

DOI: 10.7667/PSPC170992

# 基于网络结构重要度和安全隐患脆弱度的 配电网脆弱线路辨识

孙顺祥<sup>1</sup>, 李晓明<sup>1</sup>, 张繁碧<sup>2</sup>, 史文超<sup>1</sup>, 郝超超<sup>1</sup>

(1. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 广东电网公司惠州惠阳供电局, 广东 惠州 516211)

**摘要:** 为了辨识配电网中的脆弱线路, 提出一种基于网络结构重要度和安全隐患脆弱度的线路综合脆弱性评估模型。该模型一方面以复杂网络理论基本参数结合配电网的特点定义了线路的网络结构重要度指标, 另一方面以负荷冲击和故障断线两种情况对系统安全运行造成的影响定义了线路的安全隐患脆弱度指标。通过层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 计算各指标的权重系数, 从而综合反映线路的脆弱性。以 IEEE33 节点配电系统进行计算分析, 验证了该线路综合脆弱度评估模型具有合理性和有效性。

**关键词:** 有功度数; 改进介数; 负荷冲击脆弱度; 故障断线脆弱度; 层次分析法

## Identification of vulnerable lines in the distribution network based on network structure importance and potential hazard vulnerability

SUN Shunxiang<sup>1</sup>, LI Xiaoming<sup>1</sup>, ZHANG Fanbi<sup>2</sup>, SHI Wenchao<sup>1</sup>, HAO Chaochao<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Huiyang Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Co., Huizhou 516211, China)

**Abstract:** In order to identify vulnerable lines in distribution network, this paper proposes a new model of comprehensive vulnerability assessment based on network structure importance and potential hazard vulnerability. On one hand, this model defines network structure importance of the distribution line by combining basic parameters of the complex network theory and the characteristics of the distribution network. On the other hand, the potential hazard vulnerability indexes of the distribution line are defined according to the severity of the impact on safety operation caused by load shock and fault disconnection. The weight coefficient of each index is calculated by analytic hierarchy process, which reflects the line vulnerability comprehensively. The rationality and effectiveness of this comprehensive vulnerability assessment model are verified by simulation results of IEEE 33-bus distribution system.

This work is supported by Science and Technology Project of Guangdong Power Grid Corporation (No. GDKJXM20161884).

**Key words:** active degree; improved betweenness; load shock vulnerability; fault disconnection vulnerability; analytic hierarchy process

## 0 引言

近年来, 国内外频发的大停电事故引起了人们的广泛关注, 以 2003 年美加大停电和 2006 年西欧大停电为例的诸多停电事故的发生严重影响到人们的正常生活, 造成了巨大的经济损失<sup>[1-4]</sup>。事故分析表明, 大规模停电往往是由个别元件的相继故障开始, 在事故的传播扩大阶段与电力系统中的脆弱环

节有着密切的联系<sup>[5-8]</sup>。因此, 准确地辨识电力系统中的脆弱环节并采取相应的控制策略对提高电力系统的安全性、降低故障发生概率具有重要的意义。

文献[9-11]将复杂网络理论引入电力系统的脆弱线路辨识中, 结合电力系统的实际特点对复杂网络理论的拓扑参数进行改进, 从而分析识别出电网中的脆弱线路。文献[12-13]基于风险理论将电力系统定义为一个脆弱系统, 通过元件故障概率与故障严重性的综合分析识别出电网中的脆弱线路。文献[14-16]将“熵”的概念引入电力系统中, 通过定

义系统潮流熵指标分析故障后系统的混乱程度,从而辨识脆弱线路。文献[17]基于戴维南等值理论建立基于短路容量的状态脆弱性评估模型,从而辨识出系统的脆弱点。文献[18-19]对PageRank算法进行改进并将其应用于电网脆弱线路的识别。

然而,在引入复杂网络理论等研究方法时,大多数脆弱指标的定义仍考虑的较为单一,很少将电力系统的结构特点和运行特点有效地结合。另一方面,目前对于电力系统脆弱性指标的研究基本都集中于输电网方面,对配电线路脆弱环节的辨识分析还缺乏具体可靠的衡量指标。

针对以上问题,本文从电力系统的网络结构重要度和安全隐患脆弱度两个方面出发,针对配电网进行脆弱线路的辨识研究。首先通过对传统复杂网络理论中的度数和介数等参数加以改进,结合配电网的实际特点定义包含有功度数和改进介数的网络结构重要度指标。然后以负荷冲击和故障断线两种情况对系统产生的影响定义安全隐患脆弱度指标。文中考虑了配电网多为辐射状的结构,以分级搜索定义了不同线路的等级,并将之应用于安全隐患脆弱度指标中。采用层次分析法计算出不同指标的权重,综合得出配电线路的脆弱指标,并以IEEE33节点配电系统为例进行分析,验证了文中所定义脆弱度指标的正确性和合理性。

## 1 配电线路的网络结构重要度

配电线路网络结构重要度包含线路有功度数和改进介数两方面指标,着重分析线路在网络拓扑结构中的重要性,由此能够反映出线路故障对配电网整体拓扑结构产生的影响,进而衡量线路的脆弱性。

### 1.1 线路有功度数

在复杂网络理论中,传统的节点度数 $k_i$ 表示与节点 $i$ 直接相连的其他节点的数量,反映了该节点与网络中其他节点联系的紧密程度<sup>[20]</sup>。然而针对配电网而言,由于其多为辐射状结构,单纯的节点度数并不能恰当地反映其重要度。从图1所示的IEEE14节点配电网可以看出,若以传统的节点度数来分析,节点3和节点8的度数均为3,而实际的潮流流向则清晰地表明节点3在该配电网中的重要度大于节点8。

针对这个问题,本文提出“有功度数 $D_i$ ”以表征配电网中的节点度数。

$$D_i = P_i \times k_i \quad (1)$$

式中: $P_i$ 表示节点 $i$ 的有功注入功率; $k_i$ 表示节点 $i$ 的传统节点度数。

有功度数结合了节点在配电网中的结构特性和

实际运行特性,相较于传统度数更契合配电网的特点。以有功度数指标比较图1中的节点3和节点8,可以简单地验证该指标的合理性。

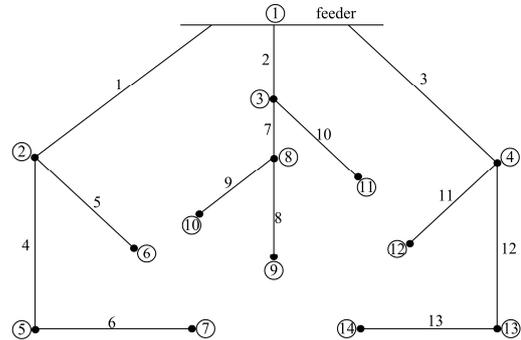


图1 IEEE14节点配电系统

Fig. 1 IEEE14-bus distribution system

由于复杂网络理论中并没有边的度数的概念,因此本文通过节点有功度数引申定义出线路有功度数 $LD_l$ 为

$$LD_l = \sqrt{D_i D_j} \quad (2)$$

式中, $i$ 和 $j$ 分别表示线路 $l$ 两端的节点。

式(2)以线路两端点的有功度数综合得出线路度数指标。若对比存在公共节点的两条线路,则线路有功度数的差异可以通过异端节点有功度数的不同而体现出来。

### 1.2 线路改进介数

在复杂网络理论中,传统的边的介数指系统中某条边被网络中的任意两节点之间最短路径经过的次数<sup>[21]</sup>。考虑到辐射状配电网中并不是任意两节点之间都存在潮流信息的流动,故传统的最短路径不适用于配电网。因此,本文定义出改进的线路介数 $LB_l$ 为

$$LB_l = P_l \sum_{a \in G, b \in L} \sqrt{S_a S_b} \cdot |I_{ab\text{-unit}}(l)| \quad (3)$$

式中: $P_l$ 表示线路 $l$ 传输的有功功率; $a$ 和 $b$ 分别表示系统中的配电母线节点和负荷节点集, $S_a$ 和 $S_b$ 为对应的视在功率; $I_{ab\text{-unit}}(l)$ 表示单独在 $(a, b)$ 节点对间加单位电流源时线路 $l$ 流过的电流值。

式(3)以 $I_{ab\text{-unit}}(l)$ 代替了复杂网络理论中的最短路径所反映的线路重要度信息,同时考虑了配电网正常运行时的线路传输潮流,将只计及结构特点的介数特征量改进为更完善的线路介数指标。

## 2 配电线路的安全隐患脆弱度

大停电事故通常表现为连锁故障,往往是由于系统中过负荷、元件切除、故障跳闸等产生的潮流转移,进一步造成一系列线路和电源的连锁跳闸而

形成的<sup>[14]</sup>。故本文中配电线路的安全隐患脆弱度包含负荷冲击脆弱度和故障断线脆弱度两方面指标, 通过负荷冲击和故障断线两种情况对配电系统产生影响的大小反映线路对于整个系统的安全隐患, 进而衡量线路的脆弱性。

## 2.1 负荷冲击脆弱度

### 2.1.1 基于负荷冲击的潮流增量严重度

假设某配电系统包含  $m$  个节点和  $n$  条线路, 系统正常运行时表示为状态 0, 当第  $i$  个节点负荷单位增加即系统受到单位负荷冲击时的运行状态表示为状态  $i$ , 则在状态  $i$  下线路  $l$  的潮流增量为

$$\Delta P_l^i = P_l^i - P_l^0 \quad (4)$$

采用效用理论分析负荷冲击情况下的潮流增量严重度。在配电系统中, 线路的潮流增量越大, 则线路的故障可能性越高, 即产生的严重度越大。以风险偏好型效用函数描述潮流增量严重度为

$$S_l^i = 0.582(e^{\Delta P_l^i} - 1) \quad (5)$$

式(5)的效用函数满足  $\begin{cases} S_l^{i'} > 0 \\ S_l^{i''} > 0 \end{cases}$ , 表明了潮流增

量的增大会引起更快速的严重度增加。

对配电系统中每一个节点施加单位负荷冲击, 即令每一条线路  $l$  包含了  $m$  个状态(除正常运行状态 0), 则每一条线路的潮流增量严重度可以组成  $m$  维列向量  $\mathbf{S}_l$ 。本文令线路  $l$  的潮流增量严重度  $SL_l$  为

$$SL_l = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{m} \|\mathbf{S}_l\|_1 + \|\mathbf{S}_l\|_\infty \right) \quad (6)$$

式中:  $\|\mathbf{S}_l\|_1$  为向量  $\mathbf{S}_l$  的 1-范数, 表征系统所有节点受负荷冲击对线路  $l$  造成的严重度的共同影响;  $\|\mathbf{S}_l\|_\infty$  为向量  $\mathbf{S}_l$  的  $\infty$ -范数, 表征系统中所有节点受负荷冲击对线路  $l$  造成的严重度的最大影响。

### 2.1.2 配电线路的分级搜索

由负荷冲击产生的潮流增量只针对系统中的某一条具体线路, 并未计及该严重度在整个系统中的影响。若具有相同潮流增量严重度的多条线路处于配电系统中的不同位置, 则对系统产生的影响是不同的, 即线路的隐患程度是不同的。因此, 考虑到配电网多为辐射状结构, 本文将处于不同分支的线路赋予不同的等级, 并以其作为权重因子与潮流增量严重度相乘, 作为线路的负荷冲击脆弱度。

线路分级搜索步骤包括: 在初始情况下, 令配电系统所有线路为一级。从配电母线节点开始沿馈线向下搜索, 若下一节点不是分支节点, 则继续向下搜索, 线路等级不变; 若遇到分支节点, 则令该节点前所有线路等级加 1。继续以此方法沿线搜索,

直至遍历配电系统中所有线路。

以图 1 的 IEEE14 节点系统为例进行分析, 采用这种分级方法后, 线路 2 为三级线路, 线路 1、3、7 为二级线路, 其余线路均为一级线路。

### 2.1.3 线路的负荷冲击脆弱度

综合 2.1.1 和 2.1.2 节的概念, 定义线路的负荷冲击脆弱度  $LL_l$  为

$$LL_l = \lambda_l \cdot SL_l \quad (7)$$

式中:  $\lambda_l$  表示配电线路  $l$  的等级;  $SL_l$  表示线路  $l$  在负荷冲击下的潮流增量严重度。

## 2.2 故障断线脆弱度

对于包含  $n$  条线路的配电系统, 当线路  $l$  断开时, 第  $i$  条线路的潮流损失值为

$$\Delta P_l(i) = P_0(i) - P_l(i) \quad (8)$$

式中:  $P_0(i)$  表示系统正常运行情况下线路  $i$  传输的有功功率;  $P_l(i)$  表示线路  $l$  断开情况下线路  $i$  传输的有功功率。

计及配电线路的故障断线对系统中所有线路的影响, 定义故障断线脆弱度  $LM_l$  为

$$LM_l = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\Delta P_l(i)}{P_0(i)} \quad (9)$$

式(9)综合线路  $l$  断开所引起的系统中所有线路的有功损失率来衡量故障断线对整个配电系统的影响, 以此作为线路  $l$  的故障断线脆弱度的评判指标。

## 3 配电线路综合脆弱度

本文提出以有功度数与改进介数指标反映的网络结构重要度和以负荷冲击与故障断线指标反映的安全隐患脆弱度。为综合四种指标, 采用层次分析法计算相应的权重, 从而衡量各指标的相对重要性。

### 3.1 脆弱度指标权重的确定

在层次分析法中, 各准则在目标衡量中所占的比重并不一定相同, 在决策者的心目中, 不同准则各自占有一定的比例, 故引用数字 1~9 及其倒数作为标度来定义成对比较判断矩阵  $\mathbf{A}$ , 用以反映各准则之间的相对重要程度。本文考虑线路有功度数  $LD_l$ 、改进介数  $LB_l$ 、负荷冲击脆弱度  $LL_l$  和故障断线脆弱度  $LM_l$  相互之间的重要性, 构造成对比较矩阵  $\mathbf{A}$  为

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ 2 & 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 3 & 2 & 1 & 1 \\ 3 & 2 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

该成对比较矩阵  $A$  中, 数字 1 表示两个因素相比具有同样的重要性; 数字 2 表示两个因素相比, 前者比后者稍显重要; 数字 3 表示两个因素相比, 前者比后者重要。若元素  $i$  相对于元素  $j$  的重要性为  $a_{ij}$ , 则相应的元素  $j$  对于元素  $i$  的重要性  $a_{ji}$  为  $a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}}$ 。

在层次分析法中, 对于成对比较矩阵计算最大特征根及对应特征向量, 利用一致性指标、随机一致性指标和一致性比率做一致性检验。若检验通过, 特征向量(归一化后)即为权向量; 若不通过, 需重新构成对比较矩阵。计算式(10)的成对比较矩阵  $A$  的不一致程度  $CI=0.0035$ , 随机一致性比率  $CR=0.0038 < 0.1$ , 故成对比较矩阵  $A$  具有满意的一致性。计算矩阵  $A$  的最大特征值对应的特征向量并进行归一化, 即形成权向量  $U$  为

$$U = (0.1091, 0.1891, 0.3509, 0.3509)^T \quad (11)$$

式(11)权向量  $U$  中每一元素对应相应的脆弱度指标的权重系数, 亦即各指标的相对重要性。

### 3.2 配电线路综合脆弱度的确定

综合线路有功度数  $LD_i$ 、改进介数  $LB_i$ 、负荷冲击脆弱度  $LL_i$  和故障断线脆弱度  $LM_i$  4 个指标, 得出配电线路综合脆弱度为

$$LV_i = \omega_{LD} \frac{LD_i}{LD_{i\max}} + \omega_{LB} \frac{LB_i}{LB_{i\max}} + \omega_{LL} \frac{LL_i}{LL_{i\max}} + \omega_{LM} \frac{LM_i}{LM_{i\max}} \quad (12)$$

式中:  $\omega_{LD}$ 、 $\omega_{LB}$ 、 $\omega_{LL}$ 、 $\omega_{LM}$  分别表示线路有功度数、改进介数、负荷冲击脆弱度和故障断线脆弱度 4 个指标的权重, 即为权向量  $U$  中的对应元素;  $LD_{i\max}$ 、 $LB_{i\max}$ 、 $LL_{i\max}$ 、 $LM_{i\max}$  分别为  $LD_i$ 、 $LB_i$ 、 $LL_i$ 、 $LM_i$  的最大值, 用以将单项指标分别归一化方能进行各指标的综合。

根据式(12)所示的配电线路综合脆弱度指标, 计算并对整个配电网中每一条线路的综合脆弱度值。线路的综合脆弱度越大, 则表明其在配电网中的重要度越高, 在受干扰或故障情况下造成的影响越严重, 更易引起连锁故障, 即线路越脆弱。

## 4 算例分析

本文采用 IEEE33 节点配电系统进行分析, 系统拓扑图如图 2 所示, 其中加圈数字表示配电系统节点编号, 不加圈数字表示配电线路编号。

采用 2.1.2 节分级搜索方法对图 2 所示的配电网所有线路进行分级, 则线路 1 为四级线路, 线路 2

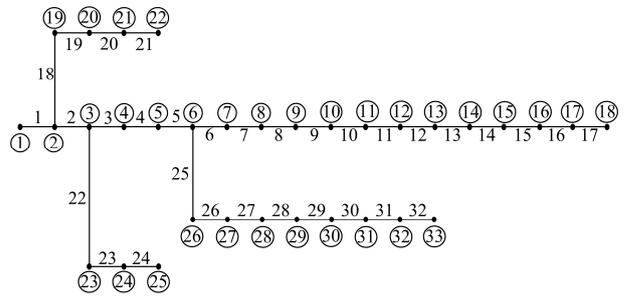


图 2 IEEE33 节点配电系统

Fig. 2 IEEE33-bus distribution system

为三级线路, 线路 3、4、5 为二级线路, 其余线路均为一级线路。

根据归一化后的线路有功度数  $LD_i$ 、改进介数  $LB_i$ 、负荷冲击脆弱度  $LL_i$  和故障断线脆弱度  $LM_i$  4 个指标, 利用 Matlab 平台对 IEEE33 节点配电系统进行计算, 结果如图 3 所示, 具体数据如表 1 所示。

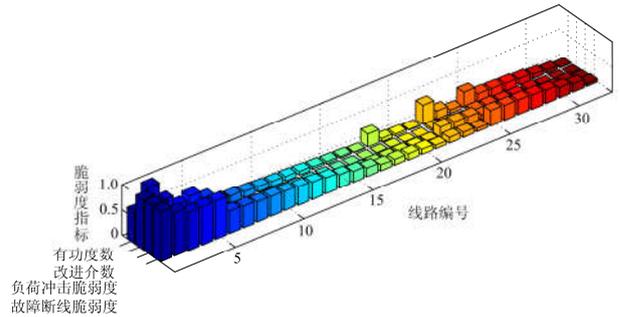


图 3 IEEE33 节点配电系统各类型脆弱度指标对比

Fig. 3 Comparison of various types of vulnerability indexes based on IEEE33-bus distribution system

由图 3 和表 1 可以看出, 除有功度数指标外, 就其余三项指标而言, 配电线路等级越高, 则指标值越大。而对于有功度数指标, 由于其着重分析线路在配电网中所处的位置重要度, 从图 2 可以看出, IEEE33 节点配电系统的线路 2 所连接的线路较线路 1 而言更多, 因此存在线路 2 的有功度数大于线路 1 的情况。由此可以判断 2.1.2 节所提出的配电线路的分级搜索方法具有一定的正确性和合理性, 能大致区分配电线路的重要度。

以单项指标进行纵向对比分析, 如表 2 所示对线路指标值进行排序, 其中列出每项指标排序前 10 位的线路。

由表 2 可以看出, 除排序前 5 位的线路为等级较高的配电线路外, 对于其余的一级线路而言, 按不同的指标得到的结果均有差异。其中, 按有功度数和改进介数这两种网络结构重要度指标的排序着重于线路位置的重要性, 其指标值较大的线路多为

从等级较高的线路所分支出的首条线路或前几条线路。而按负荷冲击和故障断线这两种安全隐患脆弱度指标的排序则着重于系统受干扰或故障而造成影响的严重度, 其指标值较大的线路多集中于从等级较高的线路所分支出的某一条或两条支路上。这些不同类型指标计算结果的差异表明了考虑多方面指标的必要性和合理性。

表 1 IEEE33 节点配电系统各类型脆弱度指标数据

Table 1 Data of various types of vulnerability indexes based on IEEE33-bus distribution system

线路编号	线路脆弱度指标归一值			
	有功度数	改进介数	负荷冲击脆弱度	故障断线脆弱度
1	0.622 2	1.000 0	1.000 0	1.000 0
2	1.000 0	0.761 8	0.694 4	0.871 4
3	0.632 2	0.373 0	0.315 2	0.760 3
4	0.416 1	0.331 4	0.295 4	0.756 7
5	0.480 2	0.217 5	0.258 9	0.754 1
6	0.335 9	0.035 3	0.088 8	0.443 3
7	0.177 7	0.065 6	0.084 7	0.425 4
8	0.140 4	0.021 9	0.053 7	0.400 5
9	0.117 2	0.018 4	0.051 7	0.390 3
10	0.105 9	0.026 5	0.050 9	0.377 1
11	0.096 4	0.022 3	0.050 1	0.364 6
12	0.086 4	0.009 2	0.048 1	0.344 2
13	0.075 2	0.005 4	0.047 1	0.319 7
14	0.058 2	0.003 0	0.035 0	0.260 5
15	0.042 6	0.002 1	0.034 2	0.223 9
16	0.031 7	0.000 8	0.033 3	0.178 2
17	0.014 7	0.000 3	0.032 6	0.119 7
18	0.263 4	0.005 6	0.036 0	0.127 8
19	0.055 8	0.003 2	0.034 7	0.119 3
20	0.039 4	0.001 3	0.033 7	0.100 4
21	0.016 1	0.000 3	0.032 6	0.065 9
22	0.395 0	0.045 1	0.195 9	0.110 2
23	0.158 8	0.033 3	0.189 4	0.105 6
24	0.075 1	0.008 4	0.180 9	0.068 6
25	0.314 0	0.073 5	0.113 2	0.310 4
26	0.166 4	0.065 4	0.109 2	0.304 8
27	0.153 5	0.040 0	0.096 8	0.297 2
28	0.140 1	0.035 0	0.090 3	0.287 2
29	0.122 0	0.036 8	0.087 4	0.262 2
30	0.091 4	0.007 3	0.083 6	0.207 4
31	0.060 2	0.002 9	0.081 6	0.156 2
32	0.016 1	0.000 1	0.021 4	0.059 3

根据式(12)所示的线路综合脆弱度指标进行分析, 其计算结果如图 4 所示, 具体数据如表 3 所示。表 3 按线路综合脆弱度值由高到低进行排序。

由图 4 和表 3 可以看出, 按权重将各项指标综合后的脆弱度指标分析, IEEE33 节点配电系统中脆弱度前 16 位的线路分别为线路 1、2、3、4、5、6、

表 2 IEEE33 节点配电系统按各类型脆弱度指标大小的线路排序

Table 2 Vulnerable lines sort by the magnitude of different vulnerability indexes based on IEEE33-bus distribution system

指标排序序号	线路脆弱度指标归一值排序			
	按有功度数线路排序	按改进介数线路排序	按负荷冲击脆弱度线路排序	按故障断线脆弱度线路排序
1	2	1	1	1
2	3	2	2	2
3	1	3	3	3
4	5	4	4	4
5	4	5	5	5
6	22	25	22	6
7	6	7	23	7
8	25	26	24	8
9	18	22	25	9
10	7	27	26	10

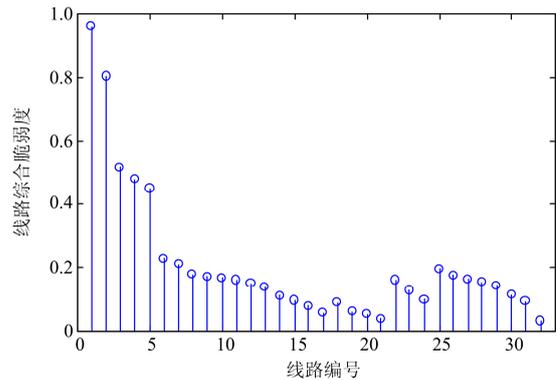


图 4 IEEE33 节点配电系统线路综合脆弱度对比

Fig. 4 Comparison of comprehensive line vulnerability index based on IEEE33-bus distribution system

表 3 IEEE33 节点配电系统线路综合脆弱度数据

Table 3 Data of comprehensive line vulnerability index based on IEEE33-bus distribution system

线路编号	线路综合脆弱度	线路编号	线路综合脆弱度
1	0.958 8	12	0.148 9
2	0.802 6	29	0.142 9
3	0.516 9	13	0.137 9
4	0.477 3	23	0.127 1
5	0.449 0	30	0.113 5
6	0.230 0	14	0.110 6
7	0.210 8	24	0.097 3
25	0.196 8	15	0.095 6
8	0.178 8	31	0.090 6
26	0.175 8	18	0.087 3
9	0.171 4	16	0.077 8
10	0.166 7	19	0.060 8
27	0.162 6	17	0.055 1
11	0.160 2	20	0.051 6
22	0.159 0	21	0.036 4
28	0.154 4	32	0.030 1

7、25、8、26、9、10、27、11、22、28。结合图2的系统拓扑图可以看出,脆弱度排名越高的线路处于越重要的配电位置上,对整个配电网的运行起到越关键的作用。这些配电线路若断开,则会使系统可供电范围减小的更多,造成的事故严重度更高。因此,对综合脆弱度指标越高的线路而言,无论从其所处的配电位置还是从受干扰或故障的影响来看,都有较高的脆弱度。故本文所提出的配电线路综合脆弱度评估模型具有合理性和有效性。

## 5 结论

本文基于配电系统中线路的网络结构重要度和安全隐患脆弱度,提出一种辨识配电网脆弱线路的模型。网络结构重要度以复杂网络理论基本参数为基础,结合配电网特点定义线路有功度数和改进介数指标;安全隐患脆弱度则以负荷冲击和故障断线两种情况定义脆弱度指标,衡量系统受干扰或故障时造成影响的严重度。采用IEEE33节点配电系统进行分析,表明了文中定义的综合脆弱度指标具有合理性和有效性。但本文定义的脆弱线路辨识指标着重于针对辐射状配电网,对于具有弱环结构的配电网而言,本文定义的线路分级方法并不适用,因而针对具有环状结构配电网的脆弱线路辨识方法的研究还有待改进。

## 参考文献

- [1] 龚辉, 吕林, 刘友波, 等. 输电网脆弱线路识别的静态综合指标法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(11): 25-31.  
GONG Hui, LÜ Lin, LIU Youbo, et al. Static comprehensive index method of vulnerable lines identification of power transmission grids[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(11): 25-31.
- [2] BAI Feifei, LIU Yong, LIU Yilu, et al. A measurement-based approach for power system instability early warning[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 17-25. DOI: 10.1186/s41601-016-0014-0.
- [3] 孙伟卿, 王承民, 张焰, 等. 电力系统运行均匀性分析与评估[J]. 电工技术学报, 2014, 29(4): 173-180.  
SUN Weiqing, WANG Chengmin, ZHANG Yan, et al. Analysis and evaluation on power system operation homogeneity[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(4): 173-180.
- [4] 蔡新雷, 范文礼, 张文一, 等. 考虑连锁故障的广东电网抗毁性分析[J]. 广东电力, 2016, 29(4): 73-78.  
CAI Xinlei, FAN Wenli, ZHANG Wenyi, et al. Analysis on invulnerability of Guangdong power grid considering cascading failure[J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29(4): 73-78.
- [5] 何俊, 庞松龄, 禹冰, 等. 基于容量介数指标的电网脆弱线路识别[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(8): 30-35.  
HE Jun, PANG Songling, 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.
- [6] 岳贤龙, 王涛, 顾雪平, 等. 基于自组织临界理论的电网脆弱线路辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(15): 18-26.  
YUE Xianlong, WANG Tao, GU Xueping, et al. Vulnerable line identification of power grid based on self-organizing critical theory[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(15): 18-26.
- [7] 林鸿基, 林振智, 林冠强, 等. 基于信息熵权和层次分析法的电网关键节点识别[J]. 广东电力, 2016, 29(12): 50-56.  
LIN Hongji, LIN Zhenzhi, LIN Guanqiang, et al. Identification for critical nodes of power grid based on information entropy weight and analytic hierarchy process[J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29(12): 50-56.
- [8] 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 Xianggen, CHEN Qingqian, 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.
- [9] 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.
- [10] 刘小丽, 毛戈, 梁杉, 等. 基于综合介数的电网脆弱线路辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(2): 116-121.  
LIU Xiaoli, MAO Yi, LIANG Shan, et al. Identification of vulnerable lines in power grid based on comprehensive betweenness index[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 116-121.
- [11] 梁颖, 方瑞明, 卢小芬, 等. 基于复杂网络理论的电力系统脆弱线路辨识研究现状[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(20): 151-155.

- LIANG Ying, FANG Ruiming, LU Xiaofen, et al. Research status of power system vulnerable line identification based on complex-network theory[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(20): 151-155.
- [12] 陈为化, 江全元, 曹一家, 等. 基于风险理论的复杂电力系统脆弱性评估[J]. 电网技术, 2005, 29(4): 12-17.  
CHEN Weihua, JIANG Quanyuan, CAO Yijia, et al. Risk-based vulnerability assessment in complex power systems[J]. Power System Technology, 2005, 29(4): 12-17.
- [13] 张毅明, 张忠会, 姚峰, 等. 基于风险理论的电力系统元件风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(23): 73-78.  
ZHANG Yiming, ZHANG Zhonghui, YAO Feng, et al. Risk assessment of power system components based on the risk theory[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(23): 73-78.
- [14] 李勇, 刘俊勇, 刘晓宇, 等. 基于潮流熵测度的连锁故障脆弱线路评估及其在四川主干电网中的应用[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(10): 40-46.  
LI Yong, LIU Junyong, LIU Xiaoyu, et al. Vulnerability assessment based on power flow entropy for lines in cascading failures and its application in Sichuan backbone power grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(10): 40-46.
- [15] 刘文颖, 王佳明, 谢昶, 等. 基于脆性风险熵的复杂电网连锁故障脆性源辨识模型[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(31): 142-149.  
LIU Wenyong, WANG Jiaming, XIE Chang, et al. Brittleness source identification model for cascading failure of complex power grid based on brittle risk entropy[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(31): 142-149.
- [16] 王佳明. 基于复杂系统脆性理论的电网连锁故障预警模型研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.  
WANG Jiaming. Research on early warning model of cascading failure for power grid based on brittleness theory of complex system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013.
- [17] 丁少倩, 林涛, 翟学, 等. 基于短路容量的含大规模新能源接入的电网状态脆弱性评估方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(13): 40-47.  
DING Shaoqian, LIN Tao, ZHAI Xue, et al. Research on state vulnerability assessment method of grid with large scale new energy sources based on short-circuit capability[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(13): 40-47.
- [18] 马志远, 刘锋, 沈沉, 等. 基于 PageRank 改进算法的电网脆弱线路快速辨识(一): 理论基础[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(23): 6363-6370.  
MA Zhiyuan, LIU Feng, SHEN Chen, et al. Rapid identification of vulnerable lines in power grid using modified PageRank algorithm — part I: theoretical foundation[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(23): 6363-6370.
- [19] 马志远, 刘锋, 沈沉, 等. 基于 PageRank 改进算法的电网脆弱线路快速辨识(二): 影响因素分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 36-45.  
MA Zhiyuan, LIU Feng, SHEN Chen, et al. Rapid identification of vulnerable lines in power grid using modified PageRank algorithm—part II: factors affecting identification results[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 36-45.
- [20] 汪小帆, 李翔, 陈关荣, 等. 复杂网络理论及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [21] 刘金龙. 基于复杂网络的电力系统脆弱性分析[D]. 大庆: 东北石油大学, 2015.  
LIU Jinlong. Power grids vulnerability analysis based on complex networks[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2015.

收稿日期: 2017-07-04; 修回日期: 2017-09-25

作者简介:

孙顺祥(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制; E-mail: 463966814@qq.com

李晓明(1955—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统运行与控制、电能质量、智能电网等; E-mail: xmli@whu.edu.cn

张繁碧(1975—), 女, 工程师, 主要研究方向为配电运行。E-mail: 1377177061@qq.com

(编辑 周金梅)