

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.06.002

电力设备状态评价系统的开发与应用

武 星¹, 王 瑜¹, 殷晓刚¹, 刘 宇², 骆 虎³, 曾 创¹

(1. 西安高压电器研究院有限责任公司, 西安 710077; 2. 西安西电电气研究院有限责任公司, 西安 710000; 3. 宝光集团, 陕西 宝鸡 721000)

摘要: 随着国民经济的发展及智能化技术的不断进步,用户对用电质量的要求在不断提升。为了满足设备用户与电力管理部门对设备的实时运行状态、设备状态变化趋势、故障趋势及预测、设备可靠性的评估和系统可靠性评估方面的直接的、迫切的需求,需要对电力设备的可靠性进行深入研究,实现对设备状态的量化评估。在对电力设备的可靠性指标、可靠性试验方案、状态评价模型等一系列内容的探索性研究的基础上开发出一套基于特征阈值的开关设备状态评估系统。该系统采用模块化评估计算,多级结果耦合分析方法,实现对设备整体状态的实时评估,同时分别实现了系统的单独部署应用和嵌入数据平台中的应用。

关键词: 电力设备; 状态评价; 可靠性

Development and Application of Power Equipment Status Evaluation System

WU Xing¹, WANG Yu¹, YIN Xiaogang¹, LIU Yu², LUO Hu³, ZENG Chuang¹

(1. R&D Center, Xi'an High Voltage Apparatus Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710077, China; 2. Xi'an XD Electric Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710000, China; 3. Shaanxi Baoguang Group Co., Ltd., Shannxi Baoji 721000, China)

Abstract: With the development of the national economy and the continuous advancement of intelligent technology, the requirements for the quality of electricity are constantly increasing. In order to meet the direct and urgent needs of equipment users and electrical management departments for real-time operating status, status change trend, failure trend and reliability evaluation of equipment, the study of power equipment reliability is required, so as to realize the quantitative evaluation of equipment state. Based on a serial of exploratory research, including reliability index, reliability test plan and condition assessment model of power equipment, a status evaluation system of switch-gear based on characteristic threshold is developed. The system uses modular evaluation calculation, multi-level results coupling analysis and other methods to realize the real-time evaluation of the overall status of the equipment, and realizes the application of the system separately deployed and embedded in the data platform.

Key words: power equipment; status evaluation; reliability

0 引言

电力设备的可靠性是影响系统稳定的关键因素。设备不可靠带来的故障会引起直接的经济损失;设备可靠性状态不明晰则会使设备的运维难度增大,运维费用大幅增长^[1-9]。近年来随着智能运维技术需求的持续增长,泛在电力物联网技术发展的需求,设备用户与电力管理部门对设备的实时运行状态、设备状态变化趋势、故障趋势及预测、设备可靠性的评估和系统可靠性的评估有直接的、迫切的

需求。如何准确及时的对在运的电力设备做出评价,直接关系到设备是否能够安全稳定的服役,关系到系统是否能够提供稳定的高质量的电力服务,因此是电力行业非常关心也是亟待解决的问题之一。

1 电力设备状态评价系统开发的理论基础

1.1 电力设备可靠性理论

现有可靠性理论是基于电子设备的可靠性研究逐步形成的,其绝大部分方法和数学模型不能直接应用于非电子类产品中^[10-15]。要实现对电力设备

的可靠性评价首先要对电力设备的相关可靠性理论进行探索研究。

电力设备结构及功能都有自身的特点,设备本身由复杂的机械传动系统、一定的绝缘和金属结构、合理的载流主回路和充分考虑电、热、磁、流体耦合的灭弧单元组成。无论其中哪个方面,都涉及多个零件以及多种物理过程的相互作用,因此在考虑其可靠性分析时,具有非常大的难度^[16-18]。

对电力设备可靠性的研究,包括设备的失效模式、失效机理以及设备或系统的可靠性指标的研究等内容,都是确定后续评估模型的边界条件和阈值参数的技术基础,在此基础上才可以对设备的状态进行量化评估,进而实现对设备整体状态的评估和寿命预测。

1.2 评估模型的开发

研究初期采用专家论证搭建分析模型,同时收集运行数据进行分析和验证,建立了初步的评估算法和评估模型见图1。在此基础上再充分结合被评估电力设备的特点,参考和借鉴通用的可靠性理论和方法,例如故障树理论、FMEA理论等,通过专业分析、试验设计、试验验证、数据建模与验证等多种途径和手段,从电力产品的功能角度、结构特点出发,设计出可靠性试验的试验方案和数据采集方案,通过对数据的分析和整理,对评估模型中的评估阈值进行验证和优化,逐步开发出适用的数据模型和评估方法。用这种研究思路和方法,先后开发出了机械寿命评估模型,密封性能预测模型等,实现了以功能模块为单元的状态评估与预测^[19-21]。

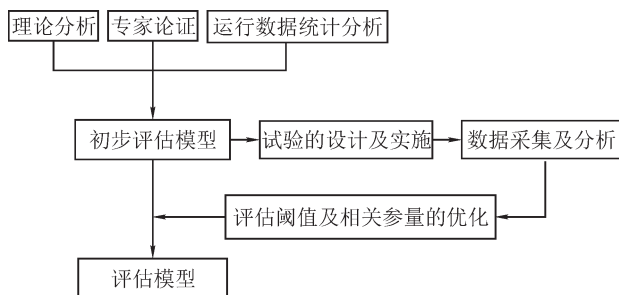


图1 评估模型开发流程示意图

Fig. 1 Evaluation model development process

1.3 模糊综合评价法简介

模糊综合评价法是一种基于模糊数学的综合评价方法。该综合评价法根据模糊数学的隶属度理论把定性评价转化为定量评价,即用模糊数学对受到多种因素制约的事物或对象做出一个总体的评价。

评估的过程一般包括构建评价指标、建立权重向量、构建评价矩阵以及评价矩阵与权重合成等主要步骤,最后得到综合评估结果。模糊综合评价法

的最显著特点是:

1.3.1 相互比较

以最优的评价因素值为基准,其评价值为1;其余欠优的评价因素依据欠优的程度得到相应的评价值。

1.3.2 函数关系

可以依据各类评价因素的特征,确定评价值与评价因素值之间的函数关系,即隶属度函数。确定隶属度函数的常用方法有二元对比排序法、模糊统计试验法和最小模糊度法等,常见的隶属度函数有三角形隶属度函数、梯形隶属度函数、高斯型隶属度函数等。隶属度函数的选择需要根据因素指标的特性而确定,在特定的情况下,也可以依据专家的经验,直接给出评价值。

模糊评价法具有结果清晰,系统性强的特点,能较好地解决模糊的、难以量化的问题,适合各种非确定性问题的解决。在面对多因素且复杂程度较高的问题时,可以通过该方法对多因素导致的权重因素进行有效的分配并予以解决,并且能够对各项因素进行层次划分,面向评价对象各方因素展开深入探究,因此具有其他评价方法难以比拟的应用优势^[22-23]。

2 评价系统的开发

评估系统的开发采用了模块化的开发模式,一方面是沿用前述评估模型的研究思路和方法,另一方面也使系统整体具有很强的可扩展性。

2.1 系统架构设计

为了全面评估设备的实时状态,一方面需要对设备寿命的总体表现进行评估,同时需要对设备的实时数据所反映出的设备各功能模块的状态进行评估,将两方面的表现结合起来可以得到比较准确的设备的状态评估结果。因此评估系统开发时,将整体评估模型分为一阶评定模块和二阶评定模块,一阶评定结果通过产品的运行数据和维护数据计算得到;二阶评定结果通过在可靠性评估模型中输入实时监测数据之后计算得到。

2.2 特征参量的提取

一阶评定的特征量是基于运行及维护数据计算得到的可靠性指标,比如平均寿命、无故障运行时间等;二阶评定的特征量是将产品划分模块后,由各个模块的特征参量组成的。以GIS的评估为例,首先依据产品的功能和结构特点,结合现有的监测信息量,将二阶评定部分划分为四个模块:机械性能模块、气密性能模型、载流性能模块和控制

辅助回路模块。之后提取出每个模块中的关键评价指标, 见图2。

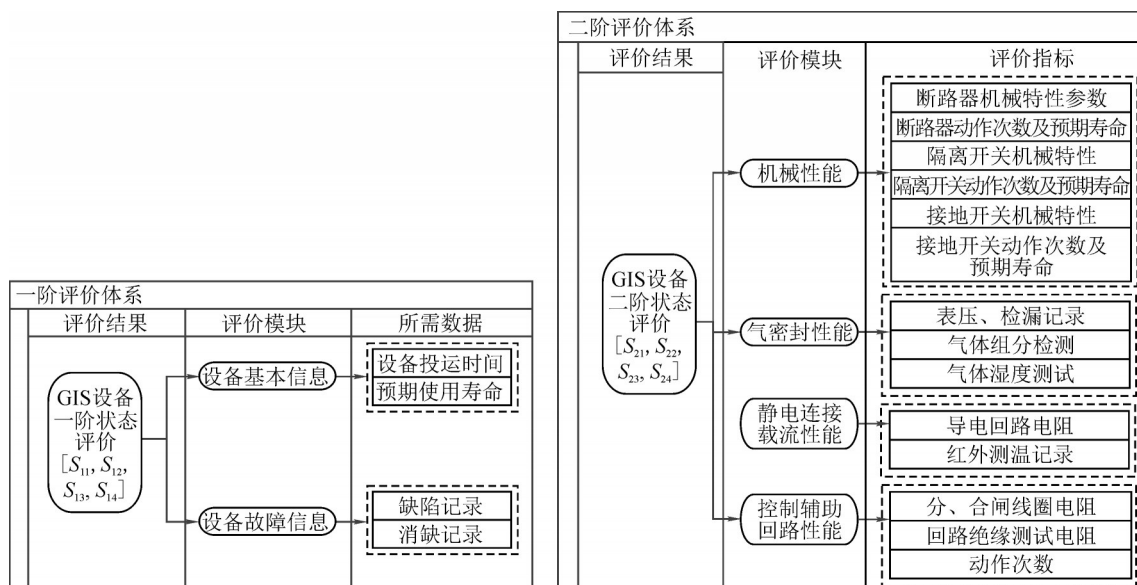


图2 系统各阶评价体系示意图

Fig. 2 Each stage of the evaluation system

2.3 特征量阈值的确定

评估模型中各个模块的评价阈值都是依据前述的可靠性研究成果而确定的, 参照图1所示的研究过程, 考虑到研究的延续性, 在系统开发时, 将这些参数作为可以设置和调整的, 但终端用户不能进行该项操作, 需要管理员权限的用户才能操作。

2.4 特征参量评估向量计算

各个特征参量的评价阈值确定之后, 根据该参数的输入值即可计算得到相应的评价向量。

2.4.1 各参量测量值(输入)的归一化

结合初始值和阈值等, 将测量值 x 归一化为 $\bar{x}$ 。假设参量阈值范围为 $100 \sim 1\ 100$, 则测量值 $x \leq 100$ 时归一化的测量值 $\bar{x} = 0$, $x > 1\ 100$ 时 $\bar{x} = 1$, $100 < x \leq 1\ 100$ 则按该参量测量值的分布规律来计算, 以常见的均匀分布为例来说明, 即 x 为 600 时 $\bar{x} = 0.5$ 。

2.4.2 建立评语向量

评语向量是根据最终评价结果的表达形式来确定的, 这里以4级划分为例, 设 v_1, v_2, v_3, v_4 分别对应良好、关注、异常、故障4个等级; 根据模糊理论中对隶属度函数的描述, 选择岭型分布函数通过式(1)~(4)计算归一化参量处于各状态等级的隶属度 $u(x_n)$, ($i = 1, 2, 3, 4$), 其中 x_n 为归一化参量; $a_1 \sim a_6$ 可以为归一化参量隶属于所评价参量的状态等级的边界值, 此处取值: $a_1 \sim a_6$ 的值分别为 $0.1, 0.3, 0.4, 0.6, 0.7, 0.9$; 各状态等级 $u_1 \sim u_4$ 的变化区间为 $0 \sim 0.3$ 、

$0.1 \sim 0.6, 0.4 \sim 0.9, 0.7 \sim 1$ 。

$$u_1(x_n) = \begin{cases} 1 & x_n \leq a_1 \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin\left[\frac{\pi}{a_2 - a_1} \left(x_n - \frac{a_1 + a_2}{2}\right)\right] & a_1 \leq x_n \leq a_2 \\ 0 & x_n \geq a_2 \end{cases} \quad (1)$$

$$u_2(x_n) = \begin{cases} \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin\left[\frac{\pi}{a_2 - a_1} \left(x_n - \frac{a_1 + a_2}{2}\right)\right] & a_1 \leq x_n \leq a_2 \\ 1 & a_2 \leq x_n \leq a_3 \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin\left[\frac{\pi}{a_4 - a_3} \left(x_n - \frac{a_3 + a_4}{2}\right)\right] & a_3 \leq x_n \leq a_4 \\ 0 & x_n \leq a_1 \text{ 或 } x_n \geq a_5 \end{cases} \quad (2)$$

$$u_3(x_n) = \begin{cases} \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin\left[\frac{\pi}{a_4 - a_3} \left(x_n - \frac{a_3 + a_4}{2}\right)\right] & a_3 \leq x_n \leq a_4 \\ 1 & a_4 \leq x_n \leq a_5 \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin\left[\frac{\pi}{a_6 - a_5} \left(x_n - \frac{a_5 + a_6}{2}\right)\right] & a_5 \leq x_n \leq a_6 \\ 0 & x_n \leq a_3 \text{ 或 } x_n \geq a_6 \end{cases} \quad (3)$$

$$u_4(x_n) = \begin{cases} 0 & x_n \leq a_5 \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin\left[\frac{\pi}{a_6 - a_5} \left(x_n - \frac{a_5 + a_6}{2}\right)\right] & a_5 \leq x_n \leq a_6 \\ 1 & x_n \geq a_6 \end{cases} \quad (4)$$

将归一化后的测量值代入评语的分布函数得到各评语隶属度, 即将 $\bar{x}$ 分别代入 u_{vk} 算式, 即可求得相应的评语向量 $[u_{v1}(\bar{x}), u_{v2}(\bar{x}), u_{v3}(\bar{x}), u_{v4}(\bar{x})]$

2.4.3 确定评价权重

1) 建立判断矩阵。在同一层且同一类的因素中, 将所有因素对于上一级因素的影响的重要程度做两两对比, 根据相对重要性的判断准则给出合适的标度数值, 从而形成判断矩阵

$$E = \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & \cdots & e_{1m} \\ e_{21} & e_{22} & \cdots & e_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e_{m1} & e_{m2} & \cdots & e_{mm} \end{bmatrix} \quad (5)$$

2)计算判断矩阵的最大特征值以检验一致性。
计算判断矩阵 E 的最大特征值 $\lambda_{\max}$,并将其代入式(6)

$$\begin{cases} CI = \frac{\lambda_{\max} - m}{m - 1} \\ CR = \frac{CI}{RI} \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中, m 为矩阵 E 的阶数; RI 为平均随机一致性指标,其取值见表1。

表1 参数取值表

Table 1 Parameter value

M	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
I	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.52	1.54

CR 值反映了判断矩阵的一致性。当 $CR=0$ 时,判断矩阵具有完全的一致性;一般在 $CR \leq 0.1$ 时,即认为判断矩阵满足一致性条件;否则需要调整判断矩阵 E 中元素的取值,重新计算 $\lambda_{\max}$ 和 CR 值并重新检验,直到取得满足一致性条件的判断矩阵。

3)由判断矩阵求权重向量。判断矩阵的最大特征值 $\lambda_{\max}$ 对应的特征向量经归一化处理即得权重向量。设第1个中间层因素包含 m 个底层参数,则该中间层因素对应的权重向量为 $A_l = [a_{l1}, a_{l2}, \dots, a_{lm}]$ 。

也可以使用根法等简化算法求归一化的权重向量。其中根法的计算公式为

$$a_{li} = \frac{\sqrt[m]{\prod_{j=1}^m e_{ij}}}{\sum_{i=1}^m \sqrt[m]{\prod_{j=1}^m e_{ij}}} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (7)$$

4)计算评语向量。由权重向量与评语向量乘积得到该特征参量的评语向量 $[S_{j1}, S_{j2}, S_{j3}, S_{j4}]$ 。

2.5 各模块评估向量计算

对各个评价指标按照上述的计算过程,计算得到各个特征参量的评语向量后,模块中各特征参量的评语向量组成该模块的评语矩阵,与该模块的权重向量相乘,即可得到该模块的评估向量 $[S_{n1}, S_{n2}, S_{n3}, S_{n4}]$ 。

2.6 综合评估结果计算

根据产品类型及结构,选择所需的算法进行耦合,耦合计算过程的思路与CHP计算过程类同。耦合过程各模块的权重需要根据所评价产品的类型及目标进行设置,需要算法管理人员对该参数进行设置和调整。最终得到的综合评估结果的评估向量 $[S_1, S_2, S_3, S_4]$,根据该向量的数值可以得到最终的状态评价结果,见图3。

3 应用案例

模型整体是以模块化算法的形式实现的,系统

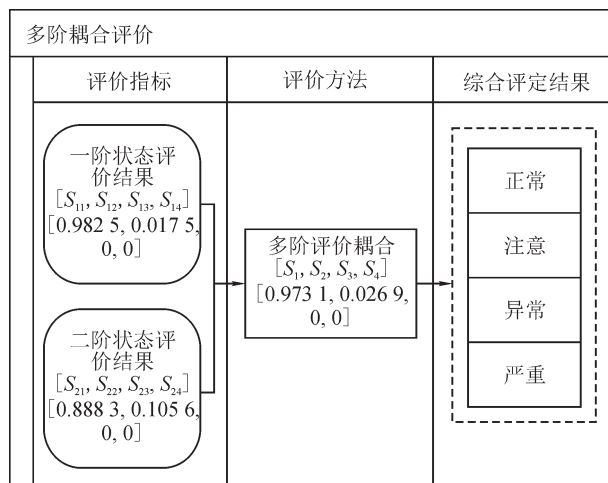


图3 综合评价模型的评估结果示意图

Fig. 3 The evaluation results of the comprehensive evaluation model

及各模块都可单独运行和展示,也可以嵌入客户的系统平台中被调用使用,可以根据客户具体的需求和资源配置情况做灵活调整。

3.1 独立部署案例

上述评价系统部署在独立的服务器上,可以依据已有数据库中的数据进行计算评价。部署在独立服务器上的运行界面见图4。

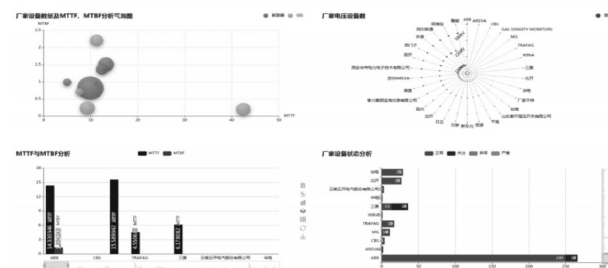


图4 独立部署系统运行界面展示

Fig. 4 System interface of independent deployment

3.2 嵌入式应用案例

该评价系统嵌入式应用在广州供电局大数据分析平台见图5。该应用案例不仅利用了各个可靠性评估模型的评估结果,同时充分利用了大数据平台中的多维数据,对各个维度的数据进行强弱关联

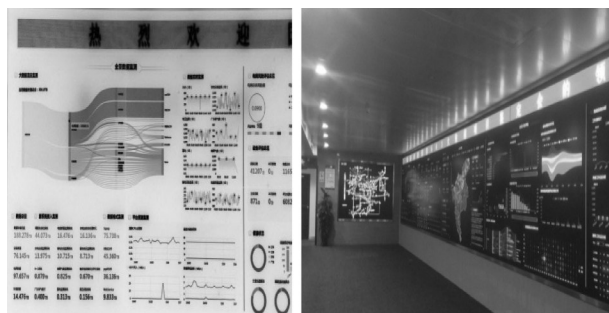


图5 嵌入式部署于大数据分析平台中

Fig. 5 Embedded deployment in big data analysis platform

关系的区分并分别加以应用,进一步提升了系统动态评估的准确性。目前该系统已实现对广州局辖区2 600余台高压断路器及GIS设备的实时状态评估及故障预测,覆盖率达100%,系统运行稳定,经用户测评,该系统的评估准确率达到93.1%,得到用户的肯定和认可。

4 结论与展望

电力设备可靠性研究没有经验可循,需要逐步探索,在理论研究的基础上进行试验验证,积累数据并建立评价模型,从局部模型逐步搭建成为整机模型。项目团队经过十余年的积累,形成了一套功能初步满足需求的评价体系,实现了试点应用。

该评价系统不仅适用于传统的电力设备,同时也适用于新一代的智能电力设备,智能设备可以采集的信息量更丰富,对于提升评估结果的准确性有很好的辅助作用。

数据的数量和质量很重要,因此数据的积累工作非常重要。评价结果的准确性很大程度上取决于数据的准确性,精准的模型还需要精准的数据才能得出结果。

对设备实时状态的评价及故障预警的实现,是工业互联网技术目标实现的基础。如今,电力大数据越来越受到重视,相信在一定的数据积累的基础上,加上对各种类型电力设备可靠性指标的深入研究,在不远的将来可以实现对各种设备实时状态的评估。

笔者介绍的评估系统是项目团队在电力设备可靠性领域内十余年研究的基础上所开发出的成果,但对于电力设备可靠性研究这个长期的课题来说,还只是一个阶段性的成果,需要在后续的研究工作中不断完善和优化。

参考文献:

[1] 孙建锋,葛睿,郑力,等.2010年国家电网安全运行情况[J].中国电力,2011,44(5):1-4.

SUN Jianfeng, GE Rui, ZHENG Li, et al. Analysis of state grid security operation in 2010[J]. Electric Power, 2011, 44 (5):1-4.

[2] 马珂,王轶禹,董昱.2009年国家电网安全运行情况[J].中国电力,2010,43(11):1-4.

MA Ke, WANG Yiyu, DONG Yu. Analysis of state grid security operation in 2009[J]. Electric Power, 2010, 43 (11):1-4.

[3] 罗治强,董昱,胡超凡.2008年国家电网安全运行情况[J].中国电力,2009,42(5):8-12.

LUO Zhiqiang, DONG Yu, HU Chaofan. Analysis of state grid security in 2008[J]. Electric Power, 2009, 42(5): 8-12.

[4] 赵晔,罗治强,赵玉柱.2007年国家电网安全运行情况[J].中国电力,2008(5):65-69.

ZHAO Ye, LUO Zhiqiang, ZHAO Yuzhu. Analysis of national power grid security in 2007[J]. Electric Power, 2008, 41(5):65-69.

[5] 胡超凡,董昱,王轶禹,等.2006年国家电网安全运行情况[J].中国电力,2007(5):23-27.

HU Chaofan, DONG Yu, WANG Yiyu, et al. Analysis of national power grid security in 2006[J]. Electric Power, 2007, 40(5):23-27.

[6] 刘晓燕.基于全寿命周期管理的电力设备状态检修成本研究[J].江苏电机工程,2016,35(5):74-76.

LIU Xiaoyan. Study on electrical equipment condition - based maintenance cost with life cycle cost theory[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2016, 35(5):74-76.

[7] 李鸿雁.全寿命周期成本在国家电网公司招标管理中的应用研究[D].北京:华北电力大学,2012.

LI Hongyan. Studies of the applications of life cycle cost on bidding management in state grid corporation of China[D]. Beijing:North China Electric Power University, 2012.

[8] 王璟儒,李川,肖定垚,等.考虑风险度量与成本最优的电网资产全寿命周期管理问题[J].电网与清洁能源,2014,30(11):26-31.

WANG Jingru, LI Chuan, XIAO Dingyao, et al. Whole life-cycle management of grid assets considering risk measurement and LCC optimization[J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(11):26-31.

[9] 张欣阳.电建企业资产全寿命周期管理研究[D].杭州:浙江大学,2012.

ZHANG Xinyang. Research on life cycle asset management of electric power construction enterprises[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.

[10] 赵宇.可靠性数据分析[M].北京:国防工业出版社,2011.

ZHAO Yu. Data analysis of reliability[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011.

[11] 吴子杰.输变电设备可靠性评估方法研究[D].广州:华南理工大学,2018.

- WU Zijie. Study on reliability assessment for transmission and transformation equipment[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.
- [12] 陈 循, 张春华. 加速寿命试验技术与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
- CHEN Xun, ZHANG Chunhua. Accelerated life testing technology and application[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013.
- [13] EBELING C E. 可靠性与维修性工程概论[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.
- EBELING C E. An introduction to reliability and maintainability engineering[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010.
- [14] 姜同敏. 可靠性与寿命试验[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
- JIANG Tongmin. Reliability and life test[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012.
- [15] 曾声奎. 可靠性设计与分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- ZENG Shengkui. Reliability design and analysis[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011.
- [16] 武 星, 游一民, 成 勇, 等. 高压开关设备可靠性评价指标及计算方法探究[J]. 高压电器, 2012, 48(5): 93-98.
- WU Xing, YOU Yimin, CHENG Yong, et al. Research on reliability evaluation indices and calculation method for high voltage power equipment[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(5): 93-98.
- [17] 武 星, 殷晓刚, 魏 泉, 等. 电力产品可靠性研究的本质动因和前景展望[J]. 高压电器, 2011, 47(10): 75-80.
- WU Xing, YIN Xiaogang, WEI Quan, et al. Motivation and prospect of research on reliability for electrical equipment[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(10): 75-80.
- [18] 魏 泉, 成 勇, 武 星, 等. 浅析高压SF₆断路器可靠性研究的特点和难点[J]. 高压电器, 2013, 49(11): 82-87.
- WEI Quan, CHENG Yong, WU Xing, et al. Discussion of characteristics and difficulties on reliability research of high-voltage SF₆ circuit - breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(11): 82-87.
- [19] 史亚斌, 殷晓刚, 武 星, 等. 高压开关设备可靠性数据库的开发与应用[J]. 高压电器, 2014, 50(6): 133-138.
- SHI Yabin, YIN Xiaogang, WU Xing, et al. Development and application of the high - voltage switchgear reliability database[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(6): 133-138.
- [20] 成 勇, 张 欣, 刘 宇, 等. GIS设备气密封O型圈老化及其使用寿命的试验研究[J]. 高压电器, 2016, 52(11): 88-94.
- CHEN Yong, ZHANG Xin, LIU Yu, et al. Research on aging and working life of the O type sealing ring used in GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(11): 88-94.
- [21] 王 静, 许艳蒲, 张 欣, 等. 液压机构储能电机启动次数与寿命的研究分析[J]. 高压电器, 2018, 54(2): 218-223.
- WANG Jing, XU Yanfu, ZHANG Xin, et al. Research and analysis of the starting times and life of energy - store motor in hydraulic operating mechanism[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(2): 218-223.
- [22] 任 宁. 输变电工程项目后评价研究[D]. 济南: 山东大学, 2017.
- REN Ning. Research on post-evaluation of power transmission and transformation project[D]. Jinan: Shandong University, 2017.
- [23] 叶 珍. 基于AHP的模糊综合评价方法研究及应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
- YE Zhen. Study and application of fuzzy comprehensive evaluation based on AHP[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010.
- 武 星(1977—), 女, 硕士研究生, 高级工程师, 主要从事智能电网、电力设备可靠性技术等研究。

(上接第6页)

- [11] 彭在兴, 王 颂, 易 林, 等. 基于SVM主成分分析的高压断路器分合闸线圈故障诊断研究[J]. 高压电器, 2019, 55(7): 39-46.
- PENG Zaixing, WANG Song, YI Lin, et al. Research on fault diagnosis of opening and closing coil of high voltage circuit breaker based on SVM principal component analysis[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(7): 39-46.
- [12] 李立涅, 饶 宏, 董旭柱, 等. 计算高电压工程学的思考与展望[J]. 高电压技术, 2018, 44(11): 3441-3453.
- LI Licheng, RAO Hong, DONG Xuzhu, et al. Thinking and Prospect of computing high voltage engineering[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(11): 3441-3453.
- [13] 刘有为, 肖 燕. 智能高压开关设备可靠性自评估方法[J]. 电网技术, 2015, 39(3): 862-866.
- LIU Youwei, XIAO Yan. Self evaluation method for reliability of intelligent high voltage switchgear[J]. Grid Technology, 2015, 39(3): 862-866.
- 彭在兴(1979—), 男, 高级工程师, 硕士研究生, 主要从事高压开关设备及其运行技术研究。
- 王 颂(1983—), 男, 高级工程师, 硕士研究生, 主要从事变电设备及其运行技术研究。