

DOI: 10.7667/PSPC150877

基于模糊理论的电力系统健康状况的研究

胡佳琳, 张炜, 操丹丹, 温宇涵, 荣雅君

(燕山大学电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 及时准确地了解电网运行健康状况具有非常重要的意义。介绍了电力系统健康诊断的概念, 并提出用 AHP-熵值法结合模糊理论对电网进行健康状况评估。从历史基础、在线运行、环境影响三个方面构建了电力系统健康诊断指标体系, 并加入故障指标项, 使指标体系更加完善, 使评估更加客观、精确、具有说服力。通过诊断数据, 找出电网自身的问题和变化趋势, 从而预测整个电网的变化态势, 对存在的隐患或者可能出现的电力系统故障给出应对的建议。最后通过对中国西南某地的实例分析, 验证了该方法的可行性和有效性。

关键词: 电力系统; 健康诊断; 模糊理论; 指标体系; AHP-熵值法

Research on health status of power system based on fuzzy theory

HU Jialin, ZHANG Wei, CAO Dandan, WEN Yuhan, RONG Yajun

(School of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: It is very important to know well the health status of power grid operation in time and accurately. The concept of power system health diagnosis and evaluation is introduced in this paper. Health condition assessment of power system through the analytic hierarchy process (AHP) - entropy method and fuzzy theory. This paper constructs the index system of power system health diagnosis in terms of the historical basis, real-time operation and environment influence, in which fault indicator item is added to improve the original index system and make the evaluation more objective, accurate and persuasive. Its gap and changing trend are found by diagnostic analysis of the system through the diagnostic data and the suggestions on the anomalies are given out. The effectiveness and feasibility of the diagnostic method is verified by analyzing certain real power grid in southwest of China.

Key words: power system; health diagnosis; fuzzy theory; index system; AHP-entropy method

0 引言

电能作为国民经济的命脉, 与人民群众的息息相关^[1]。现代社会用电负荷的快速增长^[2]、供电可靠性要求的提高, 使得电网规模不断扩大、拓扑结构越来越复杂^[3]。然而国内外发生过多次大面积停电事故, 给人类的正常生活带来诸多不便^[4]。由此可见, 电力系统对安全、可靠、经济运行等各方面的要求越来越高, 传统的针对发生故障以后采取措施和应对的策略早已不能满足现代电网的发展要求^[5]。因此, 对电力系统的“健康”状况进行实时诊断, 通过诊断结果了解系统的健康程度并预测系统健康态势的研究讨论是非常有必要的^[6]。

鉴于此, 本文介绍了电力系统健康诊断的概念, 收集影响电网健康运行的各类指标, 在进行筛选分类以后建立描述电网功能和健康状态的指标体系。并且引入故障指标项^[7]进一步完善了电力系统健康

诊断指标体系, 对电网进行实效分析, 针对电力系统的历史基础、实时运行和环境影响^[7]三个方面研究电网的健康程度^[8]。使用主客观求权值方法对各类指标进行综合权重的设定, 最后采用模糊理论对电力系统健康程度进行评价。

目前, 确定权重的方法分为主观赋权法, 如层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP)^[9]和客观赋权法, 如熵值法。本文在前人研究基础上, 采用 AHP 和熵值法确定综合权重的方法^[10-11], 使评估的可靠性^[12]、精确性、客观性得到提高。最后以某地的实际电网为例, 应用本文的方法进行综合评价, 并对结果和实际情况加以比较分析。

1 诊断流程与评语集的确定

1.1 电力系统健康诊断的概念

电力系统健康诊断的概念最早是由鞠平教授等人提出的。指的是: 通过对设备、网络与系统的状

态实时进行扫描，建立其“健康档案”实施动态跟踪，根据其特征量的变化，诊断其“健康”程度，及时发现“病灶”并报警，必要时加以消除。显然，健康诊断涵盖了故障诊断和故障预测概念，但在内容和时间上都有了进一步的延伸。健康诊断概念与状态监测概念相近，但适合的范围更广，也比较形象、直观。

1.2 诊断流程

电力系统健康诊断和对一个人的身体状况进行长期跟踪监视相似。首先从电网的各个监控与管理信息系统获取大量数据，筛选需要的历史情况、实时变化等数据作为健康诊断的原始数据。对所选数据进行加工整理，利用算法得出初步的诊断结果。再用模糊数学理论对其健康状态进行评估。最后分析并得到最终会诊结果，实现对该区域电网的健康变化趋势的预测，为电力部门工作人员实施相应的决策动作提供参考依据。

1.3 评语集的确定

本文沿用文献[8-9]并结合电力系统的自身特征，将电网的健康状态划分为黑、红、黄、蓝、绿5种颜色指示标识的等级。

绿色表示系统处于“健康状态”。此时该系统抗

扰动能力和恢复能力较强，且结构合理，用户用电质量得到保障。能够轻松抵御一般的自然灾害。

蓝色表示系统处于“亚健康状态”。此时系统的恢复能力和抗扰动能力一般，供电服务一般，负荷水平偏高，抵御一般自然灾害的能力较弱。

黄色表示系统处于“轻度病态”。此时该系统供电服务功能较差，结构较为不合理，抗扰动能力和恢复能力弱。

红色表示系统处于“中度病态”。此时该系统稳定裕度不足，抗干扰能力和恢复能力差，结构不合理且存在安全隐患。

黑色表示系统处于“严重病态”。此时的系统运行不稳定，功率严重不平衡，结构完全不合理，没有抵抗自然灾害的能力。

2 指标体系的建立

构建电力系统健康诊断的指标体系总体思路为：收集大量数据，选取一些使用频度较高的指标，对指标进行反复过滤、筛选。以该地电网历史信息和实时运行数据为主要原始资料，结合地理因素和环境影响因素，客观分析影响电力系统的主要因素。最终确定电网指标结构如图1所示。

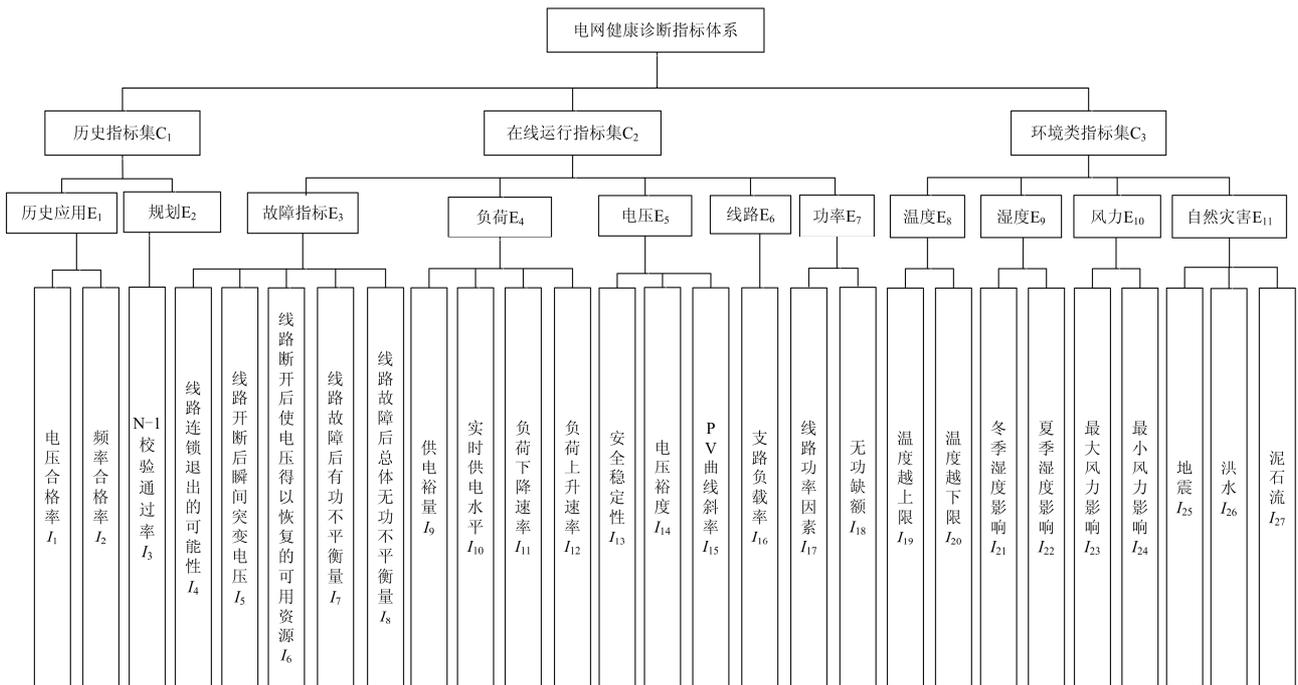


图 1 电力系统健康诊断指标结构图

Fig. 1 Indicator chart of power system health diagnosis

对电力系统的健康状态作研究不仅要考虑到电网正常运行时获得的数据，还要把电网故障状态的情况考虑进去。因此本文在在线运行类指标项中加

入了5个故障类指标，并将其分为4个层次以便分析。

本文建立的电网健康诊断结构图的特点是层次明确，便于运用各个算法进行计算，而且采用了聚

类方法与克朗巴哈系数法对各指标进行相关性分析和可靠性分析。对指标进行精简归类, 排除过多的重复性指标项。

3 综合权重的确定

3.1 AHP-熵值法

本文采用主客观结合的方法确定权重, 首次将AHP-熵值法运用到电力系统健康诊断的研究中, 使评估的可靠性、客观性得到提高, 既减少了主观因素对赋值的影响, 也弱化了因样本数据不足导致熵值法赋权产生偏差的问题, 得出优化权重组合。

电力系统健康诊断是运用构建的指标体系对电网健康程度进行综合评价的过程。由于各个指标存在的差异以及每项指标在整体评价中的相对重要性也不同, 因此, 要给各指标赋予权重值以保证综合评价的客观性。目前研究指标赋权的方法主要分为主观赋权法和客观赋权法, 每种方法都各有优缺点, 而AHP-熵值法则避免了问题, 继承了优点。

3.2 基于AHP-熵值法确定综合权重

3.2.1 层次分析法计算权重步骤

(1) 利用1-9标度法对同一层次指标比较, 得到相对于上一层的要素判断矩阵 C 。并根据判断矩阵 C 计算各因素的权重。

(2) 计算得出各因素权重以后还需要进行一致性检验, 判断矩阵若是通过一致性检验, 则说明各指标的权重比较合理; 反之, 需调整判断矩阵, 直到满足一致性要求为止。

(3) 最后计算总层级权重。

3.2.2 熵值法计算权重步骤

(1) 选取 m 个待评价对象, n 个指标的评估问题得到评价矩阵 $R' = (\gamma'_{ij})_{m \times n}$, γ'_{ij} 为第 i 个对象在第 j 个指标的数值。

(2) 对数据进行标准化处理。由于各项指标的计量单位并不统一, 因此在计算综合指标前, 先进行标准化和归一化处理, 得到标准矩阵 $(\theta_{ij})_{m \times n}$ 。

(3) 计算第 j 项指标的熵值 H_j 。

(4) 计算第 j 项指标的差异系数 g_j 。

3.2.3 综合权重的确定步骤

确定综合权重的公式为

$$w_i = \omega_i g_i / \sum_{j=1}^n \omega_j g_j, i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

式中: ω_i 为层次分析法的权重; g_i 为熵值法的差异性系数; w_i 为AHP-熵值法的综合权重。

4 综合评估模型的建立

根据模糊理论构建电力系统健康诊断综合模糊评价模型, 就是如何决定权重向量 w_i , 模糊关系矩阵 $R = [r_{ij}]_{m \times n}$, 以及模糊变换算子 f , 即

$$B = f(W \times R) \quad (2)$$

式中, B 为电力系统健康诊断模糊评价决策集的一个子集。式(2)中, R 是构建电力系统健康状态综合评价模型的关键, 直接影响最终的评价结果。模糊关系矩阵一般可以通过隶属度函数计算^[13]。

目前, 隶属度函数大多数都是通过对大量的统计数据和专家经验进行分析归纳的结果。一般指标可分为三类, 一类是正指标, 即指标值越大越好, 采用效益型模糊分布形式; 另一类是逆指标, 即指标值越小越好, 采用成本型模糊分布形式; 还有一种中间型指标, 即指标值越靠近优质取值区间越好, 采用适中型模糊分布形式^[14]。限于篇幅本文将在只详细介绍适中型模糊分布的隶属度函数。

故障指标^[15]有些可从当地电力系统调度部门得到相关数据, 如开断后使电压得以恢复的可用资源指标等。有些涉及到故障后网络状态的计算, 并需考虑电网连锁故障^[16-17]。由于故障一般只影响到系统的局部地区, 因此可以按照一定的分区方法得到该故障的影响区域^[18]。在PQ分解潮流算法的基础上, 故障后的指标即可按照各指标的定义求出。计算得到模糊关系矩阵后就可以根据式(2)求得评估结果。由于指标体系结构的多层次, 需要进行多级评估, 只需用以上的结果作为上一层因素的隶属度向量, 继续循环计算步骤, 最终计算出目标层的诊断结果。

5 实例分析

本文选取中国西南某地实际电网作为研究对象, 采用上文提出的改进的健康诊断方法对该地电网进行诊断, 根据诊断结果对电网进行分析, 并与该地实际电网运行情况进行比较验证。由于篇幅所限, 本文仅以在线运行类指标为例进行分析验证, 对历史类指标和环境类指标, 由于分析方法是一样的, 不再作介绍。根据电网公司的数据, 该地11月~次年1月的在线运行指标, 按照其各定义得到, 如表1所示。

按照本文采用的AHP-熵值法计算各指标权重值, 先分别计算出AHP法和熵值法的两个权重值, 然后按照式(1)计算得出综合权重如表2所示。

表 1 系统部分指标值

Table 1 Part of the system index value

诊断指标	11 月	12 月	1 月
I_9	44.019	48.775	44.853
I_{10}	48.479	54.091	59.346
I_{11}	65.599	31.496	26.726
I_{12}	51.225	67.077	69.422
I_{13}	0.872	0.724	0.653
I_{14}	15.67	16.56	17.90
I_{15}	123.74	133.93	92.69
I_{16}	79.60	72.70	67.43
I_{17}	0.972	0.983	0.984
I_{18}	0.222	0.091	0.085

根据每个指标的取值范围和类型,选择隶属度函数并计算得出模糊矩阵 R 。以供电裕量(I_9)为例,简单介绍如何得到模糊矩阵。根据电网公司的要求,供电裕量在 50%~60%为最佳,也就是说该指标用适中型隶属度函数求隶属度。效益型隶属度函数即适中型函数 g 点左半部分函数,成本型函数即适中型函数右半部分,所以本文列举适中型指标,不对另两类隶属度函数作详细介绍。如图 2 所示。

则 11 月份的供电裕量值 $I_9=44.019$ 代入 5 个函数易得 I_9 属于各个健康等级的隶属度向量 $a_9=[0.52, 0.48, 0, 0, 0]$,代表该指标数据隶属于“健康”状态的隶属度 0.52,“亚健康”状态为 0.48,其他均为 0。即此指标总体属于“健康”状态。

表 2 采用 AHP-熵值法计算各指标综合权重值

Table 2 Using AHP- calculated entropy method to calculate the index weights

要素层	E ₄				E ₅		E ₆		E ₇	
指标层	I_9	I_{10}	I_{11}	I_{12}	I_{13}	I_{14}	I_{15}	I_{16}	I_{17}	I_{18}
AHP	0.423 0	0.273 0	0.152 0	0.152 0	0.454 6	0.198 5	0.346 9	1	0.600 0	0.400 0
熵值法	0.228 4	0.279 5	0.161 9	0.330 2	0.362 6	0.356 9	0.280 6	1	0.696 5	0.303 5
综合权重	0.390 0	0.308 0	0.099 3	0.202 6	0.495 0	0.212 7	0.293 2	1	0.774 9	0.225 1

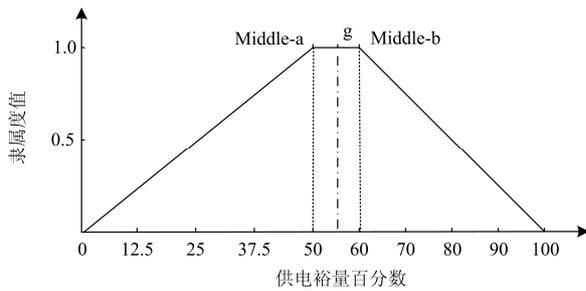


图 2 适中型指标隶属度函数图形

Fig. 2 Moderate type index membership function graph

同理,把同一层指标($I_{10} \sim I_{12}$)代入各自的隶属度函数,可一一得到每个隶属度向量 a_{10}, a_{11}, a_{12} 。模糊矩阵 $R_4=[a_9, a_{10}, a_{11}, a_{12}]^T$ 。

得到权重向量和模糊关系矩阵后按照模糊综合评价公式可计算得到负荷(E_4)的分诊结果向量 $[0.202 8, 0.234 8, 0.490 2, 0.072 1, 0]$,按以上步骤计算得到 $E_3 \sim E_7$ 的分诊结果,组成矩阵 R'_5 ,并作为上一层指标的模糊矩阵,进行二级模糊评判。

$$R'_5 = \begin{bmatrix} 0.193 7 & 0.707 1 & 0.099 1 & 0 & 0 \\ 0.202 8 & 0.234 8 & 0.490 2 & 0.072 1 & 0 \\ 0.430 6 & 0.399 5 & 0.170 0 & 0 & 0 \\ 0.276 3 & 0.723 7 & 0 & 0 & 0 \\ 0.623 0 & 0.239 8 & 0.137 2 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

最后计算得到该电网11月总体健康水平诊断向量 $S_1=[0.407 3, 0.453 6, 0.214 9, 0.075 8, 0]$ 。诊断该地连续3个月的电网健康状态得到结果如下:12月的总体健康水平 $S_2=[0.363 7, 0.389 2, 0.143 2, 0.104 0, 0]$,1月的总体健康水平 $S_3=[0.336 7, 0.289 3, 0.197 8, 0.176 2, 0]$ 。

根据以上得到的诊断结果,首先对该电网11月的健康状态进行分析。该地电网的历史指标比较好(历史应用、规划、故障类指标等三项通过诊断都显示健康状态良好),说明历史运行状态良好,系统稳定性、线路传输状况也表现稳定(电压、线路指标健康状态良好),但是存在负荷不稳定,波动大的情况(负荷指标处于亚健康状态)。对比该地11月份电网实际运行情况为:系统的频率和电压等均在正常范围之内,而在下班时间段(17:00~18:00)和晚高峰时间段(21:00~22:00)分别出现了负荷大幅的骤降和骤升,这是由于特殊时段的用电低谷和用电高峰引起的,加上该地电网的工厂用电,导致其负荷波动更大,并出现了较大无功缺额。情况与根据本文采用的健康诊断分析的结果基本一致。

通过对该地11月~次年1月连续三个月的健康诊断结果进行分析如图3所示,可知该地电网健康状态系统总体健康状况虽仍然处于“健康”等级,但部分项指标值较初始运行略有下降。进而对指标层、

要素层进行深入分析, 不难发现系统的负荷、电压、功率等均处于下降趋势, 是导致该地电网总体健康水平下降的主要原因。并且要素层的湿度项也有一定程度的下降, 说明了这段时间的气候的变化。结合数据采集分析的时间段(正好是秋季向冬季转换的过渡时段), 该地的系统负荷加重, 其负荷处于不稳定状态, 且用电峰谷扩大, 该地的冬季气候比秋季更加潮湿, 所以湿度项指标出现了下降趋势, 以上原因最终导致了健康程度的下降。针对以上结果, 有关部门可针对性采取应对措施, 比如: 对该地进行网络改造, 使其负荷转供能力增强, 针对当地冬季用电增加较多情况, 提高供电裕量等措施。

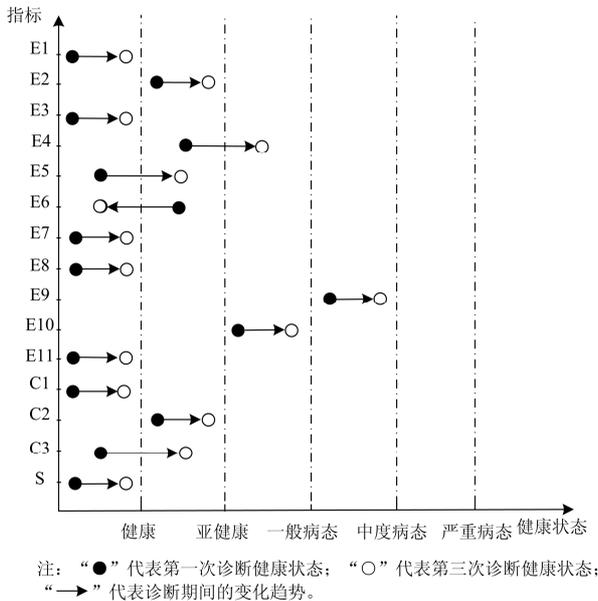


图3 指标变化趋势图

Fig. 3 Trend of indicators change

6 结论

(1) 本文在前人研究成果的基础上, 首次在电网健康诊断中加入故障指标项, 用潮流计算实现, 完善了指标体系。使电力系统健康诊断的结果更加具有说服力。

(2) 采用的AHP-熵值法计算各指标权重值, 充分利用实时数据, 使权重的确定比单一使用主观方法更加客观、符合实际。

(3) 将理论分析和电网实际运行状况进行对比分析, 结合实际情况, 对电网进行了健康诊断, 并且证明了本文方法的可行性和适用性, 可基本反映电网的总体情况, 确定其健康等级, 也给有关部门对电网进行改造和决策提供依据。

参考文献

- [1] 张逸, 林焱, 吴丹岳. 电能质量监测系统研究现状及发展趋势[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 138-147.
ZHANG Yi, LIN Yan, WU Danyue. Current status and development trend of power quality monitoring system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 138-147.
- [2] 胡殿刚, 张雪佼, 陈乃仕. 新能源发电项目多维度后评价方法体系研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(4): 10-17.
HU Diangang, ZHANG Xuejiao, CHEN Naishi. Research on multi-dimensional post evaluation methodology of new energy power generation projects[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(4): 10-17.
- [3] 杨贵, 孙磊, 李力. 区域保护与控制系统网络拓扑方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 101-107.
YANG Gui, SUN Lei, LI Li. Research on regional protection and control system network topology[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 101-107.
- [4] 顾雪平. 电力系统扩展黑启动方案的后效性研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(8): 238-246.
GU Xueping. Investigation on aftereffect of power system extended black-start schemes[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(8): 238-246.
- [5] 王成山. 微电网关键技术研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 1-12.
WANG Chengshan. Research on key technologies of microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 1-12.
- [6] 鞠平, 左英飞, 文福栓, 等. 电力系统健康诊断[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(6): 22-25.
JU Ping, ZUO Yingfei, WEN Fushuan, et al. Health diagnosis of power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(6): 22-25.
- [7] 栗秋华, 周林, 张凤, 等. 基于模糊理论和层次分析法的电力系统电压态势预警等级综合评估[J]. 电网技术, 2008, 32(4): 40-45.
LI Qiuhua, ZHOU Lin, ZHANG Feng, et al. Comprehensive evaluation of forewarning grade of voltage state and tendency in power systems based on fuzzy theory and analytic hierarchy process[J]. Power System Technology, 2008, 32(4): 40-45.
- [8] 叶剑华, 林济铿, 胡世骏, 等. 计及气象因素的电网静态安全指标体系[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(9): 59-64.
YE Jianhua, LIN Jikeng, HU Shijun, et al. Index system

of steady security of power grid considering meteorological factors[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2014, 26(9): 59-64.

[9] 谭熙静, 何正友. 基于层次分析法的复杂配电网健康诊断方法研究[J]. 继电器, 2006, 34(21): 1-7.
TAN Xijing, HE Zhengyou. Research on the health diagnosis of complex distribution network based on AHP method[J]. Relay, 2006, 34(21): 1-7.

[10] 张少敏, 栗军, 王保义. 竞争电力市场下的电网公司经营风险综合评价模型[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(8): 70-74.
ZHANG Shaomin, LI Jun, WANG Baoyi. Comprehensive evaluation model of grid corporation business risk under the competitive electricity market[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(8): 70-74.

[11] 熊以旺, 程浩忠, 王海群, 等. 基于改进 AHP 和概率统计的电能质量综合评估[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(13): 48-52.
XIONG Yiwang, CHENG Haozhong, WANG Haiqun, et al. Synthetic evaluation of power quality based on improved AHP and probability statistics[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(13): 48-52.

[12] 罗宏斌, 匡程新. 基于 AHP-熵权法的地方可持续支柱产业财源建设研究[J]. 湖南社会科学, 2011(5): 137-140.
LUO Hongbin, KUANG Chengxin. AHP-entropy method of local sustainable financial resources construction based on pillar industry[J]. Hunan Social Science, 2011(5): 137-140.

[13] 马蓉, 任强德, 张苏华, 等. 电气化铁路负荷电能质量监测评估分析[J]. 高压电器, 2014, 50(12): 79-83.
MA Rong, REN Qiangde, ZHANG Suhua, et al. Analysis on power quality monitoring and evaluation for electrical railway load[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(12): 79-83.

[14] 吴姜, 蔡泽祥, 胡春潮, 等. 基于模糊正态分布隶属函数的继电保护装置状态评估[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5): 48-52.
WU Jiang, CAI Zexiang, HU Chunchao, et al. Status evaluation of protective relays based on the membership function in fuzzy normal distribution[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(5): 48-52.

[15] 陈静, 李华强, 郑武, 等. 基于全局模糊指标的电力系统在线安全评估[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(18): 93-98.
CHEN Jing, LI Huaqiang, ZHENG Wu, et al. Power system on-line security assessment based on global fuzzy index[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(18): 93-98.

[16] 蔡晔. 基于标准化结构熵的电网结构对连锁故障的影响[J]. 电工技术学报, 2015, 30(3): 36-43.
CAI Hua. Influences of power grid structure on cascading failure based on standard structure entropy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(3): 36-43.

[17] 付蓉, 蒋国平, 王保云, 等. 计及系统连锁故障风险的电网预防控制[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(3): 12-17.
FU Rong, JIANG Guoping, WANG Baoyun, et al. A preventive control strategy for power grid considering system cascading failure risk[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(3): 12-17.

[18] 姚致清, 张茜, 刘喜梅, 等. 基于 PSCAD/EMTDC 的三相光伏并网发电系统仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(17): 76-81.
YAO Zhiqing, ZHANG Qian, LIU Ximei, et al. Research on simulation of a three-phase grid-connected photovoltaic generation system based on PSCAD/EMTDC[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(17): 76-81.

收稿日期: 2015-05-26; 修回日期: 2015-09-02

作者简介:

胡佳琳(1986-), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为新能源发电技术;

张炜(1988-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统状态评估, 健康诊断等; E-mail: 80021126zyew@163.com

操丹丹(1990-), 女, 硕士研究生, 研究方向为微电网三相潮流优化。

(编辑 葛艳娜)