

# 计及故障动态演变的光沼农场配电网弹性评估

朱进<sup>1</sup>, 蒋烨<sup>1</sup>, 仲崇磊<sup>1</sup>, 徐纬河<sup>1</sup>, 茆峰<sup>1</sup>, 戴永正<sup>2</sup>

(1. 国网江苏省电力有限公司连云港供电分公司, 江苏 连云港 222000;

2. 中国矿业大学 电气工程学院, 江苏 徐州 221116)

**摘要:** 农场配电网的弹性能力主要通过系统故障期间光伏和沼气等分布式能源构建微电网来抵御扰动, 实现故障的快速隔离与恢复。但故障期间分布式能源的动态特性和系统的级联特性相对复杂, 现有的有源配电网弹性评估方法难以准确描述分布式能源对配电网的弹性提升能力, 有必要建立一种考虑分布式能源动态演变特性的弹性评估方法。针对上述问题, 面向以光沼能源为主的农场配电网, 提出了一种综合考虑故障概率、失负荷量、故障时间的弹性评估指标; 根据系统紧急调度架构, 建立了微网动态演变模型, 实现弹性评估指标计算。在此基础上, 建立了一种农场配电网滚动弹性评估方法。最后, 基于改进的 IEEE-33 节点系统构建仿真算例, 进行了一系列仿真测试, 结果表明所提方法可以准确评估配电网的弹性, 并且能够有效地体现系统的动态演变特性。

**关键词:** 农场配电网; 弹性评估; 分布式能源; 级联特性; 动态分析

**中图分类号:** TM73    **文献标识码:** A    **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd26078

## Resilience Assessment of PV-Gas Farm Distribution Network Considering the Dynamic Cascading of Faults

ZHU Jin<sup>1</sup>, JIANG Ye<sup>1</sup>, ZHONG Chonglei<sup>1</sup>, XU Weihe<sup>1</sup>, MAO Feng<sup>1</sup>, DAI Yongzheng<sup>2</sup>

(1. Lianyungang Power Supply Branch of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Lianyungang 222000, Jiangsu, China; 2. School of Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China)

**Abstract:** The resilience capacity of farm distribution networks primarily stems from distributed generators, such as photovoltaic and biogas systems, to withstand disturbances and facilitate load recovery as microgrids during system failures. However, the dynamic characteristics of distributed generators and the cascading effects within the system during such failures are complex. Existing resilience assessment methods for active distribution networks struggle to accurately capture the improvements brought by distributed generators. Therefore, a resilience assessment method is needed considering dynamic cascading characteristics of distributed generators. To address these challenges, a resilience assessment index were proposed that encompasses fault probability, load loss, and fault repair time for farm distribution networks featuring photovoltaic and biogas generators. Based on the system's emergency dispatch architecture, a dynamic cascading model for microgrids was established to calculate the resilience assessment index. Furthermore, the rolling resilience assessment method for farm distribution networks was developed. Finally, a simulation example based on improved IEEE-33 system was constructed. A series of simulation tests were conducted, demonstrating that the proposed method can accurately assess resilience and effectively reflect the dynamic cascading characteristics of system.

**Key words:** farm distribution network; resilience assessment; distributed generation; cascading characteristics; dynamic analysis

当前, 农场正从传统农业生产模式逐渐转向 养殖和无人农场模式<sup>[1]</sup>。农场在智能化和自动化的同时, 也对其配电网供电可靠性提出了更高的

**基金项目:** 江苏省碳达峰碳中和科技创新专项资金(BE2022609)

**作者简介:** 朱进(1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统自动化, Email: 1359578361@qq.com

要求<sup>[2]</sup>。然而,由于农场配电网普遍存在地理位置偏远、网架结构脆弱等问题,导致其面临外界扰动因素和小概率极端情况时,极易引发系统关键设备故障与大范围失负荷,形成大影响小概率(high impact low probability, HILP)事件,严重威胁了系统供电可靠性和农场生产效率<sup>[3]</sup>。

为解决上述问题,农场配电网在发生故障时可通过快速切除故障部分并利用内部分布式能源构成微电网,维持故障区域的负荷供电,减少故障的影响范围和影响时间<sup>[4-5]</sup>。这种抵抗扰动与快速恢复的能力被称为配电网的弹性<sup>[6]</sup>,配电网面临的故障场景越极端、维持的负荷越多,表示系统弹性越强,反之越弱<sup>[7]</sup>。现代化农场分布式能源储备丰富,可实现大规模生物质能和光伏发电并网<sup>[8]</sup>,适宜建设基于光沼能源的弹性农场配电网。弹性是评估光沼农场配电网规划运行是否合理的重要指标。因此,准确评估农场配电网的弹性,有利于农场电力设备的有效配置与配电网调度策略的合理优化,为农场配电网供电可靠性和经济效益的提升打下良好基础。

针对含分布式能源配电网的弹性评估和弹性运行等问题,国内外学者已经进行了一系列的研究。对于配电网弹性评估指标,目前的研究主要考察故障时配电网紧急运行能力与故障修复能力<sup>[9-11]</sup>。文献[12]构建了由负荷权重和供电状态组成的系统功能函数,以系统功能函数的积分表征系统弹性指标,但该函数只能粗略地表征失负荷量,无法体现故障时段内负荷的变化情况。文献[13]引入了负荷恢复速度和恢复时长,但对于故障的概率缺乏研究。在此基础上,文献[14]以故障过程中各时段的加权负荷切除量为目标构建了弹性配电网供电恢复策略,该指标能够表征故障场景的出现概率,但计算指标依赖系统负荷的精准预测。负荷的预测误差会影响该指标的评估精度,不利于该指标在配电网优化等领域的应用。

目前关于配电网弹性运行策略的研究按运行手段的不同可分为网络重构<sup>[15]</sup>、灵活资源优化配置<sup>[16]</sup>和源荷主动控制<sup>[17]</sup>。网络重构依靠系统的联络线<sup>[15]</sup>和智能开关<sup>[18]</sup>等一次设备实现弹性供电;灵活资源优化配置通过提前感知极端场景,预先对维修团队<sup>[19]</sup>和移动应急电源<sup>[20]</sup>等灵活资源进行预防性调度,提升配电网抗风险能力。但网络重构对建设成本的需求较高,灵活资源优化配

置则需要配置大量能够快速响应的应急资源,难以在农场配电网大规模推广。源荷主动控制关注故障发生后的阶段,通过控制DTSP系统<sup>[17]</sup>和微电网<sup>[21]</sup>等源荷设备来维持重要负荷供电。上述研究主要关注稳态系统的源荷平衡问题,缺乏对故障时系统的动态稳定性的研究。文献[22]在控制源荷设备进行预防-紧急调度的基础上,补充了分布式能源构网能力的相关分析和判据,但忽略了故障状态下由于电网运行状态和网络结构变化导致的弹性能力变化。针对该问题,文献[23]关注系统在故障后的动态过程,提出了一种用于弹性分析的有源配电网级联故障恢复模型,但并未关注微网构网期间的级联特性。

综上所述,现有配电网弹性评估主要通过构建稳态下的弹性指标实现,对于微网构网及配网故障过程中系统的动态特性和级联特性的分析较少,忽视了故障持续时系统状态变化对弹性的影响,难以准确评估系统的弹性指标。农场配电网相较普通配电网,各线路容量较小,故障概率较高,不同类型负荷停电后的损失差异较大,其分布式能源主要为光沼发电,出力特性严格受制于沼气储量和光照强度。因此,有必要构建一种针对农场配电网架构、考虑系统故障过程的动态稳定性与分布式电源运行特性、能够适应复杂多变运行场景、正确反映配电网故障演变特性的弹性评估方法。

基于上述需求,本文提出了一种计及故障全过程动态演变的农场配电网弹性评估方法。首先针对光伏和沼气发电接入的农场配电网,根据配电网弹性调度架构与故障时紧急调度过程,构建了一种考虑系统故障概率、系统负荷恢复情况和恢复时间的配电网弹性评估指标。进而提出了一种能够反映故障动态演变特性的系统负荷恢复情况评估方法,实现配电网弹性评估指标的计算。利用滚动求解方法模拟系统状态时序变化,最终建立农场配电网滚动弹性评估方法。通过算例分析,验证了本文所提出的弹性评估方法能够在复杂场景下精准评估配电网的弹性能力。

## 1 基于光沼构网的农场配电网弹性运行机理

### 1.1 含分布式能源的农场配电网弹性运行架构

农场配电网系统网络结构简单且存在大量以光伏和沼气为主、伴生于农用设施的分布式可

再生能源。因此,选择源荷主动控制作为农场配电网的弹性运行策略。包含分布式电源的农场配电网运行架构如图1所示。农场配电网分布多个包括光伏-储能系统和沼气发电系统的分布式电源。这些电源与负荷一同接入到系统母线并受调度中心管理。系统线路和重要设备上装有与调度中心和保护装置相连的传感器,可在故障发生时向调度中心发送故障信息并断开故障设备。断开故障设备可能导致部分区域无法由主网供电,当断开区区域包含分布式能源时,该区域可构成由分布式能源维持供电的微电网,实现农场配电网弹性运行。

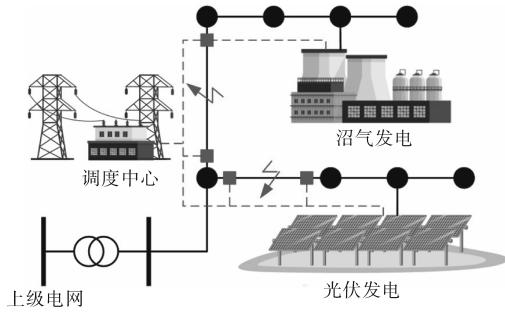


图1 农场配电网紧急调度架构

Fig.1 Emergency dispatch framework of farm distribution network

实际运行过程中,为确保故障区域能够顺利切换为微网,调度中心需预先参考实时系统状态制定调度预案,生成未来时段涵盖所有可能场景的弹性运行策略集。当线路或重要设备发生故障导致某区域断开时,断开位置向调度中心发送故障状态信号。调度中心接收到信号后识别故障区域的具体位置与规模,根据弹性运行策略集中对应策略控制分布式电源将运行模式由跟网切换为构网模式,同时控制负荷按调度指令进行削减,实现紧急状态下配电网的弹性运行。另外,由于网络结构的变化,系统频率与电压可能出现较大波动,导致相关保护动作并降低构网成功率。因此,构网期间部分保护的整定值需要进行松弛操作以保证构网能够顺利完成。具体弹性运行框架如图2所示。

## 1.2 光沼微网分布式电源动态特性

在微网构网过程中,分布式电源的动态特性是影响系统是否能够恢复到稳定状态的关键因素。农场配电网中分布式电源的类型主要为沼气和光伏<sup>[24]</sup>。并网光伏与储能配合经VSG逆变器组成虚拟同步机<sup>[24]</sup>(virtual synchronous generator, VSG)参与并网,VSG逆变器通过下垂控制等

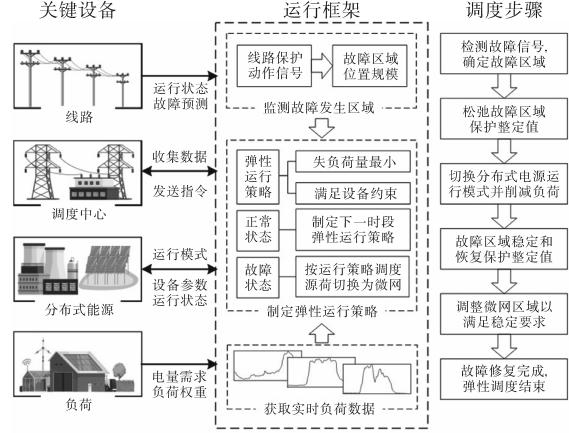


图2 农场配电网弹性运行与调度方案

Fig.2 Resilience operation and dispatch plan of farm distribution network

手段实现虚拟调速和虚拟励磁控制系统调整逆变器的输出,使光伏-储能系统具备类似于同步发电机的动态特性<sup>[25]</sup>。微网电源的动态特性如下式所示:

$$\begin{cases} M \frac{d\Delta\omega_{n,t}}{dt} = P_{G,t} - \Delta P_{L,t} - D\Delta\omega_{n,t} \\ P_{G,t} = \sum_{i \in Gas} L_{HV} G_{G,it} \eta_g + \sum_{j \in PV} P_{PV,jt} + P_{S,jt} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $P_{G,t}$ ,  $\Delta P_{L,t}$  分别为微网电源出力和功率偏差; $\omega_{n,t}$  为同步转速; $\Delta\omega_{n,t}$  为  $t$  时刻转速偏差; $M, D$  分别为惯性系数和阻尼系数; $L_{HV}$  为沼气燃烧的低热值; $G_{G,it}$  为  $t$  时刻  $i$  节点发电机消耗的沼气量; $\eta_g$  为沼气燃烧发电效率; $P_{PV,jt}$ ,  $P_{S,jt}$  分别为  $t$  时刻  $j$  节点 VSG 中光伏和储能输出的功率,储能放电时  $P_{S,jt} > 0$ ,充电时  $P_{S,jt} < 0$ ,不工作时  $P_{S,jt} = 0$ ;  $Gas, PV$  分别为沼气发电机和光伏电源所在节点编号集合。

沼气发电机的动态特性受发电机的额定容量和爬坡速率的限制,具体关系如下:

$$\begin{cases} G_{Gmin,i} \leq G_{G,it} \leq G_{Gmax,i} \\ |G_{G,it+1} - G_{G,it}| \leq G_{Gturn,i} \\ \int G_{G,it} dt \leq G_{Smax,i} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $G_{Gmax,i}$ ,  $G_{Gmin,i}$  分别为  $i$  节点沼气发电机的出力最大值和最小值; $G_{Gturn,i}$  为  $i$  节点沼气发电机的爬坡限制; $G_{Smax,i}$  为  $i$  节点储气柜的沼气储量限制。

光伏输出功率随光照自动变化,无法进行主动调节。因此,VSG的动态特性主要受限于储能的充放电能力,其具体关系如下:

$$\begin{cases} P_{Smin,i} \leq P_{S,it} \leq P_{Smax,i} \\ SOC_{min,i} - SOC_{0,i} \leq \int P_{S,it} dt \leq SOC_{0,i} - SOC_{max,i} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $P_{Smin,i}$ ,  $P_{Smax,i}$  分别为  $i$  节点储能的最小、最大



充放电功率; $SOC_{0,i}$ 为*i*节点储能在初始时刻的荷电状态; $SOC_{\max,i}, SOC_{\min,i}$ 分别为*i*节点储能允许的最高荷电状态与最低荷电状态。

## 2 考虑故障动态演变的农场配电网弹性评估模型

### 2.1 分布式能源效能驱动的弹性评估指标

配电网弹性评估中,弹性指标需要考虑配电网预防扰动、抵御扰动和受扰动后快速恢复的能力<sup>[25]</sup>。农场配电网受到的扰动主要来源于意外事件和设备老化等因素诱发的线路故障。因此本文参考线路故障的概率、线路故障期间分布式能源的保供电能力、线路故障修复时间,建立农场配电网弹性评估指标。对于故障场景数为*N*的系统,建立*N*维线路故障场景集并将系统负荷划分为*K*个等级,对于重要程度为 $k \in K$ 的负荷赋予权重 $\lambda_k$ ,分别计算各场景下弹性指标值,再根据各场景的概率计算所有场景弹性指标的期望作为最终的评估结果,弹性评估指标的计算公式如下式所示:

$$W_G = \frac{\sum_{j \in \Phi} A_j \int_{t_0}^{T_{e,j}} \sum_{k \in K} \{ \lambda_k [\Sigma P_{L,j,k}(t) - \Sigma P_{L,g,j,k}(t)] \} dt}{\int_{t_0}^{T_{e,j}} \sum_{k \in K} [\lambda_k P_{L,k}(t)] dt} \quad (4)$$

式中: $\Sigma P_{L,g,j,k}(t), \Sigma P_{L,j,k}(t)$ 分别为*t*时刻的重要程度*k*级的负荷在第*j*个故障场景下弹性运行和非弹性运行(故障后仅切除故障区域)下的负荷量; $T_{e,j}$ 为第*j*个场景的故障修复时间; $A_j$ 为第*j*个故障场景的发生概率; $\lambda_k$ 为重要程度*k*级负荷的权重系数; $P_{L,k}(t)$ 为重要程度*k*级的负荷无故障时在*t*时刻的预期用电量; $\Phi$ 为场景个数。

式(4)的分子部分为弹性调度,相比于非弹性调度失负荷减少量的期望,写为各故障概率与对应场景失负荷减少量的乘积之和。考虑到负荷的重要程度不同,计算失负荷减少量时需要乘以对应的权重。为防止 $T_{e,j}$ 对弹性评估指标影响能力过强,引入无故障时预期用电量作为分母,失负荷减少量在 $t_0$ 至 $T_{e,j}$ 变化程度越大, $W_G$ 与 $T_{e,j}$ 的相关性越强,反之越弱。

### 2.2 考虑动态演变的系统负荷恢复情况评估方法

计算式(4)所述弹性评估指标,其关键在于确定 $\Sigma P_{L,g,j,k}(t)$ 和 $\Sigma P_{L,j,k}(t)$ 的变化情况。微电网完全由分布式能源供电,稳定性较差,源荷出力的

变化可能诱发某些保护动作从而影响系统运行状态,进而诱发更多保护动作,导致系统的运行状态大幅变化甚至系统失稳<sup>[26]</sup>。因此,分析系统故障时失负荷量需要综合考虑故障期间系统的动态特性和级联特性<sup>[27]</sup>。根据系统弹性运行架构,对系统的动态演变特性进行详细的建模,模拟真实系统的源荷变化趋势,最终确定 $\Sigma P_{L,g,j,k}(t)$ 和 $\Sigma P_{L,j,k}(t)$ <sup>[28]</sup>。

传统的潮流分析方法难以适用于系统的动态特性和级联特性分析。因此,本文参考级联故障模型<sup>[23]</sup>建立了一种基于农场配电网弹性运行框架、考虑微网动态特性的光沼农场配电网负荷恢复情况评估方法。该方法通过对配电网动态演变模型进行迭代和递归运算,求得稳定后的系统状态,将该状态的系统总负荷与该时段对应的预测负荷做差,即可求得对应时段下的失负荷量。配电网动态演变模型流程如图3所示。图中, $t_d$ 为暂态构网的时间分辨率; $t_s$ 为稳态运行的时间分辨率。以故障时刻系统状态量作为初始状态开始配电网动态演变分析。首先执行区域弹性运行调度策略,确定所有孤岛区域划分;随后将每个孤岛区域代入动态演变模型进行迭代分析,并校验动态构网是否成功,再校验构网稳态值是否触发保护动作,若任一环节失败(如构网失败或保护动作)则更新系统状态并重新划分孤岛;循环此过程直至所有孤岛无状态变化,最终汇总得到系统稳态参数,输出各孤岛稳定后的状态量。

微网的构网能力和保护装置动作情况是影响孤岛的动态演变过程的主要因素,需要根据分

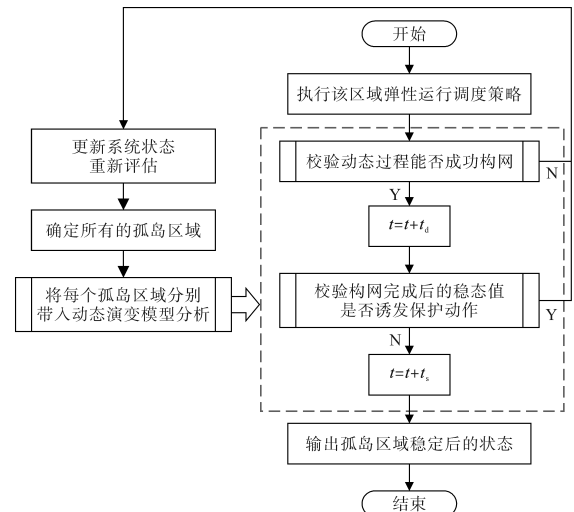


图3 农场配电网动态演变模型流程图

Fig.3 Dynamic cascading flowchart for farm distribution network

布式能源的动态特性和保护的整定值校验系统状态(图3中虚框部分)。由于微网在构网时需要松弛部分保护的稳定值,因此需要对构网中和构网完成后的状态分别进行校验。设置构网中整定值遵循以下原则:

①正常情况下微网能够顺利过渡到孤岛模式,不会在中途触发保护导致构网失败。

②对于微网无法稳定的情况保护要及时动作使微网退出运行。

实际运行时通常只需对频率和电压保护进行松弛即可,本文参考文献[28]所述微电网,采用相同比例进行松弛。

由于不同保护运行特性等方面差异较大,逐一分析过于繁琐,故只选取部分与动态演变过程关联度较高的典型保护。微网顺利过渡到孤岛状态的前提是微网内不发生故障,无需考虑短路故障类保护。弹性运行中主要问题为负荷突变引起的功率、电压、频率越限和分布式电源无法维持系统稳定。因此,本文选取频率保护、电压保护、线路过流保护构建光沼农场配电网动态演变模型。具体的校验流程如图4所示。图4表示保护动作时间由短到长(频率→电压→过流)情况下的校验流程。如图4所示,在孤岛构网过程中,保护整定值较宽松,分布式电源能否成功构网在演变特性中起主导作用。当孤岛经 $t_s$ 时刻完成构网后,保护整定值恢复,此时保护动作情况在演变特性中起主导作用,按保护的動作时间分别进行校验。若校验不通过,则令对应保护动

作,更新动作后的系统状态并记录对应的延时 $t_r$ ,准备进一步的动态演变分析。若校验通过,输出此时的系统状态作为最终的稳定状态。

分析本文具体的校验指标与对应的保护措施。校验孤岛的构网条件包括:孤岛存在分布式能源、故障时孤岛的负荷变化量小于最大容许负荷波动、故障时分布式能源的出力裕度大于或等于构网所需备用容量。若孤岛不满足上述条件,则直接关闭该孤岛所有分布式能源和负荷。

构网约束如下式所示:

$$\begin{cases} \text{num}(Gas + PV) \geq 1 \\ \Delta P_F \leq \Delta P_{Fmax} \\ \sum_{i \in Gas} L_{HV} \Delta G_{G,i} \eta_g + \sum_{j \in PV} \Delta P_{S,j} \geq P_{Rmin} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\text{num}(\cdot)$ 为求集合 $(\cdot)$ 元素个数的函数; $\Delta P_{Fmax}$ 为故障时系统最大容许负荷波动; $P_{Rmin}$ 为构网所需分布式能源备用容量。

频率保护包括低频减载和低频切机。当分布式电源的频率指标超过约束时,保护动作,在频率低于约束时按比例切除各节点的负荷,频率高于约束时或频率变化速率过大时关闭该电源。频率保护约束如下:

$$\begin{cases} \Delta \omega_{n,min} \leq \Delta \omega_{n,i} \leq \Delta \omega_{n,max} \\ \Delta \omega'_{n,min} \leq \frac{d\Delta \omega_{n,i}}{dt} \leq \Delta \omega'_{n,max} \\ R_{Pmin}^f \leq P_{UFLS} \leq R_{Pmax}^f \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\Delta \omega_{n,max}, \Delta \omega_{n,min}$ 分别为系统允许的最高和最低频率偏移; $\Delta \omega'_{n,max}, \Delta \omega'_{n,min}$ 分别为系统允许的最大频率上升和下降速率; $R_{Pmin}^f, R_{Pmax}^f$ 分别为低频减载的最小整定阈值和最大整定阈值; $P_{UFLS}$ 为低频减载的实际切负荷量。

电压保护为低压减载。当某节点电压低于约束值时,切除该节点一定比例的负荷。电压保护的约束为

$$\begin{cases} V_{min} \leq V_{it} \\ R_{Pmin}^v \leq P_{UVLS} \leq R_{Pmax}^v \\ R_{Qmin}^v \leq Q_{UVLS} \leq R_{Qmax}^v \end{cases} \quad (7)$$

式中: $V_{it}$ 为 $t$ 时刻 $i$ 节点的电压; $V_{min}$ 为电压允许最小偏移裕度; $P_{UVLS}, Q_{UVLS}$ 分别为低压减载的有功和无功负荷切除量; $R_{Pmax}^v, R_{Pmin}^v$ 分别为系统有功负荷的上调和下调裕度; $R_{Qmax}^v, R_{Qmin}^v$ 分别为系统无功负荷的上调和下调裕度。

容量保护为某线路或电源承载的功率超过额定约束时,断开该设备。过流保护的约束常表

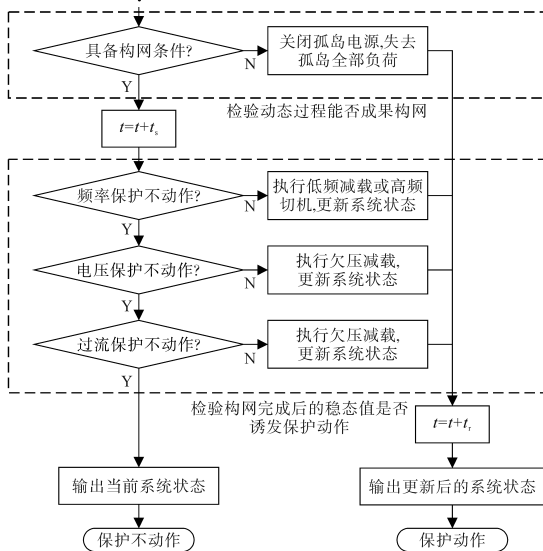


图4 独立孤岛动态与稳态校验流程图

Fig.4 Isolated island dynamic and stable check flowchart

示为功率形式:

$$\begin{cases} S_{B,jt} \leq S_{Bmax,j} \\ S_{G,mt} \leq S_{Gmax,m} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $S_{B,jt}$ ,  $S_{G,mt}$  分别为  $t$  时刻线路  $j$  和分布式电源  $m$  的功率;  $S_{Bmax,j}$ ,  $S_{Gmax,m}$  分别为线路和分布式电源的额定容量。

### 3 农场配电网滚动弹性评估方法

农场配电网由于地理位置普遍偏远,交通环境较差,当发生故障时往往难以快速进行维修,故障时间较长,故障期间源荷功率仍会根据外部环境和用户需求等因素持续变化。农场配电网弹性评估模型需要在考虑动态和级联特性的基础上,还需要综合统计故障开始到故障结束的系统总失负荷量,从而准确评估配电网的弹性能力。考虑到系统故障各时段的源荷状态存在时间上的连续性和相关性,本文建立了一种面向故障全时段滚动求解的农场配电网弹性评估方法,其流程如图5所示。

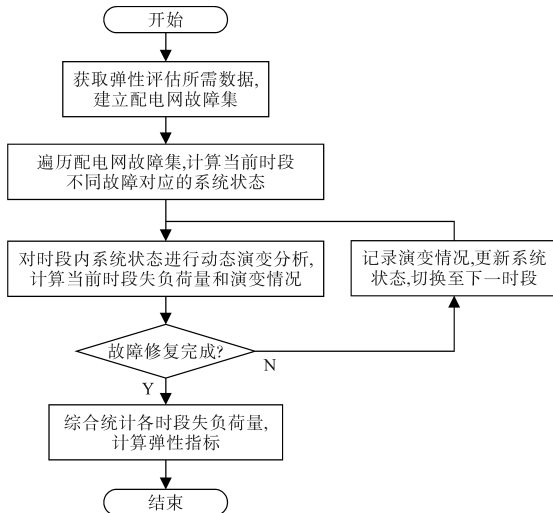


图5 农场配电网弹性评估流程

Fig.5 Resilience evaluation flowchart for farm distribution network

农场配电网弹性评估流程如下:

步骤1:收集待评估时刻系统负荷功率、分布式电源出力和调节特性、沼气和电池的储量、保护设备的相关参数、各线路发生故障的概率及故障修复时间。每次故障只考虑单条线路发生故障的前提下,建立包括所有单线路故障场景的农场配电网故障场景集,并按照现场实际情况赋予每一条线路发生故障的故障概率。依次从故障场景集中遍历所有的单线路故障场景,取待评估的时刻作为初始时刻,该场景此时的系统状态信息作为初始状态,构建基于配电网故障场景集对

应的系统状态集。

步骤2:将各故障对应的初始状态代入2.2节所述的动态演变模型中,求解该场景在当前时段内由初始状态经弹性运行后的失负荷量和无弹性运行后的失负荷量,记录演变后的系统状态,并记录此时的状态作为下一时段的初始状态。

步骤3:判断当前时段结束后故障总时长是否大于故障修复时间,若大于则故障修复完成,统计各时段的失负荷量并跳转至步骤4,否则故障修复未完成,选择下一个时段作为当前时段,更新系统的源荷出力,将更新后的系统状态重新代入步骤2计算下一时刻的失负荷量和演变状态。

步骤4:统计所有故障场景下各时段的失负荷量,根据式(4)计算弹性评估指标,完成弹性评估。

### 4 仿真分析

#### 4.1 仿真算例介绍

由于农场配电网的主要结构为树状,且负荷相对较小。因此本文以改进的IEEE-33节点配电网为参考系统,测试本文所述弹性评估方法的性能。参考系统的拓扑结构如图6所示,系统的基准电压为12.66 kV,基准功率100 MW,包含33个节点和32条线路,1节点为平衡节点,18和22节点分别接入了700 kW和300 kW的可并网光伏电源,25和33节点分别接入了700 kW的可并网沼气发电系统,其中每个光伏电源均配置可提供构网所需备用的储能设备。

本算例中,每日的节点负荷和光伏功率值相同且在日内以相同的比例变化,沼气发电系数与光伏发电系数随时间的变化情况如图7所示。负荷的重要程度分为三级,一、二、三级负荷的权重分别设置为0.5,0.3和0.2,19~25节点的负荷为一级负荷;1~6和26~33节点的负荷为二级负荷;7~18节点的负荷为三级负荷。

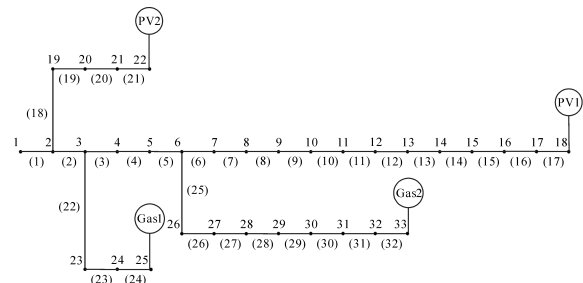


图6 改进的IEEE-33节点系统

Fig.6 Modified IEEE-33-node system



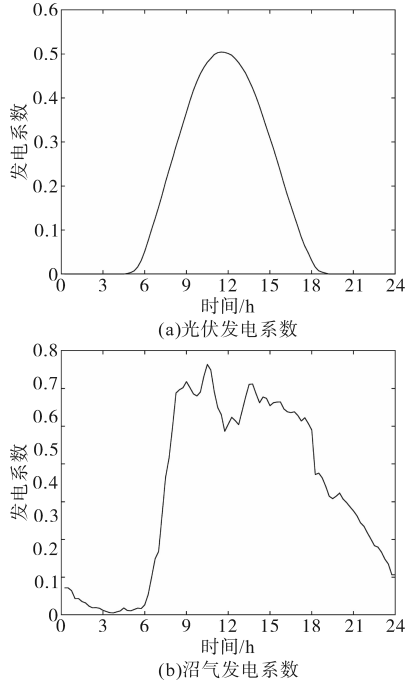


图7 光伏发电系数和沼气发电系数的变化曲线

Fig.7 PV factor variation and biogas factor variation curves

各线路的故障概率已知,不考虑多条线路同时发生故障的情况。沼气电源和光伏&储能电源具备相同的动态特性,均可承受不高于30%的功率突变,维持系统稳定。当系统需要进行低频减载和低压减载时,对独立系统内所有节点同时进行等比例的负荷削减,削减比例为5%的整数倍且最高为50%,具体的削减比例 $\xi_p$ 通过优化求解,优化目标为满足对应保护约束下削减比例最小,如下式所示:

$$\begin{cases} \min \xi_p \\ 0 \leq \xi_p \leq 0.5 \\ \xi_p \sum P \geq P_{UFLS} \quad \text{频率保护} \\ \xi_p \sum P \geq P_{UVLS} \quad \text{低压保护} \end{cases} \quad (9)$$

本算例基于Matlab R2022b环境下搭建仿真程序,潮流分析采用MATPOWER 7.1版本工具包中牛顿拉夫逊法计算,采用Opti工具包进行优化,最大迭代次数为100。

#### 4.2 分布式电源构网能力分析

为分析农场配电网内分布式电源的构网能力,选取IEEE-33节点系统6~18节点所在支路,设置源荷出力如表1所示,分别断开(17),(16),(15),(14),(13),(12)号线路,观测18节点处分布式电源的频率变化和功率变化。

系统在前4s稳定运行,在第5s开始时断开对应线路,其中,(17),(16),(15),(14),(13),

(12)号线路断线后孤岛内总负荷分别为0.275 MW,0.35 MW,0.425 MW,0.5 MW,0.575 MW,0.65 MW。断线后分布式能源的频率变化和功率变化曲线如图8所示。

表1 13~18节点源荷出力

Tab.1 Power output from No.13~18 node

节点编号	负荷/MW	电源额定/实际出力/MW
18	0.275	0.6/0.5
17	0.075	—
16	0.075	—
15	0.075	—
14	0.075	—
13	0.075	—

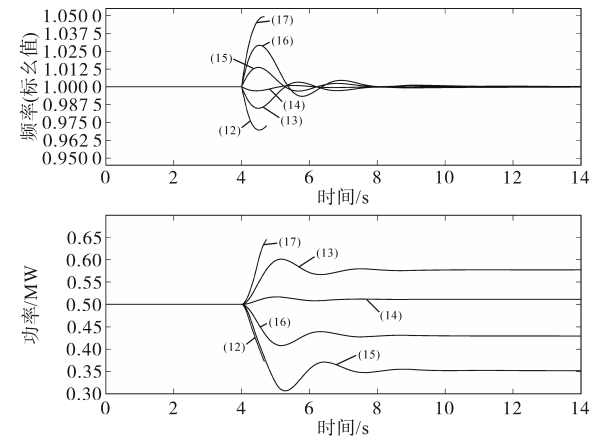


图8 分布式能源构网频率功率变化曲线

Fig.8 Frequency and power variation curves of distributed energy resource networks

由图8可见,在4s后,分布式电源切换至孤岛运行,频率和电源出力开始发生波动,当功率变化在30%以内(断线(13)~(16))时,频率可以重新恢复至稳定状态;当断开线路(17)时,由于频率变化速度过快,触发电机频率保护,关闭分布式电源,导致孤岛构网失败;当断开线路(12)时,由于孤岛总负荷超过分布式电源的额定出力(0.65 MW>0.6 MW),经过一段时间延迟后,分布式电源关闭,构网失败。

根据上述内容可知,分布式电源可在功率变化不高于30%且存在足够备用容量的情况下成功构网。

#### 4.3 负荷恢复情况分析

为验证本文的负荷恢复情况评估方法是否能够正确反映农场配电网的动态特性和级联特性,本文以15:00时为例,分别针对弹性运行和非弹性运行系统,开展不同线路故障引起保护动作断线后的负荷恢复实验。

根据该时刻系统的光伏、沼气出力预测情况,18节点和22节点的光伏电源出力分别为0.1 MW和0.26 MW,25和33节点的沼气电源出力均为0.5 MW。

图9为15:00时不同线路故障下的系统负荷恢复对比图, $x$ 轴表示系统中的各个节点, $y$ 轴表示发生单线路故障的故障线路, $z$ 轴表示该节点的负荷情况。图中灰色部分表示非弹性运行时,系统发生每一条单线路故障被切断后,各节点的负荷量;黑色部分表示在系统弹性运行时,发生每一条单线路故障被切断后,通过分布式能源孤岛运行可以恢复供电的节点以及恢复负荷量。

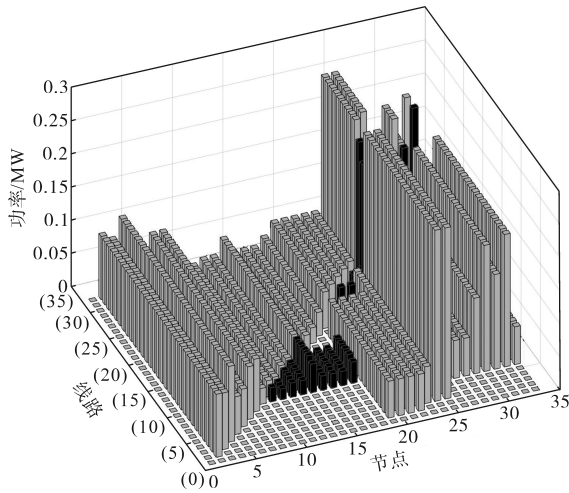


图9 不同线路故障下系统负荷恢复对比

Fig.9 Comparison of system load recovery under different line faults

如图9所示,线路(9),(10),(11),(12),(13),(20),(22),(23),(30)发生断线时均可以实现断线后的负荷恢复,其余断线情况由于潮流计算的负荷流动超出分布式发电机可承受的有功负荷突变范围,故无法恢复。在可以实现负荷恢复的断线情况中,存在一些负荷恢复不完全的情况。以线路(9)断线为例,通过对比节点负荷恢复情况与15:00时节点预测负荷,可发现节点负荷并未完全恢复。这是由于分布式光伏 $PV_1$ 的输出功率无法完全覆盖10~18节点的负荷需求,导致低频减载保护动作,对10~18节点负荷进行等比例削减,使节点恢复负荷无法达到预期负荷值。

根据上述可知,本文方法可以准确反映系统的动态特性和级联特性。通过孤岛的动态演变分析,考虑孤岛无法构网或构网引起的保护动作,判断出系统可以实现负荷恢复的故障类型,进而给出准确的负荷恢复情况。

#### 4.4 弹性评估方法有效性分析

为验证本文方法是否能够正确反映农场配电系统的弹性能力,分别选取09:00时、12:00时、15:00时、18:00时4个时刻应用本文方法进行弹性评估,根据每个时刻系统的光伏、沼气出力预测情况,分别得出对应的节点负荷恢复情况,如图10所示,并计算出每个时刻的系统弹性指标进行比较,如表2所示。

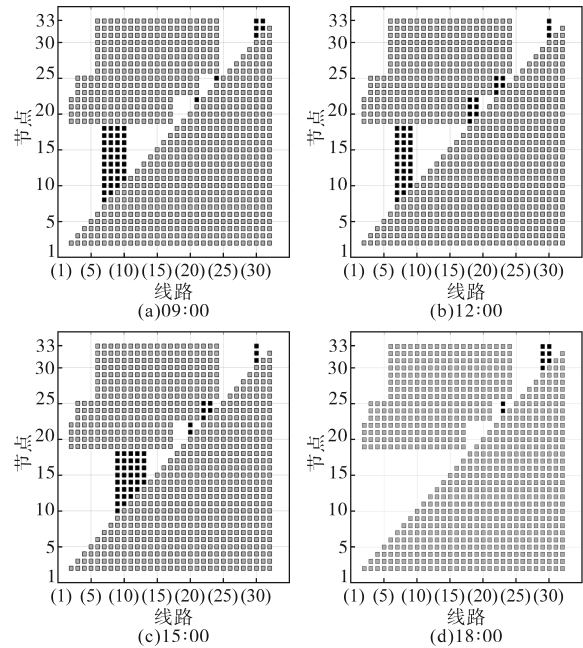


图10 不同时刻故障的系统节点负荷恢复情况

Fig.10 The recovery of the system load at different times of the fault

表2 不同时刻的系统负荷及弹性指标

Fig.2 System loads and resilience index at different times of the fault

时刻	故障前区域总负荷/MW					系统弹性指标
	节点1~6	节点7~18	节点19~22	节点23~25	节点26~33	
09:00	0.377	0.360	0.339	0.876	0.808	0.021 6
12:00	0.390	0.467	0.170	0.441	0.834	0.039 1
15:00	0.409	0.427	0.221	0.571	0.876	0.039 2
18:00	0.354	0.801	0.214	0.553	0.757	0.027 1

图10a~图10d中的深色部分,分别是指分别在09:00时、12:00时、15:00时、18:00时这4个时刻发生线路断线后,可以通过重建孤岛恢复供电的节点。

图10及表2共同说明了系统的弹性与节点负荷、分布式能源出力情况以及负荷可恢复量有关,且由于分布式能源出力的变化,在不同时刻存在一定差异。对比图10a和图10d可知,图10d中的可恢复节点数量较少并且只存在于少数的断线情况中,但是,由于在18:00时可恢复节点的负荷较高,且负荷等级以及不同线路故障概率不



同,导致了18:00时的系统弹性高于09:00时。

根据上述可知,本文方法可以准确评估系统的弹性能力。通过不同时刻系统的负荷恢复状态,结合不同线路的故障概率以及负荷等级,对每一个时刻农场配电网实现弹性评估,最终实现滚动弹性评估方案。

本方法在综合考虑不同时间的节点负荷、系统线路故障概率以及可恢复节点的负荷恢复情况的基础上,计算出的系统弹性具有较高的可靠性。并且通过实行全时段滚动评估策略,对农场配电网状态施行实时监测,能够有效获取农场配电网故障后的恢复状态,具有较高的实用性。

## 5 结论

为了实现农场配电网在复杂多变运行场景下的弹性评估精准评估,本文提出了一种计及故障全过程动态演变的农场配电网弹性评估方法。该方法根据配网弹性调度架构与故障时紧急调度过程,构建了一种考虑系统故障概率、系统负荷恢复情况和恢复时间的配电网弹性评估指标,通过分析系统动态演变特性,计算系统在有无弹性下的失负荷量和弹性评估指标,从而实现农场配电网弹性评估。还建立了基于IEEE-33节点系统的仿真算例,针对本文主要关注的故障恢复特性、动态演变特性和弹性评估有效性进行了一系列仿真计算。仿真结果证明,所述方法能够准确地反映系统的动态特性和级联特性,计算出的系统弹性具有较高的可靠性,能够有效获取农场配电网故障后的恢复状态,具有较强的实用性。

### 参考文献

- [1] 李道亮,李震. 无人农场系统分析与发展展望[J]. 农业机械学报,2020,51(7):1-12.  
LI Daoliang, LI Zhen. System analysis and development prospect of unmanned farming[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(7): 1-12.
- [2] 沈明霞,陈金鑫,丁奇安,等. 生猪自动化养殖装备与技术研究进展与展望[J]. 农业机械学报,2022,53(12):1-19.  
SHEN Mingxia, CHEN Jinxin, DING Qi'an, et al. Current situation and development trend of pig automated farming equipment application[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(12): 1-19.
- [3] 肖白,李攀攀,姜卓,等. 基于梯级组合评分的农村电网精益化改造方法[J]. 电力系统自动化,2020,44(3):220-228.  
XIAO Bai, LI Panpan, JIANG Zhuo, et al. Lean transformation method for rural electric power grid based on cascaded combination scoring[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(3): 220-228.
- [4] 倪萌,王蓓蓓,朱红,等. 能源互联背景下面向高弹性的多元融合配电网双层分布式优化调度方法研究[J]. 电工技术学报,2022,37(1):208-219.  
NI Meng, WANG Beibei, ZHU Hong, et al. Study of two-layer distributed optimal scheduling strategy for highly elastic multi-resource fusion distribution network in energy interconnection environment[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(1): 208-219.
- [5] 王守相,刘琪,赵倩宇,等. 配电网弹性内涵分析与研究展望[J]. 电力系统自动化,2021,45(9):1-9.  
WANG Shouxiang, LIU Qi, ZHAO Qianyu, et al. Connotation analysis and prospect of distribution network elasticity[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(9): 1-9.
- [6] 王钰山,邓晖,王旭,等. 考虑台风时空演变的配电网移动储能优化配置与运行策略[J]. 电力系统自动化,2022,46(9):42-51.  
WANG Yushan, DENG Hui, WANG Xu, et al. Optimal configuration and operation strategy of mobile energy storage in distribution network considering spatial-temporal evolution of typhoon[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(9): 42-51.
- [7] 别朝红,林雁翎,邱爱慈. 弹性电网及其恢复力的基本概念与研究展望[J]. 电力系统自动化,2015,39(22):1-9.  
BIE Zhaohong, LIN Yanling, QIU Aici. Concept and research prospects of power system resilience[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(22): 1-9.
- [8] 王雯沁,高红均,王仁浚,等. 考虑分布式电源支撑与农业设施协调的配电网分布鲁棒优化[J]. 电力系统自动化,2023,47(21):89-98.  
WANG Wenqin, GAO Hongjun, WANG Renjun, et al. Distributionally robust optimization of distribution network considering distributed generator support and agricultural facility coordination[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(21): 89-98.
- [9] ALBASRAWI M N, JARUS N, JOSHI K A, et al. Analysis of reliability and resilience for smart grids[C]//2014 IEEE 38th Annual Computer Software and Applications Conference, 2014: 529-534.
- [10] PANTELI M, MANCARELLA P. The grid: stronger, bigger, smarter: presenting a conceptual framework of power system resilience[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2015, 13(3): 58-66.
- [11] 陈彬,于继来. 考虑通信影响的配网恢复力评估及提升措施研究[J]. 电网技术,2019,43(7):2314-2320.  
CHEN Bin, YU Jilai. Research on resilience assessment and improvement measures of distribution network considering the influence of communication system[J]. Power System Technology, 2019, 43(7): 2314-2320.
- [12] 彭寒梅,刘子威,谭貌,等. 面向弹性提升的主动配电网重构与元件修复协同方法[J]. 电力系统保护与控制,2022,50

- (17):35-44.
- PENG Hanmei, LIU Ziwei, TAN Mao, et al. Collaborative method for an active distribution network reconfiguration and component repair for resilience improvement[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(17):35-44.
- [13] 彭佳盛,文云峰,梁晓锐,等. 基于弹性系数的配电网重构与故障抢修协同优化[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(6):88-95.
- PENG Jiasheng, WEN Yunfeng, LIANG Xiaorui, et al. Resilience coefficient based collaborative optimization of distribution network reconfiguration and fault repair[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(6):88-95.
- [14] 李明昊,杨祺铭,李更丰,等. 台风场景下基于多种分布式资源协同的弹性配电网两阶段供电恢复策略[J]. 高电压技术, 2024, 50(1):93-104.
- LI Minghao, YANG Qiming, LI Gengfeng, et al. Two-stage power supply restoration strategy of resilient distribution network based on coordination of multiple distributed resources in typhoon scenario[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1):93-104.
- [15] BAJPAI P, CHANDA S, SRIVASTAVA A K. A novel metric to quantify and enable resilient distribution system using graph theory and Choquet integral[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(4):2918-2929.
- [16] 陆秋瑜,江里舟,别朝红,等. 考虑用户能量优化调度的配电网灾后故障恢复策略[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(1):44-54.
- LU Qiuyu, JIANG Lizhou, BIE Zhaohong, et al. Post-disaster fault restoration strategy for distribution network considering optimal scheduling of user-side energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(1):44-54.
- [17] 孔惠文,马静,程鹏,等. 基于直流线路互联的区-隧供电系统弹性恢复策略[J]. 电工技术学报, 2024, 39(7):2089-2103.
- KONG Huiwen, MA Jing, CHENG Peng, et al. Resilience recovery strategy for district-tunnel power supply system based on DC line interconnection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(7):2089-2103.
- [18] 卞艺衡,别朝红. 面向弹性提升的智能配电网远动开关优化配置模型[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(3):33-39.
- BIAN Yiheng, BIE Zhaohong. Resilience-enhanced optimal placement model of remote-controlled switch for smart distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(3):33-39.
- [19] 胡玉,顾洁,马睿,等. 面向配电网弹性提升的智能软开关鲁棒优化[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(11):85-91.
- HU Yu, GU Jie, MA Rui, et al. SNOP robust optimization for distribution network resilience enhancement[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(11):85-91.
- [20] 蔡胜,谢云云,张玉坪,等. 考虑移动应急电源配置的微电网顺序恢复方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(7):2677-2689.
- CAI Sheng, XIE Yunyun, ZHANG Yuping, et al. A sequential service restoration method for microgrids considering optimal allocation of mobile emergency generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(7):2677-2689.
- [21] 谢云云,杨正婷,蔡胜,等. 基于鲁棒模型预测控制的配电网供电恢复策略[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(23):123-131.
- XIE Yunyun, YANG Zhengting, CAI Sheng, et al. Power supply restoration strategy for distribution network based on robust model prediction control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(23):123-131.
- [22] 蔡胜,谢云云,张玉坪,等. 计及动态频率稳定性的弹性配电网预防-紧急协同调度方法[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(24):9607-9617, I0009.
- CAI Sheng, XIE Yunyun, ZHANG Yuping, et al. Coordination of preventive and emergency dispatch for resilient distribution networks considering dynamic frequency stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(24):9607-9617, I0009.
- [23] NOBELS M, PREECE R, PANTELI M. AC cascading failure model for resilience analysis in power networks[J]. IEEE Systems Journal, 2022, 16(1):374-385.
- [24] 梁睿,袁乐童,黄宏旭,等. 变温影响下乡村生物质能发电系统跨周期滚动优化运行方法[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(8):3067-3078, I0018.
- LIANG Rui, YUAN Letong, HUANG Hongxu, et al. Multi-hydraulic retention time rolling optimal operation method for rural biomass power generation systems under uncertain temperature[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(8):3067-3078, I0018.
- [25] JAVADI M, GONG Y, CHUNG C Y. Frequency stability constrained microgrid scheduling considering seamless islanding[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(1):306-316.
- [26] 郑天文,陈来军,刘炜,等. 考虑源端动态特性的光伏虚拟同步机多模式运行控制[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2):454-464.
- ZHENG Tianwen, CHEN Laijun, LIU Wei, et al. Multi-mode operation control for photovoltaic virtual synchronous generator considering the dynamic characteristics of primary source[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2):454-464.
- [27] SHINTAI T, MIURA Y, ISE T. Oscillation damping of a distributed generator using a virtual synchronous generator[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(2):668-676.
- [28] VUKOJEVIC A, LUKIC S. Microgrid protection and control schemes for seamless transition to island and grid synchronization[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(4):2845-2855.

收稿日期:2024-07-24

修改稿日期:2024-09-01