

DOI: 10.7667/PSPC180093

计及新能源影响静动态结合的电网脆弱节点辨识

李利娟¹, 吴军¹, 刘红良², 李媛¹, 曾泰元¹, 周健¹, 巩政¹

(1. 湘潭大学信息工程学院, 湖南 湘潭 411105; 2. 科学与工程计算与数值仿真湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411105)

摘要: 随着新能源发电的快速增长, 其所具有的随机性、波动性不确定给电网脆弱节点辨识带来了新的挑战。提出了一种考虑新能源不确定性的电网静动态结合的脆弱节点辨识方法。该方法在静态辨识中采用区间数表示新能源的不确定性, 提出了基于区间直流潮流的最小切负荷模型计算各节点的区间静态脆弱性评估指标。在动态辨识中, 提出基于单机等效延伸方法计算各节点的稳定性裕度, 并根据稳定性裕度的正负对应计算各节点的动态脆弱性评估指标。最后建立基于熵权法的电网脆弱节点综合评估方法。IEEE-39 节点算例仿真结果表明, 该方法能准确快速地辨识新能源接入情况下电网中的脆弱节点。与已有脆弱节点辨识方法相比, 该模型更符合新能源接入下电力系统实际运行情况。通过研究发现新能源的随机性、波动性不确定对节点脆弱性具有就近影响原则, 为新能源电源在智能电网中的规划提供指导作用。

关键词: 连锁故障; 新能源; 暂态稳定性分析; 不确定性; 脆弱性

Static and dynamic integration method on identifying vulnerability nodes considering new energy power

LI Lijuan¹, WU Jun¹, LIU Hongliang², LI Yuan¹, ZENG Taiyuan¹, ZHOU Jian¹, GONG Zheng¹

(1. College of Information Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China;

2. Hunan Key Laboratory for Computation and Simulation in Science and Engineering, Xiangtan 411105, China)

Abstract: With the rapid growth of new energy power generation, its randomness and volatility bring new challenges to identify the vulnerability nodes in power grid. In this paper, a method of integration of static state and dynamic state on identifying vulnerability nodes considering new energy power is proposed. In the static identification, the interval numbers are used to express the uncertainty of new energy. The interval minimum load shedding model based on interval direct current power flow is proposed to calculate the interval static vulnerability assessment index. In the dynamic identification, the energy margin of each node is calculated by the extension method of Single Machine Equivalence (SIME) method, and the dynamic vulnerability assessment index is obtained according to the positive or negative of energy margin. Finally, the weights of two indexes are obtained by the entropy weight method, and the vulnerability index of each node is evaluated. The simulation results of IEEE 39-bus system show that the proposed method can accurately and quickly identify the vulnerability nodes under the condition of new energy injected into the power grid. Compared with the existing vulnerability identification methods, the proposed method is closer to actual operation of the power system. The results show that the randomness and volatility of new energy has a far greater impact on near nodes, which provides guidance for the planning of the new energy power supply in the smart grid.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51307148) and Sino-US international Science and Technology Cooperation Project (No. 2016YFE0105300).

Key words: cascading failure; new energy; transient stability; uncertainty; vulnerability

0 引言

近年来, 国内外大停电事故频发, 如西欧“11·4”

大停电^[1], 2012年印度7·30大停电事故等^[2-3], 造成了极为严重的社会影响和经济损失。研究表明, 这些大停电事故大多是由部分元件故障导致的一系列连锁故障。产生连锁故障初始故障的元件一般被称之为脆弱源, 这些脆弱源对电力系统稳定运行产生重要影响, 识别系统中的脆弱源, 辨识脆弱节点

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51307148); 中美国际科技合作项目资助(2016YFE0105300)

是保障电网安全稳定运行的重要环节^[4-5]。快速准确定位系统中的脆弱源, 构建脆弱性评估指标对当前系统中的各环节进行安全水平的评估, 对提高电力系统的安全可靠性, 降低大规模停电事故的发生具有重要意义。

目前, 国内外学者提出了多种脆弱节点辨识方法来评估电力系统中重要元件在突发事件下的脆弱性。根据着重点不同主要分为两类: 第一类从电网拓扑结构出发, 利用复杂网络的相关理论, 将度数、介数等指标应用到电网中, 建立关键元件的识别模型, 通过研究网络拓扑特征参数, 从拓扑结构上评估电网脆弱性, 识别关键元件^[6-8]。第二类研究主要从电网物理特性和实时运行状态出发, 通过定义相关指标描述电网元件的关键程度来评估脆弱性, 例如文献[9]基于电气距离提出了网络节点电气耦合连接度的概念, 克服了现有模型只关注节点之间线路连接关系的不足。文献[10-11]从熵的基本原理出发, 分别提出了考虑电压等级和运行状态的电网脆弱性元件辨识模型和基于潮流熵的脆弱元件评估模型, 分析了连锁故障的产生机理以及预防措施。上述研究主要是从电力系统静态性能的角度辨识脆弱节点, 然而, 扰动时的脆弱源的暂态失稳以及后续故障蔓延是造成大停电事故的重要原因^[12]。所以, 对网络中各节点进行动态脆弱性评估是准确识别脆弱节点的关键环节。

目前, 系统中各节点的动态脆弱性主要使用暂态稳定分析方法来评估。在暂态稳定性分析中主要有两类暂态评估方法。一种是基于暂态能量函数(Transient Energy Function, TEF)的暂态脆弱性评估方法^[13-15]。另一种是应用单机等效法(Single Machine Equivalent, SIME), 将故障后的多机系统用单机无穷大母线(One-Machine Infinite Bus, OMIB)进行等效, 并结合等面积法则判别系统的稳定性^[16-18]。单机等效法建模简单, 计算成本低, 并且易于嵌入在仿真程序中。因此, 本文不局限于脆弱性的静态评估, 构建了单机等效延伸方法评估各节点的动态脆弱性。

近年来, 风电、太阳能光伏发电等新能源持续快速增长, 其在电网中的渗透率日益增高, 逐渐进入大规模发展阶段^[19-21]。但是由于新能源电源特有的随机性和波动性^[22-23], 当新能源发电出力波动时, 电网潮流也将随之波动变化, 而电网脆弱节点辨识往往需要依赖于潮流结果, 使电网各节点脆弱性也发生改变。因此, 高渗透新能源电源为电网安全稳定带来新的挑战, 其中包括在高渗透新能源电网辨

识脆弱节点问题, 所以如何在新能源接入电网的情况下, 准确和快速地辨识电网中的脆弱节点就尤为迫切和重要。

本文考虑新能源发电的不确定性, 提出了综合考虑电网节点静态和动态脆弱性的脆弱节点辨识方法, 并通过熵权法确定静动态评估指标所占的权重, 客观地评估节点的脆弱性。这种方法克服了脆弱节点辨识方法一般只限于静态评估及其衍生指标的范畴, 考虑动态脆弱性实时仿真电网在新能源电源接入情况下的整体运行过程, 更真实地表示电网运行的实际情况, 实现静动态结合综合地评估网络中各节点的脆弱性。本文所提出的脆弱节点辨识方法考虑了波动性新能源接入电网, 符合现阶段智能电网发展方向, 有利于评估智能电网未来发展的安全程度。使用 IEEE-39 节点系统对本文所提方法进行测试, 所得结果验证了所提出方法的有效性。

1 计及新能源不确定性的脆弱节点静态辨识方法

新能源电源接入电网后, 由于风能、太阳能等新能源自身的随机性和波动性, 导致其发电出力在一定的范围内波动, 而这种不确定性对系统的静态稳定性造成影响。目前常采用随机法、模糊法以及非概率方法处理不确定信息, 前两种方法需要较多的样本信息来构造不确定信息的概率密度函数或模糊隶属度函数, 而非概率方法是利用区间或凸集来描述变量的不确定性, 只需通过较少的信息来获得不确定信息的边界, 极大地方便了不确定信息的度量^[24-25]。因此本文在静态脆弱性评估中采用区间方法处理不确定信息。在此基础上, 提出基于区间直流潮流的最小切负荷模型的系统节点区间静态脆弱节点辨识方法, 通过各节点的区间静态脆弱性指标(Interval Static Vulnerability Indices, ISVI)对各节点脆弱性进行评估。

1.1 考虑新能源接入的区间最小切负荷评估模型

系统发生故障时, 若不对系统采取相应的控制措施, 系统将维持故障前的负荷分布状态, 并根据故障后的拓扑重新分布潮流。当系统传输裕度不充裕时, 很容易引起其他支路过载并相继跳闸, 引起大规模停电事件。当系统发生故障导致过载后, 考虑发电机出力的不确定性将其表示为区间数, 并计及发电机的可调作用, 对负荷进行优化调度, 使潮流重新分布后无支路出现过负荷情况。基于区间直流潮流的最小切负荷模型如式(1)所示。

$$\begin{aligned}
& \min: I^T \tilde{Z} \\
\text{s.t. } & 0 \leq \tilde{Z} \leq L_0 \\
& \tilde{G} \in [\tilde{G}^{\min}, \tilde{G}^{\max}] \\
& P = \tilde{G} - (L_0 - \tilde{Z}) \\
& I^T P = 0 \\
& \theta = B^{-1} P \\
& F = B^T A \theta \\
& -F^{\max} \leq F \leq F^{\max}
\end{aligned} \quad (1)$$

式中: 设系统中含有 N 个节点数和 M 条线路, I 为元素全为 1 的 $N \times 1$ 阶向量; \tilde{Z} 为区间最小切负荷向量; \tilde{G} 表示系统各发电机节点有功出力; \tilde{G}^{\max} 和 \tilde{G}^{\min} 分别表示各发电机有功出力的上下界; P 为节点注入有功值; L_0 表示故障前初始负荷量; F 和 F^{\max} 分别表示支路有功潮流值和传输极限; θ 表示节点电压相角; A 为 $M \times N$ 阶连接矩阵; B 是 $N \times N$ 阶的节点导纳矩阵。

1.2 节点区间静态脆弱性指标及排序方法

1.2.1 区间静态脆弱性指标

一个给定节点的 ISVI 值是根据故障场景下节点的区间最小切负荷值构造的。对于系统中的某个节点 i , 当节点 i 突发故障时, 如果检测到负荷过载, 使用式(1)所示的基于区间直流潮流的最小切负荷模型计算相应的区间切负荷量, 并使用式(2)计算归一化之后的节点 i 的 ISVI 值 W_{s_i} 。

$$W_{s_i} = \frac{\tilde{Z}_i}{\sum_{i=1}^N \tilde{Z}_i} \quad (2)$$

式中: W_{s_i} 为节点 i 的区间静态脆弱性值指标; \tilde{Z}_i 为节点 i 的区间切负荷量。

1.2.2 基于可能度的区间静态脆弱性指标排序

式(2)所得的静态脆弱性指标 W_s 为区间数, 不宜进行直接大小比较, 须经过转换后才能进行比较。所以本文采用基于可能度的区间数排序法对所有节点的区间静态脆弱性指标进行排序^[26]。

记 $W_s = [W_s^-, W_s^+] = \{x | W_s^- \leq x \leq W_s^+\}$, 称 W_s 为一个区间数。当 W_{s_i}, W_{s_j} 同时为区间数或者有一个为区间数时, 设 $W_{s_i} = [W_{s_i}^-, W_{s_i}^+]$, $W_{s_j} = [W_{s_j}^-, W_{s_j}^+]$, 且记 $l_i = W_{s_i}^+ - W_{s_i}^-$, $l_j = W_{s_j}^+ - W_{s_j}^-$, 则称

$$P_{ij}(W_{s_i} \geq W_{s_j}) = \frac{\min\{l_i + l_j, \max(W_{s_i}^+ - W_{s_j}^-, 0)\}}{l_i + l_j} \quad (3)$$

为 $W_{s_i} \geq W_{s_j}$ 的可能度, 且记 i, j 的次序关系为 $W_{s_i} \geq_p W_{s_j}$ 。

对于所有的区间静态脆弱性指标值, $W_{s_i} = [W_{s_i}^-, W_{s_i}^+]$, $i \in \{1, 2, \dots, N\}$, 把其中的区间数两两比较, 利用式(3)求得值为矩阵元素构成的可能度矩阵 $P = (p_{ij})_{N \times N}$, 并利用如下的排序公式得到可能度矩阵 P 的排序向量 ψ , 并进行排序。

$$\psi_i = \frac{1}{N(N-1)} \left\{ \sum_{j=1}^N p_{ij} + \frac{N}{2} - 1 \right\}, i \in (1, 2, \dots, N) \quad (4)$$

2 计及波动性新能源电源的脆弱节点动态辨识方法

本文以风电为例, 在风速采用威布尔分布的前提下, 构建了单机等效(Single Machine Equivalent, SIME)延伸方法来辨识接入新能源的系统中的脆弱节点, 其实质为当接入新能源电源的系统中某一节点发生故障时, 对系统进行时域仿真, 通过一个正弦函数预估单机等效系统的传输功率转移函数, 进而计算系统各节点在清除故障几毫秒后的稳定性裕度, 并根据稳定性裕度的正负对应计算各节点的动态脆弱性评估指标。

2.1 计及波动性新能源的动态脆弱节点辨识模型

根据计算稳定性裕度的主要思想, 通过式(5)所示的传输功率转移函数等效故障后的单机无穷大母线的功率转移特性曲线 $P_e(\delta)$ 。

$$P_e(\delta) = \frac{E_m(\delta)E_\infty}{X_e} \sin(\delta) + P_0 \quad (5)$$

式中: δ 为等效机械转子角; $E_m(\delta)$ 为滞后暂态电抗的等效电压, 其建模为转子角的函数; E_∞ 为无穷大母线电压; P_0 为等效单机无穷大母线的额定电压。这种等效方法需要估算 $E_m(\delta)$ 、 E_∞ 和 X_e 的值, 然后通过拟合方程计算出 P_0 的值。因为该等效方法使用基于 $P_e(\delta)$ 和 δ 的完全外推法, 式(5)提供了比原始单机等效法更为一致和精确的 $P_e(\delta)$ 等效。

当接入新能源电源的系统中某一节点发生故障, 单机等效法将故障后系统的失步看成是主导机群(Critical Machines, CMs)和非主导机群(Non-Critical Machines, NMs)之间功角的相对振荡, 在时域仿真的基础上, 将包含新能源电源的多机系统等效为单机无穷大母线系统^[18]。式(5)中参数 $E_m(\delta)$ 为滞后主导机群中发电机的暂态电抗的平均电压值, 即

$$E_m(\delta) = \frac{1}{N_C} \sum_{k \in C} E_k(\delta) \quad (6)$$

式中: C 为主导机群的集合; N_C 为主导机群中发电

机的数量。

式(5)中参数 X_e 估算为每个发电机的外阻抗加权平均值加上自身的暂态阻抗。

$$X_e = M_C \times \left[\sum_{k \in C} M_k / (x_{ek} + x'_{dk}) \right]^{-1} \quad (7)$$

式中: M_k 为惯性系数; x'_{dk} 和 x_{ek} 分别为发电机 k 的暂态电抗和外阻抗; M_C 为主导机群集合 C 中所有惯性系数 M_k 之和。

根据以上预估的功率转移特性, 稳定性裕度定义为 OMIB P_e - δ 曲线减速区域超过加速区域的面积。

$$\eta = A_{\text{dec}} - A_{\text{acc}} \quad (8)$$

式中: η 为系统的稳定性裕度; A_{acc} 为系统加速区域, 代表故障时期储存的系统动能; A_{dec} 为系统减速区域, 代表系统在故障后能够使用的最大潜在能量。于是, 如果加速区域小于最大减速区域, OMIB 系统就是暂态稳定的, 换句话说, 系统在 $\eta < 0$ 的情况下不稳定, 在 $\eta > 0$ 的情况下稳定。等于 0 的情况下临界稳定(临界不稳定)。

2.2 计及波动性新能源电源的动态脆弱性指标

对于电力系统分析而言, 尤其是在安全风险评估之中, 提出一个非迭代, 无量纲的暂态稳定性指标是非常必要的。对于每一个扰动仿真, 该指标必须提供足够的精度来反映系统稳定或不稳定的程度。基于此要求, 并根据上节所得稳定性裕度的正负, 提出了两种不同形式的动态脆弱性指标。

正裕度指标(I_p)主要是依据发电机角轨迹接近势面所决定的。

$$I_p = \frac{\delta_u - \delta_r}{\delta_u - \delta_s + \delta_a} \quad (9)$$

式中: δ_u 为单机等效法不稳定均衡点的角度; δ_r 为回复角; δ_s 为故障后平衡点角度; δ_a 为一小常数角(如 10°)。正裕度指标 I_p 的值在 0~1 之间, 其中 0 代表处于临界稳定状态, 1 代表非常稳定。

对于不稳定的轨迹, 负裕度指标(I_m)为

$$I_m = -\frac{Vke_{\min}}{Vke_{\max}} \quad (10)$$

式中, Vke_{\min} 和 Vke_{\max} 分别为故障后单机等效法轨迹的最小系统动能和最大动能值。其范围在 -1~0 之间, 其中 0 代表临界不稳定状态, -1 表示为一个高不稳定状态。系统动能值的计算如式(11)所示。

$$Vke(t) = 0.5 \sum_{k=1}^n M_k \omega_k^2(t) \quad (11)$$

式中: n 为发电机数目; ω_k 为发电机 k 的角速度。

2.3 动态脆弱性指标排序

对于 2.2 节中两种不同形式的动态脆弱性指标, 由于正负值的差别, 不能直接进行数值比较, 本文使用归一化的方法对两种指标进行处理后得到归一化动态脆弱性指标 Wd_i , 并对其进行排序, 如式(12)所示。

$$Wd_i = \begin{cases} \frac{I_{Pi}}{\sum_{i=1}^N I_{Pi}} & \eta \geq 0 \\ \frac{I_{mi}}{\sum_{i=1}^N I_{mi}} & \eta < 0 \end{cases} \quad (12)$$

式中, I_{Pi} 和 I_{mi} 为节点 i 的正裕度指标或者负裕度指标。

3 基于熵权法的电网脆弱节点综合评估指标

单一的静态评估或动态评估指标难以全面地描述节点脆弱性, 因此本节利用上两节所研究的计及新能源电源静态和动态脆弱节点辨识研究结果, 定量确定静态动态指标权重, 综合评估各网络节点的脆弱性, 更符合系统的实际运行情况。

目前, 应用较为广泛的综合评价方法有模糊综合评价法、层次分析法和熵权法等。其中熵权法能综合利用各种决策信息, 自动根据静动态指标所含信息量的大小确定指标权重, 提高评估的准确度^[27]。所以本文提出基于熵权法的电网脆弱节点综合评估方法, 具体如下。

对静态和动态评估方法所得到的静态指标和动态指标, 建立矩阵 X 如式(13)所示。

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} \\ x_{21} & x_{22} \\ \vdots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} \\ \vdots & \vdots \\ x_{N1} & x_{N2} \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中, x_{ij} 表示节点 i 评估方法 j ($j=1, 2$, j_1 表示静态评估方法, j_2 表示动态识别方法)下的评估指标。

用 x_j^* 表示评估方法 j 的理想值, 定义为利用评估方法 j 得到的平均值, 评估指标 x_{ij} 与理想值 x_j^* 的接近度 D_{ij} 为

$$D_{ij} = \frac{x_j^* - x_{ij}}{x_j^*} = \frac{\sum_{i=1}^N x_{ij}}{N} \quad (14)$$

由此得到评估方法 j 对节点的相对重要性可由式(15)所示的条件熵 S_j 表示。

$$S_j = -\sum_{i=1}^N \frac{d_{ij}}{d_j} \ln \frac{d_{ij}}{d_j} \quad (15)$$

式中: $d_{ij} = \frac{D_{ij}}{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^N D_{ij}}$; $d_j = \sum_{i=1}^N d_{ij}$; m 为评估方法数。

进一步得到评估方法 j 的重要性熵值, 记为

$$s_j = -\frac{1}{\ln N} \sum_{i=1}^N \frac{d_{ij}}{d_j} \ln \frac{d_{ij}}{d_j} \quad (16)$$

由 s_j 可确定评估方法 j 的权值 $\omega_j (j=1,2)$ 为

$$\omega_j = \frac{1}{m - S_s} [1 - s_j] \quad (17)$$

式中, $S_s = \sum s_j$ 。最终的综合指标如式(18)所示。

$$W_i = \omega_1 W_{s_i} + \omega_2 W_{d_i} \quad (18)$$

式中: W_{s_i} 和 W_{d_i} 分别为节点 i 归一化之后的静态脆弱性指标和动态脆弱性指标; ω_1 为静态脆弱性指标的权重系数; ω_2 为动态脆弱性指标的权重系数; W_i 为节点脆弱性综合评估指标。电网中某节点的综合评估指标值越大, 说明该节点越脆弱, 其承受扰动后能维持正常运行的能力越弱。

4 算例仿真

本文利用 IEEE-39 算例节点系统进行仿真, 采用 Matlab 及其 PSAT 工具箱从有无新能源电源的节点静态关键节点辨识仿真, 有无新能源电源的节点动态脆弱节点辨识仿真, 并将本文提出的综合评估结果与已有方法进行对比, 从而对本文所提方法在脆弱节点辨识中应用的有效性进行了验证。

4.1 IEEE-39 节点系统

IEEE-39 节点系统含有 10 个 PV 节点和 28 个 PQ 节点, 31 号节点为平衡节点, 系统的拓扑图如图 1 所示。

4.2 计及新能源不确定性的节点静态脆弱节点辨识仿真

在仿真过程中, 新能源以风电为例, 设 32 号节点电源中含有风力发电机, 考虑该节点的发电出力为区间数。对系统中各节点使用基于区间直流潮流最小切负荷计算, 由式(2)得到各节点的区间静态脆弱性指标, 最终切负荷结果如图 2 所示。对各节点区间静态脆弱性指标使用式(3)和式(4)所示的基于可能度的区间数排序方法进行排序, 其中排名前十的脆弱节点如表 1 所示。

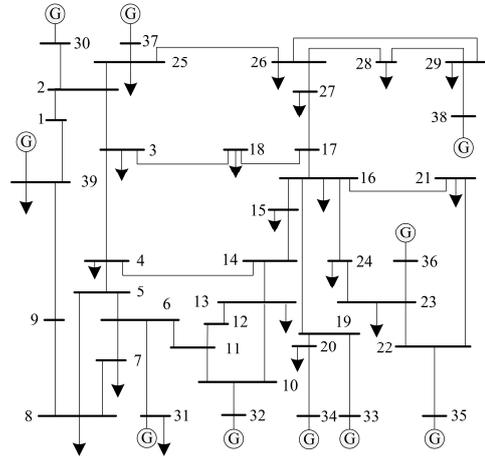


图 1 IEEE-39 节点系统拓扑图

Fig. 1 Topology of IEEE-39 bus system

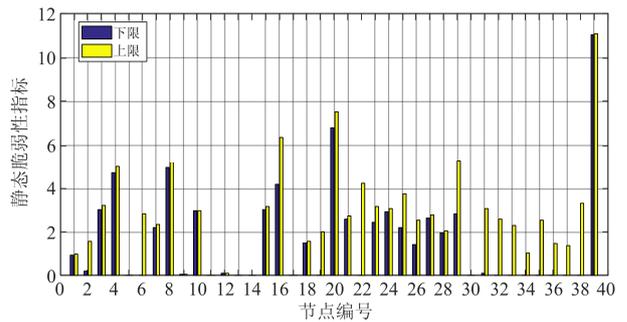


图 2 IEEE-39 节点系统区间静态脆弱性指标

Fig. 2 ISVI value of IEEE-39 bus system

表 1 IEEE-39 节点系统静态脆弱节点(前十)

Table 1 Top 10 vulnerability node in IEEE-39 bus system

排名	节点编号	区间静态性能指标	
		区间下限	区间上限
1	39	11.040 0	11.084 0
2	20	6.800 0	7.504 0
3	8	4.959	5.220 0
4	16	4.201 7	6.391 2
5	4	4.75	5
6	29	2.835	5.294 5
7	3	3.059	3.22
8	15	3.02	3.2
9	24	2.931 7	3.086
10	10	2.982 6	2.983

从图 2 和表 1 中可以看出, 排名前三的节点分别为 39、20 和 8 号节点, 这 3 个节点均在拓扑中间位置, 节点度数较高, 是重要的供电或传输节点, 如 39 号节点为重要的发电机节点, 这些节点故障将会对周边节点和系统造成很大的影响。可见本文提出的静态脆弱节点辨识方法不仅能较好地反映出电

网拓扑这一物理本质特性, 而且较好地体现了波动性新能源接入后电网的电气性能。为验证计及新能源不确定性的节点静态脆弱节点辨识模型的可行性, 将所得含有波动性新能源的结果与不考虑波动性能源的结果进行对比, 结果对比如表 2 所示。

表 2 有无不确定信息的结果对比

Table 2 Result comparison with or without uncertainty information

排名	节点编号	考虑波动性能源静态脆弱性指标		节点编号	不考虑波动性能源脆弱性指标
		下限	上限		
1	39	11.040 0	11.084 0	39	11.04
2	20	6.800 0	7.504 0	20	7.032
3	8	4.959	5.220 0	8	4.978
4	16	4.201 7	6.391 2	29	5.55
5	4	4.75	5	4	5
6	29	2.835	5.294 5	22	4.220 8
7	3	3.059	3.22	16	4.201 7
8	15	3.02	3.2	25	3.756 7
9	24	2.931 7	3.086	38	3.316 8
10	10	2.982 6	2.983	3	3.22

从表 2 结果对比来看, 波动性能源的区间静态脆弱性指标上限都大于或等于不考虑波动性能源的情况, 这表明新能源电源的接入增加了系统的负荷变化率, 加大了切负荷量, 这与实际情况相吻合, 说明本文提出的采用区间数表示不确定信息能够全面和真实地表示电力系统的实际运行情况, 其中 39, 20 和 8 号节点在两种情况下排名没有发生变化, 这 3 个节点在系统中脆弱性较高, 发生故障后易引发大规模事故发生。不确定性新能源的接入对节点脆弱性排名和指标值皆具有影响, 比较典型的有紧邻新能源电源节点的 10 号节点在有无不确定信息的情况下脆弱性排名发生了变化, 在接入波动性新能源后, 该节点脆弱性排名显著上升到前 10, 这说明新能源的波动性具有就近影响较大原则, 临近新能源影响的 16 号节点指标上升, 也符合这一点。因此新能源电源接入时应考虑不紧邻本身脆弱的节点, 否则因为其加剧临近节点的脆弱性, 造成大规模停电事故, 这将为新能源电源的规划提供参考。

4.3 计及波动性新能源电源的节点动态脆弱节点辨识仿真

使用 Matlab 及 PSAT 工具箱对 IEEE-39 节点系统进行时域仿真, 建立系统动态仿真模型。以风力发电为例, 在 32 号节点上接入双馈式变风速风力发电机, 在仿真时间内采用威布尔分布产生随机、波动性风电功率^[28]。对系统中各节点分别在 1 s 时发生三相短路故障, 持续时间为 200 ms, 在 1.2 s 时

切除故障, 记录在该运行方式下 10 s 内各发电机功角曲线。并运用式(5)—式(8)所示的计及新能源电源的动态脆弱节点辨识模型计算各节点的稳定性裕度 η , 并且根据稳定性裕度的正负使用式(9)和式(10)对应计算各节点的动态脆弱性指标 I_p 、 I_m , 结果如图 3 所示。使用式(12)的归一化方法对所得正负裕度指标进行处理, 并进行排序。为验证所得结果的合理性, 将接入风机系统的结果与无风机系统的结果进行了对比分析, 结果对比如表 3 所示。

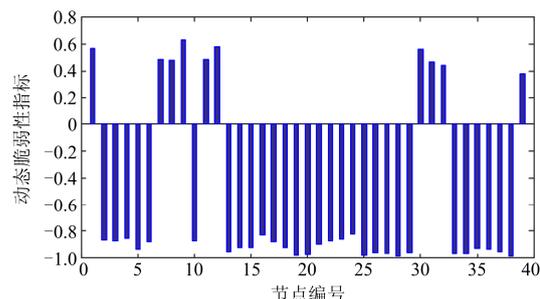


图 3 IEEE-39 节点系统动态脆弱性指标值

Fig. 3 Dynamic vulnerability index of IEEE-39 bus system

表 3 有无风机的动态脆弱节点排序结果对比分析表

Table 3 Results comparison of dynamic vulnerability node ranking with or without wind generator

排名	有风机系统		无风机系统	
	节点编号	动态性能指标	节点编号	动态性能指标
1	9	0.124 4	1	0.027 09
2	12	0.113 7	9	0.027 05
3	1	0.111 3	39	0.027 02
4	30	0.110 5	12	0.027 00
5	7	0.096 1	30	0.026 99
6	11	0.095 5	31	0.026 90
7	8	0.094 4	29	0.026 84
8	31	0.092 1	37	0.002 680
9	32	0.087 3	32	0.026 79
10	39	0.074 8	7	0.026 79

从图 3 和表 3 中可以看出, 考虑风电波动时动态脆弱节点排序结果中排名前三的节点为 9, 12 和 1 号节点, 均为系统中的重要连接节点, 若这些节点故障, 将会给系统带来很大的影响, 甚至造成连锁故障的发生。从接入风机情况下脆弱节点的拓扑位置和排名结果变化可知, 接入风机后, 11 和 12 节点排名由无风机时候的 10 名之后分别上升到第 6 和第 2, 动态脆弱性指标值显著提高, 其位置靠近风机所加的 32 号节点, 可见在动态脆弱性上, 风电的波动也对就近区域节点的影响较大, 符合风机所带来的随机性与波动性对系统的影响情况。

4.4 电网脆弱节点综合评估指标

将所得静态与动态脆弱性指标使用式(13)—式(18)确定综合指标,进行综合脆弱节点排序, ω_1 取值为0.45, ω_2 取值为0.55,结合静态和动态评估不同的侧重点,更加全面地反映节点的脆弱性,所得结果如表4所示。

表4 IEEE-39节点系统脆弱节点综合指标排名(前10)

Table 4 Top 10 vulnerability node of aggregative indices in IEEE-39 bus system

排名	节点编号	综合指标
1	39	0.144 505
2	8	0.097 648
3	20	0.090 738
4	16	0.077 302
5	31	0.075 792
6	7	0.070 637
7	29	0.069 179
8	32	0.068 847
9	1	0.065 078
10	4	0.064 27

为验证本文方法的适应性与正确性,在相同的算例系统仿真情况下,将本文所得结果与基于潮流熵^[11]以及基于灵敏度法^[29]所得结果对比如表5所示。

表5 脆弱节点排序结果对比

Table 5 Vulnerability node ranking result comparison

排名	排序依据		
	本文综合指标	潮流熵	灵敏度
1	39	8	7
2	8	7	8
3	20	5	5
4	16	6	6
5	31	13	12
6	7	11	4
7	29	13	11
8	32	9	13
9	12	12	15
10	4	10	16

根据对比结果可知,本文方法前10个脆弱节点中与已有方法结果具有相同的节点,如节点4、7、8和12,仅仅排名顺序不完全相同,可见物理拓扑本质对节点脆弱性具有深刻影响。从综合指标脆弱节点排序结果中可以看出,本文脆弱节点辨识方法不仅包含了网络拓扑中结构脆弱性的节点,如16和29号节点,处在系统拓扑图的中间位置,节点连接线路多,度数较高;而且包含系统中电气性能的脆弱节点,如39、32和31号节点为重要的电源节

点,故障会引发系统中电源功率不足,导致系统功率平衡问题。并且,本文方法考虑了新能源对脆弱性的影响,反映出新能源并网后不确定性带来的就近影响较大原则,如32号节点接入新能源电源之后,其就近的12号节点及后续影响的7、8号节点就变得非常脆弱,这些节点故障,将增强新能源波动对电网的影响,易引发大规模连锁故障。综合指标的脆弱节点排序结果说明本辨识方法不仅综合考虑了节点的拓扑结构、电气性能与动态特性,还能更加全面地对新能源并网后系统脆弱性做出评估。仿真结果所揭示的新能源不确定性就近影响原则为系统规划者对新能源接入点做出了合理建议,规划时应避开或远离系统的脆弱节点,否则会加剧系统的脆弱性,导致大停电事故的发生。

5 结论

针对新能源电源接入电网情况下电网脆弱节点辨识问题,本文从静态脆弱性与动态脆弱性两个角度出发,构建了计及新能源电源的电网节点动静态结合的脆弱节点辨识模型。对所得静态脆弱性指标和动态脆弱性指标进行综合处理,更加全面地反映了节点的脆弱性。应用本文所提方法,对IEEE-39节点算例系统进行仿真分析,发现该方法不仅能单独在静态和动态环境下快速、准确地定位系统中的脆弱源,而且通过与已有方法对比,说明了综合方法更加符合电网运行的实际情况,验证了该方法的合理性。通过该方法研究发现了新能源不确定性具有就近影响原则,对于新能源电源接入点的选取以及新能源接入情况下避免电网大停电事故具有一定的指导作用。

参考文献

- [1] 李春艳,陈洲,肖孟金,等. 西欧“11.4”大停电分析及对华中电网的启示[J]. 高电压技术, 2008, 34(1): 163-167.
- [2] LI Chunyan, CHEN Zhou, XIAO Mengjin, et al. Analysis of large scale blackout in Western Europe Power Grid on November 4 and relevant suggestion to Central China Power Grid[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(1): 163-167.
- [3] AME W. Power system operation corporation limited[R]. New Delhi: National Load Dispatch Centre, 2012.
- [4] 梁志峰,葛睿,董昱,等. 印度“7.30”、“7.31”大停电事故分析及对我国电网调度运行工作的启示[J]. 电网技术, 2013, 37(7): 1841-1848.
- [5] LIANG Zhifeng, GE Rui, DONG Yu, et al. Analysis of large-scale blackout occurred on July 30 and July 31,

- 2012 in India and its lessons to china's power grid dispatch and operation[J]. *Power System Technology*, 2013, 37(7): 1841-1848.
- [4] SUN Q, SHI L, NI Y, et al. An enhanced cascading failure model integrating data mining technique[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2017, 2(2): 19-28. DOI: 10.1186/s41601-017-0035-3.
- [5] 张晶晶, 王政余, 丁明, 等. 并联储能型 FACTS 元件对连锁故障的影响[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(11): 90-96.
ZHANG Jingjing, WANG Zhengyu, DING Ming, et al. Influences of FACTS element with energy storage on cascading failures[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(11): 90-96.
- [6] 刘小丽, 毛弋, 梁杉, 等. 基于综合介数的电网脆弱线路辨识[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(2): 116-121.
LIU Xiaoli, MAO Yi, LIANG Shan, et al. Identification of vulnerable lines in power grid based on comprehensive betweenness index[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(2): 116-121.
- [7] 曹一家, 陈晓刚, 孙可. 基于复杂网络理论的大型电力系统脆弱线路辨识[J]. *电力自动化设备*, 2006, 26(12): 1-5, 31.
CAO Yijia, CHEN Xiaogang, SUN Ke. Identification of vulnerable lines in power grid based on complex network theory[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2006, 26(12): 1-5, 31.
- [8] SALMERON J, WOOD K, BALDICK R. Analysis of electric grid security under terrorist threat[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2004, 19(2): 905-912.
- [9] 谭玉东, 李欣然, 蔡晔, 等. 基于电气距离的复杂电网关键节点识别[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(1): 146-152.
TAN Yudong, LI Xinran, CAI Ye, et al. Critical node identification for complex power grid based on electrical distance[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(1): 146-152.
- [10] 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.
- [11] 李勇, 刘俊勇, 刘晓宇, 等. 基于潮流熵的电网连锁故障传播元件的脆弱性评估[J]. *电力系统自动化*, 2012, 36(19): 11-16.
LI Yong, LIU Junyong, LIU Xiaoyu, et al. Vulnerability assessment in power grid cascading failures based on entropy of power flow[J]. *Automation of Electric Power System*, 2012, 36(19): 11-16.
- [12] WANG A, LUO Y, TU G, et al. Vulnerability assessment scheme for power system transmission networks based on the fault chain theory[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2011, 26(1): 442-450.
- [13] 黄振琳, 管霖, 何楚瑶, 等. 南方电网直流暂态稳定控制策略的设计与实现[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(22): 6131-6139.
HUANG Zhenlin, GUAN Lin, HE Chuyao, et al. Designing and realization of the HVDC transient stability control strategy in GSPG[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(22): 6131-6139.
- [14] CHEN X, MUGA J G. Transient energy excitation in shortcuts to adiabaticity for the time-dependent harmonic oscillator[J]. *Physical Review A*, 2010, 82(5): 053403.
- [15] BHUI P, SENROY N. Real-time prediction and control of transient stability using transient energy function[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2017, 32(2): 923-934.
- [16] DA SILVA A M L, JARDIM J L, DE LIMA L R, et al. A method for ranking critical nodes in power networks including load uncertainties[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2016, 31(2): 1341-1349.
- [17] PAVELLA M, ERNST D, RUIZ-VEGA D. *Transient stability of power systems: a unified approach to assessment and control*[M]. Springer Science & Business Media, 2012.
- [18] 陈柔伊, 张尧, 钟庆, 等. 多区域单机等效法分析和控制故障后区间振荡[J]. *中国电机工程学报*, 2009, 39(16): 21-27.
CHEN Rouyi, ZHANG Yao, ZHONG Qing, et al. Analysis and control of post-fault inter-area oscillations by multi-area single machine equivalent method[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2009, 39(16): 21-27.
- [19] 夏新华, 高宗和, 李恒强, 等. 考虑时空互补特性的风光水火多能源基地联合优化调度[J]. *电力工程技术*, 2017, 36(5): 59-65.
XIA Xinhua, GAO Zonghe, LI Hengqiang, et al. Combined optimization dispatching of multi-source hybrid power bases considering the time-space complementary characteristics[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2017, 36(5): 59-65.

- [20] 华君叶, 廖以燕, 李贵, 等. 风光互补发电系统性能实验研究[J]. 热力发电, 2018, 47(2): 25-30.
HUA Junye, LIAO Yiyan, LI Gui, et al. Experimental study and optimal design on operational performance of solar wind complementary system[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(2): 25-30.
- [21] 刘焕磊, 陈冬, 杨天锋, 等. 太阳能燃气轮机发电技术综述[J]. 热力发电, 2018, 47(2): 6-15.
LIU Huanlei, CHEN Dong, YANG Tianfeng, et al. Solar gas turbine power generation technology: a review[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(2): 6-15.
- [22] 张惠生, 赵兴勇, 王凯武, 等. 基于风光互补微电网的复合储能控制策略[J]. 广东电力, 2017, 30(2): 48-53, 96.
ZHANG Huisheng, ZHAO Xingyong, WANG Kaiwu, et al. Control strategy for hybrid energy storage based on wind/photovoltaic complementary micro-grid system[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(2): 48-53, 96.
- [23] 董朕, 殷豪, 孟安波. 基于混合算法优化神经网络的风电预测模型[J]. 广东电力, 2017, 30(2): 29-33.
DONG Zhen, YIN Hao, MENG Anbo. Wind power forecasting model based on optimized neural network of hybrid algorithm[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(2): 29-33.
- [24] 李新兰, 姜潮, 韩旭. 基于区间的不确定多目标优化方法及应用[J]. 中国机械工程, 2011, 22(9): 1100-1106.
LI Xinlan, JIANG Chao, HAN Xu. An uncertainty multi-objective optimization based on interval analysis and its application[J]. China Mechanical Engineering, 2011, 22(9): 1100-1106.
- [25] 王宏, 林振智, 文福拴, 等. 基于区间数的黑启动决策方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(11): 26-32.
WANG Hong, LIN Zhenzhi, WEN Fushuan, et al. A black-start decision-making method based on interval values[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(11): 26-32.
- [26] 徐泽水, 达庆利. 区间数排序的可能度法及其应用[J]. 系统工程学报, 2003, 18(1): 67-70.
XU Zeshui, DA Qingli. Possibility degree method for ranking interval numbers and its application[J]. Journal of Systems Engineering, 2003, 18(1): 67-70.
- [27] 马纪, 刘希喆. 基于序关系-熵权法的低压配网台区健康状态评估[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(6): 87-93.
MA Ji, LIU Xizhe. Evaluation of health status of low-voltage distribution network based on order relation-entropy weight method[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(6): 87-93.
- [28] 王松岩, 于继来, 李海峰, 等. 考虑统计和互相关特性的多风电场风速数据模拟生成方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(6): 18-23, 83.
WANG Songyan, YU Jilai, LI Haifeng, et al. A wind speed modeling method for multiple wind farms considering correlation and statistical characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(6): 18-23, 83.
- [29] 陈得治, 张伯明, 方兴. 节点注入功率模式对电压稳定裕度的影响[J]. 电网技术, 2009, 33(2): 62-67, 72.
CHEN Dezhi, ZHANG Boming, FANG Xing. Effect of nodal injection power mode on voltage stability margin[J]. Power System Technology, 2009, 33(2): 62-67, 72.

收稿日期: 2018-01-20; 修回日期: 2018-03-21

作者简介:

李利娟(1980—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为智能电网; E-mail: lilijuan204@126.com

吴军(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为智能电网; E-mail: wu456985236@163.com

刘红良(1979—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为数学模型及计算方法在智能电网中的应用研究。

(编辑 周金梅)