

基于综合健康指数的设备状态评估

杨春波¹, 陶青², 张健¹, 程志友², 凡远柱³

(1. 国网安徽省电力有限公司, 安徽 合肥 230061; 2. 教育部电能质量工程研究中心, 安徽 合肥 230601;
3. 安徽南瑞继远电网技术有限公司, 安徽 合肥 230088)

摘要: 将健康指数作为表征设备整体健康状态优劣的指标, 构建了设备健康状态的综合评估模型。在利用设备多个特征参数变化来反映设备运行状态的基础上, 参照电力设备健康状况老化公式, 提出了一个变量健康因子对设备运行状态健康指数进行修正。为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。最后, 建立一种基于时间序列分析的非线性关系模型来拟合设备综合健康指数的变化趋势, 评估未来健康状态并预测维护时间节点。利用该评估模型对某制氧厂的空压机进行了实例分析, 结果表明该模型具有一定的有效性与合理性。

关键词: 健康指数; 健康状态评估; 健康因子; 非线性拟合; 空压机

Equipment status evaluation based on comprehensive health index

YANG Chunbo¹, TAO Qing², ZHANG Jian¹, CHENG Zhiyou², FAN Yuanzhu³

(1. State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Hefei 230061, China; 2. Power Quality Engineering Research Center, Ministry of Education, Hefei 230601, China; 3. Anhui Nanruijuyuan Power Grid Technology Co., Ltd., Hefei 230088, China)

Abstract: The health index is used to indicate the overall health status of the equipment, based on which a comprehensive evaluation model is constructed. A variable health factor is proposed to revise the health index of the equipment according to the aging formula of the power equipment health condition and multiple characteristic parameters of the equipment that reflect the operating state of the equipment. In order to comprehensively consider the importance of equipment characteristic parameters, the combination of the order relation method and the entropy weight method is utilized for the calculation method of the weight value of the feature parameter, which leads to more reasonable establishment of the comprehensive evaluation system of the equipment health condition. Finally, a nonlinear relation model based on time series analysis is developed to fit the trend comprehensive health index of the equipment, evaluate the future health status and predict the maintenance time node. This model is used to analyze the air compressor of an oxygen plant, and the results show that the model is effective and reasonable.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61672032) and Science and Technology Project of Anhui Province (No. 1604a0702016).

Key words: health index; health status assessment; health factor; nonlinear fitting; air compressor

0 引言

目前, 国内外电网出现大停电等事故的原因除了电网运行故障外, 电力设备的自身故障也是一项重要因素, 保证电网稳定的基础是电力设备的安全运行。实时评估设备健康状态是一项复杂且困难的

工作, 对于提高设备的可靠性具有重要意义。西方国家首先提出了电力设备的故障预测与健康管理办法, 健康状态评估^[1-2]是其中的一项关键技术, 即通过某些重要特征参数的变化对电力设备的安全运行进行监测, 依靠真实数据和可靠方法来评判设备本身健康状况, 甚至进行科学的故障诊断和隔离, 以采取必要措施缓解设备的性能退化。健康指数^[3-4]是用来衡量和表征设备健康状态的一个量化数值, 关于电力电气设备健康管理领域的多数研究中都有

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(61672032); 安徽省科技攻关项目资助(1604a0702016)

此项指标, 且取值范围也不尽相同。另外, 健康状态预测和寿命预测也是一项重点, 就是综合利用设备的性能参数和运行特性, 结合历史监测数据和实时性能信息等, 对故障时间和剩余寿命进行预测。

针对单机电力设备或系统的故障诊断、健康状态评估的相关研究甚多, 但是大多围绕某关键特征参数为研究点来评估设备健康状态, 缺乏综合全面的健康评估及未来状态预测的方案。比如文献[5]引入隶属度与灰度概念, 将模糊层次关系运用于评价因素和设备状态关系的描述并建立了设备运行状态综合评估模型。通过高压断路器的实例分析表明了该模型的可行性, 但更合理的计算权重系数有待进一步研究。文献[6]以单设备系统为研究对象, 从设备的运行状态出发, 通过改进隐式马尔可夫模型的训练算法及引入老化因子, 构建了设备退化过程并提出了设备状态诊断研究方法, 但在老化因子最优形式的确定和进行设备状态值的预测方面还未做研究说明。文献[7]基于相关配变运行状态属性数据和信息熵理论, 结合多种属性的指标阈值和权重值, 提出配电变压器运行状态的大数据分析评估方法, 能够有效反映配电变压器的整体运行状态并相应地提高故障预测水平。

本文建立了完整的设备健康状态评估模型, 首先考虑设备的多个特征参数对运行性能的影响, 综合考虑特征参数间的均衡性, 结合序关系法和熵权法改进了特征参数权重值的计算。随后改进了老化健康指数公式, 提出一个变量健康因子对设备运行健康指数结果作出修正, 得到综合健康指数的计算公式。最后, 建立基于设备历史数据的非线性模型拟合出综合健康指数随运行时间的变化趋势, 评估设备未来健康状态以及预测检修维护的时间节点, 提高设备运行过程的稳定性和可靠性。

1 特征参数组合权重

影响设备运行状态的特征参数有很多, 每一类特征对设备运行状态的反映都具备其自身的优势与局限性^[8]。在设备健康状态评估体系中, 需要针对设备典型故障及现场实际状况, 尽可能选取最具代表性和方便测量的特征参数。权重的确定对于计算设备运行健康指数至关重要, 权重值反映了每个特征参数影响设备运行状态的重要程度, 合理的权重分配是准确评估设备运行状态的依据^[9-11]。序关系分析法^[12]是一种将定性分析和定量分析相结合的分析方法, 常用于分析确定权重系数的问题中。首先对特征参数进行两两相互重要性比较, 根据专家经验按特征参数重要程度进行排序: $y_1 > y_2 > \dots > y_n$;

再确定相邻两指标 y_{j+1} 和 y_j 间的相对重要性程度, 得到各个特征参数的权重系数为

$$p_{j+1} = (1 + \sum_{j=1}^{n-1} \prod_{k=j}^{n-1} \frac{y_j}{y_{j+1}})^{-1} \quad (1)$$

$$p_j = (\frac{y_j}{y_{j+1}})^{-1} p_{j+1}, j = 1, 2, \dots, n-1 \quad (2)$$

式中, p_j 为利用序关系法得到的第 j 个特征参数的权重值。

由于序关系法分配权重受主观任意性的影响, 结果依赖于专家经验知识, 为尽量排除主观因素的影响, 利用一种依据客观数据关系的熵权法^[13-14]重新分配权重。熵权法是基于特征参数的变异程度, 通过信息熵得到各特征参数的熵权, 进而获取各特征参数的权重的方法。某项指标的差异越大, 熵权越小, 表明该指标提供的信息量越大, 在评价中所起作用越大, 权值就越大。计算公式为

$$y'_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sum_{i=1}^m y_{ij}} \quad (3)$$

$$e_j = -\frac{1}{\ln n} y'_{ij} \sum_{i=1}^m y'_{ij} \quad (4)$$

$$q_j = \frac{1 - e_j}{n - \sum_{j=1}^n e_j} \quad (5)$$

式中: y_{ij} 为样本数据; y'_{ij} 为第 j 个特征参数下第 i 个样本数据所占比重; m 为样本数据数量; n 为特征参数数量; e_j 为第 j 个特征参数的熵权; q_j 为利用熵权法得到的第 j 个特征参数的权重值。

为使组合权重与 p 和 q 尽可能接近以达到主观和客观的统一, 建立最小二乘法^[15-16]优化模型来获取组合权重 ω 。

$$\begin{cases} \min H(\omega) = \sum_{j=1}^n [(\omega_j - p_j)^2 + (\omega_j - q_j)^2] \\ \text{s.t. } \sum_{j=1}^n \omega_j = 1, \omega_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (6)$$

2 设备运行健康指数

通过综合分析及设备运行状态相关的诸多影响因素, 得到体现健康状态的量化数值即为设备的影健康指数。将设备健康指数记为 HV , 且规定 HV 的取值范围为 $[0, 1]$, HV 越接近 1 表明设备的健康状况越好, 反之, HV 越接近 0 表明设备的健康状况越差。设备的运行状态是其健康状态的直接反映, 假如设备某处出现异常或故障, 则在监测到的特征参

数数据中, 必然有一项或者多项参数就会偏离正常值^[17-18]。因此, 设备运行状态健康指数就是指设备的特征参数在工作运转中与期望的正常值相比较的下跌或偏差程度^[19], 其计算遵循以下规则: 当实际测量值超过正常运行极限值时, 健康指数为 0, 表示设备崩溃, 应立即停机检修; 当实际测量值刚好等于标准值时, 健康指数为 1, 表示设备健康状态最优; 当实际测量值在正常运行极限值范围之间时, 健康指数的计算公式为

$$hv_j(t) = \begin{cases} \frac{y_j(t) - y_{\min}}{\bar{y}_j(t) - y_{\min}}, & y_j(t) \in [y_{\min}, \bar{y}_j(t)] \\ \frac{y_{\max} - y_j(t)}{y_{\max} - \bar{y}_j(t)}, & y_j(t) \in [\bar{y}_j(t), y_{\max}] \end{cases} \quad (7)$$

式中: $hv_j(t)$ 为设备的第 j 个特征参数在 t 时间的健康指数, 计算结果为 (0, 1) 之间的数值; y_{\max} 和 y_{\min} 为设备正常工作时各个特征参数的极限值; $y_j(t)$ 为第 j 个特征参数在 t 时间的实测值; $\bar{y}_j(t)$ 为该参数在 t 时间的标准值, 其值随着时间的变化而变化, 可以经过整理、分析和统计设备的设计参数和历史数据得到。设备单个特征参数的健康指数计算出来之后, 再确定各个特征参数的权重, 即可对多个特征参数健康状态进行评估, 设备运行状态健康指数的计算公式为

$$HV_r(t) = \sum_{j=1}^n \omega_j \cdot hv_j(t) \quad (8)$$

式中: $HV_r(t)$ 为设备运行健康指数; ω_j 为第 j 个特征参数的组合权重, 且 $\sum_{j=1}^n \omega_j = 1$ 。

3 设备综合健康指数

3.1 设备健康因子

引入目前欧美地区广泛应用于设备状态评估的老化健康指数经验公式^[20-21], 该公式由英国 EA 公司根据设备老化原理描述出设备健康指数随运行时间呈指数退化的趋势。改进老化健康指数的计算公式为

$$HV_a(t) = 1 - (1 - HV_0) e^{B(t-t_0)} \quad (9)$$

式中: t_0 为新设备初始投运时间; t 为设备被评估时对应时间; B 为老化系数; HV_0 为设备在 t_0 时间的初始老化健康指数, 可以取多台同类型新投运设备健康指数的平均值; HV_a 为在 t 时间的老化健康指数, 为求其值, 先要估算出设备的预期运行寿命 T_d 和老化系数 B , T_d 与 B 的计算公式为

$$T_d = \frac{T_D}{f_1 \cdot f_e} \quad (10)$$

$$B = \frac{\ln(1 - HV_n) - \ln(1 - HV_0)}{T_d} \quad (11)$$

式中: T_D 为设备的设计寿命, 可以从生产厂家获得; f_1 为负荷修正系数; f_e 为环境修正系数; HV_n 指设备退役时的健康指数, 可取多台同类型设备退役时健康指数的平均值。

将设备的老化纳入考虑范围, 定义一个变量健康因子 μ , 定义为

$$\mu(t) = \frac{HV_a(t)}{HV_0} \quad (12)$$

3.2 综合健康评估

随着设备运行时间的增加, 设备一般遵循式(9)指数形式的退化, 故而在评估设备整体状态时, 不能仅仅将选定特征参数的相对变化作为失效依据, 故利用上述定义的变量健康因子对设备运行健康指数结果进行修正, 得到设备综合健康指数 HV 为

$$HV(t) = \mu(t) \cdot HV_r(t) \quad (13)$$

现实中, 大多数工作状态下的设备在不对其进行任何维护时, 设备的性能会逐渐变差, 从而转入更差的健康状态。随着设备运行时间的增加, 设备综合健康指数应该是从初始的 1 逐渐减小, 表明其健康状态正在逐步退化, 直到某一时间综合健康指数将达到某一数值, 表明该设备需要维护, 否则即将进入故障状态。

为了能够正确预测设备需要维护的时间节点, 防止设备性能加剧退化, 本文构建一种基于时间序列分析的非线性模型来评估设备未来健康状态。即将设备综合健康指数随时间 t 的推移而形成的实际样本数据序列视为一个长度为 n 的随机序列 $HV(t) = \{HV(t_1), HV(t_2), HV(t_3), \dots, HV(t_n)\}$ 。并且建立合适的非线性模型描述此序列, 拟合出与历史数据最符合的曲线来估计后续变化趋势, 根据规律评估设备未来时刻的健康指数^[22], 并且找到设备需要维护的时间。构建的非线性模型为

$$HV(t) = \sum_{i=1}^n \sigma_i \cdot t^{n-i} \quad (14)$$

式中: n 为多项式拟合次数; σ_i 为拟合系数; t 为监测时间。

4 实例分析

空压机作为制氧系统的关键设备, 分析研究其健康状态, 对于改善空压机运行稳定性和保障制氧系统安全生产都具有十分重要的意义。本文对某制

氧厂 2014 年 1 月采购的一台空压机进行实例评估。由于目前针对空压机的健康评估研究较少, 对于建立健康评估体系没有明确的行业标准, 相关算法还在不断探索中。鉴于目前实际情况, 且空压机综合健康状态评估的量化结果 HV 为 0~1 之间的一个具体数值, 本文根据企业实际数据和专家经验将空压机状态分为健康、比较健康、亚健康、异常、故障和严重故障 5 个等级, 空压机健康指数与健康状态等级之间的映射关系见表 1。

表 1 空压机综合健康指数评估等级
Table 1 Comprehensive health index evaluation grade of air compressor

等级	健康指数取值范围	健康等级	健康状况描述
I	[0.85,1]	健康	健康状况非常好, 设备很安全
II	[0.65,0.85)	比较健康	健康状况良好, 设备比较安全
III	[0.45,0.65)	亚健康	设备不太安全, 出现轻微的异常征兆, 应加强监测并排除故障
IV	[0.25,0.45)	故障	设备非常不安全, 出现非常严重的异常征兆, 应尽快安排检修
V	[0,0.25)	严重故障	设备无法运行, 必须检修

该空压机已运行 180 周, 采集与空压机正常运行至关重要的电压、转速、有功功率、电动机的轴径向位移和噪声这 5 个特征参数的数据, 可计算出这 5 个特征参数的组合权重值分别为 0.32、0.18、0.14、0.26 和 0.10。根据空压机设计参数和实际运行数据, 可以拟合得到选定特征参数时间函数并提取出 t 时间的各设备特征参数相关数据, 见表 2 所列。

表 2 空压机各指标数值
Table 2 Each index value of air compressor

特征参数	电压/kV	转速/rpm	有功功率/MW	轴径向位移/mm	噪声/dB
组合权重	0.32	0.18	0.14	0.26	0.10
正常值	9.6~10.4	600~1200	0~7.5	2~50	不大于 60
实测值	9.96	677.6	6.953	8	55
特征参数健康指数	0.6	0.485	0.842	0.75	0.5

按式(7)可计算出此时各个特征参数的健康指数, 由式(8)可计算得到设备运行健康指数 HV_t 为 0.642 2。

已知该空压机平均负荷率为 40%~60%, T_D 为 521 周, 环境等级为 3, 查得负荷系数 f_1 为 1.05, 环境系数 f_2 为 1.05。通过对区域内多台空压机分析后取初始健康指数为 0.95, 退役时的健康指数取

0.15。故由式(10)、式(11)计算得到预期运行寿命 T_d 为 472.56 周, 老化系数 B 为 0.006。根据式(9)计算得知此时该空压机老化健康指数 HV_a 为 0.852 8, 故健康因子 μ 为 0.899 6。

由式(13)得此时该空压机综合健康指数 HV 为 0.577 7, 由表 2 可知该空压机处于亚健康状态, 不太安全则应该加强监测。

通过采集设备综合健康指数历史数据, 拟合出一条与历史数据最符合的曲线, 达到预测未来时刻健康指数和维护时间节点的目的。每周以 95% 的概率最大值采集样本数据, 共采集该空压机自投运起正常运行状况下的 180 周原始数据。通过本文所述的综合健康状态评估方法计算空压机综合健康指数, 运用 Matlab 曲线拟合工具箱进行对应的样本数据拟合。该空压机综合健康指数随时间变化的拟合曲线图如图 1。

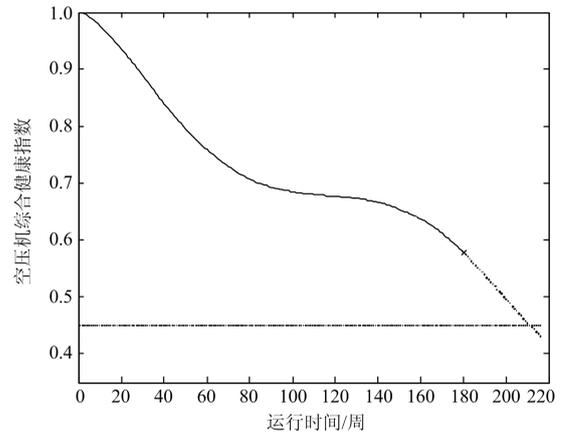


图 1 空压机综合健康指数拟合

Fig. 1 Comprehensive health index fitting of air compressor

基于式(14)得到拟合的设备综合健康指数关于运行时间的非线性表达式为

$$HV(t) = 1.695 \times 10^{-11} \times t^5 - 9.779 \times 10^{-9} \times t^4 + 1.855 \times 10^{-6} \times t^3 - 1.198 \times 10^{-4} \times t^2 - 0.001664 \times t + 1.003$$

根据该非线性表达式, 可以求出当 t 为 210.95 时, 即该空压机运行了大约 211 周时, 其综合健康指数会达到 0.45, 表明此时该空压机健康等级达到 IV 级, 需要安排这台空压机进行检修维护。结合该制氧厂同类型的某台空压机实际运行状况, 显示其大修时间为 213 周, 证明了该模型的有效性, 表明能够通过综合健康指数曲线拟合预测得到设备需要维护时间节点, 进而通过提前对设备进行检修维护, 防止其状态继续恶化, 能够避免设备部件过早损坏, 甚至延长设备使用寿命。

5 结论

本文将对于设备健康状况的描述量化为健康指数, 首先合理选择特征参数建立起设备运行状态评估模型, 基于序关系法, 结合熵权法重新确定特征参数的组合权重。参照英国 EA 公司关于电力设备的老化公式, 提出变量健康因子对设备运行状态健康指数进行修正, 克服了单一参量评估的片面性, 建立了设备健康状态的综合评估方法。最后通过建立基于时间序列分析的非线性模型来描述设备综合健康指数随运行时间的退化, 通过拟合历史数据预测设备未来健康状态和维护时间节点, 以便提前对设备进行维护工作。通过空压机的实例分析表明, 本文所建立的综合评估方法有效可行, 能够评估空压机当前的健康状况, 并且预测出未来健康状态及维护时间节点。

参考文献

[1] 张凤霞, 米根锁. 基于健康指数的轨道电路设备寿命预测方法的研究[J]. 铁道学报, 2015, 37(12): 61-66.
ZHANG Fengxia, MI Gensuo. Research on life prediction methods for track circuit equipment based on health index[J]. Journal of the China Railway Society, 2015, 37(12): 61-66.

[2] 苗红霞, 萧旋旋, 江冰. 基于信息融合的预装式变电站健康状态评估[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(14): 85-91.
MIAO Hongxia, XIAO Xuanxuan, JIANG Bing. State evaluation of prefabricated substation based on information fusion[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(14): 85-91.

[3] 史常凯, 宁昕, 孙智涛, 等. 基于设备实时健康指数的配电网风险量化评估[J]. 高电压技术, 2018, 44(2): 534-540.
SHI Changkai, NING Xin, SUN Zhitao, et al. Quantitative risk assessment of distribution network based on real-time health index of equipment[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(2): 534-540.

[4] 周莉梅, 马钊, 盛万兴. 现代配电网健康指数理论最新研究进展[J]. 供用电, 2016, 33(1): 3-7.
ZHOU Limei, MA Zhao, SHENG Wanxing. Recent development of health index theory for modern distribution network[J]. Distribution & Utilization, 2016, 33(1): 3-7.

[5] 国连玉, 李可军, 梁永亮, 等. 基于灰色模糊综合评判的高压断路器状态评估[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(11): 161-167.
GUO Lianyu, LI Kejun, LIANG Yongliang, et al. HV

circuit breaker state assessment based on gray-fuzzy comprehensive evaluation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(11): 161-167.

[6] 李丹. 考虑退化隐式马尔可夫过程的设备状态诊断研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
LI Dan. Research on machinery diagnosis based on deteriorating hidden Markov Process[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.

[7] 张友强, 寇凌峰, 盛万兴, 等. 配电变压器运行状态评估的大数据分析方法[J]. 电网技术, 2016, 40(3): 768-773.
ZHANG Youqiang, KOU Lingfeng, SHENG Wanxing, et al. Big data analytical method for operating state assessment of distribution transformer[J]. Power System Technology, 2016, 40(3): 768-773.

[8] 万凌云, 王主丁, 庞祥瑞, 等. 中压配电网可靠性评估参数收集及其规划应用[J]. 供用电, 2017, 34(6): 38-43.
WAN Lingyun, WANG Zhuding, PANG Xianglu, et al. Parameter collection and planning application of medium voltage distribution system reliability assessment[J]. Distribution & Utilization, 2017, 34(6): 38-43.

[9] 周名煜, 谢宁, 王承民. 基于灵敏度和灰色关联度的配电网运行方式变权重评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(13): 130-137.
ZHOU Mingyu, XIE Ning, WANG Chengmin. Variable weight evaluation method of distribution network operation mode based on sensitivity and grey correlation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(13): 130-137.

[10] 郭亚军. 综合评价理论、方法及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007.

[11] 翟章良, 周力行. 基于状态量权重的变压器状态评价系统研制[J]. 智慧电力, 2018, 46(9): 88-94.
ZHAI Zhangliang, ZHOU Lixing. Development of transformer state evaluation system based on state quantity weight[J]. Smart Power, 2018, 46(9): 88-94.

[12] 马纪, 刘希喆. 基于序关系-熵权法的低压配网台区健康状态评估[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(6): 87-93.
MA Ji, LIU Xizhe. Evaluation of health status of low-voltage distribution network based on order relation-entropy weight method[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(6): 87-93.

[13] 田成来, 田旻双, 熊亚骁, 等. 基于熵权法的农村低压台区典型问题评估研究[J]. 供用电, 2018, 35(7): 54-58.
TIAN Chenglai, TIAN Minshuang, XIONG Yaxiao, et al. Research on assessment of typical problems in rural distribution transformers based on entropy weight method[J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(7): 54-58.

- [14] 周正, 雷玲, 吴汉彬, 等. 基于多指标综合法的核心骨干网架生存性评估研究[J]. 智慧电力, 2018, 46(6): 1-6, 33.
ZHOU Zheng, LEI Ling, WU Hanbin, et al. Study on survivability evaluation of core backbone network based on multiple indexes synthesis method[J]. Smart Power, 2018, 46(6): 1-6, 33.
- [15] 卫泽晨, 赵凤展, 王佳惠, 等. 网格化中低压智能配电网评价指标体系与方法[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 249-255.
WEI Zechen, ZHAO Fengzhan, WANG Jiahui, et al. Gridding evaluation index system and method of MV and LV intelligent distribution network[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 249-255.
- [16] KHODAPARAST J, KHEDERZADEH M. Least square and Kalman based methods for dynamic phasor estimation: a review[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 1-18. DOI: 10.1186/s41601-016-0032-y.
- [17] 张彦如, 耿梦晓. 基于健康指数的设备运行状态评价与预测[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2015, 38(10): 1318-1323.
ZHANG Yanru, GENG Mengxiao. Equipment comprehensive health status evaluation and prediction based on health index[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science Edition), 2015, 38(10): 1318-1323.
- [18] GOPAKUMAR P, MALLIKAJUNA B, REDDY M J B, et al. Remote monitoring system for real time detection and classification of transmission line faults in a power grid using PMU measurements[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 159-168. DOI: 10.1186/s41601-018-0089-x.
- [19] 李辉, 胡姚刚, 唐显虎, 等. 并网风电机组在线运行状态评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(33): 103-109.
LI Hui, HU Yaogang, TANG Xianhu, et al. Method for on-line operating conditions assessment for a grid-connected wind turbine generator system[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(33): 103-109.
- [20] 蔡红飞. 电力变压器剩余技术寿命的综合评估[D]. 郑州: 郑州大学, 2012.
CAI Hongfei. Comprehensive assessment of the power transformer remaining life[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2012.
- [21] LI E W, SONG B. Transformer health status evaluation model based on multi-feature factors[C] // International Conference on Power System Technology, October 20-22, 2014, Chengdu, China: 1417-1422.
- [22] 廖雯竹. 基于设备衰退机制的预知性维护策略及生产排程集成研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2011.
LIAO Wenzhu. Research of predictive maintenance policy and integrated production scheduling model based on machine degradation[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2011.

收稿日期: 2018-05-27; 修回日期: 2018-10-09

作者简介:

杨春波(1976—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统自动化; E-mail: yangcb0019@ah.sgcc.com.cn

陶青(1994—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电能质量分析与控制。E-mail: 1103422654@qq.com

(编辑 周金梅)