

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210567

基于改进 PageRank 算法的输电网关键节点辨识方法研究

朱大锐, 王睿, 程文姬, 段建东, 王海峰

(西安理工大学电气工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 为了准确全面辨识输电网的关键输电节点, 针对现有辨识方法未考虑节点间功率传输路径的分配关系以及不同类型节点传输特性的问题, 基于复杂网络理论和 PageRank 算法, 从静态分析角度建立输电网的有向加权网络模型。根据节点在功率传输路径中的不同特点将节点划分为电源节点、中间节点和终端节点, 并考虑不同类型节点与相邻节点间传输转移的信息值及节点间非等概率传输特性, 通过对 PageRank 算法改进得到考虑节点状态信息与拓扑信息的电气传输转移矩阵。在此基础上, 结合节点电压值、节点度和节点传输转移特性形成能够准确全面辨识输电网关键节点的方法。通过仿真结果对比分析, 并结合系统遭受静态蓄意攻击后网络传输效率变化, 表明所辨识关键节点故障后对电网的传输能力影响较大, 验证了所提辨识方法的正确性与优越性。

关键词: 关键节点; 改进 PageRank 算法; 状态信息转移; 网络传输效率

Critical transmission node identification method based on improved PageRank algorithm

ZHU Darui, WANG Rui, CHENG Wenji, DUAN Jiandong, WANG Haifeng

(School of Electrical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: It is important to identify the critical transmission node of a power grid accurately and comprehensively. Given that the current method does not consider the power transmission path distribution between nodes and the transmission characteristics of different type nodes, then based on complex network theory and a PageRank algorithm, a directed weighted network model of a power grid is established from the perspective of static analysis. From the characteristics of nodes in the power transmission path, the nodes are divided into power, intermediate and terminal nodes. The information value and unequal probability transmission characteristics between different type nodes and adjacent nodes are considered, and an electrical transfer matrix is obtained by considering node state information and topology information based on the improved PageRank algorithm. The critical node identification method is established by the node voltage, node degree and node transfer characteristics. From the comparison and analysis of simulation results, and combining with the changes of network transmission efficiency after the system is subjected to a static deliberate attack, it is shown that the identified critical nodes have a great impact on the transmission capacity of the power grid, and the correctness and superiority of the identification method are verified.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51877174).

Key words: critical node; improved PageRank algorithm; state information transition; network transmission efficiency

0 引言

随着现代电力系统的不断发展, 电网的安全可靠运行要求越来越高。而关键输电节点对电网的安全运行具有决定性作用, 电力系统中关键节点故障

将迫使其相连接的输电线路一起断开, 甚至引发大面积停电事故, 严重威胁电网的安全可靠运行, 并将产生严重的社会影响^[1-5]。因此, 准确有效地辨识电网的关键节点对于电网的安全可靠运行, 预防和减少电网大面积停电事故具有重要的现实意义。

现有关于电网关键节点重要性辨识方法的研究, 主要是从运行状态和拓扑结构的静态角度建立可表征节点重要性的指标, 通过单一指标或多指标综合方法进行关键节点辨识。文献[6-9]通过考虑电

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51877174); 中国博士后科学基金项目资助(2020M683685XB); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目资助(2020JQ-633)

网节点电压、线路潮流分布、系统功率损耗等方面, 从电网运行状态角度进行关键节点辨识。文献[10-18]基于电气介数、节点类型、节点特性及结构重要性方面, 并通过考虑各环节权重, 从电网拓扑结构角度综合表征节点结构重要性指标进行关键节点辨识。文献[19-22]从综合拓扑结构和运行参数角度, 通过综合表征节点结构重要性和状态重要性的各指标, 形成综合辨识指标进行关键节点辨识, 能够较全面反映节点在电网中的重要性。文献[23]从系统电压等级和支路传输潮流出发, 建立电压增长率泰尔熵模型和加权潮流冲击率泰尔熵模型, 能够辨识出系统关键节点。

PageRank 算法作为衡量互联网网页重要性的排序算法, 近年来, 已有相关研究通过形成计及节点电气特性的改进 PageRank 算法进行电网关键节点辨识。文献[24]首次将 PageRank 算法应用于电力系统, 通过对比互联网与电网网络模型, 说明算法的适用性, 同时考虑电网节点负荷重要性、节点负荷量和网络拓扑, 形成电网节点重要性的改进 PageRank 算法。文献[25]借鉴 PageRank 算法思路, 建立电网加权有向图链接强度的重要度计算评价模型, 可从电网全局能量传输的角度识别对系统安全运行起关键作用的重要节点。上述研究成果的关注点在节点间传输潮流值以及节点容量大小, 没有考虑到节点间功率传输路径的分配关系以及不同类型节点传输特性不同的特点。因此, 在基本 PageRank 算法基础上, 如何考虑节点间传输转移的状态和结构信息、节点类型以及节点电压特性, 形成更加准确辨识关键节点的方法, 仍有待进一步研究。

为更加准确辨识电网关键节点, 本文从电网节点的不同类型出发, 考虑电网的实际运行情况, 将电网节点划分为电源节点、中间节点和终端节点, 并引入虚拟节点。在考虑不同类型节点与相邻节点间传输转移的信息值基础上, 通过建立节点间非等概率传输的自链接矩阵, 从而形成改进 PageRank 算法。并结合节点电压值、节点度和节点传输转移特性形成辨识指标进行关键节点辨识。最后以 IEEE39 和 IEEE118 节点系统为测试算例验证所设计方法的正确性与可行性。

1 电力复杂网络模型及节点类型

1.1 电网模型及虚拟节点

电力网络可以简化为由节点和线路组成的复杂网络模型, 其中, 发电机节点、负荷节点可简化为复杂网络的节点, 输电线路可简化为复杂网络的边。则电网模型可用无向无权网络 $G=(V, E)$ 表示, 其中

V 为节点集, $|V|=n$, E 为线路集, $|E|=m$, 则网络 G 中节点与线路之间的连接关系可用 $m \times n$ 维关联矩阵 A_G 描述, 当 $A_{Gij}=1$, 表示节点 i 为线路 j 的端点, 当 $A_{Gij}=0$, 表示节点 i 不是线路 j 的端点。

在上述电网的复杂网络模型 G 的基础上, 考虑线路潮流方向并引入线路电抗值, 将无向无权网络模型 G 拓展为与实际电网较贴近的有向加权网络 $D=(V, E, W)$, W 为线路的权重集合。

为了描述电网实际运行中各节点传输特性的不同, 本文将电网节点划分为电源节点 E_N 、中间节点 M_N 和终端节点 F_N , 其中, 电源节点是用于输出有功功率的发电机节点, 终端节点是仅消耗功率的负荷节点, 中间节点是用于传输功率的节点, 其包括联络节点和部分负荷节点。然而, 电源节点为网络的起点, 只有出线线路没有进线线路, 而负荷节点为网络的终点, 只有进线线路没有出线线路, 应用 PageRank 算法进行节点重要性排序将使得这两类节点的重要性偏低, 与实际情况不相符。

为此, 本文在有向加权网络模型 D 基础上, 为了确保电网的所有节点都存在链入与链出线路, 通过引入虚拟节点 x 和 y 将原有向加权网络 D 衍生为拓展网络, 如图 1 所示。图中所有终端节点 F_N 都指向负荷虚拟节点 x , 并将终端节点的负荷大小作为连边权重; 而电源虚拟节点 y 作为所有电源节点 E_N 的入线首节点, 并将电源节点实际输出至电网的功率作为连边权重, 使得电网保持功率平衡。图中通过引入虚拟节点 x 和 y 到拓展网络中, 节点数为 $n+2$, 其表征拓展网络中节点间链接关系矩阵 A_e 的各元素定义如式(1)所示。

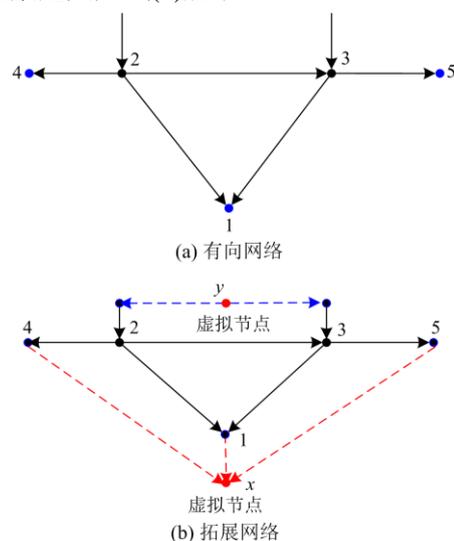


图 1 引入虚拟节点的拓展网络

Fig. 1 Extended network with virtual nodes

$$a_{e-ij} = \begin{cases} 1, & i \rightarrow j \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (1)$$

链接关系矩阵 A_e 主要描述拓展网络中节点间的链接关系, 并不能表征节点间的传输转移特性。因此, 根据不同类型节点传输信息不同的特点, 可将表征节点与其链接节点间传输转移的信息值映射到链接矩阵, 从而形成表征节点间传输转移特性的电气传输转移矩阵 X_{YW} 。

1.2 电源节点 E_N

电源节点主要将发电机输出的有功功率传输至与其相邻的节点, 是电网功率传输路径的首节点。因此, 对于电源节点的传输转移特性, 主要考虑电源节点与相邻节点之间传输转移的状态信息(即输出潮流值), 将电源节点的发电容量和发电机出线线路有功功率值占电源节点输出有功功率的比值映射到链接矩阵, 从而量化电源节点作为首节点的节点间传输转移量值, 而对于电源虚拟节点 y 的传输转移特性, 主要计及各电源节点输出容量相对于电源节点中最大输出电源容量的大小关系。因此, 电源节点 $d \in E_N$ 的传输转移量为

$$\begin{cases} X_{YW}(d, j) = \frac{S_{EN}(d)}{\sum_{w \in V_{Gs}} S_{gen}(w)} \frac{P(d, j)}{\sum_{k \in O(d)} P(d, k)} \\ X_{YW}(y, d) = \frac{S_{EN}(d)}{\max\{S_{EN1}, S_{EN2}, \dots, S_{ENn}\}} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $P(d, j)$ 是线路(d - j)流过的有功功率; $O(d)$ 是电源节点 d 的出线线路集合; $S_{EN}(d)$ 表示电源节点 d 的发电容量; $S_{gen}(w)$ 表示第 w 台发电机组的发电容量; $\max\{S_{EN1}, S_{EN2}, \dots, S_{ENn}\}$ 表示取电源节点容量中的最大值。

1.3 中间节点 M_N

中间节点是电网功率传输路径中必然会经过的节点, 其主要将流入节点的潮流值传输至节点连接的各出线线路。中间节点包含联络节点与负荷节点两类, 对于联络节点的传输转移特性, 考虑节点潮流值和传输介数值的传输转移, 从状态与拓扑两个角度同时量化联络节点的传输转移量, 对于负荷节点的传输转移特性, 考虑节点潮流值和传输介数值的传输转移, 同时考虑负荷自身的大小。因此, 中间节点的传输转移量为

$$X_{YW}(m, j) = \begin{cases} \frac{S(m, j)}{\sum_{k \in O(m)} S(m, k)} + \frac{B_N(m)}{D_{out}(m)}, & S_{load}(m) = 0 \\ \frac{S_{load}(m)}{\sum_{v \in V_{Ds}} S_{load}(v)} \left(\frac{S(m, j)}{\sum_{k \in O(m)} S(m, k)} + \frac{B_N(m)}{D_{out}(m)} \right), & S_{load}(m) \neq 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $S(m, j)$ 是线路(m - j)流过的潮流值; $O(m)$ 是中间节点 m 的出线线路集合; $S_{load}(m)$ 是节点 m 的负荷大小; $B_N(m)$ 是节点 m 的传输介数值, 主要依据复杂网络理论中的“点介数^[26]”, 根据传输路径中包含节点的数目大小进行定义, 其从电网全局拓扑角度衡量节点在传输路径位置中的重要性, 如式(4)所示。

$$B_N(t) = \sum_{\substack{i \in V_G, j \in V_L \\ i \neq j}} \sum_{k=1}^{\delta_{ij}} \frac{1}{\theta_k} \quad (4)$$

式中: V_G 为发电机节点集; V_L 为负荷节点集; δ_{ij} 为发电机节点 i 与负荷节点 j 之间的所有可能路径集; θ_k 为发电机节点 i 与负荷节点 j 之间的第 k 条路径包含节点的数目。

1.4 终端节点 F_N

终端节点是指电网中的终端负荷, 只存在入线线路, 其主要消耗流入节点的潮流值, 不存在将潮流值传输转移至其他节点的情况, 但因负荷虚拟节点 x 的引入, 使得终端节点可以将自身的负荷大小值传输至负荷虚拟节点 x 。因此, 终端节点和与其相连的负荷虚拟节点 x 间的传输转移量为

$$X_{YW}(f, x) = \frac{S_{load}(f)}{\max\{S_{load1}, S_{load2}, \dots, S_{loadn}\}} \quad (5)$$

式中: $S_{load}(f)$ 为终端节点 f 的负荷大小; $\max\{S_{load}\}$ 表示选取最大负荷值。

2 基于节点结构与状态信息转移的改进 PageRank 算法

根据式(2)一式(5)的定义, 可以形成考虑节点状态信息与拓扑信息传输转移的电气传输转移矩阵。然而, 在 PageRank 算法中, 网络中每个节点与其他节点间等概率链接进行信息传输, 但对于具有电气特性的电网而言, 其信息传输将不再是等概率的, 有必要根据节点间的不同耦合程度确定节点间可能存在信息传输的概率值。而等效阻抗是通过在任意节点间注入单位电流定义的, 可用于反映节点间的耦合程度。因此, 基于等效阻抗建立链接矩阵 E_n 能够表征有向加权网络中任意两节点间信息传输的可能概率。

$$E_n(i, j) = \frac{Z_{eq}(i, j)}{\sum_{h=1}^n Z_{eq}(i, h)} \quad (6)$$

式中: $Z_{eq}(i, j)$ 是节点 i 与节点 j 间的等效阻抗值; n 是有向加权网络模型中的节点数目。

同时, 通过引入 $n \times 1$ 维列向量 \mathbf{E}_x 和 \mathbf{E}_y , 并结合链接矩阵 \mathbf{E}_n , 形成表征拓展网络中节点间信息传输可能概率的自连接矩阵 \mathbf{E}_{YW} , 即

$$\mathbf{E}_{YW} = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_n & \mathbf{E}_x & \mathbf{E}_y \\ \mathbf{E}_x^T & 0 & \varepsilon \\ \mathbf{E}_y^T & \varepsilon & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中

$$E_x(i) = E_y(i) = \frac{1}{n+1} \quad (8)$$

式中, ε 取 $1/(n+1)$ 。

基于上述电气传输转移矩阵 \mathbf{X}_{YW} 和自连接矩阵 \mathbf{E}_{YW} , 则可形成新的电气 Google 矩阵, 即

$$\mathbf{G}_{ps} = \alpha \mathbf{X}_{YW} + (1-\alpha) \mathbf{E}_{YW} \quad (9)$$

式(9)的 Google 矩阵包含两部分信息: 拓展网络中的实际传输转移信息比和可能的传输转移概率, 将上述矩阵按行归一化处理, 从而构成从节点传输转移特性角度评估节点重要性的改进 PageRank 算法, 即

$$\begin{bmatrix} TR^{k+1} \\ TR_{xy}^{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} TR^k \\ TR_{xy}^k \end{bmatrix} \cdot \mathbf{G}_{ps} \quad (10)$$

式中: TR^k 表示第 k 次迭代后输电网节点对应的 PageRank 值; TR_{xy}^k 表示第 k 次迭代后虚拟节点对应的 PageRank 值。当 $k=0$ 时, TR^0 表示节点的初始重要性, 本文依据节点连接元件类型以及容量, 对电网节点进行初始值设定, 即

$$\begin{bmatrix} TR^0 \\ TR_{xy}^0 \end{bmatrix} = \begin{cases} 0, \text{节点}i\text{为负荷虚拟节点}x \\ 1, P_{gen}(i) = 0 \text{且} 0 \leq P_{load}(i) < 200 \text{ MW} \\ 2, P_{gen}(i) = 0 \text{且} 200 \text{ MW} \leq P_{load}(i) < 500 \text{ MW} \\ 3, P_{gen}(i) = 0 \text{且} P_{load}(i) \geq 500 \text{ MW} \\ 4, P_{gen}(i) \neq 0 \text{且} P_{load}(i) = 0 \\ 5, P_{gen}(i) \neq 0 \text{且} P_{load}(i) > P_{gen}(i) \text{或}i\text{为虚拟节点}y \end{cases} \quad (11)$$

式中: $P_{gen}(i)$ 为节点 i 的发电机容量; $P_{load}(i)$ 为节点 i 的负荷大小。

若要使上述改进 PageRank 算法收敛到唯一正向量, 则电气 Google 矩阵应满足下列 3 个性质。

性质 1(随机性): 矩阵的随机性体现在矩阵按行求和等于 1, 而 \mathbf{G}_{ps} 中的第 i 行元素满足

$$\sum_{k=1}^{n+2} G_{ps}(i, k) = 1, \text{因此, 矩阵 } \mathbf{G}_{ps} \text{ 具有随机性。}$$

性质 2(不可约性): 矩阵的不可约性体现在矩阵非零元素组成的图是强连通的, 即矩阵是非负的。依据式(2)一式(9)的定义可知, 矩阵 \mathbf{G}_{ps} 对角元素为

0, 非对角元素非负, 即矩阵 \mathbf{G}_{ps} 是非负矩阵, 因此, 矩阵具有不可约性。

性质 3(非周期性): 矩阵的非周期性为存在一个正整数 m 使非负矩阵的 m 次幂大于 0。而矩阵 \mathbf{G}_{ps} 是非负矩阵, 且当 $m=2$ 时, $(\mathbf{G}_{ps})^2 > 0$, 因此, 矩阵 \mathbf{G}_{ps} 具有非周期性。

根据上述分析可知, 所建立的电气 Google 矩阵满足随机性、不可约性、非周期性 3 个性质, 说明从节点的状态和拓扑信息传输转移角度对 PageRank 算法进行修正, 构成评估节点重要性的改进 PageRank 算法是收敛的, 且收敛至唯一正向量。

实际运行电网中, 节点的电压具有上下限值的要求, 而节点电压值并不都是运行在额定电压。因此, 可定义电压相对变化指标 N_w 来衡量节点电压与限值之间的相对大小关系, 如式(12)所示。

$$N_w(i) = \begin{cases} e^{-(U_{max}-U_i)}, U_i \geq 1 \\ e^{-(U_i-U_{min})}, U_i < 1 \end{cases} \quad (12)$$

式中: U_{max} 是节点电压上限, 取 1.07 p.u; U_{min} 是节点电压下限, 取 0.93 p.u; U_i 是节点 i 的电压标么值。

电压相对变化指标 N_w 从当前运行电网的节点参数方面衡量节点重要性, 改进 PageRank 算法从节点的状态和拓扑信息传输转移角度衡量节点重要性。为更全面地评估节点重要性, 综合电压相对变化指标、节点自身度值以及改进 PageRank 算法, 提出一种新的节点重要性指标进行节点重要性评估, 如式(13)所示, 其相应的流程如图 2 所示。

$$BT(i) = N_w(i) \cdot D_{dn}(i) \cdot TR(i) \quad (13)$$

式中: $D_{dn}(i)$ 为节点 i 的度值; $TR(i)$ 为节点 i 的 TR 值; $N_w(i)$ 为节点 i 的电压相对大小值。

3 测试算例与仿真分析

3.1 辨识方法验证指标

输电线路的断开, 使电网的功率传输路径遭受破坏, 电网的功率传输能力受到影响。网络效能 E 从网络全局角度评估网络信息传递的难易程度, 其定义为无向无权网络中节点间的最短路径距离倒数之和的平均值^[27], 即

$$E = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i \neq j} \frac{1}{d_{ij}} \quad (14)$$

式中: n 表示网络中节点的数目; d_{ij} 表示任意两个节点 i 和 j 之间的最短距离。

对于电网的传输功率信息, 借鉴网络效能的物理含义, 基于有向加权网络模型 \mathbf{D} , 定义电网传输效能指标 E_{ps} 评估电网的功率传输能力, 即

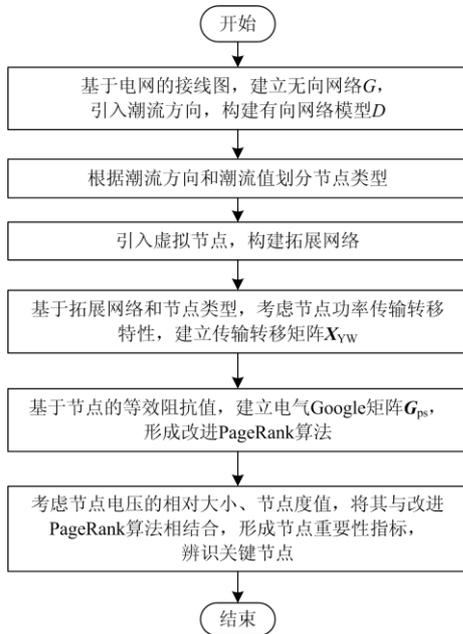


图 2 关键节点辨识方法流程图

Fig. 2 Flow chart of critical node identification method

$$E_{PS} = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i \in V_G} \sum_{j \in V_L} \sum_{k \in path(i,j)} \frac{1}{e_{k-ij}} \quad (15)$$

式中, e_{k-ij} 表示有向加权网络模型中, 发电机节点 i 与负荷节点 j 之间第 k 条传输路径的电气距离, 即线路权重之和。

电网传输效能指标从电网的全局拓扑角度表征电网的功率传输能力, 为了验证电网遭受故障后其传输能力的变化情况, 本文定义网络传输效率来描述电网遭受故障攻击后电网整体传输能力相对于正常运行时的变化, 电网遭受 m 次故障攻击后的网络传输效率如式(16)所示。

$$\eta_m = \frac{E_{PS_m}}{E_{PS_0}} \times 100\% \quad (16)$$

式中: E_{PS_0} 是电网正常运行状态下的电网传输效能指标; E_{PS_m} 是电网遭受 m 次故障攻击下的电网传输效能指标。

3.2 IEEE39 测试系统辨识结果分析

为辨识电网的关键节点, 本节采用 IEEE39 节点系统作为测试算例, 通过将改进 PageRank 算法、电压相对变化指标和节点度值综合, 得到 IEEE39 节点系统的节点重要性指标值如图 3 所示。将节点重要性指标降序排列, 选择排序前 10 位的非发电机节点为关键节点, 并将本文所提辨识方法与现有方法的辨识结果进行对比, 如表 1 所示。

由表 1 所示 IEEE39 节点系统的关键节点辨识

结果可以看出, 本文节点重要性指标辨识得到的关键节点与现有辨识方法辨识的关键节点集合完全重叠。节点 16 连接线路 16-17、16-15、16-19、16-24 和 16-21, 承担发电机 33、34、35 和 36 的功率外送任务, 节点 16 移除, 会导致电网解列、发电机功率无法及时输送, 因此, 本文获得的关键节点中最重要的是节点 16, 这与文献[13]、文献[18]和文献[28]的辨识结果一致。节点 8、4 是系统的重要负荷节点, 节点 6、26、9、5、14、29、3 是发电机 30、31、32、37、38 功率外送的节点, 一旦移除, 会使得发电机功率无法外送, 系统出现功率不平衡现象, 所以, 这些节点也是重要的节点。通过节点自身属性、节点的位置以及与现有方法对比分析, 说明本文方法辨识的关键节点是正确的, 也验证了本文辨识方法的可行性。

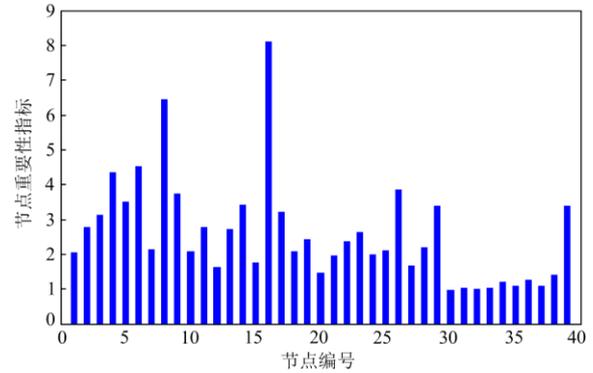


图 3 IEEE39 节点系统的节点重要性指标

Fig. 3 Node importance index value in IEEE39-bus system

表 1 IEEE39 节点系统的关键节点结果表

Table 1 Critical nodes in IEEE39-bus system

排序	本文方法	随机矩阵理论与熵理论结合 ^[28]	节点重要度 ^[14]	最优评分法 ^[19]	薄弱点判断指标 ^[29]
1	16	6	16	16	16
2	8	5	4	6	17
3	4	11	12	5	19
4	6	8	26	17	15
5	26	10	3	2	3
6	9	7	11	11	10
7	5	13	15	4	20
8	14	14	5	14	29
9	29	4	19	26	2
10	3	15	14	10	14

3.3 网络传输效率仿真结果分析

为验证关键节点辨识方法的有效性, 对 IEEE39 和 IEEE118 节点系统进行静态蓄意攻击。对于 IEEE39 节点系统, 将本文节点重要性指标、随机矩阵理论与熵理论结合、节点重要度、最优评分法和

薄弱点判断指标辨识的关键节点依次移除, 网络传输效率变化如图 4 所示。

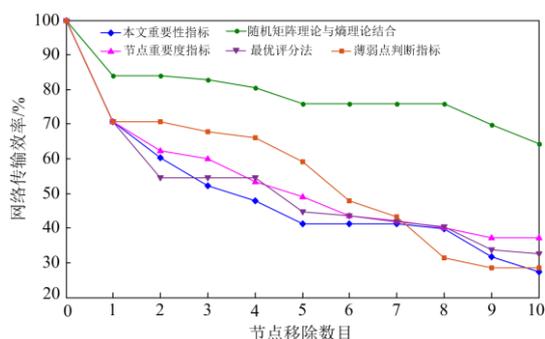


图 4 IEEE39 节点中关键节点移除后的网络传输效率值
Fig. 4 Network transmission efficiency value after critical node removal in IEEE39-bus system

由图 4 所示 IEEE39 节点系统的网络传输效率变化可知: 从节点电压数据挖掘角度提出的随机矩阵理论与熵理论相结合方法和薄弱点判断指标辨识的关键节点依次移除后, 随机矩阵理论与熵理论相结合方法的网络传输效率变化趋势较缓慢, 且全部关键节点移除后, 网络传输效率为 64.23%, 而薄弱点判断指标的网络传输效率在前 7 个关键节点间的变化相对缓慢, 因第 8、9 个节点对应的是发电机直连线路的端点, 故这两个节点的移除, 使得网络传输效率值下降的较快; 从节点间的连接关系角度出发提出的节点重要度指标和最优评分法辨识的关键节点移除后, 对应的网络传输效率变化较陡, 全部关键节点移除后, 网络传输效率分别为 37.06%、32.55%; 本文考虑节点电压与节点间传输特性提出的节点重要性指标辨识的关键节点依次移除, 系统的网络传输效率变化更大, 全部关键节点移除后, 系统的网络传输效率为 27.49%。

对于 IEEE118 节点系统, 将本文节点重要性指标、修正 PageRank 算法^[23]、扩展介数^[30]和改进 MBCC-HITS 方法^[31]辨识的关键节点依次移除, 网络传输效率变化如图 5 所示。

由图 5 所示 IEEE118 节点系统所示的网络传输效率变化可知: 随着关键节点移除数目的增多, 网络传输效率值逐次降低, 本文所提的辨识方法辨识的前 20 个关键节点移除后, 网络传输效率降低至 15.48%, 而修正 PageRank 算法、改进 MBC-HITS 和扩展介数 3 种方法辨识的关键节点移除, 网络传输效率值分别为 45.40%、29.84%和 20.6%, 比本文方法的网络传输效率高。与考虑节点负荷重要性、负荷容量和网络拓扑的修正 PageRank 算法相比, 本文计入各类节点的传输转移信息值和节点电压值

的辨识方法可以更好地辨识系统的关键节点。

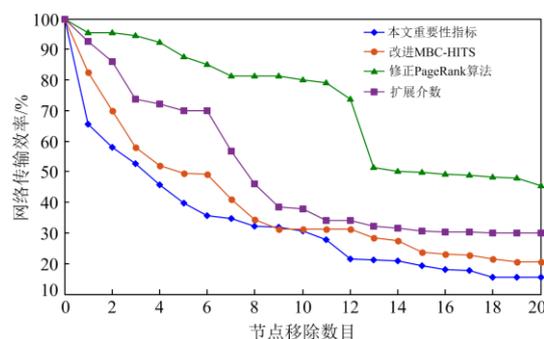


图 5 IEEE118 节点中关键节点移除后的网络传输效率值
Fig. 5 Network transmission efficiency value after critical node removal in IEEE118-bus system

综上所述, 根据网络传输效率的变化以及全部关键节点移除对应的数值分析可知, 本文所提的辨识方法同时兼顾节点电压和传输转移特性, 得到的辨识结果可以反映出对电网安全和供电能力有重要影响的节点。因此, 从电网的传输能力角度, 进一步验证了所提辨识方法的有效性和优越性。

4 结论

本文考虑节点间的传输转移特性, 提出了考虑不同类型节点与相邻节点间传输转移的信息值及节点间非等概率传输特性的改进 PageRank 算法进行关键节点的辨识。理论分析、仿真测试以及验证对比表明:

1) 从静态分析角度, 根据节点在功率传输路径中的不同特点将节点划分为电源节点、中间节点和终端节点, 并引入虚拟节点。将表征节点与其链接节点间传输转移的信息值映射到链接矩阵形成电气传输转移矩阵, 使得关键节点的辨识更加符合电网的实际传输特性。

2) 考虑节点间非等概率传输特性, 通过对 PageRank 算法进行改进而得到电气 Google 矩阵。并结合节点电压值、节点度和节点传输转移特性形成辨识指标进行关键节点辨识, 使得电网关键输电线路的辨识结果更加准确全面。

3) 对已辨识的关键节点进行蓄意静态故障攻击, 通过分析网络效能指标的变化, 并与现有方法结果进行对比分析, 表明本文方法辨识的关键节点遭受故障对电网的传输能力影响较大, 验证了本文关键节点辨识方法的正确性与优越性。

参考文献

- [1] EISENBERG D A, PARK J, SEAGER T P. Linking cascading failure models and organizational networks to

- manage large-scale blackouts in South Korea[J]. *Journal of Management in Engineering*, 2020, 36(5).
- [2] 樊陈, 姚建国, 张琦兵, 等. 英国“8·9”大停电事故振荡事件分析及思考[J]. *电力工程技术*, 2020, 39(4): 34-41.
FAN Chen, YAO Jianguo, ZHANG Qibing, et al. Reflection and analysis for oscillation of the blackout event of 9 August 2019 in UK[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2020, 39(4): 34-41.
- [3] 严道波, 文劲宇, 杜治, 等. 2021年德州大停电事故分析及其对电网规划管理的启示[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(9): 121-128.
YAN Daobo, WEN Jinyu, DU Zhi, et al. Analysis of Texas blackout in 2021 and its enlightenment to power system planning management[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(9): 121-128.
- [4] 栗然, 靳保源, 张凡, 等. 基于图谱理论的电力系统关键节点识别方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(11): 14-22.
LI Ran, JIN Baoyuan, ZHANG Fan, et al. Identification method of key nodes in power system based on graph theory[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(11): 14-22.
- [5] 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 identification method of key nodes in electric power communication network[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(1): 44-49.
- [6] 王佳裕, 顾雪平, 王涛, 等. 一种综合潮流追踪和链接分析的电力系统关键节点识别方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(6): 22-29.
WANG Jiayu, GU Xueping, WANG Tao, et al. An identification method of key nodes in power system based on integrated power flow tracing and link analysis[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(6): 22-29.
- [7] 许进, 秦文萍, 宋述勇, 等. 系统薄弱点电压分布特性分析及识别方法[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(1): 158-167, 352.
XU Jin, QIN Wenping, SONG Shuyong, et al. Analysis and identification method of power system weak bus based on bus voltage distribution characteristic[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(1): 158-167, 352.
- [8] MOGER T, DHADBANJAN T. A novel index for identification of weak nodes for reactive compensation to improve voltage stability[J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2015, 9(14): 1826-1834.
- [9] KUMAR D S, SAVIER J S, BIJU S S. Micro-synchrophasor based special protection scheme for distribution system automation in a smart city[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2020, 5(7): 97-110.
- [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): 87-93.
NI Lianghua, WEN Jiayan, ZHANG Xiaolian, et al. Identification of critical power lines based on vulnerability of impact and disconnection[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(1): 87-93.
- [11] 李昌超, 康忠健, 于洪国, 等. 考虑电力业务重要性的电力通信网关键节点识别[J]. *电工技术学报*, 2019, 34(11): 2384-2394.
LI Changchao, KANG Zhongjian, YU Hongguo, et al. Identification of key nodes in power communication network considering the importance of power business[J]. *Transactions of the China Electrotechnical Society*, 2019, 34(11): 2384-2394.
- [12] LIU B, LI Z, CHEN X, et al. Recognition and vulnerability analysis of key nodes in power grid based on complex network centrality[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2018, 65(3): 346-350.
- [13] ADEBAYO I, JIMOH A A, YUSUFF A. Voltage stability assessment and identification of important nodes in power transmission network through network response structural characteristics[J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2017, 11(6): 1398-1408.
- [14] 苗友忠, 李顺昕, 雷为民, 等. 考虑用户负荷类型的含分布式电源的配电网可靠性评估[J]. *电力科学与技术学报*, 2020, 35(2): 93-99.
MIAO Youzhong, LI Shunxin, LEI Weimin, et al. Reliability evaluation of distribution network with distributed generation considering customer sectors[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2020, 35(2): 93-99.
- [15] 徐岩, 郅静. 基于改进节点电气介数的电网关键节点辨识[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2017, 29(9): 107-113.
XU Yan, ZHI Jing. Identification of key nodes in power grid based on improved node electric betweenness[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2017, 29(9): 107-113.
- [16] 戚振彪, 凌松, 刘文辉, 等. 基于高频测试信号注入的配电网故障节点在线识别方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(4): 116-123.
QI Zhenbiao, LING Song, LIU Wenyue, et al. On-line identification method of fault nodes in distribution network based on high-frequency test signal injection[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(4): 116-123.
- [17] 林冠强, 莫天文, 叶晓君, 等. 基于TOPSIS和CRITIC法的电网关键节点识别[J]. *高电压技术*, 2018, 44(10): 3383-3389.
LIN Guanqiang, MO Tianwen, YE Xiaojun, et al. Critical

- node identification of power networks based on TOPSIS and CRITIC methods[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(10): 3383-3389.
- [18] LIN Z, WEN F, WANG H, et al. CRITIC-based node importance evaluation in skeleton-network reconfiguration of power grids[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2018, 65(2): 206-210.
- [19] 王炫丹, 李华强, 廖烽然, 等. 基于电压抗干扰因子与综合影响因子的电网关键节点辨识[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(4): 82-88, 125.
- WANG Xuandan, LI Huaqiang, LIAO Fengran, et al. Critical node identification of power grid based on voltage anti-interference factors and comprehensive influence factors[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(4): 82-88, 125.
- [20] 丰皓, 李华强, 王羽佳, 等. 计及抗干扰能力和影响力的节点综合脆弱性评估方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(6): 90-96.
- FENG Hao, LI Huaqiang, WANG Yujia, et al. Comprehensive vulnerability assessment method for nodes considering anti-interference ability and influence[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2017, 29(6): 90-96.
- [21] 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.
- [22] 许立雄, 刘俊勇, 刘洋, 等. 节点重要度的分类综合评估[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(10): 1609-1617.
- XU Lixiong, LIU Junyong, LIU Yang, et al. Node importance classified comprehensive assessment[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(10): 1609-1617.
- [23] LI C, LIU W, CAO Y, et al. Method for evaluating the importance of power grid nodes based on PageRank algorithm[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2014, 8(11): 1843-1847.
- [24] 姜盛波, 杨军, 吴赋章, 等. 基于改进 PageRank 算法的电网关键节点辨识方法[J]. 电力建设, 2018, 39(11): 34-41.
- JIANG Shengbo, YANG Jun, WU Fuzhang, et al. Identification of critical node in power grid based on modified PageRank algorithm[J]. Electric Power Construction, 2018, 39(11): 34-41.
- [25] 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.
- [26] 张喜平, 李永树, 刘刚, 等. 节点重要度贡献的复杂网络节点重要度评估方法[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2014, 11(3): 26-32, 49.
- ZHANG Xiping, LI Yongshu, LIU Gang, et al. Node importance evaluation method for complex networks based on the importance of nodes[J]. Complex Systems and Complexity Science, 2014, 11(3): 26-32, 49.
- [27] 周漩, 张凤鸣, 李克武, 等. 利用重要度评价矩阵确定复杂网络关键节点[J]. 物理学报, 2012, 61(5): 1-7.
- ZHOU Xuan, ZHANG Fengming, LI Kewu, et al. Finding vital node by node importance evaluation matrix in complex networks[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(5): 1-7.
- [28] 刘威, 张东霞, 丁玉成, 等. 基于随机矩阵理论与熵理论的电网薄弱环节辨识方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(20): 5893-5901.
- LIU Wei, ZHANG Dongxia, DING Yucheng, et al. Power grid vulnerability identification methods based on random matrix theory and entropy theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(20): 5893-5901.
- [29] 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.
- [30] BOMPARD E, NAPOLI R, XUE F. Extended topological approach for the assessment of structural vulnerability in transmission networks[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2010, 4(6): 716-724.
- [31] WANG H, SHAN Z, YING G, et al. Evaluation method of node importance for power grid considering inflow and outflow power[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2016, 5(5): 1-8.
-
- 收稿日期: 2021-05-14; 修回日期: 2021-07-11
- 作者简介:
- 朱大锐(1984—), 男, 博士, 讲师, 研究方向为复杂网络理论在电气工程中的应用; E-mail: zhudarui@xaut.edu.cn
- 王睿(1994—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统脆弱性评估; E-mail: wangr25@163.com
- 程文姬(1996—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统安全性分析. E-mail: cheng18292875258@163.com
- (编辑 葛艳娜)