

计及分布式能源的主动配电网恢复力综合评估

谭畅舒¹, 李 艳¹, 田 杰¹, 明威宇², 李 妍², 王少荣²

(1. 深圳供电局有限公司, 广东 深圳 518000, 2. 华中科技大学强电磁工程与新技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘 要:合理的主动配电网(ADN)恢复力综合评估可反映随机故障后 ADN 恢复供电的能力,有助于采取有效措施提升恢复力以减少损失。考虑到在不同随机故障下节点存在交互影响,提出适应随机不确定性的主动配电网恢复力综合评估方法。首先基于节点故障恢复过程,建立节点完全恢复供电时长、节点断续供电时长和节点能量损失百分比 3 个恢复力指标,以评价节点恢复力;然后将多次随机故障下节点恢复力之间的交互影响量化表示,并以此确定节点权重,实现 ADN 整体恢复力综合评估;最后以 IEEE 33 节点模型作为中压配电网算例,蒙特卡洛仿真随机故障,通过所提方法可反映故障恢复措施实施后的恢复力提升效果,说明方法的有效性。

关 键 词:分布式能源;恢复力;评估方法;主动配电网

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.01.012 中图分类号: TM73 文章编号: 1673-9140(2023)01-0108-06

An evaluation method of active distribution network resilience considering the distributed energy resources

TAN Changshu¹, LI Yan¹, TIAN Jie¹, MING Weiyu², LI Yan², WANG Shaorong²

(1. Shenzhen Power Supply Co., Ltd., Shenzhen 518000, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: A reasonable comprehensive evaluation of distribution network resilience can reflect the ability of distribution network to restore power supplies when random faults occur, which is also helpful to diagnose the performances of different countermeasures for a higher resilience and lower losses. According to the mutual impacts by network nodes under different random faults, one comprehensive evaluation method for the resilience of active distribution networks (ADN) is presented to handle such an uncertainty. Firstly, three resilience indexes: fault recovery time, outage time and energy loss percentage is established to comprehensively evaluate the resilience of node. Aiming at quantitatively rating the interactive influences of nodes caused by the network connectivity and distribution energy resource (DER) location in a fault event, this paper retains the data information characteristics of multiple random fault resilience, and proposes a node weight calculation method, to comprehensively evaluate the overall resilience of ADN. In a case study, IEEE 33 bus model is taken as an example medium voltage distribution network, and Monte Carlo simulation is used to simulate random faults in that system. From the results, the proposed method can reflect the improvement of resilience after the implementation of different countermeasures, thus the effectiveness of this method can be verified.

Key words: distributed energy resources; resilience; evaluation method; active distribution network

收稿日期: 2021-06-17; 修回日期: 2021-12-27

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0902800)

通信作者: 明威宇(1996—), 男, 硕士研究生, 主要从事配电网规划运行与电力系统分析研究; E-mail: 743892015@qq.com

随着全球极端天气发生日益频繁,建设高“恢复力”的弹性电网已成为各国政府的国家战略^[1-2],通过构建合理的弹性恢复力评估指标,来反映受灾后电力系统恢复供电的能力^[3],采取相应措施加以提升,使之在受灾后能迅速恢复负荷供电,减小对社会造成的损失。国内外对恢复力指标开展了广泛研究。针对无分布式能源(distributed energy resources, DER)接入的传统配电网,文献[4]将系统恢复的部分与系统正常部分的比例作为恢复力;文献[5]提出通过系统可承受的最长修复时间和系统失负荷的严重程度指标来综合评价恢复力;文献[6]考虑风速等级建立故障率模型,计及负荷的影响开展输电线路的恢复力评估;文献[7-10]从不同的气象条件评估当前电网的恢复供电能力。以上研究借鉴传统可靠性分析方法,恢复力分析均考虑到天气条件和故障恢复过程的系统运行状态。

近年来分布式能源为小概率高损失极端条件下快速恢复供电提供重要的能源支撑手段^[11],文献[12-13]研究灾害发生后,主动配电网(active distribution network, ADN)众多台区的DER通过最优分配,最大化恢复关键负荷;文献[14-16]关注到DER对ADN恢复力提升的影响,在计及分布式能源的ADN恢复力指标构建方面;文献[17-18]仅以负荷损失量单一指标衡量分布式电源提升配电网韧性的程度,未计及DER在故障恢复过程中对关键负荷的支持作用;文献[19]进一步提出最大可接受修复时间、最小可接受功能损失等指标,但没有考虑随机故障不确定性因素对恢复力综合评估的影响。综上所述,现有研究尚未形成广为接受的恢复力指标定义,在综合评估方法上也有待进一步开展深入的研究工作。

本文考虑到配电网不同随机故障下遭受损失程度的差异,兼顾节点在不同随机故障下存在交互影响,提出一种适应随机不确定性的主动配电网恢复力综合评估方法。首先针对节点故障恢复过程,建立节点完全恢复供电时长、节点断续供电时长和节点能量损失百分比3个恢复力指标,综合评价节点恢复力;由于随机故障过程中各节点恢复力的交互影响,通过分析各节点恢复力信息重复程度,基于复相关系数提出计及随机不确定性的节点权重

的确定方法以综合评估ADN整体恢复力;以IEEE 33节点作为中压配电网中由一个电源变电站供电的单元作为算例,蒙特卡洛仿真多年发生的随机故障,采用所提方法开展评估,可反映不同措施实施后的恢复力提升效果,说明了方法的有效性。

1 考虑DER的ADN恢复力评价指标

本节讨论DER在随机故障下对节点*i*恢复供电能力的影响,提出节点完全恢复供电时长、节点断续供电时长和节点能量损失百分比3个恢复力指标,并对相应指标做归一化处理,根据节点负荷供电要求赋予权重后,可定量分析配电网DER在故障恢复供电过程中为关键负荷提供的支撑作用,综合评价ADN节点恢复力。ADN中有DER接入的节点集合为 η_{DER} ,没有DER接入的节点集合为 $\eta_{\text{non-DER}}$ 。配电网某节点*i*负荷功率变化如图1所示。

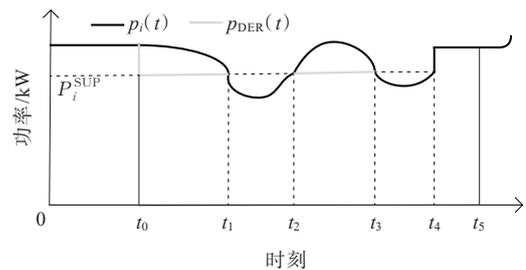


图1 考虑DER的节点*i*故障恢复过程

Figure 1 The fault recovery process of node *i* considering the DER

图1中,黑色实线表示节点*i*功率曲线 $p_i(t)$,虚线表示DER功率 $p_{\text{DER}}(t)$ 。 P_i^{SUP} 为节点*i*配置的DER所能提供的最大功率, t_0 为故障发生时刻,DER开始供电;在 t_1 时刻,节点*i*的负荷功率等于DER所能提供的最大功率;在 $t_0 \sim t_1$ 时间段内,节点*i*的负荷功率大于DER所能提供的最大功率;在 $t_1 \sim t_2$ 时间段内,节点*i*的负荷功率小于DER所能提供的最大功率;在 t_2 时刻,节点*i*的负荷功率等于DER所能提供的最大功率;在 $t_2 \sim t_3$ 时间段内,节点*i*的负荷功率大于DER所能提供的最大功率;在 t_3 时刻,节点*i*的负荷功率等于DER所能提供的最大功率;在 $t_3 \sim t_4$ 时间段内,节点*i*的负荷功率小于DER所能提供的最大功率。 t_4 为DER接入的节点负荷恢复至正常水平的时刻, t_5 为系统恢复正常供电的时刻。

1) 完全恢复供电时长。

在没有DER接入时,完全恢复供电时长是指系统制定恢复方案,修复基础设施逐步恢复负荷正常供电所需的时间。节点*i*系统恢复供电时长定义为

$$T_{i,RT} = t_5 - t_0, i \in \eta_{\text{non-DER}} \quad (1)$$

如果DER供电支撑可保证负荷恢复正常水平节点*i*完全恢复时长有可能缩短, $T_{i,RT}$ 定义为

$$T_{i,RT} = t_4 - t_0, i \in \eta_{\text{DER}} \quad (2)$$

节点完全恢复供电时长越短,电网弹性恢复能力越强,这里将该恢复供电时长转变为极大型指标,并进行归一化处理,即

$$M_{i,RT} = 1 - T_{i,RT}/\lambda, T_{i,RT} \leq \lambda \quad (3)$$

其中, λ 为节点完全恢复供电时长上限。

2) DER断续供电时长。

为考虑DER对接入节点负荷供电的支持作用,本文首先定义断续供电计数函数 $f(p)$,即

$$f(p) = \begin{cases} 1, & P_i^{\text{SUP}} \geq p_i(t) \\ 0, & P_i^{\text{SUP}} < p_i(t) \end{cases} \quad (4)$$

在 $t \sim t_2$ 、 $t_3 \sim t_4$ 时间段内 $f(p)$ 为1,在 $t_0 \sim t_1$ 、 $t_2 \sim t_3$ 时间段内, $f(p)$ 为0。

DER接入节点断续供电时长 $T_{i,OT}$ 定义为

$$T_{i,OT} = \int_{t_0}^{t_4} f(p) dt \quad (5)$$

DER断续供电时长越大,表示在恢复阶段给关键负荷供电的能力越强,此处对断续供电时长进行归一化处理,即

$$M_{i,OT} = T_{i,OT}/\gamma_{\text{DER}} \quad (6)$$

其中, γ_{DER} 为DER接入节点的断续供电时长上限。

3) 能量损失百分比。

为衡量DER恢复供电能力,本文定义能量损失百分比指故障恢复过程中电量缺额和正常所需供电量的比值 $K_{i,ELP}$,即

$$K_{i,ELP} = \frac{\int_{t_0}^{t_1} p_i(t) - P_i^{\text{SUP}} dt + \int_{t_2}^{t_3} p_i(t) - P_i^{\text{SUP}} dt}{\int_{t_0}^{t_4} p_i(t)} \quad (7)$$

在 $t_0 \sim t_1$ 、 $t_2 \sim t_3$ 时间段,DER所能提供的最大功率不能满足所有负荷需求,此时DER按照最大功率输出支持关键负荷,而在 $t_1 \sim t_2$ 、 $t_3 \sim t_4$ 时间段内DER的功率可以满足负荷需求。

能量损失百分比越小,反映恢复关键负荷供电的能力越强,此处将能量损失百分比转变为极大型指标,即

$$M_{i,ELP} = 1 - K_{i,ELP} \quad (8)$$

综合考虑影响ADN节点恢复力的3个指标,根据负荷供电要求可对3个恢复力指标赋予权重 $w_{i,RT}$ 、 $w_{i,OT}$ 、 $w_{i,ELP}$,假设第*j*次随机故障发生情况下,*i*节点可得到恢复力为

$$x_{ij} = w_{i,RT} \cdot M_{i,RT} + w_{i,OT} \cdot M_{i,OT} + w_{i,ELP} \cdot M_{i,ELP} \quad (9)$$

2 计及节点交互影响的ADN恢复力评估

配电网不同节点在不同随机故障下遭受损失程度会有差异,DER的接入的应急供电能力以及网络中的联络开关所引入新的供电通道,都会导致ADN各节点恢复力在不同随机故障下存在交互影响,因此本节将多次随机故障下节点恢复力之间的交互影响量化表示,并以此确定节点权重,从而对多种随机故障下ADN的恢复力进行综合评估。

假设极端天气导致*q*次随机故障发生,基于配电网故障恢复过程分析,将得到节点*i*恢复力集合 $X_i = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ij}, \dots, x_{iq}\}$,若配电系统节点总数为*p*个,采用文1的恢复力指标和节点恢复力评估,将建立*q*次随机故障的恢复力评价矩阵为

$$\begin{matrix} & \text{节点} \\ & \uparrow \\ & 1 & \cdots & j & \cdots & q \Rightarrow \text{故障次数} \\ \begin{matrix} 1 \\ \vdots \\ i \\ \vdots \\ p \end{matrix} & \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1j} & \cdots & x_{1q} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{i1} & \cdots & x_{ij} & \cdots & x_{iq} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{p1} & \cdots & x_{pj} & \cdots & x_{pq} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (10)$$

不同随机故障下各节点恢复力通过配电网连通性存在交互影响,评分集合 X_i 中的元素之间并非相互独立,用除*i*之外所有节点恢复力线性拟合*i*节点的恢复力 X_i ,得到拟合值 \hat{X}_i ,即

$$\hat{X}_i = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \cdots + \beta_{i-1} X_{i-1} + \beta_i X_{i+1} + \cdots + \beta_{p-1} X_p \quad (11)$$

式中, $\beta_0 \sim \beta_{p-1}$ 均为常数系数。

线性拟合效果反映了恢复力评价信息的重叠程度,衡量节点恢复力之间的相关性,体现节点恢复力的交互影响。

进一步采用复相关系数 ρ_{X_i, \hat{X}_i} 定量描述 \hat{X}_i 与 X_i 的相关性,即

$$\rho_{X_i, \hat{X}_i} = \frac{\text{cov}(X_i, \hat{X}_i)}{\sqrt{E(X_i^2) - E^2(\bar{X}_i)} \sqrt{E(\hat{X}_i^2) - E^2(\bar{\hat{X}}_i)}} \quad (12)$$

式中, $\text{cov}(X_i, \hat{X}_i)$ 为 X_i 与 \hat{X}_i 之间的协方差值; E 为期望值; $\bar{X}_i, \bar{\hat{X}}_i$ 分别为 X_i 与 \hat{X}_i 的平均值。

式(12)中的复相关系数越大,反映节点恢复力数据相关性强,数据重叠程度越大,其权重应越小;复相关系数越小,说明数据的重叠程度越小,其权重应越大,为尽量减少多次随机故障下数据信息冗余,保留数据信息特征,本文确定计及节点交互影响的权重值为

$$W_i = \frac{1}{\rho_{X_i, \hat{X}_i}} / \sum_{i=1}^p \frac{1}{\rho_{X_i, \hat{X}_i}} \quad (13)$$

式中, $1/\rho_{X_i, \hat{X}_i}$ 为节点 i 的复相关系数倒数; $\sum_{i=1}^p 1/\rho_{X_i, \hat{X}_i}$

为 ADN 所包含的所有 p 个节点的复相关系数倒数之和。

根据所得到的节点 i 恢复力集合 $X_i = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ij}, \dots, x_{iq}\}$, 算出恢复力集合的平均值 \bar{X}_i , 计及节点交互影响作用确定各节点权重 W_i , 将得到 ADN 整体恢复力为

$$X_{\text{ADN}} = \sum_{i=1}^p W_i \cdot \bar{X}_i \quad (14)$$

3 算例分析

本文根据台风和故障的概率分布参数等历史数据,模拟极端天气的随机故障,假设台风 v_{typ} 的风速服从正态分布,本文取 $v_{\text{typ}} \sim N(22, 6)$, m/s。极端天气下线路累积故障概率和台风风速 v_{typ} 满足 Weibull 累积分布,即

$$F(v_{\text{typ}}) = \begin{cases} 1 - e^{-\left(\frac{v_{\text{typ}}}{\alpha}\right)^\beta}, & v_{\text{typ}} \geq 17.2 \text{ m/s} \\ 0, & v_{\text{typ}} < 17.2 \text{ m/s} \end{cases} \quad (15)$$

其中, α 为尺度系数,决定曲线缩放程度; β 为形状系数,决定分布密度曲线的基本形状。本文选取 $\alpha = 20, \beta = 4$, 根据式(15)计算线路故障概率,利用蒙特卡洛法生成随机数,若该线路随机数小于 $F(v_{\text{typ}})$, 该线路发生故障。

以 IEEE 33 节点配电系统做为一个电源变电站供电的仿真算例,如图 2 所示。13 号节点与 26 号节点存在联络线,可接入转供电源;节点 6、7、23、24、29、31 为 DER 接入点,其他节点无 DER 接入。为突出不同 DER 对故障恢复力的影响,设置 2 种 DER 出力场景。

场景 1 所有 DER 接入点的 DER 接入最大功率 P_i^{SUP} 为 100 kW。

场景 2 6、7、23 号节点的 DER 接入最大功率 $P_6^{\text{SUP}}, P_7^{\text{SUP}}, P_{23}^{\text{SUP}}$ 为 200 kW, 24、29、31 号节点的 DER 接入最大功率 $P_{24}^{\text{SUP}}, P_{29}^{\text{SUP}}, P_{31}^{\text{SUP}}$ 为 100 kW。

蒙特卡洛仿真 10 年来台风导致的随机故障,并假设节点故障修复时长 T_r 为 2 h, 按照从变电站所在的电源点向供电线路末端节点的顺序恢复供电,有 DER 接入的节点按照到上级变压器的距离从近到远顺序先依次恢复供电。仿真参数如表 1 所示。表 1 中, $T_r, \lambda_{\text{key}}, \lambda_{\text{others}}, \gamma_{\text{key}}, \gamma_{\text{others}}$ 的单位均为 h。

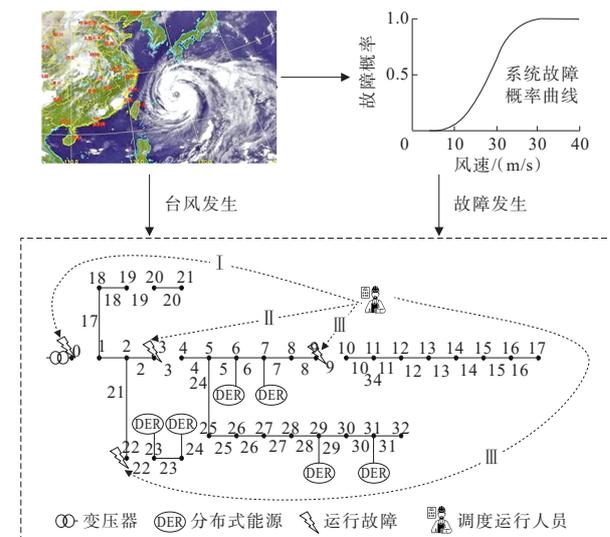


图 2 IEEE 33 节点算例模型

Figure 2 IEEE 33 bus model

表 1 仿真参数设置

Table 1 The selected parameters

v_{typ}	α	β	T_r	N_i	λ_{key}	λ_{others}	γ_{key}	γ_{others}
$v_{\text{typ}} \sim N(22, 6)$	20	4	2	13	48	72	48	72

按照文1所提出的指标计算方法,算例中无DER的节点,完全恢复供电时长为2 h,DER断续供电时长为0 h,能量损失百分比为1。为减小矩阵元素的信息重叠,同时降低恢复力矩阵的维度,将所

有无DER节点作为一个等值节点。根据式(10)构建ADN恢复力矩阵 X 。基于矩阵 X ,确定各 X_i 的权重,分别计算2种DER出力场景下ADN恢复力 X_{ADN} 如表2所示。

表2 各节点权重及ADN恢复力

Table 2 Weight of each node and the ADN resilience score

场景1					场景2				
X_i	P_i	P_i^{SUP}	W_i	X_{ADN}	X_i	P_i	P_i^{SUP}	W_i	X_{ADN}
6	224	100	0.142 99	58.39	6	224	200	0.150 77	63.43
7	224	100	0.143 43	58.39	7	224	200	0.176 01	63.43
23	465	100	0.142 74	58.39	23	465	200	0.134 69	63.43
24	465	100	0.142 70	58.39	24	465	100	0.134 36	63.43
29	632	100	0.142 74	58.39	29	632	100	0.136 64	63.43
31	233	100	0.142 71	58.39	31	233	100	0.134 43	63.43
等值	2 294	0	0.142 69	58.39	等值	2 294	0	0.133 11	63.43

表2中, P_i 为节点负荷功率,kW。由表2可知,节点DER出力的变化影响相应的节点权重,ADN的整体恢复力会得到提升。同时,负荷小的节点,如节点6、7,权重变化显著。

进一步通过故障恢复措施调整,可在不同仿真场景下开展恢复力综合评估。比较故障恢复措施调整后的恢复力提升效果如表3所示。若无特别说明, P_i^{SUP} 均设置为100 kW。由表3可知,减少线路故障发生概率使恢复力提升34.17%,故针对本算例系统,减少线路故障发生概率的措施使得配电网恢复力提升最大,算例说明:该方法为定量分析不同故障恢复措施的效果提供了理论依据。

表3 故障恢复措施调整后的恢复力提升效果

Table 3 Resilience enhancement score after adjusting fault event countermeasures

故障恢复措施调整	X_{ADN}	恢复力提升百分比/%
$T_r=1$ h	64.80	10.97
$P_i^{SUP}=200$ kW	65.74	12.58
$\alpha=32, \beta=6$	78.35	34.17
联络线 N_l 接入26节点	64.25	10.03

4 结语

随着全球极端天气灾害发生日益频繁,本文针对弹性恢复力评估指标和评估方法开展研究,所提

出的计及DER的主动配电网恢复力综合评估方法可为建设高恢复力弹性电网提供理论依据。主要工作和结论如下:

1) 基于DER接入电网后节点故障恢复过程,建立节点完全恢复供电时长、节点断续供电时长和节点能量损失百分比3个恢复力指标,有效计及DER在配电网故障恢复阶段对关键负荷的应急供电能力;

2) 在考虑ADN多种随机故障下恢复力综合评估时,基于复相关系数量化多次随机故障下节点恢复力之间的交互影响,确定各节点权重,从而确保ADN恢复力评估的有效性与准确性;

3) 采用所提方法可以定量分析不同措施对恢复力的提升效果,从而为采取有效的恢复力提升手段提供理论依据。

参考文献:

- [1] 俞拙非,刘菲,刘瑞环,等.面向配电网弹性提升的源网荷灵活资源优化研究综述及展望[J].中国电力,2022,55(4):132-144.
YU Zhuofei, LIU Fei, LIU Ruihuan, et al. Resilience-oriented optimization of source-grid-load flexible resources in distribution systems: review and prospect[J]. Electric Power, 2022, 55(4): 132-144.
- [2] 娄为,沈冰,裘愉涛,等.钻石型配电网的保护与自愈策略分析[J].电力系统保护与控制,2022,50(23):161-168.
LOU Wei, SHEN Bing, QIU Yutao, et al. Protection and

- self-healing strategy analysis of a diamond type distribution network[J]. *Power System Protection and Control*,2022,50(23):161-168.
- [3] 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 resilience[J].*Automation of Electric Power Systems*,2021, 45(9):1-9.
- [4] ALBASRAWI M N, JARUS N, JOSHI K A, et al. Analysis of reliability ADN resilience for smart grids[C]// 2014 IEEE 38th Annual Computer Software and Applications Conference (COMPSAC), Vasteras, Sweden, 2014.
- [5] KAHANJH, ALLENAC, GEORGEJK. An operational framework for resilience[J]. *Journal of Homeland Security and Emergency Management*, 2009, 6(1):1-48
- [6] PANTELI M, MANCARELLA P, WILKINSON S, et al. Assessment of the resilience of transmission networks to extreme wind events[C]// *Proceedings of 2015 IEEE Eindhoven, Eindhoven, Holland*, 2015.
- [7] 王守相,黄仁山,潘志新,等.极端冰雪天气下配电网弹性恢复力指标的构建及评估方法[J].*高电压技术*,2020, 46(1):123-132.
WANG Shouxiang, HUANG Renshan, PAN Zhixin, et al. Construction and evaluation of resilience restoration capability indices for distribution network under extreme ice and snow weather[J]. *High Voltage Engineering*, 2020, 46(1):123-132.
- [8] 钱浩,罗少杰,郭强,等.基于5G通信的有源配电网多方向故障恢复策略[J].*供用电*,2022,39(12):1-10.
QIAN Hao, LUO Shaojie, GUO Qiang, et al. Multi-directional fault recovery strategy for active distribution network based on 5G communication[J]. *Distribution & Utilization*, 2022, 39(12):1-10.
- [9] 郭艺,姜新丽,王波.基于CDOA算法的配电网弹性提升方法[J].*电网与清洁能源*,2022,38(5):56-64+78.
GUO Yi, JIANG Xinli, WANG bo. Method to improve the elasticity of distribution network based on CDOA algorithm[J]. *Power System and Clean Energy*, 2022, 38(5): 56-64+78.
- [10] 赵伟,李哲,史海峰,等.基于层次分析法的浙江电网雷击跳闸孕灾环境敏感性评估[J].*高电压技术*,2017,43 (2):619-626.
ZHAO Wei, LI Zhe, SHI Haifeng, et al. Sensitivity assessment on hazard-pregnant environment of lightning trip-out in Zhejiang power grid based on analytic hierarchy process model[J]. *High Voltage Engineering*, 2017, 43(2):619-626.
- [11] HUANG J Y, JIANG C W, XU R. A review on distributed energy resources and microgrid[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2008, 12(9):2472-2483.
- [12] POUDEL S, DUBEY A. Critical load restoration using distributed energy resources for resilient power distribution system[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, 34(1):52-63.
- [13] ARIF A, WANG Z, WANG J, et al. Power distribution system outage management with co-optimization of repairs, reconfiguration, and DG dispatch[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, 9(5):4109-4118.
- [14] LI J, MA X Y, LIU C C. Distribution system restoration with microgrids using spanning tree search[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2014, 29(6):3021-3029.
- [15] 吴文仙,韩冬,孙伟卿,等.考虑韧性增强策略的配电网负荷恢复优化[J].*电力科学与工程*,2019,35(4):17-24.
WU Wenxian, HAN Dong, SUN Weiqing, et al. Load restoration optimization of distribution systems considering resilience enhancement strategy[J]. *Electric Power Science and Engineering*, 2019, 35(4):17-24.
- [16] 景皓,李璠,卢志刚,等.基于主从博弈理论的含分布式发电的主动配电网故障恢复方法[J].*智慧电力*,2021,49 (5):77-84.
JING Hao, LI Fan, LU Zhigang, et al. Active distribution network fault recovery method with distributed generation based on master-slave game theory[J]. *Smart Power*, 2021, 49(5):77-84.
- [17] 周晓敏,葛少云,李腾,等.极端天气条件下的配电网韧性分析方法及提升措施研究[J].*中国电机工程学报*, 2018, 38(2):505-513+681.
ZHOU Xiaomin, GE Shaoyun, LI Teng, et al. Assessing and boosting resilience of distribution system under extreme weather[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(2):505-513+ 681.
- [18] GAO H, CHEN Y, MEI S, et al. Resilience-oriented pre-hurricane resource allocation in distribution systems considering electric buses[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2017, 105(7):1214-1233.
- [19] OUYANG M, DUENAS-OSORIO L, MINX. A three-stage resilience analysis framework for urban infrastructure systems[J]. *Structural Safety*, 2012, 36(2):23-31.