

## 基于电气介数的复杂电网脆弱线路辨识

王仁伟, 张友刚, 杨阳, 李军

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

**摘要:** 提出了基于直流潮流计算的电气介数和新的网络效能指标, 来辨识复杂电网中的脆弱线路。该电气介数克服了电抗加权拓扑介数假设“发电-负荷”节点间潮流沿最短路径或最有效路径传播的缺点, 且考虑了发电容量和负荷容量及其分布的影响。引入了考虑电气距离和容量分布的网络效能指标来表征故障后的网络效能。由 IEEE39 节点和 IEEE118 节点的数值仿真可知, 高电气介数线路通常属于长程连接, 处于重要的输电通道上, 对这些线路的蓄意攻击, 电网效能迅速下降, 证实了电气介数能辨识复杂电网中的脆弱线路。

**关键词:** 复杂网络; 电网; 电气介数; 脆弱线路; 网络效能

### Vulnerable line identification of complex power grid based on electrical betweenness

WANG Ren-wei, ZHANG You-gang, YANG Yang, LI Jun

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** Line electrical betweenness based on DC load flow and a new net efficiency index are proposed to identify the vulnerable lines in the complex power grid. The electrical betweenness not only overcomes the shortcoming of the weighted reactance betweenness which assures that power is transmitted through the shortest or the most effective paths, but also considers the impact of the capacity and distribution of generators and load. A new net efficiency index, which considers electrical distance and capacity distribution, is introduced to measure the efficiency of power grid after attack. Numeric simulation results of IEEE-39 and IEEE-118 show the lines with high electrical betweenness usually belong to long-distance and are the important transmission lines. If these lines are attacked intentionally, the efficiency of power grid would descend rapidly. The results also show that the betweenness index can identify the vulnerable lines in the complex power grid.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61134001).

**Key words:** complex network; power grid; electrical betweenness; vulnerable lines; net efficiency

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)20-0001-06

## 0 引言

随着电网的互联规模不断扩大, 电网的拓扑结构和物理特性变得越来越复杂, 这也造成日益增多的大停电事件。2003年8月, 美国东北部、中西部和加拿大东部联合电网发生大停电, 震惊世界<sup>[1]</sup>。同年, 欧洲、英国、瑞典和意大利都发生过大规模停电<sup>[2]</sup>。从历史统计数据得知, 大停电事故一般是由个别线路故障继而引发连锁故障导致电网崩溃的<sup>[3-4]</sup>, 而其中少量的具有长程连接的线路对故障

传播起着推波助澜的作用<sup>[5-6]</sup>。因此, 辨识出这些脆弱线路具有重要的应用研究价值。

复杂电网的脆弱线路辨识是复杂网络理论在电网中应用的一个重要研究方向。复杂网络理论的标志模型是小世界网络和无标度网络, 小世界网络具有较小的平均距离和较高的聚类系数, 而无标度网络存在少数 Hub 节点, 具有严重的异质性<sup>[7]</sup>。文献[8]通过对中美典型电网的拓扑结构进行研究, 表明大部分电力网络属于小世界网络, 其小世界特性对故障的传播起到了推波助澜的作用。文献[9]通过分析历史统计数据, 表明大停电的规模和频率具有明显的幂律关系或称“自组织临界特性”。文献[10-11]引入了节点或线路的介数(被节点对最短路径经过的次数)来衡量节点或线路的重要性, 并以此分析

**基金项目:** 国家自然科学基金重点项目(61134001); 中央高校专题研究项目(SWJTU11ZT06); 中央高校专题研究项目(SWJTU11CX034)

了电网的连锁故障过程。上述模型假设电网是一个无权网络,是从纯拓扑的角度来分析电网的脆弱性,忽视了支路阻抗及电网运行状态的影响,其研究结果也很难应用于实际电网。文献[6]考虑了支路电抗并使用了基于加权网络和发电机有功出力的电网脆弱线路识别方法。文献[12]在电抗加权的基础上提出了线路容量介数指标来识别脆弱线路。文献[13]假设功率按最有效路径传播,并基于导纳矩阵来计算电气效能。以上模型假设功率只沿最短路径或最有效路径流通,这与电力系统潮流按基尔霍夫定理传输不符,且表征脆弱线路对电网的影响多是基于最短路径长度的网络全局效能指标,其难以评估电网故障程度。可见,建立功率流可分的模型和提出合理故障评价指标来辨识关键线路是很有必要的。

文献[14]提出了功率传输分布因子(PTDF)的概念,基于直流潮流方程的PTDF表征了在任意“发电-负荷”对间注入单位功率的情况下每条线路的贡献量。本文在此基础上提出了直流潮流方程的电气介数,该电气介数还考虑了发电容量和负荷容量及其分布,使其更符合电力系统的背景。此外,提出新的网络效能指标代替传统的只考虑发电机与负荷间最短路径的全局效能指标。最后,通过IEEE39节点和IEEE118节点系统来验证其有效性。

## 1 线路的电气介数

直流潮流算法简化了交流计算,属于求解线性方程问题,计算简单,准确度较高,非常适合计算大电网的功率传输因子PTDF。

假设电网有 $N+1$ 个节点,最后一个节点为参考节点,其直流潮流方程为

$$\mathbf{P} = \mathbf{B}\boldsymbol{\theta} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{P}$ 是节点注入功率列向量; $\mathbf{B}$ 是节点导纳矩阵; $\boldsymbol{\theta}$ 是节点电压相角列向量。已知 $\mathbf{P}$ 可根据上式求取 $\boldsymbol{\theta}$ ,同时线路 $l$ 上的潮流 $P_{ij}$ 可由式(2)得到。

$$P_{ij} = b_{ij}\theta_{ij} \quad (2)$$

式中: $b_{ij}$ 是节点 $i$ 与节点 $j$ 间的导纳; $\theta_{ij}$ 是节点 $i$ 与节点 $j$ 间的电压相角差。假设单位功率从电源节点或负荷节点注入,从参考节点流出,根据式(1)和式(2)可求出各线路的功率分量。从而,PTDF可以用 $N_E \times (N_G + N_D)$  ( $N_E$ 、 $N_G$ 和 $N_D$ 分别指线路、发电节点和负荷节点的数量)维矩阵 $\mathbf{P}$ 表示,其中元素 $P_l^i$ 代表单位功率从电源节点或负荷节点注入,从参考节点流出时线路 $l$ 的功率分量。考虑直流潮流计算的线性,那么单位功率从电源节点 $i$ 注入,负

荷节点 $j$ 流出时,线路 $l$ 的功率分量 $P_l^{ij}$ 可由式(3)计算。

$$P_l^{ij} = P_l^i - P_l^j, \quad l \in E \quad (3)$$

式中, $E$ 是线路集。对于电网解列后的子网,则分别计算各个子网内的线路电气介数,而不同子网的“发电-负荷”节点对 $(i, j)$ 不会引起线路潮流变化,从而可以简化计算。

基于上述PTDF,定义线路 $l$ 电气介数 $B_e(l)$ 如式(4)。

$$B_e(l) = \sum_{i \in G} \sum_{j \in D} \sqrt{P_{G_i} P_{D_j}} |P_l^{ij}|, \quad l \in E \quad (4)$$

式中: $P_l^{ij}$ 为在“发电-负荷”节点对 $(i, j)$ 间注入单位功率时,线路 $l$ 上的功率分量; $P_{G_i}$ 为发电节点 $i$ 的有功功率权重; $P_{D_j}$ 为负荷节点 $j$ 的有功功率权重; $G$ 和 $D$ 分别为发电节点和负荷节点集合。

电气介数与文献[15]提出的加权介数(潮流沿着电抗加权和最小的路径传播)相似,表征了“发电-负荷”节点对各输电线的占用情况,可以用于脆弱线路的辨识。本文提出的电气介数还考虑了发电节点有功容量和负荷节点有功容量及其分布,从数学上量化了各线路在全网功率传播中所起的作用,其物理背景更符合电力系统,分析结果也更符合实际情况。

## 2 网络效能

有效效能<sup>[11]</sup>用来定量分析网络的全局效能和定位网络中的关键元件。网络的有效效能定义为所有节点对间加权最短路径的长度的平均值,其表达式为

$$E = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j \in V} \frac{1}{d_{ij}} \quad (5)$$

式中: $d_{ij}$ 为节点对 $(i, j)$ 间最短加权路径长度; $N$ 为网络的节点总数; $V$ 为节点集。

有效效能指标基于最短加权路径距离,没有考虑到电网的特殊情况。电网主要目的是传输电能,网络效能既要能够反映加权网络的拓扑结构,又要考虑到电网的运行状态,因此定义新的网络效能为

$$A = \frac{1}{N_G N_D} \sum_{i \in G} \sum_{j \in D} \frac{\min(P_{G_i}, P_{D_j})}{|Z_{ij}|} \quad (6)$$

式中: $A$ 代表网络效能; $\min(P_{G_i}, P_{D_j})$ 是“发电-负荷”节点对 $(i, j)$ 中有功功率较小值,其代表节点对 $(i, j)$ 间能传输的最大电能; $|Z_{ij}|$ 是“发电-负荷”节点对 $(i, j)$ 间的电气距离,即等值阻抗; $G$ 和 $D$ 分别为发电和负荷节点集合。

电气距离 $|Z_{ij}|$ 定义为“发电-负荷”节点对 $(i, j)$ 间的等值阻抗。对于一个 $N+1$ 个节点的电网, 最后一个节点为参考节点, 可列出阻抗矩阵形式的电流方程为

$$\mathbf{V}_B = \mathbf{Z}_B \mathbf{I}_B \quad (7)$$

式中:  $\mathbf{V}_B$  是电网节点电压列向量;  $\mathbf{Z}_B$  是电网阻抗矩阵;  $\mathbf{I}_B$  是节点注入电流列向量。

假设单位电流从发电节点 $i$ 注入, 从负荷节点 $j$ 流出( $I_i=1, I_j=-1$ ), 那么任意节点 $p$ 的电压 $V_p$ 可计算为

$$V_p = Z_{pi} - Z_{pj} \quad (8)$$

式中:  $Z_{pi}$  是阻抗矩阵 $\mathbf{Z}_B$ 的 $p$ 行 $i$ 列;  $Z_{pj}$  是阻抗矩阵 $\mathbf{Z}_B$ 的 $p$ 行 $j$ 列。

那么“发电-负荷”节点对 $(i, j)$ 间的电气距离(等值阻抗) $|Z_{ij}|$ 可表示成

$$|Z_{ij}| = \frac{|U_{ij}|}{I} = |U_i - U_j| = |(Z_{ii} - Z_{ij}) - (Z_{ij} - Z_{jj})| = |Z_{ii} + Z_{jj} - 2Z_{ij}| \quad (9)$$

根据式(6)和式(9)可以求出网络效能。本文定义的新的网络效能引入电气距离, 电气距离考虑了功率沿任意路线传播, 相对于最短路径距离更符合电力系统; 并且引入了发电容量和负荷容量及其分布, 相比有效效能更能反映电网的效能。网络效能越大, 表示电网的传输能力越大, 它是相对于任何一对“发电-负荷”节点对的平均值, 对于不同规模的电网, 可以用来直接进行比较。

为了便于比较, 用遭受攻击后网络效能相对于攻击前的网络效能的百分比来衡量受攻击程度; 并在网络解列后计算各个子网的网络效能之和。另外, 网络效能评价指标只能在一定程度上反映出线路攻击对电网的影响, 而不能完全反映电网的实际情况, 但其计算简单, 对关键线路的辨识还是可以接受的。

### 3 故障模式及脆弱线路辨识流程

#### 3.1 故障模式

为了研究电气介数在辨识复杂电网中的脆弱性线路, 采用文献[15]提出的三种故障模式对系统进行连锁攻击。

(1) 随机连锁攻击: 每次随机选取一条线路断开。

(2) 静态连锁攻击: 按照线路电气介数大小依次断开。

(3) 动态连锁攻击: 每次断开剩余线路中电气介数最大的线路。

#### 3.2 脆弱线路辨识流程

利用复杂网络将电网抽象成由点集 $V$ 和边集 $E$ 组成的无向有权图 $G=(V, E)$ , 其中点集 $V$ 代表母线, 根据节点功能不同, 将其分为发电节点集 $(G)$ 、传输节点集 $(T)$ 和负荷节点集 $(D)$ , 数量分别为 $N_G$ 、 $N_T$ 、 $N_D$ 。边集 $E$ 代表连接母线的线路集合, 边的权值是线路的电抗值, 网络联接用联接矩阵 $\mathbf{B}$ 表示。

基于电气介数和网络效能指标的脆弱线路辨识步骤如下:

1) 输入网络的邻接矩阵 $\mathbf{B}$ , 发电节点集 $G$ 及发电容量集 $P_G$ 和负荷节点集 $D$ 及负荷容量集 $P_D$ , 线路阻抗矩阵 $\mathbf{X}$ , 根据式(4)和式(6)计算电网初始电气介数和网络效能。

2) 根据攻击模式断开一条边, 更新网络参数。

3) 判断网络是否解列。若解列, 则分别计算各个子网内剩余线路的电气介数和各个子网的网络效能, 将线路的电气介数进行排序, 将各个子网的网络效能相加得到总的网络效能。若未解列, 则按原始方法计算剩余线路的电气介数和网络效能。

4) 继续按攻击模式断开线路, 并判断断开线路数量是否满足要求。若满足, 则终止攻击; 若不满足, 则转到步骤3)。

5) 记录每次攻击后网络效能, 并进行分析。

### 4 算例分析

#### 4.1 IEEE39 节点系统

依据上述方法, 对IEEE39节点系统<sup>[6]</sup>进行脆弱线路辨识。IEEE39节点系统包含10个发电节点、19个负荷节点和46条线路, 其结构图如图1。

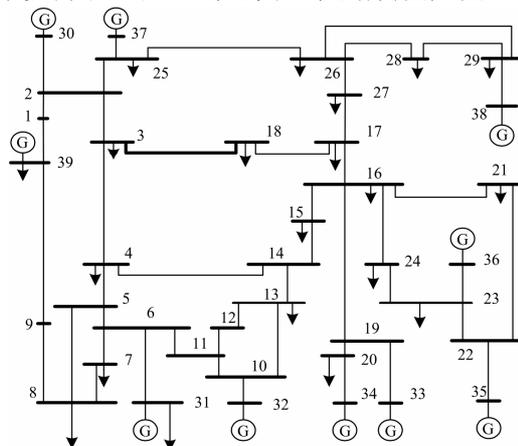


图1 IEEE39节点系统接线图  
Fig. 1 Single-line chart of the IEEE-39 system

##### 4.1.1 脆弱线路的辨识

基于电气介数对IEEE39节点系统进行脆弱线路

路辨识，并与文献[12]提出的容量介数进行比较，将部分结果列于表 1。对比两种介数指标可知，线路 16-19 和 16-17 排序结果类似，都认为它们是比较脆弱的线路，从图 1 中也可以看出，这两条线路处于输电通道，如果它们故障，会造成系统解列。线路 15-16 和 2-25 的电气介数排序较容量介数靠前，所以本文认为其为关键线路，而文献[12]通过 PSAT 仿真验证断开线路 15-16，系统暂态稳定，故认为该线路不是脆弱线路。从图 1 可以看出，断开线路 15-16 会造成系统一分为二，发电节点 33-36 的功率不能外送，对系统影响较大，故本文提出的模型更关注线路在系统拓扑结构上的重要性。同样，线路 2-3 和 16-21 电气介数排序较容量介数靠后，故认为其重要性较小。

表 1 IEEE39 节点的线路电气介数和容量介数

Table 1 Electrical betweenness and capacity betweenness of the line in IEEE39

线路	电气介数	排序	容量介数	排序
16-19	19 025	4	3 582	1
16-17	28 258	1	2 855	2
2-3	16 524	9	2 291	3
16-21	12 977	15	2 245	4
15-16	20 427	2	2 070	8
2-25	18 011	6	2 024	9

电气介数辨识的脆弱线路多承担功率中等，但处于重要的输电通道上，这些关键线路故障对电力系统影响非常大。基于电气介数的脆弱线路辨识不但考虑了线路在网络中的拓扑重要性，而且考虑了线路承担的功率大小。

#### 4.1.2 系统连锁攻击下的网络效能分析

为了验证电气介数指标辨识脆弱线路的有效性，采用 3.1 节提出的三种连锁攻击方式对 IEEE39 节点系统进行攻击，记录下每次攻击的网络效能，如图 2 所示。

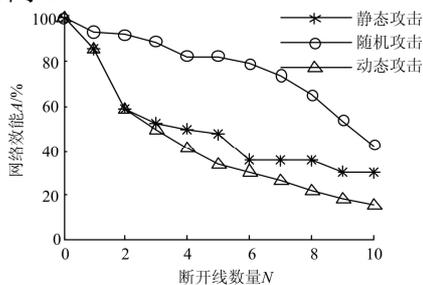


图 2 不同攻击模式下网络效能的变化

Fig. 2 Efficiency of system under the three different attack mode

从图 2 可以看出 IEEE39 节点系统遭受三种不同连锁攻击时系统网络效能变化情况。随机连锁攻击引起的网络效能下降最少，但断开线路过多时，

网络效能下降趋势明显，这是由于 IEEE39 节点系统线路较少造成的，符合实际情况，经过 10 次连锁攻击，网络效能下降到 40%左右。静态连锁攻击次之，在攻击开始初期，网络效能迅速下降，系统解列成多个孤岛，但很少切除联接发电节点的线路，使得网络效能后期下降变缓，最后网络效能下降到 30%。将动态连锁攻击后的网络效能结果列于表 2，从表 2 中可以看出：在攻击初期，切除的是联络线，网络效能下降很快，比如切除线路 16-17、14-15、3-4 和 1-2 后，网络效能迅速下降到 41.68%；在攻击后期，则主要切除与发电节点相连的线路，如线路 29-38、22-35、23-36 和 25-27，网络效能下降到 15.44%，对系统产生非常大的影响。

表 2 动态攻击下的网络效能变化

Table 2 Efficiency variation of system under dynamic attack

攻击序号	断开线路	网络效能/%
0	攻击前	100
1	16-17	86.02
2	14-15	59.62
3	3-4	50.58
4	1-2	41.68
5	16-19	33.81
6	8-9	30.62
7	29-38	26.73
8	22-35	21.80
9	23-36	18.28
10	25-27	15.44

通过上述分析可知，IEEE39 节点系统对随机连锁攻击有较好的鲁棒性，而对高电气介数动态连锁则表现得极为脆弱，从而验证了本文提出的电气介数辨识脆弱线路的有效性。

## 4.2 IEEE118 节点系统

用复杂网络理论对 IEEE118 节点系统建模，将并联双回或多回线路折算成一回路，发电容量和负荷容量仅取初始值，线路间的连接权重仅取电抗值。IEEE118 节点系统简化为一个包含 19 个发电节点、92 个负荷节点和 179 条线路的网络。

利用本文提出的电气介数指标对 IEEE118 节点系统的线路进行脆弱辨识，将辨识结果前 10 的线路列于表 3。

表 3 IEEE 118 节点系统脆弱线路

Table 3 Vulnerable lines for IEEE 118 bus system

线路	电气介数	线路	电气介数
65-68	50 188	64-65	22 958
68-81	37 212	65-66	22 104
80-81	37 212	49-66	19 340
36-85	32 649	8-30	19 242
30-38	29 843	68-69	18 115

将表 3 中的与文献[16]提出的加权介数指标所辨识的结果作比较发现, 两类电气介数排序结果非常相似, 但并不完全一致, 这是由于电气介数不仅考虑了系统的网络拓扑结构, 同时还考虑了电力系统的运行状态。从 IEEE118 节点系统的结构图中可以看出, 这些电气介数排序靠前的线路大多处于重要输电通道上, 其断开会引起输电通道中断, 会对系统结构产生很大影响。

将 IEEE118 节点系统线路的电气介数的累积分布画在双对数坐标系中, 并进行曲线拟合, 如图 3 所示。

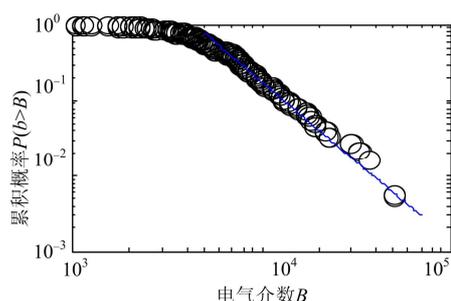


图 3 线路电气介数的累积概率分布

Fig. 3 Accumulated probability distribution of line electrical betweenness

拟合结果表明, 线路的电气介数具有幂律尾性质, 幂指数为 2.11。从图 3 中可以看出, 大部分线路的电气介数小于  $10^4$ , 存在少数线路的电气介数非常高, 从而在电网占有极其重要的位置, 这些线路的断开会极大地改变电网的结构。幂律分布也是自组织临界的证据, 可以用复杂系统的观点来看待电力系统。

## 5 结论

基于直流潮流计算, 提出了电气介数指标来辨识复杂电网的脆弱线路, 此指标考虑了网络的拓扑结构, 也考虑了发电和负荷容量及其分布, 弥补了传统模型假设功率沿最短路径或最有效路径传播的不足, 其物理背景更符合电力系统。同时提出了基于电气距离的网络效能, 新的网络效能还考虑了发电和负荷容量及其分布, 相对传统的网络效能更能体现电力网的特点。应用本文提出的方法对 IEEE39 和 IEEE118 节点系统数值仿真分析表明: 电网中脆弱线路大多是传输功率较大、位置关键的线路, 这些高电气介数线路故障会对电网的拓扑结构产生很大的影响。本文提出的电气介数计算简单, 非常适合大规模电网, 但考虑的电网特性过于单一, 对电

力系统状态的评估也不全面。

## 参考文献

- [1] 张良栋, 石辉, 张勇军. 电网事故原因分类浅析及其预防策略[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(4): 130-133.  
ZHANG Liang-dong, SHI Hui, ZHANG Yong-jun. Analysis of causes and prevention methods for power network accidents[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(4): 130-133.
- [2] GAN De-qiang, HU Jiang-yi, HAN Zhen-xiang. Thought on several blackouts in the world in 2003[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(3): 1-5.
- [3] 唐葆生. 伦敦地区大停电及其教训[J]. 电网技术, 2003, 27(11): 1-5.  
TANG Bao-sheng. Blackout in south of London and its lessons[J]. Power System Technology, 2003, 27(11): 1-5.
- [4] 胡学浩. 美加联合电网大面积停电事故的反思和启示[J]. 电网技术, 2003, 27(9): 2-6.  
HU Xue-hao. Rethinking and enlightenment of the scope blackout in interconnected North American grid[J]. Power System Technology, 2003, 27(9): 2-6.
- [5] 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(增刊): 118-122.  
DING Ming, HAN Ping-ping. Small-world topological model based vulnerability assessment to large-scale power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(S): 118-122.
- [6] 曹一家, 陈晓钢, 孙可. 基于复杂网络理论的大型电力系统脆弱线路识别[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(12): 1-5, 31.  
CAO Yi-jia, CHEN Xiao-gang, 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.
- [7] 汪小帆, 李翔, 陈关荣. 复杂网络理论及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.  
WANG Xiao-fan, LI Xiang, CHEN Guan-rong. Complex networks theory and its application[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006.
- [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 Zhong-wei, LU Zong-xiang, SONG Jing-yan. Comparison analysis of the small-world topological model of Chinese and American power grids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(15): 21-24.
- [9] CARRERAS B A, NEWMAN D E, DOBSON I, et al. Evidence for self-organized criticality in a time series of electric power system blackouts[J]. IEEE Trans on Circuits and Systems, 2004, 51(9): 1733-1740.
- [10] MOTTER A E, LAI Y C. Cascade-based attacks on complex networks[J]. Physical Review E, 2002, 66(2): 1-4.
- [11] KINNEY R, CRUCITTI P, ALBERT R, et al. Modeling cascading failures in the North American power grid[J]. The European Physical Journal, 2005, 46(1): 101-107.
- [12] 何俊, 庞松龄, 禹冰, 等. 基于容量介数指标的电网脆弱性线路识别[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(8): 30-35.
- HE Jun, PANG Song-ling, YU Bing, et al. Vulnerable line identification of power grid based on capacity betweenness index[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(8): 30-35.
- [13] CHEN G, DONG Z Y, HILL D J, et al. An improved model for structural vulnerability analysis of power networks[J]. Physica A, 2009, 388: 4259-4266.
- [14] BOMPARD E, PONS E, WU Di. Extended topological metrics for the analysis of power grid vulnerability[J]. IEEE Systems Journal, 2012, 6(3): 481-487.
- [15] 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 Ping-ping. Vulnerability assessment to small-world power grid based on weighted topological model[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(10): 20-25.
- [16] 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): 89-93.
- LIU Yao-nian, ZHU Xi, KANG Ke-fei, et al. Identification of vulnerable lines in power grid based on the weighted reactance betweenness index[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(23): 89-93.

---

收稿日期: 2014-01-14; 修回日期: 2014-04-02

作者简介:

王仁伟 (1989-), 男, 硕士研究生, 研究方向为复杂网络理论在电网中的应用; E-mail: wangrenwei2012@gmail.com

张友刚 (1974-), 男, 副教授, 研究方向为复杂网络理论及其应用, 先进控制理论及其应用;

杨阳 (1991-), 男, 硕士研究生, 研究方向为复杂网络理论在电网中的应用。