

## 基于综合介数的电网脆弱线路辨识

刘小丽, 毛弋, 梁杉, 李亚雄, 范幸, 邓海潮, 彭文强

(湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

**摘要:** 基于电网运行状态、网络拓扑结构, 综合考虑可对线路脆弱性产生影响的继电保护、节点电压偏移、线路地理位置等因素, 提出了能更加准确识别电网脆弱线路的综合介数方法。其中, 电网运行状态由发电端和负荷端的功率输送、实时潮流及潮流裕度来监测, 网络拓扑结构则通过对线路产生作用的发电机数量及可从线路吸收功率的负荷个数并结合线路介数来分析。以 IEEE39 节点系统为研究对象, 在得出脆弱线路排序之后, 使用三种常用的连锁攻击方式进行仿真测试, 通过功率传输能力的变化情况来检验分析所提综合介数的有效性。测试结果表明, 所提出的综合介数方法能较好地识别脆弱线路。

**关键词:** 电网运行状态; 网络拓扑结构; 继电保护; 节点电压偏移; 综合介数

### Identification of vulnerable lines in power grid based on comprehensive betweenness index

LIU Xiaoli, MAO Yi, LIANG Shan, LI Yaxiong, FAN Xing, DENG Haichao, PENG Wenqiang  
(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** Considering comprehensively the influence of the relay protection, node voltage offset, geographical location and other factors, this paper puts forward a more accurate method based on the running state of power grid and topological structure of network to identify the vulnerable lines in power grid — the comprehensive betweenness method. Among them, the run-time state of grid is presented by power transmission of grid side and load side, the real-time power flow and flow margin. Combined with the number of generators which have exerted some influence on the grid with the number of load absorbing power from line, and taking line betweenness into account, the network topology structure can be analyzed. Taking IEEE39 system as the research object, the paper uses three kinds of chain attack to simulate when obtaining the order of vulnerable lines. Then the situation of the percentage of power transmission changing is used to analyze the effectiveness of the proposed comprehensive betweenness. The results show that the comprehensive betweenness proposed have a better recognition on vulnerable lines.

**Key words:** grid operation state; grid topological structure; relay protection; node voltage offset; comprehensive betweenness index

中图分类号: TM71

文章编号: 1674-3415(2016)02-0116-06

## 0 引言

随着经济的发展和水平的提高, 社会对电力的需求越来越大, 电网承载的负荷也越来越大, 这对电网的安全稳定性是种考验。然而近些年来停电事故频发<sup>[1-2]</sup>, 这引起了业内对于怎么识别电网的脆弱环节<sup>[3-4]</sup>来规避停电风险的研究热。现有研究表明, 电网脆弱线路是电网脆弱环节中至关重要的一部分, 电网脆弱线路辨识对于制定电网运行方式、采取措施规避停电风险有重大意义<sup>[5-6]</sup>。

当前针对脆弱线路的研究主要从复杂网络理论

和电力系统分析这两方面来考虑。这里所指的复杂网络理论主要立足于电网的小世界特性和其无标度网络的特点。从电力系统分析方面主要考虑的是电网自身特点及其运行状态。文献[7]通过拓扑统计特性分析, 指出中美电网都是小世界网络。文献[8]将电网的各线路电抗值相差很大的这一特点考虑到有向无权图的小世界模型中。文献[9]定义了带权重线路介数作为新的脆弱线路识别方法, 同时, 为了修正介数指标, 该文将小区域内所有线路介数中的最大介数值作为该区域电力网络线路的介数指标。文献[10]在加权电抗拓扑模型的基础上引入节点的运

行容量和运行极限。文献[11]基于电路方程, 为克服加权介数模型假设母线间潮流只沿最短路径流动的不足, 提出了用线路的电气介数来识别关键线路。但是这些模型都只从复杂系统理论上模拟电网潮流与负荷分配, 与电网实际情况还有一定差距。

现有研究都趋向于将复杂网络理论与电网实时运行状态结合起来, 如将电网本身特点中的电流电压需满足的基尔霍夫定律、电网实时运行状态等应用于脆弱线路识别。文献[12]结合电网拓扑结构、功率输送关系以及系统运行状态, 提出功率介数的概念, 并用来识别脆弱环节。但这并不够全面, 脆弱线路与其所处的地理位置有重大关系<sup>[13]</sup>, 有些线路虽然本身承担功率较少, 但是其处于某些重要通道上, 若发生故障必将引起输电通道中断, 或者导致区域功率不足, 引起系统电压失稳。文献[14]提出保护装置的脆弱情况对电网的脆弱性有一定的贡献作用。后面的研究也发现, 节点的电压偏移可以反映母线实时的运行状态, 故可以用来评估实时母线负荷大小与电网输入功率的关系<sup>[15-17]</sup>。

为更准确地识别出电网的脆弱线路, 本文从功率输送关系、潮流裕度等方面考虑运行状态的同时, 分析继电保护、节点电压偏移、线路所处地理位置等因素对电网脆弱性的影响, 并结合电网的拓扑结构情况, 提出综合介数的概念。综合介数指标能更加真实全面地识别出电网的脆弱线路。最后本文利用断线冲击后的传输效率来验证本文所提的综合介数的有效性。

## 1 综合介数

### 1.1 继电保护脆弱贡献度

继电保护是保证电网安全运行的关键所在。当系统某些节点或者线路出现问题, 通过继电保护系统的跳闸或者切换备用线路, 可以减轻甚至避免故障传播, 保证其他无故障部分迅速恢复正常运行。但若继电保护装置不能正确动作, 会加速故障传播, 给系统造成重大损失。因此在寻找电网脆弱环节时, 考虑继电保护的脆弱性是非常有必要的。本文从主后备保护的配合度以及保护故障严重程度两方面来量化继电保护的贡献度。定义继电保护  $k$  的保护配合度为  $R_k$ , 继电保护  $k$  的后果故障程度函数为  $P_k$ 。于是, 对于继电保护  $k$ , 其保护脆弱贡献度为  $I_k$ 。

$$I_k = N(R_k) + N(P_k) \quad (1)$$

式中,  $N(\bullet)$  表示对函数进行归一化处理, 它的目的在于消除指标量纲不同而引起的数据失真。本文做如下设定:

$$R_k = \rho \quad (2)$$

$$P_k = \sum_{i=1}^n |1 - U_i| + \sum_{i=1}^n |1 - f_i| + \left| \sum_{i=1}^m \frac{F'(i) - F(i)}{F(i)} \right| \quad (3)$$

式中:  $\rho$  表征的是保护  $k$  的后备保护个数;  $U_i$ 、 $f_i$  分别指的是在保护故障连锁动作之后的电压标幺值和频率标幺值, 而  $F'(i)$  和  $F(i)$  分别指的是保护故障连锁触发之前和之后的视在功率。

注: 一般情况下, 我们认为电网保护配合的配合关系是基本不变的, 这种配合关系可以由保护的配置信息以及电网的网络结构来最终确定。事实上, 后备保护的个数会随着保护配合关系的确定而确定。

综上所述, 可得到线路保护脆弱贡献度  $\beta(i, j)$  为

$$\beta(i, j) = \frac{1}{2} (I_k + I_{k+1}) \quad (4)$$

$\beta(i, j)$  能很好地表征保护装置脆弱性对电网线路脆弱性的影响。其值越大, 表示保护装置脆弱性对线路脆弱性的影响越大。

### 1.2 节点电压变化对线路脆弱性的影响

一般认为节点对线路的影响主要来自节点的拓扑结构、节点的有功功率及无功功率等方面。通常所述的线路介数里已考虑了节点拓扑结构的影响。此线路介数反映的是线路在整个网络的结构分布情况, 节点情况不需要特别考虑。关于有功, 之前的电气介数等都是通过模拟的潮流分布情况来考虑上一节点对功率分布的影响, 而少有文章研究无功对节点功率分布的影响。本文通过分析节点电压来判断节点无功对线路的影响。当负荷冲击较大时, 负荷的动态特性使得负荷具有通过调节自身等值阻抗来达到从电网吸收更多功率的目的, 最终实现新的平衡。通常情况下, 当负荷功率增大到电网输送功率的最大限度时, 电压也会大幅下降, 电压接近崩溃。反之, 当输出功率比输入功率小时, 线路中的等值阻抗会变大, 这种变化会引起电压升高。综上, 及时的电网输入功率与母线负荷的关系以及母线的运行状态都可以从节点电压的偏移情况反映出来。为提高脆弱线路评估的真实性, 本文把电压偏移情况作为一个参照因素。设  $v$  为电压偏移率, 则有

$$v = \frac{V - V_N}{V_N} \quad (5)$$

为消除量纲不一致的影响, 同样对  $v$  进行归一化处理, 有  $v' = N(v)$ 。

注: 同上,  $N(\bullet)$  是归一化函数。

### 1.3 综合介数指标

考虑到对电网脆弱性起作用的诸多因素,如继电保护脆弱贡献度、节点电压偏移、线路的地理位置、网络拓扑结构等在对电网产生影响时不是相互独立的,而是共同作用的,同时顾及辨识精度,要求各因素之间应当是有效放大的关系,即当其他因素一定,保护脆弱贡献度数值越大的线路更脆弱,本文定义了线路综合介数  $C_b$ 。

$$C_b = (u_G W_G + u_L W_L) w' v' \beta(i, j) x \quad (6)$$

式中:  $W_G$  表征的是发电机因子;  $W_L$  表征的是负荷因子;  $w'$  为潮流权重因子;  $u_G$  和  $u_L$  分别表示  $W_G$  和  $W_L$  对应的权重;  $x$  为地理位置修正因子。本文设定发电端与受电端的作用相当,因此设置  $u_G = u_L = 0.5$ 。

$$W_G = \frac{N_G}{n} \sum_{i=1}^{N_G} \frac{P_{ib}}{B'_b} \quad (7)$$

式中:  $N_G/n$  为能给线路  $b$  提供功率的发电机数量与网络总节点数的比值;  $P_{ib}$  为第  $i$  台发电机给线路  $b$  提供的有功;  $B'_b$  表示的是线路的介数。

$$W_L = \frac{N_L}{n} \sum_{i=1}^{N_L} \frac{P_{ib}}{B'_b} \quad (8)$$

式中,  $N_L/n$  表示的是可以从线路  $b$  获得有功的负载数量与系统节点总数的比值。

$W_G$  和  $W_L$  表达式中,发电机贡献给线路的功率与该线路介数的比值反映的是发电机  $i$  贡献给线路  $b$  的有功功率  $P_{ib}$  越大,其断开后冲击也会越大,同时,具有较大介数的线路发生故障或扰动,这种故障或扰动会分散到较多发电机—负荷节点对,因此功率冲击相对较小;反之,线路介数较小的线路受扰动时,冲击能量会相对集中,进而对发电端和受电端影响较大。

$$w = \frac{P_b}{r} \quad (9)$$

式中:  $P_b$  为线路  $b$  上的实时功率;  $r$  为线路  $b$  上的功率传输裕度。

注:  $w'$  是归一化处理之后的线路潮流权重  $w$ 。

从综合介数定义式的整体情况来看,它通过考虑能给线路提供功率的发电机个数以及能从线路汲取功率的负荷个数具体量化了拓扑结构中网络对线路的实际利用情况,同时通过考虑发电机提供给线路的功率及负荷从线路中吸取的功率、线路的潮流裕度等情况,量化了运行状态中网络对线路的利用情况。此外,它还分析了节点电压、继电保护系统及线路的地理位置等因素对线路脆弱性的影响,并将这些因素的影响情况反映到综合介数的表达式

中,使得该介数指标能更全面地识别出脆弱线路。

## 2 线路故障模型及脆弱线路评估模型

### 2.1 线路故障模型

本文采取常用的三种攻击模式(随机攻击、静态连锁攻击、动态连锁攻击)来识别电网的脆弱线路。随机攻击的特点是系统每次选择攻击的线路都是随机的,静态连锁攻击是指依次断开综合介数最大的线路,动态连锁攻击则是依次断开实时系统中综合介数最大的线路。

### 2.2 脆弱线路评估模型

为了更加直观地看出这些线路故障对整个系统的影响,需用到一些评价指标。先前的研究中,一般用网络效能函数、连通域水平等模型来评价,它们各有优点和不足。网络效能函数评价模型是用系统受攻击后的网络效能相对于受攻击前的网络效能的百分比来判断网络受攻击的程度,虽然计算简单,但是不能全面地反映网络的实际情况。连通域水平的评价模型则是用攻击前后系统最大连通域节点数与所有节点数的比值情况来做出分析的。这个模型通过分析系统解列后自身的节点损失情况来分析系统的受影响程度,但其评价也有缺陷,如裂解后的子系统也有自身出力和负荷平衡的可能。

本文采用的是最大传输能力这一指标。它主要利用线路容量来计算分析系统的输电能力,并利用网络最大流来得到近似的该电网的最大传输能力  $E$ 。注:连锁故障后的最大传输能力为系统解列后的各子系统最大传输能力之和。

$$E = Q_{\max}(A, C) \quad (10)$$

式中:  $A$  为电网的拓扑矩阵;  $C$  为支路容量矩阵;  $Q_{\max}$  为网络最大流。

由于无功、电压、频率以及可能的切机负荷等都可能影响到电网的实际运行状态,最大传输能力这一指标只能粗略地估计系统的传输能力,但由于脆弱线路的识别也只需要粗略比较各线路故障对系统的影响情况,并不需要定量分析,所以本文运用这一指标是可行的。

### 2.3 脆弱线路识别流程

本文建立线路识别模型的流程主要包括以下三方面:

- (1) 根据电网运行情况确立综合介数所涉及的所有参数的值,并计算综合介数。
- (2) 按照不同的攻击模式进行攻击。
- (3) 用验证模型验证本文所提出方法的效果。具体流程框图如图 1 所示。

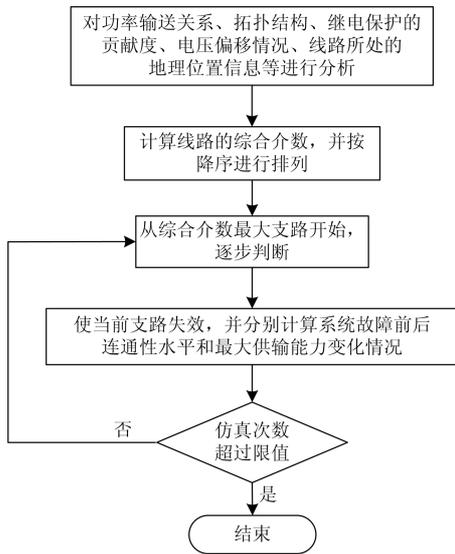


图 1 算法流程  
Fig. 1 Flow chart

### 3 算例分析

本文采用标准的IEEE39节点系统来进行仿真分析, 此处我们可假设IEEE39节点系统高压端节点为220 kV节点, 其余皆为110 kV节点, 这样处理以后便可以忽略地理位置因素对系统线路脆弱性的影响, 因此可以设定地理位置修正因子  $x \equiv 1$ 。IEEE39节点系统的具体网络拓扑结构如图2所示 (IEEE39节点系统包含10台发电机、12个联络节点、17个负荷)。

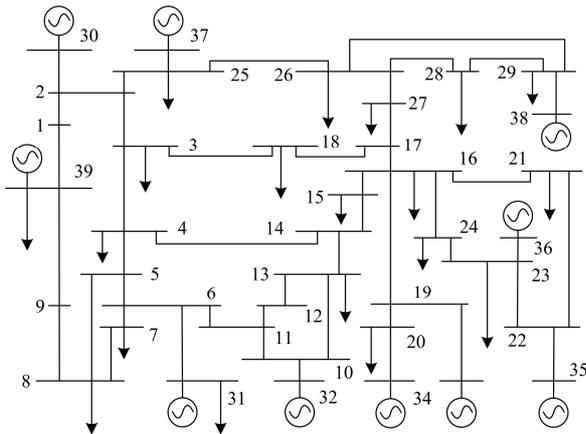


图2 IEEE39系统拓扑结构图  
Fig. 2 Topological structure of IEEE39 system

本文使用综合介数指标模型来对 IEEE39 系统进行脆弱线路识别, 将得到的综合介数与功率介数的结果进行对比, 限于篇幅, 本文只列出两指标排名前 15 的线路。具体情况如表 1 所示。

表 1 脆弱线路比较

| 排名 | 本文方法               | 综合介数  | 功率介数法              | 功率介数  |
|----|--------------------|-------|--------------------|-------|
| 1  | L <sub>5-6</sub>   | 4 130 | L <sub>12-32</sub> | 3 952 |
| 2  | L <sub>2-3</sub>   | 3 566 | L <sub>2-30</sub>  | 2 642 |
| 3  | L <sub>16-19</sub> | 3 155 | L <sub>19-33</sub> | 2 446 |
| 4  | L <sub>15-16</sub> | 2 744 | L <sub>21-22</sub> | 2 231 |
| 5  | L <sub>4-14</sub>  | 2 365 | L <sub>6-31</sub>  | 1 938 |
| 6  | L <sub>16-17</sub> | 1 504 | L <sub>29-38</sub> | 1 709 |
| 7  | L <sub>25-26</sub> | 1 086 | L <sub>23-24</sub> | 1 526 |
| 8  | L <sub>2-25</sub>  | 969   | L <sub>16-19</sub> | 1 387 |
| 9  | L <sub>3-4</sub>   | 950   | L <sub>2-3</sub>   | 1 377 |
| 10 | L <sub>16-21</sub> | 860   | L <sub>6-11</sub>  | 1 353 |
| 11 | L <sub>21-22</sub> | 805   | L <sub>6-7</sub>   | 1 308 |
| 12 | L <sub>16-21</sub> | 733   | L <sub>5-6</sub>   | 1 250 |
| 13 | L <sub>5-8</sub>   | 689   | L <sub>10-13</sub> | 1 189 |
| 14 | L <sub>6-11</sub>  | 645   | L <sub>16-21</sub> | 1 131 |
| 15 | L <sub>6-7</sub>   | 434   | L <sub>5-8</sub>   | 819   |

从表 1 不难看出, 两种方法所判断出的关键线路有半数相同。实际上, 利用潮流熵方法和电气介数方法识别得到的关键线路中也有半数与本文所提综合介数方法识别得到的关键线路相同, 如 L<sub>21-22</sub>, L<sub>16-19</sub>, L<sub>2-3</sub>, L<sub>6-11</sub>, L<sub>6-7</sub>, L<sub>5-6</sub>, L<sub>16-21</sub>, L<sub>5-8</sub>。这说明采用综合介数方法得到的仿真结果是可信的。此外, 分别采用两种识别方法所得到的关键线路也有一定差别, 究其原因是两种方法研究的侧重点不同。

从功率介数方法所得结果来看, 排名靠前的关键线路都是发电机的出口线路, 如 L<sub>12-32</sub>, L<sub>2-30</sub>, L<sub>19-33</sub>, L<sub>21-22</sub> 等。这说明功率介数方法在考虑输电线路在当前系统中的拓扑结构和运行状态的同时, 把线路是否处于电源出口处作为影响线路脆弱性的关键因素, 但这与实际情况有偏差。例如在功率介数法中排名第一的线路 L<sub>12-32</sub>, 虽然其处于电源的出口线路上, 但只对线路 L<sub>10-12</sub> 影响大, 断开后, 其他周边线路虽会受一些影响, 比如说功率等分布情况会略微改变, 但并不会引起系统发生大的变化。因此, 线路 L<sub>12-32</sub> 作为关键线路排序第一, 显然不合理。

在综合介数方法关键线路排序中, 线路 L<sub>5-6</sub> 排名第一。这是由于综合介数方法考虑了脆弱保护度和节点电压偏移对线路脆弱性的影响。文献[18]研究指出, 广义负荷节点重要度中的无功节点重要排序里, 节点 5、节点 6 都排名靠前, 而节点与线路不是孤立的, 节点 5 和节点 6 的无功重要性高, 断开时, 必然会影响综合介数指标里的线路保护脆弱

度和电压偏移情况，从而得到较大的综合介数指标数值，这佐证了线路 L<sub>5-6</sub> 综合介数排序靠前的合理性。此外，从功率传输角度来看，综合介数排序靠前的 L<sub>2-3</sub> 处于发电机 30 和 37 的重要外送通道上，若断开，发电机 30 和 37 的功率输送将会受到影响，从而引起一定范围的潮流转移。从保护脆弱性方面来看，若线路 L<sub>2-3</sub> 发生保护拒动，发电机 30 或者重要负荷节点将被孤立，最终导致系统的潮流、频率、电压等大幅波动。所以在综合考虑保护脆弱性方面，线路 L<sub>2-3</sub> 的重要度排名靠前也是合理的。对于线路 L<sub>15-16</sub>、L<sub>2-25</sub>、L<sub>16-17</sub> 来说，它们的传输能力一般，但是从整个拓扑结构来看，三条线路均处于重要的传输通道上，若故障传输通道会中断，必将导致某些区域的功率供给不足，从而引发系统功角失稳。

为验证综合介数法所得脆弱线路排序的合理性，本文采用三种攻击模式来对功率介数法和综合介数法所得到的脆弱线路进行攻击。通过分析不同攻击模式下网络最大传输能力的变化情况，来判断综合介数方法是否合理。具体情况见图 3 和图 4。

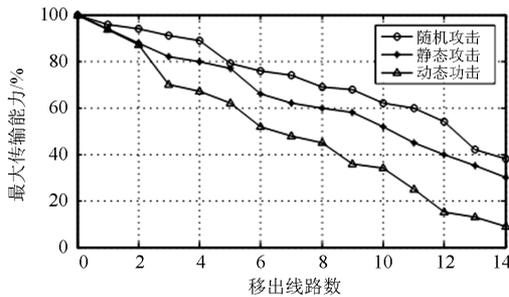


图 3 按功率介数指标排序的三种攻击结果

Fig. 3 Result of the three kinds of attack according to the current power betweenness index

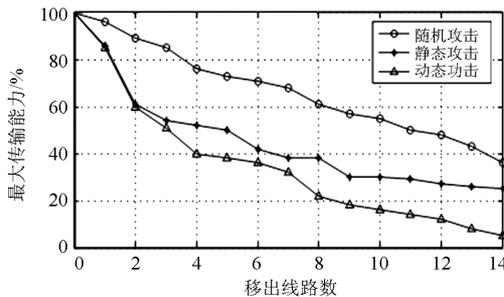


图 4 按综合介数指标排序的三种攻击结果

Fig. 4 Result of the three kinds of attack according to the current comprehensive betweenness index

图 3 和图 4 分别是对功率介数方法和综合介数方法得到的脆弱线路进行静态攻击、动态攻击、随机攻击之后得到的最大传输能力曲线图。对比图 3 和图 4 可以看到，对两种方法得到的脆弱线路进行

静态和动态攻击比对其进行随机攻击的效果要好。对比图 3 和图 4 中的静态攻击和动态攻击曲线图，可以看出前几次攻击时，图 3 的传输功率曲线下降慢一些，图 4 的曲线明显下降很快。整体看来，不管是动态攻击还是静态攻击，图 4 的曲线下降坡度比图 3 的曲线大。这说明综合介数方法效果更佳。

#### 4 结论

引起线路脆弱的因素众多。先前的研究主要考虑线路的拓扑结构和电网的运行状态这两个主因，随着研究的不断深入，发现电网的保护系统、电压偏移情况、线路的地理位置都会影响电网线路的脆弱性。本文综合这些主要因素，再结合发电机提供给线路的功率、从线路汲取功率的负荷个数以及线路的实际潮流和潮流上限等因素，提出了综合介数的概念。通过对 IEEE39 系统进行仿真测试而得到的结论与之前研究的结论做对比分析，验证了本文所提方法的合理性。但是能描述电网运行状态的因子很多，如电压、电流、功率等，而且各种因子的处理方式不一样，用哪个因子来表征系统运行状态更符合实际电力系统是值得深入思考的问题。

#### 参考文献

- [1] 徐政勋, 张伟民. 电网脆弱性分析的一种新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(12): 87-90. XU Zhengxun, ZHANG Weimin. A new method of power system vulnerability analysis[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(12): 87-90.
- [2] 唐葆生. 伦敦南部地区大停电及其教训[J]. 电网技术, 2003, 27(11): 1-5. TANG Baosheng. Blackout in south of London and its lessons[J]. Power System Technology, 2003, 27(11): 1-5.
- [3] 詹昕, 向铁元, 陈红坤, 等. 基于搜索矢量拟态物理学算法的微电网脆弱性评估及重构[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 74-81, 92. ZHAN Xin, XIANG Tieyuan, CHEN Hongkun, et al. Vulnerability assessment and reconfiguration of microgrid based on search vector artificial physics optimization algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 74-81, 92.
- [4] MOTTER A E, LAI Y C. Cascade-based attacks on complex networks[J]. Physical Review E, 2002, 66(2): 1-4.
- [5] 丁明, 过羿, 张晶晶, 等. 基于效用风险熵模糊综合评判的复杂电网节点脆弱性评估[J]. 电工技术学报, 2015, 30(3): 214-223. DING Ming, GUO Yi, ZHANG Jingjing, et al. Node vulnerability assessment for complex power grids based

- on effect risk entropy-weighted fuzzy comprehensive evaluation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(3): 214-223.
- [6] 张富超, 谢成荣, 沈立新, 等. 基于源流路径链和输电介数的电网关键线路辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 7-12.  
ZHANG Fuchao, XIE Chengrong, SHEN Lixin, et al. Identification of power grid critical lines based on path chains and transmission betweenness[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 7-12.
- [7] 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. 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.
- [8] 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 to large-scale power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(8): 7-10.
- [9] 魏震波, 刘俊勇, 李俊, 等. 基于 P、Q 网分解的有向加权拓扑模型下的电网脆弱性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(24): 19-22, 29.  
WEI Zhenbo, LIU Junyong, LI Jun, et al. Vulnerability analysis of electric power network under a directed-weighted topological model based on the P-Q networks decomposition[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(24): 19-22, 29.
- [10] 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 CSEE, 2008, 28(10): 20-25.
- [11] 徐林, 王秀丽, 王锡凡. 电气介数及其在电力系统关键线路识别中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(1): 33-39.  
XU Lin, WANG Xiuli, WANG Xifan. Electric betweenness and its application in vulnerable line identification in power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(1): 33-39.
- [12] 王涛, 高成彬, 顾雪平, 等. 基于功率介数的电网关键环节辨识[J]. 电网技术, 2014, 38(7): 1907-1913.  
WANG Tao, GAO Chengbin, GU Xueping, et al. Power betweenness based identification of power grid critical links[J]. Power System Technology, 2014, 38(7): 1907-1913.
- [13] 蔡晔, 曹一家, 李勇, 等. 考虑电压等级和运行状态的电网脆弱线路辨识[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(13): 2124-2131.  
CAI Ye, CAO Yijia, LI Yong, et al. Identification of vulnerable lines in urban power grid based on voltage grade and running state[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(13): 2124-2131.
- [14] 张海翔, 吕飞鹏. 基于保护脆弱度加权拓扑模型下的电网脆弱性评估[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(4): 613-619.  
ZHANG Haixiang, LÜ Feipeng. The vulnerability evaluation model of power grid based on the protection-vulnerability-weighted topological model[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(4): 613-619.
- [15] 李艳卿, 李华强, 李迁, 等. 基于支路综合脆弱性的电网抗毁性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(7): 80-85.  
LI Yanqing, LI Huaqiang, LI Qian, et al. Power system invulnerability assessment based on branch comprehensive vulnerability[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(7): 80-85.
- [16] 魏震波, 刘俊勇, 朱觅, 等. 基于网络数字化挖掘的电网拓扑结构辨识[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(4): 12-17.  
WEI Zhenbo, LIU Junyong, ZHU Mi, et al. Identification of power grid topological structure based on network data mining[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(4): 12-17.
- [17] 周彦衡, 吴俊勇, 陈启超, 等. 基于克鲁斯卡尔算法的电力系统结构脆弱性评估[J]. 电网技术, 2013, 37(11): 3172-3177.  
ZHOU Yanheng, WU Junyong, CHEN Qichao, et al. Kruskal algorithm based assessment on power system structural vulnerability[J]. Power System Technology, 2013, 37(11): 3172-3177.
- [18] 许立雄, 刘俊勇, 刘洋, 等. 节点重要度的分类综合评估[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(10): 1609-1617.  
XU Lixiong, LIU Junyong, LIU Yang, et al. Node importance classified comprehensive assessment[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(10): 1609-1617.

收稿日期: 2015-04-07; 修回日期: 2015-08-27

作者简介:

刘小丽(1989-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电网安全与控制、电网重构; E-mail: 738776439@qq.com

毛 戈(1965-), 男, 副教授, 研究方向为电网规划与重构、无功优化、电网安全与控制。

(编辑 魏小丽)