

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2019.03.009

基于最大流算法的复杂电力网络脆弱性分析

雷敏, 莫霜叶

(湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 结合电力网络的电气特征, 提出一种基于复杂网络理论和网络最大流算法得到定位电力网络关键线路的方法。首先, 通过计算电力网络导纳矩阵, 对连接线赋予相应权重; 然后, 基于网络最大流算法算出连接线最大流量, 并综合导纳及线路最大流量值作为识别关键线路新的状态指标。最后, 对 IEEE 39 节点系统和 IEEE 118 节点系统进行仿真分析。结果表明, 该系统对随机攻击具有较强的鲁棒性, 随机选择和移除元件对系统效率几乎没有影响, 但对有高中心性指数的线路蓄意攻击后, 网络效率急剧下降, IEEE 39 系统约下降了 60%, IEEE 118 系统约下降了 40%。

关键词: 复杂网络理论; 脆弱性; 介值指标; 最大流算法

中图分类号: TM711.1

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2019)03-0055-07

引文格式: 雷敏, 莫霜叶. 基于最大流算法的复杂电力网络脆弱性分析 [J]. 湖南工业大学学报, 2019, 33(3): 55-61.

Vulnerability Analysis of Complex Power Network Based on Maximum Flow Algorithm

LEI Min, MO Shuangye

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: Combined with the electrical characteristics of power network, a method has thus been proposed based on complex network theory and network maximum flow algorithm to locate the key lines of power network. Firstly, by calculating the power network admittance matrix, the connecting lines are assigned with corresponding weights. Then, based on the maximum flow algorithm of the network, the maximum flow of the connecting line can be worked out, with a synthesis of the admittance and maximum flow of the line as new state indicators for identifying key lines. Finally, the simulation analysis has been carried out of the 39-node system and 118-node system of the IEEE. The results show that the system has strong robustness to random attacks, with the efficiency of the system almost unaffected by the random selection and removal of components, while the efficiency of the network decreases sharply with deliberate attacks on lines with high centrality index, with a decrease by about 60% the efficiency of the IEEE 39 system and a decrease by about 40% the efficiency of the IEEE 118 system.

Keywords: complex network theory; vulnerability; betweenness index; maximum flow algorithm

1 研究背景

近年来, 国内外发生了多起大规模停电事故, 都是由初始的局部故障逐渐发展为大规模的级联故障导致的电力系统瘫痪, 造成了巨大的经济损失。尽管

电网的二次保护系统发展迅速, 自动安全装置和防御系统为电网提供了安全运行保障, 但其自身的可靠性和稳定性仍亟需提高。

复杂网络理论通过对网络拓扑结构特征量统计

收稿日期: 2018-09-13

作者简介: 雷敏 (1973-), 女, 湖南株洲人, 湖南工业大学副教授, 博士, 主要从事复杂系统可靠性分析与优化等方面的教学与研究, E-mail: leimin0606@hotmail.com

规律的研究,揭示各种复杂网络的随机演化性质、结构稳定性及受到攻击时的动力学传播特性,对研究复杂电力系统的结构脆弱性、连锁故障的内在传播机制及相应的电网动态行为,具有重要的参考价值,已被广泛地应用于电力网络分析中^[1-3]。

2003年8月,美国电网连锁故障导致大规模停电后,Albert等人首次应用复杂网络理论研究了北美电网结构的脆弱性^[4]。意大利电力网络连锁故障而导致停电事故后,Crucitti等人在连锁故障模型的基础上分析了电力网络故障,认为复杂电力网络中某些关键节点的失效会导致电力系统发生级联故障。复杂网络理论能很好地解释电力系统中类似级联效应的现象,但是在寻找电网关键节点方面却不能起到较好的作用。因此,亟需能够识别复杂电力系统中关键线路的技术。

针对上述问题,文献[5]基于复杂网络理论,将电力网络抽象为无向网络拓扑结构,提出依据输电线路的电抗值为介数指标衡量电网脆弱性的方法,但因未考虑电力系统功率流动有向性的电气特征,有一定局限性。文献[6]将电力网络抽象为复杂网络,通过网络统计特性定义高介数节点和高度数节点,并比较随机节点、高度数节点和高介数节点对电网稳定性的影响,认为高介数节点为网络关键节点,但忽略了网络路径长度和链路权重对系统稳定性的影响。

可见,上述基于复杂网络理论的电力系统脆弱性分析各有其局限性。基于此,本研究将电力网络抽象为一个复杂网络,综合电力网络的电气特征,提出一种基于线路功率流分析的新的中心性指标,它能检测电力网络中的脆弱线路,并提出了相应的建模和算法。该算法已经在IEEE 39节点系统和IEEE 118节点系统仿真中被证明可用于识别易受攻击的线路,并通过对比电力网络中对于随机攻击和蓄意攻击间的差别,验证了最终结果的正确性。

2 复杂网络理论简介

2.1 相关研究简介

自Erdos和Renyi提出了随机网络模型以来,复杂网络的研究就一直受到了科学和工程等领域关注^[1]。由于随机网络和规则网络的局限性,1998年,Watts和Strogatz提出了小世界(small-world)网络概念^[7-8]。小世界网络介于规则网络和随机网络之间。规则网络每条边以随机概率 P 重新连接到网络中的新节点上,当 $P=0$ 时,为规则网络。随着 P 值的增加,网络的随机性增强。当 $0 < P < 1$ 时,网络符合小世界

模型特征,为小世界网络。当 $P=1$ 时,所有线路重新随机布线,为随机网络。电力系统就是介于规则网络和随机网络之间的小世界网络。图1为规则网络、小世界网络和随机网络的网络拓扑模型与随机性关系图。

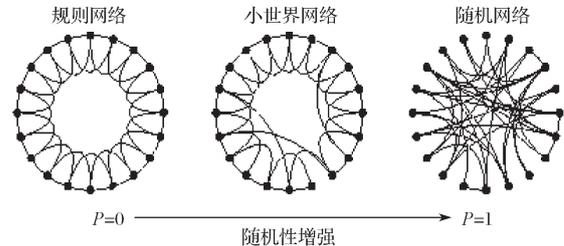


图1 网络拓扑模型与随机性关系图

Fig. 1 Network topology model with its random relation

2.2 复杂网络拓扑特征参数

定义复杂网络研究中的几个主要特征参数如下:

1) 节点度数 D 。节点度数也称为度,即指连接节点的边的数量。

2) 网络平均节点度数 K 。对于一个有 n 个节点和 E 条边的网络,其平均节点度数 K 的表达式为

$$K=2E/n。 \quad (1)$$

3) 聚类系数 C 。聚类系数是一个专门衡量网络节点集聚程度的参数, C 值越大,则节点与相邻节点间的连接越紧密。已知网络 G 由 i 个节点、 N 条边组成, C_i 是每个节点的聚类系数,可表示为 $C_i=a_i/b_i$,其中 a_i 为与节点 i 相邻节点之间连接边数的实际值, b_i 为与节点 i 相邻的节点之间最大的连接边数。聚类系数 C 的表达式为

$$C = \frac{1}{N} \sum_{i \in G} C_i。 \quad (2)$$

4) 特征路径长度 L 。信息通过网络中的链路从一个节点传输到另一个节点时,其传递路径可能不止一条,但最有效的是沿着最短路径进行。网络中两个节点间最短路径长度的平均值称为特征路径长度。特征路径长度可用于衡量网络工作效率。设网络 G 中有 N 个节点,且节点 i 和节点 j 为网络中的不同节点, d_{ij} 是节点 i 至节点 j 的最短路径,则其特征路径长度 L 的表达式为

$$L = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i,j \in G, i \neq j} d_{ij}。 \quad (3)$$

2.3 电力系统复杂网络模型

以复杂网络理论研究电力网络特性时,需先将电力网络简化为拓扑模型。建模过程中,发电机、母线和负载均可以被简化为节点,节点间的传输线可以被建模为边。

基于复杂网络理论, 将电力网络 G 模拟为具有 n 个节点、 k 条支路的网络。 $G=(V, E)$ 的邻接矩阵为 $E=\{e_{ij}\}$, 邻接矩阵 E 的元素值可定义其网络的连通性。若节点 i 和节点 j 之间有支路连接, 则邻接矩阵元素 $e_{ij}=1$, 此时线路正常工作。反之, 若 i 和 j 之间没有支路连接, 则 $e_{ij}=0$, 此时线路故障。由于电力网络结构特性的不同, 线路的权重值需要重新分配。传输线的阻抗、通过传输线路的功率等参数都可以作为线路的权重值。

电力系统功率主要通过线路传输, 且其通过电网的有效路径或最短路径传输, 电力网络中的最短路径称为中介线。如果移除该链接, 则网络的平均路径会显著增加, 电力系统效率下降。因此, 中介线可用于识别网络中的关键节点。

3 基于复杂网络理论的电网拓扑建模与特性分析

3.1 拓扑建模

以复杂网络理论研究电力网络需先将电网简化为拓扑模型, 根据 2.3 节建立电力网络拓扑模型, 电力网络中的电流遵循基尔霍夫定律。最大电流或者最大功率通常流经电网中的最短路径, 线路中的导纳与功率成正比, 决定电流流经线路的难易程度。因此, 流经大功率网络的线路可以用总线导纳矩阵描述。在电力网络 G 中, 线路电流的数学表达式如下:

$$I_G = Y_G V_G \quad (4)$$

式中: I_G 为节点电流矢量; V_G 为节点电压或总线电压矢量; Y_G 为 $n \times n$ 的支路导纳矩阵。

根据式 (4) 可求出电流流经电力线路的大小。将式 (4) 改写为如下矩阵形式

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中, 导纳 Y_{ij} ($i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, n$) 表示为

$$Y_{ij} = \begin{cases} -(G_{ij} + jB_{ij}), & i \neq j; \\ \sum_{i \neq j} (G_{ij} + jB_{ij}), & i = j. \end{cases} \quad (6)$$

式 (6) 中: B_{ij} 为节点 i 和节点 j 间的支路电纳; G_{ij} 为节点 i 和节点 j 间的支路电导。

导纳值可作为电力线路的权值。

3.2 电网结构特性分析

稳定状态下, 电力系统是有向网络, 可测量并确

定电力网络中功率流的大小及方向。图 2 显示了在 PowerWorld 中建模的电力系统简单示例, 从中可以清楚地看到稳定状态下网络中的功率流动是定向的。

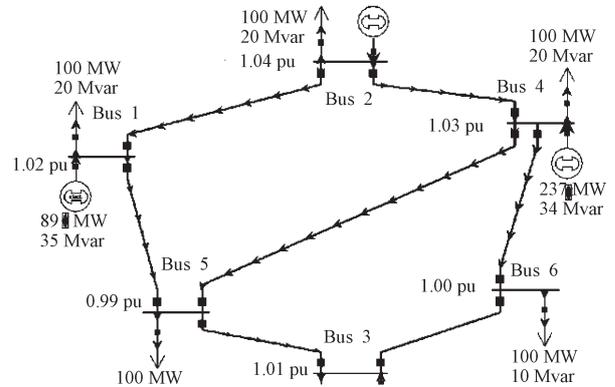


图 2 PowerWorld 显示电力系统为定向网络

Fig. 2 Power system shown as a directed network using PowerWorld

因此, 将电力系统模拟为有向图模型, 这意味着网络是不对称的, 不具有互惠元素, 即若存在节点 i 到节点 j 的电流, 则反向电流不存在。同时, 将导纳值作为电力网络线路的权重, 意味着导纳值越高, 线路可以承载更多的功率。

4 基于最大流算法的介值指标

4.1 最大流算法

最大流问题 (maximum flow problem) 是一种组合最优化问题。通过讨论如何利用装置的能力, 使得运输的流量最大、效果最好。电力网络中的功率流动问题可以模拟为网络最大流问题, 解决最大流问题的最大流算法即在不超过任何线路容量的情况下, 计算网络中从不同源点到汇点之间的可行流量, 并求出最大流量。其中, 发送信息或数据流的节点称为源点, 入度为 0; 吸收信息或数据流的节点称为汇点, 出度为 0。Ford-Fulkerson^[9] 在 1956 年首次提出了最大流算法, 此后, 很多科学家相继提出改进算法, 如 Edmund-Karp 算法^[10]、Goldberg 算法^[11]、Ahuja 和 Orlin 算法^[12] 等, 改进的算法较初始算法计算速度更快, 精确度更高。

本研究使用 Ford-Fulkerson 算法^[13] 寻找通过该电力网络线路的最大流量。从电力网络拓扑模型发电节点开始搜寻, 通过直接或间接连接到负荷节点的电力线路求出线路的最大功率值。发电节点的电能流量入度为 0, 路径中间连接节点的流入和流出量相等。根据“最大流最小割”定理, 该流量值也等于“最小切割”边缘集合的流量之和, 也称为 Ford-Fulkerson 定理。

设电力网路 G 为有向网络, P 是从发电节点到负荷节点的一组增广路径。网络上的权重值定义了每条线路的容量值 c_{ij} , 流经节点 i 至节点 j 的线路流量为 f_{ij} 。则可将最大流算法总结如下:

1) 将增益路径 P 中每条边中的起始流量 f_{ij} 标记为 0, 即

$$f_{ij}=0。$$

2) 对 G 中从发电节点到负荷节点的每个增广路径 P , 残差 r 为无穷大, 即

$$r=\infty。$$

3) 增广路径 P 中节点 i 到节点 j 的线路 r , 记

$$r=\min(r, (c_{ij}-f_{ij}))。$$

4) 计算连接节点 i 到节点 j 的线路流量值 f_{ij} , 为

$$f_{ij}=f_{ij}+r。(7)$$

4.2 中心性指数

电力网络功率流动遵循基尔霍夫定律, 流经任何网络线路的功率值与其导纳矩阵成正比。因此, 将导纳值作为传输线路的权重, 基于最大流定义可得到新的中心性指数。

电力网络 G 中有 m 个发电节点, n 个负荷节点, 从发电节点 u 到负荷节点 v 的最大流量为 f_{\max} , f_{ij} 为通过线路 $E_{ij}(i \neq j)$ 的流量值。其中心性指数定义如下:

$$C_{ij} = \sum_{u=1}^m \sum_{v=1}^n f_{ij}^{uv}。$$

将上述方程进行归一化为相对值:

$$\overline{C}_{ij} = \sum_{u=1}^m \sum_{v=1}^n f_{ij}^{uv} / \sum_{u=1}^m \sum_{v=1}^n f_{\max}^{uv}。(8)$$

电力网络 G 由公式 (8) 对网络中线路的流量值进行排序, 高流量值的线路中心性指数更高。

4.3 关键线路识别流程

电力网络负责将电能从发电机运送到用户负荷端, 与网络的整体效能密切相关。识别关键线路的算法流程如图 3 所示。对关键线路识别的具体描述如下:

1) 根据 2.3 节建立电力网络拓扑模型;

2) 判断网络的连通性, 确定电网中各节点所属的分区;

3) 计算电力网络各分区的导纳矩阵 Y_G , 并对连接的传输线添加权重;

4) 任意选取一对发电-负荷节点 (i, j) , 判断是否在同一分区中; 若 (i, j) 不在同一分区中, 则重新选取; 若 (i, j) 在同一分区中, 则注入有功功率, 计算从发电节点到负荷节点的最大流量值 f_{\max} ;

5) 遍历所有发电-负荷节点对后, 根据公式 (7) 计算不同发电-负荷节点对中线路的电气介数, 并根据公式 (8) 将数据归一化;

6) 将线路电气介数降序排列, 计算其累计分布;
7) 使当前线路失效, 并计算不同类型系统故障前后连通性水平和最大传输能力变化, 验证结果。

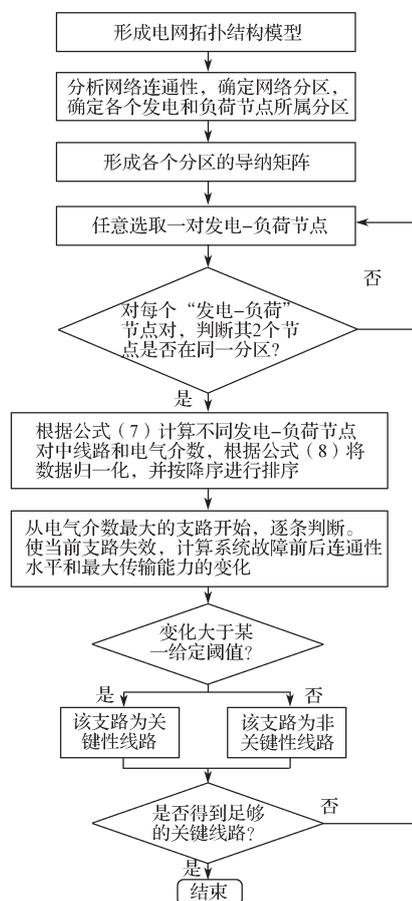


图 3 关键线路算法流程

Fig. 3 Flow chart of key route algorithm

5 电网结构脆弱性分析

5.1 电网结构脆弱程度的状态指标

电网结构脆弱性的研究方法有静态分析法和动态分析法两种, 两者的区别在于是否考虑故障后电网结构变化引起的连锁反应。静态分析法需先确定能反映电网初始状态的指标; 然后按一定的故障模式移除一定比例的元件或线路, 并计算电网的最终状态指标; 最后得出移除元件比例与电网状态指标的变化曲线。动态分析法通过初始故障或攻击触发其他元件过负荷, 由此产生连锁故障, 并分析电网在不同耐受性水平下的动态行为。两者分析方法的目标均是通过研究元件和线路移除后的电网特性, 对电网中的关键节点和关键线路进行辨识, 最终判断电网的状态。本文使用静态分析法分析电网结构的脆弱性。

电力网络脆弱程度状态指标, 采用最大连通子集的规模 X 表示, 即

$$X = N' / N.$$

式中, N 和 N' 分别为故障前和故障后的最大连通子集规模。

当移除其中的节点或线路时, 电网可能解列为若干个子网络。 X 下降越慢网络效率越高, 电网针对元件移除的鲁棒性越强。

5.2 IEEE 39 节点系统仿真

根据前面章节中的建模原则对 IEEE 39 节点系统进行建模, 模型如图 4 所示。在电网拓扑模型中, 网络中的边是电力系统的输电线、变压器支路; 模型中的节点则为电源点、负荷点以及中间电气连接点。电气网络为有向图, 是不对称网络, 在稳定状态下通过电流流向来定义方向。基于导纳矩阵对电力线路进行加权。图 5 为 IEEE 39 系统模型等效定向网络,

Matlab 根据线路权重算出了线路的最大流量值。图 6 为进行数据归一化处理后的网络模型。

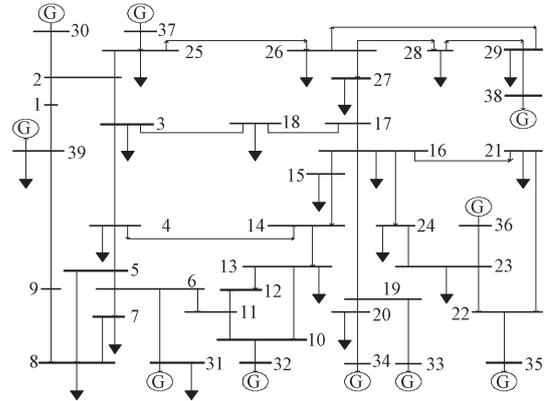


图 4 IEEE 39 节点系统

Fig. 4 IEEE 39 node system

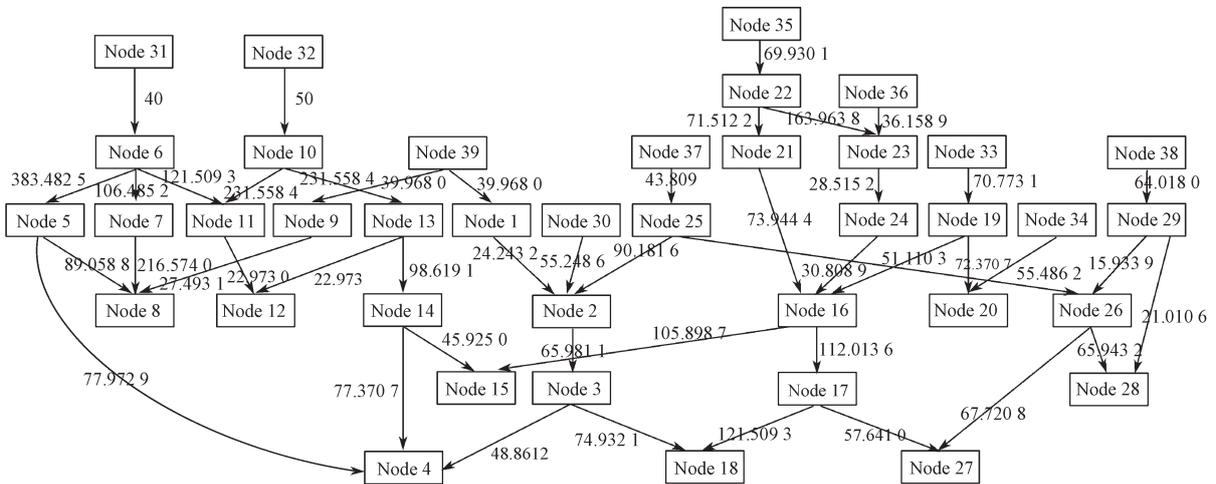


图 5 IEEE 39 系统的定向网络模型

Fig. 5 Directional network model of IEEE 39 system

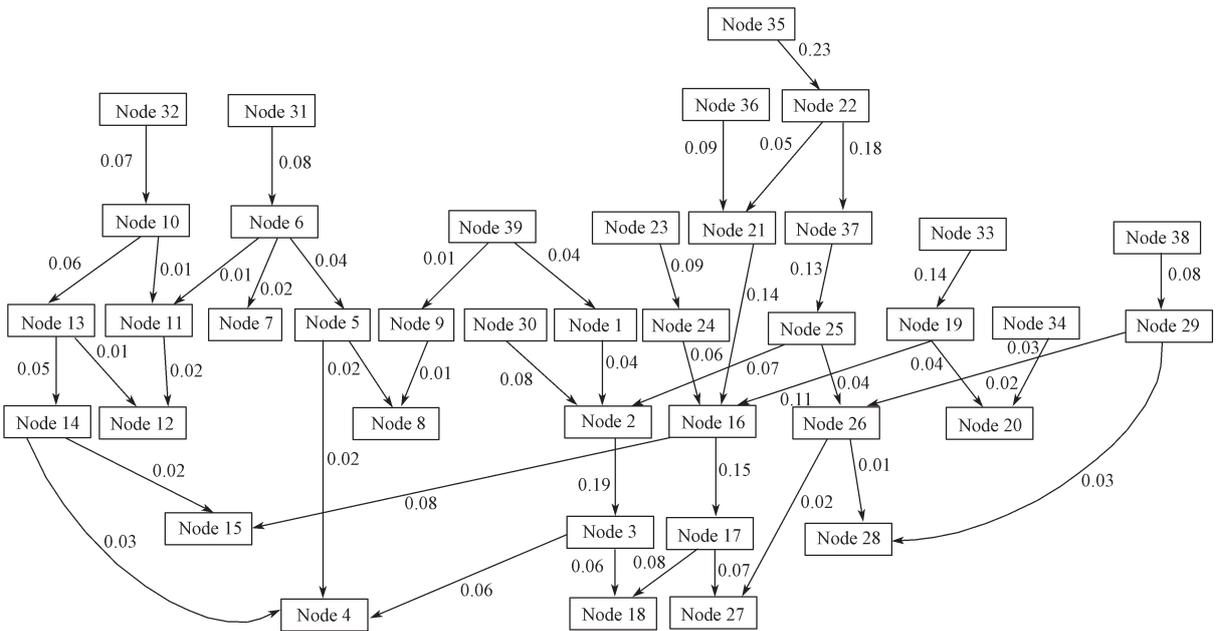


图 6 具有标准化最大流量的 IEEE 39 系统网络模型

Fig. 6 Network model of IEEE 39 system with standardized maximum flow

表1为标准化后前10条高流量值线路及其中心性指数。可见,中心性指数高的线路功率明显高于其他线路的,其能承载更大的功率,是电力网络中的关键性线路。

表1 IEEE 39 系统的中心性指数

Table 1 Centrality index for IEEE 39 Bus System

线路名称	中心性指数	线路名称	中心性指数
L_{35-22}	0.229 1	L_{21-16}	0.140 6
L_{2-3}	0.188 9	L_{37-25}	0.134 1
L_{22-21}	0.177 4	L_{19-16}	0.107 5
L_{16-17}	0.150 8	L_{26-23}	0.094 0
L_{33-19}	0.144 5	L_{23-24}	0.089 9

为验证结论的正确性,仿真中模拟该系统受到不同模式攻击——随机攻击和蓄意攻击,然后对两种不同攻击模式下的网络进行脆弱性分析。随机攻击通过随机移除电力网络中的元件或线路进行模拟;蓄意攻击通过有目的、有针对性地移除中心性指数高的节点或线路进行模拟。本次仿真中,先对系统进行随机攻击,随机移除网络中的10条线路,分析网络系统的鲁棒性。恢复系统后,再对系统进行蓄意攻击,有目的地依次移除10条中心性指数高的线路,记录移除元件后网络的效率,分析电力网络的脆弱性。

图7为对系统分别进行了随机攻击和蓄意攻击后的网络效率结果。可见,进行了10次蓄意攻击后,系统的运行效率急剧下降,接近原网络的40%,但是在随机攻击中,系统的稳定性几乎不受影响,10次攻击后系统运行效率仅下降至原网络的95%。

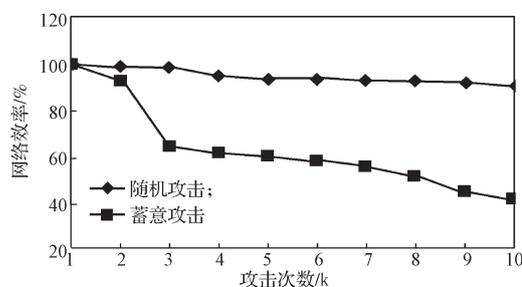


图7 IEEE 39 节点系统在随机攻击和蓄意攻击后的网络效率

Fig. 7 Network efficiency of IEEE 39 node system under random attacks and deliberate attacks

5.3 IEEE 118 系统仿真

对系统进行类似 IEEE 39 系统线路的模拟仿真,识别其中的高中心性指数线路,然后对系统分别进行随机攻击和蓄意攻击,记录结果。图8是 IEEE 118 系统节点测试仿真图。

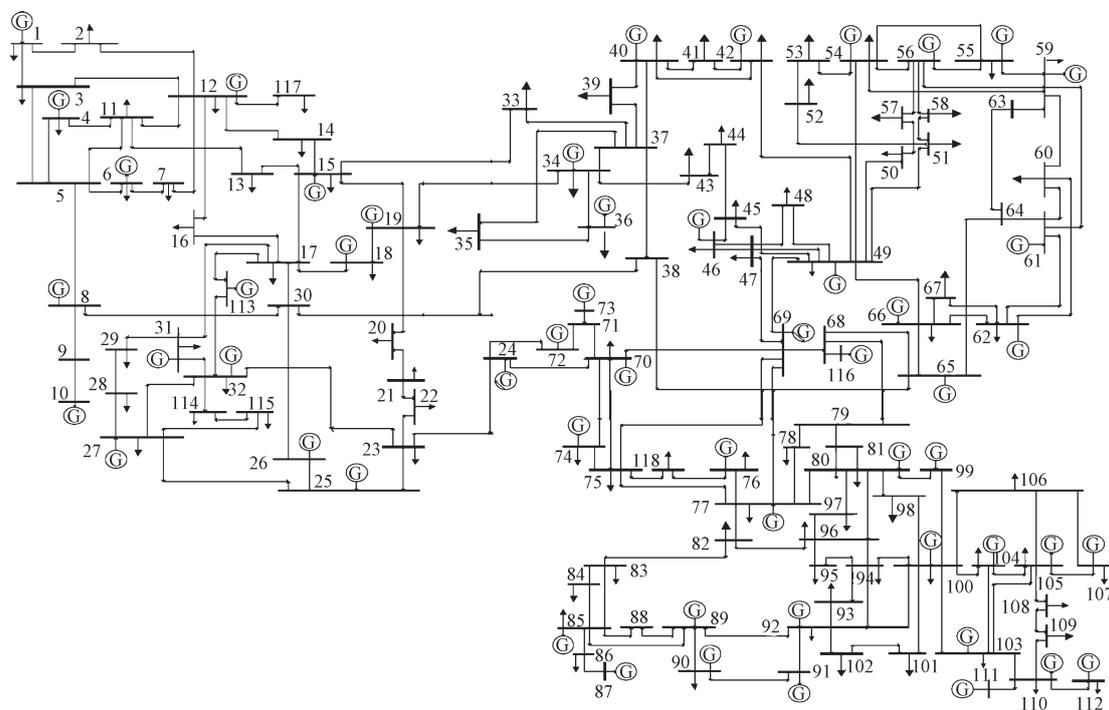


图8 IEEE 118 系统节点系统

Fig. 8 IEEE 118 node system

对 IEEE 118 节点系统进行了灵敏度分析,所得结果如图9所示。由图9可以看出,随机攻击下网络效率没有受到太大的影响,即使随机攻击了10次

之后,网络效率也仅约下降了3%。与此同时,进行了10次蓄意攻击之后的网络效率下降明显,约下降了40%。

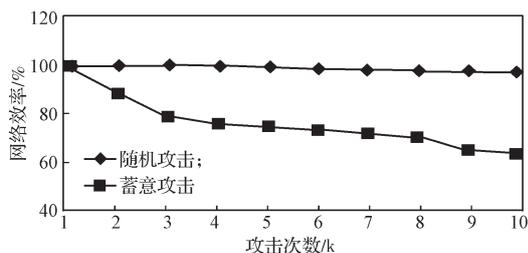


图9 IEEE 118 节点系统在随机攻击和蓄意攻击后的网络效率

Fig. 9 Network efficiency of IEEE 118 node system under random attacks and deliberate attacks

6 结语

本文基于复杂网络理论,提出了一种由新中心性指数判断电力网络线路脆弱性的方法。即根据电力网络中心性指数高的线路位置和流经此线路功率识别易受攻击的线路。电网稳定运行时,线路中的最大流量值是衡量线路功率的指标之一。对网络模拟随机攻击和蓄意攻击,测试网络线路的鲁棒性和脆弱性,最终结果也验证了新中心性指数能判断线路脆弱性。研究表明,该系统对随机攻击具有较强的鲁棒性,如果随机选择和移除元件,对系统的效率几乎无影响。然而,对有高中心性指数的线路蓄意攻击后,网络效率急剧下降,IEEE 39 系统约下降了 60%, IEEE 118 系统约下降了 40%。

对系统线路的脆弱性分析有助于令电力系统更稳定可靠。在基于复杂网络理论的基础上,通过高中心性指数辨别脆弱线路,通过提前保护脆弱线路和预防故障攻击,可提高系统的安全性和可靠性。因此,这种有利于找出脆弱线路从而保护系统稳定性的方法,应进行全面而精确的研究。这一方法也可推广到配电网的稳定性分析中,以确定关键配电线路。

参考文献:

- [1] ERDOS P. On the Evolution of Random Graphs[J]. Transactions of the American Mathematical Society, 2011, 286(1): 257-274.
- [2] DING M, HAN P. Reliability Assessment to Large-Scale Power Grid Based on Small-World Topological Model[C]//International Conference on Power System Technology. [S. l.]: IEEE, 2007: 1-5.
- [3] ZHAO H S, ZHANG C, REN H. Power Transmission Network Vulnerable Region Identifying Based on Complex Network Theory[C]//International Conference on Electric Utility Deregulation & Restructuring & Power Technologies. [S. l.]: IEEE, 2008: 1082-1085.
- [4] 魏震波, 苟竞. 复杂网络理论在电网分析中的应用与探讨[J]. 电网技术, 2015, 39(1): 279-287.
WEI Zhenbo, GOU Jing. An Overview on Application of Complex Network Theory in Power System Analysis[J]. Power System Technology, 2015, 39(1): 279-287.
- [5] 刘耀年, 术茜, 康科飞, 等. 基于电抗加权介数指标的电网脆弱线路识别[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(23): 89-92.
LIU Yaonian, ZHU Xi, KANG Kefei, et al. Identification of Vulnerable Lines in Power Grid Based on Reactive Weighted Median Index[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(23): 89-92.
- [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. Vulnerability Analysis of Large Power Grid Structure Based on Complex Network Theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(10): 138-144.
- [7] 蔡泽祥, 王星华, 任晓娜, 等. 复杂网络理论及其在电力系统中的应用研究综述[J]. 电网技术, 2012, 36(11): 114-121.
CAI Zexiang, WANG Xinghua, REN Xiaona, et al. A Review of Complex Network Theory and Its Application in Power Systems[J]. Power System Technology, 2012, 36(11): 114-121.
- [8] WATTS D J. Small Worlds: The Dynamics of Networks Between Order and Randomness[J]. Physics Today, 2002, 31(4): 74-75.
- [9] 严子恒. 最小割最大流算法的研究与应用[D]. 南京: 南京邮电大学, 2016.
YAN Ziheng. Research and Application of Minimum Cut Maximum Flow Algorithm[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2016.
- [10] BOETTCHER S, MERTENS S. Analysis of the Karmarkar-Karp Differencing Algorithm[J]. European Physical Journal B, 2008, 65(1): 131-140.
- [11] GOLDBERG A V, TARJAN R E. A New Approach to the Maximum Flow Problem[J]. Journal of the ACM, 1988, 35(4): 921-940.
- [12] AHUJA R K, ORLIN J B. A Fast and Simple Algorithm for the Maximum Flow Problem[J]. Operations Research, 1989, 37: 748-759.
- [13] 杜政均. 一种新的最大流算法的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2015.
DU Zhengjun. Research on a New Maximum Flow Algorithm[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015.

(责任编辑: 廖友媛)