

# 分布式光伏台区电压越限问题机理分析及治理方法

蔡木良<sup>1</sup>, 吴朝晖<sup>2</sup>, 夏鹤轩<sup>3</sup>, 赖信辉<sup>1</sup>, 李赢正<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. 国网江西省电力有限公司鹰潭供电分公司, 江西 鹰潭 335000; 3. 南昌大学, 江西 南昌 330036)

**摘要:**随着分布式光伏等可再生分布式电源以及电动汽车等新型资源的广泛接入,传统配电网从单幅射源-荷供电逐渐转向高波动性、高随机性、多电源的新型配电网,给配电网运行带来了严峻的挑战。分布式光伏的接入易导致台区光伏倒送、电压越限,损坏用户电器,引发用户投诉,降低台区运行安全性和经济性。文中对分布式光伏接入台区的电压越限问题进行研究,并提出相应运行治理策略和方法,以进一步提升新型配电网对分布式光伏接纳和调控能力。

**关键词:**分布式光伏; 光伏台区; 电压越限; 功率控制; 运行治理

**中图分类号:** TM 72 **文献标志码:** B **文章编号:** 1006-348X(2025)01-0007-06

## 0 引言

随着国家“3060”碳达峰、碳中和目标战略的推进,中国新能源装机容量快速增长。2024年11月,国家能源局公布了前三季度光伏发电建设情况<sup>[1]</sup>,数据显示,我国光伏新增并网容量16 088万kW,其中分布式光伏新增并网容量8 522万kW,占全部光伏新增并网容量的53%。截至2024年9月底,我国分布式光伏累计装机量34 191万kW,分布式光伏渗透率前五省份为河南、山东、安徽、河北、江西,其中江西分布式光伏渗透率已达33%。

以江西省为例,2023年12月,江西省能源局印发《关于进一步推进屋顶分布式光伏健康有序发展的通知》<sup>[2]</sup>,指出不得无故限制光伏备案,在分布式光伏影响电网供电质量和电网安全运行风险时,可对分布式光伏发电项目采取限制出力等措施,并通过储能等手段提高调峰能力。分布式光伏快速增长使得供侧能源清洁化,同时,其出力高随机性和波动性导致配电网消纳问题严峻,配电系统面临电压越限<sup>[3-5]</sup>、光伏倒送<sup>[6-8]</sup>等问题,影响台区运行经济性;在电压过高时,家用电器会受较大

影响,导致其寿命下降、损坏甚至造成火灾<sup>[9-10]</sup>,对用户造成经济财产损失,因此,亟需开展分布式光伏接入导致的电压越限问题机理分析及治理策略研究。

文中聚焦于分布式光伏并网导致的电压越限问题,针对分布式光伏低压接入导致的电压越限问题进行机理分析,相应地开展电压治理策略、技术研究,提出了多类型光伏台区电压治理方法,例举相关治理案例,旨在给光伏接入导致电压越限治理时作参考。

## 1 分布式光伏接入引起电压越限的机理

目前,分布式光伏一般通过低压0.4 kV或中压10 kV、35 kV接入配电网,整体呈现低压占比高、分散接入多、接入容量小现象<sup>[11]</sup>。文中以分布式光伏低压0.4 kV接入为例,研究分布式光伏对台区线路电压影响机理,掌握光伏台区电压易越限的基本原因。

### 1.1 典型低压单幅射线路电压变化情况

如图1为 $n$ 节点典型配电网低压单幅射线路拓扑。

收稿日期:2025-02-05

基金项目:江西省重点研发计划(含高比例分布式电源的有源配电网智能管控与故障自愈技术研究,20223BBE51013)。

作者简介:蔡木良(1989),男,硕士,高级工程师,从事配电网运行、新型配电系统研究。

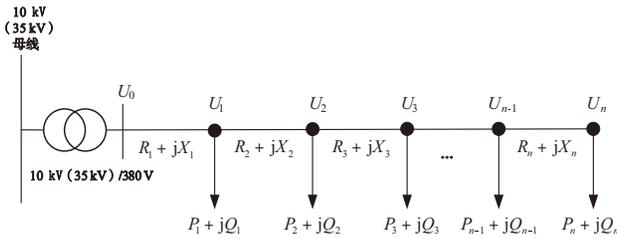


图1 典型配电网低压单幅射线拓扑

根据电力系统基础知识,稳态情况下,电压沿着功率流动的方向逐渐降低,以低压母线电压为系统电压,不考虑网损时为:

$$\Delta U_{(n-1,n)} = \frac{P_n R_n + Q_n X_n}{U_0} \quad (1)$$

式中: $\Delta U_{(n-1,n)}$ 为节点 $n-1$ 和 $n$ 电压差; $P_n$ 、 $Q_n$ 分别为节点 $n$ 的有功负荷和无功负荷; $R_n$ 、 $X_n$ 分别为节点 $n-1$ 和节点 $n$ 之间的电阻、电抗; $U_0$ 为系统电压。

进一步推理,为:

$$\Delta U_{(n-2,n-1)} = \frac{(P_{(n-1)} + P_n)R_{n-1} + (Q_{(n-1)} + Q_n)X_{n-1}}{U_0} \quad (2)$$

式中: $\Delta U_{(n-2,n-1)}$ 为 $n-2$ 和 $n-1$ 节点电压差; $P_{(n-1)}$ 、 $Q_{(n-1)}$ 分别为节点 $n-1$ 的有功负荷和无功负荷; $R_{n-1}$ 、 $X_{n-1}$ 分别为节点 $n-1$ 和节点 $n$ 之间的电阻、电抗。

根据以上规律可知,在不考虑网损的情况下,线路两节点之间线段的功率等于节点后所有用户负荷之和,按照累进叠加法,低压母线与节点 $m$ 的电压差可表示为:

$$\Delta U_{(1,m)} = \sum_{i=1}^m \frac{\sum_{j=1}^n P_j R_i + \sum_{j=1}^n Q_j X_i}{U_0} \quad (3)$$

则节点 $m$ 电压为:

$$U_m = U_0 - \sum_{i=1}^m \frac{\sum_{j=1}^n P_j R_i + \sum_{j=1}^n Q_j X_i}{U_0} \quad (4)$$

式中: $\Delta U_{(1,m)}$ 表示低压母线与节点 $m$ 的电压差; $U_m$ 为节点 $m$ 电压; $P_j$ 、 $Q_j$ 分别为节点 $j$ 有功负荷和无功负荷; $R_i$ 、 $X_i$ 分别表示节点 $i-1$ 和节点 $i$ 之间的电阻、电抗。

## 1.2 分布式光伏接入低压单幅射线电压影响机理

现假设单个分布式光伏功率从 $k$ 点注入低压配电网,如图2所示,分布式光伏接入低压单幅射线拓扑,节点 $m$ 电压有两种情况。

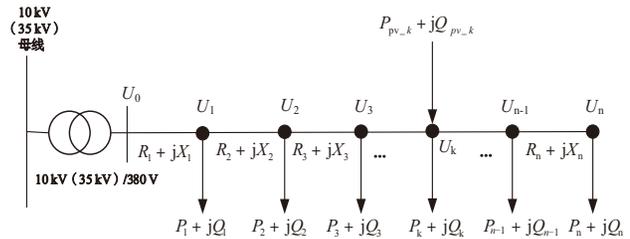


图2 分布式光伏接入低压单幅射线拓扑图

### 1.2.1 节点 $m$ 位于台区与光伏接入点之间

由于节点 $m$ 位于台区与光伏接入点之间,根据1.1节中提及“线路两节点之间线段的功率等于节点后所有用户负荷之和”,故所有线段电压差计算均需去除 $k$ 点接入光伏功率,则电压公式可统一表示为:

$$U_m = U_0 - \sum_{i=1}^m \frac{(\sum_{j=1}^n P_j - P_{pv,k})R_i + (\sum_{j=1}^n Q_j - Q_{pv,k})X_i}{U_0} \quad (5)$$

式中: $P_{pv,k}$ 、 $Q_{pv,k}$ 分别为分布式光伏有功出力和无功出力。

根据式(5)可以看出,光伏接入后,系统电压水平将有所提升,具体提升幅度与用户负荷、光伏出力、接入位置、电阻电抗(供电半径)以及低压母线电压相关。

### 1.2.2 节点 $m$ 位于光伏接入点之后

当节点 $m$ 位于光伏接入点与末端用户之间,根据1.1节中提及“线路两节点之间线段的功率等于节点后所有用户负荷之和”,故光伏接入点 $k$ 之前的线段电压差计算均需去除 $k$ 点接入光伏功率, $k$ 点之后的线段电压差计算只需考虑用户负荷,则电压公式可统一表示为:

$$U_m = U_0 - \sum_{i=1}^m \frac{(\sum_{j=1}^n P_j - P_{pv,k})R_i + (\sum_{j=1}^n Q_j - Q_{pv,k})X_i}{U_0} - \sum_{i=1}^m \frac{(\sum_{j=1}^n P_j)R_i + (\sum_{j=1}^n Q_j)X_i}{U_0} \quad (6)$$

根据公式(5)、(6),可以得到以下结论:1)当光伏功率越大,线路整体电压水平提升越多;2)当光伏功率等于节点 $k$ 及之后用户负荷功率之和时,节点 $k-1$ 至 $k$ 线段功率流动为0,此时相当于台区给节点1至 $k-1$ 供电,光伏电源给节点 $k$ 至 $n$ 供电,此时节点 $k-1$ 与节点 $k$ 电压相等;3)当光伏功率进一步提高时,功率将从节点 $k$ 流向节点 $k-1$ ,形成台区低压线路光伏功

率倒送,直至光伏功率等于节点 $k-1$ 及之后用户负荷功率之和时,此时,节点 $k-2$ 与 $k-1$ 电压相等,以此类推,随着光伏功率越大,整体电压水平提升越多,直至光伏功率超过线路所有用户负荷之和时,功率经变压器倒送至中压线路,此时节点 $k$ 为电压最高点,台区低压出口母线或末端用户为电压最低点;4)光伏接入点 $k$ 之后的节点电压也将提升,但沿线路方向逐步降低,不受光伏功率倒送影响;5)光伏接入点越靠近末端,其电压提升效果越明显。

因此,如图3所示,单个分布式光伏接入功率流动导致电压变化大致可分为三类模式:1)光伏出力小于接入点及后段负荷之和时,光伏功率向后端负荷流动,电压随低压线路走向逐渐降低;2)光伏出力大于接入点及后段负荷之和,但小于总负荷时,部分低压线路倒送,电压随低压线路走向先降低、后升高、再降低;3)光伏出力大于总负荷时,功率经变压器倒送至中压线路,电压先沿低压线路走向升高,至接入点后沿线路降低。

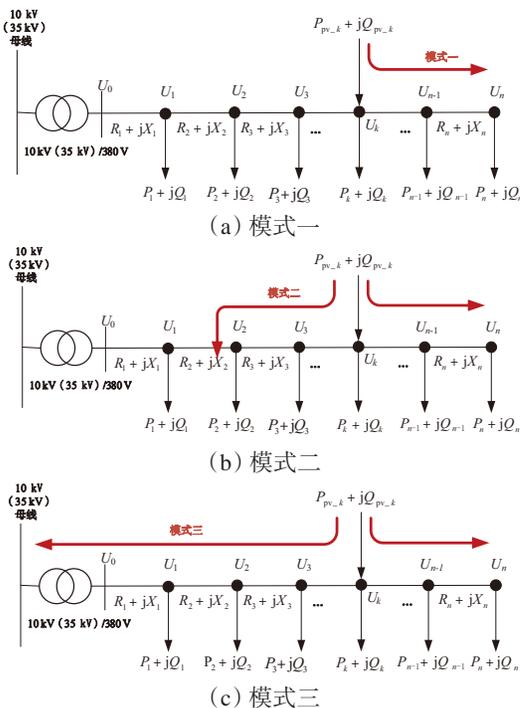


图3 三种光伏功率流动模式

## 2 分布式光伏台区多类型电压越限治理方法

根据上述分析,分布式光伏接入对电压的影响与低压母线电压、光伏出力、用户负荷、接入位置以及电

阻电抗(供电半径)密切相关。据此,文中针对以上电压的影响因素提出相对应治理方法。

### 2.1 配电变压器调档

为改变台区低压母线电压,可以通过变压器调档实现,以10 kV/400 V台区配变为例,其中压侧分接头一般有-5%、-2.5%、0、2.5%、5%共5个档位,分别对应23.75、24.375、25、25.625、26.25共5个变比。当低压侧出现用户高电压时,可以适当将变比调大,降低台区出口电压,从而使低压线路整体电压水平降低。然而,配变调档目前主要面临两方面问题,一是大多数台区变压器为非有载调压变压器,需要停电进行配变调档,影响供电可靠性;二是配变档位确定需要考虑用户负荷、光伏出力、供电半径、线路线径等多个因素,调档为三相同步调档,且光伏出力存在较大随机性、波动性,易出现为了避免高电压调档而出现低电压的情况,在部分场景难以同时兼顾电压越上限和下限治理。

### 2.2 逆变器出力控制

为了更精准有效地治理电压越上限情况,可对逆变器有功、无功出力进行控制。图4为逆变器有功-无功出力范围,第一象限为逆变器发出无功功率,第二象限为逆变器吸收无功功率。

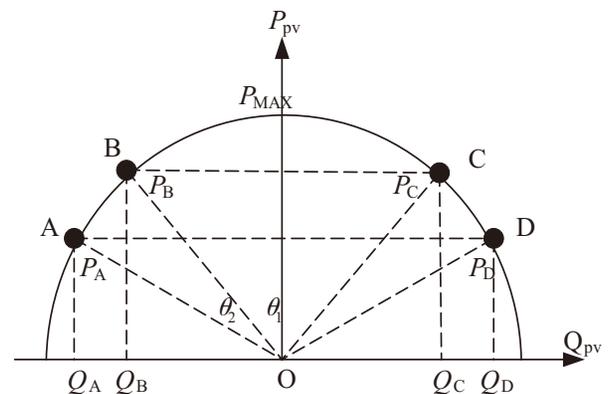


图4 逆变器有功-无功曲线图

#### 2.2.1 利用逆变器的剩余功率进行无功控制

当并网点电压在正常范围内时,维持原出力方式不变。当逆变器容量有剩余且并网点电压过高时,维持有功功率不变,逆变器运行点向第二象限移动吸收无功功率,电流超前电压,增加线路上流过的无功功率,以降低系统电压水平,直至图4中第二象限B点达到逆变器最大容量,此时功率因数角为 $\theta_1$ ;当逆变器容量有剩余且并网点电压过低时,维持有功功率不

变,逆变器运行点向第一象限移动发出无功功率,电压超前电流,以提升系统电压水平,直至图4中第一象限C点达到逆变器最大容量。

### 2.2.2 逆变器有功功率控制

当逆变器工作到最大容量时,由于容量受限,此时功率因数增大将导致有功功率降低、无功功率增加,如图4中BA段和CD段,逆变器功率因数角从 $\theta_1$ 变为最大功率因数角 $\theta_2$ ,且由于逆变器功率因数一般在0.8至1之间,故利用逆变器的剩余功率进行无功控制对电压改善能力有限。因此当光伏倒送导致电压越上限时,需要控制逆变器有功出力以降低系统电压水平。此时,逆变器运行点沿AO降低,保持功率因数不变,有功功率和无功功率同比例降低,如1.2节中所述,当光伏出力减小时,系统电压将明显改善。

目前,全国多地已开展分布式光伏“可观、可测、可调、可控”(四可)建设工作,电力公司对分布式电源的管控能力大幅提升,有效保障了光伏台区运行安全和稳定。

### 2.3 分布式储能配置与台区柔性直流互济

为减少线路上倒送的光伏功率,同时不降低光伏出力(即将光伏剩余功率转移至它处),可通过分布式储能<sup>[12-13]</sup>、台区低压柔性直流互联<sup>[14-15]</sup>等新型配电技术手段实现。

通过配置分布式储能系统,在光伏产生倒送时,分布式储能进行充电以吸收电网无法消纳的光伏功率,降低线路倒送功率,改善电压越上限、配变反向重过载情况。在负荷高峰时、光伏出力降低时,通过分布式储能系统放电,降低台区输送功率,改善电压越下限情况。通过储能充放电,可提升台区电压质量,提升台区运行经济性,保障用户光伏发电收益,在故障停电时,也可作为应急电源,保障一定时长的电力供应,提升台区供电可靠性。

另外,可构建台区柔性直流互联系统,将分布式电源接入直流母线,并通过AC/DC变流器转换为交流电,在台区低压线路首端接入供给台区低压负荷,以减少交流线路上光伏功率流动,维持用户电压正常;同时,当多台台区通过直流母线互联时,通过配置控制策略,当某一台区光伏功率较高时,功率可通过直流母线传输至其他高负荷台区,实现分布式电源功率共济,以解决光伏消纳、电压越限等问题,提升台区电能质量。

### 2.4 合理优化低压网架

低压用户电压值还与供电半径、分布式光伏接入位置有关,因此需要合理优化台区低压网架,以改善电压越限情况。

针对台区网架不合理情况,可通过缩短供电半径、增加线径<sup>[6]</sup>等方式改善。通过改变供电半径,即拆分台区新增布点,由新电源向部分末端台区供电,能减小线路的供电半径,从而压降线路的电压升高值;增加线径同样可以减小线路阻抗,改善电压越限情况。

另外,在进行低压分布式光伏规划和容量配置时,应尽量部署在靠近台区出口位置,最大程度让光伏功率优先供给于后端负荷。在产生光伏倒送时,由于光伏功率流过线路阻抗较小,产生的电压差较低,其对用户电压影响较小;还可使用“集中汇流”模式,将同一区域内较为分散的分布式光伏集中接入某一个或多个专用变压器,通过10 kV线路并入配电网,更易实现对电压的控制,同时集中汇流箱可汇集、管理和监控来自各个光伏系统的电流,便于整体运行和维护。在此基础上,可推广“集中汇流+配储”模式,更为集中地进行光伏消纳,提高线路光伏可开放容量。

### 2.5 优化用户负荷时间分布

通过精细化调整分时电价,将光伏大发时段设置为谷段,引导用户在光伏出力较高时增加用电,引导和鼓励用户灵活实施削峰填谷,将夜间负荷转移至光伏大发时段,以消纳高峰时期光伏功率,改善光伏倒送情况,提高电力系统的整体运行效率。目前,全国已有10余省份开展试行“光伏大发时段谷电价”,有效提升光伏消纳水平。

## 3 江西实际案例

### 3.1 江西电压越限治理思路

通过绝对值越限研判用户高低电压具有一定局限性,某些用户电压可能受10 kV母线、配变电压影响,整体偏高或偏低,导致网架及运行问题无法判断。因此,文中考虑以台区电压降(台区出口电压与用户侧电压的差值)、反向负载率指标为核心开展光伏台区治理,提出多类型的光伏台区自我管理、自平衡方法。

#### 1) 主配协同联合调档

江西目前无电压降越限的台区占总光伏台区数的74.6%，此类台区光伏功率与负荷匹配情况较好，低压网架良好，存在两种情况：一是台区配变档位正常，电压范围正常；二是台区配变档位过高或过低，但由于低压网架良好，无电压降越限。因此，这类台区可以再结合电压绝对值，判断是否要进行“主配协同调档”，以确保台区用户电压值在正常范围。

### 2) “主配协同调档+分布式光伏”出力控制

在无电压降越限台区中，光伏反向重过载台区的特征为：光伏渗透率过高，且负荷相对于光伏功率较小，导致台区反向重过载。通过采用台区增容，或者分布式光伏“四可”措施，对光伏逆变器输出功率进行控制，可以有效改善台区反向重过载情况，同时采用“主配协同调档”，进行电压调节。

### 3) 台区低压网架改造+主配协同调档+源荷协同技术

针对电压降越上限、下限比例大于10%的问题台区，其低压网架结构难以有效支撑负荷功率和光伏台区功率的正常流动。针对此类台区，有两种方案，一是针对台区成片高/低电压，开展低压网架改造，通过增大低压线径、下户线线径、新增布点、缩短供电半径等方法，开展光伏台区低压网架线路改造，进一步提升光伏台区低压网架线路水平，在此基础上，再开展“主配协同调档+分布式光伏出力控制”，实现台区自我管理；二是针对台区短时反向重过载以及少数用户高低电压情况，为降低基建投资，利用分布式储能灵活充放电方法，来治理台区电压越限情况、降低台区最大反向负载率，同时结合“分布式光伏出力控制”，达到“光伏功率+储能”协同优化，以实现台区自我管理。

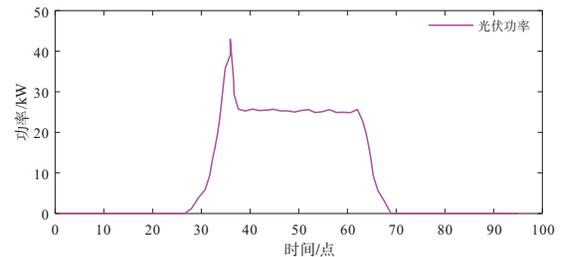
## 3.2 电压越限治理案例

江西省南昌市某公变台区容量为200 kVA，光伏用户3户，接入光伏总容量290 kW，光伏渗透率达145%，最大反向负载率为72.45%，用户最高电压达260 V，同时台区下其他用户光伏并网需求旺盛，若不及时进行电压控制，电压越限情况将更为严重。文中针对此台区将每日分为96个时间点，开展光伏就地功率控制和分布式储能充放电治理。

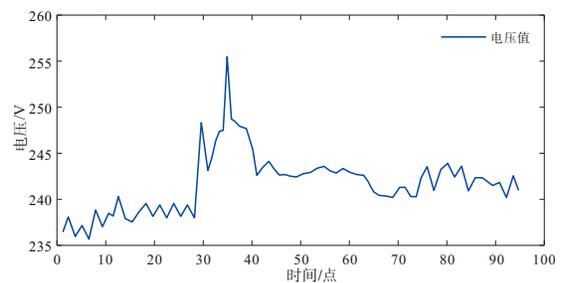
### 3.2.1 光伏就地功率控制

图5为分布式光伏就地功率控制案例，在9:00左右，由于光伏出力增加，导致光伏并网点电压超253

V(超额定电压15%)，此时逆变器启动分布式光伏并网功率控制，将光伏功率从40 kW降至25 kW，并使电压维持在245 V以下，避免并网点电压进一步升高，出现用户电压越上限情况。



(a) 光伏出力曲线



(b) 光伏并网点电压曲线

图5 光伏就地功率控制案例

### 3.2.2 分布式储能充放电治理

通过在光伏用户附近配置60 kW/64.5 kWh台区分布式储能，构建源网荷储微电网，利用智能测控终端将光伏、分布式储能等可调资源的统一接入，实现台区源荷时空互补供需平衡调控、电压越限、反向倒送问题治理等功能。

如图6所示，分布式储能能在负荷高峰时进行放电，在光伏出力高峰时充电进行消纳，可有效压降光伏倒送功率，明显改善光伏接入对台区电压的影响，优化台区负荷峰谷差，促进了清洁能源的使用与消纳。

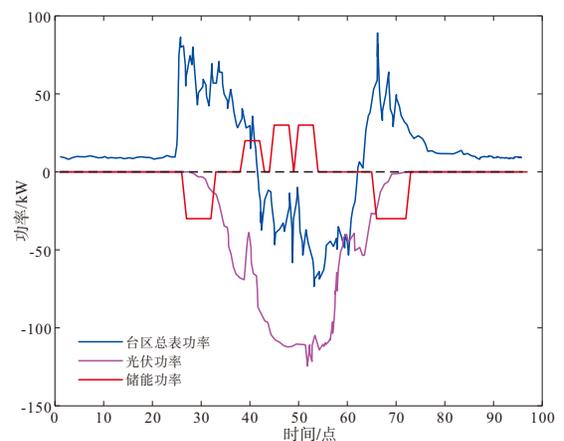


图6 分布式储能参与光伏接入配网问题治理

#### 4 结语

在分布式光伏快速接入的背景下,文中探讨了光伏接入对线路电压越限、光伏倒送影响的机理与模式,并针对多类影响因素提出了相对应的改善措施与方法,包括配电变压器调档、逆变器出力控制、分布式储能配置与台区柔性直流互济、合理优化低压网架、优化用户负荷时间分布,最后例举了光伏出力控制和分布式储能充放电的台区实际治理应用案例,有助于电力运维、管理人员理解光伏电压越限原理,并高效开展光伏台区电压越限治理工作,助力新型配电系统转型升级,进一步提升配电网新能源接纳能力。

#### 参考文献:

[1] 国家能源局.《2024年前三季度光伏发电建设情况》[Z]. [https://www.nea.gov.cn/2024-11/01/c\\_1310787081.htm](https://www.nea.gov.cn/2024-11/01/c_1310787081.htm).

[2] 江西省能源局.《关于进一步推进屋顶分布式光伏健康有序发展的通知》(赣能新能字[2023]142号)[Z].2023.

[3] 余昆,唐修明,陈星莺,等.高比例分布式光伏接入的配电网过电压责任分摊方法[J].中国电机工程学报,2023,43(24):9535-9546.

[4] 孙文文,何国庆,刘纯,等.含高渗透率分布式光伏的配电网电压越限解决方法研究综述[J].现代电力,2024,41(2):302-309.

[5] 梁志峰,康重庆,隋凌峰,等.含高比例分布式光伏的主配电网运行风险评估与防控策略研究[J].清华大学学报(自然科学版),2024,64(11):1964-1978.

[6] 张轶炫,田志瞳,杨博超,等.考虑动态增容受限的光伏反向过载台区滚动优化策略研究[J].高电压技术,2024,50(12):5563-5573.

[7] 赵冬梅,任耀宇,程雪婷.低压配电网分布式光伏接纳能力分析[J].现代电力,2021,38(4):392-403.

[8] 于雨彤,王灿,李勇,等.高比例光伏接入的配电网多层级反向重过载风险评估[J].高电压技术,2024,50(10):4540-4549.

[9] 高志民.农村家庭电气火灾原因浅析[J].家电维修技术,2011(14):52-53.

[10] 张元星.浅谈过电压火灾[J].消防技术与产品信息,2007(1):49-50.

[11] 杨宇,文福拴,周星龙,等.高光伏渗透率配电系统电压协同控制研究综述[J].电力自动化设备,2023,43(10):48-58.

[12] 陈滇斐,马程,葛磊蛟,等.分布式光伏接入下智能配电网的集中式混合储能选址定容优化方法[J/OL].电网技术,1-16[2025-02-07].<https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.1409>.

[13] 陈滇斐,马程,葛磊蛟,等.分布式光伏接入下智能配电网的集中式混合储能选址定容优化方法[J/OL].电网技术,1-16[2025-01-17].<https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.1409>.

[14] 唐巍,张起铭,张璐,等.新型配电系统多层级交直流互联理念、关键技术与发展方向[J].电力系统自动化,2023,47(6):2-17.

[15] 刘海涛,董新洲,熊雄,等.基于低压柔直的末端电网能源互联与能量微循环系统[J].电力系统自动化,2023,47(6):40-47.

[16] 张明泽,栾文鹏,艾欣,等.基于边缘计算的低压配电网健康状态评价方法[J].电测与仪表,2024,61(5):91-97.

(上接第6页)

[10] 谢民,王同文,徐靖东,等.分布式电源对配电网继电保护影响及综合改进保护方案[J].电力系统保护与控制,2019,47(19):78-84.

[11] 王江海,邵能灵,宋凯,等.考虑继电保护动作的分布式电源在配电网中的准入容量研究[J].中国电机工程学报,2010,30(22):37-43.

[12] 孙苗苗,王慧,朱晓荣.光伏电站接入对配电网电流保护的影响研究[J].电测与仪表,2017,54(17):29-34.

[13] 李斌,袁越.光伏并网发电对保护及重合闸的影响与对策

[J].电力自动化设备,2013,33(4):12-17.

[14] 韦明杰,王聪博,余越,等.适用高比例分布式光伏接入的配电网多级保护优化配置方案[J].电力系统及其自动化,2023,47(22):55-65.

[15] 龙国华,李琼,鄢文清,等.分布式光伏接入对配电网接地故障影响分析及其故障辨识研究[J/OL].电磁避雷器,[2024-10-22].

[16] 国家电网有限公司.继电保护整定计算用新能源场站建模导则:Q/GDW 12207—2022.[S].北京:中国电力出版社,2022.