

受互联网思路启发的电力系统重要节点评估算法*

耿俊琪^{1,2}, 孙贤明¹, 宋蕙慧³, 曲延滨³

(1. 山东理工大学 电气与电子工程学院, 山东 淄博 255000; 2. 国网山东省电力公司淄博供电公司, 山东 淄博 255000;

3. 哈尔滨工业大学(威海) 新能源学院, 山东 威海 264200)

摘要:对电力系统中重要节点进行有效区分,有助于在资源有限的条件下对重要节点施加额外保护或改变拓扑结构,从而提高系统鲁棒性、降低事故发生的概率。受网页排序算法启发,提出电气链接结构分析的随机方法(electrical stochastic approach for link structure analysis, E-SALSA)用于电力系统重要节点评估。该算法综合考虑了电力系统拓扑结构、潮流等因素对节点的影响,能够有效反映电力系统的真实情况,并且其特点更符合电力系统背景。在IEEE300节点电力系统中,使用失负荷规模和最大子群规模两个指标对E-SALSA算法与电气介数算法、基于共同引用的超链接引导的主题搜索(model based on co-citation hypertext induced topic search, MBCC-HITS)算法进行了对比分析。结果证明E-SALSA算法相比电气介数算法在两个指标上都具有优势,相比MBCC-HITS算法能够更综合考虑各方面因素对节点的影响,进而证明了E-SALSA算法的合理性、有效性。

关键词:复杂网络;电力系统;网页算法;重要节点

中图分类号:TM744 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号:1001-2486(2023)03-211-08



听语音
与作者互动
聊科研

Important node evaluation algorithm for electrical power system inspired by internet thinking

GENG Junqi^{1,2}, SUN Xianming¹, SONG Huihui³, QU Yanbin³

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China;

2. State Grid Shandong Electric Power Company Zibo Power Supply Company, Zibo 255000, China;

3. School of New Energy, Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai 264200, China)

Abstract: Effective identification of important nodes in power system is helpful to improve robustness of system and reduce the probability of accidents by applying additional protection or changing the topology of important nodes under limited resources. Inspired by the web page sorting algorithm, an algorithm called E-SALSA (electrical stochastic approach for link structure analysis) was proposed for evaluating important nodes in power system. Taking into account the influence of power system topology, power flow and other factors on nodes, this algorithm can effectively reflect the true situation of power system, and its features are more in line with the background of power system. In the IEEE300 node power system, the E-SALSA algorithm was compared with the electrical median algorithm and the MBCC-HITS (model based on co-citation hypertext induced topic search) algorithm by using the two indexes of the scale of load loss and the maximum subgroup size. The results show that the E-SALSA algorithm has advantages over electrical median algorithm in both indicators. Compared with MBCC-HITS algorithm, E-SALSA algorithm can use all factors more comprehensively on the impact of nodes, which further proves its rationality and effectiveness.

Keywords: complex network; electrical power system; webpage algorithm; important nodes

电力系统互联一方面可以充分利用地区分散能源,增加系统各部分的相互支援,但另一方面也是引发故障连锁,造成大停电事故的主要原因^[1-4]。特别对于经济较发达地区,电网负荷较重,传输已接近上限。充分认识电网脆弱性,并对电力系统重要节点进行有效区分,进而为重要节

点施加额外保护或改变不安全拓扑结构,对增强电力系统安全稳定运行能力、切断连锁故障链中的相关环节、降低电力网络大面积停电的灾变风险具有重要的现实意义^[5-6]。

目前,评估电力系统重要节点的方法多是从复杂网络的角度分析。文献[7]认为连接输电线

* 收稿日期:2021-09-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51907109)

作者简介:耿俊琪(1995—)男,山东淄博人,博士研究生,E-mail:gengjunqi0919@126.com;

孙贤明(通信作者),男,山东烟台人,教授,博士,博士生导师,E-mail:xmsun@sdu.edu.cn

路数量多的节点就是重要的,并发现当随机攻击节点时电力系统具有很强的鲁棒性,但是攻击连接输电线路数量多的节点时电力系统鲁棒性较差。介数(即被节点间最短路径所经过的次数)是复杂网络中评估重要节点的重要概念^[8]。文献[9-12]使用介数思想从无权无向网络的角度分别评估了北美电网、意大利电网、荷兰电网、中国东部电网的重要节点,但是未考虑电力系统物理特点对节点的影响。文献[13]结合基尔霍夫定律与介数概念提出了电气介数算法,该算法物理背景更贴合实际电力系统。

从复杂网络的角度分析,互联网与电力系统存在相似性与一致性^[14-15]。表 1 是互联网、电力系统、复杂网络三者的对比关系^[16]。因此,也有学者将互联网中的网页排序算法应用到电力系统的重要节点评估领域。2014 年文献[16]首次将互联网中评估重要网页的 PageRank 算法应用在电力系统中,但是只考虑了节点流入功率对节点的影响。2017 年文献[17]将网页排序算法——基于共同引用的超链接引导的主题搜索(model based on co-citation hypertext induced topic search, MBCC-HITS)算法^[18]应用到电力系统中,该算法考虑了流入、流出功率对重要节点的影响。但是 MBCC-HITS 算法中的权威值、枢纽值存在相互加强关系,使得结果与实际情况有偏差,并且 MBCC-HITS 算法偏重功率对重要节点的影响,对电力系统拓扑结构作用的考虑相对不足。

最后,在 IEEE300 节点电力系统中,使用广泛用于评价重要节点评估算法的失负荷规模指标和最大子群规模指标,将 E-SALSA 算法与电气介数算法、MBCC-HITS 算法进行了对比,结果证明了 E-SALSA 算法的合理性与有效性。

1 基本概念及评价指标

1.1 二分图

分图的严格定义是:一个无向图,如果所有节点组成的集合 V 可分为没有交集的两个子集 V_a 和 V_b ,并且无向图中每条边关联的两个节点分别属于 V_a 和 V_b ^[20],则称为二分图。文献[21]中为了便于 SALSA 算法的实现,给出了一种不严格的针对有向图的分二分图定义,其中, V_a 和 V_b 是图的两个节点集合,并集是所有节点,交集可以不是空集。 V_a 和 V_b 可以由式(1)、式(2)计算:

$$V_a = \{c | c \in S \text{ 且入度大于 } 0\} \quad (1)$$

$$V_b = \{c | c \in S \text{ 且出度大于 } 0\} \quad (2)$$

其中, c 代表所有不独立的节点, $c \in S$ 。由于一个节点可能出度、入度均大于零,所以它可能属于 V_a 和 V_b 的交集。图 1 是一个由 6 个节点及其连接关系组成的有向图,图 2 则是由图 1 生成的不严格二分图。

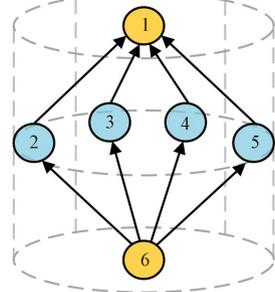


图 1 6 节点复杂网络

Fig.1 6-node complex network

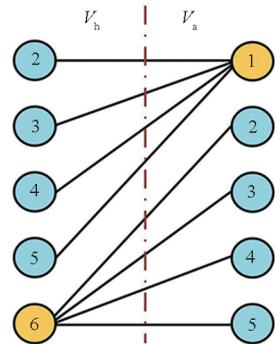


图 2 由图 1 生成的不严格二分图

Fig.2 The loosely dichotomized graph generated by Figure 1

表 1 互联网、电力系统、复杂网络对比

Tab.1 Comparison of Internet, power system and complex network

比较对象	互联网	电力系统	复杂网络
构成要素	网页,超链接,指向该网页的网页数,该网页指向的网页数	母线,输电线路,母线进线数目,母线出线数目	节点,边,入度,出度

受到互联网链接结构分析的随机方法^[19](stochastic approach for link structure analysis, SALSA)的启发,本文提出了用于电力系统重要节点评估的 E-SALSA (electrical SALSA) 算法。首先,E-SALSA 算法结合了流入、流出功率两方面对节点的影响。然后,通过使用设置迭代和迭代初值,将电力系统拓扑结构对节点的影响考虑进 E-SALSA 算法中。接着,通过设置潮流作为图中边的权值和方向,将电力系统抽象为有向有权图,使得 E-SALSA 算法更贴近电力系统物理特点。

1.2 权威值与枢纽值

Kleinberg 等首先在提出 HITS 算法的文献中定义了权威值和枢纽值^[19],它们分别体现了节点的重要性和枢纽性。节点的权威值与入链连接的节点数量、枢纽值大小有关,枢纽值越大、入链连接的节点越多则权威值越大;节点枢纽值与出链连接的节点数量、权威值大小有关,权威值越大、出链连接的节点数量越多则枢纽值越大。HITS 算法中权威值和枢纽值不是相互独立的,而是在运算中存在相互加强关系。

1.3 评价指标

失负荷规模和最大子群规模都是反映电力系统重要节点评估算法有效性、合理性的指标^[13]。失负荷规模可以由式(3)和式(4)描述:

$$\Delta L_i = \begin{cases} D_i - C_i & D_i > C_i \\ 0 & D_i \leq C_i \end{cases} \quad (3)$$

$$L_{OL} = \frac{1}{D} \sum_{i=1}^s \Delta L_i \quad (4)$$

其中, C_i 、 D_i 分别是子系统 i 的发电机出力以及负荷的需求,式(3)计算的是攻击节点后子系统 i 的负荷损失规模。 D 是没有攻击节点前整个电力系统的负荷需求, s 是在攻击节点后子系统的数量, L_{OL} 为失负荷规模。失负荷规模评估的是攻击节点后,电力系统对负荷供电能力的下降程度。

最大子群规模可以从拓扑结构角度体现节点对电力系统的影响,可以根据式(5)计算得到:

$$R = \frac{N'}{N} \quad (5)$$

式中, N 、 N' 分别代表攻击节点前、后的最大子群含有的节点数量, R 为最大子群规模。最大子群规模越小,代表被攻击的节点越重要。

2 E-SALSA 算法

2.1 SALSA 算法

SALSA 算法将连接关系转化为二分图,从而分别计算权威向量和枢纽向量。与 MBCC-HITS 算法不同,SALSA 算法的两个向量拥有各自独立的马尔可夫链,因此避免了两个向量相互加强的特点^[21]。设 $S = \{1, 2, 3, \dots, N\}$ 是一个有向无权图的节点集合,根据网络中的连接关系可以得到邻接矩阵 \mathbf{W} 。如式(6)和式(7)所示,将邻接矩阵 \mathbf{W} 中每个非零元素除以所在列所有元素的和,就得到 \mathbf{W}_c 矩阵;将邻接矩阵 \mathbf{W} 中每个非零元素除以所在行所有元素的和,就得到 \mathbf{W}_r 矩阵。其中, $\mathbf{e} = [1, 1, 1, \dots, 1]^T$ 。

$$\mathbf{W}_c = \{ [\text{diag}(\mathbf{W}^T \mathbf{e})]^{-1} \mathbf{W}^T \}^T \quad (6)$$

$$\mathbf{W}_r = [\text{diag}(\mathbf{W} \mathbf{e})]^{-1} \mathbf{W} \quad (7)$$

$\mathbf{W}_c \mathbf{W}_r^T$ 删去全为零的行、列,就得到 $\tilde{\mathbf{A}}$; $\mathbf{W}_r \mathbf{W}_c^T$ 删去全为零的行、列就得到 $\tilde{\mathbf{H}}$ 。式(8)、式(9)中 φ 代表的是删去相应矩阵全为零的行、列。

$$\tilde{\mathbf{A}} = \varphi(\mathbf{W}_c \mathbf{W}_r^T) \quad (8)$$

$$\tilde{\mathbf{H}} = \varphi(\mathbf{W}_r \mathbf{W}_c^T) \quad (9)$$

式(10)和式(11)可求得各个节点的权威值和枢纽值:

$$\mathbf{x} = \tilde{\mathbf{A}} \mathbf{x}_0 \quad (10)$$

$$\mathbf{y} = \tilde{\mathbf{H}} \mathbf{y}_0 \quad (11)$$

其中, \mathbf{x}_0 、 \mathbf{y}_0 由式(12)、式(13)定义。 N_a 、 N_h 分别为权威向量、枢纽向量中节点的数量。

$$\mathbf{x}_0 = \left[\frac{1}{\sqrt{N_a}} \quad \frac{1}{\sqrt{N_a}} \quad \frac{1}{\sqrt{N_a}} \quad \dots \quad \frac{1}{\sqrt{N_a}} \right]^T \quad (12)$$

$$\mathbf{y}_0 = \left[\frac{1}{\sqrt{N_h}} \quad \frac{1}{\sqrt{N_h}} \quad \frac{1}{\sqrt{N_h}} \quad \dots \quad \frac{1}{\sqrt{N_h}} \right]^T \quad (13)$$

最后,通常使用权威值来对重要网页排名,枢纽值仅作为参考^[22]。

2.2 基于电力系统特点的算法改进

SALSA 算法在评估重要网页时,仅使用有向无权图从拓扑结构的角度对网页进行了评估。但是对于电力系统,节点与相邻节点连接关系代表的局部连接情况,以及节点在图中所处位置代表的全局连接情况,两者对节点有着不同影响。这两个影响因素需要区别考虑。同时,电力系统重要节点的评估不仅与拓扑结构有关,还与时刻变化、影响节点的潮流有关。因此,算法还需要从以下几方面进行改进。

2.2.1 拓扑结构因素

拓扑结构体现电力系统的连接特点,为将电力系统拓扑结构因素融入算法,主要从初值设置方法和多次迭代两方面进行实现。

1) 初值设置方法:度中心性能够反映节点局部连接情况,一个节点连接的节点数目越多,那么这个节点的度中心性越大,节点影响力越大^[19]。在 E-SALSA 算法中将节点的度中心性数值作为迭代初值,从而考虑了局部结构对节点的影响。式(14)给出了通过邻接矩阵 \mathbf{W} 计算度中心性的方法。式(15)和式(16)分别给出了计算初始权威向量和枢纽向量的方法。

$$d(i) = \sum_{j=1}^N W_{ij} (i \neq j) \quad (14)$$

$$\mathbf{x}'_0 = \left[\frac{d(1)}{E_a} \quad \frac{d(2)}{E_a} \quad \frac{d(3)}{E_a} \quad \dots \quad \frac{d(N_a)}{E_a} \right] \quad (15)$$

$$y'_0 = \left[\frac{d(1)}{E_h} \quad \frac{d(2)}{E_h} \quad \frac{d(3)}{E_h} \quad \dots \quad \frac{d(N_h)}{E_h} \right] \quad (16)$$

其中, $d(i)$ 为节点 i 的度中心性数值, N 为图内节点的总数, E_a, E_h 是二分图中 V_a 和 V_h 包含的边的数量。各个节点的计算初值可以理解为是在枢纽图或权威图中, 该节点连接的边的数量所占的比例。

2) 多次迭代体现全局影响: 在 SALSALSA 算法中, 仅计算了一次式(10)和式(11)便得到了最终的权威值和枢纽值。这仅仅考虑了一个节点附近其他节点对它造成的影响, 并没有充分评估该节点在整个系统中充当的角色。为了使 E-SALSALSA 能够全局考虑电力系统内所有节点相互间的影响, 需要对式(10)和式(11)迭代, 直到权威向量和枢纽向量收敛。

2.2.2 潮流因素

潮流是一个动态变化的量, 时刻影响着电力系统重要节点的评估结果。为了评估这个随电力系统运行状态改变而变化的量对节点的影响, 将潮流的绝对值设置为节点间边的权重, 同时将潮流的方向设置为边的方向。因此, 在本算法中电力系统被抽象成一个有向有权图。电力系统有向有权图的邻接矩阵可以按照式(17)确定。

$$W'_{ij} = \begin{cases} S_{i \rightarrow j} & \text{节点 } i \text{ 到节点 } j \text{ 有线路 } l_{i \rightarrow j} \text{ 连接, 视在功率为 } S_{i \rightarrow j} \\ 0 & \text{节点 } i \text{ 到节点 } j \text{ 有线路 } l_{i \rightarrow j} \text{ 连接} \end{cases} \quad (17)$$

2.3 E-SALSALSA 算法评估流程

根据前述内容, 得到 E-SALSALSA 算法计算流程:

- 1) 根据电力系统拓扑结构得到原始的有向有权图 G 。
- 2) 在有向有权图 G 基础上增补发电、负荷节点得到邻接矩阵 W' 。
- 3) 根据式(14) ~ (16) 赋值初始权威向量、枢纽向量。
- 4) 根据式(10)、式(11) 进行迭代, 得到最终权威、枢纽向量。
- 5) 对于电力系统节点, 流入、流出的功率同等重要, 因此将节点对应的权威值、枢纽值相加, 得到最终的结果。

算法说明:

1) 由于 E-SALSALSA 依据节点连接关系评估重要节点, 为了全面评估节点, 如果发电、负荷在电

力系统中没有用节点形式表现, 则在图中增补为节点。节点在最后排序时剔除这两类节点。

2) 邻接矩阵由考虑了潮流方向、大小并且对发电、负荷节点进行增补后的有向有权图得到。

为了更加清晰地说明 E-SALSALSA 算法的计算过程, 以图 3 所示 10 节点为例进行重要节点评估。

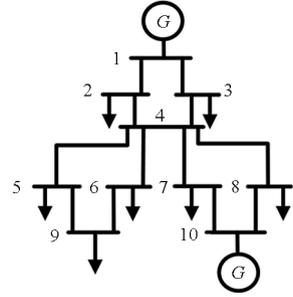


图 3 10 节点电力系统
Fig. 3 10-node power system

步骤 1: 根据图 3 抽象得到图 4 所示电力系统拓扑结构图。各条线路的视在功率已标注在图中。

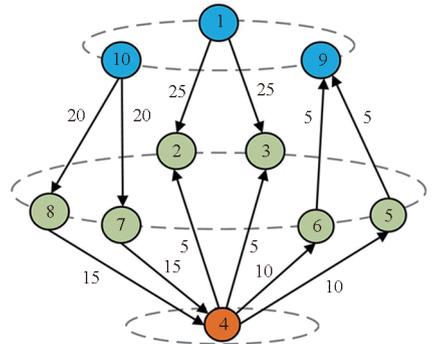


图 4 10 节点电力系统有向有权图
Fig. 4 Directed authority diagram of 10-node power system

步骤 2: 通过增补发电、负荷节点, 得到如图 5 所示拓扑结构图, 并进一步得到该电力系统的邻接矩阵 W' 。各个节点的发电、负荷节点分别被抽象为邻接矩阵中的第 11 至 19 节点。

$$W' = \begin{bmatrix} 0 & S_{1 \rightarrow 2} & \dots & S_{1 \rightarrow 19} \\ S_{2 \rightarrow 1} & 0 & \dots & S_{2 \rightarrow 19} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{19 \rightarrow 1} & S_{19 \rightarrow 2} & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

步骤 3: 根据式(15)、式(16) 求得初始权威向量、枢纽向量。

$$x'_0 = \left[\underbrace{0.075 \dots 0.075}_3 \quad 0.015 \quad \underbrace{0.075 \dots 0.075}_6 \quad \underbrace{0.025 \dots 0.025}_7 \right] \quad (19)$$

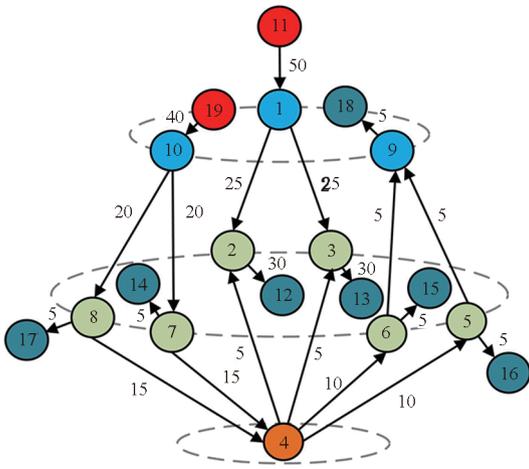


图5 10节点电力系统增补发电、负荷节点后有向有权图

Fig. 5 Directed authority diagram of 10-node power system after add power and load nodes

$$y'_0 = \left[\underbrace{0.0857 \dots 0.0857}_3 \quad 0.1714 \quad \underbrace{0.0857 \dots 0.0857}_6 \quad 0.0286 \quad 0.0286 \right] \quad (20)$$

步骤4:通过迭代式(10)、式(11),求得收敛后的权威值向量、枢纽值向量。

$$x = \left[\underbrace{0.075 \dots 0.075}_2 \quad \underbrace{0.1125 \dots 0.1125}_2 \quad 0.15 \quad \underbrace{0.0375 \dots 0.0375}_2 \right. \\ \left. \underbrace{0.075 \dots 0.075}_2 \quad 0.0625 \quad 0.075 \quad 0 \right. \\ \left. \underbrace{0.0313 \dots 0.0313}_2 \quad \underbrace{0.025 \dots 0.025}_2 \quad 0 \right] \quad (21)$$

$$y = \left[0.1607 \quad \underbrace{0.0857 \dots 0.0857}_2 \quad 0.0964 \quad \underbrace{0.0857 \dots 0.0857}_6 \right. \\ \left. 0.0286 \quad \underbrace{0 \dots 0}_7 \quad 0.0286 \right] \quad (22)$$

步骤5:删除增添的发电、负荷节点后,将节点对应权威值、枢纽值相加,得到最终电力系统各个节点重要度评估结果。

$$C = \left[0.2357 \quad \underbrace{0.1982 \dots 0.1982}_2 \quad 0.2464 \quad \underbrace{0.1232 \dots 0.1232}_2 \right. \\ \left. \underbrace{0.1607 \dots 0.1607}_2 \quad 0.1482 \quad 0.1607 \right] \quad (23)$$

3 算例分析

将 E-SALSA 算法、电气介数算法^[13]以及 MBCC-HITS 算法^[17]在 IEEE300 节点模型中进行对比,以验证 E-SALSA 算法的合理性与有效性。三种算法计算得到的 IEEE300 节点模型中的前 10% 重要节点、流过功率最大的前 10% 节点如表 2 所示。

表2 三种算法得到的前 10% 重要节点

Tab.2 The top 10% important nodes obtained by the three algorithms

排名	E-SALSA	电气介数	MBCC-HITS	潮流
1	130	130	119	130
2	42	81	191	3
3	9003	219	137	137
4	3	42	3	231
5	137	46	188	188
6	73	16	186	119
7	198	3	120	133
8	17	237	7003	42
9	231	150	231	237
10	143	4	118	191
11	133	195	133	16
12	77	194	187	4
13	46	131	130	7130
14	126	126	7130	118
15	237	137	138	181
16	20	7	42	21
17	9005	45	181	7003
18	21	62	121	2
19	45	143	192	12
20	74	133	4	46
21	99	144	20	187
22	49	74	237	186
23	139	231	225	166
24	119	60	21	165
25	140	88	139	238
26	214	37	171	62
27	211	127	46	126
28	38	234	190	117
29	108	129	7017	39
30	188	157	140	120

3.1 电气介数算法与 E-SALSA 算法对比分析

通过删除节点的方式,依次攻击 E-SALSA 算法得到的前 10% 重要节点计算失负荷规模,得到如图 6 所示的蓝色曲线;依次攻击电气介数算法计算得到的前 10% 重要节点,得到如图 6 所示的红色曲线。失负荷规模越大,代表越多

负荷不能得到供电,说明被攻击的节点越重要。在失负荷规模指标下有 29 个位置 E-SALSA 算法大于电气介数算法,1 个位置两个算法大小相等。依次攻击 E-SALSA 算法计算出的前 10% 重要节点计算最大子群规模,得到如图 7 所示的蓝色曲线;依次攻击电气介数算法计算出的前 10% 重要节点,得到如图 7 所示的红色曲线。最大子群规模越小,代表从拓扑角度分析被攻击的节点越重要。E-SALSA 算法有 29 个位置的数值小于电气介数算法得到的数值,1 个位置的数值与电气介数得到的数值相同。因此从两个指标的结果来分析,E-SALSA 算法相比电气介数算法能够更精确地评估电力系统重要节点。

这是由于文献[13]提出的电气介数算法是一种在图论介数指标基础上,结合基尔霍夫定律的电力系统重要节点评估算法。在评估过程中,电气介数算法更侧重于将处在更多节点联通路径上的节点赋予较高的重要度数值。但是,对于处于电力系统拓扑结构边缘的发电、负荷节点,电气介数算法无法进行有效的重要度评估。

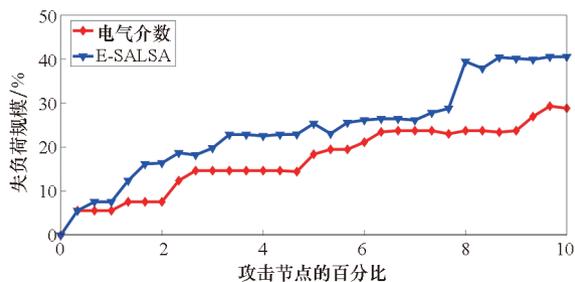


图 6 依次攻击 E-SALSA、电气介数两种方法前 10% 重要节点得到的失负荷规模

Fig. 6 Load loss scale obtained by attacking the first 10% important nodes of E-SALSA and electrical betweenness in sequence

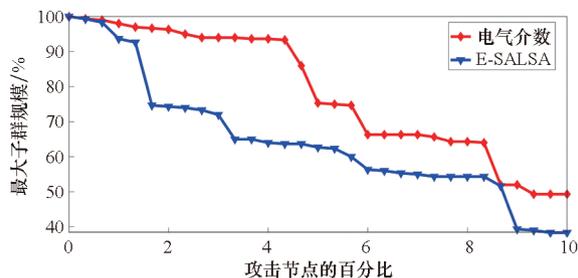


图 7 依次攻击 E-SALSA、电气介数两种方法前 10% 重要节点得到的最大子群规模

Fig. 7 The maximum subgroup size obtained by attacking the first 10% important nodes of E-SALSA and electrical betweenness in sequence

3.2 MBCC-HITS 算法与 E-SALSA 算法对比分析

为了更明了地分析 MBCC-HITS 算法和 E-SALSA 算法的特点,使用图 3 所示 10 节点电力系统进行详细分析。表 3 为 MBCC-HITS 算法、E-SALSA 算法对 10 节点系统的计算结果,以及节点潮流从大到小的排序结果。

表 3 10 节点电力系统计算结果

Tab. 3 Calculation results of 10-node power system

排名	E-SALSA	MBCC-HITS	潮流
1	4	1	1
2	1	10	10
3	2	2	2
4	3	3	3
5	7	7	4
6	8	8	7
7	10	4	8
8	9	5	5
9	5	6	6
10	6	9	9

如表 3 所示,MBCC-HITS 算法更加侧重于从潮流绝对值大小的角度对电力系统重要节点进行评估。在图 3 所示的 10 节点电力系统中,MBCC-HITS 算法评估得到的重要节点排序与按照节点流过潮流绝对值大小的节点排序几乎一致。而 E-SALSA 算法则通过系列改进,综合考虑了潮流、拓扑结构对节点的作用。例如,节点 4 在潮流中排名第 5,从流过潮流的绝对值大小角度来分析是一个并不重要的节点。但是,节点 4 在拓扑结构中所处的位置非常重要,一旦节点 4 受到攻击退出运行,不仅会导致系统解列,同时节点 5、6、9 也会失去电力供应。节点 4 在 MBCC-HITS 算法中排名第 7 是明显不合理的,而在 E-SALSA 算法中排名第 1 则更符合电力系统的实际情况。同样如表 2 所示的 IEEE300 节点电力系统的评估结果,MBCC-HITS 算法前 5% 重要节点的潮流排名除 117 节点排名 31 外,其他节点均位于潮流绝对值大小排名的前 10%,而 E-SALSA 算法评估得到的结果则不存在这样的情况。

依次攻击 E-SALSA 算法前 10% 重要节点并计算最大子群规模指标,得到如图 8 所示的蓝色曲线;依次攻击 MBCC-HITS 算法得到的前 10% 重要节点,得到如图 8 所示的红色曲线。E-

SALSA 算法除了第一个位置的数值与 MBCC-HITS 算法相等,其余位置的数值均小于 MBCC-HITS 算法。这证明在拓扑结构方面,E-SALSA 算法相比 MBCC-HITS 算法体现出优势。

依次攻击 E-SALSA 算法前 10% 重要节点计算失负荷规模,得到如图 9 所示的蓝色曲线;依次攻击 MBCC-HITS 算法得到的前 10% 重要节点,得到如图 9 所示的红色曲线。除少数位置的结果相近外,其他位置 MBCC-HITS 算法都大于 E-SALSA 算法。这是因为 MBCC-HITS 算法更考虑潮流的影响,未充分考虑电力系统拓扑结构的作用。结合基于最大子群规模的分析,由于 E-SALSA 具有综合考虑潮流和拓扑结构的特点,因此 E-SALSA 算法相比 MBCC-HITS 算法更具有合理性。

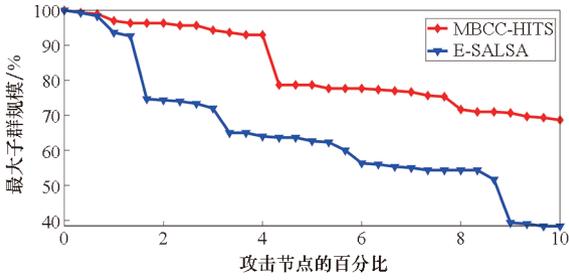


图 8 依次攻击 E-SALSA、MBCC-HITS 两种方法前 10% 重要节点得到的最大子群规模

Fig. 8 The maximum subgroup size obtained by attacking the first 10% important nodes of E-SALSA and MBCC-HITS successively

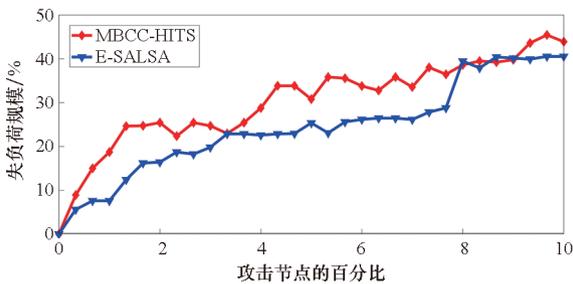


图 9 依次攻击 E-SALSA、MBCC-HITS 两种方法前 10% 重要节点得到的失负荷规模

Fig. 9 Load loss scale of 10% important nodes obtained by attacking E-SALSA and MBCC-HITS successively

4 结论

针对电力系统重要节点评估这一问题,受互联网 SALSA 算法启发,设计了 E-SALSA 算法。E-SALSA 算法综合考虑了电力系统拓扑结构、潮流等因素对节点的影响,从而更加贴近电力系统实

际物理特点。在 IEEE300 节点电力系统中,通过最大子群规模指标、失负荷规模指标量化分析了 E-SALSA 算法与对照算法。根据算例结果与统计分析,可以得出以下结论:

1) E-SALSA 算法在最大子群规模、失负荷规模两个指标上相比电气介数算法均体现出优势。证明了本算法相比电气介数算法,能够更准确地进行电力系统重要节点评估。

2) 通过分析 MBCC-HITS 算法,发现了该算法更侧重潮流因素、未充分考虑电力系统拓扑结构作用的不足。

3) 通过 E-SALSA 算法与 MBCC-HITS 算法在最大子群规模、失负荷规模两个指标下的分别评估,进一步验证了 E-SALSA 算法更合理地考虑了拓扑结构、潮流等因素对节点的影响,证明了 E-SALSA 算法的合理性与有效性。

参考文献 (References)

- [1] 李晖,刘栋,姚丹阳. 面向碳达峰碳中和目标的我国电力系统发展研判[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(18): 6245-6259.
LI H, LIU D, YAO D Y. Analysis and reflection on the development of power system towards the goal of carbon emission peak and carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(18): 6245-6259. (in Chinese)
- [2] 王伟胜,林伟芳,何国庆,等. 美国得州 2021 年大停电事故对我国新能源发展的启示[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(12): 4033-4043.
WANG W S, LIN W F, HE G Q, et al. Enlightenment of 2021 texas blackout to the renewable energy development in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(12): 4033-4043. (in Chinese)
- [3] ZHAO J X, ZHANG X, DI F Q, et al. Exploring the optimum proactive defense strategy for the power systems from an attack perspective[J]. Security and Communication Networks, 2021, 2021: 6699108.
- [4] BUSBY J W, BAKER K, BAZILIAN M D, et al. Cascading risks: understanding the 2021 winter blackout in Texas[J]. Energy Research & Social Science, 2021, 77: 102106.
- [5] MENCK P J, HEITZIG J, KURTHS J, et al. How dead ends undermine power grid stability[J]. Nature Communications, 2014, 5: 3969.
- [6] 钱宇骋. 过载主导型连锁故障预测和风险控制[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2018.
QIAN Y C. Forecast and risk management of overload leading cascading failures[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [7] BARABASI A L, ALBERT R. Emergence of scaling in random networks[J]. Science, 1999, 286(5439): 509-512.
- [8] SATOTANI Y, MIGITA T, TAKAHASHI N, et al. An algorithm for updating betweenness centrality scores of all vertices in a graph upon deletion of a single edge[J]. Journal of Complex Networks, 2022, 10(4): 1-22.
- [9] ALBERT R, ALBERT I, NAKARADO G L. Structural

- vulnerability of the North American power grid[J]. *Physical Review E*, 2004, 69(2): 025103.
- [10] ROSATO V, ISSACHAROFF L, GIANESE G, et al. Influence of the topology on the power flux of the Italian high-voltage electrical network [EB/OL]. (2009 - 09 - 09) [2021 - 08 - 02]. <https://arxiv.org/abs/0909.1664v1>.
- [11] PAGANI G A, AIELLO M. Towards decentralization: a topological investigation of the medium and low voltage grids[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2011, 2(3): 538 - 547.
- [12] DING M, HAN P P. Reliability assessment to large-scale power grid based on small-world topological model [C]// *Proceedings of International Conference on Power System Technology*, 2007.
- [13] WANG K, ZHANG B H, ZHANG Z, 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): 4692 - 4701.
- [14] ALBERT R, JEONG H, BARABÁSI A L. Diameter of the world-wide web[J]. *Nature*, 1999, 401(6749): 130 - 131.
- [15] STROGATZ S H. Exploring complex networks[J]. *Nature*, 2001, 410(6825): 268 - 276.
- [16] LI C B, LIU W C, CAO Y J, 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.
- [17] WANG H F, SHAN Z B, YING G L, et al. Evaluation method of node importance for power grid considering inflow and outflow power[J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2017, 5(5): 696 - 703.
- [18] XIE Y, HUANG T Z. A model based on cocitation for web information retrieval [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014, 2014: 418605.
- [19] GIBSON D, KLEINBERG J, RAGHAVAN P, et al. Inferring Web communities from link topology[C]// *Proceedings of the 9th ACM Conference on Hypertext and Hypermedia*, 1998.
- [20] LI H C, ZHAO C L, LIU Y Y, et al. Anomaly detection by discovering bipartite structure on complex networks [J]. *Computer Networks*, 2021, 190: 107899.
- [21] LEMPEL R, MORAN S. The stochastic approach for link-structure analysis (SALSA) and the TKC effect [J]. *Computer Networks*, 2000, 33(1/2/3/4/5/6): 387 - 401.
- [22] 库珊, 刘钊. 基于 PageRank 与 HITS 的改进算法的网页排名优化 [J]. *武汉科技大学学报*, 2019, 42(2): 155 - 160.
- KU S, LIU Z. An improved algorithm for page rank optimization based on PageRank and HITS algorithms [J]. *Journal of Wuhan University of Science and Technology*, 2019, 42(2): 155 - 160. (in Chinese)