

# 计及网络结构的配电网健康状态评估方法研究

孙黎霞<sup>1</sup>, 王中一<sup>1,2</sup>, 戴洪<sup>1</sup>, 田屹昀<sup>1</sup>, 陈欣凌<sup>1</sup>

(1. 河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 211100; 2. 国网河南省电力公司新乡供电公司, 河南 新乡 453000)

**摘要:** 现阶段随着配电网中分布式电源、储能、电动汽车的逐渐增加, 配电网的运行工况变得越来越复杂多变。为了准确地判断配电网实时运行状况及健康状态, 及时地发现配电网运行中的缺陷问题并制定合理的安全管控措施, 提出一种计及网络结构的配电网健康状态评估方法。首先, 基于配电设备运行的电气量和非电气量参数进行配电设备健康指数计算, 利用成功流法对同一网络中的配电设备健康指数进行等价简化, 评估配电设备层的健康状态。然后, 从可靠性、安全性、经济性和环保性四个维度实时监测配电网的运行数据建立指标体系, 采用模糊层次分析法和证据理论相结合的方法对运行指标进行分析计算, 得到网络结构层的健康指数和健康状态。结合配电设备层健康状态和网络结构层健康状态进行综合评估, 从而得到配电网的健康指数, 判断配电网所处的健康状态。最后, 以某 10 kV 配电网为例进行算例分析, 证明所提出的评估方法的有效性和实用性。

**关键词:** 配电网; 配电设备层; 网络结构层; 健康状态评估; 模糊层次分析法; 证据理论

## The health state assessment method of a smart distribution network considering network structure

SUN Lixia<sup>1</sup>, WANG Zhongyi<sup>1,2</sup>, DAI Hong<sup>1</sup>, TIAN Yiyun<sup>1</sup>, CHEN Xinling<sup>1</sup>

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

2. Xinxiang Power Supply Company, State Grid Henan Electric Power Company, Xinxiang 453000, China)

**Abstract:** With the rapid growth in the distribution network of distributed power sources, energy storage and electric vehicles, the operating conditions of the distribution network become more and more complex and variable. This paper proposes a novel approach for the health status assessment of the distribution network including the network structure. The purpose is to accurately determine the real-time operating conditions and health status of the distribution network in order to identify defects in network operation and formulate reasonable safety control measures. First, based on the electrical and non-electrical variable states of the distribution equipment during operation, a health index of the equipment is calculated. The health index of the distribution equipment layer is obtained using the goal-oriented method, which can evaluate the health status of the distribution equipment layer. Then, the four dimension indices of reliability, safety, economy and environmental protection on the real-time operational status of the distribution network are chosen to establish a network structure indicator system. The indicators are modified by introducing a fuzzy analytic hierarchy process and D-S evidence theory to obtain a health index of the network structure layer. This can be used to evaluate the network structure health status. The method comprehensively considers the health index of the distribution equipment and the network structure layers together to evaluate the health status of the distribution network. The data are collected based on a 10 kV distribution network. Simulation analysis is carried out to verify the effectiveness and practicality of the proposed method.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51707056).

**Key words:** distribution network; distribution equipment layer; network structure layer; health state assessment; fuzzy hierarchical analysis method; D-S evidence theory

## 0 引言

电力系统是一个复杂的网络, 电力系统的风险

评估和管控在配电系统中得到了广泛的应用<sup>[1-4]</sup>。配电网直接面向用户侧, 随着分布式电源的接入、负荷容量和电动汽车的增加, 配电网的运行情况变得越来越复杂, 且配电网运行状态多变。电力系统绝大多数的故障停电发生在配网侧<sup>[5-7]</sup>, 这使得配电

网运行风险大大增加。因此,全面系统地掌握配电设备和配电网的健康状态,对其健康指数进行计算并制定合理的安全管控措施,不仅是配电网日常运维管理、提升效率的需要,还是现代配电网建设的重点。

配电网是一个实时动态变化的系统,目前对配电网的健康状态多采用实时性能指标的健康指数对单一设备进行健康评估。文献[8]预测了断路器各种接触退化程度与动态电阻波形特性之间的相关性,从动态电阻测量曲线中提取诊断参数,使用评分和加权技术识别断路器的健康状况。文献[9]综合考虑设备特征参数的重要程度,结合序关系法和熵权法改进了特征参数权重值的计算方式,使得设备健康状态综合评估体系的建立更加合理。文献[10]建立变压器运行状态评估结果与其剩余寿命的映射关系,提出考虑绝缘剩余寿命的油浸式变压器健康状态评估方法。

目前配电网健康状态评估研究大部分仅考虑了配电设备或网络的运行指标,计算模型和评价指标比较简单。文献[11]考虑了配电网负荷的差异和不同设备故障所产生的影响等因素,综合建立了配电网运行的健康状态和网络重要度两个指标,提出了基于健康度和重要度的配电网运行风险评估方法。文献[12]利用成功流法通过网络等值法简化系统拓扑结构,将网络中的配电设备健康指数按其连接方式由点及面扩展至网络层面,但是忽略了网架结构和配电网整体运行指标。文献[13]提出了一种模糊集理论、模糊层次分析法和改进加权平均法相结合的评价模型,以此评价单一设备或网架的健康状态,但未将二者结合起来。

本文提出一种计及网络结构的配电网健康状态评估研究方法。本方法考虑了配电设备层的健康状态和配电结构层的健康状态。首先,对配电设备的电气量和非电气量进行状态监测,利用成功流法计算配电设备层健康指数。然后,从可靠、安全、经济和环保四个维度采集网络结构指标数据,采用模糊层次分析法和证据理论相结合的方法计算网络结构层的健康指数。把配电设备层和网络结构层二者健康指数结合,将健康指数从单一的设备层面扩展

至整个配电网,实时评估配电网健康状态和运行风险。最后,以 10 kV 配电网为例,证明该评估方法的合理性和有效性。

## 1 配电网健康状态评估体系

配电网的健康监测类似于人体健康监测,对配电网实施长期的状态监测和管理,收集环境、设备和网络运行数据以及实时状态变化数据用以评估配电网健康状态。健康指数是用以表明配电网健康状态的一个指数<sup>[14]</sup>,可用于表征网络的健康状态、性能和各功能执行能力。

为了准确地判断配电网实时健康状态,及时地发现配电网运行中的缺陷问题,本研究提出的计及网络结构的配电网健康状态评估研究方法将配电网健康状态评估分为两部分:配电设备层的健康状态评估和网络结构层的健康状态评估。配电设备层的评估基于设备电气量参数和非电气量参数,网络结构层的健康评估基于网络运行可靠性、安全性、经济性和环保性指标。评估方法与流程如图 1 所示。



图 1 配电网健康状态评估流程

Fig. 1 Health status assessment process of the distribution network

配电网健康指数可以将配电网的健康状态进行量化,不同的健康指数对应不同的配电网健康状态。结合配电网的复杂特性,本文将配电网健康指数的取值范围定义为(0, 4),健康指数越小,配电网健康状态越好,健康指数分值越大,配电网健康状态越差。将配电网健康状态划分为 4 个等级,不同数值分别对应着无缺陷、一般缺陷、重要缺陷和紧急缺陷 4 个等级<sup>[14-15]</sup>。不同的健康状态表明配电网的性能、指标裕度、执行功能的能力、抗扰动能力和适应环境的能力不同。表 1 为配电网健康等级。

表 1 配电网健康等级

Table 1 Health level of distribution network

分值	健康等级	代表颜色	定义
[0, 1)	无缺陷	绿	配电网结构合理,有很强的抗扰动能力,能够按规定执行功能,运行裕度大,能够可靠供电。
[1, 2)	一般缺陷	蓝	配电网结构较为不合理,抗扰动能力较差,能够按规定执行功能,但部分功能退化,稳定裕度正常。
[2, 3)	重要缺陷	黄	配电网结构不合理,存在安全隐患,能够按规定执行功能,但部分功能严重退化,稳定裕度不足。
[3, 4)	紧急缺陷	红	配电网结构完全不合理,系统运行不稳定,已无法按规定正常执行功能,出现崩溃征兆。



## 2 配电设备层健康状态评估

配电设备层的健康状态评估首先需要对设备主要参数进行处理,计算参数的健康指数和健康状态,

通过设备参数的健康指数计算得到配电设备的综合健康指数。采用成功流算法,得到配电设备层的健康指数,评估配电设备层健康状态。配电设备层健康状态评估流程如图 2 所示。

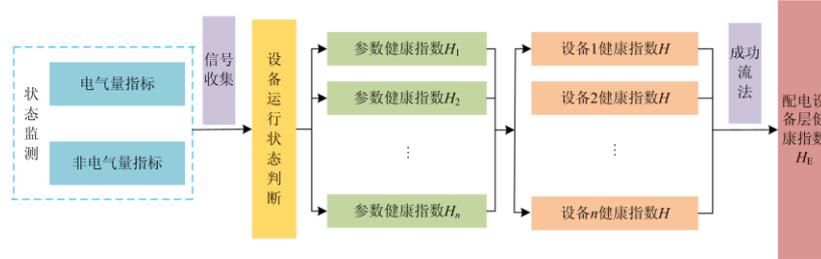


图 2 配电设备层健康状态评估方法

Fig. 2 Health state assessment method of power distribution equipment layer

### 2.1 配电设备主要运行参数

配电设备在运行过程中必然会产生电流、电压等电气量及温度、压力、振动等非电气量变化参数,根据不同的状态监测需求,可以选择能表示设备运行状态的不同参数<sup>[16-17]</sup>。本研究在已有文献和监测

参数<sup>[18-19]</sup>等基础上,综合考虑配电设备的运行状态,以多个运行参数作为配电设备的运行指标,综合考虑配电设备的运行状态。配电设备主要参数及缺陷限值如表 2 所示。

表 2 配电设备主要参数及缺陷限值

Table 2 Main parameters and defect limits of power distribution equipment

配电设备	主要参数	缺陷限值			
		正常状态	一般缺陷	严重缺陷	紧急缺陷
架空线	接点温度/°C	<70	[70,90)	[90,130]	>130
	绕组和铁芯温度/°C	$\delta \leq 35$	$\leq 130$ 且 $\delta \geq 35$	130~155	>155
	箱体温度/°C	$\delta \leq 35$	$\leq 85$ 且 $\delta \geq 35$	85~105	>105
	介质损耗因数 $\tan\delta$	<0.2%	0.2%~0.5%	0.5%~1%	>1%
	油色谱绝对产气速率	0	0~0.25	0.25~1.5	>1.5
配电变压器	H <sub>2</sub> 含量/( $\mu$ L/L)	<30	<70	<100	>100
	CH <sub>4</sub> 含量/( $\mu$ L/L)	<35	<85	<120	>120
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> 含量/( $\mu$ L/L)	<15	<35	<50	>50
	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> 含量/( $\mu$ L/L)	<10	<25	<35	>35
	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> 含量/( $\mu$ L/L)	<20	<45	<65	>65
断路器	分合闸开断电流/A	1.15~1.25	1.0~1.15 或 1.25~1.4	0.8~1.0 或 1.4~1.6	其他
	触头相对温差值 $\delta$ /%	<35	$\geq 35$	55~80°C 或 $\delta \geq 80$ 且 $< 55^\circ\text{C}$	$> 80^\circ\text{C}$ 或 $\delta \geq 95$ 且 $> 55^\circ\text{C}$
	触头行程/mm	21~23	20~21 或 23~24	19~20 或 24~25	其他
	振动信号/(m/s <sup>2</sup> )	<75	75~80	80~90	90~100
	SF <sub>6</sub> 气体压力/MPa	>0.62	0.57~0.62	0.52~0.57	$\leq 0.52$
分闸速度/(m/s)	分闸速度/(m/s)	1.6~1.9	1.5~1.6 或 1.9~2.0	1.4~1.5 或 2.0~2.1	其他
	合闸速度/(m/s)	0.7~0.9	0.6~0.7 或 0.9~1.0	0.5~0.6 或 1.0~1.1	其他

(注: ① $\delta$  为相对温差值<sup>[20]</sup>(%); ②表中各设备主要参数缺陷限值标准要具体参考相关设备的说明书,不同设备的各项参数的数值会存在一定的差异。)

### 2.2 单台配电设备健康指数计算

设配电设备运行参数用  $x_n (n=1,2,\dots,k)$  表示,其值分别在最大值  $x_n^{\max}$  和最小值  $x_n^{\min}$  之间。设置

参数的一般缺陷限值  $x_n^G$  (超出该缺陷值则参数即为一般缺陷,下同)、重要缺陷限值  $x_n^I$ 、紧急缺陷限值  $x_n^E$ 。使用描述参数之间关系的二维椭圆模型表明配

电设备参数值区间<sup>[21]</sup>, 如图 3 所示。

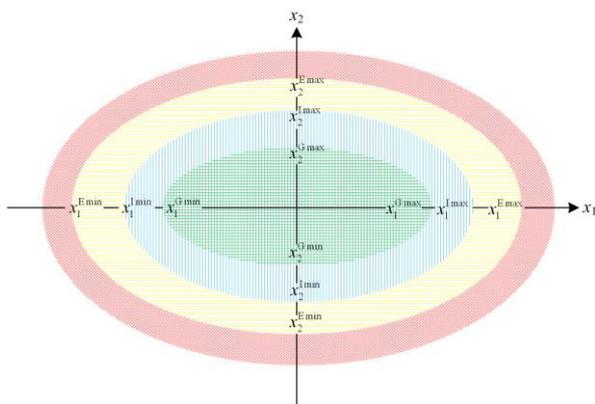


图 3 设备参数阈值图

Fig. 3 Parameter threshold diagram of power equipment

将各缺陷限值之间的差值与参数  $x_n$  实际值超出不同缺陷限值的值作比较, 提出参数健康指数, 可表示为

$$H_n = \begin{cases} 3 + \left| \frac{x_n - x_n^E}{x_n^E} \right| & x_n^{E \max} \leq x_n \text{ 或 } x_n \leq x_n^{E \min} \\ 2 + \left| \frac{x_n - x_n^I}{x_n^I - x_n^E} \right| & x_n^{I \max} \leq x_n < x_n^{E \max} \text{ 或 } x_n^{E \min} < x_n \leq x_n^{I \min} \\ 1 + \left| \frac{x_n - x_n^G}{x_n^I - x_n^G} \right| & x_n^{G \max} \leq x_n < x_n^{I \max} \text{ 或 } x_n^{I \min} < x_n \leq x_n^{G \min} \\ \left| \frac{x_n}{x_n^{G \max} - x_n^{G \min}} \right| & x_n^{G \min} \leq x_n < x_n^{G \max} \end{cases} \quad (1)$$

$n = 1, 2, \dots, k$

式中,  $x_n^{G \max}$ 、 $x_n^{G \min}$ 、 $x_n^{I \max}$ 、 $x_n^{I \min}$ 、 $x_n^{E \max}$ 、 $x_n^{E \min}$  分别为配电设备的一般缺陷、重要缺陷和紧急缺陷的上下限值。由式(1)结果可知,  $H_n$  为[0,1)时参数是无缺陷的,  $H_n$  为[1,2)时参数处于一般缺陷,  $H_n$  为[2,3)时参数处于重要缺陷,  $H_n$  为[3,4)时参数处于紧急缺陷。

由于设备的不同参数、部件可能处于不同的健康状态, 包括无缺陷、一般缺陷、重要缺陷和紧急缺陷, 将健康状态最差的参数的健康指数作为该台设备的健康指数, 可表示为

$$H = \max \{H_1, H_2, \dots, H_n, \dots, H_k\} \quad (2)$$

式中, 参数  $H_n$  ( $n=1, 2, \dots, k$ ) 表示设备第  $n$  个运行参数的健康指数。

### 2.3 基于成功流法的设备层健康状态评估

采用成功流法的健康状态评估是基于配电设备健康指数<sup>[22]</sup>, 将设备健康指数转化为设备的成功运行率, 通过网络拓扑结构将单一配电设备等价至系统层面, 从而将单台配电设备的健康指数转化为配

电设备层的健康指数。评估流程如下。

(1) 以图 4 配电网系统馈线 1 为例对系统进行分层处理, 从母线开始在拓扑图上自上向下搜索配电设备, 将搜索到的主线路上的分支线路及与之相连的断路器、变压器、配电线路等设备划分为同一层, 并搜索分支线路连接的下一级分支线路, 将每一层设备相连得到系统层次图。系统层次图如图 5 所示。

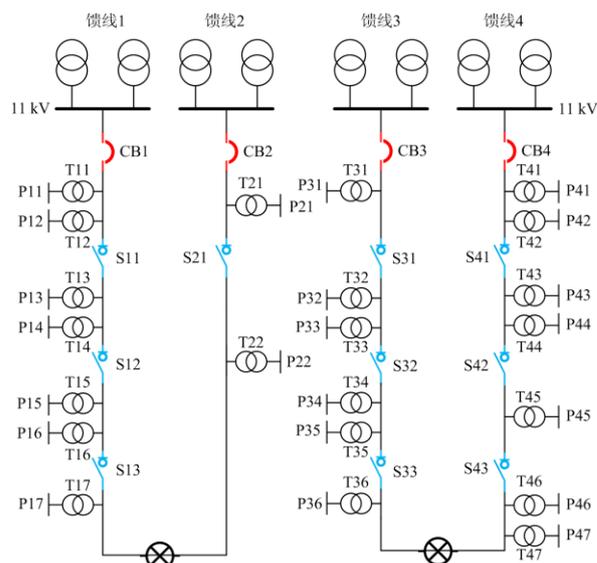


图 4 IEEE RBTS BUS2 配电网系统

Fig. 4 IEEE RBTS BUS2 distribution network system

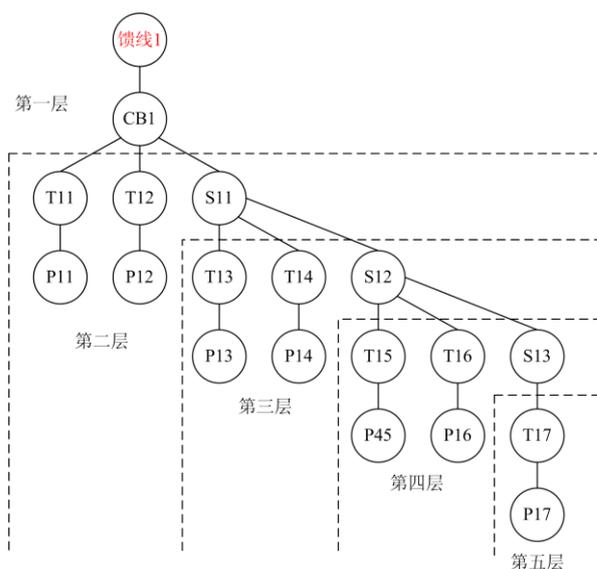


图 5 配电网馈线 1 系统层次图

Fig. 5 Hierarchical diagram of distribution network feeder 1 system

(2) 根据设备的健康指数获取设备的成功运行概率。配电设备健康指数  $H$  和故障概率  $P_{i,j}$  为指数关系:

$$P_{i,j} = 1 - e^{-\left(\frac{H-4}{H}\right)^2} \quad (3)$$

式中,  $P_{i,j}$  为第  $i$  层第  $j$  台设备的成功运行概率。设备健康指数等于 0, 则成功运行概率等于 1。设备健康指数等于 4, 则成功运行概率等于 0。

(3) 根据制定的系统层次图从最下层开始向上等价, 若分支线路上的设备是串联的, 将这条线路上的所有设备等价为一台设备  $M_i$ , 成功运行概率为

$$P_i = \prod P_{i,j} \quad (4)$$

如采用双回线则采用并联计算, 即

$$P_i = 1 - (1 - P_{i,1})(1 - P_{i,2}) \quad (5)$$

式中,  $P_{i,1}$  和  $P_{i,2}$  为第 1、2 回线的成功运行概率。

同一层各条分支线路的权重为各条线路所连接的负荷占该层总负荷比重, 成功运行概率为

$$\begin{cases} P_i = \sum_{j=1}^n (a_j \times P_j) \\ \sum_{j=1}^n a_j = 1 \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $a_j$  为在第  $i$  层第  $j$  台设备所连接负荷占该层总负荷比例。

(4) 重复步骤(1)一步骤(3), 一直等值到 10 kV 母线, 得到整个配电网成功运行概率  $P$ , 将式(3)转换为配电设备层健康指数  $H_E$ :

$$H_E = \frac{4}{1 + \sqrt{-\ln(1 - P)}} \quad (7)$$

### 3 网络结构层健康状态评估

网络结构层的健康状态评估采用模糊层次分析法和证据理论相结合的方法, 提出网络结构层健康评估模型。针对网络结构的健康指数评估问题,

各个指标的权重会很大程度地影响评估结果的准确性, 指标的权重应该同时考虑评估者的主观偏好和指标本身的客观属性, 以此得到更为准确合理的权重, 模糊层次分析法可以解决大量指标同时评估产生的偏差和缺少弹性的问题, 并且能够最大程度地降低打分者偏好和经验对最终结果的影响, 使赋值较为简便, 准确性得到提高。证据理论相比熵权法等方法允许直接对集合或区间数赋予概率质量, 可以对权重进行调整<sup>[23-25]</sup>。

网络结构层健康状态评估方法基于评估指标体系, 采用模糊层次分析法对每个指标进行标准化处理, 运用隶属度函数建立各个指标的隶属度矩阵。确定出各个评估指标的相对权重。运用证据理论, 得出各个指标的最终权重和网络结构层的健康指数  $H_s$ , 其评估流程详见图 6。

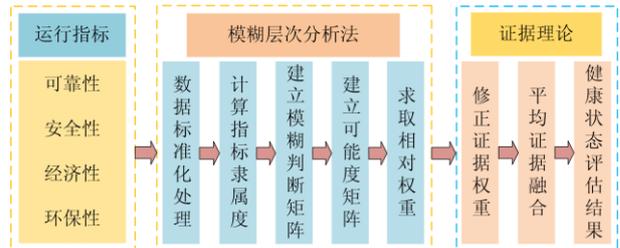


图 6 网络结构层健康状态评估方法  
Fig. 6 Health state assessment method of the network structure layer

#### 3.1 网络结构层运行指标

根据对配电网运行指标的分析, 建立配电网网络结构层健康状态评估指标体系, 可以从可靠性、安全性、经济性、环保性四个维度选取反映网络运行状态的多个指标进行网络结构层健康指数的计算。选取的配电网指标如表 3 所示。由于网络中

表 3 配电网网络结构层评估指标体系

Table 3 Evaluation indicators system of distribution network structure layer

维度	运行指标	指标类型及取值范围	指标定义
可靠性	负荷裕度	中间型: [50%, 60%]	当前负荷量与负荷量临界值的差与临界值之比
	负荷转供率	中间型: [40%, 50%]	转供的负荷与受影响负荷之比 <sup>[26]</sup>
	平均供电可用率	效益型: [99.85%, 100%]	一年中配电系统可能的供电小时数与用户需要的供电小时数之比
	实时供电水平	效益型: [0, 100%]	周期内的平均负荷与最大负荷的比值
安全性	支路负载率	中间型: [50%, 66.7%]	线路实际载流量与其允许载流量的比值
	电压安全稳定性	效益型: [0.5, 1]	配电网电压的安全稳定性 <sup>[27]</sup>
	电压偏差	成本型: [0, 7%]	各点的实际电压与系统标称电压的差值绝对值
	无功配置水平	效益型: [0, 0.1]	配电网无功缺额水平
经济性	变压器负载率	中间型: [65%, 75%]	一定时间内变压器平均输出的视在功率与变压器额定容量之比
	线路损耗率	成本型: [0, 6.2%]	线路传输产生的能量损耗与配电网额定容量之比
环保性	分布式电源渗透率	中间型: [10%, 20%]	分布式电源容量与配电网额定容量之比

各评估指标的取值类型不同, 做标准化处理时会有所不同, 成本型指标为数值越小状态越好的指标, 效益型指标为数值越大状态越好的指标, 中间型指标为数值居中时状态越好、数值越往两侧状态越差的指标。

### 3.2 模糊层次分析法求取相对权重

采用模糊理论对各个指标值进行无量纲标准化处理, 将所有指标转化为 0~1 中的一个值, 值越大, 表征其隶属于这个模糊集合的程度越高, 可表示为

$$f_i = \begin{cases} \frac{I_i - I_{i0}}{I_{il} - I_{i0}} & I_{i0} \leq I_i \leq I_{il} \\ \frac{I_{i0} - I_i}{I_{i0} - I_{il}} & I_{il} \leq I_i \leq I_{i0} \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $I_i$  为指标实际值;  $I_{i0}$  为指标初始值;  $I_{il}$  为指标标准极限值。

配电网指标一般采用梯形隶属函数确定各网络指标的隶属度, 梯形区间是根据网络指标的健康状况等级划分的, 可分为优、良、差、劣四个等级。

图 7 为隶属度等级。

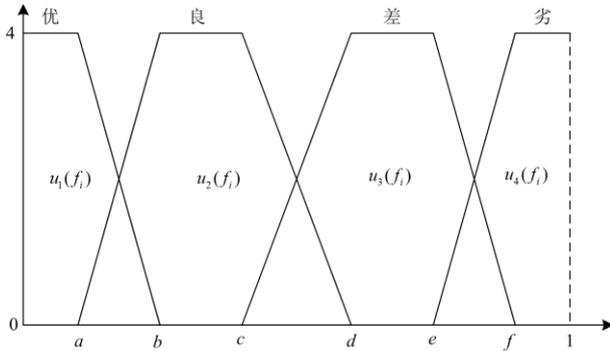


图 7 隶属度等级

Fig. 7 Membership level

设计关于各个指标和维度的调查问卷由数位专家进行打分, 总结不同专家对不同指标重要程度的偏好情况。根据得到的模糊数和层次结构, 求取加权平均数, 建立三角模糊判断矩阵<sup>[28-29]</sup>, 可表示为

$$C_{ij} = (c_{ij})_{n \times n} = \begin{bmatrix} (1,1,1) & (l_{12}, m_{12}, u_{12}) & \cdots & (l_{1n}, m_{1n}, u_{1n}) \\ (l_{21}, m_{21}, u_{21}) & (1,1,1) & \cdots & (l_{2n}, m_{2n}, u_{2n}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (l_{n1}, m_{n1}, u_{n1}) & (l_{n2}, m_{n2}, u_{n2}) & \cdots & (1,1,1) \end{bmatrix} \quad (9)$$

根据三角模糊数的运算规则, 将式(9)修改成规范三角模糊矩阵, 可表示为

$$\begin{cases} r_{ij}^l = c_{ij}^l / \sum_{i=1}^n c_{ij}^u \\ r_{ij}^m = c_{ij}^m / \sum_{i=1}^n c_{ij}^m, i \in n, j \in k \\ r_{ij}^u = c_{ij}^u / \sum_{i=1}^n c_{ij}^l \end{cases} \quad (10)$$

对于一个三角模糊数问题, 比较各指标可能性的程度, 求得各指标三角模糊数对应的可能度, 建立可能度矩阵, 可表示为式(11)和式(12)。

$$v(r_1 \geq r_2) = \begin{cases} 1 & r_1^m \geq r_2^m \\ \frac{r_1^l - r_1^u}{(r_2^m - r_2^u) - (r_1^m - r_1^l)} & r_1^m \leq r_2^m, r_1^u \geq r_2^l \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

$$V_{ij} = \begin{bmatrix} v_{12} & v_{13} & \cdots & v_{1j} \\ v_{21} & v_{22} & \cdots & v_{2j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{i1} & v_{i2} & \cdots & v_{ij} \end{bmatrix} \quad (12)$$

根据可能度矩阵, 选取每一个指标的最小可能度, 可表示为

$$V_{\min} = [v_{1\min} \quad v_{2\min} \quad \cdots \quad v_{i\min}]^T, i = 1, 2, \dots, n \quad (13)$$

基于三角模糊数矩阵比较可能度确定的指标相对权重为  $\omega_{ri} = [\omega_{r1}, \omega_{r2}, \dots, \omega_{rn}]$ , 其中

$$\omega_{ri} = \frac{v_{i\min}}{\sum_{i=1}^n v_{i\min}}, i = 1, 2, \dots, n \quad (14)$$

结合模糊隶属度矩阵和相对权重向量, 获得基本健康度概率分配并形成基本概率矩阵  $H_R$ , 可表示为

$$H_R = \omega_{ri} \cdot M(H) \quad (15)$$

### 3.3 基于证据理论的最终权重的确定

从基本概率矩阵  $H_R$  中提取两个指标的基本概率值  $S_i$  和  $S_j$ , 求解  $S_i$  和  $S_j$  之间的距离并形成距离矩阵, 可表示为

$$d_{ij} = \sqrt{0.5(\|S_1\|^2 + \|S_2\|^2 - 2 \langle S_1, S_2 \rangle)} \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (16)$$

$$D_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & d_{12} & d_{13} & \cdots & d_{1n} \\ d_{21} & 0 & d_{23} & \cdots & d_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{(n-1)1} & d_{(n-1)2} & \cdots & 0 & d_{(n-1)n} \\ d_{n1} & d_{n2} & \cdots & d_{n(n-1)} & 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

根据距离矩阵, 求出两个指标的基本概率值  $S_i$  和  $S_j$  之间的相似数和相似矩阵:

$$sim_{ij} = sim(S_i, S_j) = 1 - d(S_i, S_j) \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (18)$$

$$SIM_{ij} = 1 - D_{ij} = \begin{bmatrix} 1 & sim_{12} & \dots & sim_{1n} \\ sim_{21} & 1 & \dots & sim_{2n} \\ \vdots & \vdots & 1 & \vdots \\ sim_{n1} & sim_{n2} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

将相似矩阵的每一行相似因子相加, 得出基本概率值  $S_i$  的支持度, 可表示为

$$Sup(S_i) = \sum_{j=1, j \neq i}^n sim(S_i, S_j) \quad (20)$$

根据相似矩阵支持度  $Sup$  求出每个证据的证据权重, 可表示为

$$\omega_{ei} = \frac{Sup(S_i)}{\sum_{i=1}^n Sup(S_i)} \quad (21)$$

由于不同指标的相对重要性不同, 需要对证据权重进行修正, 得到最终权重  $\omega_i$ , 可表示为

$$\omega_i = \frac{\sqrt{\omega_{ri} \cdot \omega_{ei}}}{\sum_{i=1}^n \sqrt{\omega_{ri} \cdot \omega_{ei}}} \quad (22)$$

最终得到修正的平均证据, 并取其最大值为网络结构层的健康指数  $H_S$ , 可表示为

$$H_S = \max \{ \omega_i \cdot H_R \} \quad (23)$$

#### 4 建立配电网健康状态评估模型

配电网健康状态评估模型综合了配电设备层和网络结构层的健康指数。本模型制定了配电网健康指数映射图, 其中横轴为配电设备层健康指数  $H_E$ , 纵轴为网络结构层健康指数  $H_S$ , 数值区间为  $[0, 4)$ , 将配电设备层和网络结构层两个层面的健康指数映射为配电网健康指数。

二者的健康指数分别被划分成 4 个区间, 映射的配电网健康指数共有 16 个区域, 如图 8 所示。

将以上 16 个区域分为两大类。

(1) 类型 1: 配电设备层和网络结构层的健康指数不在同一区间, 即 {配电设备层, 网络结构层} = {(绿, 蓝), (绿, 黄), (绿, 红), (蓝, 绿), (蓝, 黄), (蓝, 红), (黄, 绿), (黄, 蓝), (黄, 红), (红, 绿), (红, 蓝), (红, 黄)}, 用菱形  $\diamond$  表示。

此时二者健康状态不一致且差距较大, 将状态较差的健康指数值作为配电网的健康指数, 表示为

$$H_N = \max \{ H_E, H_S \} \quad (24)$$

(2) 类型 2: 配电设备层和网络结构层的健康指数在同一区间, 即 {配电设备层, 网络结构层} = {(绿, 绿), (蓝, 蓝), (黄, 黄), (红, 红)}, 用方形  $\square$  表示。

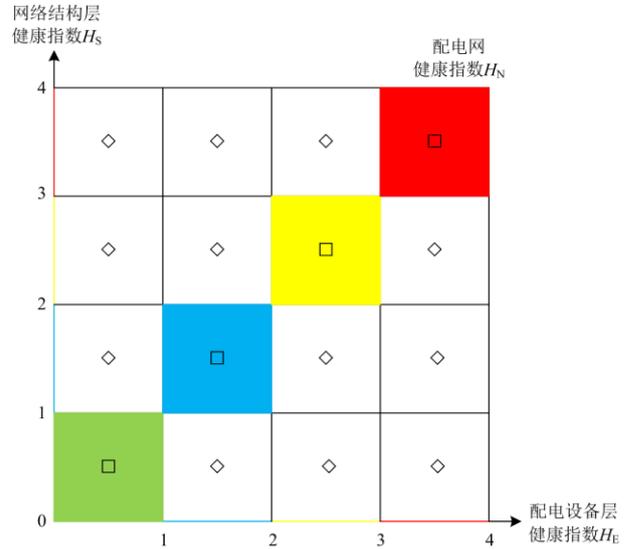


图 8 配电网健康指数映射图

Fig. 8 Mapping diagram of distribution network health index

绿), (蓝, 蓝), (蓝, 蓝), (红, 红)}, 用方形  $\square$  表示。

此时二者健康状态一致且差距较小, 需要按照二者重要程度不同和现实情况综合评估配电网的健康状态, 设置网络结构层的权重  $\omega_S$ , 配电设备层的权重为  $\omega_E$ , 可表示为

$$H_N = \omega_E \times H_E + \omega_S \times H_S \quad (25)$$

式中:  $H_N$  为配电网的健康指数;  $H_E$  为配电设备层的健康指数;  $H_S$  为网络结构层的健康指数。

根据健康评估的侧重点不同可将类型 2 分为 3 种情况, 分别为

(1) 情况 1: 配电设备层和网络结构层对于配电网健康状态评估同等重要。此时, 设网络结构层和配电设备层的权重均为 0.5。

(2) 情况 2: 网络结构层对于配电网健康状态评估比配电设备层更重要。设网络结构层的权重  $\omega_S=0.6$ , 配电设备层的权重为  $\omega_E=0.4$ 。

(3) 情况 3: 配电设备层对于配电网健康状态评估比网络结构层更重要。设置网络结构层的权重  $\omega_S=0.4$ , 配电设备层的权重为  $\omega_E=0.6$ 。

#### 5 算例分析

选取某地 10 kV 配电网为研究对象, 其网络拓扑图如图 9 所示。该地主要负荷类型为居民和工商用电, 网络呈辐射状。该配电网负荷总量为 9.9 MW, 包含 3 台断路器和 30 台变压器, 网络分别在 10、19 和 30 三个节点接入分布式光伏电站, 将配电网支路划分为 3 个区域。

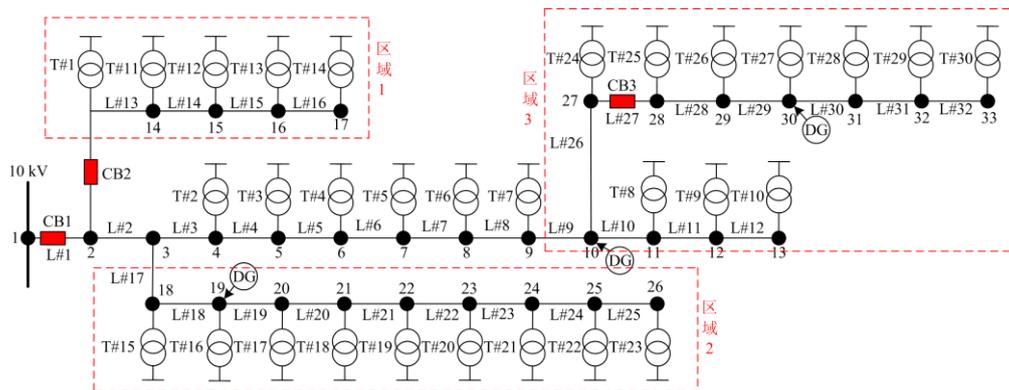


图 9 某地 10 kV 配电网的网络拓扑图

Fig. 9 Network topology diagram of a 10 kV distribution network in a certain place

收集配电设备断路器 2 的主要运行参数数据, 通过式(1)、式(2)计算断路器 2 的健康指数, 所收集的参数数据和各参数的健康指数如表 4 所示。

表 4 断路器 2 健康指数

Table 4 Health index of circuit breaker 2

断路器特性	运行参数	实测值	健康指数
机械性能	分合闸线圈开断电流/A	1.12	1.2
	分闸动触头行程/mm	21	1.0
	合闸动触头行程/mm	23	1.0
	分闸速度/(m/s)	1.58	1.2
	合闸速度/(m/s)	0.9	1.0
接点温度	触头温度/°C	35	0.64
绝缘特性	SF <sub>6</sub> 气体压力/MPa	0.65	0.83

对该配电网进行分层处理, 从 10 kV 母线开始在拓扑图上自上而下搜索配电设备得到配电网系统层次图。根据系统层次图, 通过式(3)计算得到每台配电设备成功运行概率, 再结合式(4)~式(7)并通过成功流算法计算得到配电网 3 个区域的健康指数和配电设备层的健康指数, 结果如图 10 所示。

配电设备层的健康指数  $H_E=1.50$ , 配电设备层总体处于一般缺陷状态。



图 10 配电设备层的健康指数

Fig. 10 Health index of power distribution equipment layer

从可靠性、安全性、经济性和环保性四个维度收集可以表征配电网运行状态的指标数据并进行

无量纲标准化处理, 处理结果如表 5 所示。

表 5 配电网运行指标

Table 5 Distribution network operation indicators

维度	网络指标	指标类型	实际值	归一化标准值
可靠性	负荷裕度	中间型	54.1%	0.059
	负荷转供率	中间型	53.6%	0.172
	平均供电可用率	效益型	99.953%	0.31
	实时供电水平	效益型	57.4%	0.426
安全性	支路负载率	中间型	69.04%	0.170
	电压安全稳定性	效益型	0.78	0.44
	电压偏差	成本型	4.04%	0.577
	无功配置水平	效益型	0.088	0.12
	变压器负载率	中间型	67%	0.06
经济性	综合线损率	成本型	1.14%	0.184
环保性	分布式电源渗透率	中间型	7.57%	0.176

采用梯形隶属函数确定网络指标的隶属度, 结果如表 6 所示。

表 6 指标隶属度

Table 6 Index membership degree

维度	网络指标	隶属度	隶属度等级			
			$H_1$	$H_2$	$H_3$	$H_4$
可靠性	负荷裕度	$f_{11}$	4	0	0	0
	负荷转供率	$f_{12}$	2.08	1.92	0	0
	平均供电可用率	$f_{13}$	0	4	0	0
	实时供电水平	$f_{14}$	0	3.48	0.52	0
安全性	支路负载率	$f_{21}$	2.13	1.87	0	0
	电压安全稳定性	$f_{22}$	0	3.2	0.8	0
	电压偏差	$f_{23}$	0	0.46	3.54	0
	无功配置水平	$f_{24}$	3.47	0.53	0	0
	变压器负载率	$f_{25}$	4	0	0	0
经济性	综合线损率	$f_{31}$	1.76	2.24	0	0
环保性	分布式电源渗透率	$f_{41}$	1.97	2.03	0	0

建立四个维度的模糊判断矩阵，如表 7 所示。

表 7 模糊判断矩阵

Table 7 Fuzzy judgment matrix

因子	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$
$f_1$	(1, 1, 1)	(0.67, 1, 1.5)	(0.67, 1, 1.5)	(1.5, 2, 2.33)
$f_2$	(0.67, 1, 1.5)	(1, 1, 1)	(0.67, 1, 1.5)	(1.5, 2, 2.5)
$f_3$	(0.67, 1, 1.5)	(0.67, 1, 1.5)	(1, 1, 1)	(0.67, 1, 1.5)
$f_4$	(0.43, 0.5, 0.67)	(0.4, 0.5, 0.67)	(0.67, 1, 1.5)	(1, 1, 1)

求得各指标三角模糊数对应的可能度，建立可能度矩阵，可表示为

$$V_{43} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0.8057 & 0.8057 & 1 \\ 0.5006 & 0.5006 & 0.7254 \end{bmatrix}$$

$$V_{\min} = [1 \ 1 \ 0.8057 \ 0.5006]^T$$

根据可能度矩阵，求取各指标的相对权重，获得基本健康度概率分配，可表示为

$$\omega_{n_i} = [0.3025 \ 0.3025 \ 0.2437 \ 0.1514]$$

$$H_R = \begin{bmatrix} H_1 & H_2 & H_3 & H_4 \\ 2.06 & 1.74 & 0.2 & 0 \\ 1.71 & 1.45 & 0.83 & 0 \\ 1.76 & 2.24 & 0 & 0 \\ 1.97 & 2.03 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

然后根据距离矩阵求出两个指标的基本概率值  $S_i$  和  $S_j$  之间的相似数和相似矩阵，可表示为

$$SIM = \begin{bmatrix} 1 & 0.77 & 0.59 & 0.97 \\ 0.77 & 1 & 0.42 & 0.76 \\ 0.59 & 0.42 & 1 & 0.58 \\ 0.97 & 0.76 & 0.58 & 1 \end{bmatrix}$$

根据相似矩阵修正的相对权重可表示为

$$\omega_{ei} = [0.2804 \ 0.2936 \ 0.2226 \ 0.2035]$$

对证据权重进行修正得到各维度指标所占权重，可表示为

$$\omega_i = [0.2935 \ 0.2685 \ 0.229 \ 0.2068]$$

最终得到修正的平均证据，并取其最大值为网络结构层的健康指数。

$$H_s = \max \{1.8131 \ 1.8328 \ 0.3541 \ 0\}$$

将可靠性、安全性、经济性和环保性四个维度的健康指数映射为一维的网络结构层健康指数，用于判断网络结构层健康状态，如图 11 所示。判断网络结构层的健康指数为  $H_s=1.8328$ ，配电网网络结构层处于一般缺陷状态。

将配电设备层和网络结构层的健康指数合并进

行综合评估得到配电网健康指数，根据得到的配电设备层健康指数  $H_E$  和网络结构层健康指数  $H_S$  以及配电网健康指数映射图可知，二者的健康状态均为一般缺陷状态，属于类型 2，根据文中所提方法，获得 3 种情况下的配电网健康指数，如表 8 所示。

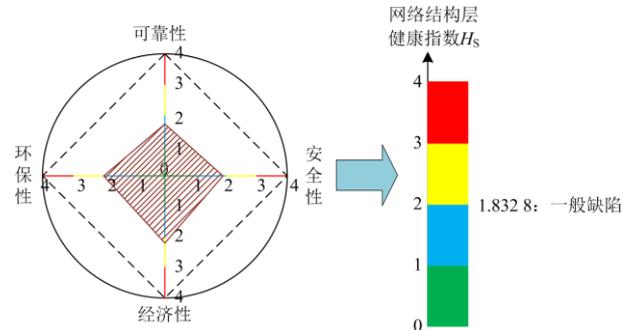


图 11 网络结构层健康指数映射图

Fig. 11 Mapping diagram of network structure layer health index

表 8 配电网健康指数和健康状态

Table 8 Distribution network health index and health status

算例 1	情况 1	情况 2	情况 3
配电网健康指数	1.664	1.70	1.633 1
配电网健康状态	一般缺陷	一般缺陷	一般缺陷

根据表 8 中的配电网健康指数，判断配电网健康状况为一般缺陷状态，配电网网络结构较为不合理，抗扰动能力较差，但能够按规定执行功能，但部分功能退化，稳定裕度正常，需采取应急处理措施。

采用文中所提方法，改变 10、19 和 30 三个节点分布式光伏电站的出力，将分布式电源渗透率提高为 13.3%，再次收集配电网中配电设备的运行参数和网络结构层的运行指标数据，并评估分布式电源渗透率改变后的配电网健康状态，计算结果如表 9 所示。

表 9 配电网健康指数和健康状态

Table 9 Distribution network health index and health status

算例 2	情况 1	情况 2	情况 3
配电网健康指数	1.424 3	1.409 1	1.439 4
配电网健康状态	一般缺陷	一般缺陷	一般缺陷

判断算例 2 中配电网健康状况为一般缺陷状态，健康指数相比于算例 1 中的配电网的健康指数较低，配电网健康状态有所改善，即适当地提高分布式电源渗透率会降低配电网的健康指数，配电网运行状态更为健康。

## 6 结论

配电网设备众多，运行复杂，为了更好地对配

电网的运行状态和健康状况进行准确评估, 本文提出了一种计及网络结构的配电网健康状态评估研究方法。本文将配电网的健康状态划分为无缺陷、一般缺陷、重要缺陷和紧急缺陷四个状态。配电设备健康评估基于电气量和非电气量参数计算单台配电设备的健康指数, 并采用成功流法获得配电设备层群体设备的健康指数。网络结构层健康状态评估采用模糊层次分析法和证据理论相结合的方法计算网络结构层的健康指数。最后综合配电设备层和网络结构层的健康指数得到整个配电网的健康指数, 以此判断配电网的健康状态。某 10 kV 配电网实例表明该评估方法能从整体上反映配电网的健康状态并确定其健康等级。

### 参考文献

- [1] 王伊健, 诸葛暄雨, 江斌开, 等. 配电自动化终端运行状态大数据在线评价研究[J]. 供用电, 2021, 38(8): 61-69.  
WANG Yijian, ZHUGE Xuanyu, JIANG Binkai, et al. Research on big data online evaluation of distribution automation terminal operation state[J]. Distribution & Utilization, 2021, 38(8): 61-69.
- [2] 陈泽兴, 张勇军, 黄豫, 等. 基于条件风险价值的综合能源配电网优化重构方法研究[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(6): 590-599.  
CHEN Zexing, ZHANG Yongjun, HUANG Yu, et al. Optimal reconfiguration of distribution networks in integrated energy systems based on conditional value at risk[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(6): 590-599.
- [3] 程向向, 秦川, 张功林, 等. 基于营配贯通电力大数据的配电网画像建模技术与运行状态评估研究[J]. 供用电, 2020, 37(11): 21-27.  
CHENG Xiangxiang, QIN Chuan, ZHANG Gonglin, et al. Research on distribution network portrait modeling technology and operation status evaluation based on big data of the marketing and distribution fusion[J]. Distribution & Utilization, 2020, 37(11): 21-27.
- [4] 李振华, 陶渊, 赵爽, 等. 智能配电网状态估计方法研究现状分析[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(1): 115-122.  
LI Zhenhua, TAO Yuan, ZHAO Shuang, et al. Research situation analysis of state estimation in smart distribution networks[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(1): 115-122.
- [5] 杨斐然, 于永进. 基于时间约束的分层模糊 Petri 网的配电网故障诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(2): 99-106.  
YANG Feiran, YU Yongjin. Fault diagnosis of distribution network based on time constrained hierarchical fuzzy Petri nets[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(2): 99-106.
- [6] 刘健, 张小庆, 张志华. 继电保护配合提高配电自动化故障处理性能[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 10-16.  
LIU Jian, ZHANG Xiaoqing, ZHANG Zhihua. Improving the performance of fault location and restoration based on relay protection for distribution grids[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 10-16.
- [7] 黄鸣宇, 祁升龙, 芦翔, 等. 面向配网保护的集分联合馈线自动化控制方法[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2020, 48(5): 49-54.  
HUANG Mingyu, QI Shenglong, LU Xiang, et al. Combined centralized and distributed control method for distribution network protection[J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition), 2020, 48(5): 49-54.
- [8] KHODDAM M, SADEH J, POURMOHAMADIYAN P. Performance evaluation of circuit breaker electrical contact based on dynamic resistance signature and using health index[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2016, 6(10): 1505-1512.
- [9] 杨春波, 陶青, 张健, 等. 基于综合健康指数的设备状态评估[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(10): 104-109.  
YANG Chunbo, TAO Qing, ZHANG Jian, et al. Equipment status evaluation based on comprehensive health index[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(10): 104-109.
- [10] 李振柱, 谢志成, 熊卫红, 等. 考虑绝缘剩余寿命的变压器健康状态评估方法[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(8): 137-142, 169.  
LI Zhenzhu, XIE Zhicheng, XIONG Weihong, et al. Transformer health condition assessment considering insulation remaining life[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(8): 137-142, 169.
- [11] 黄翌, 汪飒, 谭阳红, 等. 基于健康度和重要度的配电网运行风险评估方法[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(6): 136-141.  
HUANG Zhao, WANG Feng, TAN Yanghong, et al. Operational risk assessment based on health and importance indexes for distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6): 136-141.
- [12] 李毅强. 电力系统配电网健康指数初步研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.  
LI Yiqiang. Preliminary research on health index theory of distribution network in power system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.
- [13] SUN Lingjie, MA Zhao, SHANG Yuwei, et al. Research

- on multi-attribute decision-making in condition evaluation for power transformer using fuzzy AHP and modified weighted averaging combination[J]. *Generation, Transmission and Distribution*, 2016, 10(15): 3855-3864.
- [14] ASHKEZARI A D, MA H, SAHA T K. Application of fuzzy support vector machine for determining the health index of the insulation system of in-service power transformers[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2013, 20(3): 965-973.
- [15] 国家电网公司. 配电设备状态评价导则: Q/GDW 645—2011[S]. 北京: 中国电力出版社, 2011.  
State Grid Corporation of China. Guidelines for condition evaluation of power distribution equipment: Q/GDW 645—2011[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2011.
- [16] 胡志广. 配电设备在线状态监测及评价[M]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
- [17] 王致杰, 徐余法, 刘三明. 电力设备状态监测与故障诊断[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2012.
- [18] FAN Jingmin, FU Chenyang, YIN Hao, et al. Power transformer condition assessment based on online monitor with SOFC chromatographic detector[J]. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2019, 118.
- [19] 李鑫, 徐晓刚, 邓建刚, 等. 35 kV 油浸式变压器绕组热点温度计算分析[J]. *高压电器*, 2017, 53(1): 144-150.  
LI Xin, XU Xiaogang, DENG Jiangan, et al. Calculation and analysis of hot spot temperature in 35 kV oil-immersed transformer windings[J]. *High Voltage Apparatus*, 2017, 53(1): 144-150.
- [20] 中华人民共和国电力行业标准. 带电设备红外诊断应用规范: DL/T664—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.  
Power Industry Standards of the People's Republic of China. Application specification for infrared diagnosis of live equipment: DL/T664—2016[S]. Beijing: China Standard Press, 2016.
- [21] 马青山, 孙玉玮, 邓伟超, 等. 基于健康度和重要度的电力设备风险评估[J]. *电气工程学报*, 2020, 15(4): 144-152.  
MA Qingshan, SUN Yuwei, DENG Weichao, et al. Power equipment risk assessment based on health and importance[J]. *Journal of Electrical Engineering*, 2020, 15(4): 144-152.
- [22] 高崇, 曾广璇, 张俊潇, 等. 基于成功流法的配电信息物理系统可靠性评估[J]. *电力建设*, 2020, 41(5): 58-64.  
GAO Chong, ZENG Guangxuan, ZHANG Junxiao, et al. Reliability assessment of distribution network cyber-physical system using goal-oriented method[J]. *Electric Power Construction*, 2020, 41(5): 58-64.
- [23] 马钊, 周莉梅, 袁海文, 等. 现代配电网健康指数理论及其应用研究[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(1): 130-140, 328.
- MA Zhao, ZHOU Limei, YUAN Haiwen, et al. Health index methodology of modern distribution network and its application[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(1): 130-140, 328.
- [24] MA Zhao, SHANG Yuwei, YUAN Haiwen, et al. Holistic performance evaluation framework: power distribution network health index[J]. *IET Generation Transmission & Distribution*, 2017, 11(9): 2184-2193.
- [25] 戴志辉, 鲁浩, 刘媛, 等. 基于改进 D-S 证据理论的智能站保护二次回路故障诊断方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(9): 59-67.  
DAI Zhihui, LU Hao, LIU Yuan, et al. A fault diagnosis method for the secondary circuits of protection systems in smart substations based on improved D-S evidence theory[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(9): 59-67.
- [26] 刘芳芳, 吕林, 刘友波, 等. 高渗透清洁能源的城市高压配电网转供调度策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(11): 1-9.  
LIU Fangfang, LÜ Lin, LIU Youbo, et al. Transfer scheduling strategy for urban high-voltage distribution network with highly-penetrated renewable energy[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(11): 1-9.
- [27] SINHA A K, HAZARIKA D. A comparative study of voltage stability indices in a power system[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2000, 22(8): 589-596.
- [28] 陈雪, 黄智力, 罗键. 基于相对相似度关系的三角模糊数型不确定多属性决策法[J]. *控制与决策*, 2016, 31(12): 2232-2240.  
CHEN Xue, HUANG Zhili, LUO Jian. Approach for triangular fuzzy number-based uncertain multi-attribute decision making based on relative similarity degree relation[J]. *Control and Decision*, 2016, 31(12): 2232-2240.
- [29] MA T S, XIAO F Y. An improved method to transform triangular fuzzy number into basic belief assignment in evidence theory[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 25308-25322.

收稿日期: 2021-06-02; 修回日期: 2021-07-18

作者简介:

孙黎霞(1978—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为电力电子在电力系统中的应用、同步发电机及其励磁系统的建模与参数辨识、非线性系统的控制等; E-mail: Lixiasun@hhu.edu.cn

王中一(1997—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为配电网风险评估. E-mail: 1252895196@qq.com

(编辑 魏小丽)