

## 基于支路综合脆弱性的电网抗毁性分析

李艳卿, 李华强, 李 迁, 黄昭蒙

(四川大学电气信息学院, 智能电网四川省重点实验室, 四川 成都 610065)

**摘要:** 大停电事故一般由个别元件故障开始并最终导致全系统崩溃, 而其中极少数带有较重传输任务的支路往往起到助推作用, 因此寻找这些关键支路, 分析该部分支路失效情况下的电力系统的抗毁性, 具有重要的研究价值。建立支路静态能量函数模型, 并在此基础上提出支路状态脆弱因子。结合基于电气介数的结构脆弱因子, 提出支路综合脆弱性评估指标。通过仿真计算, 评估电网的支路综合脆弱性, 确定脆弱环节。基于脆弱性评估结果建立抗毁性评估指标, 通过蓄意攻击和随机攻击, 仿真验证不同扰动模式对电网抗毁性的影响。通过对IEEE-30母线系统的仿真, 验证了该方法的合理性与有效性。

**关键词:** 电力系统抗毁性; 静态能量函数; 支路综合脆弱性; 网络抗毁度

### Power system invulnerability assessment based on branch comprehensive vulnerability

LI Yan-qing, LI Hua-qiang, LI Qian, HUANG Zhao-meng

(Intelligent Electric Power Grid Key Laboratory of Sichuan Province, School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** The blackouts usually start from individual components failure which eventually leads to system crash, and a very few branches with heavy load play a promoting role in the tendency, therefore, it is very important to find these key branches, and analyze the system invulnerability under the conditions of branch failures. This paper builds the branch static energy function model and then proposes the branch state vulnerability factor. Combining with the structure vulnerability factor based on electric betweenness, the branch comprehensive vulnerability index is put forward. Through simulating calculation, the branch comprehensive vulnerability is evaluated to confirm the fragile link of power system. On this basis, the invulnerability index is determined. Through intentional attack and random attack, the influence of different disturbance on the network invulnerability is simulated. The simulation on the IEEE-30 bus system verifies the rationality and effectiveness of this method.

**Key words:** power system invulnerability; static energy function; branch comprehensive vulnerability; network invulnerability

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)07-0080-06

## 0 引言

电力系统在逐步扩展供电范围与输电规模的同时, 其各类特性愈发复杂, 这种日益增长的复杂性为电力系统安全稳定运行带来了更多挑战。这其中, 最具有研究价值和实用价值的就是电力系统的脆弱性与抗毁性。

电力系统的脆弱性是指电力系统因人为干预、信息、计算、通信、内部元件和保护控制系统等因素的影响而潜伏着的大面积停电的危险状态, 这种危险状态是在系统发生故障时才暴露出来, 并表现为系统能否保持稳定和正常供电的能力<sup>[1]</sup>。现阶段脆弱性的分析主要从状态<sup>[2-4]</sup>和结构<sup>[5-7]</sup>两个方面着手。

而抗毁性是从网络连通性的角度来描述网络拓扑结构安全性的一个静态指标。一个网络的抗毁性是指至少破坏网络中多少个节点或边才能中断网络间的联系, 即是衡量破坏一个网络的困难程度<sup>[8]</sup>。抗毁性的分析尚无统一的标准和固定的方法, 多数通过计算网络拓扑结构中的节点或支路的重要度, 进而分析网络的抗毁性。文献[9]阐述了基于连通度的网络抗毁性评价模型, 并将其应用到电力系统应急通信网络。文献[10]定义了网络连通性和抗毁性的新测度: 连通系数、容错度和抗攻击度, 研究拓扑结构的各种属性对网络抗毁性的影响。文献[11]给出了一个以破坏整个网络连通度的估计为基础的网络抗毁性测度指标和计算实例, 提出了基于节点重要性的平衡度网络拓扑优化算法。文献[12]应用

复杂网络理论, 借鉴有权网络的抗毁性评估方法, 构建了中压配电网网络结构抗毁性评估模型。文献[13]提出了一种基于最短路径数的网络抗毁评价方法, 通过对计算节点之间的最短路径数, 将待评价网络与全连通网络进行网络抗毁性评价。

但是, 在电力系统的抗毁性评估中, 考虑电力系统自身特性, 结合其运行状态进行抗毁性分析也是不可或缺的一方面<sup>[14-15]</sup>。根据电力系统脆弱性的定义, 电网中最脆弱的环节是电网运行状态最接近临界运行状态, 且故障后对整个电网的安全稳定运行造成的影响后果最严重的环节。一旦该核心支路发生故障, 就会严重威胁系统安全, 甚至发生灾难性事故。这部分支路既是电力系统中的脆弱支路, 也是电力系统抗毁性研究的关键所在。

因此, 本文基于能量的观点<sup>[2-7]</sup>, 建立有效和快速的模型评估支路综合脆弱性, 筛选出电网的脆弱环节。对筛选出的电网脆弱支路进行排序, 依次对脆弱支路施加扰动, 结合抗毁性评估的理论、模型以及方法, 利用电网抗毁度指标来进一步分析电网的抗毁性。并通过与随机故障法对比, 验证了本方法的正确性, 有效性。

## 1 支路静态能量函数模型

文献[3]根据支路传输的有功功率与无功功率建立支路静态能量函数模型。根据图1所示的支路模型, 建立支路节点电压间的相互关系。

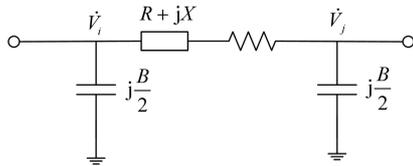


图1 网络支路等值电路

Fig. 1 Network branch equivalent circuit

由节点*i*、节点*j*的电压关系得

$$V_j \approx V_i \cos \delta_{ij} - V_i \sin \delta_{ij} \tan \varphi_j \quad (1)$$

由式(1)可得节点*i*与*j*间的电压差 $V_{ij}$ 为

$$V_{ij} = V_i(1 - \cos \delta_{ij} + \sin \delta_{ij} \tan \varphi_j) \quad (2)$$

式中:  $V_i$ ,  $V_j$  分别为节点*i*、*j*的电压幅值;  $\delta_{ij}$  为节点*i*、*j*的相位差;  $\varphi_j$  为节点*j*的功率因数角。

可得支路*ij*的潮流表达式为

$$P_{ij} = V_i^2 G_{ij} - V_i V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (3)$$

$$Q_{ij} = -V_i^2 B_{ij} + V_i V_j (B_{ij} \cos \delta_{ij} - G_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (4)$$

式中:  $P_{ij}$  是*ij*支路当前传输的有功功率;  $Q_{ij}$  是*ij*支路当前传输的无功功率;  $B_{ij}$  是*ij*支路的电纳;  $G_{ij}$  是*ij*支路的电导。

由此可得支路功率传输的变化量为

$$f_{pij} = P_{ij} - P_{ij}^s = V_i^2 G_{ij} - V_i V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) - P_{ij}^s \quad (5)$$

$$f_{qij} = \frac{Q_{ij} - Q_{ij}^s}{V_{ij}} = \frac{-V_i^2 B_{ij} + V_i V_j (B_{ij} \cos \delta_{ij} - G_{ij} \sin \delta_{ij}) - Q_{ij}^s}{V_{ij}} \quad (6)$$

完整的支路能量函数应对电压相角差和电压幅值差两部分同时进行积分, 表达式为

$$E_{ij} = \int_{(\delta_{ij}^s, V_{ij}^s)}^{(\delta_{ij}, V_{ij})} [f_{pij}, f_{qij}] \mathbf{d} \begin{bmatrix} \delta_{ij} \\ V_{ij} \end{bmatrix} = \int_{\delta_{ij}^s}^{\delta_{ij}} (P_{ij} - P_{ij}^s) \mathbf{d} \delta_{ij} + \int_{V_{ij}^s}^{V_{ij}} \left( \frac{Q_{ij} - Q_{ij}^s}{V_{ij}} \right) \mathbf{d} V_{ij} = \int_{\delta_{ij}^s}^{\delta_{ij}} [V_i^2 G_{ij} - V_i V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) - P_{ij}^s] \mathbf{d} \delta_{ij} + \int_{V_{ij}^s}^{V_{ij}} \left[ \frac{-V_i^2 B_{ij} + V_i V_j (B_{ij} \cos \delta_{ij} - G_{ij} \sin \delta_{ij}) - Q_{ij}^s}{V_{ij}} \right] \mathbf{d} V_{ij} \quad (7)$$

## 2 支路脆弱度指标

当电力网络中的某一个脆弱环节发生故障, 而该故障所引起的其他因素的变化(如电压、频率等)将会对与其相关联的其他环节产生影响。由于这些相关联的环节自身也存在脆弱性, 在这些因素的共同作用下, 可能导致故障影响在一定范围内传播和扩大, 形成级联崩溃, 甚至大面积的系统灾难。因此, 在研究电力网络的抗毁性前预先找出电网的脆弱环节是非常重要的。

### 2.1 支路状态脆弱因子

基于支路能量函数确定了线路的状态脆弱因子为

$$a_l(i, j) = \frac{\partial E_{ij}}{\partial V_{ij}} \quad (8)$$

其中,  $a_l(i, j)$  为支路能量对支路节点电压差求偏导,  $a_l(i, j)$  因此能够表征支路能量随支路节点电

压差的变化趋势。该评估指标能有效反映有功功率和无功功率在支路中的传输和节点电压的幅值相角的变化对电网脆弱性的影响, 物理意义清楚, 且判断简单, 有很强的实用价值。

## 2.2 支路电气介数结构脆弱因子

基于支路电气介数定义支路的结构脆弱因子<sup>[16]</sup>为

$$B_c(l) = \sum_{i \in G, j \in L} \sqrt{W_i W_j} |I_{ij}(l)| \quad (9)$$

式中:  $I_{ij}(l)$  为在“发电-负荷”节点对  $(i, j)$  间加上单位注入电流源后在线路  $l$  上引起的电流;  $W_i$  为发电节点  $i$  的权重, 取发电机额定容量或实际出力;  $W_j$  为负荷节点  $j$  的权重, 取实际或峰值负荷;  $G$  和  $L$  为所有发电和负荷节点集合。

$B_c(l)$  能够量化全网潮流在网络支路中的实际分布, 同时反映各支路的承载能力和支撑作用, 亦可反映出节点发电出力和负荷水平对线路关键性的影响, 这与实际电力系统物理意义相符。

## 2.3 支路综合脆弱度指标

目前, 在建立电力系统的脆弱性评估指标时遇到的最大问题是: 在针对电力系统实时运行参数或自身固有的网络拓扑结构建立指标时, 往往只能考虑到实时运行或者拓扑结构性单一方面。而电力系统的脆弱性不仅仅与系统自身的固有脆弱性有关, 即一定的网架结构及元件自身强度, 而且与系统的实时运行参数、网络约束条件等密切相关。

基于上述理论基础和数学模型, 考虑到状态和结构脆弱因子对电网脆弱性的影响并非相互独立而是共同作用的, 得出评估电网支路脆弱性的综合指标为

$$\beta_l = \alpha_l \cdot B_c(l) \quad (10)$$

其中:  $\alpha_l$  为支路状态脆弱因子;  $B_c(l)$  为支路结构脆弱因子, 该指标能综合反映支路在电网中状态与结构的脆弱性。

# 3 抗毁性指标建立

## 3.1 自然连通度

当一个节点与其他任意节点连接的部分路径出现故障时, 与这个节点连通的不同路径数越多, 发生故障时可替代的路径就越多。在复杂网络抗毁性分析中, 该特性可用自然连通度表示, 即

$$\bar{\lambda} = \ln\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e^{\lambda_i}\right) \quad (11)$$

式中:  $N$  为网络节点数;  $\lambda_i (i=1, 2, \dots, N)$  为网络邻

接矩阵  $A(G)$  的特征根。

## 3.2 抗毁度指标

将网络  $G$  的抗毁度指标<sup>[17]</sup>定义为

$$s(G) = \frac{\ln\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e^{\lambda_i}\right)}{S_0} \quad (12)$$

式中,  $S_0$  为考虑所有可行路径的“完全网络图”的自然连通度。对于不同的网络结构, 当网络中各节点的备用路径越多, 则网络的抗毁度越大, 其在遭受扰动或攻击时能维持系统稳定运行的性能越好。

# 4 电力系统抗毁性评估流程

在网络的初始状态是稳定运行时, 电力网络抗毁性分析的步骤如下。

### 1) 蓄意攻击模式

根据脆弱性的定义, 电网中最脆弱的环节是电网运行状态最接近临界运行状态, 且故障后对整个电网的安全稳定运行造成的影响后果最严重的环节。通过蓄意攻击脆弱支路可严重破坏电力系统的潮流平衡和拓扑结构, 从而导致系统运行状态发生巨大变化, 继而造成系统崩溃。优先攻击网络中的脆弱支路, 会加速系统崩溃进程。

分析步骤如下:

- ① 计算算例系统各支路的综合脆弱度指标;
- ② 把各支路按其综合脆弱度指标从大到小依次排序, 并断开最脆弱的一条支路;
- ③ 判断算例系统能否继续正常运行, 若能, 返回①, 否则进入④;
- ④ 根据断开支路后的网络结构, 根据式(11)、式(12)计算得到网络抗毁度指标。

### 2) 随机攻击模式

通过优先攻击脆弱性最大的支路可以得到电网在故障最严重情况下的电网结构的抗毁性, 但如果模拟故障链时随机断开电力系统网络模型中的支路, 通过与蓄意攻击模式下的抗毁性对比分析, 可以验证支路综合脆弱性指标评估出的脆弱环节是否是电网发生故障后对电网运行影响最大的环节。

分析步骤如下:

- ① 在算例系统支路中随机筛选一条, 并断开;
- ② 判断算例系统能否继续正常运行, 若能, 返回①, 否则进入③;
- ③ 根据断开支路后的网络结构, 根据式(11)、(12)计算得到网络抗毁度指标。

## 5 算例分析

以 IEEE-30 母线系统为例, 该系统包含 6 台发电机, 41 条支路。系统节点编号如图 2 所示。

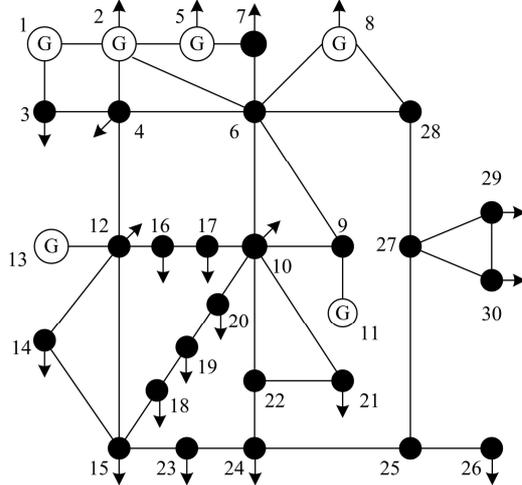


图 2 IEEE-30 母线系统拓扑结构图

Fig. 2 Electrical connection diagram of IEEE-30 bus system

### 5.1 按脆弱度蓄意攻击最脆弱支路

在系统正常运行的情况下, 由式(12)计算出 IEEE-30 系统的抗毁度指标值为 0.873 2。

同时, 在系统处于初始潮流时分析各支路的状态脆弱因子, 结构脆弱因子以及综合脆弱程度, 按综合脆弱度由大到小排序, 列出综合脆弱度排序前十的支路如表 1 所示。

表 1 初始潮流下的综合脆弱性排序前十支路

Table 1 Top ten vulnerable branches under initial trend

支路编号 (起始节点- 终止节点)	状态脆弱 因子	结构脆弱 因子	综合脆弱度 指标
32(24-25)	-0.524 09	0.204 43	-0.107 14
14(4-12)	-0.064 14	0.203 28	-0.013 04
39(8-28)	-0.014 2	0.116 40	-0.001 65
8(5-7)	-0.004 89	0.073 09	-0.000 36
9(6-7)	-0.1	0.001 10	-0.000 11
38(29-30)	0.011 95	0.056 35	0.000 67
12(6-10)	0.003 69	0.194 91	0.000 72
36(27-29)	0.042 52	0.084 61	0.003 60
20(16-17)	0.019 86	0.211 44	0.004 20
35(27-28)	0.017 18	0.252 49	0.004 34

攻击步骤如下:

① 由表 1 可知, 初始潮流下最脆弱的支路为 32 支路 (24-25), 断开 32 支路。

② 重新计算系统各支路脆弱度, 得到此时最脆弱支路为 14 支路 (4-12), 断开 14 支路。

③ 重新计算系统各支路脆弱度, 得到此时最脆弱支路为 8 支路 (5-7), 断开 8 支路。

此后系统运行状态严重恶化, 不能继续正常运行。

### 5.2 随机攻击支路

第一组随机攻击: ①随机断开支路 25 (10-17); ②继续随机断开支路 12 (6-10); ③继续随机断开支路 30 (22-24); ④继续随机断开支路 15 (12-13)。

此后系统运行状态严重恶化, 不能继续正常运行。

第二组随机攻击: ①随机断开支路 10 (6-8); ②继续随机断开支路 4 (3-4); ③继续随机断开支路 19 (14-15); ④继续随机断开支路 39 (8-28)。

此后系统运行状态严重恶化, 不能继续正常运行。

本文分别对 IEEE-30 系统进行两种攻击: 按支路综合脆弱度排序由大到小依次进行蓄意攻击; 在系统中随机选择支路进行随机攻击。由两种攻击下的系统仿真结果表见 2。

表 2 蓄意攻击与随机攻击的系统抗毁度比较

Table 2 Comparison of system invulnerability between intentional attack and random attack

蓄意攻击	系统抗毁度
32	0.839 3
32-14	0.810 9
32-14-8	0.797 0
第一组随机攻击	
25	0.855 3
25-12	0.829 6
25-12-30	0.804 9
25-12-30-15	0.782 3
第二组随机攻击	
10	0.841 2
10-4	0.821 1
10-4-19	0.805 5
10-4-19-39	0.784 1

蓄意攻击 1 条支路后系统的抗毁度较随机攻击一条支路低很多: 由于支路 32 上的传输功率很重, 为系统右边负荷提供重要功率支撑, 且是连接系统右半部分结构与系统中间主网结构的重要线路, 所以当它退出运行, 造成系统运行状态及网架结构均发生重大改变; 蓄意攻击 2 条支路后系统的抗毁度较随机攻击两条支路低很多: 因支路 14 本身承载功率传输较大, 发生故障时, 其造成的潮流转移较大, 且是连接系统上下部分的重要支路, 断开后严

重影响系统结构；蓄意攻击 3 条支路时，因为节点 5,7 自带负荷较重，支路 8 (5-7) 是 3 台发电机向外送功率的关键线路，系统发生故障时，其需要承受很大的功率波动。所以断开这三条关键线路对整个系统运行状态及网架结构产生了破坏性的影响。

而在两组随机攻击中，当攻击前几条支路时，系统仍能继续运行，但当系统中有 4 条支路被随机断开后，由于断开的支路发生累积效应，造成系统潮流变化很大，并且使整个网络结构发生较大改变，从而系统抗毁度降低到一定程度，对整个网络的运行状态和网架结构造成严重影响。

仿真结果表明，按照脆弱度筛选出的脆弱支路确实是系统中非常薄弱或关键环节，这些脆弱支路退出运行会造成系统潮流分布等的急剧变化，结构上被严重破坏，若此时电网的安全与稳定保护装置不能及时动作，如切负荷等，则会导致系统电压全面下降，逐渐拉垮整个系统电压水平，系统不能继续运行。

## 6 结论

电力系统脆弱性评估能对电网在设计和运行中存在的隐患进行评估，揭露运行中的电力系统存在的薄弱环节。电网的抗毁性评估即是衡量电网在遭受扰动或者攻击的情况下，网络结构对电网继续保持稳定运行的能力的影响。通过脆弱性评估对系统存在的薄弱环节进行筛选，基于电网脆弱性分析的基础上再依据抗毁性评估的理论对系统遭受扰动和攻击后产生的后果进行预先判断分析，可以保证电网的安全、可靠运行。

本文将电网运行状态和网架结构相结合，建立能准确合理评估系统脆弱性的支路综合脆弱度指标，找出系统的脆弱环节，利用抗毁性分析原理对其进行蓄意攻击和随机攻击，然后结合电力系统网架结构构建系统抗毁度指标，分析评估电力系统遭受攻击时能维持稳定的抗毁能力，为电力系统的安全及稳定运行提供有价值的参考和指导信息。

## 参考文献

- [1] FOUAD A A, ZHOU Qin, VITTTAL V. System vulnerability as a concept to assess power system dynamic security[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(2): 1009-1015.
- [2] 李杨, 刘俊勇, 朱国俊, 等. 计及动作安全裕度的节点电压脆弱性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(8): 10-14.
- [3] 黄昭蒙, 李华强, 杜涛, 等. 基于支路能量函数的脆弱支路评估[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(15): 7-11. HUANG Zhao-meng, LI Hua-qiang, DU Tao, et al. Vulnerable branch assessment based on branch energy function[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(15): 7-11.
- [4] 尹项根, 陈庆前, 王博, 等. 基于四层集合模型的复杂电力系统脆弱性评估体系[J]. 电工技术学报, 2013, 28(1): 225-233. YIN Xiang-gen, CHEN Qing-qian, WANG Bo, et al. Vulnerability assessment system of complicated power system based on four-level set model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(1): 225-233.
- [5] 王伊渺, 李华强, 肖先勇, 等. 基于电网状态和结构的连锁故障预测[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(20): 1-5. WANG Yi-miao, LI Hua-qiang, XIAO Xian-yong, et al. Cascading failures forecasting based on running state and structure[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(20): 1-5.
- [6] 魏震波, 刘俊勇, 朱国俊, 等. 基于可靠性加权拓扑模型下的电网脆弱性评估模型[J]. 电工技术学报, 2010, 25(8): 131-137. WEI Zhen-bo, LIU Jun-yong, ZHU Guo-jun, et al. Vulnerability evaluation model to power grid based on reliability-parameter-weighted topological model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(8): 131-137.
- [7] 刘群英, 刘俊勇, 刘起方, 等. 支路约束优化下的电网结构脆弱性研究[J]. 电工技术学报, 2011, 26(3): 148-161. LIU Qun-ying, LIU Jun-yong, LIU Qi-fang, et al. Research on grid structural vulnerability based on optimal branch limit[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(3): 148-161.
- [8] 程克勤, 李世伟, 周健. 基于边权值的网络抗毁性评估方法[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(35): 95-100. CHENG Ke-qin, LI Shi-wei, ZHOU Jian. Evaluation method for network invulnerability based on edge weight[J]. Computer Engineering and Applications, 2010,

- 46(35): 95-100.
- [9] 高强, 刘献伟, 邱丽君. 电力系统应急通信网络及其抗毁性分析[J]. 电网技术, 2009, 33(11): 104-108.  
GAO Qiang, LIU Xian-wei, QIU Li-jun. Emergency communication network in power system and its invulnerability analysis[J]. Power System Technology, 2009, 33(11): 104-108.
- [10] 吴俊, 谭跃进. 复杂网络抗毁性测度研究[J]. 系统工程学报, 2005, 20(2): 128-131.  
WU Jun, TAN Yue-jin. Study on measure of complex network invulnerability[J]. Journal of Systems Engineering, 2005, 20(2): 128-131.
- [11] 施继红, 宗容, 刘宇明, 等. 电力通信网的抗毁性和拓扑优化研究[J]. 电力系统通信, 2009, 30(9): 11-13.  
SHI Ji-hong, ZONG Rong, LIU Yu-ming, et al. Study on the invulnerability and topology optimization of power communication network[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2009, 30(9): 11-13.
- [12] 杨丽徙, 林茂盛, 张宏伟, 等. 中压配电网典型网络结构抗毁性评估[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(1): 28-31.  
YANG Li-xi, LIN Mao-sheng, ZHANG Hong-wei, et al. Invulnerability evaluation of typical network structures for medium voltage distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(1): 28-31.
- [13] 饶育萍, 林竞羽, 侯德亭. 基于最短路径数的网络抗毁评价方法[J]. 通信学报, 2009, 30(4): 113-117.  
RAO Yu-ping, LIN Jing-yu, HOU De-ting. Evaluation method for network invulnerability based on shortest route number[J]. Journal on Communications, 2009, 30(4): 113-117.
- [14] 谢丰, 程苏琦, 陈冬青, 等. 基于级联失效的复杂网络抗毁性[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2011, 51(10): 1252-1257.  
XIE Feng, CHENG Su-qi, CHEN Dong-qing, et al. Cascade-based attack vulnerability in complex networks[J]. J Tsinghua Univ: Sci & Tech, 2011, 51(10): 1252-1257.
- [15] 张国华, 张建华, 杨京燕, 等. 基于有向权重图和复杂网络理论的大型电力系统脆弱性评估[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(4): 21-26.  
ZHANG Guo-hua, ZHANG Jian-hua, YANG Jing-yan, et al. Vulnerability assessment of bulk power grid based on weighted directional graph and complex network theory[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(4): 21-26.
- [16] 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 Xiu-li, WANG Xi-fan. Electric betweenness and its application in vulnerable line identification in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(1): 33-39.
- [17] 杨丽徙, 曾新梅, 方强华, 等. 基于抗毁性分析的中压配电网拓扑结构研究[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(8): 65-69.  
YANG Li-xi, ZENG Xin-mei, FANG Qiang-hua, et al. Research on medium voltage distribution network topology based on survivability analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(8): 65-69.

收稿日期: 2013-06-26; 修回日期: 2013-11-26

作者简介:

李艳卿(1989-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析、稳定及优化问题研究; E-mail:282599885@qq.com

李华强(1965-), 男, 博士, 教授, 从事电力系统分析、稳定及优化问题研究。