

江西主网故障引发分布式光伏脱网风险评估

戈田平¹, 陈波¹, 汪硕承¹, 程思萌¹, 韦宝泉²

(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. 华东交通大学, 江西 南昌 330013)

摘要:江西电网分布式光伏大规模增长以来, 电网主网中交流短路等故障易引发分布式光伏的连锁反应, 造成大范围脱网, 对电力系统的安全稳定运行构成严重威胁。针对这一问题, 文中对主网故障引发分布式光伏脱网的机理进行了详细分析, 发现电压暂降是造成分布式光伏脱网的主要因素, 基于江西全网数据对主网故障引起电压暂降的传播特性进行了仿真验证, 并对分布式光伏脱网风险进行了相应的评估。

关键词:主网故障; 分布式光伏; 电压暂降; 低压穿越; 风险评估

中图分类号: TM 615 **文献标志码:** B **文章编号:** 1006-348X(2025)01-0019-05

0 引言

随着“双碳”政策的持续推进, 新能源迎来快速发展, 江西电网分布式光伏的增长尤为迅猛, 截至2024年底, 总容量已达到1 185万 kW。分布式光伏抗扰动能力弱, 在其规模化接入电力系统后, 参与多层级的源荷相互作用, 主网故障容易引发分布式光伏的连锁反应, 造成大范围脱网, 这将对电力系统的安全稳定运行构成严重威胁。

目前, 大量的研究聚焦于集中式光伏脱网风险评估。文献[1]对2016至2023年间, 国外11起新能源大规模脱网事故进行分析, 指出: 高比例新能源接入弱电网, 电力系统电压支撑不足, 电网故障诱发电压保护动作是新能源脱网的重要诱因; 文献[2-3]提出新能源多场站短路比来衡量系统电压支撑强度, 这一指标会随着新能源接入规模的增加而减小, 可作为评估新能源脱网风险的依据; 文献[4]进一步利用临界短路比指标约束, 建立了新能源消纳能力与新能源并网点系统强度之间的关联, 可用于评估某一并网点处可接入的新能源规模。上述研究均针对集中式光伏, 文献[5]指出分布式光伏99%以上接入中低压配电网, 呈现“单机小、数量多、电压低、分布无规律”等特点, 难以用短路比指标来衡量潜在的脱网风险。截至当前, 并无相关文献对分布式光伏脱网评估进行研究, 文中对主网故障引发分布式光伏脱网的机理进行了详细分析, 发现电压暂降是造成分布式光伏

脱网的主要因素, 基于江西全网数据对电压暂降的传播特性进行了仿真验证, 并依据电压暂降传播特性对分布式光伏脱网风险进行了相应的评估。

1 主网故障引发分布式光伏脱网的机理

主网故障通常指110 kV及以上电网中的交流短路故障, 其中交流线路三相接地故障对系统造成的危害最大, 为文中的主要研究对象。三相接地故障发生后, 接地点电压将暂时降至0, 之后继电保护装置马上动作, 断开故障支路, 故障清除后断路器重新闭合, 电压恢复至正常。这一过程中, 接地点的电压暂降首先经同电压等级线路传输至其他母线节点, 故障点所在片区的母线均将发生不同程度的电压暂降, 之后电压暂降经变压器向低电压等级逐级传输, 导致分布式光伏并网点同样发生一定程度的电压暂降^[6]。若分布式光伏并网点暂降程度较深, 持续时间较长, 分布式光伏低压穿越策略失败, 将导致分布式光伏机组脱网, 此即主网故障导致分布式光伏脱网的主要机理。因此, 首先需要对短路故障引起电压暂降在同等级电网、跨电压等级电网中的传输机理进行分析, 并对分布式光伏模型及其脱网特性进行研究。

1.1 电压暂降传输机理

1.1.1 电压暂降经同电压等级传输特性

电压暂降在同电压等级网络中传输结构如图1所示。电压暂降主要通过输电线路在同电压等级网络间

收稿日期: 2025-02-05

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。

传输,线路阻抗是影响电压暂降传输的关键因素。

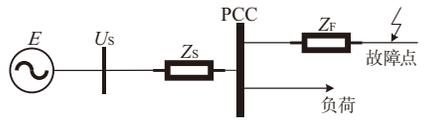


图1 电压暂降在同电压等级间传输结构图

图1中 Z_s 与 Z_f 为线路阻抗,假设中性点有效接地,线路的正、负、零序阻抗均相等,电源电压 E 为1,不考虑负荷电流,当系统发生三相接地故障时,可知PCC母线处三相电压为。

$$U_a = U_b = U_c = \frac{Z_f}{Z_s + Z_f} \quad (1)$$

由式(1)可知, Z_s 为定值时,PCC母线受三相接地故障引发的电压暂降将与故障点至PCC母线间线路阻抗 Z_f 成反比,远离故障点的母线电压幅值将高于靠近故障点的母线电压幅值^[7]。也就是说,电压暂降在同电压等级网络中传输时,会被线路阻抗逐渐削弱,离故障位置足够远的母线将几乎不受影响。

根据上述分析,可以推得,当电压暂降发生在短路容量大的区域时,电压暂降影响的范围将更广,程度将更深。这是因为短路容量越大,意味着附近母线之间的联系更为紧密,线路阻抗更小,对电压暂降的削弱作用也就更小。

1.1.2 电压暂降跨电压等级传输特性

电压暂降跨电压等级传输结构如图2所示,电压暂降主要通过变压器实现跨电压等级传输。变压器的传输矩阵是影响电压暂降传输的关键。

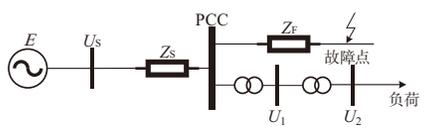


图2 电压暂降跨电压等级传输结构图

不同接线方式的变压器有着不同的传输矩阵,主网中变压器主要有三种接线方式: Y_0-y_0 、 Y_0-y 及 $Y-d$,对应的相电压传递矩阵如图3所示。

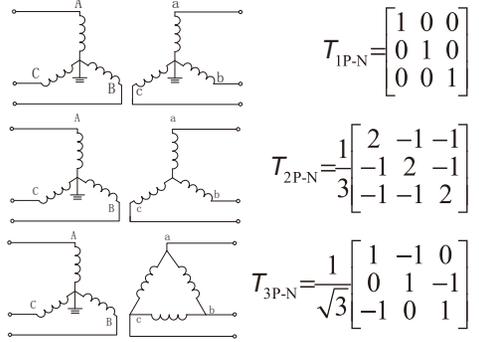


图3 不同接线方式变压器传输矩阵

根据变压器传输矩阵可推得,若均按理想变压器考虑,电压暂降经变压器传输后,低压侧电压暂降将保持原状或小幅削减^[8]。另一方面,变压器阻抗归算至低压侧时将提升至变压器变比的平方倍,这样一来极大地增加了低压侧母线与故障点之间的线路阻抗,同样阻碍了电压暂降的传输。

根据上述分析,可以推得,当电压暂降发生在高电压等级网络中时,对低电压等级网络的影响将小幅削减。这是由变压器传输矩阵以及变压器阻抗对暂降的削减共同导致。

1.2 分布式光伏脱网特性

分布式光伏按其接入的电压等级分为A类和B类:通过35 kV及以上电压等级并网,以及通过10(6) kV接入公共电网的光伏发电系统为A类;通过380 V及以下电压等级并网,以及通过10(6) kV接入用户侧的光伏发电系统为B类。江西电网B类分布式光伏占比较大,分布较广,故文中重点研究B类分布式光伏建模及其脱网特性。

B类分布式光伏通常安装在低压配电网中,主网电压暂降传输至光伏并网点后,光伏并网点同步发生一定程度电压暂降,若暂降过程中并网电压无法及时恢复,相关保护将动作导致光伏切机,造成光伏脱网。这一过程中,分布式光伏模型及其切机保护均可对光伏脱网造成影响,因此,需要研究B类分布式光伏模型及其切机保护原理。

1.2.1 分布式光伏模型

分布式光伏目前有单机和多机等值模型,单机等值模型可以很好地描述分布式光伏单机并网时的稳态和暂态特性。但是,单机等值模型的输出功率特性与其地理位置、并网电压、逆变器类型和控制策略相关,这使得单机等值模型在描述分布式光伏聚合体时显示出局限性;而多机等值模型可实现对分布式光伏聚合暂态特性的模拟,研究者能够有效地捕捉和表征详细模型中分布式光伏的集群暂态特性。文中B类分布式光伏采用中国电科院提供的多机等值模型^[9],典型模型如图4所示。

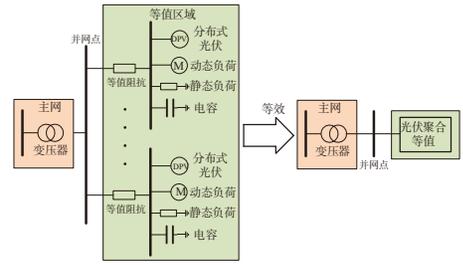


图4 分布式光伏等值聚合模型

等值过程中,使用聚类算法将具有相似动态特性的光伏发电单元聚合成一个单独的发电单元,并考虑同电压等级接入的动态、静态负荷及电容等元件的作用,形成最终的多机聚合等值模型,在同一并网点并网。文中分析的场景中不可忽视配网网络,故将分布式光伏聚合等值至10 kV侧。

1.2.2 分布式光伏脱网特性

分布式光伏并网点电压暂降期间,低压切机保护将监测并网点电压,若其满足切机判据:并网点电压低于某一判定值并持续一段时间后,保护立即动作导致光伏切机,低压切机保护曲线如图5所示,当运行点处于下半部区域时即触发保护动作造成切机^[10]。由图5可知,并网点电压水平及持续时间是脱网与否的关键。

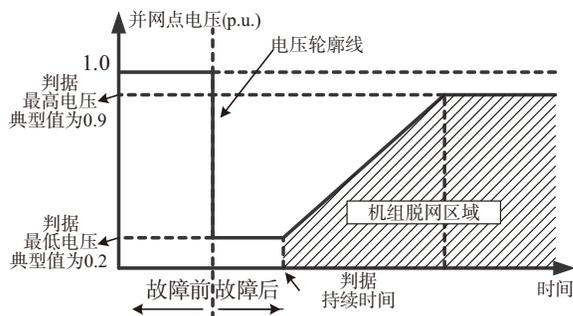


图5 分布式光伏低压脱网判据

2 江西主网故障引起电压暂降风险

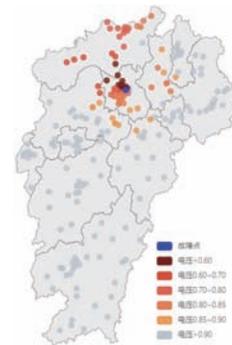
江西主网的核心为220 kV以上网架,本节以220 kV交流线路三相接地故障为研究对象。以江西地区2024年夏季平负荷方式作为基准数据,结合母线短路电流水平、站点位置,选取表1所示的部分出线,开展故障分析。

表1 站点选择

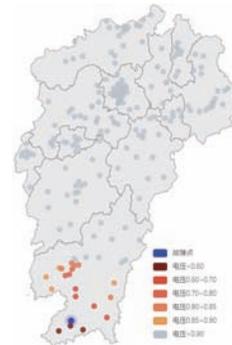
站点位置	短路电流/kA	出线
南昌220	42.6	南昌-七里线路
马洪220	30.0	马洪-狮山线路
金堂220	19.5	金堂-雷公山线路

2.1 同电压等级电压暂降风险

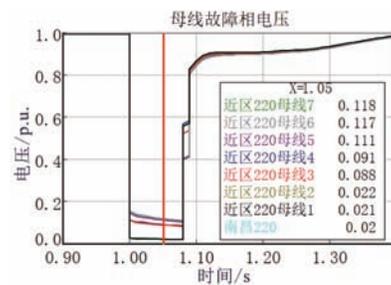
对南昌-七里、金堂-雷公山线路三相接地故障进行仿真,统计全网220 kV变电站母线电压暂降情况。全网电压暂降分布、近区电压暂降跌落程度最深的部分曲线如图6所示。



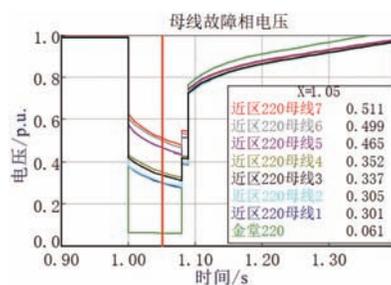
a) 南昌-七里线路三相接地220 kV母线电压暂降分布



b) 金堂-雷公山线路三相接地220 kV母线电压暂降分布



c) 南昌-七里线路三相接地近区220 kV母线电压暂降



d) 金堂-雷公山线路三相接地近区220 kV母线电压暂降

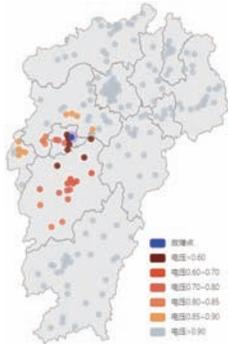
图6 同电压等级传输时电压暂降跌落深度对比

由图6可知,对于同一电压等级网络,交流线路三相接地故障发生在短路电流水平较高区域时,近区同电压等级母线电压暂降程度更深,电压暂降低于0.9 p.u.的范围更广,这很好地验证了电压暂降在同电压等级网架中的传输规律。

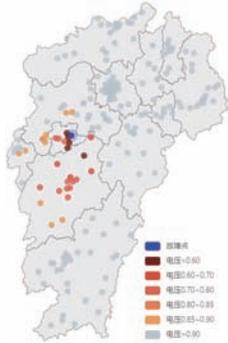
2.2 跨电压等级电压暂降风险

对马洪-狮山线路三相接地故障进行仿真,统计

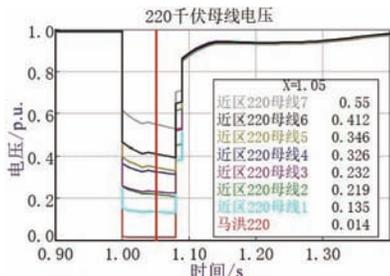
近区 220 kV 母线和 110 kV 母线电压暂降情况。全网电压暂降分布、近区电压暂降程度最深的部分曲线如图 7 所示。



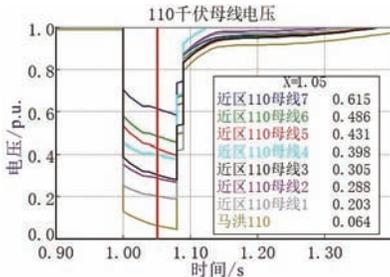
a) 马洪-狮山线路三相接地 220 kV 母线电压暂降分布



b) 马洪-狮山线路三相接地 110 kV 母线电压暂降分布



c) 马洪-狮山线路三相接地近区 220 kV 母线电压暂降



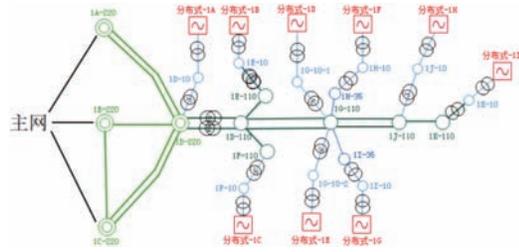
d) 马洪-狮山线路三相接地近区 110 kV 母线电压暂降

图 7 跨电压等级传输时电压暂降跌落深度对比

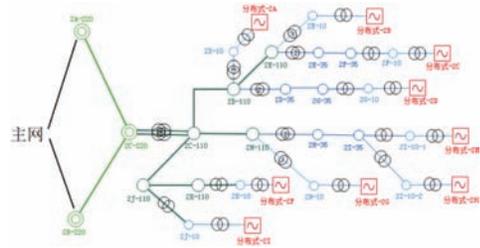
由图 7 可知,对于同一个交流短路故障,电压暂降跨电压等级传输后,暂降深度将削弱 0.05 p.u. 左右,电压暂降低于 0.9 p.u. 范围略微缩小,验证了电压暂降在跨电压等级网络中的传输规律。

3 电压暂降导致分布式光伏脱网风险

根据 B 类分布式光伏在江西电网的安装情况,选取了江西电网区域 I、II 作为主体研究对象,两区域对应的电网接线图如图 8 所示。



a) 区域 I 电网接线图



b) 区域 II 电网接线图

图 8 区域 I、II 电网接线图

区域 I 位于江西中部,站点密集,结构紧密,是网架核心。此区域 110 kV 网架为长链形,5 个站点的 10 kV 侧聚合形成 9 个分布式光伏,容量达 343 kW。

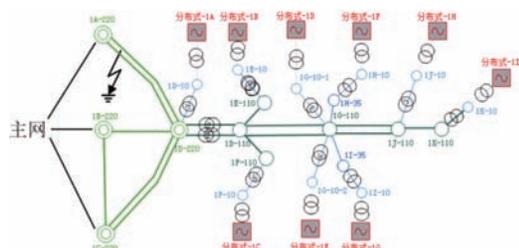
区域 II 位于江西南部,站点稀疏,结构薄弱,是网架末端。此区域 110 kV 网架为辐射形,5 个站点的 10 kV 侧聚合形成 9 个分布式光伏,容量达 168 kW。

区域 I 及区域 II 中相关母线的短路电流如表 2 所示:

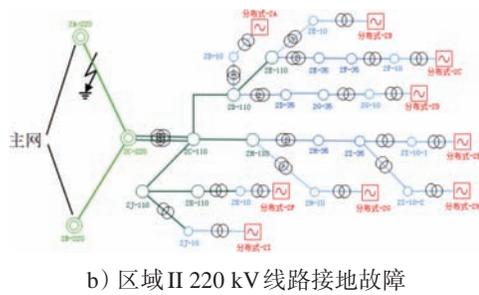
表 2 短路电流水平对比

kA		kA	
母线	短路电流	母线	短路电流
1A-220	48.4	2A-220	12.6
1G-110	7.0	2D-110	6.8
1J-110	6.4	2H-110	8.2

考虑 220 kV、110 kV 线路三相接地故障,不同故障点下分布式光伏脱网情况如图 9、图 10 所示。



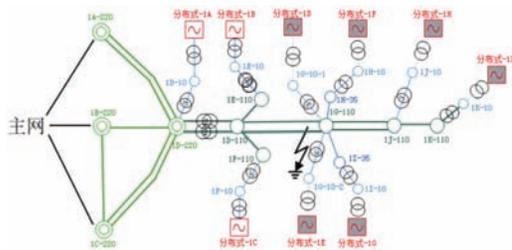
a) 区域 I 220 kV 线路接地故障



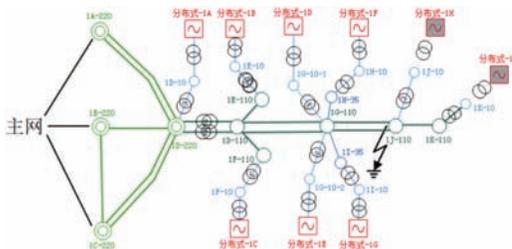
b) 区域II 220 kV线路接地故障

图9 220 kV故障下分布式光伏脱网情况

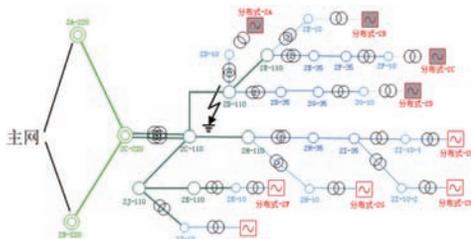
由图9可知,区域I发生线路接地故障后,分布式光伏全部脱网,区域II发生类似故障则不发生脱网。即对于220 kV线路三相接地故障,短路电流大的区域更易引起分布式光伏脱网,这与电压暂降的分布规律保持一致。



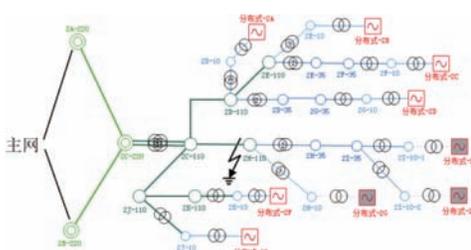
a) 区域I 110 kV线路接地故障-故障点1



b) 区域I 110 kV线路接地故障-故障点2



c) 区域II 110 kV线路接地故障-故障点1



d) 区域II 110 kV线路接地故障-故障点2

图10 110 kV故障下分布式光伏脱网情况

由图10可知,110 kV网架为长链形或辐射形结构,与主网只通过一侧相连。对于110 kV线路三相接地故障,分布式光伏脱网与否与短路电流水平无关,一旦发生故障,从故障点往电网末端网架中并网的分布式光伏均会脱网,且这一脱网现象不会向主网侧或其他分支侧延伸。

4 结语

1) 主网故障形成的电压暂降,经网络传输后,造成分布式光伏并网点电压同样发生暂降,若并网点的暂降程度较深、持续时间较长,满足脱网判据即可造成分布式光伏脱网。

2) 电压暂降在主网中传输存在两个规律:同电压等级传输时,暂降深度主要受线路阻抗削弱,因此故障发生在短路电流水平大区域时,易发生深度大、范围广的电压暂降;跨电压等级传输时,暂降深度经变压器向低电压等级传输后存在一定程度的削弱,因此故障发生在高电压等级时,低电压等级暂降深度及范围均将衰减。

3) 对于江西主网而言,220 kV网架为环形结构,多侧与主网相连,线路接地故障对分布式光伏脱网的影响与短路电流水平正相关,短路电流较大的区域,更易造成分布式光伏大范围脱网;110 kV网架为长链形或辐射形结构,一侧与主网相连,线路接地故障对分布式光伏脱网的影响与短路电流水平关联不大,一旦发生故障,从故障点往电网末端网架中并网的分布式光伏均会脱网,且这一脱网现象不会向主网侧或其他分支侧延伸。

4) 后续,将进一步研究500 kV故障对分布式光伏脱网的影响;研究分布式光伏机组参数对分布式光伏脱网的影响;以线路故障导致分布式光伏脱网范围为依据,划分风险等级,对线路实行分级运维,更好地维护电网安全稳定运行。

参考文献:

- [1] 徐式蕴,王一鸣,孙华东,等.国外新能源脱网事故对中国电网安全稳定运行的启示[J].电力系统自动化,2024,48(13):1-8.
- [2] 于琳,孙华东,徐式蕴,等.电力电子设备接入电压支撑度量化评估指标综述[J].中国电机工程学报,2022,42(2):499-515.
- [3] 孙华东,徐式蕴,许涛,等.新能源多场站短路比定义及指标[J].中国电机工程学报,2021,41(2):497-506. (下转第32页)

能源场站无功控制策略优化研究,充分发挥新能源场站SVG无功控制资源作用。

4 结语

分布式光伏大发期间,一方面输电线路潮流较轻,无功损耗小,充电无功过剩;另一方面为满足调峰需求关停部分常规机组,导致系统进相调节能力下降,二者是主网产生高电压现象的主要原因。针对高比例分布式光伏接入电网后引起的主网高电压问题,结合江西电网实际运行场景,总结得出以下建议:

1) 综合研判无功电压问题解决方案,结合区域无功补偿度,优化无功补偿装置配置类型和容量。若地区存在稳态无功过剩且动态无功不足问题,建议厂站优先考虑加装SVG;若地区仅存在稳态无功过剩问题,建议直接加装常规电抗器。此外,需加强无功补偿装置运维,确保装置能根据需要进行调压。

2) 开展厂网协同调压,优化分布式光伏大发时段电网运行方式,合理安排机组开机,加强机组进相管理。滚动开展500 kV及以上主变分接头档位优化。节假日极小负荷期间,应积极向国调、网调申请辅助调压,如雅湖直流降压运行、拉停线路,以配合江西电网电压控制。

3) 建议深入研究新能源力调电费调整方案,引导新能源场站的SVG无功调节资源更好地服务于新型电力系统发展,并开展新能源场站无功控制策略优化研究,将新能源场站纳入AVC系统统一控制。加强地调管辖的新能源场站无功管理,严肃考核无功设

备投运率不满足要求、假投入等情况。

参考文献:

- [1] 赵洪山,胡滇,魏伟,等.考虑相关性的配电网分布式光伏承载能力提升方法[J].电力系统保护与控制,2025,53(1):37-46.
- [2] 李佳,付骏,陈波,等.含高比例分布式光伏电站的配电网电压协调控制系统[J].江西电力,2023,47(2):7-12.
- [3] 王颖,文福拴,赵波,等.高密度分布式光伏接入下电压越限问题的分析与对策[J].中国电机工程学报,2016,36(5):1200-1206.
- [4] 康田园,詹惠瑜,贾东梨,等.高比例分布式光伏接入下的配电网电压控制策略研究[J].农村电气化,2024(12):6-11,15.
- [5] 欧奕昊,姜彤,张一航,等.考虑变流器无功调节的含高比例分布式光伏配电网多时间尺度电压控制方法[J].电力自动化设备,2024,44(12):221-230.
- [6] 尚博文,徐铭铭,张金帅,等.高比例分布式光伏接入背景下配电网电压调控方法研究综述[J].智慧电力,2024,52(12):1-11.
- [7] 张战彬,段珺,石磊磊,等.改善低压农网电压质量的分布式光伏电源优化配置方法[J].电力系统保护与控制,2016,44(22):129-135.
- [8] 乐健,朱江峰,孙旻,等.大规模分布式光伏接入的配网风险评估及应对措施研究[J].电测与仪表,2019,56(14):28-33.
- [9] 葛津铭,刘英儒,庞丹,等.含高渗透率光伏配电网的集群划分电压控制策略[J].高压技术,2024,50(1):74-82.
- [10] 邹文斌,韩松,荣娜,等.基于分布式共识协同的光伏逆变器电压控制策略研究[J].电力系统保护与控制,2024,52(1):166-173.
- [11] 贺静波,万磊,霍超,等.高压直流输电非典型工况下过电压异常风险分析[J].电网技术,2014,38(12):3459-3463.

(上接第23页)

- [4] 丁坤,陈博洋,秦建茹,等.大规模新能源集群接入弱电网的消纳能力评估方法[J].电力建设,2023,44(11):86-94.
- [5] 栗峰,丁杰,周才期,等.新型电力系统下分布式光伏规模化并网运行关键技术探讨[J].电网技术,2024,48(1):184-199.
- [6] 张宸宇,史明明,范忠,等.电压暂降事件分类及短路类型识别研究[J].电力工程技术,2018,37(2):102-107,113.
- [7] 胡文曦,肖先勇.电网结构对电压暂降传播的影响及其量

- 化分析方法[J].电力自动化设备,2020,40(7):181-189.
- [8] 罗珊珊,杜晓彤,张军,等.电压暂降通过多级变压器的传播规律研究[J].电力电容器与无功补偿,2019,40(5):170-175.
- [9] 胡善华.含高渗透率分布式光伏的有源配电网动态等值研究及应用[D].北京:中国电力科学研究院,2024.
- [10] 何冕,王林玲,郭成,等.电力系统电压暂降治理措施综述[J].电工技术,2023(18):210-215.