

新型电力系统下的江西电网安全稳定研究

王 静, 聂更生, 陈田田, 郑 春, 薄明明

(国网江西省电力有限公司经济技术研究院, 江西 南昌 330096)

摘 要:在新型电力系统建设背景下,江西电源结构、电网形态将发生深刻变化,新能源装机规模占比不断提升,交直流混联电网特征愈加凸显,电网运行特性和电网安全稳定问题愈发复杂。文中介绍了新型电力系统安全稳定运行面临的挑战,分析了江西不同阶段交直流混联电网的稳定运行情况,以及大规模新能源接入对系统频率、功角和电压稳定性的影响,从规划和运行角度提出了提高系统稳定性的措施建议。

关键词:安全稳定;新能源;交直流混联;新型电力系统;功角稳定

中图分类号:TM 712 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-348X(2026)02-0031-04

0 引言

随着直流输电系统和可再生能源的发展,大量不同类型、不同电压等级的电力电子设备将接入电网,给系统运行安全、系统分析控制、仿真建模计算等方面带来诸多挑战^[1]。含高比例可再生能源的交直流混联电网对电网电压更加敏感^[2];纯新能源机组集中馈入、远距离送出系统,动态的无功支撑能力较弱,需要通过加装动态无功补偿装置提升系统电压支撑能力^[3];直流功率水平降低,或同步发电机占比增加,或在直流受端母线配置同步调相机,系统电压稳定性显著提高^[4];文献[5]仿真计算结果表明,新能源渗透率越高,逆变型分布式发电对系统暂态稳定性的负作用越大,而电压控制的逆变型分布式发电能明显改善系统电压的稳定性;大规模风电接入电网后系统惯性和抗扰能力降低,对电网功角稳定性带来了严峻的挑战^[6-8];文献[9]仿真分析结果表明,当风电替换常规机组比例较低时,系统稳定性的主要表现为功角稳定,而替换比例较高时,则主要表现为电压稳定;文献[10]仿真分析结果表明,当系统中部分常规机组被新能源机组替换后,存在最大替换功率,当替换功率小于该值时,系统稳定问题的主要表现为暂态稳定,而当替换功率大于该值时,则系统稳定问题的主要表现为电压失稳。因

此,新型电力系统的暂态稳定问题亟待深入研究。

1 江西电网现状及面临的挑战

1.1 电网现状

截至2024年底,江西省风电、光伏装机容量3578万kW,占总装机的44.7%,"十四五"前四年年均增速29.2%,已超过火电成为江西第一大电源。江西主网架结构更加完善,深入融入华中特高压交流环网,通过±800 kV雅湖特高压直流与西南联网,交流联络线通过1000 kV潇江双回线与湖南电网相联,通过1000 kV黄江双回线和500 kV黄永线、500 kV咸梦双回线与湖北电网相联。江西电网目前形成了完整的"一交一直"特高压网架,由华中末端电网发展升级为区域枢纽电网。

1.2 面临的挑战

为了满足江西电力保供需求,江西规划"十五五"引入第二回特高压直流、"十六五"引入第三回特高压直流,届时江西多直流馈入的交直流混联电网形态特征愈加凸显。同时,随着新能源装机占比的不断提升,电网运行特性发生复杂深刻变化。电网安全稳定面临以下挑战:

1) 外来电规模不断增大,交直流故障引起系统功角、频率、电压稳定问题愈发突出。"十五五"到"十六五"期间,江西将从"一交一直"向"两交两直"、"两交三直"的特高压电网格局发展。特高压直流容量

收稿日期:2026-01-06

作者简介:王静(1994),女,硕士,工程师,主要从事电网规划建设、电网安全稳定研究、新能源方面工作。

大、占电源比例高,若发生直流连续换相失败、直流瞬降等故障,将引起大规模潮流转移,系统功率冲击大,电网功角、频率、电压稳定问题将愈发突出。

2) 新能源占比持续增长,频率和电压稳定问题凸显。新能源占比持续增长,导致系统转动惯量、短路容量、一次调频能力下降;同时,新能源耐压水平差,易低电压或过电压脱网,将导致系统频率和电压稳定问题凸显。

3) 新能源集中的直流群受端地区,系统故障可能引发跨区联络线解列。当系统发生故障时,因电压瞬时跌落,可能造成大量新能源进入低穿状态,同时引发多回直流发生换相失败,二者功率缺额叠加可能导致跨区联络线解列。

4) 直流故障和大规模新能源接入将给系统带来暂态过电压风险。常规特高压直流发生闭锁等故障时,为满足直流故障恢复时间需求,配置的滤波器一般不会立即切除,导致直流无功补偿过剩,换流站交流母线存在暂态过电压风险;新能源在低电压穿越状态支撑电压,会增发无功电流,故障消失后无功电流不能突变,过多无功会产生暂态过电压。

2 江西电网安全稳定分析

文中所有仿真计算分析均在国家电网规划仿真计算分析平台中完成。该平台支持PSD-BPA机电暂态仿真程序,可实现潮流、短路、暂态稳定计算分析。计算中采用的江西电网负荷模型为感应电动机和恒定阻抗组合模型,已投运、在建设备选取调度实测参数或实际设计参数,规划设备根据典型参数选取。

本章重点校核分析夏季大负荷和春季午间新能源大发方式(简称“春午”方式)。夏季大负荷方式负荷系数为1,雅湖直流800万kW、江西第二回直流500万kW,风电出力系数0.05、光伏出力系数0;春午新能源大发方式负荷系数为0.6,雅湖直流800万kW、江西第二回直流800万kW,风电和光伏出力系数均为0.4。

2.1 “十五五”期间江西电网稳定特性研究

根据计算得到,若江西第二回特高压直流采用常规直流、配套500 kV送出方案,在2028年大负荷方式下,500 kV泰和—赣州北线路N-1故障将导致赣南电网部分500 kV和220 kV变电站母线电压低于0.6 p.u.,电压大幅跌落难以恢复;同时,引起直流系统持续换相

失败,故障影响范围加大;随后,赣州地区火电机组出现功角失稳,随着系统电压逐渐下降,机组功角逐渐增大。故障下暂态稳定曲线见图1。

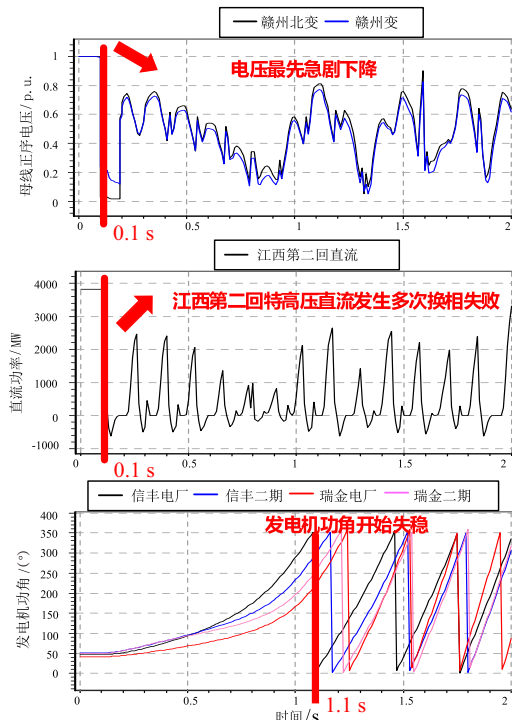


图1 2028年大负荷方式泰和—赣州北线路N-1故障的暂态稳定曲线(第二回特高压直流采用配套500 kV送出方案、常规直流技术路线)

在2028年春午方式下,若江西第二回特高压直流受端发生直流双极闭锁故障,系统会失稳。失稳的主要原因是该方式下常规机组开机容量和旋转备用不足,对电网电压调节能力相对其他方式差,闭锁后瞬间,常规直流换流站配置的滤波器尚未切除,电压急剧上升,换流站母线电压超过1.5 p.u.;交流滤波器切除后,电压逐渐降低低于0.6 p.u.,电压失稳。

若江西第二回特高压直流同步建设赣江特—赣南特1000 kV输变电工程,并采用柔性直流技术路线,2028年在各典型方式下,任一回直流双极闭锁均能保持系统稳定。

2.2 “十六五”期间江西电网稳定特性分析

计算得到,在2028年春午方式下,若雅湖直流双极闭锁,江西电网系统最低频率为49.4Hz,电压波动范围为0.92~1.05 p.u.;在2035年春午方式下,系统频率和电压在直流闭锁故障下的波动变大,系统最低频率为49.2 Hz,电压波动范围为0.90~1.19 p.u。故障下的频率和电压曲线见图2。因此,随着新能源出力

占比不断提升,系统频率在故障下的跌落速度加快、跌落深度不断增大,系统电压波动范围不断加大。

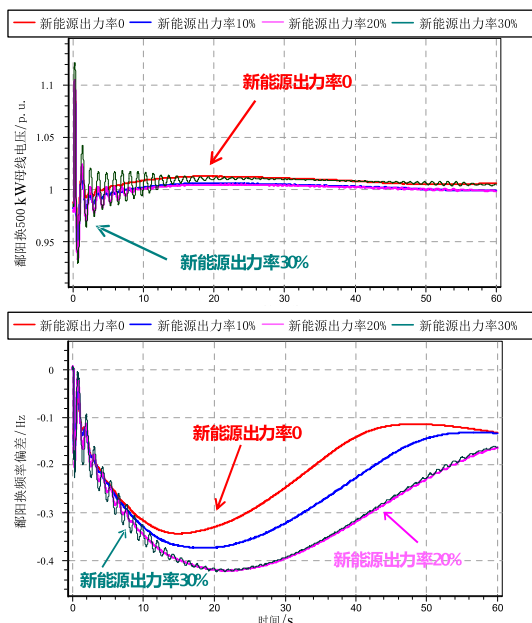


图2 2035年不同新能源出力下雅湖直流双极闭锁系统频率和电压

3 提升电网安全稳定措施研究

根据上一章的计算,可以判断赣南电网存在局部线路N-1和N-2故障下电网失稳问题。若第二回直流投运,不加强1000 kV通道,电网稳定问题将进一步加剧;同时,随着新能源占比不断提升,电网暂态稳定水平也有所下降。

为了解决以上问题,本章从规划仿真平台计算网架加强、调整发电机无功出力、加装动态无功补偿装置等方面,提出相应的措施。

1) 加强1000 kV特高压交流网架支撑,可显著提高直流电力疏散能力和电网稳定水平。

随着新能源装机快速增长、外电输送功率持续增大,省内火电机组开机空间受到严重挤压,小负荷新能源大发方式故障影响程度增加,特高压交流对直流的支撑作用愈发明显。江西第二回特高压直流同步建设1000 kV特高压交流输电工程,赣州地区部分重要500 kV线路潮流减轻,系统结构加强,直流和交流发挥各自优势,提高电网安全稳定水平。江西第二回特高压直流采用配套500 kV和配套1000 kV方案的稳定结果如表1所示。从表1结果可知,配套1000 kV方案稳定性更优。

表1 2028年第二回特高压直流采用不同方案的稳定校核情况

		%	
		常规直流+配套500 kV方案	常规直流+配套1000 kV方案
1	引起省内两回直流同时换相失败的500 kV线路N-1和N-2故障数比例	88	69
2	引起直流连续发生三次以上换相失败的500 kV线路N-1和N-2故障数比例	20	0

注:(1)柔性直流不会发生换相失败,但交流电网严重故障下可能采取主动闭锁措施。

(2)常规直流连续发生多次换相失败后,直流系统将暂时停止运行然后重启,再启动失败将导致直流系统闭锁。

2) 新增特高压直流采用柔性直流输电技术,可提高电网无功支撑能力。

交直流混联输电系统,在电网交流通道发生故障时,系统电压大幅跌落,导致直流持续换相失败,将进一步加重交流联络线输电压力,从而引发系统失稳。柔性直流输电技术不存在换相失败的问题,降低多直流同时换相失败的风险;同时,不需要交流电网提供无功功率,可起到静止同步补偿器的作用,可动态补偿无功功率,提高交流系统的频率和电压稳定性。江西第二回特高压直流采用柔性直流输电技术,可显著提高严重故障下电网稳定水平。江西第二回特高压直流受端采用不同直流技术路线的稳定结果如表2所示。从表2结果可知,采用柔性直流技术路线可进一步提高电网稳定性。

表2 2028年第二回特高压直流采用不同直流技术路线下的稳定校核情况

	常规直流+配套1000 kV方案	柔性直流+配套1000 kV方案
省内两回特高压直流同时发生双极闭锁严重故障	夏大 切全省一定负荷,可以保持系统稳定 夏平 失稳 春午 切全省一定负荷,可以保持系统稳定	稳定 切全省一定负荷,可以保持系统稳定 切全省一定负荷,可以保持系统稳定

3) 调整发电机功率因数、适当增大其无功输出功率,有助于提升系统电压暂态稳定水平。

根据计算可以确定,2028年江西第二回直流投运时,采用常规直流、配套500 kV送出方案,若大负荷方式将直流近区火电机组迟相运行,功率因数定为0.96或以下,系统在任意故障下,无需旋备,就能保持系统稳定;若功率因数为0.99,则需预留80万kW旋备。发电机在暂态过程中,不仅能够维持稳态运行时输出无功功率的基础容量;在励磁系统调控下,可进一步增加内电势与电网间的电压差,快速的大幅提升容性无功输出水平。因此,发电机稳态输出容性无功功率越多,对应的动态无功支撑能力就越强。

4) 在电网电压薄弱点配置动态无功补偿装置,可提升暂态过程无功支撑能力。

在2028年大负荷方式下,若发生500 kV泰和—赣州北线路N-1故障,赣南地区将出现电压失稳、伴

随功角失稳。故障暂态过程中,赣南地区 220 kV 变电站电压跌落程度将高于 500 kV 变电站。根据仿真计算发现,较 500 kV 层面,在电压最为薄弱的 220 kV 层面加装无功补偿装置,对电网稳定性改善效果更好;分布式调相机的暂态电压支撑能力效果高于 SVG 与 STATCOM。计算仿真结果见图 3。

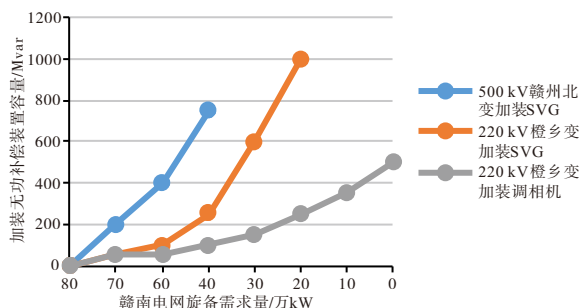


图3 2028年赣南电网不同位置加装 SVG/分布式调相机降低旋备情况

5) 新能源厂站 SVG 可靠运行,可加快新能源接入点电压恢复,提高系统稳定性。

采用 SVG 典型模型测算得到,若 SVG 稳态不吸收也不发出无功,在赣南电网 20% 新能源的 SVG 可靠运行时,2028 年赣南电网大负荷旋备需求量可减少 10 万 kW;若 60% 新能源的 SVG 能可靠运行,2028 年大负荷旋备需求量可减少 30 万 kW。SVG 的动态调节能力目前主要受两个因素影响,一是新能源不发有功时,功率因数要求超过 0.9,若低于 0.9 将被收取力调电费;二是 SVG 暂态过程无功响应性能与其初始运行状态有关,稳态吸收无功时动态无功裕度更大,电压支撑能力更强;稳态发出无功时动态无功裕度更小,电压支撑能力更弱。

4 江西电网安全稳定相关建议

基于以上两章的计算分析,为了应对新能源大规模发展、特高压交直流混联带来的暂态稳定问题,对电网规划和运行提出以下三点建议:

1) 构建科学合理的电网网架结构,充分融入华中“目字型”特高压交流环网。

建设以特高压交直流为骨干网架的坚强电网结构,华中特高压网架向南延伸至赣南、湘南站点,华中区域内形成“目”字型特高压电网,可有效抵御交直流任一通道故障导致的潮流大规模转移。

2) 加强新能源并网性能,防范新能源大规模脱

网风险。

确保新能源高低压穿越、耐频耐压符合《风电场接入电力系统技术规定第 1 部分:陆上风电》(GB/T 19963.1—2021)、《光伏电站接入电力系统技术规定》(GB/T 19964—2012)等标准要求;确保新能源场站具备自动电压控制功能和动态无功功率调节能力,SVG 动态无功调节设备配置满足要求、可靠运行;探索应用各类新型储能新技术,提升新能源主动支撑能力,提高系统频率稳定水平。

3) 加强电力系统安全稳定管理。

进一步深化新能源、常规电源和储能仿真建模管理,提升新能源机组故障穿越等关键环节的仿真准确性,强化电网安全风险管控;建立适应新型电力系统的稳定管理体系,确保《电力系统安全稳定导则》在新型电力系统全过程、全环节、全方位落实。

参考文献:

- [1] 周孝信,陈树勇,鲁宗相,等.能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J].中国电机工程学报,2018,38(07):1893-1904,2205.
- [2] 葛怀畅,王彬,郭庆来,等.面向高比例可再生能源交直流混联电网的动态自动电压控制系统:设计与应用[J].中国电机工程学报,2020,40(16):5170-5179.
- [3] 孙华东,于琳,赵兵.基于故障后稳态电压安全约束的新能源并网系统电压支撑强度量化分析方法[J].中国电机工程学报,2023,43(09):3322-3332.
- [4] 赵兵,徐式蕴,兰天楷,等.新型电力系统标准算例(三):电压稳定 CSEE-VS[J].中国电机工程学报,2024,44(21):8353-8364.
- [5] 庄慧敏,巨辉,肖建.高渗透率逆变型分布式发电对电力系统暂态稳定和电压稳定的影响[J].电力系统保护与控制,2014,42(17):84-89.
- [6] 王科,秦文萍,张宇,等.双馈风机等效惯量控制比例系数对系统功角摇摆稳定的影响机理分析[J].电工技术学报,2023,38(03):741-753.
- [7] Mitra, Arghya, Chatterjee, et al. Active power control of dfig-based wind farm for improvement of transient stability of power systems[J].IEEE Transactions on Power Systems: A Publication of the Power Engineering Society,2016,31(01):82-93.
- [8] 严干贵,岳霖,张皓程,等.风电外送电力系统暂态稳定性分析及提升策略[J].电网技术,2024,48(12):4826-4832.
- [9] 陈磊,刘永奇,戴远航,等.电力电子接口新能源并网的暂态电压稳定机理研究[J].电力系统保护与控制,2016,44(09):15-21.
- [10] 毛安家,马静,蒯圣宇,等.高比例新能源替代常规电源后系统暂态稳定与电压稳定的演化机理[J].中国电机工程学报,2020,40(09):2745-2756.