

DOI: 10.7667/PSPC160434

# 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

王佳裕, 顾雪平, 王涛, 张尚

(华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071003)

**摘要:** 将一种基于链接分析的思路应用于电力系统安全评估, 结合潮流追踪技术提出一种考虑系统运行状态的关键节点识别方法。基于潮流追踪结果定义了系统节点链接强度以及负荷重要性评价的新指标, 并利用系统链接强度同时考虑系统实际潮流方向建立了电网的加权有向图。借鉴基于链接分析的 PageRank 算法思路, 建立了基于电网加权有向图链接强度的节点重要度计算评价模型, 实现了关键节点的有效识别。所提出的识别方法可基于系统当前实际网络结构和潮流分布, 从电网全局能量传输的角度, 识别出对系统安全运行起关键作用的重要节点。利用 IEEE39 节点系统作为算例对所提出的关键节点识别方法进行了验证, 并通过与已有的关键节点识别方法进行比较, 表明该方法所得到的辨识结果更加符合电力系统的运行实际。

**关键词:** 关键节点辨识; 潮流追踪; 链接分析; 节点重要度; 电力系统安全评估

## Power system critical node identification based on power tracing and link analysis method

WANG Jiayu, GU Xueping, WANG Tao, ZHANG Shang

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

**Abstract:** A kind of link analysis sorting method is applied to power system security assessment. A critical node identification method combined with power tracing technique is proposed. Based on result of the power trace, a new index of system node link strength and evaluation of load importance is defined. Power grid weighted directed graph is established by utilizing system node link strength with system actual power flow direction. Inspired by the idea of Pagerank Algorithm based on link analysis, the computational model of node importance evaluation based on power grid weighted directed graph is established and the critical node effective identification is realized. The proposed identification method bases on the system actual grid topology and power flow distribution, from the view of the global grid energy transmission to identify the key node of system safe operation. The proposed method is verified by taking IEEE-39 system as an example and compared with the existing method. The verification result indicates that this method is more consistent with the system actual operation state.

This work is supported by Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 13MS108).

**Key words:** critical node identification; power trace; link analysis; node importance; power system security assessment

## 0 引言

近年来, 世界范围内由于电网连锁故障引起的大规模停电事故时有发生。例如: 2012年“印度大停电”事故, 国内2012年“深圳大停电”等<sup>[1-2]</sup>。这些事故的发生对国民经济和电力系统的稳定造成了巨大的影响, 对电力系统的安全运行和大停电事故预防提出了更严峻的挑战。通过对这些事故的分

析, 可以发现, 往往是由某一元件(环节)发生故障后逐渐扩大, 最后系统迅速崩溃。这些系统元件(环节)往往出现在系统重载线路、潮流集中区域, 或者负荷密集区域。如何识别对系统安全运行发挥关键作用的节点, 并对其加强监视和控制, 对提高系统稳定性和安全性、减小大停电事故发生几率有着重要的意义。

文献[3]建立加权电网拓扑模型, 提出以节点“结构负荷”来辨识关键节点。文献[4-7]考虑拓扑位置影响, 利用节点/支路介数指标, 即节点或支路

被母线间最短路径经过的次数来表征关键性。文献[8]提出结合复杂网络理论和网络最大流理论,从全局预防的角度出发解释电网结构的关键环节。单从电网结构考虑难免片面,为了综合考虑网络结构和运行状态研究,文献[9]提出了“电气介数”概念,结合能量函数模型,提出了节点结构脆弱因子来筛选薄弱节点。文献[10-11]在潮流追踪基础上提出了“功率介数”、“潮流介数”的概念弥补现有模型假设系统潮流沿最短路径流动的不足,其物理背景更贴合电力系统的实际。文献[12]基于源流路径链生成算法,搜索源流节点对间的所有潮流传输路径,用该路径定义输电介数指标。文献[13]基于条件云发生器的云语言预测规则,在此基础上提出了基于云推理的电网故障率预测模型。文献[14]在传统年均值模型的基础上建立了不同时间尺度、不同气象灾害类型下的元件故障模型,并依据此模型进行电网可靠性评估。以往研究工作主要利用了复杂网络介数指标来评价电力系统中的关键环节,介数定义要求大部分模型都需要寻找例如:“发电—负荷”节点对之间经过被评价节点最短路径,计算量较大。同时仅从系统结构评价得到的重要节点不能很好地反映电网实际运行状态对节点重要度的影响。目前,除基于潮流追踪技术的识别方法之外,所有识别方法基本都采用电力网络的无向图模型,无法考虑能量流动的方向性。考虑能量流动的方向性来评价节点的重要度,将更充分地反映系统运行方式对电网运行安全性的影响。

基于以上考虑,本文基于潮流追踪算法,提出了电网节点的“链接强度”概念,定义了负荷重要性判断指标。引入基于链接分析的 PageRank 算法思想,从电网全局拓扑结构考虑,考虑能量流动的方向性,建立了节点重要度的评价模型。该方法避免了基于介数评价的方法中介数计算的繁重计算量,使得该识别方法能够满足系统在线评估要求,同时从建模思路更加符合系统能量流动的特点,所得到的识别结果更加符合电力系统的运行实际。采用 IEEE39 节点算例对本文的识别方法进行了验证,并与已有的识别方法进行了结果的比较,表明本文方法具有更高的计算速度,并且能够更好地反映系统运行方式的影响。

## 1 基于潮流追踪与 PageRank 算法的关键节点识别思路

### 1.1 潮流追踪算法

潮流追踪由 Bialek 和 Kirschen 在 1996—1997

年提出,目的是为了找到发电机、负荷、线路三者间的功率分布关系,明确发电机对负荷的功率分配(或负荷对发电机的功率汲取)、发电机对线路的功率分配以及负荷对线路的功率汲取。

根据潮流计算或者状态估计结果,本文通过应用功率分配解析模型算法<sup>[15]</sup>对系统进行潮流追踪。

$$\begin{cases} \mathbf{K} = \mathbf{k}_{ij} = \mathbf{E}^T (\mathbf{P}_{\text{GG}})^{-1} \mathbf{A}^{-1} \\ P_{G_i \rightarrow j} = \sum_{j=1}^n k_{ij} P_{L_j} \\ P_{G_i \rightarrow L(s,t)} = k_{is} P_{L(s,t)} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{E}$  为单位矩阵;  $\mathbf{P}_{\text{GG}} = \text{diag}(P_{G1}, P_{G2}, \dots, P_{Gn})$ ;  $\mathbf{A}$  为顺流分配矩阵;  $P_{G_i \rightarrow j}$  为发电机  $G_i$  流向负荷节点  $j$  的功率分配;  $P_{G_i \rightarrow L(s,t)}$  为发电机  $G_i$  流向线路  $L(s,t)$  的功率分配。

通过对式(1)的计算可以得到发电机对线路流过功率以及节点负荷的贡献量,以及负荷对发电机发出功率的汲取量。比较一般利用直接潮流计算结果建立电力系统加权有向图,采用潮流跟踪技术可以确定各发电机和负荷节点之间的功率分配关系,发电机和负荷对输电线路的实际使用程度。利用以上所得结果,得到的系统评价指标能够更好地符合电力系统的物理背景。因此,利用潮流追踪结果反映系统重要环节更加有效。

### 1.2 PageRank 算法

为了解决互联网中重要节点的排序问题,斯坦福大学 Sergey Brin 和 Larry Page 于 1998 年提出 PageRank 算法。该算法从提出至今,在各领域得到了广泛的应用,包括 Google 搜索引擎、神经科学、交通网络等<sup>[16]</sup>。如图 1 所示,该算法将整个互联网表示为一个有向图,其中网页代表了各个节点,而节点关联边代表了各节点之间的链接。

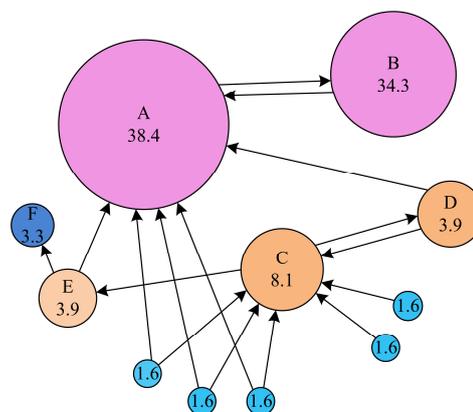


图 1 PageRank 算法示意图

Fig. 1 PageRank algorithm sketch drawing

代表一个节点重要性的  $PR$  值由链入其节点的  $PR$  值和其自身的  $PR$  值共同确定。在 PageRank 算法中,  $PR$  值的计算以迭代的方式实现, 具体迭代公式如式(2)。

$$PR(p_i) = \frac{1-\sigma}{N} + \sigma \sum_{p_j \in M(p_i)} \frac{PR(p_j)}{L(p_j)} \quad (2)$$

其中:  $\{p_1, p_2, \dots, p_N\}$  为被研究网络节点集合;  $M(p_i)$  为指向  $p_i$  的节点集合;  $L(p_j)$  是  $p_j$  链出节点数量;  $N$  为网络所有节点数量;  $\sigma$  为算法阻尼系数, 用来保证算法的收敛性, 一般推荐设置为 0.85。

将式(2)改写成更加简洁的矩阵形式, 如式(3)。

$$\begin{aligned} PR^{(k+1)T} &= PR^{(k)T} G \\ G &= (\sigma S + \frac{(1-\sigma)}{N} ee^T) \end{aligned} \quad (3)$$

式中:  $S$  为经过行归一化的链接矩阵;  $\frac{(1-\sigma)}{N} ee^T$  是为消除网络悬挂节点而建立的随机跳转矩阵, 用来保证算法的收敛性。

对式(3)中  $PR$  向量可以看作状态转移矩阵为  $G(N \times N)$  的马尔可夫链稳态向量, 因此对 Pagerank 算法作如下理解: 对于  $N$  个节点的网络, 每一个节点都存在  $\frac{(1-\sigma)}{N}$  的内在重要性, 如果节点  $p_i$  的重要性为  $P_i$ , 那么该节点会贡献  $\sigma P_i$  的重要性, 这个重要性由该节点所指向的节点共同分享, 对整个网络进行迭代计算后得到的稳态值  $PR$  向量, 得到的  $PR$  值越大的节点则代表在网络中位置越重要。

### 1.3 关键节点识别思路

本文将 Pagerank 思想应用到电力系统关键节点的评估与识别。将电力能量流看作影响电网节点重要性的因素, 将体现电网节点链接重要性的节点链接矩阵看作矩阵  $G$ , 将每个节点看作一个马尔可夫状态, 那么对于各个节点的马尔可夫稳态向量分布  $(PR_1, PR_2, \dots, PR_n)^T$ ,  $PR_i$  即代表了电能在电网节点  $i$  上对整体网络的影响,  $PR_i$  值越大则该节点  $i$  越重要。因此, 本文关键节点的定义为, 在实际电网运行中对电网输电能力和运行安全有着重要影响的节点。

通过以上分析, 可以得到辨识方法的关键在于建立符合电网实际的节点链接矩阵  $G$ 。而电网与互联网之间的链接权值在确定上存在较大的差异。首先, 网络链接关系大部分是由互联网用户来决定的, 其带有较大的随机性, 并且对于互联网来说其样本空间过于巨大, 其数量为数十亿级别。为了完成对

大量页面的分析, PageRank 算法将模型在迭代过程中链接权值仅按照当前页面的出度平均分配, 在权值分配中平等对待链出的每个节点, 并没有考虑各个节点本身的重要性。对于电网这样一个能量传输系统来说, 在当前系统运行情况下, 其潮流大小和指向应该是确定的, 因此对待节点链接权值分配应该由实际线路潮流情况决定。其次, 在实际运行中, 大负荷节点以及发电节点对于电网的重要性也需要在设定计算模型中加以考虑。

综上, 本文在建立电力网络的加权有向图模型、负荷节点重要度这两点的基础上, 结合 Pagerank 思想对电力系统进行了关键节点排序。首先, 利用潮流追踪结果, 着重考虑发电机对于系统线路的能量分配制定节点链接边权, 得到电力系统实时反映节点间链接关系的加权有向图模型。其次, 考虑发电机对系统各个节点负荷的能量分配制定负荷节点重要程度, 在迭代计算中提高重要负荷节点的评估值。

## 2 电网加权有向模型建立

### 2.1 节点链接强度

结合功率输送关系, 本文重点考虑了发电机对系统中线路和节点的贡献。从功率能量角度考虑, 系统中的所有能量由发电机给予, 根据发电机发电量大小确定该发电机在系统能量供应中所处的地位, 定义发电机重要性权重  $\eta_{G_k}$ , 如式(4)。

$$\eta_{G_k} = P_{G_k} / \sum P_G \quad (4)$$

式中:  $P_{G_k}$  为机组  $G_k$  发电量;  $\sum P_G$  为系统总发电量。结合发电机重要性权重, 进一步考虑发电机对线路的功率分配。定义了一种基于潮流追踪结果的系统节点链接强度, 利用该强度来表征各个节点之间的链接权值。定义节点链接强度如式(5)。

$$\omega_{\text{Line}}(v_i, v_j) = \sum_{k=1}^n \eta_{G_k} \cdot P_{G_k \rightarrow L(v_i, v_j)} \quad (5)$$

式中:  $n$  为系统机组数;  $v_i, v_j$  为线路  $L(v_i, v_j)$  两端的节点号;  $P_{G_k \rightarrow L(v_i, v_j)}$  为机组  $G_k$  在线路  $L(v_i, v_j)$  的功率分配;  $\eta_{G_k}$  为发电机  $G_k$  的重要性权重。

通过以上定义可以得出, 系统链接强度的意义在于链接权值较大的线路其潮流成分可能来自于较重要的机组, 或者来自于多台机组, 来自于重要机组的功率其重要性不言而喻, 而一条线路中拥有多台机组提供的功率表征了该线路在系统中处于多台机组的供电路径上, 若将其断开可能造成较大的潮流转移。该链接强度同时考虑了在潮流深度和广度上反映出了系统中的能量分布情况。

## 2.2 节点负荷权重

类比刚刚对于线路链接强度的定义, 发电机节点对于每个负荷节点的功率分配, 计及各个发电机在系统中的重要性, 本文提出用一类负荷权重表示, 如式(6)。

$$\omega_{\text{load}}(j) = \sum_{i=1}^N P_{G_i \rightarrow j} \cdot \eta_{G_i} \quad (6)$$

式中:  $N$  为系统发电机数;  $P_{G_i \rightarrow j}$  为发电机  $G_i$  对于节点  $j$  的功率分配;  $\eta_{G_i}$  为发电机  $G_i$  的重要性权重。

定义该指标的意义在于, 对于某一给定负荷, 其重要度越高则意味着从重要机组吸取功率, 或者该节点吸取了多台机组的功率, 对于吸取多台机组功率的负荷节点, 在系统潮流中显然处于一个较中心的位置。该指标表现出, 节点负荷在系统当前潮流下的电气位置的重要度。

为了防止节点负荷权重过大导致失真, 对节点负荷权重进行归一化处理:

$$\omega'_{\text{load}}(i) = 1 + \frac{\omega_{\text{load}}(j)}{\sum_{j=1}^N \omega_{\text{load}}(j)} \quad (7)$$

通过以上定义的相关指标, 本文借鉴 PageRank 算法思想, 将系统链接强度作为重要性排序因素, 并且综合考虑系统负荷重要性, 提出一种新的电力系统关键节点的辨识方法, 在此简称为 PowerTrace Rank 算法。

## 3 PowerTrace Rank 算法

在一个具有  $n$  个节点的电力网络中, 假定节点  $v$ , 其链接来自于  $v_1, v_2, \dots, v_l$ ,  $\omega_{\text{line}}(v_i, v)$  为链接节点  $v_i$  和  $v$  的系统链接强度权值, 则应用 PowerTrace Rank 算法计算节点关键度的公式如式(8)。

$$\begin{aligned} PT(v) &= \frac{1-\sigma}{n} + \sigma \sum_{i=1}^l \omega'_{\text{load}}(v_i) \frac{\omega_{\text{line}}(v_i, v)}{S_{\text{out}}(v_i)} PT(v_i) = \\ &= \frac{1-\sigma}{n} + \sigma \sum_{i=1}^l \omega'_{\text{load}}(v_i) \frac{\omega_{\text{line}}(v_i, v)}{\sum_{j=1}^{m_i} \omega_{\text{line}}(v_i, z_j)} PT(v_i) \end{aligned} \quad (8)$$

式中:  $PT(v_i)$  为指向节点  $v$  的节点源  $v_i$  自身的  $PT$  节点关键值;  $\sum_{j=1}^{m_i} \omega_{\text{line}}(v_i, z_j)$  为节点源  $v_i$  的出链强度  $S_{\text{out}}(v_i)$ , 其中  $V_{\text{out}}(v_i) = \{z_1, z_2, \dots, z_{m_i}\}$ , 即节点源  $v_i$  与包括节点  $v$  在内的  $z_1, z_2, \dots, z_{m_i}$  等  $m_i$  个节点直接相连, 节点  $v$  获得节点  $v_i$  的权值并考虑节点  $v$  本身

负荷重要度可表示如下:

$$\omega'_{\text{load}}(v_i) \frac{\omega_{\text{line}}(v_i, v)}{\sum_{j=1}^{m_i} \omega_{\text{line}}(v_i, z_j)} \quad (9)$$

通过该权重可以改进对原始 PageRank 中仅将链接权值按照当前节点出度平均分配, 在权值分配中平等对待链出的每个节点, 本文对不同的链接给予不同权值并且考虑节点负荷的重要度。

通过上文定义, 得到系统链接强度矩阵如式(10)。

$$W = (w_{ij})_{n \times n} = \begin{cases} \omega_{\text{Line}}(v_i, v_j), & (v_i, v_j) \in L \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $L$  为系统线路集;  $\omega_{\text{Line}}(v_i, v_j)$  为两节点之间的链接强度, 若节点之间不存在线路链接则取 0。将系统链接强度矩阵  $W$  每行除以该行元素总和, 进行归一化, 得到新链接强度矩阵  $Q$ , 该矩阵用来描述一个节点到达另一个节点的链接强度关系:

$$Q = \left( w_{ij} / \sum_{k=1}^n w_{ik} \right)_{n \times n} \quad (11)$$

引入归一化后负荷重要度因子矩阵为

$$\Psi_{\text{load}} = \text{diag} \begin{bmatrix} \omega'_{\text{load}}(1) \\ \omega'_{\text{load}}(2) \\ \vdots \\ \omega'_{\text{load}}(n) \end{bmatrix} \quad (12)$$

将链接强度矩阵加入节点负荷重要因子得到改进链接矩阵  $Q'$  为

$$Q' = \Psi_{\text{load}} Q \quad (13)$$

根据以上矩阵得到 PowerTrace Rank 矩阵  $\tilde{A}$ , 由式(9)得到。

$$\tilde{A} = (1-\sigma)/n E + \sigma Q' \quad (14)$$

因此, 迭代式(8)化为如下形式:

$$PT(k) = \tilde{A} PT(k-1) = (\tilde{A})^k PT(0) \quad (15)$$

根据式(15), 电网节点的关键度计算流程如图 2。

## 4 算例分析

为了验证本文算法的有效性和正确性, 选用了 IEEE39 节点系统作为算例系统, 如图 3 所示。该系统为北美新英格兰州的一个区域电力网, 共有 10 台发电机, 19 个负荷点和 46 条线路; 其中, 30 到 39 号节点为机组节点, 31 号机为系统平衡机。

### 4.1 关键节点辨识结果

利用 Matlab 编程, 实现上文算法, 计算 PT 值,

对得到结果(PT 值)进行排序, 得到系统关键节点排序, 如表 1 所示。

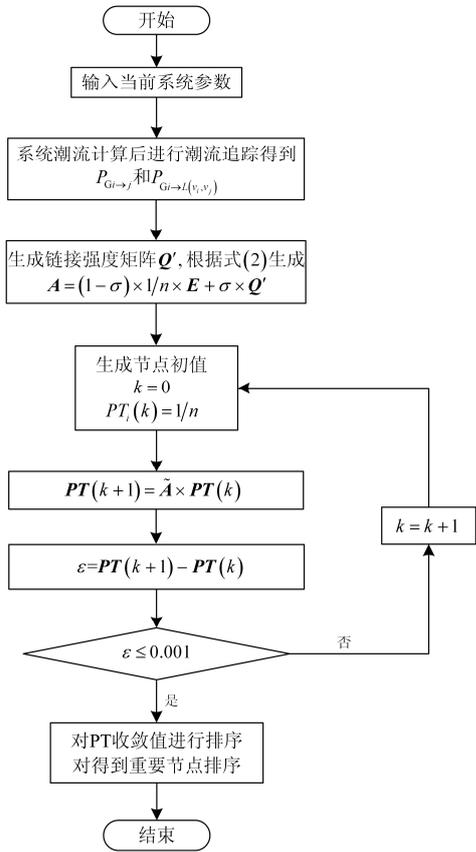


图 2 PowerTrace Rank 算法流程

Fig. 2 PowerTrace Rank algorithm flowchart

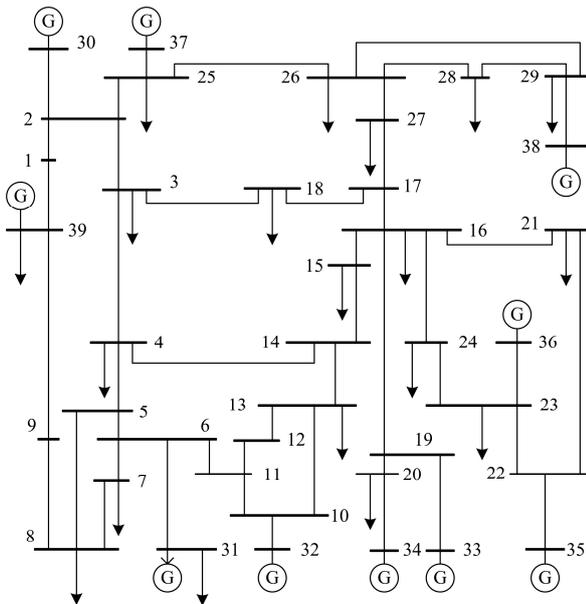


图 3 IEEE 39 节点系统接线

Fig. 3 Connection diagram of IEEE 39-bus system

表 1 关键节点辨识结果

Table 1 Critical node identification result		
排序	节点	PT 值
1	32	0.1415
2	35	0.1157
3	38	0.1104
4	33	0.066
5	10	0.0638
6	22	0.0518
7	31	0.0455
8	11	0.039
9	29	0.0303
10	19	0.0303
11	6	0.029
12	37	0.0256
13	36	0.0238
14	21	0.0226
15	16	0.0155
16	25	0.0141
17	13	0.0134
18	23	0.012
19	5	0.0112
20	28	0.011

将表 1 进行可视化如图 4 所示。

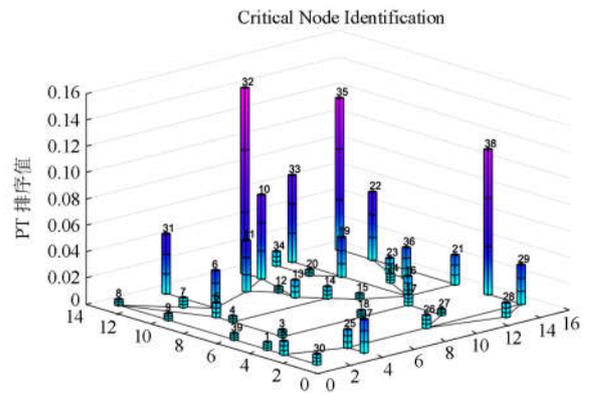


图 4 系统节点重要度识别

Fig. 4 Critical node identification

系统中位于较重要的节点分布如图 4 所示。其中节点 32, 35, 38 在节点重要度中处于最重要的位置, 系统设置中这 3 个节点都为发电机节点, 其发电量分别为 650 MW, 650 MW, 820 MW, 在系统中都属于大功率发电机组。对于一个实际系统, 大功率发电机组作为电力能量的主要源头在能量传输中拥有最高的地位也是合理的, 这也证明了算法在系统能量传输的角度上能够辨识出处于关键位置的节点。

#### 4.2 与其他辨识方法的结果比较

为了同其他重要度评价方法得到的结果进行对

比, 本文分别采用功率介数法和拓扑介数法对该系统进行了关键节点的排序计算。采用的计算机实验平台为 Intel Core-i7-2640M 2.8 GHz, 内存 8 GB。本文方法和其他两种方法的计算时间分别为 0.289 s、4.533 s 和 1.551 s, 充分表明本文方法的计算效率高。本文方法的结果剔除发电机节点后的重要度排序前 10 的节点与其他两种方法的排序结果如表 2 中所示。

表 2 关键节点辨识结果对比

Table 2 Comparison of critical node identification result

排序	PT Rank	功率介数	拓扑介数
1	10	10	16
2	22	6	17
3	11	22	14
4	29	7	2
5	19	8	26
6	6	11	3
7	21	31	5
8	16	23	18
9	25	24	25
10	13	5	4

将数据可视化如图 5 所示。

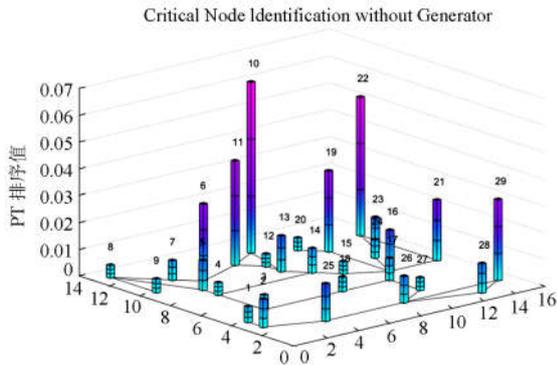


图 5 去除发电机后系统节点重要度辨识

Fig. 5 Critical node identification without generator

与其他两种排序结果进行比较, 本算法同功率介数算法得到的排序有一定的相似性, 这是由于本文方法与功率介数算法同样使用了潮流追踪, 并将其结果作为分析依据。而同节点介数排序具有较大差异性的原因在于, 节点介数只考虑系统拓扑结构而没有考虑系统潮流分布, 本文方法综合从系统潮流分配和拓扑两方面来进行排序更加全面。

通过观察 IEEE 39 节点系统图可以发现, 在表 3 PT Rank 排名前 10 的节点中, 节点 10, 22, 19, 29, 25, 6 都为系统中直连发电机的节点。若将其断开则代表了直接相连的发电机从系统中去除, 这几个节点退出运行将对系统供电安全性造成巨大的影响。值

得一提的是节点 39, 在系统中 39 节点本身作为最大的发电机组拥有 1000 MW 的发电能力, 但是由于 39 节点本地负荷为 1104 MW, 标准算例如此设定, 可能是该节点在运行时若出现故障则同时会丢失负荷和电源, 该电源、负荷之间的联系较为紧密所致。为了更加合理地评价节点重要性, 本文将 39 节点分列为 39、40 节点, 一个发电节点和一个负荷节点, 并对新算例进行计算得到如表 3 所示结果。

表 3 算例更改后的辨识结果

Table 3 Identification result after case change

排序	Pt 值	节点
1	0.115 704 304 177 586	32
2	0.097 531 271 250 439 2	35
3	0.084 976 665 947 942 9	33
4	0.058 812 485 362 138 2	38
5	0.055 030 824 361 465 5	37
6	0.050 983 503 148 263 5	10
7	0.049 234 839 210 929 3	39
8	0.048 072 942 493 725 8	22
9	0.038 493 103 217 379 7	36
10	0.035 810 294 401 565 8	19
11	0.033 767 312 781 727 9	3
12	0.028 426 732 249 188 3	25
13	0.026 729 661 765 284 4	11
14	0.024 728 594 203 170 6	2
15	0.022 871 467 206 130 1	21
16	0.021 791 731 252 059 6	31
17	0.020 624 241 802 963 9	29
18	0.020 597 804 460 014 6	6
19	0.017 555 390 146 473 0	16
20	0.015 839 826 849 716 9	13
21	0.014 729 472 918 271 9	40
22	0.013 436 406 909 651 2	23

可以看到 39 和 40 这两个节点在关键节点辨识中地位被大幅度提高, 但还是略低于之前评价的各关键节点。通过潮流计算结果, 对于 39~40 节点供电中, 潮流追踪结果其供电成分较为单一, 仅仅只有 39、30 节点供电, 并且大部分的电能来自于 39 节点, 故 39~40 该线路系统中潮流成分并不复杂。因此, 该输电通道在设定模型中的权值较其他对于发电机供电较多负荷的输电通道稍低, 造成如上的排序结果。在计算时间上耗时 0.329 s, 该结果也能佐证本文评估结果能够应对不同时刻的潮流变化, 较为迅速地给出关键节点的辨识结果。剩余的节点中可以观察到, 节点 16, 25 在拓扑介数评价中也处于靠前排名, 这两个节点在网络结构上也处于中心

的位置，对电网拓扑结构也有着较重要的影响。综上，本文提出的辨识方法，同时兼顾了潮流和结构的影响，得到的辨识结果能够反映出实际运行中对电网供电能力和安全运行有着重要影响的节点。

### 4.3 识别效果的验证评价

为了验证本文方法的有效性，将本文结果同节点功率介数和节点拓扑介数结果进行比较。采用文献[10]中节点过负荷静态攻击对得到的排序结果进行验证，该验证方式对节点进行节点负荷攻击，按照重要度排序顺序将每个负荷节点按照一定比例增加负荷，计算每次负荷增加之后的潮流熵直至系统潮流不收敛。潮流熵描述了某确定状态下系统内部能量的分布均匀度，潮流熵越大，系统能量分布越不均匀。潮流熵越小，系统能量分布越均匀，系统也就越稳定。

利用节点负荷攻击针对以下 3 种方式进行仿真，观察网络效能变化。方式 1：根据 PT Rank 排序结果，对节点进行负荷攻击，后计算潮流熵；方式 2：根据节点拓扑介数排序结果，对节点进行负荷攻击，后计算潮流熵；方式 3：根据功率介数排序结果，对节点进行负荷攻击，后计算潮流熵。图 6 为不同攻击方式下系统潮流熵的变化结果。

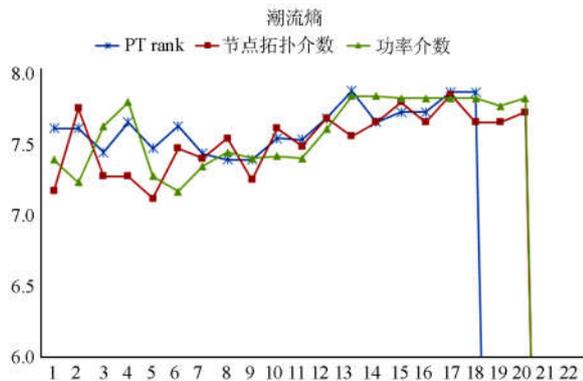


图 6 攻击不同节点评估方式下的系统状态变化

Fig. 6 Different node assessment system state change under attack

由图 6 所示，在节点负荷攻击下，3 种方式都发生了潮流熵波动。通过对数据的分析可以得到：利用方式 1，PT RANK 排序在攻击下得到的结果，潮流熵波动在 3 种方式处于最大的节点序为 1, 5, 6, 7, 11, 12, 13, 17, 18；利用方式 2，节点拓扑介数排序在攻击下得到的结果，潮流熵波动在 3 种方式处于最大的节点序为 2, 8, 9；利用方式 3：功率介数排序在攻击下得到的结果，潮流熵波动在 3 种方式处于最大的节点序为 3, 4, 9, 14, 15, 16。结果说明相对

于其他方法，利用 PT Rank 得到的系统关键辨识结果，在大部分的攻击情况下会使得系统的能量分布更加混乱。同时，在方式 1 攻击下第 18 次后系统潮流就已经发散，而方式 2、方式 3 都在攻击 20 次后系统潮流才发散。根据该结果，也能佐证本文提出的方法相较于其他评估方式拥有更加准确的结果。

## 5 结论

本文结合链接分析思路和潮流追踪技术提出一种考虑系统运行状态的关键节点识别方法。该方法结合电网实际运行状态，从电力系统全局能量供应角度考虑，制定了节点链接强度和负荷重要性评价指标，采用基于链接分析的 PageRank 算法思路，实现了电网关键节点的有效辨识。该方法同时考虑了电网拓扑结构和实际运行状态对节点重要性的影响，避免了大部分研究只考虑电网拓扑或者只考虑电网功率分布的片面性，并且比基于介数评价的识别方法计算速度更快，更适合在线应用。IEEE39 节点系统的算例结果验证了本文方法的有效性，与已有方法的结果比较表明本文方法的识别结果更加符合电力系统的运行实际。

## 参考文献

[1] 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.  
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.

[2] 张良栋, 石辉, 张勇军. 电网事故原因分类浅析及其预防策略[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(4): 130-133, 150.  
ZHANG Liangdong, SHI Hui, ZHANG Yongjun. Analysis of causes and prevention methods for power network accidents[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(4): 130-133, 150.

[3] 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.

[4] 刘艳, 顾雪平. 基于节点重要度评价的骨架网络重构[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(10): 20-27.  
LIU Yan, GU Xueping. Node importance assessment based skeleton-network reconfiguration[J]. Proceedings of the

- CSEE, 2007, 27(10): 20-27.
- [5] 王仁伟, 张友刚, 杨阳, 等. 基于电气介数的复杂电网脆弱线路辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(20): 1-6.  
WANG Renwei, ZHANG Yougang, YANG Yang, et al. Vulnerable line identification of complex power grid based on electrical betweenness[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(20): 1-6.
- [6] 陈晓刚, 孙可, 曹一家. 基于复杂网络理论的大电网结构脆弱性分析[J]. 电工技术学报, 2007, 22(10): 138-144.  
CHEN Xiaogang, SUN Ke, CAO Yijia. Structural vulnerability analysis of large power grid based on complex network theory[J]. Transactions of China Electrothchnical Society, 2007, 22(10): 138-144.
- [7] 鞠文云, 李银红. 基于最大流传输贡献度的电力网关键线路和节点辨识[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(9): 6-12.  
JU Wenyun, LI Yinhong. Identification of critical lines and nodes in power grid based on maximum flow transmission contibution degree[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(9): 6-12.
- [8] 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.
- [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, 高成彬, 顾雪平, 等. 基于功率介数的电网关键环节辨识[J]. 电网技术, 2014, 38(7): 1907-1913.  
WANG Tao, GAO Chengbin, GU Xueping, et al. Power betweenness based identification of power grid critical links[J]. Power System Technology, 2014, 38(7): 1907-1913.
- [11] 刘文颖, 梁才, 徐鹏, 等. 基于潮流介数的电力系统关键线路辨识[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(31): 90-98, 11.  
LIU Wenyong, LIANG Cai, XU Peng, et al. Identification of critical line in power systems based on flow betweenness[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(31): 90-98, 11.
- [12] 张富超, 谢成荣, 沈立新, 等. 基于源流路径链和输电介数的电网关键线路辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 7-12.  
ZHANG Fuchao, XIE Chengrong, SHEN Lixin, et al. Identification of power grid critical lines based on path chains and transmission betweenness[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 7-12.
- [13] 胡文平, 于腾凯, 巫伟南. 一种基于云预测模型的电网综合风险评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 35-42.  
HU Wenping, YU Teng kai, WU Weinan. A comprehensive power grid risk assessment method based on cloud prediction model[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 35-42.
- [14] 熊小伏, 王建, 袁峻, 等. 时空环境相依的电网故障模型及在电网可靠性评估中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 28-35.  
XIONG Xiaofu, WANG Jian, YUAN Jun, et al. Temporal and spatial environments dependent power grid failure method and its application in power grid reliability assessment[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 28-35.
- [15] 谢开贵, 李春燕, 赵渊, 等. 电力系统功率分配的解析模型和算法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(22): 30-34.  
XIE Kaigui, LI Chunyan, ZHAO Yuan, et al. Efficient analytical model and algorithm for distributing power using the downstream distribution matrix[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(22): 30-34.
- [16] 李稚楷, 杨武, 谢治军. PageRank 算法研究综述[J]. 计算机科学, 2011, 38(增刊 1): 185-188.  
LI Zhiyong, YANG Wu, XIE Zhijun. Research on Pagerank algorithm[J]. Computer Science, 2011, 38(S1): 185-188.

收稿日期: 2016-03-29; 修回日期: 2016-07-26

作者简介:

王佳裕(1991-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统安全防御与恢复控制; E-mail: mrwangjy@icloud.com

顾雪平(1964-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统安全稳定评估与控制、电力系统安全防御与恢复控制、智能技术在电力系统中的应用研究;

王涛(1976-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统安全防御与恢复控制、智能技术在电力系统中的应用研究。

(编辑 魏小丽)