

9-3-2020

Research on identification method of key nodes of power system based on PSNodeRank algorithm

Zhiyuan SUN

Electrical Power Research Institute, Guangxi Power Grid Co , Ltd , Nanning 530023 , China

Shuiying LIANG

Electrical Power Research Institute, Guangxi Power Grid Co , Ltd , Nanning 530023 , China

Yubin FU

School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072 , China

Follow this and additional works at: <https://jepst.researchcommons.org/journal>

Recommended Citation

SUN, Zhiyuan; LIANG, Shuiying; and FU, Yubin (2020) "Research on identification method of key nodes of power system based on PSNodeRank algorithm," *Journal of Electric Power Science and Technology*. Vol. 35: Iss. 2, Article 21.

DOI: 10.19781/j.issn.16739140.2020.02.021

Available at: <https://jepst.researchcommons.org/journal/vol35/iss2/21>

This Article is brought to you for free and open access by Journal of Electric Power Science and Technology. It has been accepted for inclusion in Journal of Electric Power Science and Technology by an authorized editor of Journal of Electric Power Science and Technology.

基于 PSNodeRank 算法的电力系统 关键节点辨识方法

孙志媛¹, 梁水莹¹, 傅裕斌²

(1. 广西电网有限责任公司电力科学研究院, 广西 南宁 530023; 2. 武汉大学电气与自动化学院, 湖北 武汉 430074)

摘要:电力系统中的某些关键节点在系统发生大规模连锁故障的时候可能会对故障的扩大起着推动的作用。为了提高关键节点辨识的速度和准确性, 该文通过对 Google 公司提出的 PageRank 算法进行改进, 提出基于 PSNodeRank 算法的电网关键节点辨识方法。该方法选取电网关键节点的重要评价指标, 建立电力系统有向加权网络模型。考虑电力系统网络的网络链接方向和权值的特性, 该文提出 PSNodeRank 值对节点进行评估, 并具体描述每个节点的重要性, 再利用电力系统分区特点, 对大电网节点重要性的复杂计算过程进行改进, 大大提高了运算速度, 减少了运算所需存储容量。最后, 通过对 IEEE 39 节点系统进行仿真, 所得结果表明: 该文所提方法计算的指标可以有效、准确地辨识出电网中的关键节点, 判断它们在交直流电网自组织临界演化过程中的作用。对预防系统向连锁故障临界状态演化有着重要的意义。

关键词:关键节点; 复杂网络; PSNodeRank 算法; 连锁故障

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2020.02.021 中图分类号: TM863 文章编号: 1673-9140(2020)02-0157-06

Research on identification method of key nodes of power system based on PSNodeRank algorithm

SUN Zhiyuan¹, LIANG Shuiying¹, FU Yubin²

(1. Electrical Power Research Institute, Guangxi Power Grid Co., Ltd., Nanning 530023, China;

2. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Some key nodes in the power system may play a role in the expansion of faults when a large-scale interlock failure occurs in the system. In order to improve the speed and accuracy of key node identification, this paper proposes a key node identification method based on PSNodeRank algorithm by improving the PageRank algorithm proposed by Google Company. This method selects the important evaluation index of the key nodes of the power grid, and establishes the directional weighted network model of the power system. Considering the network link direction and the characteristic for the weight of power system network, the PSNodeRank value is proposed to assess the importance of each node. And then the power system partitioning characteristics is utilized to improve the complicated calculation process for the importance of large power grid nodes. The speed of operation is greatly improved and the storage capacity required for the operation is also reduced. Finally, an IEEE 39-node system is simulated for verification. It is

shown that the proposed method can effectively and accurately identify the key nodes in the power grid and judge their roles in the critical evolution of AC-DC power network. This method has a great significance to the critical state evolution of the system.

Key words: key nodes; complex network; PSNodeRank algorithm; cascading failures

中国已经建成全世界规模最大、运行最复杂的交直流混联电网,保障其安全运行是重要而紧迫的国家需求。但随着交、直流电力系统耦合程度的不断加深,电网网架结构日趋复杂,系统运行风险进一步加剧,局部故障容易产生连锁反应传播到相邻的区域甚至整个电网,从而造成大停电事故。如,华中电网“7·1”大停电、巴西美丽山大停电等,无一不对当地人民生活 and 经济发展产生了巨大的影响^[1-4]。研究表明,电力系统的大停电事故往往源于电网中的某些个别元件引发的连锁故障。因此,准确、快速地辨识出电网中对连锁故障产生推波助澜的关键节点和线路^[5-6],对于预防连锁故障大面积停电事故发生,保障电力系统安全与稳定运行,有着重要的指导意义。

现阶段,针对电力系统关键节点的识别方法,从围绕建模方向的研究来看,主要集中在以下 2 个方面。

1) 从电网的物理属性出发。文献[7]提出了计及系统运行方式、潮流分布的线路潮流介数指标,并应用到电力系统关键线路的辨识;文献[8]基于加权网络模型,综合考虑电网拓扑结构和潮流分布的非匀质特性,提出了电网潮流转移下危险线路的识别方法;文献[9]提出以综合系统的运行状态、功率的输送关系以及电网的拓扑结构的功率介数指标,并以此定量表征电网的关键节点;文献[10]提出了最大流传输贡献度指标,计算电力网关键节点和线路对电网电能传输功能的承载和贡献能力。

2) 从复杂网络的角度出发,考虑电网的拓扑结构,忽略电网的潮流,传输容量极限等电网属性。以小世界网络模型^[11]、无标度网络模型^[12]为代表,基于图论思想和分析方法辨识电网中的关键节点。文献[13]建立了以节点的结构负荷形成的电网加权拓扑结构,以此辨识电网的关键节点;文献[14]以节点的度值分析节点的重要性,仅从网络的局部进行考虑,所得结果的可靠性有待提高;文献[15]计及电力网络的拓扑结构和电气特性,以带权重的线路介数指标作为系统中脆弱线路判别依据,以此甄选出

电网中自身拓扑位置重要、对系统影响关键的环节;文献[16-17]提出基于 PageRank 算法电网关键节点的辨识方法,考虑了有向网络拓扑中边的权值以及节点的重要性。

综上所述,该文基于 Google 提出的 PageRank 算法,定义 PSNodeRank 这一概念,建立电力系统网络有向加权的网络模型,深度地发掘电网节点之间的潮流方向以及链接关系,利用 PSNodeRank 这一指标表征电网拓扑结构中节点的重要性,能快速、准确地反映电力系统中某个关键节点在电网中的重要度。该文提出的 PSNodeRank 算法既考虑了在全局上电网的整体链接特性对节点重要程度的影响,又考虑了电网节点局部特性,从而可以准确地辨识电网的关键节点,可以提高针对大电网的计算速度,减小运算所需存储空间。最后,通过 IEEE 39 典型仿真模型为例,对所述模型和算法的有效性、准确性进行了验证。

1 PSNodeRank 算法介绍

Google 的 PageRank 算法^[18]自 1998 年提出以来,在许多学科领域取得了广泛的应用。其核心思想是将整个互连网络抽象为一个规模巨大的有向图,一个网页抽象为一个顶点,网页间的超链接关系抽象为有向边。

网页的 PageRank 值也即网页的重要度,由 Google 根据不同网页的链接数量计算得到。其影响因素主要有 3 个:①链接到该网页的链入网页数量;②链入到该网页的那些网页自身的重要性;③链接网页自身的链接数目。PageRank 算法的计算公式为

$$\mathbf{PR}(A) = \frac{(1-\alpha)}{N} + \alpha \cdot \sum_{i=1}^n \frac{IN_A}{\sum_{j=1}^m IN_j} \mathbf{PR}(T_i) \quad (1)$$

式中 IN_A 是网页 A 的链入网页总数; T_i 为链接源,分别为 S_1, S_2, \dots, S_m ; IN_i 为页面 S_i 的链接源数目; α 为跳转因子; $\mathbf{PR}(T_i)$ 为 T_i 节点的 PageR-

ank 值。

依据各节点权值对 PageRank 值进行分配,同时考虑节点间的链接关系程度以及节点间的方向性,即可构造一个有向加权网络。

电力系统是由发电厂、输电线路、供配电所和用电负荷等环节组成的大型电能生产与消费网络,如果将发电厂等元件抽象成网络拓扑中的节点,输电线路抽象成链接节点与节点的边,节点与节点之间有着功率传输的方向。这样,电力系统就被抽象成一个复杂有向加权的网络。该文提出的 PSNodeRank 的算法概念涉及步骤如下。

1) 在一个具有 N 个节点的电力系统网络中,由电网的各个节点构成一个 $N \times N$ 的链接矩阵 \mathbf{H} ,元素 h_{ij} 表示节点 i 与节点 j 之间的有功传输功率,代表节点 i 到节点 j 的边的权值,即节点间的链接强度。由于现代大规模电网的节点数目巨大,如果将所有节点的链接关系全部表示出来,那么电网的链接矩阵将会非常庞大,接下来的步骤的迭代运算量将极其巨大,运算所需时间很长,所需运算空间也将很大。而且,对电网中绝大多数的节点来说,与其有直接链接关系的节点是很少的,因此,在 N 维的链接矩阵中,这些节点所在的行绝大多数的元素都是 0,这个 N 维的链接矩阵是一个极其稀疏的矩阵,对大规模运算非常不利。

为了解决这一问题,缩短运算时间,减小运算量,根据电网的复杂网络特性,电网的结构是不均匀的,整个电网可以被划分成若干个区域块 B_1, B_2, \dots, B_n ,该文依据文献[19]方法对电网进行分区,使得区域内的节点之间的链接关系较为紧密,而区域块之间的链接数尽量少。将每个区域块 B_i 内的节点通过 PSNodeRank 算法算出的局部 PSNodeRank 值称为 Local PSNodeRank 向量。将区域块抽象成节点,通过 PSNodeRank 算法算出区域分块 PSNodeRank 值称为 Block PSNodeRank 向量。

2) 对链接矩阵 \mathbf{H} 归一化处理,从而得到矩阵 $\mathbf{P} = (\mathbf{h}_{ij} / \sum_{j=1}^n \mathbf{h}_{ij})_{n \times n}$ 。其中,矩阵元素 \mathbf{P}_{ij} 表示节点 i 经一次跳转到达节点 j 的概率。过程中,如果矩阵中出现元素全为 0 的行,则用向量 $(1/n)\mathbf{e}^T$ 来处理。因此,处理后的新随机矩阵 \mathbf{P}' 将不会出现行向量和为 0 的行。

考虑到 PSNodeRank 算法重视的是节点的链

入而不是链出,因此,将矩阵 \mathbf{P}' 转置后得到转置矩阵 \mathbf{M} ,亦称为电网链接结构的概率转移矩阵。

3) 采用 Google 提出的 PageRank 算法,由式(1)计算得到 Local PSNodeRank 矩阵 \mathbf{A}_L ,其计算公式为

$$\mathbf{A}_L = \alpha \cdot \mathbf{M} + \frac{1 - \alpha}{N} \cdot \mathbf{e} \cdot \mathbf{e}^T \quad (2)$$

在这里,为了提高算法的有效性与幂法收敛速度,推荐跳转因子设置为 $\alpha = 0.85^{[20]}$ 。

区域块内的初始向量 \mathbf{x} 可以采用节点的注入有功功率占整个区域块的注入功率之和的比值来估计。将初始向量 \mathbf{x} 代入公式,进行迭代运算,所求的计算结果为 $\mathbf{L} = \mathbf{L}_{b_1}, \mathbf{L}_{b_2}, \dots, \mathbf{L}_{b_k}$,这里的 \mathbf{L}_{b_k} 表示区域块内的 Local PSNodeRank 向量, k 表示电网所有的区域块数目。由于将电网分成若干个区域块使得电网规模减小,因此,迭代运算次数和每一次迭代运算量都大大减少。

同理,通过 PSNodeRank 算法以 B_i 为节点构成电网缩略图的区域分块 Block PSNodeRank 矩阵 \mathbf{A}_B 。有所不同的是区域块间初始向量的估计和概率转移矩阵 \mathbf{x}' 的计算。

由于分区的作用使得每个区域块的初始 PSNodeRank 向量已不能简单采用节点的注入功率比值来估算。该文认为一个区域块节点的重要程度与其内的节点数有着紧密的联系。因此,该文采用区域块内节点数目与整个电网的节点总数的比值作为区域块间的初始 PSNodeRank 向量 \mathbf{x}' 。

电网分区后,在整个电网中,区域块与区域块之间的链接不止一条。为了计算区域块之间的概率转移矩阵,将区域块与区域块之间注入功率的总和作为区域块到区域块新边的权值,这样就构成了一个以区域块为节点的新的电网缩略图。在这个新的电网缩略图中,区域块概率转移矩阵的计算与前文区域块内节点的概率转移矩阵的算法完全一致。

将初始向量 \mathbf{x}' 带入式(2)进行迭代运算,就可以得到一个 K 维的 Block PSNodeRank 向量 $\mathbf{G} = (\mathbf{g}_1, \mathbf{g}_2, \dots, \mathbf{g}_k)^T$ 。

4) 通过上述 PSNodeRank 算法求得 2 种向量:① 各区域块内节点的 Local PSNodeRank 向量 $\mathbf{L} = \mathbf{L}_{b_1}, \mathbf{L}_{b_2}, \dots, \mathbf{L}_{b_k}$,共计 k 个;② 电网缩略图的区域块间 Block PSNodeRank 向量, $\mathbf{G} = (\mathbf{g}_1, \mathbf{g}_2, \dots, \mathbf{g}_k)^T$,这个向量是 k 维的。

为了构造一个同时具有区域块内 Local PSNodeRank 向量和区域块间 Block PSNodeRank 向量 2 种特征的 N 维向量, 该文将某个 Local PSNodeRank 和 Block PSNodeRank 向量中与之对应的数值相乘:

$$\mathbf{Z}_i = \mathbf{L}_{b_i} \cdot \mathbf{g}_i \quad (3)$$

最后得到的 \mathbf{Z} 向量就是一个 N 维的全网 PSNodeRank 向量。

从全网向量的计算公式可以看出, 节点的 PSNodeRank 值既和节点所在区域块的 Block PSNodeRank 值有关又和节点自身的 Local PSNodeRank 值有关。在节点的 Local PSNodeRank 值不变的情况下, 节点所在区域块的 PSNodeRank 值越大则节点的 PSNodeRank 值越大, 在节点所在区域块的 Block PSNodeRank 值不变的情况下, 节点的 Local PSNodeRank 值越大则节点的 PSNodeRank 值越大。这也与实际情况相符合。

2 电网关键节点辨识流程

基于 PSNodeRank 算法的电网关键节点辨识流程如图 1 所示。

该方法的主要步骤如下:

1) 获取电网的拓扑结构信息;

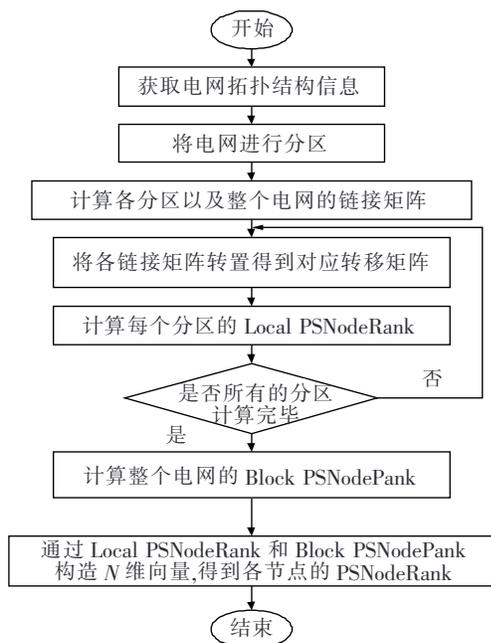


图 1 节点 PSNodeRank 计算流程

Figure 1 Flow chart of PSNodeRank calculation of the node

- 2) 将电网进行分区;
- 3) 计算电网各个分区的链接矩阵以及整个电网的链接矩阵;
- 4) 根据链接矩阵通过矩阵变换获得相应的转置矩阵;
- 5) 计算每个分区的 Local PSNodeRank 和整个电网的 Block PSNodeRank;
- 6) 通过 Local PSNodeRank 和 Block PSNodeRank 构造 N 维向量, 得到每个节点的 PSNodeRank。

根据 PSNodeRank 进行排序, 获得电力系统网络中的关键节点。

3 算例分析

基于 MATLAB 对算法进行了编程, 以 IEEE 39 节点标准系统为例, 对该文方法的基于 PSNodeRank 的关键节点排序算法的正确性和有效性进行校验仿真。

以北美新英格兰州 10 机 39 节点的标准测试系统为例, 对该文所提方法进行仿真验证。该系统包含 10 台发电机组、12 台变压器组、46 条线路以及 19 个用户负荷节点, 其中节点 31 为系统的平衡节点。系统接线如图 2 所示。

IEEE 39 节点系统的关键节点如表 1 所示, 可以看出, 该系统关键节点主要集中在 3 个不同的区

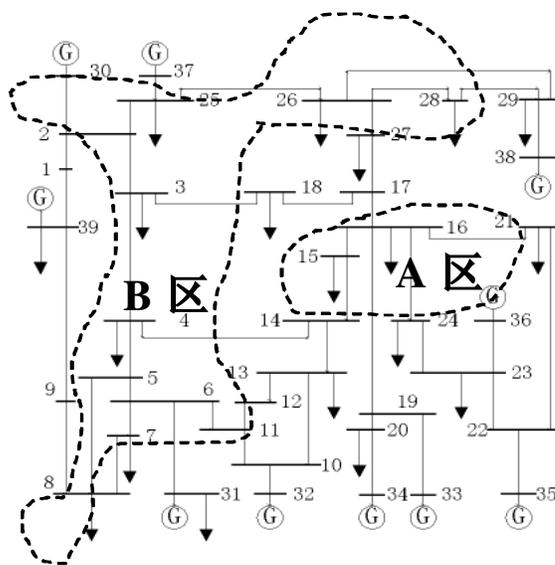


图 2 IEEE 39 测试系统接线示意

Figure 2 The diagram of IEEE 39 test system

域(参照图 2)。按照 PSNodeRank 指标排名,节点 15、16 位于“A”区域,节点 2~6、8、26、27 位于“B”区域。其中,节点 2 为发电机节点,节点 15、16、5、6 位于重负荷的关键联络通道,节点 3、4、27、26 属于重负荷节点。上述各关键节点的故障及退运都会导致该系统潮流的大规模转移,从而影响电网安全稳定运行。

为验证该文所提方法的有效性,现将其他文献的仿真结果与该文方法的结果进行对比分析。文献[19]基于节点重要度评价的骨架网络重构策略,以网络凝聚度指标对节点重要度进行量化评估。文献[20]提出了基于节点流量重要度的电网关键节点辨识方法,定义了节点传输贡献度指标和节点传输效率,通过计算各节点的节点流量重要度对关键节点进行排序。3 种不同辨识方法的对比结果如表 2 所示。

表 1 IEEE 39 节点系统的关键节点

Table 1 The key nodes of IEEE 39 test system

排序	节点编号	PSNodeRank
1	15	0.121 341 802
2	16	0.120 723 215
3	3	0.074 764 616
4	8	0.069 976 615
5	27	0.069 192 456
6	26	0.060 880 635
7	4	0.060 024 652
8	6	0.053 824 031
9	2	0.050 503 825
10	5	0.050 190 586

表 2 3 种方法的关键节点辨识结果对比

Table 2 Comparison results of the key nodes with three identification methods

排序	识别方法		
	PSNodeRank	网络凝聚度	节点流量值
1	15	16	5
2	16	17	3
3	3	14	6
4	8	2	25
5	27	26	16
6	26	3	15
7	4	5	17
8	6	18	4
9	2	25	2
10	5	4	11

由表 2 可以看出,该文采用的方法辨识出的关键节点有 5 个同时包含在文献[19]、[20]辨识出的关键节点中。造成排序不一样的原因主要是不同方法的辨识指标考虑的影响因素不同和侧重点不同。由以上对比可知,该法所使用的辨识方法是准确、有效的。

4 结语

该文定义了节点重要度的 PSNodeRank 指标,在表征节点在电力系统中关键程度的时候,不仅能够反映出电网某个节点的局部连接特性,定量表征单个节点与相邻节点的电气拓扑关系;又能反映出复杂电力网络中整体链接关系对单个节点重要性的影响,定量表征单个节点在电网功率传输过程中承担的作用。从而能够准确地辨识出交直流混联大电网的关键节点。IEEE 39 节点的算例分析,验证了该方法的准确性和有效性。

该文所提方法充实和发展了电力系统薄弱环节的辨识技术,对于有效预防和阻断由薄弱环节引发的连锁故障,避免大停电事故的发生具有积极的指导意义。

参考文献:

- [1] 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.
- [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] 常康,徐泰山,郁琛,等. 自然灾害下电网运行风险控制策略探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(10): 73-81.
CHANG Kang, XU Taishan, YU Chen, et al. Discussion of power system operation risk control strategy in natural disasters[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(10): 73-81.
- [4] 李更丰,邱爱慈,黄格超,等. 电力系统应对极端事件的新挑战与未来研究展望[J]. 智慧电力, 2019, 47(8): 1-11.

- LI Gengfeng, QIU Aici, HUANG Gechao, et al. New challenges and future research prospects in power system against to extreme events[J]. Smart Power, 2019, 47(8):1-11.
- [5] 朱国威,王先培,贺瑞娟,等. 基于重要度评价矩阵的电网关键节点辨识[J]. 高电压技术, 2016, 42(10):3347-3353.
- ZHU Guowei, WANG Xianpei, HE Ruijuan, et al. Identification of vital node in power grid based on importance evaluation matrix[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(10):3347-3353.
- [6] 刘明顺,龙志君,赵立进,等. 基于模糊推理的电网风险评估及线路重要度辨识[J]. 电力科学与技术学报, 2017, 32(7):131-138.
- LIU Mingshun, LONG Zhijun, ZHAO Lijin, et al. Grid risk assessment and line importance identification based on fuzzy reasoning[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2017, 32(7):131-138.
- [7] 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.
- 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.
- [8] 沈瑞寒,刘涤尘,赵洁,等. 基于加权网络模型的电网潮流转移下危险线路识别[J]. 电网技术, 2012, 36(5):245-250.
- SHEN Ruihan, LIU Dichen, ZHAO Jie, et al. Weighted network model based recognition of dangerous lines under power flow transferring[J]. Power System Technology, 2012, 36(5):245-250.
- [9] 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.
- [10] 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 contribution degree[J]. Automation of Electrical Power System, 2012, 36(9):6-12.
- [11] Newman M E J. Model of the small world[J]. Journal of Statistical Physics, 2000, 101:819-841.
- [12] Barabasi A L, Albert R. Emergence of scaling in random networks[J]. Science, 1999, 286(5439):509-512.
- [13] 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]. 中国电机工程学报, 2005, 25(Z1):118-122.
- DING Ming, HAN Pingping. Small-world topological model based vulnerability assessment to large-scale power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(S1):118-122.
- [14] Kitsak M, Gallos L K, Havlin S, et al. Identification of influential spreaders in complex networks[J]. Nature Physics, 2010, 6(11):888-893.
- [15] 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.
- [16] 张琨,李配配,朱保平,等. 基于 PageRank 的有向加权复杂网络节点重要性评估方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2013, 45(3):429-434.
- ZHANG Kun, LI Peipei, ZHU Baoping, et al. Evaluation method for node importance in directed-weighted complex networks based on PageRank[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2013, 45(3):429-434.
- [17] Li Canbing, Liu Wencan, Cao Yijia, 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.
- [18] Langville A N, Meyer C D. Google's pagerank and beyond: The science of search engine ranking[M]. Princeton, NJ, USA: Princeton University Press, 2006.
- [19] 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.
- [20] 傅裕斌,葛梦昕,樊友平,等. 基于节点流量重要度的电网关键节点辨识[J]. 现代电力, 2018, 35(3):1-8.
- FU Yubin, GE Mengxin, FAN Youping, et al. Identification of critical nodes in power grid based on node traffic importance degree[J]. Modern Electrical Power, 2018, 35(3):1-8.