

DOI: 10.7667/PSPC171758

基于 AHP-灰色关联度的复杂电网节点综合脆弱性评估

周依希¹, 李晓明¹, 瞿合祚¹, 刘恒², 史文超¹

(1. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 湖北省电力公司孝感供电公司, 湖北 孝感 432000)

摘要: 针对现有脆弱节点辨识方法存在的评估指标片面、指标权重不够准确等问题, 从电网拓扑结构、系统当前运行状态及节点故障后果影响三方面出发, 构建了层次化的节点脆弱性指标体系。在传统结构脆弱性指标的基础上, 综合考虑事故后电压裕度、系统整体负载率、线路潮流冲击等因素, 并提出 AHP-灰色关联度的综合评估模型。该模型在决策过程中计及专家的经验知识, 将指标的价值系数体现在客观关联度中, 并引入动态分辨系数调整策略, 实现了专家经验主观性和节点数据客观性的良好结合。仿真结果表明, 该方法比传统方法能更有效地辨识出电网中的脆弱节点, 具有一定的实用价值。

关键词: 脆弱性指标体系; 加权潮流冲击熵; AHP-灰色关联度; 动态分辨系数调整

Node integrated vulnerability assessment of complex power grid based on AHP-gray relational degree method

ZHOU Yixi¹, LI Xiaoming¹, QU Hezuo¹, LIU Heng², SHI Wenchao¹

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Xiaogan Power Supply Company, Hubei Electric Power Corporation, Xiaogan 432000, China)

Abstract: Most of existing node vulnerability assessment methods fail to present a full view of evaluation and the index weights are inaccurate. To solve these problems, this paper starts analysis from the topology of the system, the current safe operation of the power system as well as the consequence of a node failure, and constructs a hierarchical node vulnerability assessment index system taking the structural vulnerability of power grid, voltage margin after accident, overall system load rate, and line flow impact into account. On this basis, a comprehensive evaluation model of AHP-gray relevance is proposed, integrating indicator value coefficients into objective grey-relevance. And a dynamic resolution coefficient adjustment strategy is used to achieve the combination of both subjective preference and objective data. The simulation results show that this method can identify the vulnerable nodes in the power grid more effectively than the traditional methods, which means the proposed model has certain practical value.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51277134).

Key words: vulnerability index system; weighted power shock entropy; AHP-gray relational degree; dynamic resolution coefficient adjustment

0 引言

电力系统节点是电网能量传输的出发点和重要汇聚点^[1], 大量事实证明某些脆弱节点的故障停运在电网事故传播中起着推波助澜的作用^[2-3]。对电网节点脆弱性的评估, 既有助于评估系统当前安全水平, 又能把握安全水平的变化趋势, 对预防连锁故障具有重要意义。

目前关键线路识别的研究比较丰富^[4-8], 而对节点脆弱性评估的研究相对较少。现有研究主要基于各类脆弱性指标, 并通过赋予其不同的权重得到节点的综合脆弱性水平。文献[9]综合考虑了电网的状态和结构特征, 在电气介数模型构造结构指标的基础上, 运用能量函数构造状态指标, 但两类指标仅单纯相乘, 未能充分反映综合指标的合理性和准确性。文献[10]从熵理论出发, 提出以奇异值熵和潮流分布熵表征负荷波动对节点电压幅值和线路负载率的影响, 从而辨识电力系统中的关键节点, 但忽

略了电网固有结构的脆弱性水平。文献[11]从复杂网络特征出发, 考虑了节点多种结构信息, 结合层次分析法与风险熵权法得到节点综合脆弱性评估模型。文献[12]综合考虑系统潮流分布、系统电压稳定性以及电网拓扑结构等因素, 利用犹豫模糊决策法综合评估系统的脆弱节点, 但并未考虑节点因故障退出运行后对系统造成的冲击, 且评估方式易受极端数据和专家主观偏差影响, 鲁棒性较差。

为解决上述问题, 本文综合考虑电网固有拓扑结构及当前运行状态特性, 并兼顾节点因故障退出运行后由于网络拓扑结构和电力潮流变化对系统造成的影响, 构建了一个较为全面的层次化指标体系。在此基础上建立基于 AHP-灰色关联度法的综合评价模型, 将专家、运行人员的经验知识量化赋权给各个指标后, 通过考察评估对象的客观数值分布特性, 对节点脆弱性进行主客观相结合的评估, 并引入动态分辨系数调整策略, 增加了评估模型的有效性和鲁棒性。通过 IEEE39 节点仿真, 验证了该方法除了能辨识电网在非故障状态下的脆弱节点集合外, 还能有效筛选出故障后会对电网造成严重冲击的脆弱部分。

1 脆弱性指标体系构建

本文将反映节点脆弱性的因素归纳为结构脆弱性指标和状态脆弱性指标两个宏观准则, 建立了包含节点度数、节点收缩凝聚度、节点电气介数、整体电压裕度、系统负载率、加权潮流冲击熵 6 个指标的节点脆弱性指标评估体系, 并按照层次分析法^[13]的递阶层次结构, 详细分析各准则因素间的相互关系, 找出主要准则以及隶属于主要准则的次准则, 然后根据这些关系将准则元素分成不同的层次和组。递阶层次结构模型如图 1 所示。

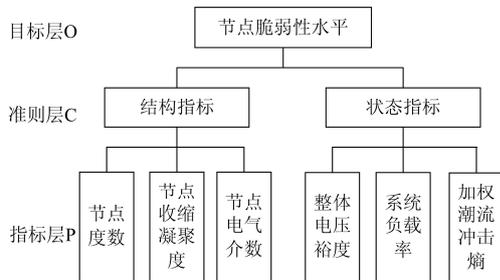


图 1 节点脆弱性水平评价指标体系

Fig. 1 Node vulnerability level evaluation index system

1.1 节点结构脆弱性指标构建

结构脆弱性指标主要考虑电力网络的拓扑结构, 基于复杂网络分析法筛选在电网中处于关键位

置的重要节点。

1.1.1 节点度数

节点度数 d 表征的是与该节点相连的支路数目, 衡量了该节点和相邻节点的直接通信能力, 即节点的度数越大, 该节点越重要^[14]。

1.1.2 网络凝聚度

考虑到在实际网络中某些关键节点并不一定具有较大的度数, 本文引入网络凝聚度 α ^[15]这一评判指标来进一步表征节点的重要程度。

$$\begin{cases} \alpha = \frac{1}{nl} \\ l = \sum_{i,j \in V} \frac{d_{\min,ij}}{n(n-1)/2} \end{cases} \quad (1)$$

式中: n 表示收缩后网络中节点的个数; l 表示节点间的平均最小路径; $d_{\min,ij}$ 为任意两个节点之间经过的最少支路数目。由式(1)可知, 节点收缩凝聚度不仅反映了节点的度数, 还表征了节点的位置信息, 能有效地反映节点的重要程度。

1.1.3 节点电气介数

节点电气介数^[16]将电网拓扑结构和电气参量有机结合, 弥补了传统介数忽略系统电气特性的缺陷, 更加符合电网实际运行状况, 定义为

$$\begin{cases} B_e(n) = \sum_{i \in G, j \in L} \sqrt{W_i W_j} B_{e,ij}(n) \\ B_{e,ij}(n) = \begin{cases} \frac{1}{2} \sum_m |I_{ij}(m, n)|, & n \neq i, j \\ 1, & n = i, j \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

式中: G 、 L 分别为发电机和负荷节点的集合; W 表示节点的权值, 其中 W_i 取发电机节点 i 的额定容量或实际出力, W_j 取负荷节点 j 的实际负荷或峰值负荷大小; $B_{e,ij}(n)$ 为单位电流元注入 (i, j) “发电机-负荷”节点对后节点 n 的电气介数; $I_{ij}(m, n)$ 为单位电流源注入线路 (m, n) 上产生的电流; m 为所有和 n 直接相连的节点。

1.2 节点状态脆弱性指标

节点状态脆弱性指标从电网的运行状态出发, 考察故障发生后电气量相对于正常值的偏离程度或相对于临界值的逼近程度, 表征了电网承受干扰或故障的能力。

1.2.1 整体电压裕度

整体电压裕度指标考察当节点 i 发生故障退出运行时, 电网中剩余节点的电压裕度之和。它从全局角度反映了事故发生后系统的整体运行状态和安全裕度。定义为

$$\rho(i) = \sum_{j=1}^N \frac{|U_j(i) - U_j^*(i)|}{U_j^*(i)} \quad (3)$$

式中： $U_j(i)$ 为节点当前稳定运行时的电压水平； $U_j^*(i)$ 为节点运行的临界电压值； N 为系统中剩余元件总数；节点的临界电压由连续潮流法求得。

1.2.2 系统平均负载率

线路负载率水平是促使电网进入自组织临界态和连锁故障传播的关键因素之一^[17-18]。本文引入系统平均负载率^[17]指标，以表征目标节点故障对电网输电线路整体传输压力和传送能力的影响。

设节点 i 因故障退出运行后，线路 j 的实际潮流为 $P_j^k(i)$ ，则此时系统平均负载率为

$$\beta(i) = \frac{\sum_{j=1}^M |P_j^k(i)|}{\sum_{j=1}^M |P_j^{\max}(i)|} \quad (4)$$

式中： $P_j^{\max}(i)$ 为线路最大传输容量； M 为电网中剩余输电线路的数量； $\beta(i)$ 越大，线路整体容量裕度越小，说明节点 i 故障对系统的影响越严重。

1.2.3 加权潮流冲击熵

平均负载率虽能有效地反映系统整体负荷水平，但无法反映节点退出运行后因潮流转移对线路的冲击及潮流的不均衡程度。本文提出改进潮流冲击熵指标，表征系统中线路潮流分布的混乱程度及能量冲击在系统中的分布规律，并通过负载率扩大倍数衡量出现过载线路时的系统运行安全水平。

设节点 i 因故障退出运行后，线路 j 承担的潮流转移量为

$$\Delta P_j(i) = P_j^k(i) - P_j^o(i) \quad (5)$$

式中： $P_j^o(i)$ 为线路初始潮流； $P_j^k(i)$ 为节点故障后线路 j 的当前潮流水平。

此时，系统受到的潮流转移冲击量为

$$\xi_j(i) = \frac{\Delta P_j(i)}{\sum_{j=1}^M \Delta P_j(i)} \quad (6)$$

考虑线路安全约束和出现过载线路时的系统运行安全水平，将节点 i 退出运行后线路 j 的负载率倒数设为权重，并引入负载率扩大倍数，定义加权潮流冲击熵为

$$\begin{cases} H(i) = -\sum_{j=1}^M \frac{1}{\alpha \sigma_j} \xi_j(i) \ln \xi_j(i) \\ \sigma_j = \frac{P_j^k(i)}{P_j^{\max}(i)} \end{cases} \quad (7)$$

式中： σ_j 表示线路 j 的负载率； α 为负载率扩大倍数，当 σ_j 越限时， $\alpha > 1$ ，否则 $\alpha = 1$ 。

节点断开后，改进潮流冲击熵越小，说明系统潮流分布越不均衡，对线路的冲击极大，此时部分线路负载率过高，甚至出现过载线路，严重影响系统安全运行水平，系统越容易进入自组织临界状态。

2 AHP-灰色关联度法综合评价模型建立

灰色关联度法从信息的非完备性出发，通过比较序列之间的数值分布特性，反映各评价对象与参考对象的接近程度，从而得出其优劣次序^[19]。但传统关联度计算公式存在以下几个不足：一是对各指标采用平权处理，无法反映各指标的重要性差异；二是若关联系数间差距过大，容易造成局部关联倾向，使分析结果出现偏差；三是固定分辨系数可能会弱化关联系数间的差异性，导致结果趋于平均化，且人为取值随机性较强，使最终评估结果的有效性降低。因此，本文提出 AHP-灰色关联度法综合评价模型，将专家知识和长期运行经验进行量化后赋权给各个指标，给客观评价提供了主观经验的参考，并采用动态分辨系数^[20]调整策略，弥补了传统灰色关联度的不足。步骤如下。

2.1 指标数据处理

设待评价集合为 $\mathbf{X}=(X_1, X_2, \dots, X_n)$ ，指标层集合为 $\mathbf{P}=(P_1, P_2, \dots, P_m)$ ，对待评价对象中各个指标进行评估，得到原始评价矩阵 $\mathbf{X}=(x_{ij})_{n \times m}$ 。由于各指标的量纲、数量级存在差异，需要对其进行归一化处理，将其线性映射到 $[0,1]$ 的区间内，如式(8)所示。

$$\begin{cases} y_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{\min j}}{x_{\max j} - x_{\min j}} & \text{正向型指标} \\ y_{ij} = \frac{x_{\max j} - x_{ij}}{x_{\max j} - x_{\min j}} & \text{逆向型指标} \end{cases} \quad (8)$$

最终得到标准化矩阵为

$$\mathbf{Y}=(y_{ij})_{n \times m}$$

2.2 AHP 法确定专家权重

1) 构造判断矩阵

本文采用九标度法对各层指标进行两两比较，得到判断矩阵 $\mathbf{A}=(a_{ij})_{m \times m}$ ，其中 a_{ij} 表示下层指标 P_i 和 P_j 相对上层准则的重要性量化值，判断尺度量化规则如表1所示。

2) 单层排序

求解判断矩阵 \mathbf{A} 的最大特征值 λ_{\max} 及其对应特征向量 $\boldsymbol{\omega}$ ，并根据 $CI = (\lambda_{\max} - m) / (m - 1)$ 、 $CR = CI / RI$ 对判断矩阵进行一致性检验，其中 RI 为平均随机一致性指标^[13]。若 $CR < 0.1$ ，即认为该判断矩

阵有满意的一致性。则 ω 为该层指标相对于上一层准则的权重向量。

表 1 判断尺度量化规则

标度	含义
1	P_i 与 P_j 相比, 重要度相同
3	P_i 与 P_j 相比, 稍微重要
5	P_i 与 P_j 相比, 较为重要
7	P_i 与 P_j 相比, 明显重要
9	P_i 与 P_j 相比, 绝对重要
2, 4, 6, 8	表示上述判断的中间值
1/2, ..., 1/9	若 P_i 与 P_j 的重要性之比为 a_{ij} , 则 P_j 与 P_i 的重要性之比为 $a_{ji}=1/a_{ij}$

3) 层次总排序

综合各层次指标相对于上一层指标的权重值, 得到指标层 P 中第 j 个指标 P_j 相对于目标层的总排序权重 ω_j 。最终得到的加权归一化评价矩阵为 $Z=(\omega_j v_{ij})_{n \times m}$ 。

2.3 确定关联系数

选择加权归一化后评价矩阵中各个指标的极大值作为参考向量 Z_0 。则第 i 个评价对象的第 j 个指标和参考序列 Z_0 的第 j 个指标之间的关联系数如式(9)所示。

$$\zeta_{ij} = \frac{\min_{i=1, \dots, n} \left\{ \min_{j=1, \dots, m} (|z_{ij} - z_{0j}|) \right\} + \eta \cdot \max_{i=1, \dots, n} \left\{ \max_{j=1, \dots, m} (|z_{ij} - z_{0j}|) \right\}}{|z_{ij} - z_{0j}| + \eta \cdot \min_{i=1, \dots, n} \left\{ \min_{j=1, \dots, m} (|z_{ij} - z_{0j}|) \right\}} \quad (9)$$

式中, $\eta(0 \leq \eta \leq 1)$ 为分辨系数。在实际应用中, 通常人为规定 $\eta=0.5$ 。

2.4 动态分辨系数调整

由式(9)可知, 分辨系数 η 的取值直接影响关联系数的大小, 它决定了各评估对象关联度的分布区间及评价模型对数据差异的灵敏度。而人为设置恒定分辨系数可能会导致结果趋于平均化, 降低最终评价结果说服力。为克服上述不足, 本文提出一种针对分辨系数的动态调整策略, 从而使模型评估结果更加客观有效。定义分辨系数分界判断因子 σ_j 为

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_j &= \Delta_j^{\text{var}} / \max_{i=1, \dots, n} \left\{ \max_{j=1, \dots, m} (|z_{ij} - z_{0j}|) \right\} \\ \Delta_j^{\text{var}} &= \left(\sum_{i=1}^n |z_{ij} - z_{0j}| \right) / m \end{aligned} \right. \quad (10)$$

式中, Δ_j^{var} 为待评价对象中指标 P_j 的平均差异化距离。

以 0.5 为分界值, 当 $\sigma_j=0$ 时, 取 η 在 $[0,1]$ 间任

意值; 当 $0 < \sigma_j < 0.5$ 时, 说明最大差异化距离较大, 指标可能因受干扰而存在异常值, 为抑制该值对关联系数结果的支配作用, 取 $\eta=4\sigma_j^2$; 当 $\sigma_j > 0.5$ 时, 说明计算数据较为平稳, 为充分突出关联度中所蕴含整体数据信息的差异性, 取 η 在 $[0.8,1]$ 之间。

2.5 计算关联度

根据评价对象和参考序列各对应指标之间的关联系数, 计算得第 i 个评价对象与参考序列的整体灰关联度 ψ_i 为

$$\psi_i = \sum_{j=1}^m \xi_{ij}, \quad i=1, 2, \dots, n \quad (11)$$

ψ_i 越大, 表示待评对象越贴近参考序列。因此, 可根据关联度大小对待评价对象进行优劣排序。整体算法流程如图 2。

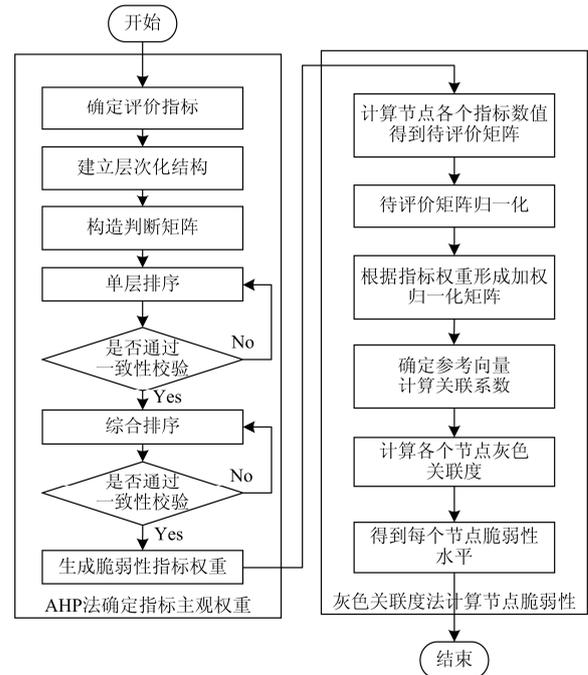


图 2 AHP-灰色关联度法评价模型算法流程

Fig. 2 AHP-gray correlation degree evaluation model algorithm flow

3 算例分析

本文采用 IEEE39 节点系统进行算例验证, 如图 3 所示。

3.1 确定指标权重

运用 AHP 法构建判断矩阵时, 本文主要考虑以下方面。1) 节点的结构脆弱性是电网本身的固有属性, 一旦网络结构确定, 外界环境的改变都难以从根本上改变这一特性; 而状态脆弱性则反映了电网的实际运行状态, 是电网区别于其他网络的主要方

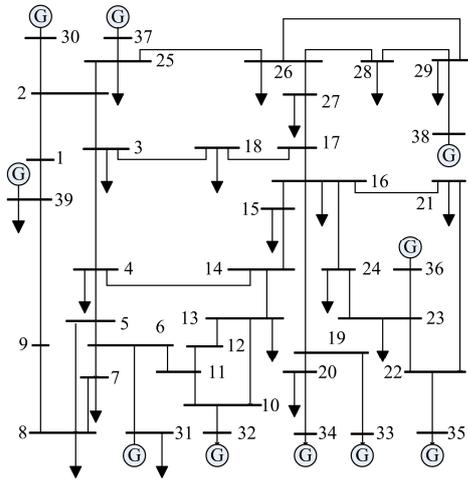


图3 IEEE39节点系统接线图
Fig. 3 System wiring of the IEEE39 system

面，两者相辅相成，缺一不可，因此认为结构脆弱性指标和状态脆弱性指标具有同等重要性。2) 在结构脆弱性指标中，节点度数所表征的网络特征最少，因此指标的重要度最小；而节点收缩凝聚度是对节点度数和节点位置信息的综合表征，故其重要度稍高；节点电气介数是结构脆弱性的拓展，不单单考虑电网的拓扑结构，还引入了潮流和发电机负荷容量，更加真实地反映潮流对节点的占用情况，因此它在三个指标中最为重要。3) 在状态脆弱性指标中，加权潮流冲击熵可以定量描述系统线路潮流分布的不均衡性，表征能量冲击在系统中的分布规律及出现过载线路时的危险性。文献[17]指出，即使在系统平均负载率较低时，若线路潮流分布高度不均衡，也会使电网进入自组织临界态，发生连锁故障反应，故其比系统平均负载率更能表征节点的状态脆弱性；电压裕度和负荷水平呈负相关，系统平均负载率越高，电压裕度越小，故整体电压裕度指标和系统平均负载率重要度相同。由上述分析可得各指标判断矩阵如表2。

表2 基于九标度法的判断矩阵

Table 2 Judgment matrix based on nine scale method

结构脆弱性指标	d	α	B_e
d	1	1/3	1/6
α	3	1	1/3
B_e	6	3	1
一致性检验	0.0158 < 0.1		
状态脆弱性指标	$\rho(i)$	$\beta(i)$	$H(i)$
$\rho(i)$	1	1	1/4
$\beta(i)$	1	1	1/4
$H(i)$	4	4	1
一致性检验	0 < 0.1		

根据专家决策的判断矩阵，经过一致性检验，得到底层的各个脆弱性指标对于节点脆弱性的重要程度权重如表3所示。

表3 节点脆弱性主观指标权重
Table 3 Node vulnerability index weight

指标	d	α	B_e	$\rho(i)$	$\beta(i)$	$H(i)$
权重	0.052	0.124	0.327	0.083	0.083	0.331

由表3可知，层次分析法两两指标间重要性的主观评价量化为各指标对脆弱性水平的贡献度，为后续计算灰色关联度提供了一个融合客观和主观信息的接口。

3.2 节点脆弱性分析

分别运用层次分析法、本文所提出的 AHP-灰色关联度法计算各节点的综合脆弱性水平，结果如图4所示。

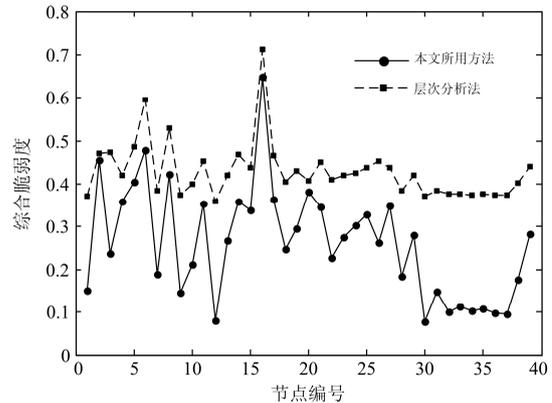


图4 节点综合脆弱性评价结果
Fig. 4 Node comprehensive vulnerability evaluation results

由图4可知，网络中重要位置节点的关联度明显大于其他节点，且每个节点间关联度的区分度较高，这说明 AHP-灰色关联度法能够有效识别关键节点，为运行工作人员定位和维护网络中脆弱节点提供了有效判据。

层次分析法和改进的灰色关联度法的结果有较大的相似性。但是，层次分析法的综合脆弱值相较于本文方法整体偏大，且个别排名相近的节点之间脆弱值十分接近，无法准确判断两个节点之间的差异，这是由于层次分析法主要依靠于专家的经验进行评判，无法十分细致地量化每一个指标之间的差异和关联，因此对节点的排序也较为粗略。而基于改进的灰色关联度法则综合考虑了主观权重和客观权重，将专家的主观意见量化为权重后，结合完全使用客观信息的灰色关联度方法，实现了节点数据信息与专家主观偏好的良好结合。

为进一步验证本文所提方法的有效性，按照本

文的 AHP-灰色关联度法计算系统中节点的脆弱度, 并和单一指标法、犹豫模糊决策法(方法二)^[12]对比, 由此得出不同评估方法下节点脆弱性水平的排序, 得到的结果如表 4。

表 4 不同评估方式节点脆弱性排序

Table 4 Vulnerability ranking based on different methods

序号	单一指标法					方法二	本文方法		脆弱度
	d	α	B_e	$\rho(i)$	$\beta(i)$	$H(i)$	节点	节点	
1	16	16	16	30	6	8	5	16	0.648 2
2	2	4	17	32	38	7	6	6	0.478 9
3	6	14	3	20	2	5	11	2	0.457 1
4	26	3	2	39	22	6	7	8	0.422 5
5	3	17	26	37	21	13	8	5	0.405 7
6	4	2	4	36	29	11	10	3	0.381 7
7	5	8	15	35	31	14	13	17	0.364 9
8	8	5	25	33	37	27	14	4	0.358 9
9	10	6	14	34	33	12	4	14	0.358 7
10	11	15	27	38	34	4	9	11	0.355 1

从表 4 可以看出, 单一指标法所筛选出的脆弱节点不尽相同, 尤其是结构脆弱性指标和状态脆弱性指标之间结果差异较大: 结构脆弱性指标主要辨识出了处于电网核心位置的联络节点, 一旦这些节点发生故障, 会使整个电网结构发生较大的变化, 连通性水平急剧下降; 而状态脆弱性指标则考虑到节点因故障退出运行后系统潮流和安全水平的变化, 能有效筛选出较为脆弱却处于电网边缘位置的发电机节点。这是由于不同指标所表征的是节点脆弱性的某一特定方面, 进一步说明了同时考虑节点结构脆弱性指标和状态脆弱性指标的必要性。

此外, 运用本文所提方法得到的评估结果与文献[12]的评估结果有良好的一致性, 即两种方法所辨识出的排名前十的关键节点中有 6 个重合, 如节点 5、6, 这些节点都处于电网中的核心位置, 连接着重要的输电通道, 一旦发生故障而退出运行, 会使系统受到较大的冲击, 甚至会使电网进入自组织临界状态, 引发灾变。这证明采用本文所提 AHP-灰色关联度方法得到的辨识结果是有效可信的。

除了一致性外, 两种方法的评价结果也表现出差异性。如节点 3、16 在方法二中并没有筛选出来, 但其在结构脆弱性指标评估中排名十分靠前。如节点 16 是发电机节点 33、34、35 及 36 的重要功率外送节点, 一旦其退出运行, 系统潮流分布会产生较大改变, 造成相邻节点的功率不平衡, 引发功角失稳等问题, 最终电网会解列成 3 个孤岛。这是由于两种方法选取的指标所考虑的侧重点及指标赋权方式不同所导致, 而方法二所建立的评估模型弱化了

电网本身结构脆弱性水平, 因此无法有效识别节点 3 与节点 16。可见本文所选指标具有互补性, 在考虑结构脆弱性的同时也兼顾网络的运行状态, 摆脱了在节点脆弱性评估中出现信息片面性的问题。

为进一步验证 AHP-灰色关联度综合评价模型的优越性, 分别根据节点电气介数指标、加权潮流冲击熵指标、犹豫模糊决策法以及本文提出的 AHP-灰色关联度法对脆弱性程度最高的 6 个节点进行连续攻击, 使节点依次连续退出运行, 计算电网的输电能力^[4]并和随机节点攻击方式进行比较。得到的结果如图 5 所示。

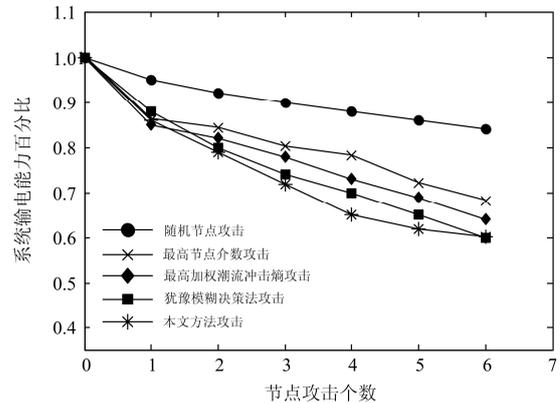


图 5 不同攻击模式下系统输电能力变化

Fig. 5 System transmission capacity under different attack modes

从图 5 中可以看出, 随着切节点数目的增多, 电网的输电能力不断减弱; 其中随机节点攻击方式下电网输电能力下降最为平缓, 这说明电网对关键节点的依赖性远远大于普通节点; 最高节点电气介数攻击方式与最高加权潮流冲击熵攻击方式两者相比, 后者电网输电能力下降更为显著, 这进一步验证了前文由 AHP 法得到的指标权重中加权潮流冲击熵指标权重大于节点电气介数指标权重的正确性; 后四种攻击模式下电网输电能力变化趋势一致, 但根据本文所构建的 AHP-灰色关联度法进行攻击, 对电网的破坏能力最强, 输电能力下降得最明显, 这说明采用本文提出的 AHP-灰色关联度法辨别脆弱性节点是有效可信的。

4 结论

本文提出了基于 AHP-灰色关联度法的节点综合脆弱性评估方法, 为专家和运行人员全面、准确辨识脆弱节点提供了新的思路。

1) 兼顾网络结构特性和运行特性, 并考察节点故障后对电网所产生的影响, 构建了较为全面的节

点脆弱性评价指标体系, 弥补了从单一角度对脆弱性进行评估的不足。仿真表明, 通过该指标体系不但能定位到网络中具有重要位置且能找到遭受大扰动后会对电网产生较大冲击的节点。

2) 相较于其他评估方法, 通过采用分辨系数动态调整的 AHP-灰色关联度法既能反映客观数据所蕴含的有效信息, 又能根据实际运行经验反映出各个指标之间的贡献度差异性, 且受异常数据的影响较小, 有较强的鲁棒性。

3) 该综合评价模型能将不同性质的参数有机统一在同一结构框架里, 具有一定的开放性, 可以拓展到支路脆弱性的评估。

参考文献

- [1] 程林, 刘满君, 易俊, 等. 基于运行可靠性模型的连锁故障模拟及薄弱环节分析[J]. 电网技术, 2016, 40(5): 1488-1494.
CHENG Lin, LIU Manjun, YI Jun, et al. The power system cascading outage simulation and vulnerability analysis based on operational reliability[J]. Power System Technology, 2016, 40(5): 1488-1494.
- [2] 汤涌, 卜广全, 易俊. 印度“7.30”、“7.31”大停电事故分析及启示[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 167-174.
TANG Yong, BU Guangquan, YI Jun. Analysis and lessons of the blackout in Indian Power Grid on July 30 and 31, 2012[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 167-174.
- [3] 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. Research on state vulnerability assessment method of grid with large scale energy sources based on short-circuit capability[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(13): 40-47.
- [4] 徐林, 王秀丽, 王锡凡. 电气介数及其在电力系统关键线路识别中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(1): 33-39.
XU Lin, WANG Xiuli, WANG Xifan. Electric betweenness and its application in vulnerable line identification in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(1): 33-39.
- [5] 曹煜, 郭创新, 章禹, 等. 计及无功潮流影响的传输介数概念及其电网关键线路辨识研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(23): 9-16.
CAO Yu, GUO Chuangxin, ZHANG Yu, et al. Study of the concept of transmission betweenness considering the effect of reactive power flow and its application in identification of critical lines in power grid[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(23): 9-16.
- [6] 张弘历, 李华强, 杨植雅, 等. 基于潮流增长率泰尔熵的脆弱支路辨识[J]. 电网技术, 2017, 41(7): 2340-2346.
ZHANG Hongli, LI Huaqiang, YANG Zhiya, et al. Identification of vulnerable line based on the theil entropy of flow growth rate[J]. Power System Technology, 2017, 41(7): 2340-2346.
- [7] BAI H, MIAO S. Hybrid flow betweenness approach for identification of vulnerable line in power system[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2015, 9(12): 1324-1331.
- [8] 陈卉灿, 栗然, 吕子遇, 等. 考虑多因素的电网关键线路主客观综合辨识模型[J]. 广东电力, 2016, 29(11): 100-104.
CHEN Huican, LI Ran, LÜ Ziyu, et al. Subjective and objective comprehensive identification model for power grid critical lines considering multiple factors[J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29(11): 100-104.
- [9] 徐行, 李华强, 赵祥云, 等. 基于运行状态和网络结构的节点综合脆弱性评估[J]. 电网技术, 2014, 38(3): 731-735.
XU Hang, LI Huaqiang, ZHAO Xiangyun, et al. Assessment on nodal comprehensive vulnerability based on operational state and network structure[J]. Power System Technology, 2014, 38(3): 731-735.
- [10] 王涛, 岳贤龙, 顾雪平, 等. 基于奇异值熵和潮流分布熵的电网关键节点辨识[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(4): 46-53.
WANG Tao, YUE Xianlong, GU Xueping, et al. Power grid critical node identification based on singular value entropy and power flow distribution entropy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(4): 46-53.
- [11] 丁明, 过羿, 张晶晶, 等. 基于效用风险熵模糊综合评判的复杂电网节点脆弱性评估[J]. 电工技术学报, 2015, 30(3): 214-223.
DING Ming, GUO Yi, ZHANG Jingjing, et al. Node vulnerability assessment for complex power grids based on effect risk entropy-weighted fuzzy comprehensive evaluation[J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2015, 30(3): 214-223.
- [12] 王涛, 岳贤龙, 顾雪平, 等. 基于犹豫模糊决策法的电网脆弱性综合评估[J]. 电网技术, 2017, 41(7): 2272-2281.
WANG Tao, YUE Xianlong, GU Xueping, et al. Comprehensive evaluation of power grid vulnerability based on hesitant fuzzy decision making method[J]. Power System Technology, 2017, 41(7): 2272-2281.

- [13] 李圆智, 刘青, 高博, 等. 智能电网交换机网络性能的 AHP 熵权评估方法[J]. 陕西电力, 2016, 44(12): 29-33.
LI Yuanzhi, LIU Qing, GAO Bo, et al. Probe into evaluation method of switch network performance in smart grid based on AHP-Entropy method[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(12): 29-33.
- [14] 顾雪平, 李少岩, 李凯. 用于网架重构决策的节点重要度动态评价方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(4): 89-95.
GU Xueping, LI Shaoyan, LI Kai. Dynamic assessment of nodal network importance for decision-making of reconfiguration[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(4): 89-95.
- [15] 王汪兵, 王先培, 尤泽樟, 等. 电力通信网关键节点辨识方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(1): 44-49.
WANG Wangbing, WANG Xianpei, YOU Zezhang, et al. Research on key node identification method in electric power communication network[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(1): 44-49.
- [16] 徐林, 王秀丽, 王锡凡. 基于电气介数的电网连锁故障传播机制与积极防御[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(13): 61-68.
XU Lin, WANG Xiuli, WANG Xifan. Cascading failure mechanism in power grid based on electric betweenness and active defence[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(13): 61-68.
- [17] 刘文颖, 但扬清, 朱艳伟, 等. 复杂电网自组织临界态辨识物理指标研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(8): 274-280.
LIU Wenyang, DAN Yangqing, ZHU Yanwei, et al. Research on physical indicators to identify power system self-organized critical state[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8): 274-280.
- [18] 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.
- [19] 周名煜, 谢宁, 王承民. 基于灵敏度和灰色关联度的配电网运行方式变权重评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(13): 130-137.
ZHOU Mingyu, XIE Ning, WANG Chengmin. Variable weight evaluation method of distribution network operation mode based on sensitivity and grey correlation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(13): 130-137.
- [20] 曾博, 白婧萌, 郭万祝, 等. 智能配电网需求响应效益综合评价[J]. 电网技术, 2017, 41(5): 1603-1611.
ZENG Bo, BAI Jingmeng, GUO Wanzhu, et al. Comprehensive evaluation for benefits of demand response in smart distribution networks[J]. Power System Technology, 2017, 41(5): 1603-1611.

收稿日期: 2017-12-04; 修回日期: 2018-05-24

作者简介:

周依希(1993—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统运行与控制; E-mail: 286846853@qq.com

李晓明(1955—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统运行与控制; E-mail: xml@whu.edu.cn

瞿合祚(1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统运行与控制。E-mail: quhezuo@163.com

(编辑 周金梅)