

Analysis and Assessment of a Realistic Power Grid's Dynamic Structure Vulnerability

Huan Pan, Rong Guo, Gangdun Hu

Ningxia Key Laboratory of Intelligent Sensing for Desert Information, School of Physics and Electronic-Electrical Engineering, Ningxia University, Yinchuan Ningxia

Email: ph0303@126.com

Received: Oct. 3rd, 2017; accepted: Oct. 16th, 2017; published: Oct. 23rd, 2017

Abstract

In this paper, the method of complex network theory is used to establish the network model of a realistic power grid. Pajek is used to calculate the characteristic parameters of the power grid, determine the network type of the grid. By removing edges/nodes randomly or purposefully, the structural vulnerability of power grid is analyzed. For the deficiency of the model of the non-direction, unweighted complex power system, the reactance of power grid is used as weighted values to build a weighted network model. The vulnerability of weighted grid model is investigated. It can be found that the average path length and betweenness in weighted network are slightly larger than them in unweighted network model by comparing the characteristic parameter values of complex power network models.

Keywords

Power Grid, Complex Network, Vulnerability

实际电网动态结构脆弱性分析与评估

潘欢, 郭嵘, 胡钢墩

宁夏大学物理与电子电气工程学院, 宁夏沙漠信息智能感知重点实验室, 宁夏 银川

Email: ph0303@126.com

收稿日期: 2017年10月3日; 录用日期: 2017年10月16日; 发布日期: 2017年10月23日

摘要

本文主要应用复杂网络理论建立某实际电网网络模型, 应用Pajek软件计算电网拓扑结构特征参数, 判

定电网所属的网络类型,通过随机移除边/点、有目的移出边/点的方法,分析电网的结构脆弱性;针对无向、无权复杂电网模型的不足,以电网线路中电抗值作为权重,建立更加符合电网特性的加权网络模型,研究加权电网模型的脆弱性。通过对比可以发现,加权后网络的平均路径长度与介数略大于未加权网络的。

关键词

电网, 复杂网络, 脆弱性

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

电力是国民经济正常运行的基本保障,电力网络则承担着将电能传输至各用电负荷的重任。电网作为典型的人造系统,是一个时变、高维、非线性、时空大、范围跨越的巨大复杂系统[1] [2]。电力系统复杂性可以分为存在复杂性及演化复杂性,其中时空演化过程中,包括电网连锁故障传播及演化机理在内的演化复杂性,造就了电力系统这样一个鲁棒性与脆弱性兼备的混合体系。因此,电力网络的复杂性使得电力系统安全性、脆弱性评估等研究成为当今极具热点与挑战性的课题。

电力系统脆弱性是近年来针对电力系统安全性及可靠性提出的一个新概念,目前还没有公认的定义和统一的分析标准,由 Fouad 教授及其学生于 1994 年首次提出,主要利用基于神经网络的暂态能量函数来分析电网脆弱性[3]。此后电力领域的学者开始以电力系统大面积停电为目标对电力系统脆弱性进行系统性研究,用于评估电力系统动态安全性[4] [5] [6]。

结构脆弱性是指电力系统正常运行情况下,保持其拓扑结构完整性的能力。对任一给定电网,其网络拓扑结构是唯一的,它是电网内在的本质特征。结构脆弱性是电力系统固有脆弱程度的一种反映,电力网络结构强壮性是电力系统鲁棒的基础。研究表明,电力系统拓扑结构与连锁故障传播有着紧密的联系,运用复杂网络理论分析连锁故障的传播机理已成为电力系统结构脆弱性研究的重要方向[7] [8]。

本文研究的主要内容是基于复杂网络理论,综合分析评估某地电网的脆弱性问题。采用静态脆弱性分析方法在复杂网络分析软件中对实际电网的拓扑结构模型进行分析,同时使用不同的攻击策略、不同的故障指标模拟仿真电网在受到攻击时的脆弱性。在此基础上,引入权重的概念,用动态脆弱性分析方法,更加深入、切合实际的研究电网脆弱性问题。

2. 电力网络拓扑建模原则

考虑到获取数据的特点,及当前小世界网络模型的定义基础(无向、无权、简单、稀疏和连通图),为简化分析过程,对实际电网做如下假设[9]:

- ① 电网拓扑模型中的边是输电线、变压器支路,所有边都是无向边;
- ② 研究对象仅限于高压输电网,且对配电网、发电厂和变电站的主接线结构不予考虑;
- ③ 传输线的拓扑特性均相同,即不考虑传输电压不同的情况,不同传输线的物理构造特性和电气参数差异忽略不计,网络边均为无权边;

④ 包括发电机、负荷、变电站，全部被视为电网拓扑模型中的节点，不考虑大地(零点)，而且各节点被认为不具差别；

⑤ 将同杆并架的输电线合并(不计入并联电容支路)，消除电网拓扑模型中的自环和多重边，使相应的图简化。

3. 电网拓扑建模及统计特征分析

以某地实际电网地理接线图为例，使用上一节所介绍的电网拓扑建模原则，提取电网中的节点与边，将各个节点简化编号，用编号替换实际电网中的各站点名称，利用实际节点与边的连接方式，编写 Pajek 程序，将电网结构特性绘入软件，生成电网拓扑模型。对电网中各节点进行数字编号，便于分析，如图 1 所示。

3.1. 电网统计特征分析

利用 Pajek 软件中的命令，然后应用 Matlab 进行数据统计处理，可得到如图 2 所示的电网节点度数统计图。统计各种度数出现的概率如表 1 所示。

根据表 1 节点度分布统计数据，应用 Matlab 绘制电网节点度分布图，如图 3 所示。

进一步统计分析该系统的其它特征参数：节点数 n 、边数 m 、平均度 k 、聚类系数 C 、平均路径长度 L 和介数 B 。运行 Pajek 中相应的命令可得统计结果如表 2 所示。

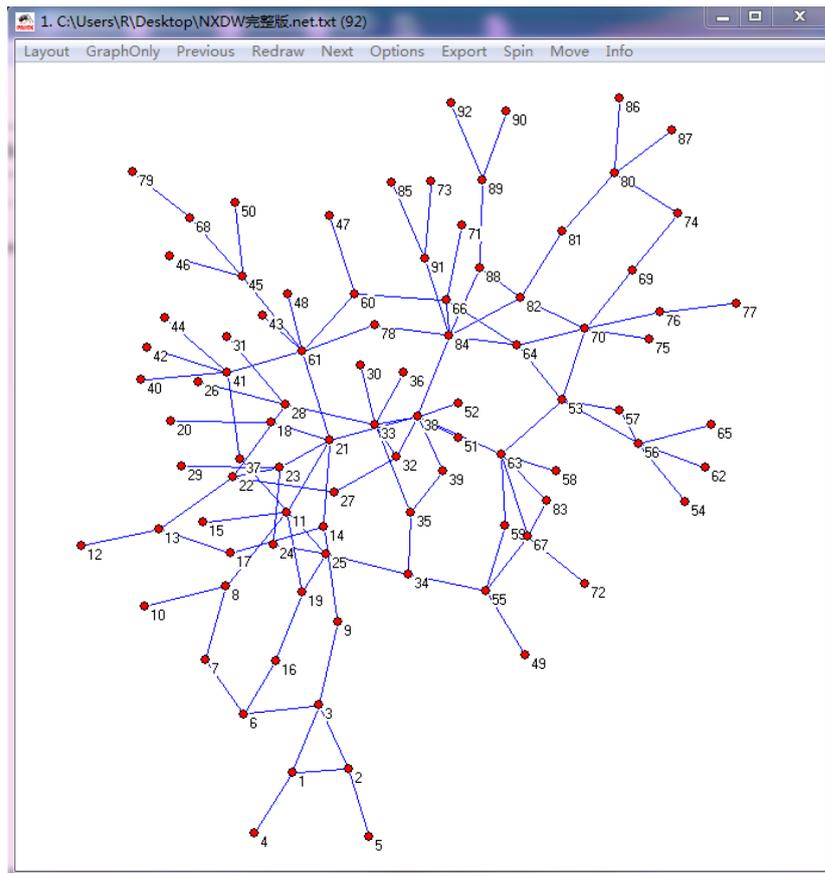


Figure 1. The simplified topological map of power grid nodes at somewhere in 2014
图 1. 2014 年某地电网简化节点编号拓扑模型图

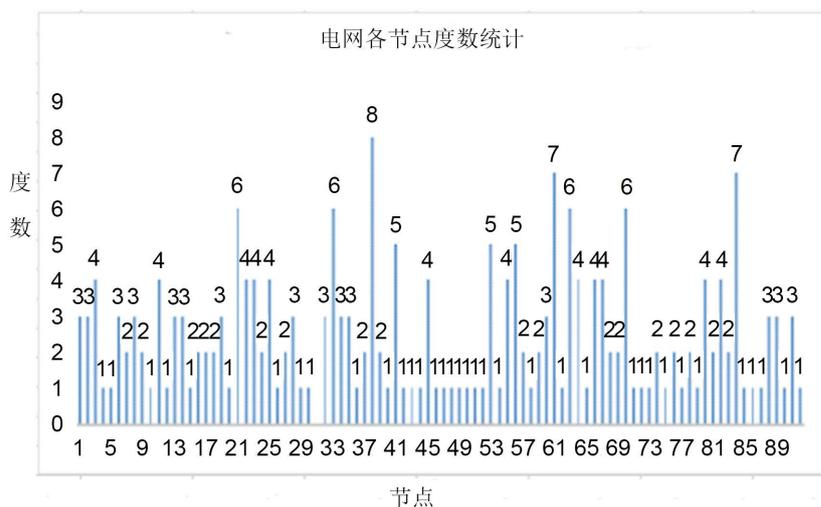


Figure 2. Statistical figure of power grid nodes' degree
图 2. 电网各节点度数统计图

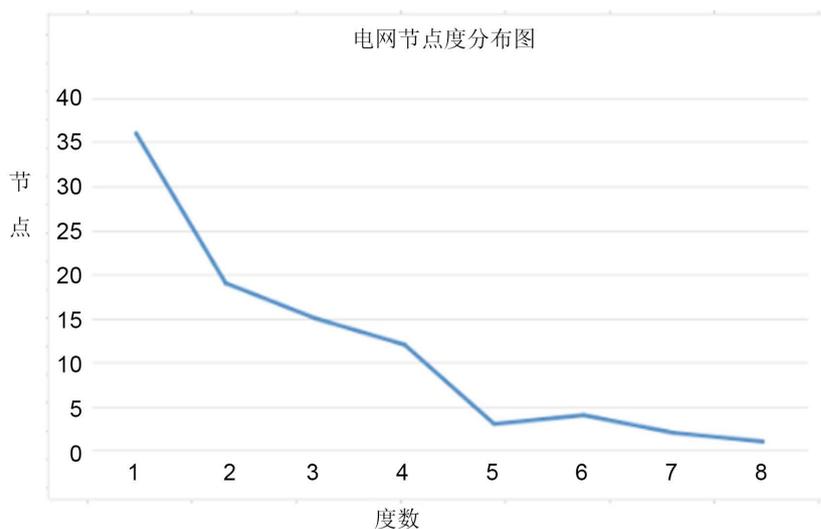


Figure 3. The figure of power grid nodes' degree distribution
图 3. 电网节点度分布图

Table 1. Statistical table of degree distribution of power grid nodes

表 1. 电网节点度分布统计表

度数 k	1	2	3	4
概率 p(k)	0.3913	0.2065	0.1630	0.1304
度数 k	5	6	7	8
概率 p(k)	0.0326	0.0435	0.0217	0.0109

Table 2. Statistical table of power grid's characteristic parameters

表 2. 电网特征参数统计表

统计特征量	节点数目 n	边数目 m	平均度数 k	聚类系数 C	平均路长度 L	介数 B
电网	92	114	2.4565	0.0903	4.9968	0.4108

由表 2 中的特征参数可得到具有相同节点数及相同平均度数的随机网络聚类系数、特征路径长度:

$$\begin{cases} C_{random} \approx \frac{k}{n} = \frac{2.4565}{92} = 0.0267 \\ L_{random} \approx \frac{\ln n}{\ln k} = \frac{\ln 92}{\ln 2.4565} = 5.0315 \end{cases} \quad (1)$$

由(1)及小世界判据 $C \gg C_{random}, L \geq L_{random}$ 可知: 该电网的聚类系数相对要比与具有相同平均度数的等节点随机网络聚类系数大一点, 但还是没有达到远远大于; 电网的平均路径比与具有相同平均度数的等节点随机网络的平均路径长度还要小一点, 是不满足小世界特性判据的。通过电网各节点度数统计图可以发现, 电网大部分节点度数很低, 只有 1 或 2, 度数较高的节点数目不多, 网络整体表现出无标度特性, 它的度分布图呈幂函数下降趋势, 且斜率较大, 可判断网络的大部分节点度数较低, 只有部分少数节点度数较高, 也呈现出典型的无标度特性。综合可以得出电网图 1 属于无标度网络。

3.2. 电网统计特征

图 1 所示电网在应对连锁故障时, 拥有一定的抵挡能力, 但这并不意味着不会遭遇连锁故障, 从电网结构的角度出发, 此电网依然存在高度数、高介数的输电单元, 是网络固有的脆弱环节。欲提高整个电网的可靠性水平, 必须从电网结构出发, 对高度数节点、高介数节点和线路进行重点防护, 才能降低大规模停电事故发生概率, 保证系统的安全稳定运行。

同时, 由于图 1 电网这类无标度网络具有少数高度数节点, 而大部分节点的度数较低, 使得网络发生故障时的备用能力很低, 从而造成故障自愈能力较弱, 系统容易面临危险。

4. 电网结构脆弱性研究与分析

本节主要对电网结构脆弱性进行分析, 首先进行静态结构脆弱性分析, 针对其不足, 加入输电线的阻抗值作为权重, 进行动态结构脆弱性分析。

4.1. 电网静态结构脆弱性分析

4.1.1. 元件移除策略

静态分析法通过反映电网状态的指标[10][11][12][13], 计算其初始值; 按照一定的故障模式移除一定比例的节点或边, 并计算电网状态指标; 得到移除元件比例与电网状态指标的变化曲线。具体如下:

a) 随机攻击:

随机攻击节点/边——在各个网络中选取占有全网节点/边总数相同比例的节点/边数目进行攻击, 攻击节点/边的数目逐渐增加。

b) 蓄意攻击:

蓄意攻击节点/边——每次特定移除度数/介数最大节点/边, 并依照度数/介数由大到小逐渐增加被攻击节点/边的数目。

4.1.2. 故障指标

利用复杂网络理论, 确定度、聚类系数、平均路径长度为电力网络结构脆弱性评估指标, 同时在电网拓扑结构基础上, 引入体现电力网络结构变化的两个新指标——最大连通度与连通因子。

a) 最大连通度 G_{max}

最大连通度指电力网络受到干扰后, 在所有仍然连接且具有发电能力节点的网络中, 所含节点数目最多的集团中节点数目占所有剩余节点的比例, 如(2)所示。

$$G_{\max} = \frac{N_{\max}}{N'} \quad (2)$$

其中, N_{\max} 表示电网故障后, 仍然工作的网络中所含节点最多的网络中节点的数目, N' 表示电网故障后所有仍然在工作的节点数目。

b) 连通因子 τ

对于无向复杂网络图, 网络在攻击前网络整体板块数为 $m=1$, 受到攻击之后, 网络裂解为 n 个板块(包括孤立节点), 则连通因子 τ 定义如(3)所示,

$$\tau = \frac{m}{n} \quad (3)$$

式中, m 表示网络在攻击前网络整体板块数(一般将初始网络看做一个整体, 为 1), n 表示电网遭受攻击之后裂解成的板块的个数(包括孤立的节点)。

4.1.3. 静态分析法仿真流程

静态结构脆弱性分析方法不考虑故障后由于电网潮流变化而引起的连锁反应, 主要通过移除一定比例的节点或边, 计算电网的故障指标, 分析电网故障指标与网络元件移除比例的变化曲线。静态脆弱性分析方法的具体过程包括: 生成电网的拓扑结构模型, 计算初始状态下节点和边的介数, 电网的聚类系数、平均路径长度以及电网故障指标; 选择某一种故障模式, 在此故障模式下移除一定数量的节点或边, 每移除一个节点或边后计算当前状态下电网的故障指标; 计算最终状态下电网的故障指标; 得到在一种特定故障模式下, 电网的故障指标随节点或边移除比例的增加而变化的曲线。

4.1.4. 电网静态结构脆弱性

以图 1 电网为例, 用静态脆弱性分析方法研究其脆弱性, 其中表 2 已得到该电网拓扑特征参数值。应用电网的静态脆弱性分析法, 对电网的简化拓扑图分别采用 4.1.1 的攻击模式:

a) 随机攻击电网的节点/边: 移除节点/边时选取网络中总节点/边数的 7%, 14%, 20% 个节点/边(移除 6, 12, 18 个节点/移除 8, 16, 23 条边)。由于随机攻击时移除节点/边的不确定性, 需进行多次的随机攻击, 将每一次攻击后的网络特征参数值记录下来, 多次的试验取平均值, 得到较准确的数据, 综合汇总如表 3、表 4 所示。

Table 3. The statistical table of power grid's characteristic parameters after random attacking nodes

表 3. 随机攻击电网节点后网络的特征参数统计表

移除节点数目	移除节点占原有节点百分比	聚类系数 C	平均路径长度 L	最大连通度 G_{\max}	连通因子 τ	介数 B
6	7%	0.1279	4.6339	0.9069	0.2000	0.3139
12	14%	0.1083	4.5077	0.8625	0.1429	0.2518
18	20%	0.1001	4.4007	0.8649	0.1250	0.2148

Table 4. The statistical table of power grid's characteristic parameters after random attacking edges

表 4. 随机攻击电网的边后网络的特征参数统计表

移除边的数目	移除边占原有边数百分比	聚类系数 C	平均路径长度 L	最大连通度 G_{\max}	连通因子 τ	介数 B
8	7%	0.0836	5.3385	0.9565	0.2500	0.4249
16	14%	0.0824	5.3264	0.9130	0.2000	0.4205
23	20%	0.0765	5.1438	0.6304	0.1429	0.1709

b) 蓄意攻击电网的高度数节点/高介数边：便于比较分析，同样选取网络中 6、12、18 个节点/8、16、23 条边。根据节点/边的度数/介数大小，由高至低选取，使用 Pajek 软件，分析不同个数的节点/边受到攻击后，电网的特征参数的变化情况，汇总如下表 5、表 6 所示。

4.2. 电网动态结构脆弱性

静态结构脆弱性分析时，考虑电网拓扑结构为无向、无权网络，忽略了对潮流分布有重大影响的线路电抗，无向无权模型进行电网脆弱性分析时具有很大的局限性，所得到的结论往往与实际有较大出入。基于此，有效提取电网的固有电气特征，建立更贴近电网物理实际背景的复杂网络模型。将网络中的双回路或多回路输电线合并为单一线路，看作是网络中的一条有权无向边，建立了带加权值的复杂电网模型。

4.2.1. 电网权重参数的选取

输电线的电抗值对电网的运行有着重要影响，且输电线的阻抗值相对于电抗值特别小，可以忽略不计，建立边权为输电线电抗值的加权模型。将有权无向的电网定义为 $N \times N$ 邻接矩阵 $[m_{ij}]$ ，如果节点 i 与节点 j 之间有线路直接相连，那么 m_{ij} 为线路电抗值 X_{ij} ，否则 $m_{ij} = \infty$ 。如下式：

$$\begin{aligned} w_{ij} &= \infty, & i, j\text{-间无边直接相连} \\ w_{ij} &= X_{ij}, & i, j\text{-间有边直接相连} \end{aligned} \tag{4}$$

4.2.2. 加权后的电网拓扑模型参数

a) 在电网发生故障时，网络潮流总是朝着阻碍较小的方向流动，从发电机节点发出的能量到其它节点的方向总是沿着节点间最短路径流动，定义最短路径有助于计算网络的特征参数进而对网络进行实时评估；

如图 4 所示，假设线路 2-3-5 的电抗值大于线路 2-4-5 的电抗值，且以电抗值作为线路的权值，那么 2-4-5 即为两平行路径中的最短路径，虽然它的物理长度要大于 2-3-5，但是网络的潮流是沿着阻碍较小的方向流动的。故加权后的平均路径长度修正为 L' ，其的表达式为(5)：

$$L' = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} d'_{ij} \tag{5}$$

式中： N 为电网节点总数； d'_{ij} 为网络发电 - 负荷节点对之间的最短加权路径上的边数。

b) 网络加权后，由于最短路径长度定义会发生变化，故与之相关的介数也会发生变化。但仍然为节点经过加权后最短路径的次数占加权后最短路径总数的比例；

c) 网络加权后，结构不会发生变化，故节点度数保持不变。加权网络的度与线路权值无关，故在加权网络的拓扑模型中节点度数保持不变；

d) 网络加权后，聚类系数也不发生改变。

Table 5. The statistical table of power grid's characteristic parameters after deliberate attacking nodes

表 5. 蓄意攻击电网节点后网络的特征参数统计表

移除节点数目	移除节点占原有节点百分比	聚类系数 C	平均路径长度 L	最大连通度 G_{max}	连通因子 τ	介数 B
6	7%	0.0620	4.9200	0.4884	0.0769	0.1135
12	14%	0	4.9873	0.3875	0.0400	0.0664
18	20%	0	2.5463	0.1486	0.0278	0.0067

Table 6. The statistical table of power grid's characteristic parameters after deliberate attacking edges
表 6. 蓄意攻击电网的边后网络的特征参数统计表

移除边的数目	移除边占原有边数百分比	聚类系数 C	平均路径长度 L	最大连通度 G_{max}	连通因子 τ	介数 B
8	7%	0.0485	6.1399	0.9348	0.5000	0.3858
16	14%	0.0296	5.4257	0.8696	0.3333	0.2452
23	20%	0.0103	5.182	0.6957	0.2000	0.1308

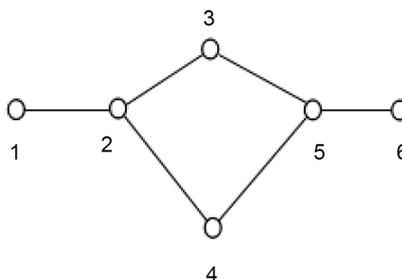


Figure 4. The hypothetical lines
图 4. 假设线路

4.2.3. 动态分析法仿真流程

基于动态分析法电网结构脆弱性分析流程如下：

- 依照前文所述基于复杂网络理论的建模方法将实际电网简化为节点与边的拓扑图，形成电网拓扑结构模型；
- 将两节点之间的线路定义为一条边，两点之间不包含第三个点，否则视为两条边；
- 考虑实际电网中每条线路的不同的电压等级与每两个节点之间的物理距离，计算每条边的电抗值；
- 将电抗值作为权重，加至电网拓扑模型中的每一条边上；
- 在复杂网络分析软件中计算当前状态下加权电网的各个特征参数。

4.2.4. 电网仿真与结果分析

考虑电网线路电抗值，加权后，电网的结构不会发生变化，对应的度数与聚类系数也不会发生变化。加权网络模型与无权网络各个特征参数值如表 7 所示，加权后网络的平均路径长度略大于加权前网络的平均路径长度；加权后电网介数略大于加权前电网介数。为分析加权后电网的脆弱节点与脆弱边，重点分析加权后各节点的介数，故只对最短路径长度与边介数的变化进行对比分析。

由加权介数的定义求出电网拓扑网络加权后的节点介数和边介数，并将其从高到低排列，具体如表 8 所示，限于篇幅本文只列出前 14 个节点介数。

由表 8 中可看出，

- 加权后介数的大小排列与度数的大小排列并不完全一致；
- 一般地，度数较大的节点加权后介数也相应较大，但并不是所有高度数节点加权介数都大，如电网中有两个度数为 5 的节点：节点 41 和节点 56，但加权后的介数较小，即潮流流经的次数不是很多；
- 节点 14 的度数虽然只有 3，但加权后的介数达到了 0.1410，在所有节点介数大小中排第 7，节点 9 的度数只有 2，在整个网络中属于低度数节点，但加权后的介数值为 0.0954，在所有加权节点介数中排名 14，这说明节点 14 与节点 9，虽然在网络中度数比较小，但在实际电网工作中却处于较高的地位，潮流流经它们的次数很多，属于小型枢纽部位。

Table 7. The power grid's characteristic parameters
表 7. 电网各个特征参数值

电网模型	节点数 n	边数 m	平均度数 k	聚类系数 C	平均路径长度 L	介数 B
加权模型	92	114	2.4565	0.0903	5.3241	0.4863
无权模型	92	114	2.4565	0.0903	4.9968	0.4108

Table 8. A list of high betweenness nodes of weighted power grid
表 8. 加权后高介数节点选列表

节点编号	加权介数	节点度数	节点编号	加权介数	节点度数
38	0.4509	8	23	0.1279	4
21	0.4259	6	11	0.1179	4
84	0.3044	7	70	0.1178	6
61	0.2547	7	82	0.1169	4
63	0.2049	6	22	0.1167	4
53	0.1487	5	33	0.1098	6
14	0.1410	3	9	0.0954	2

Table 9. A list of nodes which have a big difference in betweenness
表 9. 加权前后介数相差大的节点列举

节点编号	加权前节点介数	加权后节点介数
22	0.0533	0.1167
23	0.0791	0.1279
27	0.0087	0.1026
32	0.0224	0.2624
57	0	0.1934

Table 10. A list of lines which have a big difference in betweenness
表 10. 加权前后介数相差大的线路列举

线路编号	加权前线路介数	加权后线路介数
21-38	0.1396	0
33-38	0.0954	0
53-56	0.0579	0

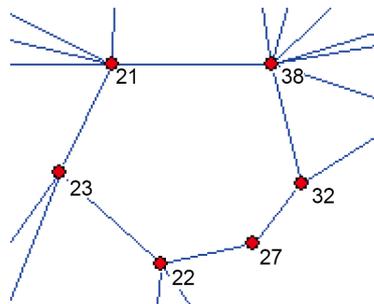


Figure 5. The diagrammatic sketch of 21-38 lines
图 5. 21-38 线路示意图

加权后,大部分节点、线路的介数大小排列在整个网络中处于相似程度,但有几个节点、线路的变化较大,具体如表 9 和表 10 所示。

由于电网运行及发生故障时,潮流总是朝着阻碍较小的方向流动,结合表 9 和表 10 综合分析可发现,加权前后线路介数变化较大的三条线路本身具有较大电抗值,尽管 3 段线路在物理长度方面均属于最短距离,可结合实际电网电气参数后,已不再是网络中的最短路径,即不是潮流流经的最优选择,例如图 5 所示线路 21-38,加权后从节点 21 到节点 38 的最短路径为 21-23-22-28-33-32-38,线路 21-28 被经过更多节点的后者所取代。故其加权后介数为 0。相对应的线路 21-23-22-28-33-32-38 中的节点 22, 23, 28, 32, 33 比未加权重前更加重要。如图 5 所示。

5. 结论

本文主要对某地区实际电网结构脆弱性进行分析。使用元件移除策略(攻击策略)研究电网静态结构脆弱性,即随机攻击与蓄意攻击以及两个故障指标,得到电网在受到外界不同的攻击的时候所表现出来的特性。结合电网实际运行时的一些状态与物理特性,在此基础上,选用实际电网中的电抗值作为线路权重,建立加权电网模型,进行电网的动态结构脆弱性分析。通过比对加权前后电网特性的变化得出,考虑电抗加权后的电网更能贴近实际运行情况。

基金项目

国家自然科学基金(61403219, 61463043)。

参考文献 (References)

- [1] Dobson, I., Chen, J., Carreras, B.A., *et al.* (2001) Examining Criticality of Blackouts in Power System Models with Cascading Events. *Hawaii International Conference on System Science*, Hawaii.
- [2] Carreras, B.A., Lynch, V.E., Dobson, I., *et al.* (2002) Dynamics, Criticality and Self-Organization in a Model for Blackouts in Power Transmission Systems. *Hawaii International Conference on System Science*, Hawaii. <https://doi.org/10.1109/HICSS.2002.993976>
- [3] Zhou, Q., Davidson, J. and Fouad, A.A. (1994) Application of Artificial Neural Network in Power System Security and Vulnerability Assessment. *IEEE Transactions on Power Systems*, **9**, 525-532. <https://doi.org/10.1109/59.317570>
- [4] 李蓉蓉, 张晔, 江全元. 复杂电力系统连锁故障风险评估[J]. 电网技术, 2006, 30(10): 18-22.
- [5] Wang, K., Zhang, B.H., Zhang, Z., *et al.* (2011) An Electrical Betweenness Approach for Vulnerability Assessment of Power Grids Considering the Capacity of Generators and Load. *Physica A*, **390**, 4692-4701. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2011.07.031>
- [6] Vaiman, M., Bell, K., Chen, Y., *et al.* (2012) Risk Assessment of Cascading Outages: Methodologies and Challenges. *IEEE Transactions Power Systems*, **27**, 631-641. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2011.2177868>
- [7] 史进. 电力系统复杂网络特性分析与模型改进[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(25): 93-98.
- [8] 徐立新, 杨建梅, 姚灿中, 王世华. 基于加权网络模型的电网连锁故障分析[J]. 控制理论与应用, 2011, 28(11): 1607-1612.
- [9] Watts, D.J. and Strogatz, S.H. (1998) Collective Dynamics of Small World Networks. *Nature*, **393**, 440-442. <https://doi.org/10.1038/30918>
- [10] Wang, B., Tang, H.W., Guo, C.G., *et al.* (2006) Entropy Optimization of Scale-Free Network's Robustness to Random Failures. *Physica A*, **363**, 591-596. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2005.08.025>
- [11] 吴俊, 谭跃进, 郑宏钟, 等. 无标度网络拓扑结构非均匀性研究[J]. 系统工程理论与实践, 2007, 27(5): 101-105.
- [12] 林振智, 文福拴. 基于加权复杂网络模型的恢复路径优化方法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(6): 11-15.
- [13] 沈瑞寒, 刘涤尘, 赵洁, 廖清芬, 杜振川. 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.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2161-8763，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：sg@hanspub.org