

基于随机模糊理论和改进马尔科夫法的变压器寿命评估

赵飞¹, 眭欢然², 戴岩¹, 武红梅¹, 马燕峰², 赵广忠¹

(1. 国网葫芦岛供电公司, 辽宁 葫芦岛 125000; 2. 华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071003)

摘要: 为了全面评估变压器的剩余寿命, 从变压器性能衰退的角度和健康指数特性出发, 考虑变压器寿命相关因素, 采用变压器寿命评估三级系统, 给出了变压器历年健康指数计算方法。基于变压器的历年健康指数, 在传统马尔科夫预测模型的基础上, 建立了改进的马尔科夫预测模型。考虑了不确定性因素对模型的影响, 进行了不确定性修正, 实现对变压器的寿命预测。通过某火电厂的实际算例验证了评估方法的可行性。

关键词: 变压器; 随机模糊; 健康指数; 改进马尔科夫模型; 不确定性; 寿命预测

Power transformers life assessment based on random fuzzy theory and improved Markov method

ZHAO Fei¹, SUI Huan-ran², DAI Yan¹, WU Hong-mei¹, MA Yan-feng², ZHAO Guang-zhong¹

(1. Huludao Electric Power Company, Huludao 125000, China;

2. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: In order to estimate transformer remain life, from the perspective of transformer performance degradation and health indices characteristics, considering the relevant factors of transformer life, based on transformer life assessment three stages systems, the calculation method of every year health index is put forward. Then considering the uncertainty factors, an improved Markov prediction model is founded for the prediction of the transformer life. The example verifies the feasibility of this method.

Key words: transformers; random fuzzy; health index; improved Markov model; uncertainty; life prediction

中图分类号: TM7; TM4 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)15-0039-06

0 引言

变压器作为电力系统最重要的设备之一, 其材料老化或者部件损耗都严重影响变压器的剩余寿命^[1-2], 继而影响电力系统的安全可靠运行。因此进行变压器的故障诊断和寿命评估并根据评估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^[3-4]。

对于设备的寿命, 有经济寿命评估和技术寿命评估^[5-12], 传统的变压器技术寿命评估主要有解析法, 破坏性实验法以及非损伤计测法^[5-7]。其中解析法和破坏性实验法由于现场情况繁杂多变而受到局限, 评估效果不理想, 而非损伤计测法由于具体生产材料的较大偏差以及设备运行环境的不确定性等, 不可避免地产生不精确现象。而变压器剩余寿命评估还涉及到不确定性因素, 如环境、负荷和检修特性等, 因此需要进行不确定性分析。

文献[5-6]提出了变压器绝缘老化与寿命评估的人工神经网络法, 文献[7-9]依据绝缘纸聚合度和糠

醛含量进行变压器寿命评估, 但是单纯依靠一种方式判断绝缘老化并进行寿命评估是不客观的, 应考虑多重因素对变压器进行正确的寿命评估。文献[13-16]分别在不同程度上考虑了未来负荷及环境温度的影响, 对变压器绝缘寿命进行了估计, 但未考虑负荷增长因素。通过分析可知, 现有评估方法均利用与变压器寿命相关的少数几种指标做为评估变压器剩余寿命的参考指标, 缺乏全面性, 且对于影响寿命的随机因素考虑不多, 因此本文提取影响寿命的主要因素, 并考虑其不确定性, 采用随机模糊理论进行变压器健康指数的计算, 同时由于马尔科夫方法简单的结果和独特的随机特性, 将其改进进行剩余寿命预测, 使结果更符合实际。

1 基于随机模糊理论的变压器健康指数计算

参照 GBGB1094.1-96 电力变压器第一部分总则和 JB/T501 电力变压器试验导则, 考虑参数全面性和现场实用性, 其一级指标除了包括常规的气相色谱分析、电气试验分析、绝缘油、糠醛含量和绝

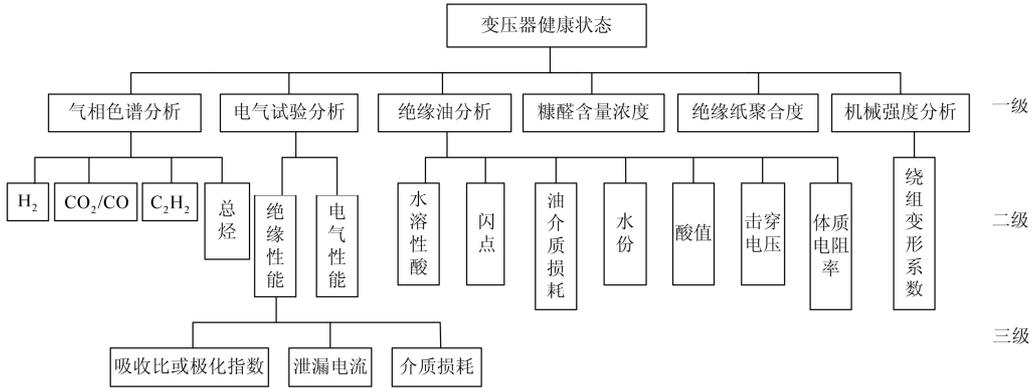


图1 寿命评估模型考虑因素

Fig. 1 Factor in model of life assessment

缘纸聚合度以外，在有监测条件的情况下，还应该包括机械强度的状况分析^[17]，因此本文选取图1所示各项因素作为变压器健康状况和寿命预测的参数指标。

由于上述因素值受到测量环境以及负荷情况的影响，可将其处理为具有不确定性的因素，运用概率论处理随机变量，可信性理论处理模糊变量，机会理论处理随机模糊变量。例如，变压器绝缘油参数处理为随机模糊变量 $\xi(x)$ ，其中闪点、水份处理为随机变量，击穿电压处理为模糊变量；糠醛含量浓度等处理为模糊变量；运行环境、负荷情况具有随机模糊双重不确定性，处理为随机模糊变量，处理方法如下：

变压器评估参数值 c_i 具有一定的随机性且基本服从正态分布，因此以正态分布 $c_i \sim N(u_i, \sigma_i^2)$ 表示参数的分布规律，概率密度函数和可靠度分别为式(1)和式(2)所示。

$$f(c_i) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(c_i-u_i)^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

$$R_i = \int_{\Omega} f(c_i) dc_i \quad (2)$$

式中： u_i 为期望； σ^2 为方差； Ω 为可靠域。

另外，变压器各参数的“可靠”与“失效”具有模糊性，因此采用模糊性进行分析。偏小型、中间型和偏大型的隶属函数如式(3)~式(5)和图2所示。

$$u_{c_i}(c_i) = \begin{cases} 1 & c_i \leq u_i \\ \frac{(c_i-u_i)^2}{2\sigma_i^2} & c_i > u_i \end{cases} \quad (3)$$

$$u_{c_i}(c_i) = e^{-\frac{(c_i-u_i)^2}{2\sigma_i^2}} \quad (4)$$

$$u_{c_i}(c_i) = \begin{cases} 1 & c_i \geq u_i \\ e^{-\frac{(c_i-u_i)^2}{2\sigma_i^2}} & c_i < u_i \end{cases} \quad (5)$$

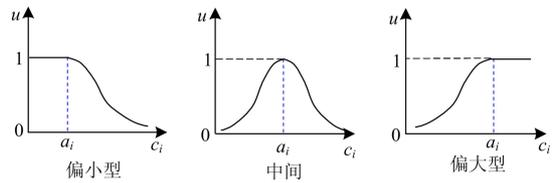


图2 三种类型的隶属函数

Fig. 2 Subjection functions

采用随机模糊理论对某一因素健康指数计算流程图见图3，计算步骤说明如下^[18-19]。

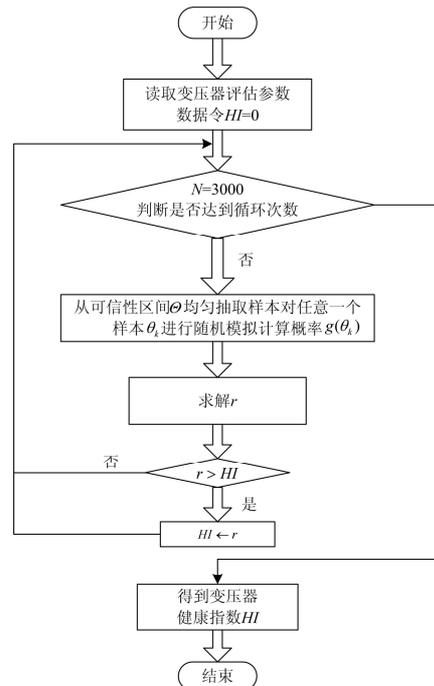


图3 变压器寿命随机模糊模型算法流程图

Fig. 3 Calculation method flow chart of transformer life

(1) 可信区间 Θ 中均匀生成样本 θ_k 需满足等式

$$\text{Cr}\{\theta_k\} \geq \varepsilon/2 \quad (k=1,2,\dots,N) \quad (6)$$

式中 ε 无穷小且 $\varepsilon > 0$, 计算等式

$$v_k = (2\text{Cr}\{\theta_k\}) \wedge 1 \quad (7)$$

(2) 计算每一个样本的概率随机模拟公式为

$$g(\theta_k) = \Pr\{f(\xi(\theta_k)) \leq 0\} \quad (8)$$

(3) r 为使不等式 $L(r) \geq \alpha$ 成立的最大的值

$$L(r) = \frac{1}{2} \left(\max_{1 \leq k \leq N} \{v_k | g(\theta_k) \geq r\} + \min_{1 \leq k \leq N} \{1 - v_k | g(\theta_k) < r\} \right) \quad (9)$$

在分项因素健康指数的基础上采取加权的方法, 并考虑环境和负荷因素的不确定性修正得到最终变压器健康指数, 计算公式如式(10)所示。

$$HI = \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m w_i \cdot w_{ij} \cdot HI_{ij} \right) \times (1 - L\%) \quad (10)$$

式中: HI 表示变压器整体健康指数; HI_{ij} 表示变压器三级指标健康指数(各因素的健康指数), w_i 和 w_{ij} 分别表示变压器二级和三级指标的权重; $L\%$ 表示变压器寿命损失率, 其计算公式如下:

$$L\% = \frac{\text{EXP}\left(\frac{1500}{383} - \frac{1500}{T_{\theta_{HST}}}\right) \times t}{L_N} \quad (11)$$

式中: $T_{\theta_{HST}}$ 表示最热点温度; t 为统计时间; L_N 表示在参考温度下, 干燥无氧环境中, 变压器绝缘正常运行的寿命统计值, 常数由 IEEE C57.91-1995 给出。

2 基于改进 Markov 法的变压器寿命预测

2.1 马尔科夫理论

Markov 链模型为应用较多的预测模型, 其特指时间、状态均为离散特性的 Markov 随机过程 $x(t)$, 时间 t 满足如下条件:

- 1) 隶属于时间集合 $T = \{n = 0, 1, 2, \dots\}$ 的每个 t 的状态空间均为离散的, 离散集合为 $E = \{n = 0, 1, 2, \dots\}$;
- 2) 取任一正整数 m, n, q 、任一非负整数 $c_p > \dots > c_2 > c_1 (n > c_p)$ 、状态 $i_{n+q}, i_n, i_{c_p}, \dots, i_{c_2}, i_{c_1}$, 等式(12)成立;

$$P\{x(m+k) = i_{m+k} | x(m) = i_m, x(j_s) = i_{j_s}, \dots, x(j_2) = i_{j_2}, x(j_1) = i_{j_1}\} = P\{x(m+k) = i_{m+k} | x(m) = i_m\} \quad (12)$$

满足上面条件的 $x(t)$ 称为 Markov 链。

2.2 变压器评估状态分级

在利用马尔科夫链对变压器寿命进行预测之前, 需要对变压器评估指标的状态进行分级。分级方法包括两种, 即硬状态分级和软状态分级。硬状态分级方法以其运算简单的优点而被广泛应用。软

状态分级方法应用于评估指标状态不严格遵循“是”或“否”、“属于”或“不属于”某类的情况。具体分级方法有人工经验分级法^[20-22], 均值-方差分级法和聚类分级法, 其中电力变压器的运行特点及影响因素较多, 采取人工历史经验往往比理论数值计算方法的模型复杂度更低, 现场实用性更强, 因此, 本文采取人工经验状态分级法。

2.3 基于改进马尔科夫方法的寿命预测模型

设马尔科夫链 $\{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$ 的状态空间为 $E = \{1, 2, 3, \dots, n\}$, f_{ij} 表示样本序列自状态 i 经过一步转移到状态 j 的频数, 其中 $i, j \in E$, 转移频数 $f_{ij} (i, j \in E)$ 组成“转移频数矩阵” $(f_{ij})_{i,j \in E}$, 而样本序列自状态 i 达到状态 j 的转移频率定义为

$$p_{ij} = \frac{f_{ij}}{\sum_{j=1}^m f_{ij}}, \quad i, j \in E \quad (13)$$

即把“转移频数矩阵” $(f_{ij})_{i,j \in E}$ 中的第 i 行第 j 列的元素 f_{ij} 除以该行的总和则可得。

由频率的稳定性可知, 若 n 足够大时, 转移频率和转移概率数值很接近, 可以认为二者相等。因此, 转移概率矩阵表示为 $P = (p_{ij})_{i,j \in E}$ 。

传统马尔科夫随着预测步数的增加, 系统会稳定于一个固定的状态, 预测值与真实值之间的灰度也会越来越大, 因此本文把预测的结果加入输入序列中, 及时更新状态转移矩阵, 从而影响下一年的状态概率向量, 弥补传统马尔科夫方法对变压器衰减特性的预测缺陷。具体流程图如图 4 所示。

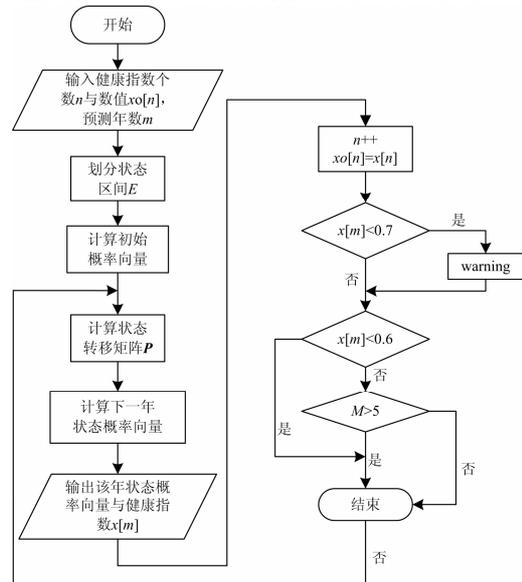


图 4 改进马尔科夫寿命预测模型流程图

Fig. 4 Improved Markov life prediction model flowchart

3 变压器剩余寿命评估算例仿真分析

本文利用内蒙某火电厂 2004 年 10 月出厂的 SFPZ9-240000/110 主变 1#和江西某变电站 1997 年 3 月投运的 OSFPSZ7-240000/330 主变 2#进行计算, 平均负荷率为 70%、最热点平均温度为 85℃及变压器设计寿命为 30 年。

1) 利用式 (11) 求得 1#变压器寿命损失率为 $L\% = 0.01281\%$, 采用寿命损失修正后计算得 1#变压器的健康指数如表 1 所示, 然后利用马尔科夫方法的电力变压器寿命预测, 在分析变压器经济成本和技术寿命的基础上^[23-24], 认为变压器健康指数值达到 0.6 时, 各指标达到初始化设定的阈值。

表 1 1#正常运行变压器整体健康指数

Table 1 1# normal operating transformer holistic health index

时间	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
HI	0.97652	0.98013	0.98338	0.97801	0.97196	0.97003	0.95417

依据改进马尔科夫方法进行健康指数预测, 曲线如图 5 所示。

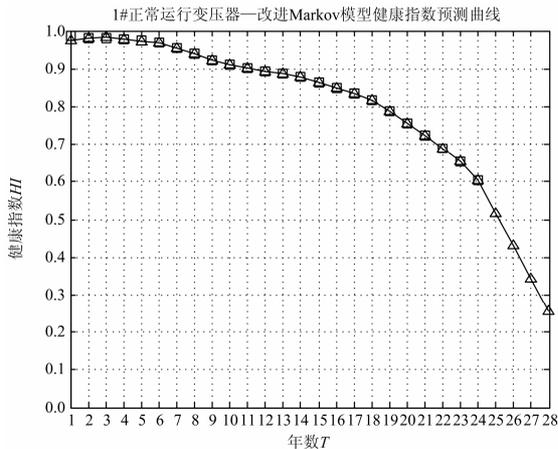


图 5 1#正常运行变压器改进马尔科夫预测模型健康指数预测曲线

Fig. 5 1# normal transformer HI prediction curve of improved Markov prediction model

由图 5 可知, 变压器投运初期, 健康指数很高, 随着使用年数的增加, 变压器绝缘老化程度增加, 进入马尔科夫状态区间, 隶属于可靠状态的程度不断减小, 健康指数不断降低。在变压器运行到第 24 年和第 25 年时的健康指数下降迅速, 因此可在变压器投运的第 24 年进行维修或更换, 使其健康指数优化到阈值以上。

2) 利用式 (11) 求得 2#变压器寿命损失率为 $L\% = 0.01457\%$, 采用寿命损失修正后计算得 2#变压器的健康指数如表 2 所示。

表 2 2#故障检修后变压器整体健康指数

Table 2 Transformer holistic health index after 2# fault

maintenance							
时间	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
HI	0.96352	0.97031	0.96684	0.96101	0.95326	0.94658	0.93898
时间	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
HI	0.93166	0.92420	0.91687	0.61325	0.95372	0.94813	0.94328
时间	2011	2012					
HI	0.93897	0.93368					

依据改进马尔科夫方法进行健康指数预测, 曲线如图 6 所示。

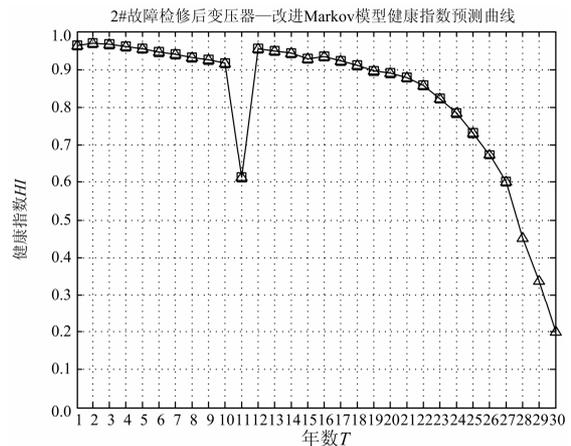


图 6 2#故障检修后变压器改进马尔科夫预测模型健康指数预测曲线

Fig. 6 2# malfunctioned transformer HI prediction curve of improved Markov prediction model

观察图 6, 该变压器在运行至 11 年时由于故障原因, 健康指数骤降至阈值附近, 经抢修维护后性能恢复至一定水平, 但仍低于变压器投运初期健康值, 且经历故障检修后的变压器健康指数恶化速率较故障前明显升高, 变压器老化速度加快, 进入马尔科夫状态区间, 健康指数不断加速降低; 当运行至第 27 年时, 老化速率达到峰值, 健康指数降低至阈值, 因此可在其投运后至第 27 年考虑退役处置, 提高变电站运行的可靠性和经济性。

4 结语

引用变压器健康指数概念, 采用随机模糊理论并考虑温度和负荷修正的基础上计算出变压器的健康指数, 然后采用改进马尔科夫法进行变压器寿命预测, 该方法将新预测的数据加入历史数据中, 及时更新状态转移概率矩阵, 克服了传统马尔科夫方

法平稳性的缺点, 并通过环境、负荷等具有不确定性因素进行了寿命损失修正, 使仿真结果更符合实际。通过对变压器的寿命预测, 为管理者做出决策提供一定的理论和数据依据。

参考文献

- [1] 杨丽君, 廖瑞金, 孙会刚, 等. 变压器油纸绝缘热老化特性及特征量研究[J]. 电工技术学报, 2009, 24(8): 27-33.
YANG Li-jun, LIAO Rui-jin, SUN Hui-gang, et al. Investigation on properties and characteristics of oil-paper insulation in transformer during thermal degradation process[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(8): 27-33.
- [2] 廖瑞金, 孙会刚, 尹建国, 等. 水分对油纸绝缘热老化速率及热老化特征参量的影响[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 34-41.
LIAO Rui-jin, SUN Hui-gang, YIN Jian-guo, et al. Influence on the thermal aging rate and thermal aging characteristics caused by water content of oil-paper insulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 34-41.
- [3] 尹金良, 朱永利, 俞国勤, 等. 基于高斯过程分类器的变压器故障诊断[J]. 电工技术学报, 2013, 28(1): 158-164.
YIN Jin-liang, ZHU Yong-li, YU Guo-qin, et al. Fault diagnosis of transformers based on Gaussian process classifier[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(1): 158-164.
- [4] 孙鹏, 陈绍辉, 张彩庆. 基于 Marquardt 法参数估计的变电设备寿命周期故障率评估[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(1): 85-90.
SUN Peng, CHEN Shao-hui, ZHANG Cai-qing. Assessment of failure rate for substation equipment life cycle based on Marquardt parameter estimation method[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(1): 85-90.
- [5] 杨启平, 薛五德, 蓝之迭. 变压器绝缘老化的诊断与寿命评估[J]. 变压器, 2004, 41(2): 13-17.
YANG Qi-ping, XUE Wu-de, LAN Zhi-die. Aging diagnosis and expected life assessment for transformer insulation[J]. Transformer, 2004, 41(2): 13-17.
- [6] 李军, 董立文, 赵红. 油浸式变压器的老化和寿命评估[J]. 高电压技术, 2007, 33(3): 186-189.
LI Jun, DONG Li-wen, ZHAO Hong. Aging and life assessment for oil-immersed transformer[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(3): 186-189.
- [7] 张欲晓, 李胜利, 王梦君, 等. 变压器绝缘纸的聚合度变化规律[J]. 高电压技术, 2011, 37(10): 2458-2463.
ZHANG Xu-xiao, LI Sheng-li, WANG Meng-jun, et al. Degree of polymerization of insulation paper in the transformer[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(10): 2458-2463.
- [8] 林朝晖, 张彼德. 利用糠醛含量进行变压器寿命预测[J]. 变压器, 2009, 46(7): 35-38.
LIN Zhao-hui, ZHANG Bi-de. Forecast of transformer life time with furfural content[J]. Transformer, 2009, 46(7): 35-38.
- [9] 王福琴, 李晋城, 赵素平, 等. 基于油浸变压器安全运行剩余寿命的判据研究[J]. 变压器, 2010, 47(7): 60-63, 73.
WANG Fu-qin, LI Jin-cheng, ZHAO Su-ping, et al. Criterion research of remaining life time of oil-immersed transformer based on operation[J]. Transformer, 2010, 47(7): 60-63, 73.
- [10] 崔新奇, 尹来宾, 范春菊, 等. 变电站改造中变压器全生命周期费用(LCC)模型的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(7): 60-73.
CUI Xin-qi, YIN Lai-bin, FAN Chun-ju, et al. Study of LCC for power transformer in modification of transformer substation[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(7): 60-73.
- [11] 蔡亦竹, 柳璐, 程浩忠, 等. 全寿命周期成本 LCC 技术在电力系统中的应用综述[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(17): 149-154.
CAI Yi-zhu, LIU Lu, CHENG Hao-zhong, et al. Application review of life cycle cost (LCC) technology in power system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(17): 149-154.
- [12] 孙鹏, 陈绍辉, 张彩庆. 基于 Marquardt 法参数估计的变电设备寿命周期故障率评估[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(1): 85-90.
SUN Peng, CHEN Shao-hui, ZHANG Cai-qing. Assessment of failure rate for substation equipment life cycle based on Marquardt parameter estimation method[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(1): 85-90.
- [13] MUTHANNA K, SARKAR A, DAS K, et al. Transformer

- insulation life assessment[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21(1): 150-156.
- [14] STAHLHUT J W, HEYDT G T, SELOVER N J. A preliminary assessment of the impact of ambient temperature rise on distribution transformer loss of life[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2008, 23(4): 2000-2007.
- [15] 石文辉, 别朝红, 王锡凡. 大型电力系统可靠性评估中的马尔可夫链蒙特卡洛方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(4): 9-15.
- SHI Wen-hui, BIE Zhao-hong, WANG Xi-fan. Applications of Markov chain Monte Carlo in large-scale system reliability evaluation[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(4): 9-15.
- [16] 杜林, 袁蕾, 熊浩, 等. 应用蒙特卡罗模拟法的电力变压器热特性绝缘寿命评估[J]. 高电压技术, 2010, 36(4): 856-861.
- DU Lin, YUAN Lei, XIONG Hao, et al. Insulation life assessment of power transformer thermal characteristics using Monte Carlo simulation[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(4): 856-861.
- [17] 姚森敬, 欧阳旭东, 林春耀. 电力变压器绕组变形诊断分析[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(18): 95-98.
- YAO Sen-jing, OUYANG Xu-dong, LIN Chun-yao. Diagnosis of power transformer winding deformation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(18): 95-98.
- [18] 祝东进, 郭大伟, 刘晓. 概率论与数理统计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- [19] 梁保松, 曹殿立. 模糊数学及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [20] 吕一兵, 彭慧明, 张超, 等. 用马氏链方法预测塔里木油田近期石油年产量趋势[J]. 西安石油大学学报, 2004, 19(4): 77-79.
- Lü Yi-bing, PENG Hui-ming, ZHANG Chao, et al. Forecasting the trend of oil production of Talimu oil field in the near future by using Markov chain[J]. Journal of Xi'an Shiyou University, 2004, 19(4): 77-79.
- [21] 何鑫, 宋平岗, 官二勇. 用马氏链方法预测全国年发电量[J]. 华东交通大学学报, 2006, 23(4): 51-54.
- HE Xin, SONG Ping-gang, GUAN Er-yong. Forecasting the trend of electricity production in the year future by using Markov Chain[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2006, 23(4): 51-54.
- [22] 吴隽, 陈长彬. 东南亚各国人均 GDP 的马尔科夫法预测[J]. 番禺职业技术学院学报, 2007, 6(4): 36-37.
- WU Jun, CHEN Chang-bin. The forecast of GDP per capita in Southeast Asian countries with Markov chain[J]. Journal of Panyu Polytechnic, 2007, 6(4): 36-37.
- [23] 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.
- [24] 李喜桂, 常燕, 罗运柏, 等. 基于健康指数的变压器剩余寿命评估[J]. 高压电器, 2012, 48(12): 80-85.
- LI Xi-gui, CHANG Yan, LUO Yun-bai, et al. Remnant life estimation of power transformer based on health index[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(12): 80-85.

收稿日期: 2013-10-22; 修回日期: 2013-12-16

作者简介:

赵飞(1986-), 男, 学士, 工程师, 研究方向为电气设备在线监测与故障诊断;

眭欢然(1989-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统规划与可靠性;

戴岩(1972-), 男, 学士, 高级工程师, 主要研究方向为电气设备在线监测与故障诊断。