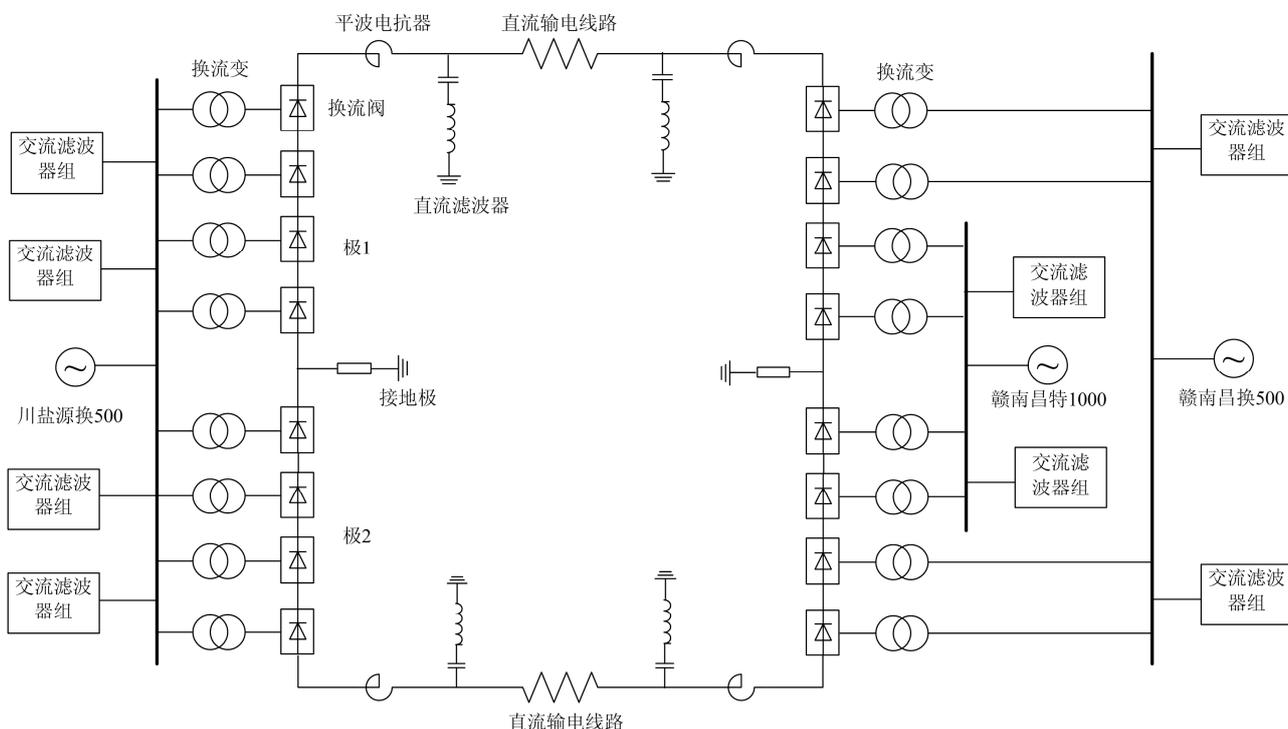


图 2 ±800 kV 雅中-南昌直流分层接入系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the ±800 kV Yazhong-Nanchang DC hierarchical access system

联络线能承受直流满送 1000 万 kW 双极闭锁损失的功率, 转移比在 90%左右, 系统有功功率能快速达到平衡。而省内开机有限, 系统无功动态调节能力较弱, 易发生电压失稳。母线电压波形如图 3 所示。

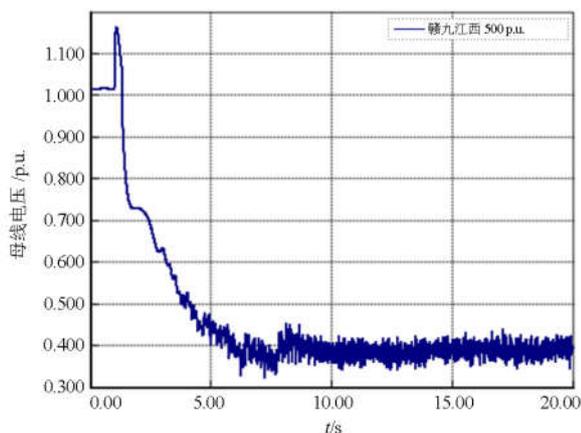


图 3 双极闭锁故障系统母线电压

Fig. 3 System bus voltage of bipolar latch fault

2.3 解决措施

2.3.1 优化无功网源结构

发电机与静止补偿电容器都是电网稳态电压调控的重要无功源。优化无功网源结构指的是通过调

整系统中发电机和投运电容器的配比, 改变发电机的初始无功出力, 从而改变受到扰动后的动态电压恢复特性。

基于上节中小负荷运行方式, 分别切除南昌、永修、文山站电容共计 4 台 234 Mvar, 500 kV 系统电压从 525~530 kV 降低到 515~520 kV, 省内各发电机稳态无功出力增加。在此运行方式基础上发生双极闭锁故障, 系统电压、电容器退出前后发电机无功输出如图 4、图 5 所示。

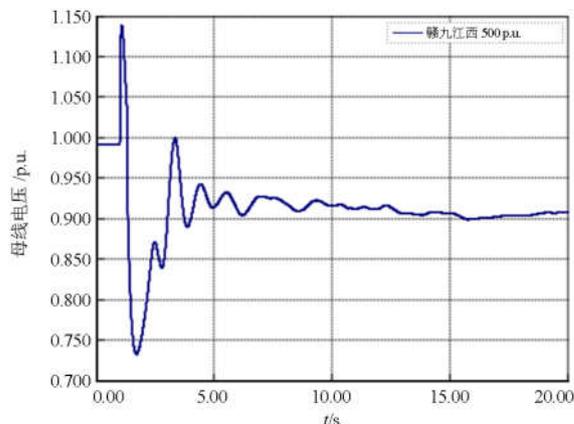


图 4 退电容后双极闭锁母线电压

Fig. 4 Bipolar blocking bus voltage after decoupling capacitor

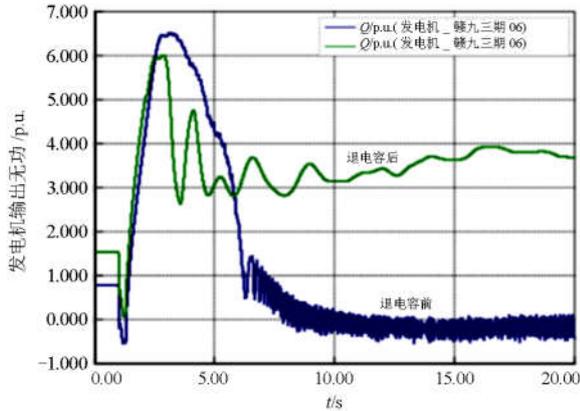


图 5 退电容前后发电机无功输出

Fig. 5 Generator reactive output before and after decoupling capacitor

图3初始潮流全网电压水平高，稳态下由于并联电容器对电压的支撑，发电机发出的无功较少。1 s发生双极闭锁后无功过剩，发电机发出无功减少甚至反向吸收无功达到进相极限，而1.3 s滤波器切除后系统无功不足，发电机强行励磁输出大量无功保持电压稳定。从图5可以看出电容器退出前，发电机发出初始无功少，故障后发电机发出无功波动量过大，导致电网电压失稳。图4初始潮流由于电容器退出使全网电压水平降低，从而提升了发电机调节能力，故障后发电机输出无功波动量小，易于恢复稳定，电压最终能稳定在0.9 p.u.左右，发电机功角也能恢复稳定。

2.3.2 滤波器快速切除

直流输电系统中交流滤波器向系统提供无功，直流系统发生双极闭锁故障瞬间有功功率降低至零，而无功功率并未同时切除。大量过剩无功会抬升系统电压，使发电机进相至极限，从而造成系统失稳，而滤波器的快速切除则有利于减轻故障的严重程度，减小故障对系统的冲击。

针对江西电网小负荷方式双极闭锁故障，分别设置在故障后 0.1 s、0.3 s 切除交流滤波器，省内母线电压如图 6 所示，发电机无功出力如图 7 所示。

由图 6、图 7 可看出，故障后滤波器切除时间对系统稳定性影响很大，快速切除滤波器可以减小故障严重程度，使发电机输出无功波动大幅度减小，从而保证系统稳定。而当初始潮流比较理想，发电机的动态无功储备充足时，可以适当延长滤波器切除时间同时保持系统稳定。

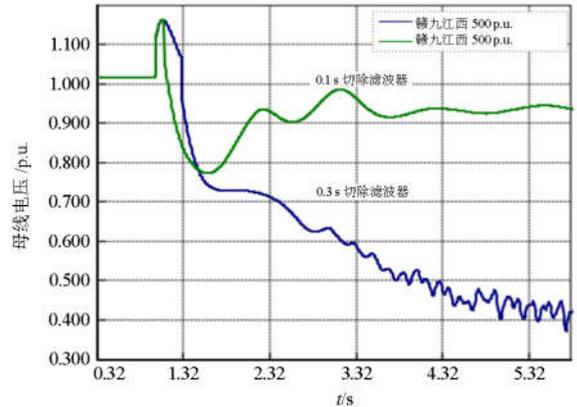


图 6 不同切除时间母线电压

Fig. 6 Bus voltages of different cut-off time

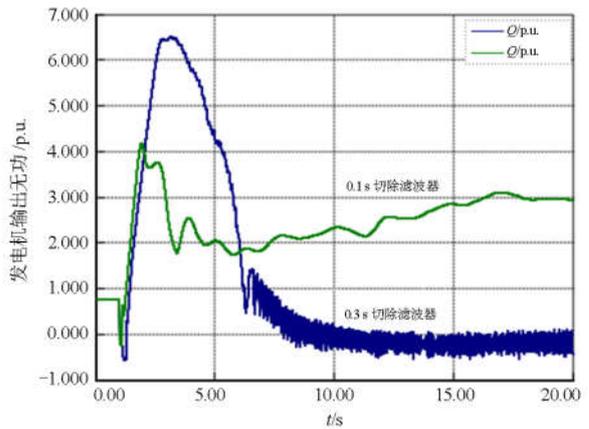


图 7 不同切除时间发电机无功出力

Fig. 7 Generator reactive power output of different cut-off time

2.3.3 稳控策略对暂态稳定的影响

按照《电力系统安全稳定导则标准》，直流输电线路双极故障属于第二级安全稳定标准，允许切除部分负荷。以上述小负荷电压失稳运行方式为例，即全网负荷 1 500 万 kW，直流输电 1 000 万 kW。直流双极闭锁故障后，切除萍宜仙地区 220 kV 跑马坪变 70 MW 负荷可以使系统恢复稳定，切负荷量符合导则规定要求。

通过以上仿真研究可见，单纯的直流故障对于 2020 年网架结构下的江西电网的影响主要体现在无功方面。仅在小负荷方式下，省内开机较少无功动态支撑能力较差时，直流双极闭锁才会造成系统失稳。针对这种状况下的直流故障失稳问题，可以通过优化无功网源结构来优化潮流初始状态，或者通过快速切除滤波器、切除电网部分负荷来减小故障严重程度。

3 落点近区交流故障对电网暂稳的影响及控制策略

直流落点近区交流系统故障对电网的暂态稳定性分为两个方面, 一方面交流系统故障, 引起电压跌落, 如果没有足够的无功动态支撑或快速故障切除容易引起系统失稳。另一方面由于逆变侧交流母线电压跌落, 容易引起直流换流阀换相失败, 长时间换相失败会导致双极闭锁, 两故障叠加, 加重故障严重程度也容易引起系统失稳。

交流系统对电网暂态稳定性影响主要取决于交流故障的严重程度。除了故障严重程度, 还有交流系统的动态无功支撑能力和对直流换相失败产生影响的程度。直流换流站的无功补偿设备对电压的动态补偿效果呈现反调节特性, 直流输送功率越大, 则换流站消耗的无功越多, 稳定运行时投运的无功补偿设备也越多, 则故障期间电压跌落导致的无功缺额也会越大, 更容易引起直流的换相失败甚至双极闭锁。

3.1 直流落点近区典型交流故障分析

由于直流传输功率巨大, 直流落点近区 500 kV、1 000 kV 交流线路有功功率和无功功率较重, 发生故障时对系统的影响也最为严重。基于此, 本文将交流系统故障点设置在与直流落点南昌换、南昌特站相连的线路及特高压主变上。包括南昌换—南昌东、南昌换—抚州、南昌特—进贤、南昌特—东乡、南昌特—武汉特、南昌特—长沙特和南昌特主变共计 7 处, 如图 8 所示。

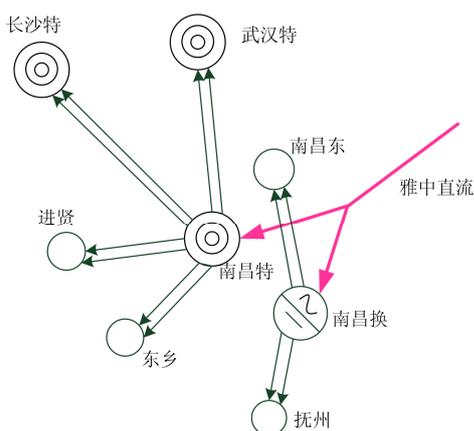


图 8 特高压直流疏散通道

Fig 8 UHV DC power transmission channel

由于影响仿真结果的因素较多, 为了方便分析, 现给定直流近区交流侧故障仿真边界条件如下: 保证江西交流通道潮流结零, 直流换流站逆变侧电容

投入数量将与直流输电功率大小保持一定的比例, 省内开机满足最小开机要求, 开机区域分布均匀, 运行机组满发无旋转备用, 未加装调相机, 全网电压调至较低的 1.0 p.u. 附近, 故障类型均为三相对称短路故障, 故障 1 s 发生, 1.09 s 本侧保护动作, 1.1 s 对侧保护动作。由于线路 N-1 故障对系统安全稳定运行影响不大, 对规划建设线路考虑 N-2 故障校核。不同负荷水平典型交流系统 N-1、N-2 故障扫描结果如表 2 所示。

表 2 不同负荷水平近区交流故障对暂稳的影响

Table 2 Effect of AC faults in near area at different

load levels on transient stability

故障类型	负荷 2 000	负荷 1 750	负荷 1 500	负荷 1 500
	直流 1 000	直流 1 000	直流 1 000	直流 800
南昌换—南昌东 N-2	稳定	稳定	稳定	稳定
南昌换—抚州抚 N-2	稳定	稳定	稳定	稳定
南昌特—进贤 N-2	稳定	稳定	不稳定	稳定
南昌特—东乡 N-2	稳定	稳定	稳定	稳定
南昌特—武汉特 N-2	稳定	稳定	稳定	稳定
南昌特—长沙特 N-2	稳定	稳定	稳定	稳定
南昌特高压主变 N-1	稳定	不稳定	不稳定	稳定

由表 2 可以看出, 在相同的运行方式下, 不同故障位置故障的严重程度不同, 各种故障中南昌特主变 N-1 故障最为严重。在江西电网当前网架结构下, 南昌特高压主变 N-1 故障是系统小负荷运行方式下的暂稳卡口。相同故障类型时, 全网负荷越低, 省内开机越少, 无功动态调整能力差, 故障越严重。当全网负荷降低到 1 500 万 kW 时, 暴露出了更多问题, 由于直流功率相较于省内开机占比大, 南昌特—进贤双回线路由于距离南昌特主变电气距离较短, N-2 故障发生也会导致系统失稳。对比最后两列可以看出, 相同负荷条件下, 减小直流输送功率有助于减轻系统故障的严重程度。

3.2 南昌特主变 N-1 对电网暂态稳定的影响

在江西电网直流落点近区交流故障形式中, 最严重的故障形式是南昌特主变 N-1 故障。在全网负荷低于 1 750 万 kW (即省内开机小于 750 万 kW) 会造成系统功角、电压失稳、直流双极闭锁。全网负荷 1 500 万 kW 南昌特主变 N-1 故障波形如图 9—图 11 所示。

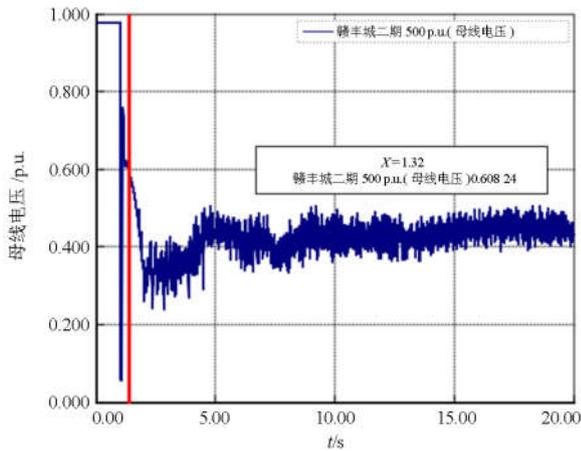


图 9 临近故障点母线电压
Fig. 9 Bus voltage near fault point

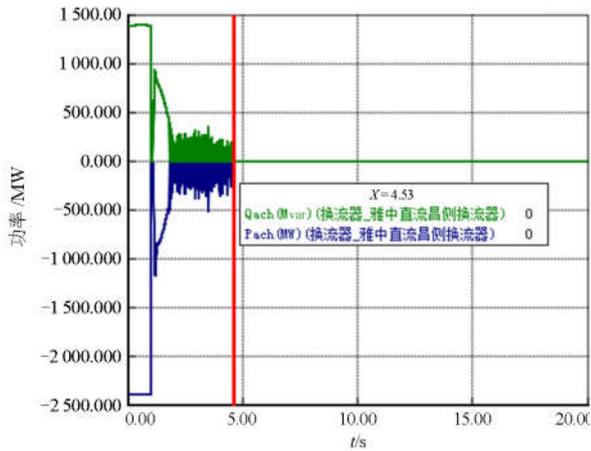


图 10 a 换流器高端直流功率
Fig. 10 High terminal DC power of converter a

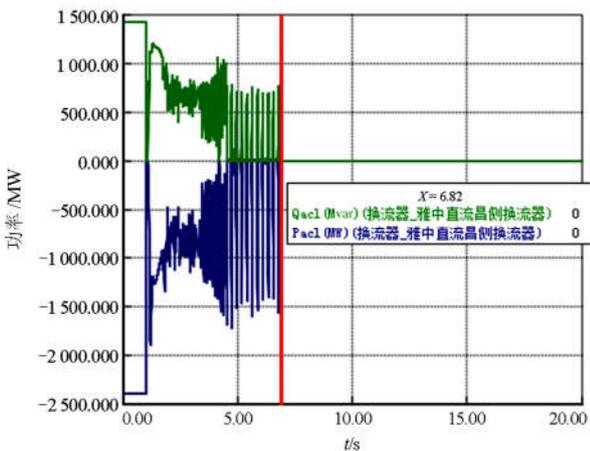


图 11 b 换流器低端直流功率
Fig. 11 Low terminal DC power of converter b

由图 9—图 11 在该运行方式下发生南昌特主变 $N-1$ 故障, 临近故障点母线电压在 1.3 s 左右跌落到 0.6 p.u. 以下, 并发生电压失稳。而直流侧直流换相器发生换相失败, 长时间换相失败后在 4.5 s 处高端闭锁, 6.8 s 处低端闭锁。通过时间对比可以看出交流侧故障的传递时序是先引起交流侧电压失稳, 再引起直流侧双极闭锁。

3.3 解决措施

3.3.1 增加调相机

交流故障引起的系统失稳, 主要原因是小负荷运行方式下省内开机较少, 发电机无功动态支撑能力不足。而针对这种问题, 解决措施是在特高压 500 kV 侧落点南昌换站加装 2 台 300 Mvar 调相机。一方面在正常运行时可以用以调节电压, 另一方面在系统发生故障电压瞬时跌落时, 相较于电容器, 调相机对瞬时跌落的电压有更好的抬升效果, 有利于电压保持稳定。

调相机对主变 $N-1$ 故障稳定性影响如图 12 所示。

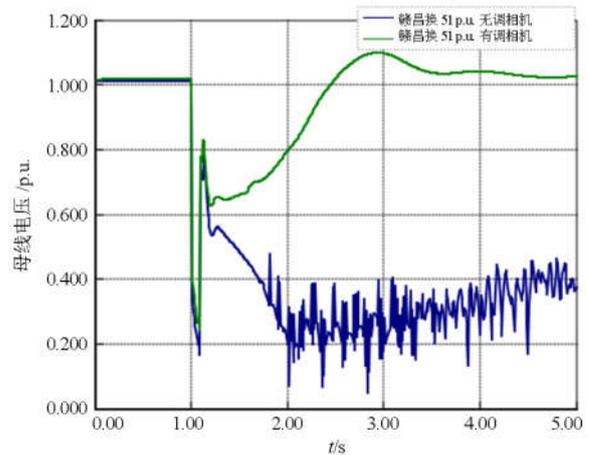


图 12 南昌特主变 $N-1$ 故障母线电压
Fig. 12 Bus voltage of $N-1$ fault in UHV main transformer in Nanchang

南昌特主变 $N-1$ 故障, 在未加装调相机情况下, 系统发生电压功角失稳。加装调相机后, 单台调相机最大可提供 650 Mvar 的动态无功支撑, 显著提升系统电压, 故障切除后功角恢复稳定, 电压能恢复到 1 p.u. 附近。

经过研究表明, 在增加调相机后, 负荷 1500 万 kW 直流 1000 万 kW 运行条件下对省内典型故障系统均能保持稳定。相比于未增加调相机时小负荷 1500 万 kW 运行方式下直流只能承受 800 万 kW 直流功率, 对系统直流接纳能力提升效果显著。

3.3.2 降低直流功率与省内开机比

表 2 中直流功率固定 1 000 万 kW, 省内开机容量分别是 750 万 kW、500 万 kW。直流功率与省内开机比分别为 1.33 和 2, 比例过大, 容易引起系统失稳。而根据《电力系统安全稳定导则标准》规定: 系统 $N-1$ 故障, 不采取任何稳定控制措施, 必须保证电力系统稳定运行和电网正常供电。所以直流满送方式下, 这两种运行方式不符合要求。需要重新调节运行方式, 在不改变其他条件前提下, 减小直流功率或增大省内开机容量至直流传输功率与省内开机比降低至 1 时, 主变 $N-1$ 故障将不会引起系统失稳。

经过研究发现, 在不增加调相机的情况下, 能承受直流满送 1 000 万 kW 交流侧 $N-1$ 故障不失稳的省内最小开机约为 1 000 万 kW, 能承受直流输送 800 万 kW 交流侧 $N-1$ 故障不失稳的省内最小开机约为 700 万 kW, 能承受直流输送 500 万 kW 交流侧 $N-1$ 故障不失稳的省内最小开机约为 450 万 kW。故保证交流故障不失稳的临界开机方式约是直流功率与省内开机比为 1。

4 特高压交流环网敏感性分析

武汉—南昌—长沙特高压交流环网的建设旨在加强省际电网之间的电气联系, 同时也为特高压直流电力提供疏散通道, 对华中—南昌特高压直流起到支撑作用。根据特高压交流环网的投运时间, 分为两步, 第一步建成南昌—武汉段(以下称为无环

网), 第二步建成南昌—武汉、南昌—长沙, 并与湖北荆门构成华中特高压环网(以下称为有环网)。交流环网连接如图 13 所示。

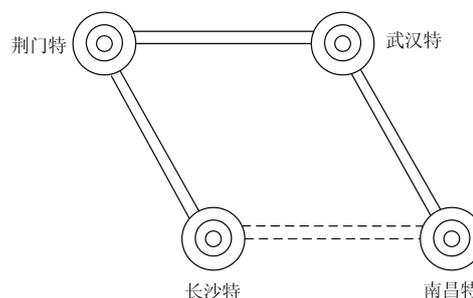


图 13 华中特高压交流环网示意图

Fig. 13 Schematic diagram of UHVAC ring network in Central China

仿真条件与第三章相同, 比较不同负荷水平下上文所述的七种交流故障和直流双极闭锁故障时, 特高压交流环网建立前后系统稳定性的差异, 分析环网建立的敏感性, 仿真结果如表 3 所示。

由表 3 第一种运行方式, 负荷较大省内开机较多时, 环网对暂态稳定的支撑主要体现在增加了有功转移通道。有环网时直流双极闭锁故障不容易造成系统失稳, 而无环网时易导致系统失稳。同时由于 1 000 kV 层面通道减少, 加重了另一条通道故障的严重性, 无环网时南昌特—武汉特 $N-2$ 故障也存在系统失稳的风险。大负荷条件下交流环网敏感性主要体现在特高压联络线。

表 3 不同负荷水平交直流故障对暂稳影响

Table 3 Effect of AC and DC faults on transient stability at different load levels

故障类型	负荷 2 000 直流 1 000/万 kW		负荷 1 750 直流 1 000/万 kW		负荷 1 500 直流 1 000/万 kW	
	有环网	无环网	有环网	无环网	有环网	无环网
南昌换—南昌东 $N-2$	稳定	稳定	稳定	稳定	稳定	稳定
南昌换—抚州 $N-2$	稳定	稳定	稳定	稳定	稳定	稳定
南昌特—进贤 $N-2$	稳定	稳定	稳定	稳定	不稳定	不稳定
南昌特—东乡 $N-2$	稳定	稳定	稳定	稳定	稳定	不稳定
南昌特—武汉特 $N-2$	稳定	不稳定	稳定	不稳定	稳定	不稳定
咸宁—梦山 $N-2$	稳定	稳定	稳定	不稳定	稳定	不稳定
南昌特高压主变 $N-1$	稳定	稳定	不稳定	不稳定	不稳定	不稳定
直流双极闭锁	稳定	不稳定	稳定	不稳定	不稳定	不稳定

由表 3 第二种运行方式, 当省内负荷和开机减少, 不同故障对系统稳定的影响逐渐体现。无环网的影响逐渐体现在 500 kV 层面省间交流联络线咸宁—梦山线故障。由于开机减小, 同时功率疏散通道减少, 500 kV 省间联络线咸宁—梦山线 $N-2$ 故障的严重程度激增, 从稳定变为失稳。中等负荷条件下交流环网敏感性主要体现在 500 kV 交流联络线。

由表 3 第三种运行方式, 当省内负荷和开机继续减小, 达到省内最小开机状态时, 无环网的影响开始体现在特高压站的省内疏散通道上, 包括南昌特—东乡, 南昌特—进贤线路 $N-2$ 故障, 均会引起省内系统失稳。而直流高端通道的南昌换侧疏散通道故障则不会受到影响, 依然能保持系统稳定运行。小负荷条件下交流环网敏感性主要体现在 500 kV

省内特高压疏散通道。

5 结论

(1) 直流故障对受端系统暂态稳定影响的严重程度与负荷水平和省内开机容量有关。小开机方式下，由于动态支撑能力不足系统更容易失稳。通过调节发电机和电容器投运配比，缩减故障后滤波器切除时间可以提升动态支撑能力从而使系统稳定。

(2) 不同类型交流故障严重程度不同，对系统的影响也不同。江西电网当前条件下最严重的故障是南昌特主变 N-1 故障，系统对直流接纳能力受该故障的约束。直流功率接纳水平与省内开机容量有关，在不增加调相机条件下，控制直流送入功率与省内发电机发出功率的比，使之不超过 1。

(3) 调相机的投运对直流接入后江西电网暂态稳定性有很好的提升效果，对故障后最低电压的提升接近 0.1 p.u.，故障越严重，调相机对电压提升量越大。同时对系统接纳直流功率能力有所提升。就系统暂态稳定而言，加装调相机可以在小负荷运行方式下将直流功率的接纳能力从 800 万 kW 提升到 1 000 万 kW。

(4) 武汉—南昌—长沙特高压交流环网投运对于江西电网暂态稳定性有显著的提升。就暂态稳定提升的敏感性而言，大负荷条件下主要体现在特高压联络线，中等负荷条件下主要体现在 500 kV 省间联络线，小负荷条件下主要体现在 500 kV 省内特高压疏散通道。环网对系统暂态稳定裕度的提升能力：1 000 kV 省间联络线 > 500 kV 省间联络线 > 500 kV 省内疏散线路。

参考文献

[1] 刘振亚. 中国电力与能源[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.

[2] 蒋冠前, 李志勇, 杨慧霞, 等. 柔性直流输电系统拓扑结构研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 145-153.

JIANG Guanqian, LI Zhiyong, YANG Huixia, et al. Research review on topological structure of flexible HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 145-153.

[3] 周强, 汪宁渤, 何世恩, 等. 高弃风弃光背景下中国新能源发展总结及前景探究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(10): 146-154.

ZHOU Qiang, WANG Ningbo, HE Shien, et al. Summary and prospect of China's new energy development under the background of high abandoned new energy power[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(10):

146-154.

[4] 杨欢欢, 蔡泽祥, 朱林, 等. 直流系统无功动态特性及其对受端电网暂态电压稳定的影响[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(10): 86-92.

YANG Huanhuan, CAI Zexiang, ZHU Lin, et al. Dynamic characteristic of HVDC reactive power and its influence on transient voltage stability of receiving-end power grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(10): 86-92.

[5] 高强, 张小聪, 施正钗, 等. ±800 kV 宾金直流双极闭锁故障对浙江电网的影响[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(11): 47-51.

GAO Qiang, ZHANG Xiaocong, SHI Zhengchai, et al. Impact of ±800 kV Yibin-Jinhua DC bipolar block fault on Zhejiang power grid[J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(11): 47-51.

[6] 卫鹏, 周前, 汪成根, 等. ±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 ±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.

[7] 霍鹏飞, 王国功, 刘敏, 等. 向上±800 kV 特高压直流输电工程的直流保护闭锁策略[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(9): 137-139.

HUO Pengfei, WANG Guogong, LIU Min, et al. The DC protection block strategy in Xiangjiaba-Shanghai ±800 kV UHVDC transmission project[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(9): 137-139.

[8] 曾庆禹. 特高压交直流输电系统技术经济分析[J]. 电网技术, 2015, 39(2): 341-348.

ZENG Qingyu. Techno-economic analysis of UHVAC and UHVDC power transmission systems[J]. Power System Technology, 2015, 39(2): 341-348.

[9] 曾庆禹. 特高压交直流输电系统可靠性分析[J]. 电网技术, 2013, 37(10): 1-7.

ZENG Qingyu. Reliability analysis of UHVAC and UHVDC transmission systems[J]. Power System Technology, 2013, 37(10): 1-7.

[10] 胡扬宇, 付红军, 张毅明, 等. 特高压南阳站建成后鄂豫断面电磁环网运行分析[J]. 电网技术, 2011, 35(6): 22-26.

HU Yangyu, FU Hongjun, ZHANG Yiming, et al. Analysis on electromagnetically coupled loop operation of tie line connecting Hubei power grid and Henan power grid after building up of Nanyang UHVAC substation[J]. Power

- System Technology, 2011, 35(6): 22-26.
- [11] 熊虎, 向铁元, 詹昕, 等. 特高压交流输电系统无功与电压的最优控制策略[J]. 电网技术, 2012, 36(3): 34-39. XIONG Hu, XIANG Tiejuan, ZHAN Xin, et al. An optimal control strategy of reactive power and voltage for UHVAC power transmission system[J]. Power System Technology, 2012, 36(3): 34-39.
- [12] 唐晓骏, 陈会元, 姚淑玲, 等. 基于改进经济压差的特高压电网无功电压控制策略[J]. 电网技术, 2013, 37(3): 673-678. TANG Xiaojun, CHEN Huiyuan, YAO Shuling, et al. Reactive power and voltage control strategy for UHVAC power grid based on improved economic voltage difference[J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 673-678.
- [13] 赵树本, 张伏生, 钟继友, 等. 自适应差分进化算法在电力系统无功优化中的应用[J]. 电网技术, 2010, 34(6): 169-174. ZHAO Shuben, ZHANG Fusheng, ZHONG Jiyu, et al. An adaptive differential evolution algorithm and its application in reactive power optimization of power system[J]. Power System Technology, 2010, 34(6): 169-174.
- [14] 张勇军, 林建熙, 杨银国. 电力系统无功电压调控配合研究综述[J]. 电网技术, 2012, 36(3): 101-107. ZHANG Yongjun, LIN Jianxi, YANG Yinguo. Survey on voltage/var control and coordination of power systems[J]. Power System Technology, 2012, 36(3): 101-107.
- [15] 易强, 周浩, 计荣荣, 等. 交流特高压线路高抗补偿度下限的研究[J]. 电网技术, 2011, 35(8): 18-25. YI Qiang, ZHOU Hao, JI Rongrong, et al. Research on lower limit of compensation degree for UHVAC transmission lines[J]. Power System Technology, 2011, 35(8): 18-25.
- [16] 付伟, 刘天琪, 李兴源, 等. 静止无功补偿器运行特性分析和控制方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(22): 147-154. FU Wei, LIU Tianqi, LI Xingyuan, et al. Analysis of operating characteristic and survey of control methods used in static var compensator[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(22): 147-154.
- [17] 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.
- [18] 潘小艳, 王建全. 特高压电网接入浙江电网的暂态电压稳定分析和控制策略[J]. 华东电力, 2010, 38(6): 863-866. PAN Xiaoyan, WANG Jianquan. Transient voltage stability analysis and control strategies of UHV access Zhejiang grid[J]. East China Electric Power, 2010, 38(6): 863-866.
- [19] 蔡晖, 张文嘉, 祁万春, 等. 调相机接入江苏电网后的适应性研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2017, 38(2): 23-27. CAI Hui, ZHANG Wenjia, QI Wanchun, et al. Study on adaptability of phase modifier access to Jiangsu power grid[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2017, 38(2): 23-27.
- [20] 姜建国, 乔树通, 郜登科. 电力电子装置在电力系统中的应用[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(3): 2-6. JIANG Jianguo, QIAO Shutong, GAO Dengke. Application of power electronic equipments in power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(3): 2-6.
- [21] 张开宇, 崔勇, 庄侃沁, 等. 加装同步调相机对多直流馈入受端电网的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(22): 139-143. ZHANG Kaiyu, CUI Yong, ZHUANG Kanqin, et al. Analysis of the influence of synchronous condensers on receiving-end grid with multi-infeed HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(22): 139-143.
- [22] 郑涛, 余青蔚, 詹荣荣, 等. 调相机接入对发电机失磁保护的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(4): 50-56. ZHENG Tao, YU Qingwei, ZHAN Rongrong, et al. Impact of synchronous condenser access on generator loss of excitation protection[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(4): 50-56.

收稿日期: 2018-05-13; 修回日期: 2018-07-05

作者简介:

辛建波(1970—), 男, 博士, 高级工程师, 硕士生导师, 主要从事电力系统运行与控制、智能变电站、分布式供电的配电网技术等方面的科研工作; E-mail: mandyzuhai@163.com

王玉麟(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定分析与控制。E-mail: 15717911994@163.com

(编辑 张爱琴)