

# 基于加权网络模型的电网连锁故障分析

徐立新<sup>1,2</sup>, 杨建梅<sup>2</sup>, 姚灿中<sup>1</sup>, 王世华<sup>3</sup>

(1. 华南理工大学 经济与贸易学院, 广东 广州 510006; 2. 华南理工大学 工商管理学院, 广东 广州 510640;

3. 广东石油化工学院 信息与计算科学系, 广东 茂名 525000)

**摘要:** 本文基于复杂网络理论提出了一种评估电网发生连锁故障的新方法, 运用复杂网络理论来分析电网有助于从电网架构上研究连锁故障. 首先, 以输电线路和变压器的阻抗模值为边权构建了电网加权拓扑模型, 并给出评价电网中心性的指标; 其次, 基于线路断开瞬间线路传输功率优先分配到邻近线路的原则, 提出评估电网发生连锁故障的阈值模型; 最后, 以 IEEE 118 节点系统为例, 通过计算反映其中心性的指标值, 找出了 IEEE 118 节点系统的中心节点, 验证了加权拓扑模型在反映节点中心性方面优于无权拓扑模型, 与实际电网也更接近. 在此基础上, 针对四种攻击网络的典型模式, 运用阈值模型计算该系统发生连锁故障的临界阈值, 揭示了电网发生连锁故障的机理.

**关键词:** 电力网络; 连锁故障; 复杂网络; 加权网络

**中图分类号:** TM711, TM732 **文献标识码:** A

## Analysis of cascading failures in power grids based on weighted network model

XU Li-xin<sup>1,2</sup>, YANG Jian-mei<sup>2</sup>, YAO Can-zhong<sup>1</sup>, WANG Shi-hua<sup>3</sup>

(1. School of Economics and Commerce, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510006, China;

2. School of Business Administration, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510640, China;

3. Department of Information and Computing Science, Guangdong University of Petrochemical Technology, Maoming Guangdong 525000, China)

**Abstract:** A new method for the assessment of cascading failures in power grids is presented. This method is helpful to investigating cascading failures from the configuration of power grids by using complex networks theory. The topological model of power grids is established by defining the impedance of transmission lines and transformers as connection weights. The indices of centrality characteristics of power grids are given. The critical threshold model of cascading failures in power grids is explored based on the principle that a failed edge causes redistribution of instant power flow only to its neighboring edges. Taking IEEE 118-bus test system as example, we find its central vertexes by calculating those indices of centrality characteristics of power grids. The weighted model is more efficient than conventional ones in exhibiting vertexes, and closer in characteristics to real transmission grids. By using the system threshold model, we calculate the threshold value of cascading failure in grids under four typical attacking modes, revealing the mechanism of cascading failures.

**Key words:** power grid; cascading failure; complex networks; weighted networks

### 1 引言(Introduction)

随着电网规模的日益扩大, 电网的安全性、可靠性等问题也越来越重要和复杂, 发生电网连锁故障的可能性也显著增加. 据文献[1]介绍, 近年来世界范围发生的大停电事故多达几十起. 比较突出的有2009年巴西18个州以及邻近的巴拉圭大停电, 其涉及面比起1996年和2003年的美国大停电事故还要广; 2010年印度旁遮普及邻近地区发生长达7个小时的大停电事故; 2010年澳大利亚发生昆士兰大停电事故. 诸如此类的电网大停电给人们工作和生活带来了极大的危害, 而究其原因, 大部分均是基于意外

小事故而引发的连锁故障. 因此, 探讨和研究由于各种意外小事故而引发的电网大停电事故的机理, 建立描述引发故障的数学模型, 对于预测和预防事故的发生具有重要意义.

目前对大停电事故的机理研究主要采用了还原论方法, 其缺点在于对电网缺乏整体认识, 而复杂网络理论有助于解决这些问题. 自Watts和Strogatz提出小世界网络模型<sup>[2]</sup>与Barabási等提出无标度网络模型<sup>[3]</sup>后, 复杂网络理论开始应用于研究电网连锁故障的机理. 文献[4~7]立足于复杂网络基础理论, 从网络结构角度探讨了电网承受各种攻击或故障的能

力及发生连锁故障的可能性等问题. 文献[8]分析了中美电网的拓扑结构, 得出中美大区电网具有小世界网络特性, 并阐述了这种特性对故障的传播起到了推波助澜的作用. 文献[9]提出了大停电现象可以用自组织临界性的概念来解释. 文献[10, 11]定量研究了电网自身小世界特性与故障传播的关系. 文献[12]提出了一种基于电网拓扑结构分析大规模电网结构脆弱性的方法, 强调了电网整体架构对故障传播的影响. 以上这些研究都基于不考虑权重的小世界网络模型, 忽略了对潮流分布有较大影响的线路阻抗. 文献[13]同时考虑了电网的拓扑特性和电气特性, 将线路阻抗值引入电网的拓扑模型中, 探讨了电力系统的脆弱性. 文献[14]建立的电网拓扑模型和连锁故障模型也考虑了线路阻抗, 认为在考虑权重后的电网拓扑模型中电能将沿线路阻抗值之和最小的路径输送. 文献[15]认为在实际电网中功率的传播需要满足基尔霍夫定律, 并非受制于节点间的最短路径, 并认为应该采用故障线路附近节点的负载量等指标反映局部区域的供应紧张或拥堵情况. 文献[16]提出了一种局部加权分流规则, 即以边两端点度指标的乘积的常数次幂为边权, 分享邻近断边上的原有负荷. 比如边 $ij$ 的两端点的度分别为 $k_i, k_j$ , 边 $ij$ 的权就为 $\omega_{ij} = (k_i \cdot k_j)^\theta$ ,  $\theta$ 为一可调常数. 当边 $ij$ 断开时, 边 $ij$ 原有负荷就按一定的权重比例分配到邻近边上.

由于电网各输电线的长短不一, 造成各线路阻抗值相差较大, 对负荷的分布有一定影响, 用无权模型研究电网拓扑结构的脆弱性具有一定的局限性. 因而本文在文献[15]和[16]基础上充分考虑输电网络中阻抗对电网功率分配的实际影响, 以输电线路和变压器的阻抗作为权值, 研究电网的拓扑特性, 并建立电网发生连锁故障的阈值模型, 分析电网连锁故障传播的内在机理.

## 2 电网的加权拓扑模型分析(Analysis of weighted topological model of power grids)

现实运行中的电力网络分为输电网和配电网. 输电网是通过高压、超高压输电线将发电厂、变电站(所)连接起来, 完成电能传输的电力网络. 配电网一般是指10kV以下的馈电线路, 是电力系统中低压侧直接面向用户供电的网络. 发生连锁故障引发大停电事故主要发生在高电压等级的输电网, 低电压等级的配电网事故一般不会引发大电网连锁故障, 因此本文研究对象为输电网, 简称为电网. 为了研究电网的拓扑特性与电网脆弱性的关系, 需要构建与电网相匹配的拓扑结构图.

定义节点对应于电网中的母线(接发电机或负荷, 或起联络作用), 而边则代表变压器和输电线路,

并用线路和变压器的阻抗标么值为边权. 由于输电线路的长度与其阻抗成正比, 即输电线路越长, 阻抗就越大, 输电线路两个端点之间的关系就越疏远, 因此以线路阻抗为边权的电网拓扑模型(下文简称加权电网)相对于无权的电网拓扑模型(下文简称无权电网)来说可以更好地刻画实际电网中节点的疏密关系.

在电网加权拓扑模型中, 计算表征电网中心性和集聚性的5个基本指标为:

1) 节点 $i$ 的度(degree): 定义为连接节点 $i$ 的所有边的数目. 用于描述节点 $i$ 在网络中的直接影响力. 在无权电网中, 度大的节点可推断是电网中的重要节点, 起着主要的传输作用. 在加权电网中, 判断重要的节点还需考虑节点权的大小, 即使节点度相同, 其边权不同也会导致节点的重要性不同, 因此节点权越大, 表示该点与邻居点的关系越紧密. 节点权 $s_i$ 也称为节点强度(node strength):

$$s_i = \sum_{j \in \Gamma_i} \omega_{ij}, \quad (1)$$

其中:  $\Gamma_i$ 是节点 $i$ 的近邻集,  $\omega_{ij}$ 为边 $ij$ 的权重. 点权集中了节点的邻居信息和该节点所有连接边的权重. 当网络退化为无权网时, 节点的点权和该节点的度相等, 即有 $s_i = k_i$ .

节点的度分布(degree distribution): 定义为网络中节点度为 $k$ 的概率 $P(k)$ 随节点度 $k$ 的变化规律. 同理可得到点权分布 $P(s)$ .

2) 节点 $i$ 的集聚系数(clustering coefficient) $C_i$ : 定义为节点 $i$ 有 $k_i$ 个邻接点, 这 $k_i$ 个节点之间实际有 $t_i$ 条边, 而最多有 $\frac{k_i \cdot (k_i - 1)}{2}$ 条边, 边 $ij$ 的权重为 $\omega_{ij}$ , 节点 $i$ 的点权为 $s_i$ ,  $a_{ij}$ 是加权网络的邻接矩阵元素, 根据Barrat<sup>[17]</sup>等提出的加权网络集聚系数计算公式有

$$C_i = \frac{1}{s_i(k_i - 1)} \sum_{j,h} \frac{(\omega_{ij} + \omega_{ih})}{2} a_{ij} a_{ih} a_{jh}, \quad (2)$$

其中权值 $\omega_{ij}$ 等为相似权, 其越大, 表示两点之间的距离就越小, 关系越紧密.

当加权网络退化为无权网络时, 有

$$C_i = \frac{2t_i}{k_i(k_i - 1)}. \quad (3)$$

加权网络的平均集聚系数为

$$C = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_i. \quad (4)$$

式(4)对所有节点的集聚系数求均值得到网络的集聚系数, 表示邻近节点的紧密程度.

3) 平均路径长度(average path length) $L$ : 定义为 $n$ 个节点的网络中所有节点对之间最短距离 $d_{ij}$ 的

平均值.

$$L = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i \geq j} d_{ij}. \quad (5)$$

其中  $d_{ij}$  为连接节点  $i$  和节点  $j$  之间最短路径所包含的边数的权值和, 平均路径长度越小, 负载越容易在整个网络中传输. 计算最短路径时, 权值  $\omega_{ij}$  为相似权, 其越大, 两点之间的距离就越小, 关系越紧密.

4) 节点  $i$  的紧密度(closeness centrality): 定义为节点  $i$  与其他所有节点的最短距离之和.

$$C_c(i) = \sum_{s < t} d_{st}. \quad (6)$$

5) 节点  $m$  的介数(betweenness): 定义为

$$C_b(m) = \sum_{i < j} b_{ij}(m), \quad (7)$$

其中  $b_{ij}(m)$  为连接节点  $i$  和节点  $j$  间最短路径  $d_{ij}$  中经过节点  $m$  的边数. 同理可得到边介数. 利用介数指标可以确定负载繁重的节点, 介数大的节点的稳定性决定了全网络的稳定性. 介数分布(betweenness distribution)定义为网络中介数为  $C_b$  的节点的概率  $P(C_b)$  随节点介数  $C_b$  的变化规律.

综上所述, 节点度和节点度分布与网络是否加权无关, 均保持不变; 点权、集聚系数、平均路径长度、紧密度、介数和介数分布均与权有直接或间接的关系, 会受到权值的影响.

### 3 分析电网连锁故障的阈值模型(Threshold model of analyzing cascading failure of power grids)

当线路发生故障后, 如果其附近节点需要提供或通过的功率大增, 瞬间很可能引起局部功能失效, 而这种失效不会瞬间扩散到全局. 因此提出一种新的局部断边分流模型, 即以传输线路(边)的阻抗为边权, 当局部线路发生小故障断边, 其附近的邻边会消化断边的原有负荷而受到影响, 如图1所示.

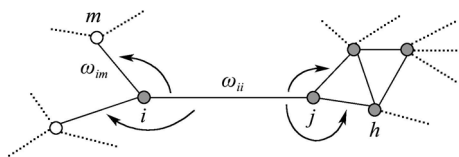


图 1 局部断边分流模型示意图

Fig. 1 Illustration of local power-flow redistribution after a branch outage

假设故障前后的系统运行在各自的平衡点(不考虑暂态过渡过程), 线路传输的有功功率、无功功率和节点电压分别在故障前后的一段时间内恒定不变(仅在故障瞬间发生突变).  $\omega_{ij}$  和  $\omega_{im}$  分别表示边  $ij$  和  $im$  的权, 其大小为线路阻抗的标么值. 当线路  $ij$  由于意外故障而发生断边, 考虑到实际输电线

路中多为双回路, 则线路  $ij$  原有传输功率  $P_{ij}$  按一定规则分配到  $im$  和  $jh$  等邻边上, 在线路  $im$  等邻边上会产生功率扰动瞬时增量, 其中  $im$  上设其估计值为  $\Delta P_{im}$ . 一般线路的阻抗越大, 导纳越小, 则代表线路越长, 其对应的电压等级也就越高, 因而实际传输的功率通常越大. 假设线路承载的功率与其阻抗成比例, 因此线路  $im$  上的功率扰动瞬时增量可按式估计:

$$\Delta P_{im} = \frac{\omega_{im}}{\sum_{s \in \Gamma_i} \omega_{is} + \sum_{t \in \Gamma_j} \omega_{jt}} P_{ij}, \quad (8)$$

其中  $\Gamma_i$  和  $\Gamma_j$  分别是节点  $i$  和  $j$  的邻居点的集合.

当电网初始正常运行时, 输电线路  $ij$  的  $P_{ij}$  与阻抗  $\omega_{ij}$  成正比例, 可表示为

$$P_{ij} = \alpha \cdot \omega_{ij}, \quad (9)$$

其中:  $\alpha$  是一单位容量系数,  $\alpha > 0$ .

当由于故障造成线路  $ij$  断开时, 引起  $ij$  上原有的负荷瞬间重新分配到其他邻边上. 线路  $im$  上一共有负荷  $\Delta P_{im} + P_{im}$ . 当线路  $im$  上流过的负荷超过它自己的最大允许容量  $T$ , 线路  $im$  就会自动跳闸, 这时,

$$\Delta P_{im} + P_{im} > T \cdot \omega_{im}, \quad (10)$$

其中:  $T$  是一与网络有关的常数阈值,  $T > 0$ , 并与线路能承载的功率大小有关,  $T$  越大, 式(10)越不易满足, 断边也就越不易发生, 即网络的鲁棒性就越强, 网络就越不易发生连锁故障.

当线路  $im$  自动跳闸, 就会导致其上的负荷进一步分流到其他邻边上, 依次持续下去, 直到不再有边断开, 这时记录下这个过程总共断边的数目  $m_{ij}$ ,  $\sum_{ij} m_{ij}$  表示每次发生断边故障时总的断边数. 做归一化处理, 有

$$S_N = \frac{\sum_{ij} m_{ij}}{N_{\text{edge}}}, \quad (11)$$

其中:  $N_{\text{edge}}$  表示输电网中总的边数,  $S_N$  表示输电网中断边数的百分比, 易知  $0 < S_N < 1$ .

不难看出,  $S_N$  是阈值  $T$  的函数. 对于给定的一个  $T$  值, 有相应的  $S_N$ , 不断减少  $T$  的取值,  $S_N$  就会不断增加,  $S_N$  达到一定规模, 电网会发生连锁故障的相变, 这时对应的  $T$  为一临界值  $T_c$ ,  $T_c$  为线路发生连锁故障的最大容量值, 称  $T_c$  为网络发生连锁故障的临界因子.  $T_c$  较小时, 线路上的负荷容易超过临界值, 电网发生连锁故障的可能性较大; 当  $T_c$  较大时, 线路上的负荷不容易超过临界值, 电网发生连锁故障的可能性就较小. 通过这个规则, 可以用仿真的方法求得估计电力网络发生连锁故障的阈值, 从而可以科学的提高电网发生故障的阈值, 改善电网的安全性, 避免和减少故障的发生.

## 4 算例分析(Case study)

### 4.1 电网的中心性特征(Centrality characteristics of power grids)

采用IEEE 118节点系统的数据<sup>[18]</sup>, 计算该电网无权 and 加权的拓扑特性参数. 由于在表征网络中心性的5个参数的计算公式中, 有关权重都表示相似权(权越大越紧密), 而论文中定义的电网拓扑结构中的阻抗边权为相异权(权越大越疏远), 因此在计算时要做一调整, 公式(1)~(7)中的 $\omega_{ij}$ 取阻抗标么值的倒数, 分别计算度, 点权, 集聚系数, 点介数和边介数, 以及紧密度. 计算结果分别如表1和表2所示.

表1 IEEE 118节点系统的拓扑特性参数

Table 1 Topological characteristic parameters in IEEE 118-bus test system

网络指标	实际电网		随机网络
	布尔网络	加权网络	
集聚系数	0.1651	0.0207	0.0247
平均路径长度	6.2027	0.6348	4.3732
平均点介数	310.5593	379.4661	185.0848
节点	118	118	118
边数	179	179	169
平均度(点权)	3.0339	0.3965	2.8644

表2 IEEE 118节点系统加权拓扑模型中的表征中心性的参数值

Table 2 Centrality parameters of weighted topological model in IEEE 118-bus test system

度	值	9	8	7	7	6	6	6	6	6	6
	id	49	100	12	80	17	37	59	69	77	92
节点强度	值	1.9967	1.5146	1.2731	1.2602	1.1080	0.9712	0.9699	0.9057	0.8500	0.8440
(加权)	id	49	100	69	59	92	70	80	54	77	15
点介数	值	4314	3437	3410	3120	1976	1951	1437	1434	1233	1205
(加权)	id	65	38	68	30	81	80	69	8	17	66
边介数	值	1638.0	1573.5	1428.0	1029.0	1005.5	755.0	743.0	648.5	637.0	621.5
(加权)	id	65,68	38,65	38,30	68,81	80,81	8,30	68,69	65,66	17,30	5,8
紧密度	值	44.54	44.96	45.47	46.19	47.13	47.77	47.85	47.87	47.90	49.69
(加权)	id	65	68	116	81	38	64	69	66	80	30
集聚系数	值	0.1676	0.1564	0.1519	0.1384	0.1370	0.1353	0.1296	0.1269	0.1188	0.1109
(加权)	id	67	107	84	41	97	39	93	88	74	55

从表1可看出, 该电网系统不考虑权重的拓扑模型参数, 相对随机网络的而言, 其集聚系数较大, 而平均路径长度相近, 因而该电网系统具有小世界特性<sup>[2]</sup>. 该系统采用阻抗边权后, 集聚系数和平均路径长度都成倍减少, 可看出这两个系数都受到边权的影响, 这时不能得出考虑边权后的电网有小世界特性. 输电网是分层次的. 它的层次性体现在输电线的电压等级常分为500 kV, 220 kV, 110 kV等. 有些还有800 kV(少见). 为便于比较和计算, 阻抗边权采用了标么值, 这样就化解了不同电压等级的差异. 该系统采用阻抗边权后, 即考虑了输电线的传输距离后, 集聚系数和平均路径长度都成倍减少, 说明该系统的集聚性因加权而减弱, 系统的中心性因加权而增强, 因此采用加权网络模型更能体现实际网络中的中心节点和桥节点. 集聚系数越大, 故障在网络中传播得就越广; 平均路径长度越小, 故障在网络中传播得就越深<sup>[19]</sup>. 从这可引申出电网的连锁故障主要是主干线路失效, 引起了深度传播. 为避免连锁故障, 可以通过仿真计算找出主干线路, 对主干线路采取特别保护措施.

施.

从表2可以看出, 6个描述中心性的参数所展示的前10个中心节点有些不同, 主要集中在节点38, 49, 65, 68, 69, 70, 77, 80和81. 在电网中有很多三角形的独立顶点, 因此这些节点的集聚系数相对较大, 比如节点67, 107等, 但这些节点并不是电网中的关键节点. 节点集聚系数在电网分析中可忽略. 节点强度, 紧密度, 点介数和边介数具有较高的一致性, 而且这4个指标中有5个或5个以上节点与实际网络结构中的中心点吻合, 说明相对于度和集聚系数能更好地表征出电网的中心节点和桥节点. 这个也可从如图2所示的118节点系统的电网拓扑图中得到直观验证, 其中方框节点表示以上描述的中心节点和桥节点. 网络的安全性主要体现在这些关键节点上. 关键节点找到了, 主干线路也就找到了. 从图3至图4可看出, 118节点系统的度分布和介数分布更适合指数分布, 不满足幂律分布. 总的来说, 电网的加权拓扑模型在反映节点重要程度方面优于其无权拓扑模型, 与实际输电网络也更接近.

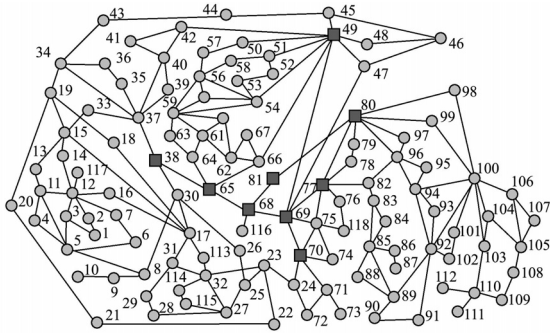


图 2 IEEE118节点系统的电网拓扑图

Fig. 2 Topological diagram of IEEE 118-bus test system

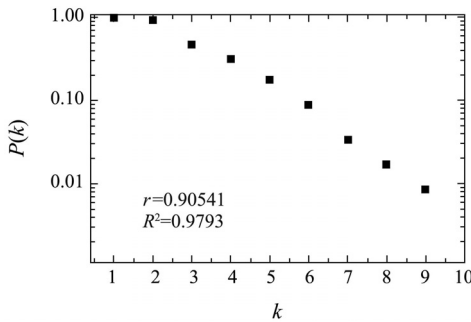


图 3 118节点系统的度分布

Fig. 3 Degree distribution in IEEE 118-bus Test System

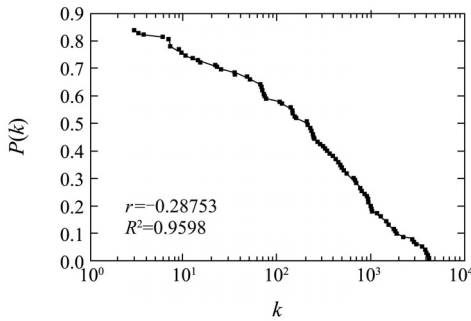


图 4 118节点系统的点介数分布

Fig. 4 Betweenness distribution in IEEE 118-bus test system

### 4.2 电网的鲁棒性分析(Analysis of robustness of power grids)

分别采用4种典型的模式来攻击电网:

**模式 1** 随机攻击节点, 任选与该节点连接的一条边断开, 重复仿真计算1000次, 得到阈值 $T_{c1}$ ;

**模式 2** 有选择地蓄意攻击度数最大的节点, 依次攻击度数次大的节点, 任选与该节点连接的一条边断开, 重复仿真计算1000次, 得到阈值 $T_{c2}$ ;

**模式 3** 有选择地蓄意攻击介数最大的节点, 并依次攻击介数次大的节点, 任选与该节点相互连接的一条边断开, 重复仿真计算1000次, 得到阈值 $T_{c3}$ ;

**模式 4** 连锁攻击介数最大的节点, 每次攻击一节点之后, 重新计算各节点介数, 然后再攻击重

新计算后介数最大的节点, 任选与该节点连接的一条边断开, 依次类推, 重复仿真计算1000次, 得到阈值 $T_{c4}$ .

采用计算机仿真, 得到图5至图8, 图中 $T$ 是一与网络有关的常数阈值,  $T_c$ 表示临界因子,  $S_N$ 是输电网中断边数的百分比, 即雪崩规模.

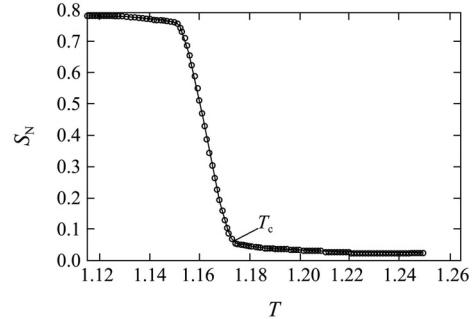


图 5 攻击模式1的仿真结果

Fig. 5 Simulation result corresponding to attack mode 1

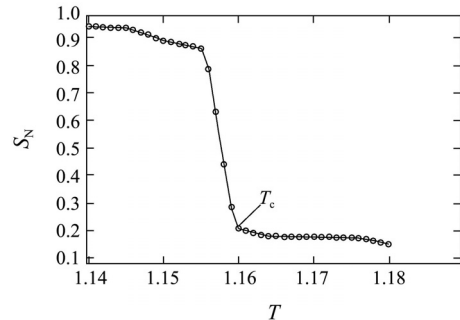


图 6 攻击模式2的仿真结果

Fig. 6 Simulation result corresponding to attack mode 2

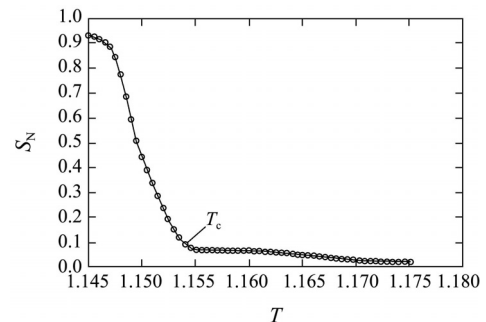


图 7 攻击模式3的仿真结果

Fig. 7 Simulation result corresponding to attack mode 3

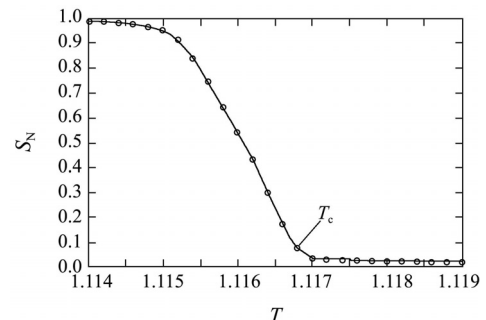


图 8 攻击模式4的仿真结果

Fig. 8 Simulation result corresponding to attack mode 4

从图5至图8可看出,  $T_{c1} > T_{c2} > T_{c3} > T_{c4}$ , 这表明电网在随机攻击时鲁棒性较好, 而在连锁攻击介数最大的节点时鲁棒性较差. 也表明攻击介数大的点比单纯攻击度大的点对网络的损害更大. 因此一方面可推出,  $T_c$ 不但与输电线路的容量有关, 还与电网的整体结构有关, 表征了是一个与网络结构相关的描述网络鲁棒性大小的参数. 当 $T_c$ 较大时, 整体电网能容忍的最大容量相对较大, 电网就不容易发生连锁故障, 相反, 当 $T_c$ 较小时, 整体电网能容忍的最大容量相对较小, 电网就较容易发生连锁故障. 另一方面可推出, 当要估算电网发生连锁故障的最小阈值时, 可以选用连续攻击最大介数节点的模式来仿真估算.

## 5 结论(Conclusion)

本文基于电网输电线路的阻抗与输电容量的关系, 运用复杂网络理论构建了输电网络的加权拓扑模型, 提出了分析电网发生连锁故障的阈值模型. 并通过用IEEE 118节点系统作为测试系统, 发现电网的加权拓扑模型能更好地描述电网的中心性, 与实际电网也更吻合. 借助计算机仿真, 定量地分析了电网连锁故障发生的阈值, 展示了输电网络在面对四种不同网络故障时的鲁棒性.

## 参考文献(References):

- [1] DUFFY C. Blackout watch[J]. *Protection, Automation & Control World*, 2010(3): 34 – 35.
- [2] WATTS D J, STROGATZ S H. Collective dynamics of ‘small-world’ networks[J]. *Nature*, 1998, 393(6684): 440 – 442.
- [3] BARABÁSI A L, ALERT R. Emergence of scaling in random networks[J]. *Science*, 1999, 286(5439): 509 – 512.
- [4] HOME P. Edge overload breakdown in evolving networks[J]. *Physical Review E*, 2002, 66(2): 036119. 1 – 036119. 7.
- [5] HOME P, KIM B J. Vertex overload breakdown in evolving networks[J]. *Physical Review E*, 2002, 65(1): 066109. 1 – 066109. 8.
- [6] HOME P, KIM B J, YOON C N, et al. Attack vulnerability of complex networks[J]. *Physical Review E*, 2002, 65(1): 056109. 1 – 056109. 14.
- [7] LAI Y C, MOTTER A E, NISHIKAWA T. Attacks and cascades in complex networks[M] // *Lecture Notes in Physics*. [s.l.]: [s.n.], 2004, 650: 299 – 310.
- [8] 孟仲伟, 鲁宗相, 宋靖雁. 中美电网的小世界拓扑模型比较分析[J]. *电力系统自动化*, 2004, 28(15): 21 – 24.  
(MENG Zhongwei, LU Zongxiang, SONG Jingyan. Contrastive analysis of the small-world topological model of Chinese and American power grid[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2004, 28(15): 21 – 24.)
- [9] 曹一家, 江全元, 丁理杰. 电力系统大停电的自组织临界现象[J]. *电网技术*, 2005, 29(15): 1 – 5.  
(CAO Yijia, JIANG Quanyuan, DING Lijie. Self-organized criticality phenomenon for power system blackouts[J]. *Power System Technology*, 2005, 29(15): 1 – 5.)
- [10] 丁明, 韩平平. 基于小世界拓扑模型的大型电网脆弱性评估算法[J]. *电力系统自动化*, 2006, 30(8): 7 – 10.  
(DING Ming, HAN Pingping. Small-world topological model based vulnerability assessment algorithm for large-scale power grid[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2006, 30(8): 7 – 10.)
- [11] 丁明, 韩平平. 小世界电网的连锁故障传播机理分析[J]. *电力系统自动化*, 2007, 31(18): 6 – 10.  
(DING Ming, HAN Pingping. Study of failure spreading mechanism in the small-world power grid[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2007, 31(18): 6 – 10.)
- [12] 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 Electrotechnical Society*, 2007, 22(10): 138 – 144.)
- [13] 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.  
(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.)
- [14] 丁明, 韩平平. 加权拓扑模型下的小世界电网脆弱性评估[J]. *中国电机工程学报*, 2008, 28(10): 20 – 25.  
(DING Ming, HAN Pingping. Vulnerability assessment to small-world power grid based on weighted topological model[J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2008, 28(10): 20 – 25.)
- [15] 倪向萍, 梅生伟, 张雪敏. 基于复杂网络理论的输电线路脆弱度评估方法[J]. *电力系统自动化*, 2008, 32(4): 1 – 5.  
(NI Xiangping, MEI Shengwei, ZHANG Xuemin. Transmission lines’ vulnerability assessment based on complex network theory[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2008, 32(4): 1 – 5.)
- [16] WANG W X, CHEN G R. Universal robustness characteristic of weighted networks against cascading failure [J]. *Physical Review E*, 2008, 77(2): 026101.1 – 026101.5.
- [17] BARRAT A, BARTHELEMY M, VESPIGNANI A. Wighted evolving networks: coupling topology and weight dynamics[J]. *Physical Review Letters*, 2004, 92(22): 228701. 1 – 228701. 4.
- [18] 刘明波, 谢敏, 赵维兴. 大电网最优潮流计算[M]. 北京: 科学出版社, 2010.  
(LIU Mingbo, XIE Min, ZHAO Weixing. *Optimal Power Flow Computing of Large-Scale Power Systems*[M]. Beijing: Science Press, 2010.)
- [19] 王林, 戴冠中. 复杂网络的Scale-free性、Scale-free现象及其控制[M]. 北京: 科学出版社, 2009.  
(WANG Lin, DAI Guanzhong. *Scale-Free Characteristic, Scale-Free Phenomenon and Control of Complex Networks*[M]. Beijing: Science Press, 2009.)

## 作者简介:

**徐立新** (1967—), 女, 讲师, 博士研究生, 主要研究方向为复杂系统与复杂网络, E-mail: xulixin@scut.edu.cn;

**杨建梅** (1946—), 女, 教授, 博士生导师, 博士, 主要研究方向为复杂系统与复杂网络及产业决策, E-mail: fbajyang@scut.edu.cn;

**姚灿中** (1983—), 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为复杂系统与复杂网络的建模与仿真, E-mail: yaocanzhong@scut.edu.cn;

**王世华** (1977—), 男, 讲师, 博士研究生, 主要研究方向为系统复杂性与复杂网络, E-mail:56373054@qq.com.