

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.11.024

基于DAHP算法及非等间隔GM(1,1)模型的电力变压器技术寿命预测研究

郭绍伟¹, 臧春艳², 马继先¹, 龙凯华¹, 李昊杨¹, 赵延文²

(1. 国网冀北电力有限公司冀北电力科学研究院, 北京 100045; 2. 华中科技大学电气与电子工程学院, 武汉 430074)

摘要: 为减少电网提前或延迟退役电力变压器带来的巨大损失,提出了一种基于DAHP算法及非等间隔GM(1,1)模型的电力变压器技术寿命预测新方法。笔者首先从电力变压器特性出发,结合DAHP(改进的层次分析法)算法,构建电力变压器健康状况评估指标体系,并计算得到电力变压器的健康指数(health index)值。然后在电力变压器历年健康指数值基础上,结合灰色理论非等间隔GM(1,1)模型,建立了电力变压器技术寿命预测模型。最后,应用该模型分别对110、220、500 kV等级的在运电力变压器进行了技术寿命预测研究,验证了该方法的可行性,为电网退役电力变压器提供了参考依据。

关键词: 电力变压器; DAHP算法; 健康指数(HI)值; 非等间隔GM(1,1)模型; 技术寿命预测

Research on the Life Prediction of Power Transformer Based on DAHP Algorithm and Non-equidistant GM(1,1) Model

GUO Shaowei¹, ZANG Chunyan², MA Jixian¹, LONG Kaihua¹, LI Haoyang¹, ZHAO Yanwen²

(1. Research Institute of State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd., Beijing 100045, China; 2. Institute of Electric and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: To reduce the huge losses of power transformer retirement in advance or delay in power grid, this article put forward a new method to predict technology life of power transformer based on DAHP algorithm and Non-Equidistant GM(1,1) model. Firstly we build Health evaluation Index system of power transformer combining DAHP(improved analytic hierarchy process) algorithm from the characteristics of power transformer. And then calculate the health index value of power transformer. Secondly we set up technical life prediction model combining with the Non-Equidistant GM(1,1) model based on the past health index value of power transformer. Finally we verifies the feasibility of this method by applying our model in power transformer of 110 kV, 220 kV and 500 kV which provides a reference for the retirement of power transformer.

Key words: power transformer; DAHP algorithm; power transformer health index(HI); technical life prediction; non-equidistant GM(1,1) model

0 引言

在电力系统中,电力变压器是电网运行的重要输变电设备之一,在变电站中处于枢纽地位,其运行的安全性与可靠性直接关系到整个电网运行的安全^[1]。因此对电力变压器进行技术寿命预测并根据预测结果采取相应的措施,对保证电力系统的安全稳定运行具有十分重要的意义^[2]。

目前,对于电力变压器健康指数(health index, HI)的评估研究比较广泛,已经逐渐形成了较为成熟的理论。主要研究方向有:基于三级评估模型的健康指数评估研究^[3]、基于单一指标判断(如油色谱或糠醛含量)的健康指数评估研究^[4]、基于人工神经网络法的健康指数评估研究^[5]、基于模糊综合评判法的健康指数评估研究^[6-8]、基于灰色理论法的健康指数评估研究^[9-10]、基于物元理论及云理论法的健康指数评估研究^[11-12]等。以上提到的对于健康指数的评估研究各有优劣,文中在总结相关文献的基础上,

结合电力变压器自身的复杂性及综合性, 引入 DAHP 算法建立了新的健康指数计算模型。

对于电力变压器技术寿命评估预测的研究, 当前的研究主要集中于2个方向: ①通过对英国EA公司的设备健康状况计算公式进行改进, 进而对变压器进行技术寿命预测^[3], 这种方法简单易行, 但由于其为经验公式, 只能对电力变压器的技术寿命进行较为粗略的预测研究; ②通过对变压器油纸绝缘进行研究, 进而确定变压器技术寿命^[13-15], 这种方法通过对变压器油纸绝缘进行实验研究, 可以总结得到油纸绝缘的近似寿命趋势公式, 对特定型式的变压器效果较好。但这种方法需要针对特定型式的变压器做大量实验, 由实验数据总结公式, 对于实验的要求较高; 并且对于不同型号、不同环境下的变压器, 其实验结果及寿命发展方向存在较大差异, 不具有普适性。文中以电力变

压器历年健康指数值 HI 的计算为基础, 结合灰色理论非等间隔 $GM(1,1)$ 模型, 提出了一种新的电力变压器技术寿命预测方法, 并通过实际算例证明了该计算方法的可行性。

1 基于DAHP算法的电力变压器健康指数计算

1.1 构建电力变压器健康状况评估指标体系

以GB 1094.1—96《电力变压器第一部分总则》、JB/T 501—2006《电力变压器试验导则》及DL/T 536—1996《电力设备预防性试验规程》为参照, 综合考虑变压器组成的复杂性及参数的实用性, 文中选取了组成电力变压器的11个主要部件进行研究, 具体部件划分见图1。并且对于变压器中较为重要的部件如绕组、绝缘油及套管, 对其进行了更为细致的划分, 力求使最终健康指数的计算更为准确。

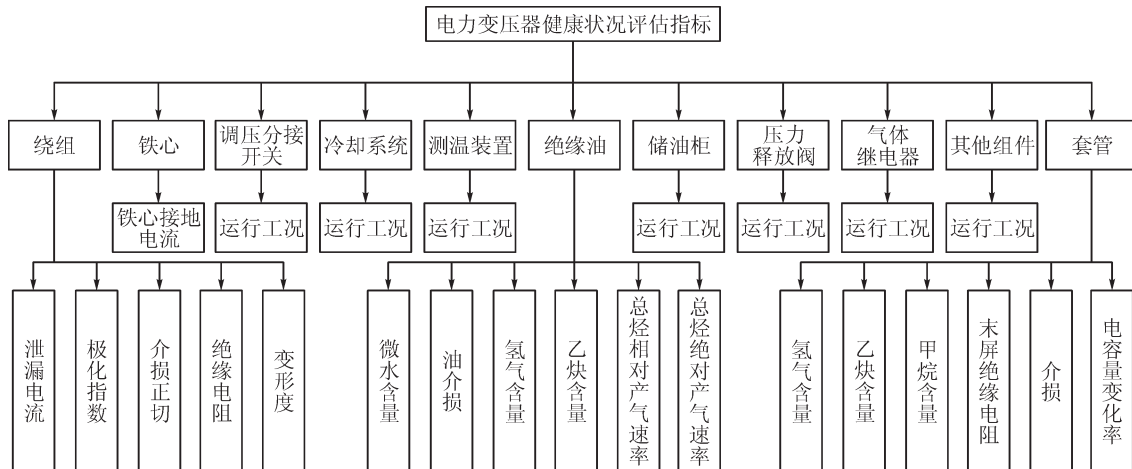


图1 电力变压器健康状况评估指标体系

Fig. 1 Evaluation index system for health condition of power transformer

1.2 评估指标劣化度函数确定

将电力变压器细分为子部件后, 需要根据已有的数据对各个子部件的状况进行量化判断, 为此引入模糊数学中相对劣化度的概念来表征变压器各个子部件当前实际状态与故障状态相比的相对劣化的程度。相对劣化度是一个定量指标, 取值范围为 $[0, 1]$, 根据不同取值反映指标状态劣化的程度。

对越小越优型的状态量, 如介损, 其相对劣化度为

$$f(x) = \frac{C_{\max} - C_i}{C_{\max} - C_{\min}} \quad (1)$$

式(1)中: C_i 为实测值; $C_{\max}$ 为上限阈值; $C_{\min}$ 为下限阈值。

对越大越优型的状态量, 如极化指数, 其相对劣化度可以表示为

$$f(x) = \frac{C_i - C_{\min}}{C_{\max} - C_{\min}} \quad (2)$$

式(2)中: C_i 为实测值; $C_{\max}$ 为上限阈值; $C_{\min}$ 为下限阈值。

1.3 评估指标权重值确定

评估指标权重值的确定是电力变压器健康状况评估的重难点, 当前对于这一问题的解决方法主要有灰色关联法、未确知有理数法和层次分析法等。综合考虑各个计算方法的优劣以及该计算模型综合性较强的特点, 文中采用将层次分析法^[16-17]和专家打分法相结合的DAHP(改进的模糊层次分析法)法来确定各评估指标的权重值, 即借助专家的知识 and 经验来构建AHP(模糊层次分析法)中的判断矩阵。具体的计算步骤如下:

1) 建立判断矩阵(优先关系矩阵)。建立判断矩阵

$F=(f_{ij})_{m \times n}$, 其中

$$f_{ij} = \begin{cases} 0.5 & C(i)=C(j) \\ 1.0 & C(i)>C(j) \\ 0 & C(i)<C(j) \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中, $C(i)$ 和 $C(j)$ 分别为指标和的相对重要程度。

2)综合多位专家的意见,确定最终的优先关系矩阵。具体过程为:设有 m 位专家根据三标度^[18]对指标 i 和指标 j 进行重要程度的判定,假设他们的判定结果分别为: $f_{ij}^1, f_{ij}^2, \dots, f_{ij}^m$,该判定结果的数学期望为

$$E(f_{ij}) = \frac{\sum_{n=1}^m f_{ij}^n}{m} \quad (4)$$

则最终判定结果为

$$f_{ij} = \begin{cases} 1 & 0.75 \leq E(f_{ij}) \leq 1 \\ 0.5 & 0.25 < E(f_{ij}) < 0.75 \\ 0 & 0 \leq E(f_{ij}) \leq 0.25 \end{cases} \quad (5)$$

3)将优先关系矩阵转化成模糊一致矩阵。模糊一致矩阵 $Q=(q_{ij})_{m \times m}$ 计算为:

$$q_i = \sum_{j=1}^m f_{ij} \quad i=1, 2, 3, \dots, m; \quad (6)$$

$$q_{ij} = (q_i - q_j) / (2m) + 0.5 \quad (7)$$

4)利用和行归一法得到权重向量为:

$$l_i = \sum_{j=1}^m q_{ij} - 0.5 \quad i=1, 2, 3, \dots, m; \quad (8)$$

$$\sum_i l_i = m(m-1)/2; \quad (9)$$

$$w_i = l_i / \sum_i l_i = 2l_i / [m(m-1)] \quad (10)$$

则计算得到最终权重分配向量为

$$w^{(0)} = (w_1, w_2, \dots, w_m)^T \quad (11)$$

1.4 综合计算变压器健康指数值

为了综合得到电力变压器的最终健康指数值,文中采用欧几里得贴近度的改进公式将各个评估指标进行综合,改进的综合计算式为

$$HI = \sqrt{\sum_{j=1}^n w_j [u(x_{ij}) - u(x_j)]^2} \quad (12)$$

式(12)中: w_j 为评估指标权重; x_{ij} 为评估指标的理想值; x_j 为评估指标的实际值。

通过式(12)可以定义健康指数 HI 为电力变压器的健康状况值。健康指数值 HI 可以反映出变压器当前状态与其理想状态之间接近的程度。文中规定 HI 的取值范围为0~10,其值越小说明变压器的健康状况越好;反之则说明变压器的健康状况越差。文中以电力变压器的健康指数值6.5作为临界点,即电力变压器健康指数值超过6.5时视为其技术寿命终结。具

体的 HI 值计算流程见图2。

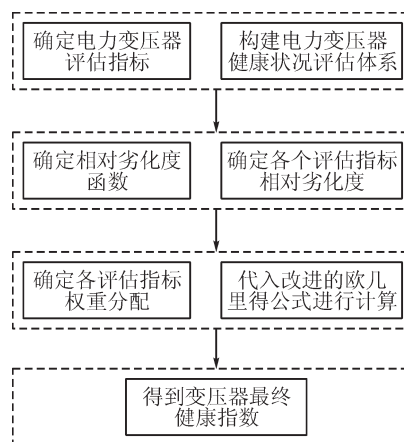


图2 HI 值计算流程图

Fig. 2 HI value calculation flow chart

2 基于非等间隔 $GM(1,1)$ 模型的电力变压器技术寿命预测

2.1 灰色理论非等间隔 $GM(1,1)$ 模型简介

灰色系统理论由中国学者邓聚龙教授于1982年首先提出,是一种用于研究数据量少、信息贫瘠的不确定性问题的理论方法。灰色系统理论以“部分信息已知,部分信息未知”的“小样本”、“贫信息”不确定性系统作为研究对象,通过对“部分”已知信息的生成、开发,提取有价值的信息,实现对系统运行行为、演化规律的正确性和有效监控。灰色系统理论由于适应贫信息且抗噪声能力强,显示出比传统预测方法更大的优越性^[19]。

灰色系统理论自问世以来,研究工作取得了很大的进展,已成功地应用于很多领域。 $GM(1,1)$ 模型因其计算简便、实用广泛而在灰色预测中占有重要地位,是应用最早也是迄今为止应用最为广泛的灰色模型。但是灰色系统模型的建立大多基于等间距序列。而在实际工作中所得到的原始数据往往是非等间距的序列,因此,建立非等间距序列的 $GM(1,1)$ 模型有广泛的现实意义^[20]。

2.2 预测模型理论基础及计算步骤

电力变压器是一个非常复杂的系统,已知的信息很有限,很多信息是难以监测的,因而可以将电力变压器看成一个典型的灰色系统加以分析处理。应用灰色系统理论对电力变压器技术寿命进行分析预测,可以较为准确地得到其剩余技术寿命,为电力企业提供检修或更换指导。

随着时间的推移,电力变压器的总体健康状况是呈逐年下降趋势的,所以应用灰色理论模型可以非常好地拟合变压器的老化过程,理论上具有较高

的预测精度。并且由于变压器不同数据之间的测量周期并不相同,因此需要引入非等间距GM(1,1)模型对其技术寿命进行预测。

非等间距GM(1,1)模型的具体计算步骤如下所示。

1)建立如下所示的原始数据列。 $X^{(0)}=\{X^{(0)}(t_1), X^{(0)}(t_2), \dots, X^{(0)}(t_n)\}$,然后变换为如下累加序列 $X^{(1)}(t_i)=\sum_{j=1}^i X^{(0)}(t_j)\Delta t_j, i=1, 2, 3, \dots, n$ 。

2)对累加序列建立灰微分方程。

$$\frac{dX^{(1)}(t)}{dt} + aX^{(1)}(t) = b \quad t \in [0, \infty] \quad (13)$$

3)在区间 $[t_i, t_{i+1}]$ 上积分,得到积分方程

$$\int_{t_i}^{t_{i+1}} dX^{(1)}(t) + a \int_{t_i}^{t_{i+1}} X^{(1)}(t) dt = b \int_{t_i}^{t_{i+1}} dt。$$

4)构造背景值函数。

$$Z^{(1)}(t_{i+1}) = \frac{X^{(0)}(t_{i+1})(\Delta t_{i+1})^2}{\ln X^{(1)}(t_{i+1}) - \ln X^{(1)}(t_i)} \quad (14)$$

式(14)中:假设 $Z^{(1)}(t_{i+1}) = \int_{t_i}^{t_{i+1}} X^{(1)}(t) dt$ 为累加序列 $X^{(1)}(t)$ 。

5)利用最小二乘法求解。利用最小二乘法求得的累加序列的解为

$$\hat{X}^{(1)}(t_{i+1}) = [X^{(1)}(t_i) - \hat{b}/\hat{a}]e^{-\hat{a}(t_{i+1}-t_i)} + \hat{b}/\hat{a}。$$

最后对以上解进行处理得到原始数据序列的预测值为

$$\hat{X}^{(0)}(t_{i+1}) = \frac{\hat{X}^{(1)}(t_{i+1}) - \hat{X}^{(1)}(t_i)}{\Delta t_{i+1}} = \frac{1}{\Delta t_i} (1 - e^{-\hat{a}\Delta t_{i+1}}) [X^{(1)}(t_i) - \hat{b}/\hat{a}] e^{-\hat{a}(t_{i+1}-t_i)}。 \quad (15)$$

根据得到的原始数据列预测序列进行预测计算,确定变压器的剩余技术寿命,具体计算流程见图3。

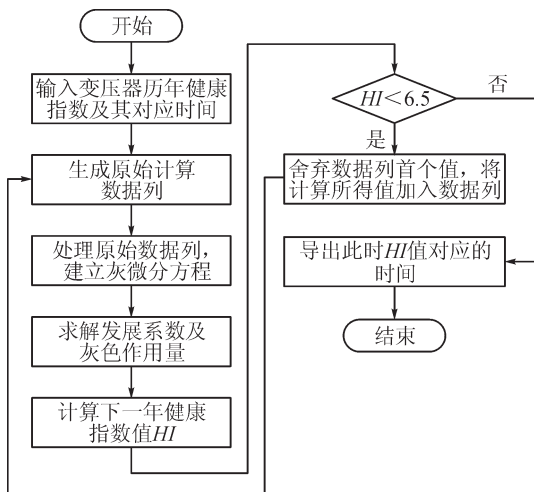


图3 非等间隔GM(1,1)寿命预测模型流程图

Fig. 3 Flow chart of non-equidistant GM(1,1) life prediction model

3 算例分析

文中选取北京某电网公司1994年12月投运的AOTYTH-267000/500主变1号、河北某变电站2005年11月投运的SFSZ-180000/220主变2号及2002年6月投运的SSZ9-50000/110主变3号进行计算。

1)利用健康指数计算模型得到1号主变的历年健康指数值见表1。

表1 1号主变(500 kV)历年健康指数

Table 1 Health index over the years of No.1 transformer (500 kV)			
评估日期(年-月)	1994-12	2003-05	2005-04
HI值	0.645	0.972	1.087
评估日期(年-月)	2006-10	2008-05	2013-11
HI值	0.889	0.983	1.107

依据文中电力变压器技术寿命预测方法进行计算得到1号主变健康指数变化趋势见图4。

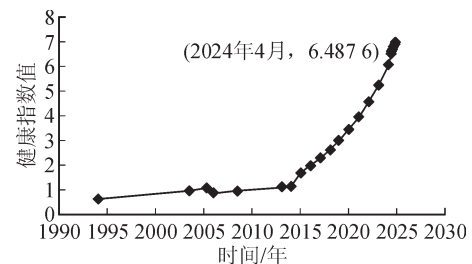


图4 1号主变健康指数预测曲线

Fig. 4 Health index forecasting curve of No.1 transformer

由图4可知,该台变压器投运初期,健康指数很低。但随着时间的推移,变压器绝缘逐步老化,故障率开始上升,健康指数逐渐增大。变压器运行到2024年4月时健康指数达到了6.487 6,已经逼近上限阈值;到2024年5月时健康指数为6.580 1,已经超过上限阈值。由此可以得出1号主变的技术寿命为29年零5个月,也就意味着运行到2024年5月时必须对本台变压器进行更换或进行其他处理。

2)利用健康指数计算模型得到2号主变的历年健康指数值见表2。

表2 2号主变(220 kV)历年健康指数

Table 2 Health index over the years of No.2 transformer (220 kV)				
评估日期(年-月)	2005-11	2007-04	2009-11	2014-05
HI值	0.619	0.713	0.789	1.003

依据文中技术寿命预测方法进行预测,2号主变健康指数变化趋势见图5。

由图5可知,该台变压器的健康指数随着时间的推移不断增大,运行到2023年5月时健康指数达

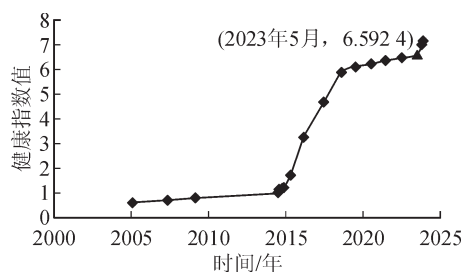


图 5 2号主变健康指数预测曲线

Fig. 5 Health index forecasting curve of No.2 transformer

到了6.592 4,已经超过上限阈值,由此分析可得2号主变的技术寿命为17年零6个月。因而从投入运行到2023年5月,该台变压器技术寿命已经终结,须在此时间点对其进行技改或更换。

3)利用健康指数计算模型计算得到3号主变的历年健康指数值见表3。

表 3 3号主变(110 kV)历年健康指数

Table 3 Health index over the years of No.3 transformer (110 kV)

评估日期(年-月)	2002-08	2007-03	2008-04	2011-09
HI值	0.637	0.776	0.812	1.175

依据文中电力变压器技术寿命预测方法进行预测,3号主变健康指数变化见图6。

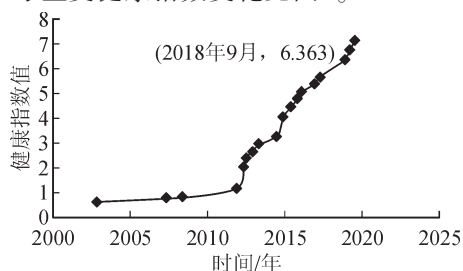


图 6 3号主变健康指数预测曲线

Fig. 6 Health index forecasting curve of No.3 transformer

由图6可知,该台变压器的健康指数经过了初期的缓慢增长后,从2012年左右开始有了较大幅度的增长。当该台变压器运行到2018年9月时健康指数达到6.363,已经逼近上限阈值。由此分析可得3号主变的技术寿命为16年零3个月,即到2018年9月时,须考虑对该台变压器进行大修或更换处理。

文中共计对29台在运电力变压器进行了评估预测,其中500 kV变压器4台,110 kV变压器13台,220 kV变压器12台。得到的计算结果如下:110 kV主变的平均技术寿命约为20年零5个月,220 kV主变的平均技术寿命约为17年零4个月,500 kV主变的平均技术寿命约为24年零6个月。

一般的电力变压器设计寿命约为25~30年,文中的计算结果都处于此范围内,因而表明文中的计算方法具有一定的合理性。

4 结语

文中在电力变压器健康指数计算的基础上,建立了基于灰色理论非等间隔GM(1,1)模型的变压器技术寿命预测模型,实现了对变压器技术寿命趋势的近似拟合,并通过实际算例验证了该模型的合理性和可行性。

由文中计算结果可以看出,当前中国电力变压器技术寿命与欧美国家变压器40年及以上的技术寿命相比普遍偏低,因而造成了巨大的社会和经济损失。鉴于此,希望电力变压器技术寿命预测的研究能够引起电网企业的重视,进而推动相关研究的不断深入发展,最终助力中国电力行业的发展。

参考文献:

- [1] 姚 琪,郭汶昇.基于故障树法的电力变压器可靠性及失效分析[J]. 电力系统及其自动化,2015,37(3):83-89.
YAO Qi, GUO Wensheng. Power transformer reliability and failure analysis based on fault tree[J]. Power System & Automation, 2015, 37(3): 83-89.
- [2] 赵 飞,睦欢然,戴 岩,等.基于随机模糊理论和改进马尔科夫法的变压器寿命评估[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(15): 39-44.
ZHAO Fei, SUI Huanran, DAI Yan, et al. Power transformers life assessment based on random fuzzy theory and improved Markov method[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(15): 39-44.
- [3] 梁博渊,刘 伟,杨欣桐.变压器健康状况评估与剩余寿命预测[J]. 电网与清洁能源, 2010, 26(11): 37-43.
LIANG Boyuan, LIU Wei, YANG Xintong. Transformer condition assessment and residual life prediction[J]. Power System and Clean Energy, 2010, 26(11): 37-43.
- [4] WETZER J M, CLITEUR G J, RUTGERS W R, et al. Diagnostic and condition assessment techniques for condition based maintenance[C]//2000 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. [S.l.]: IEEE, 2000: 47-51.
- [5] 齐振忠.多信息融合的变压器状态评估方法的研究[D]. 保定:华北电力大学, 2008.
QI Zhenzhong. Multiple information fusion of transformer state evaluation method research[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2008.
- [6] 刘 洋.基于模糊综合评判的配电变压器状态评估的研究[D]. 保定:华北电力大学, 2013.
LIU Yang. Research on status assessment of distribution transformer based on fuzzy comprehensive evaluation[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2013.
- [7] 吴立增.变压器状态评估方法的研究[D]. 保定:华北电力

- 大学,2005.
- WU Lizeng. Research of transformer state evaluation method [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2005.
- [8] 纪航. 变压器状态综合评估方法研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2006.
- Ji Hang. Transformer state comprehensive evaluation method research [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2006.
- [9] 熊浩, 孙才新, 张 昀, 等. 电力变压器运行状态的灰色层次评估模型[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(7): 55-60.
- XIONG Hao, SUN Caixin, ZHANG Yun, et al. A hierarchical grey evaluation model for operation condition of power transformers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(7): 55-60.
- [10] 郑蕊蕊, 赵继印, 吴宝春, 等. 基于加权灰靶理论的电力变压器绝缘状态分级评估方法[J]. 电工技术学报, 2008, 23(8): 60-66.
- ZHENG Ruihui, ZHAO Jiyin, WU Baochun, et al. Method for insulative condition classification evaluation of power transformer based on weight coefficient grey target theory [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(8): 60-66.
- [11] 朱永利, 官 政, 武中利, 等. 正态云模型在电力变压器状态评估中的应用[J]. 华北电力大学学报, 2010, 37(5): 17-23.
- ZHU Yongli, GONG Zheng, WU Zhongli, et al. The application of normal cloud model in condition assessment in power transformers [J]. Journal of North China Electric Power University, 2010, 37(5): 17-23.
- [12] 廖瑞金, 张懿议, 黄飞龙, 等. 基于可拓分析法的电力变压器本体绝缘状态评估[J]. 高电压技术, 2012, 38(3): 521-526.
- LIAO Ruijin, ZHANG Yiyi, HUANG Feilong, et al. Power transformer condition assessment strategy using matter element analysis [J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(3): 521-526.
- [13] 魏建林, 张冠军, 董 明, 等. 化学反应动力学预测油纸绝缘变压器老化寿命[J]. 高电压技术, 2009, 35(3): 544-550.
- WEI Jianlin, ZHANG Guanjin, DONG Ming, et al. Application of kinetics of chemical reaction in aging lifetime evaluation of oil-paper insulated transformers [J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(3): 544-550.
- [14] KANG P, BIRTWHISTLE D. Condition monitoring of power transformer on-load tap-changers. I. Automatic condition diagnostics [J]. IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, 2001, 148(4): 301-306.
- [15] MOKHNACKE L, BOUBAKEUR A, FELIACHI A. Prediction of thermal ageing in transformer oil and high voltage PVC cables using artificial neural networks [J]. IEEE Proceedings-Science Measurement and Technology, 2003, 150(3): 107-112.
- [16] 卢绪祥, 李录平. 基于模糊综合评判的凝汽器运行状态评价[J]. 汽轮机技术, 2001, 43(5): 301-303.
- LU Xuxiang, LI Luping. Estimation for operating state of condenser based on fuzzy synthesis judgement [J]. Turbine Technology, 2001, 43(5): 301-303.
- [17] SAATY T L. The analytic hierarchy process [M]. New York: Reprinted by RWS Publication, 1996.
- [18] 祁兴会, 陈晓楠, 邱 林, 等. 基于三标度法的模糊物元模型在湖泊水质评价中的应用[J]. 节水灌溉, 2007(3): 38-40.
- QI Xinghui, CHEN Xiaonan, QIU Lin, et al. Application of fuzzy matter-element model based on three-mark method in the evaluation of water quality of lake [J]. Water Saving Irrigation, 2007(3): 38-40.
- [19] 邓聚龙. 灰色预测与决策 [M]. 武汉: 华中工学院出版社, 1986.
- DENG Julong. Grey forecasting and decision-making [M]. Wuhan: Huazhong institute of Technology Press, 1986.
- [20] 戴文战, 李俊峰. 非等间距 $GM(1,1)$ 模型建模研究[J]. 系统工程理论与实践, 2005(9): 89-93.
- DAI Wenzhan, LI Junfeng. Modeling research on non equidistance $GM(1,1)$ model [J]. Systems Engineering Theory & Practice, 2005(9): 89-93.

郭绍伟(1985—), 男, 硕士, 电力工程师, 主要从事高电压试验技术和变压器设备检测的研究工作。

臧春艳(1978—), 女, 讲师, 硕士, 工学博士后, 主要研究方向为高电压与绝缘技术、电弧电接触、电工电能新技术与智能电网等。

赵延文(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事高电压与绝缘技术的研究工作。

(上接第 145 页)

范松海(1977—), 男, 高级工程师, 博士, 主要研究领域为电网防灾减灾及在线监测等。

谢彦斌(1970—), 男, 博士研究生, 主要研究领域为高电压与绝缘技术、在线监测等(通讯作者)。

刘益岑(1986—), 男, 工程师, 硕士, 主要研究领域为电网防灾减灾及在线监测等。

龚奕宇(1986—), 男, 工程师, 硕士, 主要研究领域为电网

防灾减灾及在线监测等。

蒋兴良(1961—), 男, 教授, 博士, 主要研究领域为超高压输电线路覆冰及其防护、电力系统外绝缘特性、输电线路安全与防护装置、在线监测等。

胡建林(1978—), 男, 副教授, 博士, 主要研究领域为超高压输电线路覆冰及其防护、电力系统外绝缘特性、输电线路安全与防护装置、在线监测等。