

闽赣直流联网工程对江西电网安全稳定影响研究

戈田平,徐在德,刘 柳,程思萌,刘 畅

(国网江西省电力有限公司电力科学研究院,江西 南昌 330096)

摘 要:闽赣背靠背直流联网工程计划于2026年投运,届时,江西电网直流网架由单回变双回,省内安全稳定特性将发生重大变化。针对这一形势,文中基于PSASP仿真平台,在2026年运行方式数据上搭建闽赣直流模型,从江西全局电网、赣州局部电网两方面出发,结合闽赣直流的运行工况,详细地分析了其给江西电网安全稳定带来的影响。分析结果表明,闽赣直流与雅湖直流的静态潮流、暂态稳定均互不影响,可认为相互解耦;闽赣直流的效应主要集中于赣州局部,其运行工况将影响赣州断面输电能力及局部暂稳特性,相关结论可为直流接入后,江西电网的安全稳定运行提供重要参考。

关键词:背靠背直流;断面能力;消纳与疏散;暂态稳定

中图分类号:TM 721.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-348X(2025)02-0005-06

0 引言

近年来,随着江西经济的快速发展,全省用电量节节攀升,预计2030年最大负荷将达5900万kW。与负荷的快速增长相反,省内火电装机在2027年后将长期保持约4100万kW不变。考虑新能源装机容量具有不确定性,“十五五”中后期江西电网将存在较大的电力缺口,预计最大达890万kW^[1];与此同时,福建电网存在较大的电力盈余。因此,按照最新规划,2026年将建设闽赣直流联网工程(下文简称“闽赣直流”),通过背靠背方式实现江西、福建电网互联,发挥负荷错峰、余缺互济、安全支撑等方面的作用,可加强省间电力互补互济能力,提升紧急情况下的事故支援能力。

按照最新规划,闽赣直流投运后,江西电网500 kV网架保持“一核四翼五环网”不变,但直流网架由单回变双回,省内安全稳定特性将发生重大变化。过去,江西电网关于直流工程的研究仅限于雅湖直流^[2-4]。若在雅湖直流基础上叠加闽赣直流,研究内容将产生较大区别;一方面,闽赣直流建成后,两回直流分别落点南昌、赣州,共同作用于江西电网,相互间的耦合关系

难以明晰,需深入探究;另一方面,闽赣直流为柔性直流,暂态特性与常规直流存在巨大区别,需结合其运行工况做详细分析。

文中基于PSASP仿真平台,在江西电网2026年运行方式数据上,按最新规划方案搭建闽赣直流模型,从江西全局电网、赣州局部电网两方面出发,结合闽赣直流不同运行工况,详细地分析了闽赣直流对江西电网带来的影响,发现闽赣直流的效应主要集中于赣州地区,赣州断面输电能力及局部暂稳特性均与闽赣直流运行工况相关。

1 闽赣直流接入系统方案

按照最新规划方案,闽赣直流采用柔性直流技术,在500 kV红都站附近建设背靠背换流站,同时新建换流站至红都双回500 kV线路,长度35 km,新建换流站-汀州双回500 kV线路,长度48 km,换流站四回出线的导线型号均为LGJ-4×630。闽赣直流规划满送功率为300万kW,为实现直流功率的合理疏散,额外新建琴城-红都II线,长度160 km。

相比于常规直流,柔性直流最大的特点是采用全控型电力电子器件,可实现有功、无功功率的独立控

收稿日期:2025-03-15

作者简介:戈田平(1997),男,硕士,工程师,研究方向为电力系统安全稳定运行。

制,没有最小运行功率限制,可在毫秒级时间内实现潮流反转^[5]。因此,闽赣直流的运行工况十分复杂,可在外送300万kW至受电300万kW之间任意变化,需要结合运行工况详细地分析其安全稳定特性,以便制定合理的运行规则,减轻调度压力。此外,闽赣直流作为连接江西、福建电网的大型工程,打破了江西以往“单直流”格局,按照河南、湖北电网等多直流分析方法,需要从全局、局部影响两方面进行逐次分析^[6-8]。全局分析重点关注直流间的耦合关系、省间断面的输电能力,局部分析重点关注薄弱断面的输电能力、局部电网的暂稳特性。

闽赣直流投运后,江西电网500 kV及以上电压等级网架结构如图1所示。

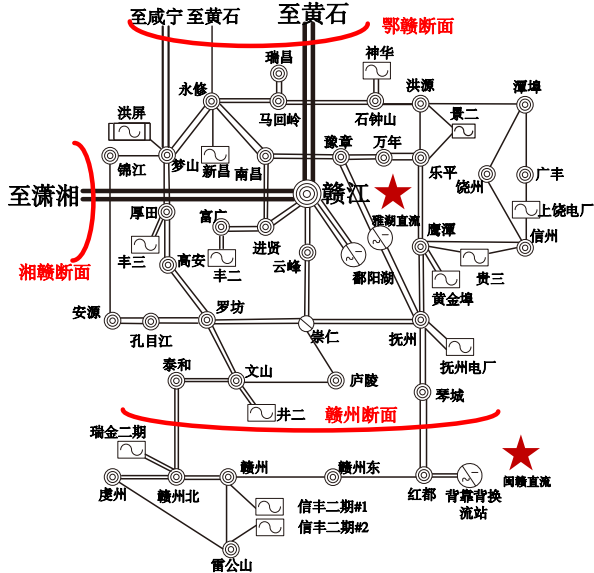


图1 闽赣直流接入方案示意图

2 闽赣直流对江西全网的影响

从江西电网整体来看,需要关注的问题主要有两个:一是省间断面的输电能力、雅湖直流的疏散能力是否因闽赣直流投运而发生明显变化;二是雅湖直流主导下的省内暂稳特性是否因闽赣直流投运而发生较大变化。

2.1 静态安全分析

2026年,江西电网通过鄂赣断面(500 kV黄永线、咸梦双回线,1000 kV黄江双回线),湘赣断面(1000 kV潇江双回线)分别与湖北、湖南电网相连,两断面位于江西省中、北部;雅湖直流通过江云、进江四回

线疏散换流站低端潮流,通过鄱抚、鄱章四回线疏散换流站高端潮流,位于江西省中部。闽赣直接入江西南部,与中、北部距离较长,其投运对省间断面及雅湖直流潮流疏散的影响有限。分析思路:投运闽赣直流并使其运行于闽送赣或赣送闽最大功率上,用赣州负荷或机组平衡直流功率,观察省间断面线路潮流、雅湖直流疏散潮流是否因此而发生变化。相关运行方式如下:

- 方式一:江西平负荷方式,闽赣直流未投运;
- 方式二、三:在方式一基础上,闽赣直流投运且闽送赣300万kW,关赣州地区机组(方式二)、等比例增长赣州负荷(方式三)以平衡功率;
- 方式四、五:在方式一基础上,闽赣直流投运且赣送闽300万kW,开赣州地区机组(方式四)、等比例降低赣州负荷(方式五)以平衡功率。

五种方式下相关线路潮流如表1所示。

表1 闽赣直流典型工况下部分线路潮流值

	MW				
	方式一	方式二	方式三	方式四	方式五
黄永线	591	595	594	587	587
咸梦I线	460	472	476	440	444
咸梦II线	468	480	484	448	451
黄江I线	464	460	452	479	475
黄江II线	464	460	452	479	475
潇江I线	-172	-174	-179	-163	-165
潇江II线	-172	-174	-179	-163	-165
江云I线	656	656	650	663	661
江云II线	658	658	652	665	663
进江I线	609	603	596	626	622
进江II线	610	604	598	628	624

由表1可知,闽赣直流投运对省间断面潮流及雅湖直流疏散潮流基本无影响。可认为,静态模式下闽赣、雅湖直流间无耦合关系,闽赣直流不会改变省间断面输电能力、雅湖直流疏散能力。

2.2 暂态稳定分析

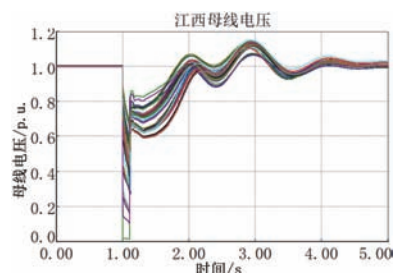
2026年,500 kV赣江站扩建第三台主变并实行分列运行,雅湖直流主导的省内暂稳特性将受南进双回线N-2故障制约(下文简称“南进N-2”);500 kV赣州北站投运,赣州地区暂稳特性将受泰和-赣州北、赣州北-瑞金二期赣州北侧N-2故障制约(下文简称“赣州北N-2”);下文以南进N-2、赣州北N-2故障下500 kV母线电压暂稳曲线作为对比依据。分析思路:雅湖直流临界稳定方式下,投运闽赣直流且保证赣州局部临界稳定,观察雅湖稳定特性是否发生变化;赣州局部临界稳定方式下,改变雅湖直流运行工况,观察赣州局部稳定特性是否发生变化。相关运行方式如下:

方式一:江西小开机大负荷方式,雅湖直流受入440万kW,鄂赣、湘赣断面共受入880万kW,雅湖直流主导下省内处于临界稳定方式;

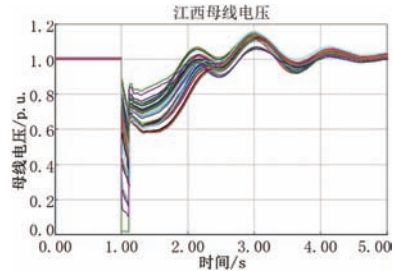
方式二:在方式一基础上,闽赣直流投运且闽送赣300万kW,赣州机组留取30万kW旋备,调整赣州负荷以平衡功率,此时赣州局部处于临界稳定;

方式三:在方式二基础上,雅湖直流运行至530万kW工况下,调整除赣州外其余区域的负荷以平衡功率,此时赣州局部仍处于临界稳定方式;

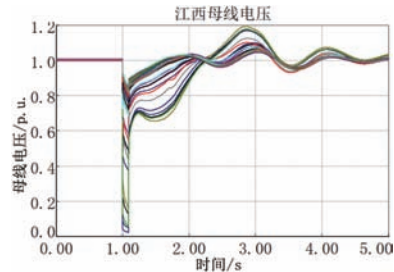
三种方式下江西500 kV母线电压暂稳曲线如图2所示。



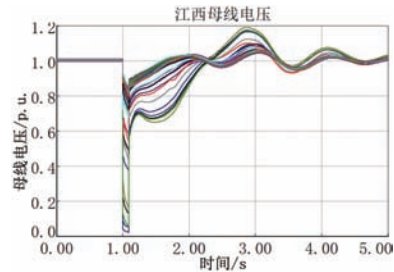
a) 方式一南进N-2临界稳定



b) 方式二南进N-2临界稳定



c) 方式二赣州北N-2临界稳定



d) 方式三赣州北N-2临界稳定

图2 闽赣、雅湖直流暂稳特性耦合关系

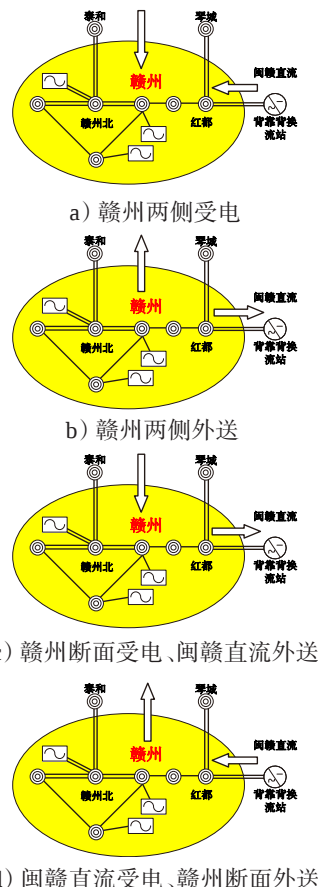
由图2a、b对比可知,雅湖直流主导下省内临界稳定时投运闽赣直流,在保证赣州地区暂态稳定的情况下,雅湖直流稳定特性不会发生变化;由图2c、d对比可知,赣州电网局部临界稳定时更改雅湖直流运行工况,同样不会导致闽赣直流主导下的赣州局部暂稳水平发生变化。因此,可认为暂态模式下闽赣、雅湖直流无耦合关系,闽赣直流不会改变雅湖直流主导下的省内暂稳特性。

3 闽赣直流对赣州局部的影响

从赣州电网局部来看,需要关注的问题主要有两个:一是不同工况下,闽赣直流疏散能力、赣州断面输电能力;二是闽赣直流主导下的赣州电网暂态稳定特性。

3.1 静态安全分析

2026年新建琴红II线后,闽赣直流功率主要通过琴红双回线、赣州东-红都线路及红都两台主变进行疏散,潮流走向存在四种情况,如图3所示。



d) 闽赣直流受电、赣州断面外送

图3 闽赣直流潮流疏散的四种情况

赣州一侧受电一侧外送时,潮流疏散通道较多;赣州两侧均受电或均外送时,潮流仅通过赣州东-红都线路和红都两主变疏散,某些线路N-1方式下易发生元件超热稳限额情况。需重点关注两侧均受电或均外送场景,相关运行方式如下:

方式一:赣州大负荷方式,赣州两侧均受电,闽送赣 300 万 kW,赣州断面受电 100 万 kW;

方式二:赣州小负荷方式,赣州两侧均外送,赣送闽 300 万 kW,赣州断面外送 100 万 kW;

基于上述两方式,对潮流较重元件附近区域做元件 N-1 分析,最严重的场景如图 4 所示。

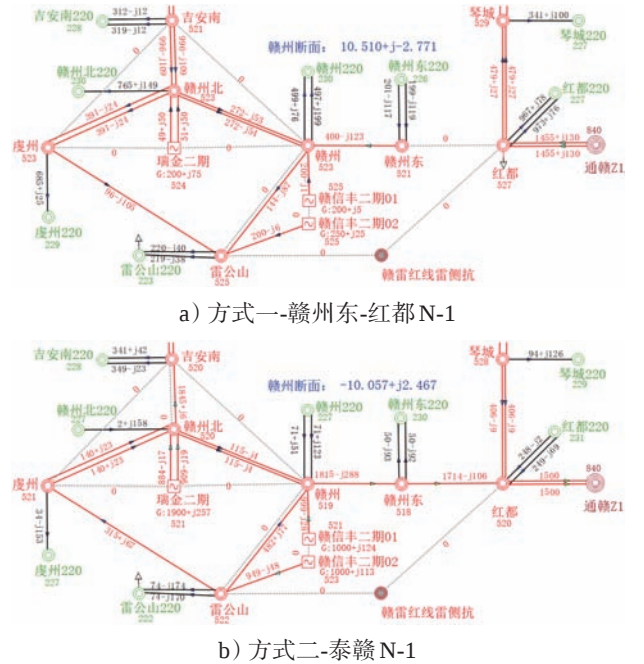


图 4 闽赣直流潮流疏散分析

由图 4 可知,最恶劣场景下,闽赣直流的潮流疏散过程无元件达到热稳限额,因此按照这一规划方案闽赣直流可满足功率运行。

赣州电网通过两侧断面(泰赣双回为西断面、琴红双回为东断面)与江西主网相连,闽赣直流接入了东断面核心节点红都站,其不同工况将极大地影响赣州断面输电能力。西断面线路 40℃热稳限额为 190 万 kW,东断面线路 40℃热稳限额 310 万 kW,考虑断面线路 N-1,西断面将更易过载。分析思路:首先分析线路 N-1 对断面潮流的影响,明确断面输电能力的制约故障;之后,在闽赣直流运行不同工况下,调整赣州开机、负荷,使制约故障下元件刚好过载,从而得到断面输电能力。相关运行方式如下:

典型受电方式:赣州大负荷,闽送赣 300 万 kW,赣州断面受电 260 万 kW;赣州断面输电能力制约故障推导过程如图 5 所示。

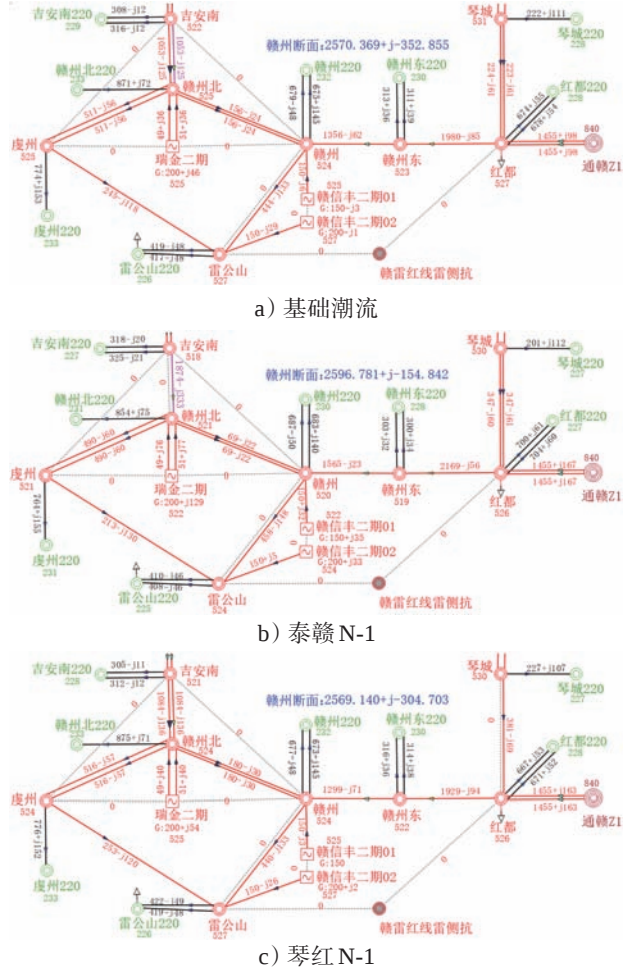


图 5 赣州断面输电能力计算过程

由图 5 可知:“泰赣双回 N-1,潮流转移至另一回线的转移比为 78%”,“琴红双回 N-1,潮流转移至另一回线的转移比为 71%”。泰赣或琴红 N-1,均不会导致对方潮流过载,可认为两故障之间解耦。泰赣双回线径较小,“泰赣双回 N-1,另一回路潮流达热稳限额”为赣州断面输电能力的制约故障。

使用上述方法,在闽赣不同运行工况下,推算赣州断面输电能力,可得两者之间的关联关系如表 2 所示。

表 2 闽赣直流工况与赣州断面输电能力关联关系

	万 kW	
	赣州断面受电极限	赣州断面外送极限
闽送赣 300	260	440
	210(西)+50(东)	210(西)+230(东)
闽赣功率结零	410	290
	210(西)+200(东)	210(西)+80(东)
赣送闽 300	530	130
	210(西)+320(东)	210(西)-80(东)

由表2可知,闽赣直流工况极大地影响赣州东断面潮流,而对西断面潮流无影响;在闽送赣工况下,闽赣直流等效于大电源接入红都站,从而阻碍琴红受电、加强琴红外送;在赣送闽工况下,直流等效情况则相反。

3.2 暂态稳定分析

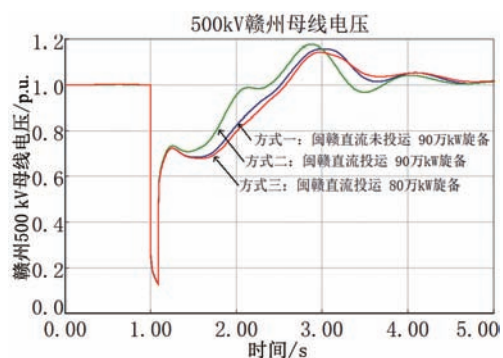
首先探究闽赣直流对赣州电网局部暂稳特性的影响,分析思路:投运闽赣直流并使其功率结零,观察制约故障下暂稳曲线变化情况;改变赣州机组旋备,使其暂稳曲线恢复至未投运前,定量表示直流对局部稳定水平的影响,相关运行方式如下:

方式一:闽赣直流未投运,赣州大负荷方式,瑞金二期留90万kW旋备,赣州断面受电300万kW,赣州电网局部临界稳定;

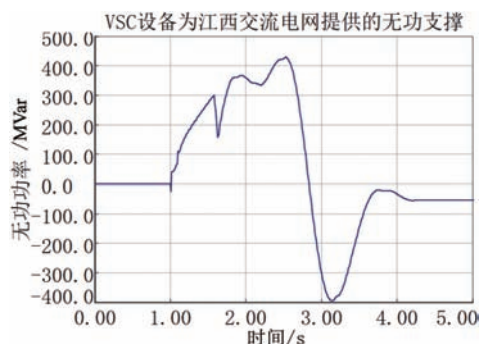
方式二:以方式一为基础,闽赣直流投运,且其运行功率结零;

方式三:以方式二为基础,瑞金二期改为留80万kW旋备,赣州断面受电不变。

上述方式下发生赣州北N-2故障,局部暂稳水平对比、VSC设备无功支撑情况如图6所示。



a) 闽赣直流提升局部暂稳水平



b) VSC设备动态无功支撑

图6 闽赣直流投运前后对比

由图6a可知,闽赣直流的投运将略微提高赣州

地区暂稳特性,效果与降低瑞金二期10万kW旋备相当;这与柔直的动态无功支撑能力有关,暂态过程中闽赣直流提供的动态无功如图6中b所示。

在保持赣州机组开组合不变的情况下,通过江西、福建机组的开停机及等比例地调整赣州地区负荷,可得到赣州电网不同边界下的运行方式;再根据不同边界下,赣州地区临界稳定时对应的机组留旋备量,可以定量地表示不同边界下暂稳水平。不同边界下对应机组旋备量如表3所示。

赣州交流断面与闽赣直流边界共同组成一种运行方式,由表3可知:赣州交直流总体受电越大,赣州地区机组留取旋备越多,暂稳特性越差,赣州交直流总体外送越大时暂稳特性同样变差。当赣州交直流断面保持一致时,改变闽赣直流与赣州交流断面的占比,不同方式对应的赣州电网局部暂稳水平基本一致(差距在20万kW旋备以内),暂稳特性随着闽赣直流受电值的增加而恶化,闽赣直流受电300万kW时最差。若保持闽赣直流边界不变,赣州交流断面受电、结零、外送方式下,赣州交流断面受电越大赣州暂稳特性越差;若赣州交流断面边界保持不变,闽赣直流受电、结零、外送方式下,闽赣直流受电功率越大赣州暂稳特性越差。

表3 赣州电网交直流断面边界与赣州机组旋备关联关系
万kW

运行方式		赣州断面边界								
		受400	受300	受200	受100	结零	送100	送200	送300	送400
闽赣 直流 边界	受300	/	/	/	110	95	75	55	40	35
	受200	/	/	110	90	70	50	35	30	30
	受100	/	110	80	60	45	30	20	20	25
	结零	110	80	60	40	25	15	10	15	30
	送100	80	60	45	25	15	10	10	25	/
	送200	65	45	30	20	10	10	15	/	/
	送300	45	30	20	10	10	15	/	/	/

4 结语

1) 闽赣直流投运后,与雅湖直流分别接入赣州、南昌,共同作用于江西电网,两者之间无网架直接相连,需通过500kV网架间接联系,这导致两者间电气联系薄弱,两直流的静态潮流、暂态稳定均互不影响,可认为两直流间相互解耦;鄂赣、湘赣断面位于中、北部,与闽赣直流间电气距离遥远,闽赣直流多种工况下均不会改变省间断面输电能力;江西全局暂稳特性

由雅湖直流主导,受中部关键线路N-2故障制约,因闽赣直流与雅湖直流间相互解耦,其投运对全局暂稳特性没有影响。

2) 闽赣直流对江西电网的影响集中于赣州局部:对于闽赣直流功率的疏散,在多种边界下均无元件N-1导致的过载问题,这说明闽赣直流可满足功率运行;对于赣州断面输电能力,闽赣直流只影响东断面,闽赣直流受电时,等效于红都站接入一个大电源,从而降低琴红双回的受电能力同时增加其外送能力,闽赣直流外送时则相反。

3) 对于赣州地区局部暂稳特性,闽赣直流作为柔性直流,有一定动态无功支撑能力,接入后若维持在功率结零状态,可提升赣州局部暂稳水平;赣州局部稳定特性受运行边界的影响,赣州总体受电越大暂稳特性越差;当总边界固定时,改变闽赣直流与赣州断面的占比,赣州电网暂稳水平基本一致(差距在20万kW旋备以内),此时赣州稳定特性随着闽赣直流受电的越大而恶化,当闽赣直流受电300万kW时最差。

参考文献:

- [1] 胡晟,郑春,聂更生,等.闽赣两省电网异步互联探索研究[J].江西电力,2022,46(7):5-9.
- [2] 陈波,周宁,舒展,等.雅中-江西特高压直流入对江西电网影响分析[J].江西电力,2016,40(4):13-17.
- [3] 辛建波,王玉麟,舒展,等.特高压交直流接入对江西电网暂态稳定的影响分析[J].电力系统保护与控制,2019,47(8):71-79.
- [4] 陈波,熊华强,舒展,等.雅中—江西特高压直流消纳能力分析及提升措施研究[J].江西电力,2021,45(4):2-6,20.
- [5] 饶宏,周月宾,李巍巍,等.柔性直流输电技术的工程应用和发展展望[J].电力系统自动化,2023,47(1):1-11.
- [6] 边宏宇,潘晓杰,刘芳冰,等.多直流馈入背景下的河南电压稳定分析及改善措施研究[J].电力系统保护与控制,2020,48(21):125-131.
- [7] 蔡德福,周鲲鹏,董航,等.渝鄂柔性直流背靠背联网工程对湖北电网运行特性的影响[J].湖北电力,2017,41(1):9-13.
- [8] 邱威,贺静波,于钊,等.特高压直流馈入湖南电网的暂态电压稳定分析[J].电力自动化设备,2019,39(10):168-173.