

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210390

基于复杂网络与运行因素的电网薄弱点辨识方法

谢李为¹, 李勇¹, 罗隆福¹, 曾祥君², 曹一家¹

(1. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 针对电网薄弱点辨识方法中存在未计及节点局部和整体特性、节点间功率传输的相互影响和对节点电压约束考虑不足的问题, 提出一种基于复杂网络与运行因素的薄弱点辨识方法。通过考虑电力系统的拓扑、线路参数、潮流特性和运行参数等因素, 建立了基于拉普拉斯矩阵谱半径的节点重要度指标、节点介数指标和电压越限指标。然后, 采用组合赋权法对复杂网络指标和运行指标进行权重分配, 得到辨识电网薄弱点的组合指标。最后, 利用IEEE30和IEEE118节点系统验证所提方法的可行性和合理性。结果表明该方法辨识结果比现有方法更准确、合理, 对电力系统的影响更大。

关键词: 薄弱点辨识; 复杂网络; 谱半径; 节点介数; 电压越限

A vulnerable points identification method based on complex network theory and an operation index

XIE Liwei¹, LI Yong¹, LUO Longfu¹, ZENG Xiangjun², CAO Yijia¹

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. College of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: There are shortcomings in the existing vulnerable points identification method for a power system, where the node characteristics, mutual influences of power transmission between nodes and the node voltage constraints are insufficiently considered. Thus a novel vulnerable point identification method based on a complex network combination and an operation index is proposed. First, from the analysis of power system topology, line parameters, power flow and operating parameters characters, a node degree index based on Laplacian spectral radius, node betweenness index and voltage over-limits index is established. Then, to obtain the combination index, which is applied to identify the vulnerable points for the power grid, the combination weighting method is used to assign complex network and operation indicator weightings. Finally, IEEE30 and IEEE118 bus systems are used to verify the proposed method's feasibility and rationality. The results show that compared with the reference method, the proposed method's identification results are more reasonable and have greater relevance for a power system.

This work is supported by the Key Intergovernmental Cooperation Project on International Science, Technology and Innovation of the National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFE0125300).

Key words: vulnerable points identification; complex network; spectral radius; node betweenness; voltage over-limits

0 引言

随着电力系统的不断发展, 电网结构越来越复杂, 电网故障对人民生活和社会造成的经济损失和影响也越来越大^[1-4]。当电网发生故障时, 越薄弱的部分对系统的影响越严重, 更容易导致整个系统失稳, 甚至崩溃^[5]。因此, 在系统正常运行时, 准确地辨识电网薄弱点具有重要的理论价值和实际

意义^[6-7]。

目前, 电网薄弱点的辨识方法主要可以分为基于复杂网络理论和基于电网运行特性两个方面^[8-11]。基于复杂网络理论的方法主要是通过分析电网拓扑结构和节点特性, 利用度、介数等指标反映系统网架特性, 实现电网薄弱点的辨识。文献[12-14]基于复杂网络理论, 考虑电网中线路的阻抗参数, 建立了电力系统的加权拓扑模型, 根据网络节点位置对系统拓扑的影响, 利用网络中节点介数大小来辨识系统薄弱点。但这些方法在辨识过程中假设节点间的功率按最短路径传输, 与系统潮流的传输特性不符。文献[15]和文献[16]通过改进电网的复杂网络模型, 分别提出了综合距离度、能力度等评估指标的

基金项目: 国家重点研发计划政府间国际科技创新合作重点项目(2018YFE0125300); 国家自然科学基金项目(52061130217); 湖湘高层次人才聚集工程项目(2019RS1016); 长沙市杰出创新青年计划(KQ2009037)

辨识方法和基于节点电气耦合连接度的辨识方法。文献[17-18]通过分析电网结构,定义了电网拓扑中的发电机-负荷节点对,并通过向节点对之间注入单位电流,提出了新的节点电气介数指标辨识系统薄弱点,但没有考虑节点不同方向的功率叠加后会有抵消的现象。

基于电网运行特性的辨识方法主要通过分析系统的潮流特性实现对电网薄弱点的辨识。文献[19]定义了电力系统的潮流熵,并建立了基于潮流熵的电网自组织临界状态模型。通过潮流熵分析电网功率分布不均衡性,从而辨识系统的薄弱点。文献[20-21]在文献[19]的基础上对潮流熵进行改进,通过分析系统的拓扑结构和潮流传输特性,结合潮流熵、改进潮流熵等建立了故障前后电网潮流分布特征指标,从系统潮流冲击性或风险性等方面实现电网薄弱点的辨识。文献[22]从节点电压的角度分析电网潮流,利用奇异值熵和潮流分布熵建立节点重要度综合评价指标,辨识电网的薄弱节点。但上述方法未能充分考虑系统节点的运行参数约束和不同节点之间的相互连接关系^[23],并且从电网拓扑结构和潮流特性角度建立的单一指标难以全面辨识整个系统的薄弱点。

因此,本文提出一种基于复杂网络与运行因素的电网薄弱点辨识方法。从电力系统的网络拓扑入手,通过分析电网结构特性、线路参数、功率传输和节点电压约束等特征,提出了一种基于拉普拉斯矩阵谱半径的节点度指标、基于功率传输分布的节点介数指标和节点电压越限指标,利用组合权重法对不同指标进行权重分配,形成电网薄弱点辨识指标。该指标考虑了系统中节点的局部特性和整体特性,更好地体现了不同节点间的相互影响,弥补了电气介数未能考虑功率传输路径和传输方向的不足。通过仿真验证可知,本文所提方法辨识的薄弱点比现有方法辨识的薄弱点对电力系统的网络效能影响更大,辨识结果更加合理和可靠。

1 复杂网络指标

1.1 电力网络的拉普拉斯矩阵

根据复杂网络理论可知,电网可以由一个带有权重的有向图 $G(V,E,w)$ 表示。假设电网 G 由 n 个节点和 m 条线路组成,其中 V 表示电网拓扑中节点的集合,即 $V(G)=[v_1,v_2,\dots,v_n]$, E 表示电网拓扑中边的集合,即 $E(G)=[e_1,e_2,\dots,e_m]$, w 表示电网中边的权重集合,即 $w(G)=[w_1,w_2,\dots,w_m]$ ^[24]。考虑到电力系统的功率传输特性,电网任意节点 i 的度可以根据其

功率的流入和流出方向分为入度和出度两个部分。当电网 G 的关联矩阵 M 中元素 $m_{ij}=w_{ij}>0$ 时,表示节点 i 和节点 j 相连,且功率由节点 i 流向节点 j ,若 $m_{ij}=-w_{ij}<0$,则表示两节点相连,且功率由节点 j 流向节点 i ,当两节点不相连时, $m_{ij}=0$ 。因此,电网 G 中顶点度对角矩阵为

$$D(G)=\text{diag}[D(1),D(2),\dots,D(i)]_{n \times n} \quad (1)$$

式中, $D(i)$ 可表示为

$$D(i)=\sum_{j=1}^n m_{ij}+\sum_{j=1}^n m_{ji} \quad (2)$$

根据拉普拉斯矩阵的定义可知,对于一个顶点度对角矩阵为 $D(G)$,邻接矩阵为 $A(G)$ 的网络 G ,它的拉普拉斯矩阵为 $L(G)=D(G)-A(G)$,所以电力网络 G 的拉普拉斯矩阵表示为

$$[L_{ij}]_{n \times n}=\begin{cases} D(i) & i=j \\ -w_{ij} & i \neq j \end{cases} \quad (3)$$

根据图谱理论可知,网络的邻接矩阵和拉普拉斯矩阵是反映网络基本结构性质的主要矩阵。这两个矩阵特征值的特性反映了网络拓扑结构的内在特性^[25]。相比于文献[26]中关联矩阵所表征的节点之间关系,拉普拉斯矩阵能更好地体现连接多条线路节点间的相互影响。为此,本文选取拉普拉斯矩阵的最大特征值即谱半径作为特征值指标。

1.2 节点度指标

事实上,电网各节点状态的变化不仅影响与其直接相连的节点,也会对没有直接相连的节点产生影响。如图1所示,黄色节点为发电机节点,蓝色节点为负荷节点,实线箭头代表节点间存在直接相连关系,虚线箭头代表节点间存在间接相连关系。

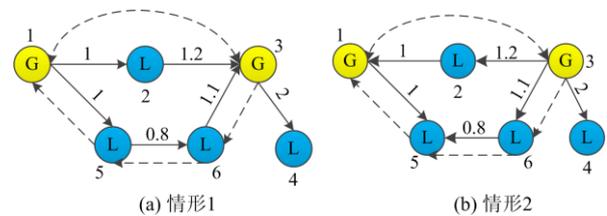


图1 电网节点连接关系

Fig. 1 Relationship between each node

系统运行时,节点间的潮流方向为实线箭头方向。当某一个发电机节点或负荷节点的状态发生变化时,通过网络中的潮流传输,其状态的变化将可能导致没有与之相连的负荷节点或其他发电机节点状态发生变化,导致系统中非直连的节点间也可能存在相互影响。因此,为了更好地揭示网络中节点间

的相互影响和薄弱性, 本文基于 $K-1$ 事件的网络脆弱性, 通过分析节点移除前后网络拉普拉斯矩阵谱半径的变化, 提出一种新的节点度表征方式如式(4)。

$$T(i) = \frac{|\max \lambda(L(n)) - \max \lambda(L(n-i))|}{\max \lambda(L(n))} \quad (4)$$

式中: n 为电力网络中的节点数; $\max \lambda(L(n))$ 表示网络变化前拉普拉斯矩阵的谱半径; $\max \lambda(L(n-i))$ 表示网络移除节点 i 后拉普拉斯矩阵的谱半径。

节点度指标 $T(i)$ 反映了节点间局部特性与整体特性的相互影响, 其值的大小体现了系统节点对系统薄弱性的影响程度。 T 值越大, 表明节点对系统影响越严重, 失效后的系统更薄弱。

1.3 节点介数指标

在复杂网络中, 传统的介数可以分为节点介数和边介数, 分别反映节点或边在整个网络中的连接作用和影响力。但电力系统中的节点间通过电流来获得联系, 且系统中的电流由发电机节点产生, 具有方向性和来源性。因此, 在电力系统网络 G 中, 定义节点介数为该节点被网络中所有发电机-负荷节点对之间最短路径通过的次数。在计算最短路径过程中, 考虑节点线路间的功率传输, 利用故障前后首节点有功功率到尾节点所经过距离的变化值, 建立系统中发电机-负荷节点间的功率转移指标^[27], 衡量功率在电力网络中的通畅性。同时, 在网络功率传输过程中, 线路的最大传输功率限制了节点间功率的传输容量。因此, 节点 i 的电气介数可表示为

$$B(i) = \sum_{g \in G} \sum_{d \in D} \min(P_g, P_d) \frac{E(i)}{\sum_{i=1}^N E(i)} \quad (5)$$

式中: G 表示系统中所有发电节点; D 表示系统中所有负荷节点; i 表示发电机-负荷节点间经过的节点; N 表示系统中的节点数量; $E(i)$ 表示所有经过节点 i 的功率转移指标之和, 其表达式为

$$E(i) = \sum_{g \in G} \sum_{d \in D} |P_i^g - P_i^d| w_{gd} \quad (6)$$

式中: w_{gd} 表示节点 g 和节点 d 之间的线路权重值; P_i^g 表示当发电节点功率注入单位功率后的发电节点功率; P_i^d 表示所对应的负荷节点功率。

2 节点电压越限指标

电力系统在实际运行中的状态时刻发生变化, 上述基于复杂网络理论的节点指标忽略了系统运行过程中可能出现的风险事件。风险理论通常用来表达电网运行时受到伤害的可能性和伤害程度, 电网

的电压越限风险体现了系统中各节点的电压约束。

传统的电压越限风险指标由电压越限的概率和严重程度指标组成^[28], 本文引入电压越限风险理论, 利用系统中各节点的电压越限风险指标对复杂网络理论中薄弱节点辨识进行补充。但传统风险指标中的重要度主要是反应该节点在风险事件中的危害, 难以体现其在整个系统中的重要程度。因此, 本文通过分析导致系统潮流不收敛时的各节点电压越限值, 根据各节点电压越限值的大小反映各节点电压变动对系统的影响程度, 建立新的电压越限重要度指标 $V(i)$ 为

$$V(i) = \frac{V_{\text{Low}}(i)}{\sum_{i=1}^n V_{\text{Low}}(i)} + \frac{V_{\text{Over}}(i)}{\sum_{i=1}^n V_{\text{Over}}(i)} \quad (7)$$

式中, $V_{\text{Low}}(i)$ 和 $V_{\text{Over}}(i)$ 表示节点 i 的电压越限指标, 其表达式分别为

$$\begin{cases} V_{\text{Low}}(i) = \max V(i) \\ V_{\text{Over}}(i) = 1/\min V(i) \\ \text{s.t. } f(i) = \text{not converge} \\ 0 < V_{\text{Low}}(i) \leq 0.95V_E(i) \\ V_{\text{Over}}(i) \geq 1.05V_E(i) \end{cases} \quad (8)$$

式中: $V_E(i)$ 表示系统中节点 i 的额定电压; $f(i)$ 表示节点 i 电压越限情况下的系统潮流方程。式(8)反映了导致系统潮流不收敛时的节点电压越限值。

事实上, 电网运行过程中存在多种类型的风险。在建立电力系统运行指标的过程中可以按照需求考虑不同的运行风险, 然后利用权重分配等方法建立考虑多种运行风险严重度的综合指标。

3 薄弱点辨识方法

3.1 薄弱点组合指标

本文为分析电力系统的薄弱节点, 从电力网络的局部特性、整体拓扑、功率传输和电压约束等方面建立了节点度指标、节点介数指标、节点电压越限指标。但不同指标间的量纲和数量级可能存在差别, 为此, 在进行指标融合前先对不同指标进行归一化处理^[29], 得到归一化矩阵 z_{ji} , 其中, j 表示指标种类, i 表示节点数量。然后利用组合赋权法对不同指标进行权重分配, 进行加权求和, 建立全面评估电力系统薄弱节点的综合指标 $Q(i)$ 为

$$Q(i) = W_T \tilde{T}(i) + W_B \tilde{B}(i) + W_V \tilde{V}(i) \quad (9)$$

式中: $\tilde{T}(i)$ 、 $\tilde{B}(i)$ 、 $\tilde{V}(i)$ 分别为节点 i 归一化后的节点度指标、节点介数指标和节点电压越限指标; W_T 、 W_B 、 W_V 分别为各对应指标的组合权重。

3.2 组合权重计算法

权重的确定方法主要有主观赋权法和客观赋权法两种,组合赋权法将主观权重和客观权重相结合,既能有效地反映参与者的主观意愿,又可避免主观因素过多的随意性,指标权重能够随着数据的变动而发生变化,赋权的结果更合理。本文利用文献[30]的层次分析法计算各指标的主观权重 $W_1=[W_{T1},W_{B1},W_{V1}]$,利用文献[31]的熵权法计算各指标的客观权重 $W_2=[W_{T2},W_{B2},W_{V2}]$,利用文献[29]中二次规划方法对各指标的主观权重和客观权重进行权重分配,得到各指标的组合权重值为

$$\begin{cases} W_T = \alpha_1 W_{T1} + \alpha_2 W_{T2} \\ W_B = \alpha_1 W_{B1} + \alpha_2 W_{B2} \\ W_V = \alpha_1 W_{V1} + \alpha_2 W_{V2} \end{cases} \quad (10)$$

式中, α_1 、 α_2 分别为主观权重和客观权重的分配因子。

本文以组合权重值与各单一权重间的差值最小为目标函数,建立组合权重的求解模型如式(11)。

$$\begin{aligned} \min & \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^q [(\alpha_1 W_{i1} - W_{i1}) z_{ji}]^2 + [(\alpha_2 W_{i2} - W_{i2}) z_{ji}]^2 \\ \text{s.t.} & \sum_{i=1}^q (\alpha_1 W_{i1} + \alpha_2 W_{i2}) = 1 \\ & \alpha_1 > 0, \alpha_2 > 0 \end{aligned} \quad (11)$$

式中: q 表示节点薄弱性指标种类数量; z_{ji} 表示归一化后各指标形成的矩阵。

3.3 薄弱点辨识流程

根据上述分析可知,电网薄弱点的辨识过程可分为以下4个步骤。

步骤1:分析电力系统的网络结构,建立带有权重的电网拓扑;

步骤2:分别建立系统的节点度指标、介数指标和电压越限指标;

步骤3:利用组合权重法对不同节点指标进行权重分配,建立电网薄弱点组合指标;

步骤4:计算电网中各节点的薄弱性指标,将各节点按薄弱性指标值进行降序排列。

节点的薄弱性指标越大,表明节点对系统的薄弱性影响越大。当该指标越大的节点发生故障退出时,使系统变得更加脆弱,更容易失去稳定甚至崩溃。因此,对于薄弱性指标较大的节点,需要系统运行人员重点监视。

4 薄弱点验证方法

为了进一步阐述节点薄弱性指标大小对电力

系统的影响程度,本文利用电网效能指标反映电力系统的运行性能,该指标通常用发电机-负荷间最短电气距离表示^[23],具体计算式为

$$P = \sum_{g \in G, d \in D} \frac{1}{d_{gd}} / n(n-1) \quad (12)$$

式中: n 表示电网节点的数量; d_{gd} 表示发电机-负荷节点间的最短电气距离; G 、 D 分别表示电网中所有的发电机节点和负荷节点。

系统节点发生故障退出运行时,电力系统的效能指标 P 将降低,说明电网的传输能力受到较严重的影响。退出运行节点对系统薄弱性影响越大,电网效能指标 P 的数值越小。

5 仿真验证

如图2所示,本文通过建立IEEE30节点仿真测试系统对所提方法进行验证。其中,在基于层次分析法的主观权重计算部分,利用九标度法构造层次分析法的判断矩阵,得到节点度、节点电气介数和节点电压越限指标的主观权重指标。在基于熵权法的客观权重计算部分,考虑到不同指标的量纲和数量级间的差别,先分别对节点度、节点电气介数和节点电压越限指标进行归一化处理,然后得到节点度、节点电气介数和节点电压越限指标的客观权重指标。最后利用式(10)和式(11)对各指标的主观权重和客观权重进行权重分配,得到各指标的权重分别为 $W=[0.3936, 0.4668, 0.1396]$ 。因此,IEEE30节点系统各节点的薄弱性指标值如图3所示。

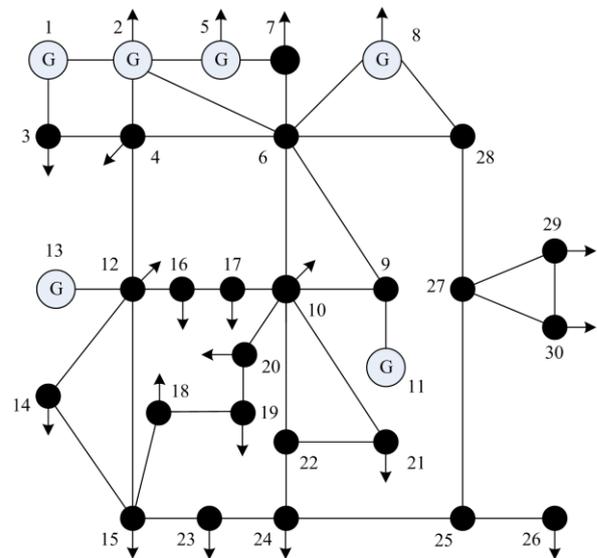


图2 IEEE30节点系统

Fig. 2 IEEE30 bus system

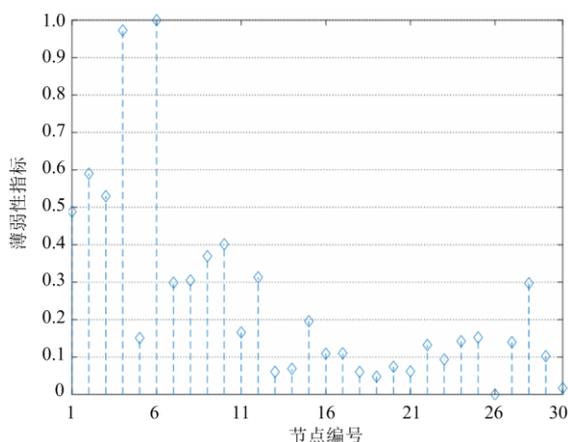


图3 IEEE30 节点系统各节点的薄弱性指标
Fig. 3 Vulnerability index of each node in IEEE30 bus system

节点的薄弱性指标越大, 表明该节点状态发生变化后对系统的影响力越大, 使系统更容易变得脆弱。如图 3 可知, 薄弱性指标排序前 10 的节点中, 各节点的分布比较集中, 表明在电力系统运行过程中, 该集中区域对系统的薄弱性影响较大, 需要系统运行人员重点监视。

5.1 不同辨识方法比较

为验证本文所提方法的合理性和有效性, 分别与文献[2]和文献[32]所辨识的薄弱点进行比较, 将薄弱性指标排名前10的节点进行降序排列, 结果如表1所示。

表 1 不同辨识方法的薄弱点辨识结果
Table 1 Identification results of weak points between different methods

排序	文献[2]	文献[32]	本文方法
1	15	13	6
2	16	11	4
3	14	14	2
4	3	9	3
5	12	15	1
6	6	16	10
7	4	6	9
8	9	10	12
9	17	12	8
10	10	3	7

如表 1 所示, 本文方法中排名前 10 的节点中有 6 个节点与文献[2]辨识得到的薄弱节点结果相同, 有 5 个节点与文献[32]辨识得到的薄弱节点结果相同, 但相同的薄弱节点间排列顺序存在不同。

在本文所提的方法中, 系统的最薄弱点为节点

6。如图 2 可知, 节点 6 是整个电网的枢纽点, 在系统中处于多条线路的交汇处, 并且还是发电机节点 5 和节点 8 功率传输到系统中部负荷的必经之路。如果节点 6 退出运行或状态发生变化, 将导致整个系统的潮流发生较大规模的变动, 更加迅速地给剩余节点和支路造成大幅度的负担, 使整个电网变得更加薄弱, 所以节点 6 被辨识为系统的最薄弱点。在节点 6 和节点 4 失效后, 对于节点 2 和节点 3 而言, 节点 2 是发电机节点, 同时节点 2 的移除将导致系统网络结构解列, 形成三个独立的供电系统。因此, 相比于节点 3, 节点 2 的状态变化对系统的影响更大, 在系统中更加薄弱。

通过分析电力系统的拓扑结构和潮流分布的特性可知, 本文所提方法辨识得到的结果是比较合理的。

为进一步验证本文方法的有效性, 本文将分析比较不同方法下电网薄弱节点故障时, 电力系统的网络效能指标变化。方法 1: 基于文献[2]的排序结果, 对排名前 10 的节点依次进行攻击, 计算系统的网络效能指标; 方法 2: 基于文献[32]的排序结果, 对排名前 10 的节点依次进行攻击, 计算系统的网络效能指标; 方法 3: 基于本文所提方法的排序结果, 对排名前 10 的节点依次进行攻击, 计算系统的网络效能指标。不同方法的比较结果如图 4 所示。

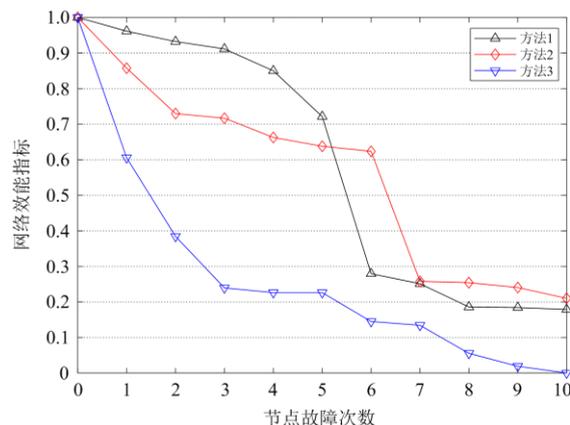


图 4 不同辨识方法的网络效能

Fig. 4 Network effectiveness between different methods

由图 4 可知, 当系统节点没有遭受故障时, 系统的网络效能指标为 1。当系统按照不同方法的辨识结果遭受 1 次节点故障时, 本文所提方法导致系统网络效能指标下降的幅度最大, 下降到正常系统指标的 60.54%, 文献[2]和文献[32]分别导致系统网络效能指标下降到正常系统指标的 96.15% 和 85.73%。当系统按照不同方法的辨识结果依次遭受

10次节点故障时，文献[2]和文献[32]导致的效能指标分别下降至正常情况的17.88%和20.7%，而本文所提方法导致的效能指标下降至正常情况的0%，导致整个系统发电机-负荷节点间的电能传输能力被完全破坏。并且在节点故障过程中，本文所提方法每次导致的系统效能指标均不大于其他方法。因此，相比于文献[2]和文献[32]的辨识结果，本文所提方法得到的薄弱点辨识结果更加合理，对电力系统的薄弱性影响更大。

5.2 不同指标的网络效能分析

考虑到本文所提方法为多个节点指标组合而成，为进一步分析组合指标的可靠性和准确性，分析本文所提的节点度 T 、节点介数 B 、节点电压越限指标 V 和组合指标 Q 所形成的薄弱节点序列，各指标下的节点排序如表2所示。

表2 不同指标的辨识结果

Table 2 Identification results between different indexes

排序	T	B	V	Q
1	6	6	7	6
2	4	4	2	4
3	8	2	11	2
4	3	1	29	3
5	28	10	1	1
6	7	3	13	10
7	9	9	5	9
8	12	12	9	12
9	1	27	16	8
10	5	15	14	7

由表2可知，节点度指标 T 和介数指标 B 的最薄弱点为节点6，节点电压越限指标 V 辨识的最薄弱点为节点7。这是因为不同情形下的指标侧重点存在差异，导致不同指标辨识的结果不同。节点度指标 T 和介数指标 B 是从网络拓扑层面反映系统特性的指标，更侧重于发电机-负荷节点间的连接关系。节点6和节点10是拓扑中所连支路数量最多的节点，但节点6是系统中直连发电机节点最多的节点，对整个网络的潮流分布影响最大，所以成为指标 T 和 B 中的最薄弱节点。而节点电压越限指标 V 是从系统运行层面反映系统薄弱性的指标，更侧重于节点与系统的稳定关系。

同理，为进一步验证本文方法的有效性，本文将分4个不同情形，分别比较不同指标下电网薄弱节点故障时电力系统的网络效能指标变化。情形1：基于节点度指标的排序结果，对排名前10的节点依次进行攻击，计算系统的网络效能指标；情形2：基于节点介数指标的排序结果，对排名前10的节点

依次进行攻击，计算系统的网络效能指标；情形3：基于节点电压越限指标的排序结果，对排名前10的节点依次进行攻击，计算系统的网络效能指标；情形4：基于组合指标的排序结果，对排名前10的节点依次进行攻击，计算系统的网络效能指标。结果如图5所示。

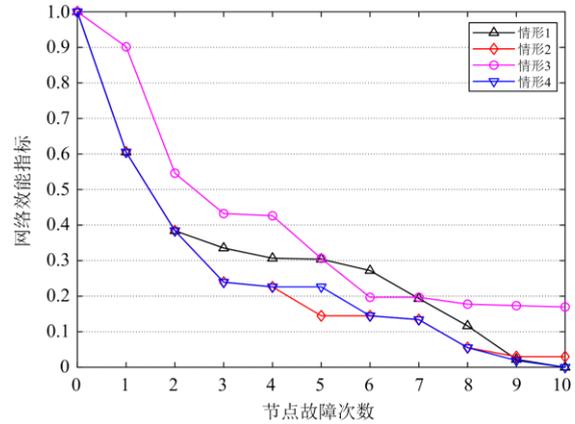


图5 不同辨识指标的网络效能

Fig. 5 Network effectiveness between identification indexes

由图5可知，因为节点度指标、节点介数指标和网络效能指标都是体现系统拓扑连接特性的指标，所以当节点故障次数为1~2时，情形1和情形2的网络效能指标比情形3的网络效能指标下降速度更快。当节点故障次数为4~6时，情形3的网络效能指标下降速度比情形1、情形2更快，表明此时系统运行指标辨识的薄弱节点对电网节点传输能力影响更大，更容易导致系统出现电压越限等现象，加速系统的崩溃。并且当节点故障次数为6时，情形3辨识节点导致的网络效能指标小于情形1。因此，考虑电力系统的运行指标能弥补复杂网络指标的不足。

根据图5可知，在第10次节点故障时，情形1与情形4均导致系统的效能指标下降至正常指标的0%，并且在节点故障过程中，除节点故障次数在1~2时，情形1与情形4所辨识结果存在重合外，情形4的辨识结果对网络效能指标的影响更大。同时，除节点故障次数在5次时，情形4辨识结果导致的效能指标大于情形2导致的效能指标外，在节点故障过程中，情形4辨识结果导致的系统效能指标均不大于情形1、情形2和情形3的指标。因此，相比于单一指标的辨识结果，组合指标的薄弱点辨识结果更加全面。

5.3 IEEE118 节点系统分析

为分析本文所提指标在复杂系统中的可靠性，

分别比较不同节点故障方法对 IEEE118 节点系统的影响。方法 1: 基于节点随机故障的排序结果, 对排名前 10 的节点依次进行攻击, 取 30 次随机攻击中影响最大的结果; 方法 2: 基于组合指标的排序结果, 对排名前 10 的节点依次进行攻击, 计算系统的网络效能指标。结果如图 6 所示。

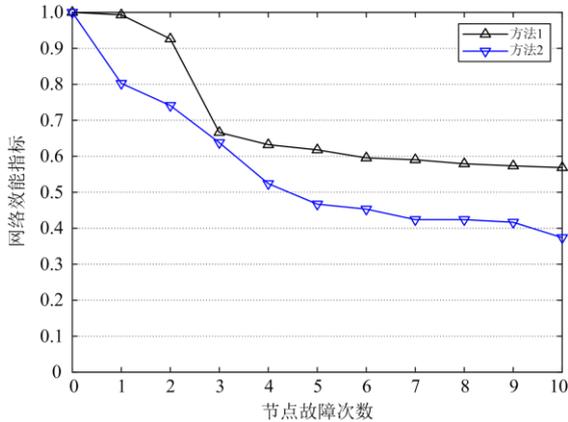


图 6 不同情形下的网络效能

Fig. 6 Network effectiveness for different conditions

由图 6 可知, 随着系统结构复杂性的增加, 系统中发电机-负荷节点间的传输效能受节点故障的影响也越小。相比于 IEEE30 节点系统的网络效能, 节点连续故障 10 次后, IEEE118 节点系统的整体下降速度和幅度更小。

同时, 从整体结果来看, 本文所提方法对系统网络效能结果的影响大于节点随机故障。基于本文所提方法的辨识结果, 10 次故障后的网络效能指标由 100% 降低至 37.4%; 基于随机故障的辨识结果, 10 次故障后的网络效能指标由 100% 降低至 56.87%。因此, 本文方法辨识的薄弱点结果更加合理。

6 结论

本文针对影响系统节点薄弱性的多个因素, 分析电网拓扑结构、功率传输和节点电压约束的特征, 提出一种基于复杂网络与运行因素的电网薄弱点辨识方法。通过理论分析与仿真验证可知:

1) 在电力系统拓扑方面, 考虑了系统节点间局部特性与整体特性的相互影响, 提出了一种基于拉普拉斯矩阵谱半径的节点度指标, 通过分析 $K-1$ 事件中节点移除前后网络拉普拉斯矩阵谱半径的变化, 更好地揭示了网络中节点间的相互影响和重要度。

2) 在电力系统运行方面, 考虑了电网发电机、负荷节点间线路传输容量水平、节点电压约束等多

种因素影响, 提出了一种基于功率传输分布的节点介数指标和一种节点电压越限指标, 弥补了复杂网络理论指标的不足。

3) 仿真表明本文所提方法的辨识结果比现有方法更加合理和可靠, 辨识的薄弱点对电力系统的网络效能影响更大。

参考文献

- [1] 尹项根, 陈庆前, 王博. 基于四层集合模型的复杂电力系统脆弱性评估体系[J]. 电工技术学报, 2013, 28(1): 225-233.
YIN Xianggen, CHEN Qingqiang, WANG Bo. Vulnerability assessment system of complicated power system based on four-level set model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(1): 225-233.
- [2] 刘美君, 刘吉龙, 李华强, 等. 计及电压等级的电网关键节点识别[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(3): 51-57.
LIU Meijun, LIU Jilong, LI Huaqiang, et al. Critical node identification of power grid considering voltage level[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(3): 51-57.
- [3] FAN W, LIAO Y. Wide area measurements based fault detection and location method for transmission lines[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(1): 53-64.
- [4] MUNIAPPAN M. A comprehensive review of DC fault protection methods in HVDC transmission systems[J]. Protection and Control Modern Power Systems, 2021, 6(1): 1-20.
- [5] 王涛, 岳贤龙, 顾雪平. 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. Comprehensive evaluation of power grid vulnerability based on hesitant fuzzy decision making method[J]. Power System Technology, 2017, 41(7): 2272-2281.
- [6] 刘友波, 刘俊勇, 王民昆. 计及动能注入介数的线路暂态脆弱性快速评估[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(13): 40-47.
LIU Youbo, LIU Junyong, WANG Minkun. Fast assessment method for transient vulnerability of transmission lines based on kinetic energy injection betweenness[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(13): 40-47.
- [7] 王涛, 刘雨濛, 顾雪平, 等. 基于连锁故障时空图的电网脆弱线路辨识[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(20): 5962-5972, 6176.
WANG Tao, LIU Yumeng, GU Xueping, et al. Vulnerable lines identification of power grid based on cascading fault space-time graph[J]. Proceedings of the CSEE, 2019,

- 39(20): 5962-5972, 6176.
- [8] 王波, 王佳丽, 刘涤尘, 等. 基于高维随机矩阵理论的电网薄弱点评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(6): 1682-1691, 1864.
WANG Bo, WANG Jiali, LIU Dichen, et al. Research on evaluating vulnerability of power network based on high-dimensional random matrix theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(6): 1682-1691, 1864.
- [9] 李昌超, 康忠健, 于洪国, 等. 基于 PageRank 改进算法的电力系统关键节点识别[J]. 电工技术学报, 2019, 34(9): 1952-1959.
LI Changchao, KANG Zhongjian, YU Hongguo, et al. Identification method of key nodes in power system based on improved PageRank algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(9): 1952-1959.
- [10] 倪良华, 闻佳妍, 张晓莲, 等. 基于受冲击与断开后果脆弱度的电网关键线路识别[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(1): 81-87.
NI Lianghua, WEN Jiayan, ZHANG Xiaolian, et al. Critical lines identification in power grid based on vulnerability of line under impact and disconnection consequence[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(1): 81-87.
- [11] 陶鸿飞, 谢栋, 赵福林, 等. 含大规模风电并网电力系统的關鍵线路综合辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(6): 115-123.
TAO Hongfei, XIE Dong, ZHAO Fulin, et al. Comprehensive identification of critical line in power systems with large-scale wind power integration[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(6): 115-123.
- [12] 丁明, 韩平平. 基于小世界拓扑模型的大型电网脆弱性评估[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(8): 7-10, 40.
DING Ming, HAN Pingping. Vulnerability assessment to small-world power grid based on weighted topological model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(8): 7-10, 40.
- [13] 丁明, 韩平平. 加权拓扑模型下的小世界电网脆弱性评估[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(10): 20-25.
DING Ming, HAN Pingping. Vulnerability assessment to small-world power grid based on weighted topological model[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(10): 20-25.
- [14] 曹一家, 陈晓钢, 孙可. 基于复杂网络理论的大型电力系统脆弱线路识别[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.
- [15] 徐敬友, 陈冲, 罗纯坚, 等. 基于改进复杂网络模型的电网关键环节辨识[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(10): 53-61.
XU Jingyou, CHEN Chong, LUO Chunjian, et al. Identification of power grid key parts based on improved complex network model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(10): 53-61.
- [16] 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.
- [17] 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 defense[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(13): 61-68.
- [18] WANG Kai, ZHANG Buhuan, ZHANG Zhe, et al. An electrical betweenness approach for vulnerability assessment of power grids considering the capacity of generators and load[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2011, 390(23-24): 4692-4701.
- [19] 曹一家, 王光增, 曹丽华, 等. 基于潮流熵的复杂电网自组织临界态判断模型[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(7): 1-6.
CAO Yijia, WANG Guangzeng, CAO Lihua, et al. An identification model for self-organized criticality of power grids based on power flow entropy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(7): 1-6.
- [20] 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 Systems, 2012, 36(19): 11-16.
- [21] 刘文颖, 王佳明, 谢昶, 等. 基于脆性风险熵的复杂电网连锁故障脆性源辨识模型[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(31): 142-149.
LIU Wenyong, WANG Jiaming, XIE Chang, et al. Brittleness source identification model for cascading failure of complex power grid based on brittle risk entropy[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(31): 142-149.

- [22] 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 grid flow distribution entropy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(4): 46-53.
- [23] 朱大锐, 王睿, 段建东, 等. 考虑多影响因素的关键输电线路辨识[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(20): 5938-5947, 6174.
ZHU Darui, WANG Rui, DUAN Jiandong, et al. Identification of critical transmission lines considering multiple influencing factors[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(20): 5938-5947, 6174.
- [24] SÁNCHEZ R J, FENNELLY M, NORRIS S, et al. Hierarchical spectral clustering of power grids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(5): 2229-2237.
- [25] YANG H J, YIN C Y, ZHU G M, et al. Self-affine fractals embedded in spectra of complex networks[J]. Physical Review E, 2008, 77(4): 1-4.
- [26] MA Zhiyuan, SHEN Chen, LIU Feng, et al. Fast screening of vulnerable transmission lines in power grids: a PageRank-based approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(2): 1982-1991.
- [27] BOMPARD E, PONS E, WU D. Extended topological metrics for the analysis of power grid vulnerability[J]. IEEE Systems Journal, 2012, 6(3): 481-487.
- [28] 史文超, 李晓明, 王孝琳, 等. 配电网脆弱性评估方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(12): 125-131.
SHI Wenchao, LI Xiaoming, WANG Xiaolin, et al. Vulnerability assessment method for distribution network[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(12): 125-131.
- [29] 周依希, 李晓明, 瞿合祚. 基于反熵-AHP 二次规划组合赋权法的电网节点综合脆弱性评估[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(7): 133-140.
ZHOU Yixi, LI Xiaoming, QU Hezuo. Node comprehensive vulnerability assessment of power grid based on anti-entropy-AHP quadratic programming combination weighting method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(7): 133-140.
- [30] 姚忠胜, 钱虹, 吴文军, 等. 基于多因素综合评价和改进灰色关联的供电可靠性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(11): 28-34.
YAO Zhongsheng, QIAN Hong, WU Wenjun, et al. Research on power supply reliability based on multi-factor comprehensive evaluation and improved gray relation[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(11): 28-34.
- [31] 艾欣, 赵旭州, 胡寰宇, 等. G1-熵权-独立性权法在电网发展态势感知中的应用[J]. 电网技术, 2020, 44(9): 3481-3490.
AI Xin, ZHAO Xuzhou, HU Huanyu, et al. G1-entropy-independence weight method in situational awareness of power grid development[J]. Power System Technology, 2020, 44(9): 3481-3490.
- [32] 张程, 于永军, 李华强, 等. 考量能量裕度及权重因子的电力系统节点综合脆弱性分析[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(3): 136-141.
ZHANG Cheng, YU Yongjun, LI Huaqiang, et al. Analysis of nodal comprehensive vulnerability considering energy margin and weight factor for power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(3): 136-141.

收稿日期: 2021-04-11; 修回日期: 2021-06-24

作者简介:

谢李为(1993—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制、薄弱点辨识;

李勇(1982—), 男, 通信作者, 教授, 博士生导师, 主要从事能源/电力系统优化与运行、风险辨识、电能变换系统与装备等方面的研究; E-mail: liyong1881@163.com

罗隆福(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事能源/电力系统优化与运行、电能变换系统与装备等方面的研究。

(编辑 葛艳娜)