

引用格式:段宏,郭成,陈凤仙.基于改进K-shell混合度分解法的有源配电网脆弱节点评估[J].电力科学与技术学报,2025,40(1):67-76.

Citation: DUAN Hong, GUO Cheng, CHEN Fengxian. Assessment of vulnerable nodes in active distribution networks based on improved K-shell mixed degree decomposition method[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2025, 40(1): 67-76.

基于改进 K-shell 混合度分解法的有源 配电网脆弱节点评估

段宏¹, 郭成¹, 陈凤仙²

(1.昆明理工大学机电工程学院, 云南昆明 650500; 2.云南电网有限责任公司曲靖马龙供电局, 云南曲靖 655000)

摘要:针对现有配电网节点脆弱性评估方法存在指标选取困难、指标权重片面而难以用于有源配电网脆弱节点评估的问题,提出一种基于改进K-shell混合度分解法(mixed degree decomposition, MDD)的有源配电网脆弱节点评估方法。首先,提出基于信息熵理论改进的K-shell混合度分解法,实现配电网节点脆弱度层级划分;随后,结合分布式电源的地理位置和随机特性,建立基于核密度估计和Copula理论的分布式电源随机出力模型;最后,基于风险理论提出以节点运行风险作为权重修正因子的配电网脆弱节点评估方法。所提方法能有效评估有源配电网的脆弱节点,且面对大规模或超大规模的配电网脆弱节点评估时具有更强的计算效率。通过对IEEE 123系统的算例分析验证所提方法的可行性和优越性。

关键词:配电网;分布式电源;脆弱节点;Copula理论;复杂网络理论;改进的K-shell混合度分解法

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2025.01.007 中图分类号: TM73 文章编号: 1673-9140(2025)01-0067-10

Assessment of vulnerable nodes in active distribution networks based on improved K-shell mixed degree decomposition method

DUAN Hong¹, GUO Cheng¹, CHEN Fengxian²

(1. Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;

2. Qujing Malong Power Supply Bureau, Yunnan Power Grid Co., Ltd., Qujing 655000, China)

Abstract: The existing distribution network node vulnerability assessment methods face problems such as the difficult selection of indicators and one-sided weights of indicators, and they thus fail to be used in the assessment of vulnerable nodes in active distribution networks. To address these issues, a vulnerable node assessment method of active distribution networks based on the improved K-shell mixed degree decomposition (MDD) is proposed. Firstly, an improved K-shell MDD based on the information entropy theory is proposed to divide the distribution network node vulnerability hierarchy; subsequently, a stochastic output model of distributed generation based on kernel density estimation and Copula theory is established by combining the geographic location and stochastic characteristics of the distributed generation; finally, a vulnerable node assessment method of distribution networks based on the risk theory is proposed with the node operation risk as a weighting correction factor. The proposed method can effectively assess the vulnerable nodes of active distribution networks and has stronger computational efficiency when facing large-scale or ultra-large-scale vulnerable node assessment of distribution networks. The feasibility and superiority of the proposed method are verified by analyzing the case of the IEEE 123 system.

Key words: distribution network; distributed generation; vulnerable node; Copula theory; complex network theory; improved K-shell mixed degree decomposition method

收稿日期: 2024-04-07; 修回日期: 2024-09-03

基金项目: 国家自然科学基金(52367002); 云南省联合基金专项(202201BE070001-15)

通信作者: 郭成(1978—), 男, 博士, 教授, 主要从事电能质量分析与控制、电力系统稳定性分析等研究; E-mail: gc325@126.com

随着配电网规模的扩大和分布式电源(distributed generation, DG)的广泛应用,配电网的不确定因素增多,对其可靠性分析变得更加困难^[1-2]。因此,有源配电网的脆弱性评估对于提高其供电可行性具有重要意义。

早期针对配电网脆弱性评估的方法主要包括灵敏度分析法^[3-4]、关键割集组法^[5-7]和蒙特卡罗模拟法^[8-9]等,但这些方法较少考虑配电网的拓扑特性。近年来,由于复杂网络理论具备较强的分析和预测能力,基于该理论的评估方法逐渐成为研究热点^[10]。目前,在电力系统领域,复杂网络理论较早被用于输电系统网络特性^[11]、输电网络连锁故障演化机制^[12]以及大电网结构脆弱性^[13-16]分析等方面。文献[17-18]较早提出使用复杂网络中节点度、介数、凝聚度和紧密度等指标来评估配电网节点脆弱度;文献[19]通过选取电网关键节点的重要评价指标,并考虑电力系统网络的网络链接方向和权值的特性,提出了基于PSNodeRank算法的电网关键节点辨识方法。上述文献侧重于电网的静态拓扑结构分析,而有关光伏发电系统出力随机特性对配电网影响的研究尚不充分。文献[20]基于围绕中心点的划分(partitioning around medoids, PAM)聚类算法和HS评价指标,提出了一种以短路容量为核心的配电网脆弱性评估模型;文献[21]通过定义新的电压稳定指标和电网结构重要度指标,提出了一种基于电网运行状态和拓扑结构的脆弱性线路辨识方法;文献[22-23]改进了节点度和介数等脆弱性评估指标,提出了一种基于样本修正权重的模糊综合评价方法;文献[24]通过迭代加权分布策略和区间潮流算法,提出了一种基于电气化的LeaderRank算法(electrical leaderrank, ELR),用于识别大规模分布式电源并网后的配电网脆弱节点。

随着复杂网络理论的迅速发展,不同类型的网络(如交通网络、社交网络和病毒传播网络等)逐渐成为研究对象。然而,以指标集评估节点脆弱性的方法在应用中暴露出诸多问题,如指标选取困难、指标单一以及指标权重片面等。因此,有学者进行了非指标集的节点脆弱性评估方法研究,如文献[25]提出了K-壳分解(K-shell decomposition)即K-shell分解法,通过将网络外围的节点层层剥离,认为处于越内层的节点拥有较高的影响力和脆弱性,但面对特殊网络(如星型图)时K-shell分解法难以发挥作用。对此,文献[26]提出了节点收缩法,即将一个节点和其邻节点收缩成一个新节点,用于寻找网

络的重要核心节点;文献[27]提出了K-shell混合度分解法(mixed degree decomposition, MDD),通过在节点剥离过程中引入混合系数以综合考虑节点的全局和局部特性,此方法在树状结构等特殊网络中表现出色,但在对混合系数的取值方法上存在不足。

本文首先针对配电网树状拓扑结构特性,提出基于信息熵理论改进的K-shell混合度分解法,也称为自适应网络壳层(adaptive network shell, ANS)算法,用于对配电网节点进行脆弱度层级划分;随后,建立基于核密度估计和Copula理论生成分布式电源典型日出力随机模型,用于考虑有源配电网中DG随机出力的影响;最后,根据分布式电源的典型日出力场景,基于风险理论引入节点运行风险指标,对相同脆弱度层级的节点进行脆弱性权重修正,从而细分配电网各节点的脆弱性,最终确定节点的具体脆弱度。本文所提方法可有效避免指标选取困难和不全面等问题,且更适用于大规模有源配电网的节点脆弱性评估。

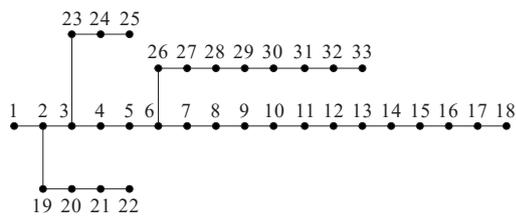
1 自适应网络壳层算法

1.1 原始K-shell混合度分解法

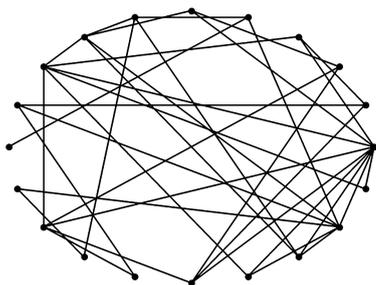
配电网的网络结构以树状拓扑为主,显著区别于传统复杂网络的复高连通特性。这种结构特性使得传统复杂网络中的多指标综合评价方法在配电网中的适用性受限。传统评价指标依赖于节点间复杂的关联关系,而配电网的简单拓扑结构缺乏环路或强耦合特征,导致这些指标在识别网络脆弱节点时效能减弱。具体而言,由于电力传输的单向性和层级性,配电网中的节点关系通常表现出明显的分层特征。这种特性导致复杂网络模型中的统计特征(如节点度分布、聚类系数等)在配电网脆弱节点评估中呈现偏态分布,而非典型的幂律分布。因此,常规节点评价指标难以全面刻画配电网的结构特性,从而削弱了其对脆弱节点的评估能力。配电网拓扑与传统复杂网络模型对比如图1所示。

相比于传统的多指标综合评价方法,MDD法在识别树形网络中的关键节点(如中继和桥接节点)方面表现出更高的敏感性。这主要得益于其基于节点平均依赖度的评估机制,能够全面整合节点的局部连接特性与全局连通性贡献。MDD法的核心原理在于逐步剥离网络中混合度最低的节点,直至所有节点均被剥离为止。故而此方法在面对层

次分明且路径依赖性较强的树形结构网络时能够更加精确地量化节点对网络整体稳定性和功能的重要性。



(a) IEEE 33 节点系统结构



(b) 复杂网络实体-联系随机模型

图1 配电网拓扑与传统复杂网络模型对比

Figure 1 Comparison of distribution network topology with traditional complex network model

MDD法在每一步剥离外围节点时,同时考虑第*i*个节点的剩余度 k_i^r (与尚未被移除节点的连接数)和耗尽度 k_i^e (与已被移除节点的连接数)。通过综合这2项指标,MDD法能够更全面地评估节点在网络中的作用,揭示节点的层次关系和相对重要性,实现更准确的节点重要性识别。在MDD法中,定义第*i*个节点的混合度为

$$k_i^m = k_i^r + \lambda \cdot k_i^e \quad (1)$$

式中, λ 为混合系数,用于平衡连接剩余节点的链路数和连接被删除节点的链路数对混合度的贡献。

1.2 基于信息熵的改进K-shell混合度分解法

在MDD法中,参数 λ 由人为设定,但从式(1)可见,其选择对MDD法的分解效果有显著影响。不恰当的 λ 可能削弱该方法对关键节点的识别能力,进而导致算法在不同网络环境中的性能表现存在不一致性。此外,由于 λ 的设定方式较为刚性,在不同配电网中,其可能无法充分适应电力系统网络结构的动态变化和节点重要性随环境变化的特性,从而影响节点混合度计算的准确性和适用性。针对 λ 取值方式的不足,结合文献[28]中提出的信息熵在电力系统中的应用思想,本文基于网络拓扑熵提出一种改进的 λ 取值方法。该方法通过综合考虑节点

在网络中相邻节点的重要性,进一步优化 λ 的设定方式,以更好地适应电力系统网络的拓扑特性和节点重要性的动态变化,改进的 λ 表达式为

$$\lambda_{i+} = - \sum_{j \in \Gamma(i)} (p_j \ln p_j) \quad (2)$$

式中, $\Gamma(i)$ 为第*i*个节点被移除的邻居节点集合; p_i 定义为 $p_i = k_i / \sum_{j=1}^N k_j$,其中 k_i 为第*i*个节点的度, $\sum_{j=1}^N k_j$ 为网络中所有节点度的总和。

从式(2)可见,基于网络理论中节点重要度与节点度数的概念计算网络拓扑熵(或称拓扑熵),从节点度数的角度定量描述了电力网络结构的不均衡性。此外,将信息熵作为度量不确定性的工具引入算法,使改进后的算法更具丰富性和普适性,使其更能适应复杂的电力系统环境。本文结合节点拓扑熵改进后的ANS算法可表示为

$$k_i^m = k_i^r + \lambda_{i+} \cdot k_i^e = k_i^r - \sum_{j \in \Gamma(i)} (p_j \ln p_j) \cdot k_i^e \quad (3)$$

在实际配电网中,电源节点通常位于网络边缘,位置较为特殊。为突出电源节点在供电保障中的重要作用,本文将其脆弱度等级设为最高值。具体操作:在ANS算法求解得到的最大混合度数值基础上,加1作为电源节点的脆弱度等级,从而体现其在供电可靠性评估中的关键地位。

1.3 ANS算法流程

本文基于被评估节点的邻节点在网络中重要性的考虑,通过拓扑熵对混合系数的计算进行改进,提出ANS算法对节点的脆弱性程度进行度量,具体步骤如下:

- 1) 初始时配电网中每个节点的 $k^m = k^r$;
- 2) 将当前所有值最小的节点脆弱度层级记为M-Level,此时M等于当前 $\min\{k^m\}$;
- 3) 从网络中将 k^m 最小的节点删除;
- 4) 通过式(3)更新所有剩余节点的 k^m ,即若存在 $k^m \leq M$ 的节点,则将这些节点的脆弱度层级也记为M-Level后从网络中删除,此步骤重复进行,直到剩余节点的 k^m 最小值均大于M;
- 5) 当剩余节点的 k^m 最小值均大于M时,跳转步骤2),直到网络中的节点个数为0时停止。

ANS分解过程如图2所示,使用ANS算法对一个6节点的网络进行节点脆弱度评估,初始时因网络中不存在被删除节点,故每个节点的 k^m 等于其链路数,如图2(a)所示;此时,将 k^m 最小节点5、6的脆弱度层级归为1-Level后将其从网络中删除,并通过

式(3)计算剩余节点的 k^m ,如图2(b)所示。因当前剩余节点1~4的 k^m 均大于1(1-Level),故将 k^m 最小的节点1、2、4脆弱度层级归为3-Level后将其从网络中删除;节点3的脆弱度评估同理,归为4-Level后将其从网络中删除,此时网络中无剩余节点,ANS计算结束。

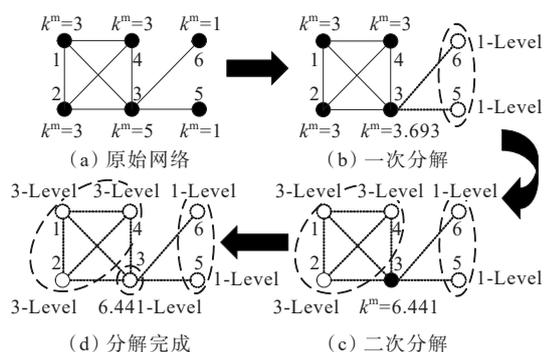


图2 ANS分解示例

Figure 2 Example of ANS decomposition

相较于原始MDD法,ANS算法在配电网脆弱节点识别中采用动态调整混合系数的策略和机制。ANS算法通过引入信息熵的概念重新定义了混合系数 λ ,在节点被移除时考虑邻居节点度分布的概率信息,使得 λ 在每一步的计算中都能动态调整,更灵活地适应不同节点在配电系统中的位置和影响程度。ANS算法允许每个节点具有个性化的 λ ,而非采用全局固定的取值,这种个性化参数的引入使得算法能够更细致地考虑配电网中每个节点的连接特性,有效反映出不同节点在配电网中的角色和影响。

此外,在实际配电网系统中,某些线路可能会根据需求进行改造或其他因素导致配电网系统的结构发生变化。而本文所提改进ANS算法考虑了配电网节点的邻居节点度分布的不确定性,使得算法更容易适应配电网网络结构的变化,有助于提高算法的鲁棒性,使其在处理不同电力系统拓扑结构和度分布的情况下,能够更准确地进行网络分解。

2 考虑DG出力的有源配电网脆弱性分析

2.1 DG典型日出力场景生成

有源配电网相较于传统配电网的区别在于其引入了大量分布式电源,而DG出力具有波动性及间歇性的特点,这与风速或光照强度的随机性有关。目前,处理风速或光照强度的随机性方法主要

有基于参数或非参数估计这两种途径。基于参数估计的方法又可分为①基于统计经验,假设风速服从Weibull分布,光照强度服从Beta分布,通过采样方法获取风速和光照强度的序列;②基于风速和光照强度的日前预测,假设预测误差服从正态分布,通过误差采样实现风速和光照强度的随机性。基于参数估计的方法需要预先假设特定的分布形式,这在一定程度上忽略了风速和光照强度曲线的实际特征,导致参数分布模型的拟合结果可能偏离数据的真实分布,从而使评估结果与实际情况存在偏差。因此,本文采用基于非参数估计的方法,利用核密度估计和Copula理论生成风光出力模型^[29]。

Copula函数基于历史风光输出数据(每小时一个数据点),通过以下步骤考虑DG出力相关性和随机性的典型日出力曲线。

1) 利用核密度估计法,使用常见的高斯核函数为每个时段(24 h内的每个时刻)生成风速和光照强度的概率密度函数。

2) 考虑风光之间的相关性,基于Copula理论构建每个时段风光输出的联合概率分布函数。对于Copula函数的选择,本文使用Frank Copula函数来描述风光出力之间的相关性。因为风能和光能通常存在负相关关系,但在二元阿基米德Copula函数中,Gumbel和Clayton Copula函数只能描述变量之间的非负关系,而Frank Copula函数可以同时描述变量的非负和负相关关系^[30]。

3) 对每个时段的联合概率分布函数进行采样,并通过反变换将采样结果映射到DG的联合概率分布中,从而获取每个时段的风机和光伏输出,最终生成同时考虑DG出力相关性和随机性的典型日出力曲线。

Copula函数表达式为

$$F(x_1, x_2, \dots, x_n) =$$

$$C(F_{X_1}(x_1), F_{X_2}(x_2), \dots, F_{X_n}(x_n)) \quad (4)$$

式中, $F(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 为 n 个变量的联合分布函数; $F_{X_i}(x_i)$ ($i=1, 2, \dots, n$)为单个变量的边缘分布函数; $C(\cdot)$ 为Copula连接函数。

考虑采样数量 N 较大而不利于分析计算,因此对Copula函数生成的DG出力模型进行场景缩减,将相似的采样结果分配到同一类别中,从而减少数据量并提取典型的日出力场景。本文使用高斯混合模型(gaussian mixture model, GMM)聚类方法对 M 组采样结果进行聚类,以生成 K 个典型的日出力

场景。在风电和光伏出力的建模中,数据通常具有连续的概率分布特征,而GMM作为一种基于概率密度估计的聚类方法能很好地捕捉这种特征。通过GMM聚类,将相似的采样结果分配到同一类别中,从而减少数据量并提取典型的日出力场景。GMM的概率密度函数表达式为

$$P(x) = \sum_{k=1}^K \pi_k \cdot N(x|\mu_k, \Sigma_k) \quad (5)$$

式中, $P(x)$ 为观测值 x 的概率密度函数; π_k 为第 k 个分量的权重,满足 $\sum_{k=1}^K \pi_k = 1$; $N(x|\mu_k, \Sigma_k)$ 为多元高斯分布的密度函数,表示第 k 个分量的概率密度。

2.2 基于风险理论的权重修正

相较于传统配电网,有源配电网中DG出力还会带来网络阻塞、电压越限和双向潮流等问题。例如,源配电网中分布式电源的出力具有时序特性,当局部发电量超过负荷需求时,可能出现功率倒送现象,进而引发节点过电压问题。而现有配电网脆弱性评价指标无法对此进行有效分析;并且ANS算法虽然对于脆弱节点的评估能力有进一步的提高,但因其改进是以K-shell混合度分解法为基础,实质上仍是一种以节点度为基础的粗粒化节点重要性排序方法,难以避免同一层级内出现多个节点的重要性无法区分的情况。为此,本文基于风险理论设定了节点运行风险指标用于节点权重修正。该指标结合DG的时序运行特性,将一天划分为24个时段,既可针对单个时段进行分析,也可通过累加各时段的运行风险值得到综合风险值。考虑到易越限节点的电压受DG出力波动影响较大,计算中引入电压偏移程度作为权重因子。第 i 个节点运行风险指标为

$$\begin{cases} S_i = \sum_{t=1}^{t=24} \frac{(V_{i,t} - V_{0,i})^2}{V_{0,i} \Delta v} \gamma_{i,t} \\ \gamma_{i,t} = (f_{ex,t} + 1) W_{i,t} / R_{base} \end{cases} \quad (6)$$

式中, $V_{i,t}$ 为 t 时段第 i 个节点的电压; $V_{0,i}$ 为第 i 个节点的额定电压; Δv 为电压偏移的允许值,取0.05; $\gamma_{i,t}$ 为 t 时段第 i 个节点的权重因子; $f_{ex,t}$ 为 t 时段系统中电压越限的节点个数; $W_{i,t}$ 为 t 时段第 i 个节点的注入功率; R_{base} 为系统基准功率。

根据节点运行风险指标的计算结果,将对应的运行风险指标作为节点权重进行赋值。在最大脆弱度层级中,依次选取运行风险指标最大的节点,最终得出节点的脆弱性排序。具体排序方式可表示为

$$R_{(i)} = \text{Max}\{k^m, S_i\} \quad (7)$$

式中, $R_{(i)}$ 为节点脆弱度排序值; $\text{Max}\{k^m, S_i\}$ 表示依次从最大混合度值中选取运行风险最大的节点 i ,并对其进行排序

2.3 有源配电网脆弱节点评估流程

考虑DG随机出力模型的有源配电网脆弱性分析流程如图3所示,具体步骤如下:

- 1) 根据有源配电网的拓扑结构特性,采用ANS算法对配电网节点进行脆弱度层级划分;
- 2) 收集评估台区DG的历史日出力数据,利用Copula函数和核密度估计法建立DG随机出力模型;
- 3) 基于核密度估计法生成台区的N个DG出力场景,采用GMM进行场景缩减,并根据出力概率提取典型DG日出力场景;
- 4) 考虑DG出力不确定性对节点脆弱性评估的影响,引入电压偏差程度构建节点运行风险指标,计算各节点24小时的运行风险总值,并基于该结果对各脆弱度层级的节点进行权重修正;
- 5) 根据权重修正结果,利用式(7)得到配电网中各节点的脆弱度排序。

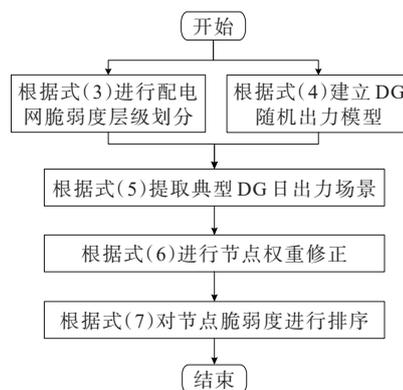


图3 评估流程

Figure 3 Evaluation flow chart

3 算例分析

3.1 节点脆弱性层级划分

为验证本文所提ANS算法的有效性,并分析DG高渗透率对配电网脆弱性评估的影响,采用IEEE 123节点配电系统进行仿真分析,并分别在节点16、56、65、250位置依次接入容量为0.8、0.8、0.5、0.5 MW的光伏电源(PV);在节点71、83、86、300位置依次接入容量为1.0、1.0、0.8、0.8 MW的风电电源(WT)。如图4所示,该配电系统电压等级为4.16 kV,基准功率为1 MV·A。

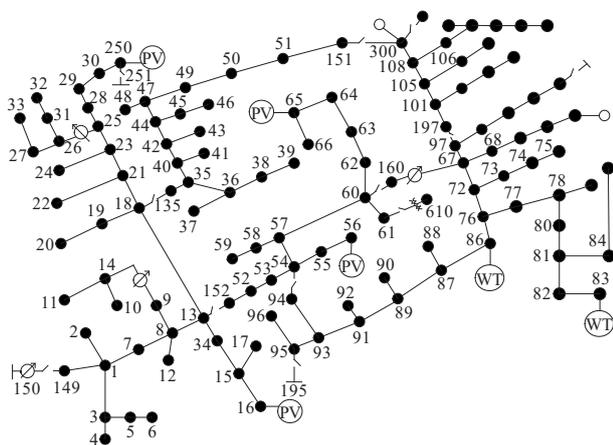


图4 IEEE 123节点系统拓扑(含DG)

Figure 4 IEEE 123 node system topology(with DG)

根据图3流程,通过ANS算法对该配网中的节点进行脆弱性层级确定,采用ANS算法的计算结果如表1所示;采用MDD法的计算结果如表2所示(表1、2中各层级所含节点仅按照标号从小到大书写,不代表此层级中节点最终脆弱性排序)。其中,鉴于IEEE 123节点电力系统的节点数量较多,以及考虑具体的实际应用价值,表中仅列出脆弱度层级最高的前5层。

表1 ANS算法计算结果

Table 1 Computing result of ANS algorithm

k^m	所含节点
2.000 0	150
1.596 9	8,13
1.557 2	1,52,53,54,57,60,67,152
1.502 8	18
1.463 1	7,160

表2 MDD法计算结果

Table 2 Computing result of MDD

k^m	所含节点
4.1	150
3.1	8,13,18
2.8	1,60,67
2.4	3,21,23,25,26,35,36,40,42,44,47,54,57,72,76,87,89,91,93,97,101,105
2.1	14,15,78,81,110

由表1、2可知, k^m 越大,代表此层级内所含节点的脆弱性越高,如节点8、13具有较高的脆弱性。从图4可以看出,节点8、13均在配网中处于主干连接位置,对于网络全局连通性起到关键作用,且相邻节点在网络连通和传输中也具有较高

的重要性。同理,其余 k^m 较大的层级节点(如1、18、52和60等节点)在网络中也处于关键连接位置,如节点1所处网络位置会直接影响源节点供电。此外,由表2可以看出,MDD法使用固定 λ 取值的方式会造成脆弱性层级识别过程中粗粒化程度较大,存在精细度不足、鲁棒性差和层级结构模糊程度大的问题。

3.2 节点脆弱性权重修正

在对具有相同脆弱度层级的节点进行权重修正前,需要生成DG典型日出力场景以计算节点运行风险指标。DG出力数据来源于云南某地2021年全年风光出力样本数据,数据采样间隔为1h,每日共24个采样点。利用Frank-Copula函数对全年24个时段的风电和光伏出力数据分别拟合,并通过蒙特卡洛采样法生成500个风光互补场景。为充分体现DG出力的随机特性,使典型日出力场景具有代表性,采用GMM聚类方法对生成的场景进行处理,最终提取光伏和风电各4个典型日出力场景,如图5、6所示,可以看出,有源配电网中光伏出力呈现明显的时序性,而风电出力则具有显著的随机性。

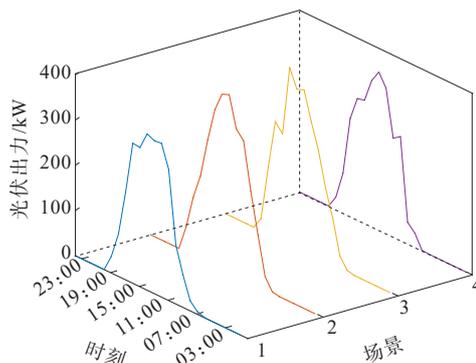


图5 光伏典型日出力场景

Figure 5 Typical daily output scenarios of photovoltaics

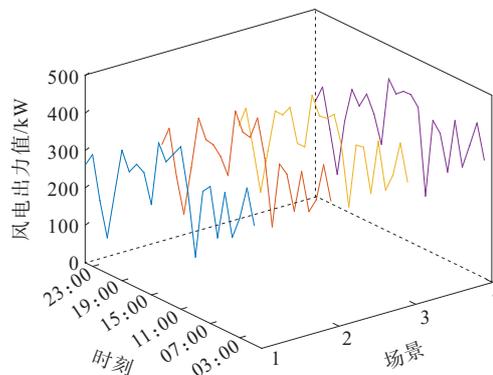


图6 风电典型日出力场景

Figure 6 Typical daily output scenarios of wind power

根据图5、6,为进一步分析DG不确定性出力对节点脆弱性评估的影响,在基于节点24h运行风险指标进行权重修正之前,选取09:00和14:00这2个时段的DG出力情况,分别计算节点运行风险指标并进行权重修正,此时DG出力占比分别为15%和35%。DG出力占比对节点脆弱性的具体影响如表3所示。

表3 DG出力占比对节点脆弱性的影响

时刻(出力占比)/%	脆弱度前10节点
09:00(15)	150、13、8、1、67、54、60、57、152、53
14:00(35)	150、13、8、1、60、54、57、67、53、152

从表3可以看出,当DG出力情况不同时,对于节点的脆弱性评估会造成一定的影响,如节点67、60。09:00时DG出力对于节点影响较小,节点脆弱性更多是受其所处网络位置的影响,而节点67一方面因其本身处于配电网关键连接位置,另一方面其邻居节点具有较高的度数,故此时节点67的脆弱性高于节点60。而14:00时DG出力占比较高,节点受影响程度较大,节点60因其在网络中作为交汇节点,本身具有较高脆弱性,同时也会受到节点56、65所接DG出力的影响,故在此情况下其脆弱性高于节点67。

最后,为更全面地进行节点脆弱性权重修正,将4组DG出力场景分别按划分的24个时刻依次接入到IEEE 123节点系统中,并通过式(6)计算节点24h运行风险指标结果,基于此结果对节点的最终脆弱度权重进行修正,最终节点脆弱度排序结果如表4所示(考虑具体的实际应用价值,仅给出脆弱度层级较高的前20个节点结果)。

表4 权重修正后的节点排序结果

脆弱度排序	节点	脆弱度排序	节点	脆弱度排序	节点	脆弱度排序	节点
1	150	6	60	11	152	16	25
2	13	7	54	12	18	17	35
3	8	8	57	13	7	18	23
4	1	9	53	14	160	19	21
5	67	10	52	15	72	20	135

由表4可以看出,对于同一脆弱度层级的节点,经过综合考虑DG日出力情况的节点权重修正后,其脆弱程度有了进一步的辨识。以节点13为例,此节点不仅距在节点16接入的DG较近,且本身靠近

源节点,又处于配网电流主干传输线路的相交点上,因此,不论从拓扑结构还是从电压越限风险方面该节点都具有较高的脆弱度;再以脆弱度第2高的层级为例,通过对该层级中节点脆弱度排名靠前的1、67、60、54、57节点分析,节点1无论从源节点的网络位置关系还是节点运行风险指标来看,都具有较高的脆弱性;而节点67相较于同层级其他节点距DG接入点71更近,且处于网络的关键连接位置,更易受DG出力和周围节点电压变化的影响,因此综合计算后具有更高的运行风险,此结果与上述取某一时刻的计算结果相比较,证明了综合考虑DG日出力情况对节点脆弱性影响的必要性。

3.3 方法有效性及优越性分析

3.3.1 方法有效性验证

为验证本文方法在配电网节点脆弱度评估中的有效性和可行性,基于电网效率损失系数^[31],分别采用文献[21]中基于层次分析法的多指标综合评价方法和文献[22]中基于样本修正权重的模糊综合评价方法,对相同DG接入情况下的IEEE 123节点系统进行计算。节点脆弱度排序对比如表5所示。

表5 节点脆弱度排序对比

采用方法	脆弱度前15节点
本文	150、13、8、1、67、60、54、57、53、52、152、18、7、160、72
文献[21]	13、60、8、150、54、152、53、67、160、52、18、1、7、149、57
文献[22]	13、8、150、1、7、52、149、67、54、57、152、60、53、160、18
电网效率损失系数	150、1、8、13、7、152、52、53、54、57、60、160、67、18、72

电网效率损失系数:

$$E = S_{\text{loss}} / \sum S \quad (8)$$

式中, S_{loss} 为某一节点故障失效后导致其余节点不能被正常供电的节点总数; $\sum S$ 为配电网正常运行时的总节点数。

从电网效率损失系数定义可知,当某一节点故障失效后,若此时的系统效率损失率越大,说明此电力系统受损越严重,即此节点对系统的影响就越大,则此节点的脆弱性也越高。但目前配电网中因为DG的接入,一部分节点在受到故障节点的影响时,依旧能依靠DG正常供电,因此为使计算简化,

取 DG 出力的均值作为 DG 的恒定出力,再依次计算每个节点故障所造成的电网效率损失率。

由表 5 可以看出,前 3 种方法所得结果与采用电网效率损失系数计算结果具有较高的重合度,仅在具体的节点排序上有所不同。其原因在于,文献[21]没有考虑 DG 出力的随机性,而是将 DG 当作恒定的电源来评价,其影响是 DG 会保持较高比例的出力水平,因此节点 60 具有较高的脆弱性,这与本文以 14:00 时计算后得到节点 60 的脆弱性较高的原因相同;文献[22]虽考虑了 DG 随机出力对于配电网的影响,但未能充分考虑地理位置相近的风电和光伏机组的相关性和时序性,这会造成实验结果与实际情况存在偏差。而本文方法通过对节点 24 h 的运行风险指标值进行累加,充分考虑 DG 出力的随机性和时序性,使得计算结果更符合实际情况;并且在采用本文所提方法得到的结果中,节点 150 的脆弱性均高于文献[21]、[22]中方法所得结果。这是因为本文从实际角度出发,更全面地考虑了配电网中电源节点在整个电网中的供电地位和重要性,而这一点也与电网效率损失系数计算结果相吻合。

此外,虽然不同方法的排序结果存在一定差异,但本文方法的结果与基于电网效率损失率的方法更为接近,这说明了本文方法的可行性和结果的准确性。需要指出的是,电网效率损失率仅作为验证本文方法有效性的客观依据,无法替代本文所提方法。

3.3.2 方法优越性分析

为验证本文方法的优越性,与 MDD 法(λ 取 0.7)进行对比分析,对 IEEE 123 系统进行节点脆弱度层级划分。结果显示,ANS 和 MDD 法的分解层数分别为 21、7 层,表明本文方法较 MDD 法能够获得更高的分解层级数。

为进一步验证本文方法在不同规模配电网中的求解速度优势,分别采用文献[22]中评估方法和本文方法,对节点规模为 33、39、57、118、123、145、162 的配电网系统进行节点脆弱度评估,并比较 2 种方法的求解耗时,如图 7 所示。结果表明,本文所提 ANS 算法在不同规模的配电网中均具有更快的求解速度。这是因为本文方法计算的指标数量较少,仅需针对 N 个节点(N 为节点数)计算运行风险指标。同时,ANS 算法基于配电网的拓扑特性进行分解,因此配电网规模变化对其分解效果影响较小。

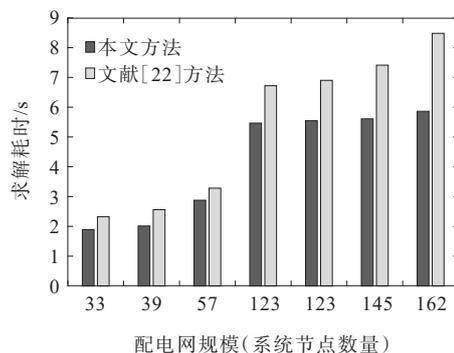


图 7 不同方法求解耗时对比

Figure 7 Comparison of time required by different algorithms

4 结语

本文针对有源配电网的节点脆弱性评估问题,提出了基于信息熵改进的 K-shell 混合度分解法,并对配电网脆弱节点进行了深入分析。主要结论如下:

1) ANS 算法充分考虑了配电网的拓扑特性,避免了多指标评估中存在的指标选取困难和权重设定不易的问题,更客观地反映了节点间的关联性;

2) 利用 Copula 理论模拟 DG 随机出力,并将其用于节点脆弱度权重修正。结果表明, DG 出力的不确定性和时序性会导致节点运行风险的动态变化,综合考虑 DG 日出力可为节点权重修正提供依据;

3) 提出了基于电压偏差程度和 DG 出力时序性的节点运行风险指标,有效弥补了对高密度 DG 出力对节点影响评估的不足,更合理地衡量了 DG 出力随机性对节点脆弱性的影响;

实例分析表明,与多指标综合评价方法相比,ANS 算法在配电网脆弱节点识别上具有更高的求解效率,能够快速有效地定位配电网的关键节点。

参考文献:

- [1] 李蕊,李跃,郭威,等.分布式电源接入对配电网可靠性影响的仿真分析[J].电网技术,2016,40(7):2016-2021.
LI Rui, LI Yue, GUO Wei, et al. Simulation analysis of the influence of distributed generation on the reliability of distribution network[J]. Power System Technology, 2016, 40(7):2016-2021.
- [2] 曾翔,文明浩,钱堃,等.逆变型分布式电源接入对接地距离保护的影响与对策[J].智慧电力,2023,51(1):46-53.
ZENG Xiang, WEN Minghao, QIAN Kun, et al. Influence

- of inverter-interfaced distributed generation integration on grounding distance protection and its strategies[J]. *Smart Power*,2023,51(1):46-53.
- [3] FOUAD A A,ZHOU Q,VITTAL V.System vulnerability as a concept to assess power system dynamic security[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1994, 9(2): 1009-1015.
- [4] 王华佳,张岩,尹书林,等.分布式光伏并网系统电压越限风险及谐波影响[J].*电网与清洁能源*, 2024, 40(3): 128-138+146.
WANG Huajia, ZHANG Yan, YIN Shulin, et al. Voltage instability and harmonic risk for the distributed photovoltaic grid-connected system[J]. *Power System and Clean Energy*, 2024, 40(3): 128-138+146.
- [5] 穆钢,蔡国伟,胡哲,等.机网结合的暂态稳定评价方法—关键割集组法[J].*清华大学学报*,1997,37(7):97-101.
MU Gang, CAI Guowei, HU Zhe, et al. Network machine combined transient stability assessment method-key cutsets method[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*,1997,37(7):97-101.
- [6] 蔡国伟,穆钢,柳焯,等.基于暂态能量的多机电力系统网络评价[J].*电力系统自动化*,1999,23(16):14-16.
CAI Guowei, MU Gang, LIU Zhuo, et al. Network evaluation of multi-machine power system based on transient energy[J]. *Automation of Electric Power Systems*,1999,23(16):14-16.
- [7] 惠慧,李蕊,朱逸楠,等.含高比例分布式光伏的配电网多目标概率规划方法[J].*电测与仪表*,2023,60(11):2-10.
HUI Hui, LI Rui, ZHU Yidi, et al. Multi-objective probabilistic planning method for distribution network with high proportion of distributed photovoltaics[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*,2023,60(11): 2-10.
- [8] 侯恺,刘泽宇,贾宏杰,等.含高比例可再生能源的电力系统运行可靠性解析评估方法综述[J].*高电压技术*, 2023,49(7):2697-2710.
HOU Kai, LIU Zeyu, JIA Hongjie, et al. Review of analytical methods for operation reliability assessment of power systems with high-penetration renewable energy [J].*High Voltage Engineering*,2023,49(7):2697- 2710.
- [9] 史明明,刘瑞煌,张宸宇,等.考虑输电网与柔性互联配电网交互影响的可靠性评估方法[J].*电力工程技术*, 2024,43(4):77-87.
SHI Mingming, LIU Ruihuang, ZHANG Chenyu, et al. Reliability assessment method considering the interaction effect between transmission network and flexible interconnected distribution network[J]. *Electric Power Engineering Technology*,2024,43 (4): 77-87.
- [10] 安沈昊,于荣欢.复杂网络理论研究综述[J].*计算机系统工程应用*,2020,29(9):26-31.
AN Shenhao, YU Ronghuan. Review on complex network theory research[J]. *Computer Systems & Applications*,2020,29(9):26-31.
- [11] 苏慧玲,李扬.基于准稳态功率转移分布因子的电力系统复杂网络特性分析[J].*电力自动化设备*,2013,33(9): 47-53.
SU Huiling, LI Yang. Analysis of complex network characteristics based on quasi-steady PTDF for power system[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2013, 33(9):47-53.
- [12] 金波,肖先勇,李长松.基于一、二次系统交互关系的电网连锁故障演化机制分析[J].*电力自动化设备*,2017,37(1):169-175.
JIN Bo, XIAO Xianyong, LI Changsong. Grounding grid fault diagnosis based on node tearing and chemical reaction optimization algorithm[J]. *Electric Power Automation Equipment*,2017,37(1):169-175.
- [13] WEN P, JIAN C, XIAO Q, et al. Operational reliability assessment of power systems based on bus voltage[J]. *IET Generation Transmission & Distribution*, 2015, 9(5): 475-482.
- [14] 谢李为,李勇,罗隆福,等.基于复杂网络与运行因素的电网薄弱点辨识方法[J].*电力系统保护与控制*,2022,50(4):83-91.
XIE Liwei, LI Yong, LUO Longfu, et al. A vulnerable points identification method based on complex network theory and an operation index[J]. *Power System Protection and Control*,2022,50(4):83-91.
- [15] 蔡晔,曹一家,李勇,等.考虑电压等级和运行状态的电网脆弱线路辨识[J].*中国电机工程学报*,2014,34(13): 2124-2131.
CAI Ye, CAO Yijia, LI Yong, et al. Identification of vulnerable lines in urban power grid based on voltage grade and running state[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014,34(13):2124-2131.
- [16] 朱大锐,王睿,程文姬,等.基于改进PageRank算法的输电网关键节点辨识方法研究[J].*电力系统保护与控制*, 2022,50(5):86-93.
ZHU Darui, WANG Rui, CHENG Wenji, et al. Critical transmission node identification method based on improved PageRank algorithm[J]. *Power System Protection and Control*,2022,50(5):86-93.
- [17] 吴辉,彭敏放,张海艳,等.基于复杂网络理论的配电网节点脆弱度评估[J].*复杂系统与复杂性科学*,2017,14(1):38-45.
WU Hui, PENG Minfang, ZHANG Haiyan, et al. Node vulnerability assessment for distribution network based on complex network theory[J]. *Complex Systems and Complexity Science*,2017,14(1):38-45.
- [18] 庄儒丰,谢小伟,杨墨缘,等.考虑冗余系统故障率参数时变性的直流配电网可靠性评估[J].*供用电*, 2023,

- 40(1):56-64.
ZHUANG Rufeng, XIE Xiaowei, YANG Moyuan, et al. Reliability evaluation of DC distribution network considering time-varying failure rate parameter of redundant system[J]. *Distribution & Utilization*, 2023, 40(1):56-64.
- [19] 孙志媛,梁水莹,傅裕斌.基于PSNodeRank算法的电力系统关键节点辨识方法[J].*电力科学与技术学报*,2020, 35(2):157-162.
SUN Zhiyuan, LIANG Shuiying, FU Yubin. Research on identification method of key nodes of power system based on PSNodeRank algorithm[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2020, 35(2):157-162.
- [20] 丁少倩,林涛,翟学,等.基于短路容量的含大规模新能源接入的电网状态脆弱性评估方法研究[J].*电力系统保护与控制*,2016,44 (13):40-47.
DING Shaoqian, LIN Tao, ZHAI Xue, et al, et al. Research on state vulnerability assessment method of grid with large scale newenergy sources based on short-circuit capability[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44 (13):40-47.
- [21] 王孝琳,郝超超,李晓明,等.含分布式电源的配电网脆弱性分析[J].*电测与仪表*,2019,56(6):38-43.
WANG Xiaolin, HAO Chaochao, LI Xiaoming, et al. The vulnerability analysis of distribution network with distributed generation[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2019, 56(6):38-43.
- [22] 王子欣,苗世洪,郭舒毓,等.考虑分布式电源出力随机特性的配电网节点脆弱性评估[J].*电力自动化设备*, 2021,41(8):33-40.
WANG Zixin, MIAO Shuyu, GUO Shuyu, et al. Node vulnerability evaluation of distribution network considering randomness characteristic of distributed generation output[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2021, 41(8):33-40.
- [23] 辛曦,欧阳森,黄祎,等.考虑储能容量衰减的多保供电型微网最优经济配置及可靠性评估[J].*电力建设*,2024, 45(10): 100-113.
XIN Xi, OUYANG Sen, HUANG Yi, et al. Optimal economic configuration and reliability evaluation of multiple power supply ensuring microgrid considering energy storage capacity attenuation[J]. *Electric Power Construction*, 2024, 45(10): 100-113.
- [24] ZHOU B, LEI Y, LI C, et al. Electrical leaderrank method for node importance evaluation of power grids considering uncertainties of renewable energy[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2018, 106:45-55.
- [25] KITSACK M, GALLOS L K, HAVLIN S, et al. Identification of influential spreaders in complex networks[J]. *Nature Physics*, 2010, 6:888-893.
- [26] 谭跃进,吴俊,邓宏钟.复杂网络中节点重要度评估的节点收缩方法[J].*系统工程理论与实践*,2006(11):79-83+102.
TAN Yuejin, WU Jun, DENG Hongzhong. Evaluation method for node importance based on node contraction in complex networks[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2006(11):79-83+102.
- [27] ZENG A, ZHANG C. Ranking spreaders by decomposing complex networks[J]. *Physics Letters A*, 2013, 377: 1031-1035.
- [28] 张广伦,钟海旺.信息熵在电力系统中的应用综述及展望[J].*中国电机工程学报*,2023,43(16):6155-6181.
ZHANG Guanglun, ZHONG Haiwang. Review and prospect of information entropy and its applications in power systems[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(16): 6155-6181.
- [29] 赵书强,金天然,李志伟,等.考虑时空相关性的多风电场出力场景生成方法[J].*电网技术*,2019,43(11):3997-4004.
ZHAO Shuqiang, JIN Tianran, LI Zhiwei, et al. Wind power scenario generation for multiple wind farms considering temporal and spatial correlations[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(11):3997-4004.
- [30] 赵继超,袁越,傅质馨,等.基于Copula理论的风光互补发电系统可靠性评估[J].*电力自动化设备*,2013,33(1): 124-129.
ZHAO Jichao, YUAN Yue, FU Zhixin, et al. Reliability assessment of wind-PV hybrid generation system based on Copula theory[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2013, 33(1):124-129.
- [31] 张家美,黎灿兵,彭敏放,等.基于综合功率系数的主动配电网脆弱性分析[J].*电力系统保护与控制*,2018,46 (18):41-48.
ZHANG Jiamei, LI Canbing, PENG Minfang, et al. Vulnerable links analysis based on integrated active power betweenness in active distribution network[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(18): 41-48.