

# 一种基于 PHM 考虑老化和设备状态的油浸式变压器故障率模型

鹿鸣明<sup>1</sup>, 王逸飞<sup>1</sup>, 郭创新<sup>1</sup>, 曹敏<sup>2</sup>

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 云南电力试验研究院(集团)有限公司, 云南 昆明 650051)

**摘要:** 比例故障率模型 (Proportional hazard model, PHM) 中的故障率函数包含基准故障率函数和连接函数, 前者表征设备的一般老化, 后者描述设备状态的影响, 对不同影响因素(协变量)进行量化。基于 PHM 提出了一种综合考虑老化和设备状态的油浸式变压器故障率模型, 基准故障率函数采用常用的温升老化模型, 连接函数中的协变量选择了能够全面客观反映设备状况的油中溶解气体信息。推导了故障前时间的概率密度分布并给出了使用极大似然估计拟合参数的方法。算例证明了拟合方法的正确性, 结果分析表明提出的模型具有正确合理表征故障率的能力, 并且能有效表征变压器维护操作对故障率的影响。**关键词:** 油浸式变压器; 比例故障率模型; 油中溶解气体分析; 极大似然估计

## Failure rate model for oil-immersed transformer based on PHM concerning aging process and equipment inspection information

LU Ming-ming<sup>1</sup>, WANG Yi-fei<sup>1</sup>, GUO Chuang-xin<sup>1</sup>, CAO Min<sup>2</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. Yunnan Power Research & Test Institute (Group) Co., Limited, Kunming 650051, China)

**Abstract:** The Cox's time-dependent proportional hazard model (PHM) is widely used. Its hazard function contains two parts: the baseline hazard function which represents the aging process, and the link function which represents the equipment status. Based on PHM this paper proposes a new failure rate model for oil-immersed transformer concerning both aging process and equipment inspection information. The baseline hazard function follows a temperature-based aging model. The quantity of the dissolved gas is used as the covariate of the link function, for its comprehensiveness. We determine the probability density function of the time to failure, and the maximum likelihood estimation (MLE) is used to estimate the model's parameters. The case study proves the efficiency of the proposed model, which is able to characterize the failure rate of oil-immersed transformer reasonably and comprehensively and can represent the maintenance effect properly.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51177143), National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2011AA05A120), and Natural Science Foundation of Zhejiang Province (No. LZ12E07002).

**Key words:** oil-immersed transformer; proportional hazard model; dissolved gas analysis; maximum-likelihood estimation

中图分类号: TM772 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)18-0066-06

## 0 引言

油浸变压器是电力系统重要组成元件, 其安全稳定运行是系统安全可靠供电的基础。变压器故障

率是评估系统可靠性的重要指标, 能为制定调度运行、检修计划、电网规划提供依据<sup>[1-3]</sup>。

目前研究中所采用的故障率模型主要分为两种: 一种是根据统计数据进行拟合建模<sup>[4-5]</sup>, 另一种是针对变压器运行期间的反映健康状态的某种状态指标进行建模。前者模型较为简单, 需要大量统计数据, 无法反映单台变压器状态和运行条件差异性。后者对发生在变压器内部的物理或化学现象进行分

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51177143); 国家 863 高技术基金项目(2011AA05A120); 浙江省自然科学基金项目(LZ12E07002)

析, 利用各种检测手段获取的指标来间接反映老化程度或内部故障的发展程度, 并据此建模给出故障率。此类模型主要有基于负载率温升的模型<sup>[6]</sup>、基于聚合度的模型<sup>[7-8]</sup>、基于油中溶解气体信息的模型<sup>[9-12]</sup>。其中温升模型较好地描述了变压器老化过程, 但无法反映变压器运行中受到放电、受潮、冲击、系统故障、随机因素等的影响<sup>[13]</sup>; 绝缘纸寿命一般被认为是变压器寿命<sup>[7]</sup>, 而聚合度是最能表征变压器绝缘纸老化分解程度的指标, 此指标下限有不同人为取值<sup>[13]</sup>, 且直接测量需要吊罩取样, 不同位置的数值具有分散性, 测量方面存在难度<sup>[14]</sup>。油中溶解气体信息是运行过程中非常重要的特征量, 对变压器健康状况反映较为全面客观, 适合以此进行故障率建模。然而在变压器实际运行过程中, 会进行油过滤或换油等维护操作, 油过滤后油中溶解气体的数值基本清零, 此时仅采用油中溶解气体信息就无法有效反映设备故障率情况。

因此本文基于比例故障率模型, 综合考虑与运行时间相关的设备老化情况和反映变压器状态的油中溶解气体信息进行故障率建模。其中老化情况利用了温升老化模型, 变压器状态的判断参照了标准《浸式变压器产生气体的描述指南》<sup>[15]</sup>。模型中的参数估计步骤使用了极大似然估计的方法。

## 1 比例故障率模型

记设备故障前时间(time to failure)为一随机变量  $T$ , 其分布为  $F(t)$ ,  $f(t)$  为其密度函数, 可靠度函数  $R(t)=1-F(t)$ , 则  $h(t)$  故障率函数(hazard function) 定义为

$$h(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{\Delta t \cdot R(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (1)$$

$$R(t) = \exp \left\{ - \int_0^t h(t) dt \right\} \quad (2)$$

式中,  $h(t)$  物理意义是当  $\Delta t$  很小时,  $h(t)\Delta t$  表示该设备在  $t$  之前正常工作的条件下, 在  $(t, t+\Delta t]$  中失效的概率<sup>[16]</sup>。

比例故障率模型<sup>[17]</sup>最早由 D.R.Cox 于 1972 年提出, 目前广泛应用与生物医学和可靠性研究领域。比例故障率模型给出的故障率函数为  $h(t) = h_0(t) \cdot \psi(\mathbf{Z}(t))$ , 变量  $t$  为全新设备投运后历史总运行时间,  $\mathbf{Z}(t)$  表示  $t$  时刻设备所处的状态。其中  $h_0(t)$  是基准故障率函数(baseline hazard function), 用来表示设备的老化过程, 常选用韦布尔分布。 $\psi(\mathbf{Z}(t))$  是连接函数, 反映处于不同的状态  $\mathbf{Z}(t)$  对设备故障率的影响, 其中向量

$\mathbf{Z}(t) = [z_1(t), z_2(t), \dots, z_i(t), \dots, z_n(t)]$ , 由  $n$  个时变的协变量  $z(t)$  构成, 每个协变量都可以表征一种特定的测量值或状态。实际应用中协变量可以是反应设备状态的内部变量, 例如设备本体的某种检测信息, 也可以是影响设备运行的外部变量, 例如环境条件。最常用的连接函数形式为  $\psi(\mathbf{Z}(t)) = \exp(\gamma_1 Z_1(t) + \dots + \gamma_i Z_i(t) + \dots + \gamma_n Z_n(t))$ , 其中,  $\gamma_i$  是每个协变量对应的协系数。变压器服役过程中的设备自身老化和状态条件都会影响变压器的故障率, 例如役龄时间越长的设备故障率更高, 而相同役龄情况下, 状态较差的变压器比状态较好的变压器故障率高。比例故障率模型通过  $h_0(t)$  和  $\psi(\mathbf{Z}(t))$  同时反映设备老化信息和状态信息(协变量)的作用, 非常适合用于变压器故障率建模。

## 2 基于 PHM 和油气信息的故障率模型

本文提出的模型如图 1 所示。所用到的输入信息有两部分, 一部分为变压器服役时间  $t$  以及折算后的等效运行时间, 另一部分为  $t$  时刻设备状态, 由 DGA (Dissolved Gas Analysis) 在线检测装置给出油中溶解气体信息后, 参照标准<sup>[15]</sup>判断变压器的当前状态属于哪种状态, 共分四种状态。变压器全寿命过程中存在油过滤或换油等维护操作, 经过这些操作后油中溶解气体浓度会大大下降, 变压器状态回到最佳状态(状态 1)。

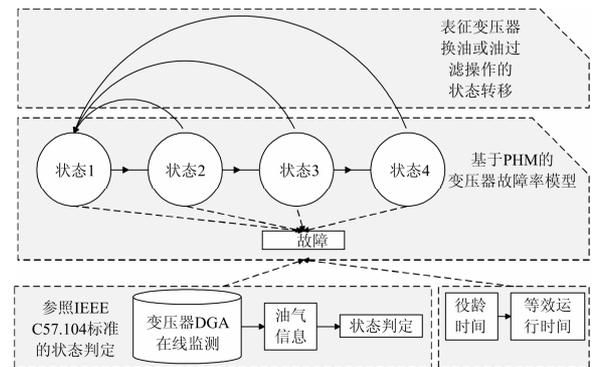


图 1 本文提出故障率模型的框架

Fig. 1 Framework of the proposed failure rate model

### 2.1 基准故障率函数的建模

比例故障率模型中的基准故障率函数  $h_0(t)$  用来描述设备老化过程, 常用威布尔分布<sup>[18]</sup>, 如下式。

$$h_0(t) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1}$$

式中:  $\beta$  为形状参数;  $\eta$  为特征寿命参数。

绝缘油在长期使用后其性能下降可以通过净

化或换油处理, 而变压器中绝缘纸不可修复, 因此绝缘纸寿命  $L_t$  一般被认为是变压器寿命<sup>[19]</sup>, 可认为  $\eta=L_t$ 。文献[6]中给出了的变压器温升老化失效 Arrhenius-Weibull 模型。参照 Arrhenius 定理, 威布尔分布中参数  $\eta$  可用下式描述。

$$\eta = L_t = C \exp\left(\frac{B}{\theta_H + 273}\right)$$

式中:  $B$ 、 $C$  为经验参数;  $\theta_H$  为绕组热点温度。利用文献[20], 在基准热点温度  $\theta_{H0}=110$  °C 条件下, 查出对应参数  $B$ 、 $C$  的值, 可计算出变压器的基准期望寿命  $\eta=L_t=7$  500 天。相应地,  $h_0(t)$  中的运行时间参数  $t$  亦需折算到热点温度恒定  $\theta_{H0}=110$  °C 的等效运行时间  $t'$ 。文献[6]给出了折算方法, 先将服役期分为  $N$  个热点温度恒定的区间, 对每个区间折算后求和即为等效运行时间  $t'$ 。例如, 设每段区间的热点温度为  $\theta_H(t_i)$ ,  $i \in \{1, 2, \dots, N\}$ , 折算为  $\theta_{H0}$  下的等效运行时间为

$$t'_i = t_i e^{\left(\frac{15000}{\theta_{H0}+273} - \frac{15000}{\theta_H(t_i)+273}\right)}$$

则基准故障率函数  $h_0(t)$  为式(3)。

$$h_0(t) = h_0(t') = \frac{\beta}{7500} \left(\frac{t'}{7500}\right)^{\beta-1} \quad (3)$$

式中:  $\beta$  为待估计参数;  $t$ 、 $t' = \sum_{i=1}^N t'_i$  以天为单位。

## 2.2 连接函数的建模

在油浸变压器运行过程中, 由于温度、氧气、电场、水分等因素, 变压器内绝缘会发生氧化、裂解、碳化等情况, 并产生相应类型的气体溶解在变压器油中, 而且存在过热或放电等潜伏性故障时, 产气的速率会变快。目前 DGA 在线监测技术已非常成熟, 不影响变压器正常运行, 更先进的光声光谱技术<sup>[21]</sup>也逐渐开始应用。检测的气体一般有:  $H_2$ 、 $C_2H_4$ 、 $C_2H_2$ 、 $CH_4$ 、 $C_2H_6$ 、 $CO$ 、 $CO_2$  等, 其中  $H_2$ 、 $C_2H_4$ 、 $C_2H_2$ 、 $CH_4$ 、 $C_2H_6$ 、 $CO$  总量称为可燃性气体总量 (Total dissolved combustible gases concentration, TDGC)。依据油中溶解气体信息, 可将变压器的状态划分为 4 个状态<sup>[15]</sup>: 良好 (状态 1)、注意 (状态 2)、严重 (状态 3)、故障 (状态 4), 严重程度逐渐增加, 其划分标准如表 1 所示。在运行中任意一种气体指标或者可燃性气体总量达到更为严重的一级时, 即认为变压器处于更为严重的状态。

表 1 IEEE C57.104 中依据 DGA 信息的状态划分  
Table 1 Dissolved gas concentrations for condition classification based on IEEE C57.104

状态	良好	注意	严重	故障
$H_2$	<100	100~700	700~1800	>1800
$CH_4$	<120	121~400	401~1000	>1000
$C_2H_2$	<35	36~50	51~80	>80
$C_2H_4$	<50	51~100	101~200	>200
$C_2H_6$	<65	66~100	101~150	>150
$CO$	<350	351~570	571~1400	>1400
$CO_2$	<2500	2500~4000	4001~10000	>10000
TDGC	<720	721~1920	1921~4630	>4630

利用油中溶解气体信息便可依据以上标准, 对其状态进行确定。当变压器分别处于良好状态、注意状态、严重状态、故障状态时, 连接函数中  $Z(t)=1$ 、2、3、4, 函数如式(4)。

$$\psi(Z(t)) = \exp(\gamma Z(t)) \quad (4)$$

其中,  $\gamma$  为待估计的协变量系数。

因此综合式(3)、式(4)完整的故障率函数为

$$h(t) = \frac{\beta}{7500} \left(\frac{t'}{7500}\right)^{\beta-1} \exp(\gamma Z(t)) \quad (5)$$

## 2.3 参数估计方法

由式(1)、式(2)可以得出

$$f(t) = h(t)R(t) = h(t) \exp\left\{-\int_0^t h(t)dt\right\}$$

利用此概率密度函数根据极大似然估计便可求解得式(5)中的待拟合参数  $\beta$ 、 $\gamma$ 。

在实际中, 某台变压器投入运行后, 有两种可能导致其退出运行, 一是其发生故障, 二是此设备由于计划检修等原因暂停运行, 前者属于故障数据, 后者便属于截尾数据。若观测终止时刻变压器仍正常运行, 那么其数据也属于截尾数据。考虑到变压器在实际运行中故障非常罕见, 所获取到的数据样本中存在大量截尾数据。考虑截尾数据的参数  $\beta$ 、 $\gamma$  极大似然估计叙述如下。

有  $n$  台变压器的独立实验, 记  $T_i$  为第  $i$  台变压器的观测停止时间。用  $\delta_i$  作为截尾标志,  $\delta_i=1$  表示为截尾数据,  $\delta_i=0$  表示为故障数据, 在样本中存在结尾数据的情况下, 最大似然函数为<sup>[22]</sup>

$$L(\beta, \gamma) = \prod_{i=1}^n f(T_i; \beta, \gamma)^{\delta_i} R(T_i; \beta, \gamma)^{1-\delta_i} = \left[ \prod_{i=1}^r h(T_i; \beta, \gamma) \right] \left[ \prod_{i=1}^n R(T_i; \beta, \gamma) \right] = \left\{ \prod_{i=1}^r \frac{\beta}{7500} \left(\frac{T_i}{7500}\right)^{\beta-1} \exp[\gamma Z(T_i)] \right\} \cdot \left\{ \prod_{i=1}^n \exp\left[-\int_0^{T_i} \frac{\beta}{7500} \left(\frac{s}{7500}\right)^{\beta-1} \exp[\gamma Z(s)] ds\right] \right\}$$

其中:  $r$  为  $n$  个样本中发生故障的数量, 其余  $(n-r)$  个数据为截尾数据;  $T_i'$  和  $s'$  为折算为热点温度恒定  $\theta_{H0}=110$  °C 的等效运行时间。

极大似然函数的对数形式为

$$\ln L(\beta, \gamma) = r \ln\left(\frac{\beta}{7500}\right) + (\beta - 1) \sum_{i=1}^r \ln\left(\frac{T_i'}{7500}\right) + \sum_{i=1}^r \gamma Z(T_i) - \sum_{i=1}^n \int_0^{T_i} \frac{\beta}{7500} \left(\frac{s'}{7500}\right)^{\beta-1} \exp[\gamma Z(s)] ds$$

油中溶解信息气体的监测一般并非是连续的, 因此上式最后一项积分项中需要分段积分。记  $0=t_{i0}, t_{i1}, \dots, t_{ij}, \dots, t_{ik}=T_i$  为第  $i$  台变压器全部的检测点, 在这些时刻知道变压器的状态  $Z(t)$ , 在监测点间隔状态未知。本文假设相对于监测间隔而言, 变压器在运行过程中状态转移的速率非常慢, 在绝大多数监测间隔中不会发生状态变化。因此对于监测间隔中的状态, 可做如下近似: 当  $t_{ij} \leq t < t_{i(j+1)}$  时,  $Z(t)=Z(t_{ij})$ , 即在到达下一个监测点之前, 认为变压器状态不变<sup>[23]</sup>。极大似然估计的模型可采用拟牛顿法等数值方法求解。

### 3 算例分析

文献[24]中给出了 6 台全新的变压器从投运开始至观测结束的油中溶解气体信息数据, 每个监测时间点以及其对应气体含量, 包括  $H_2$ 、 $C_2H_4$ 、 $C_2H_2$ 、 $CH_4$ 、 $C_2H_6$ 、 $CO$ 、 $CO_2$ 、可燃性气体总量 (TDGC)。其中一台变压器出现故障被替换, 其余 5 台是截断数据, TDGC 信息如图 2 所示, 图例中 TA~TF 分别表示 6 台变压器。

其中变压器 TC 在 1 739 天时由于故障退出运行并用一台备用变压器替换, 因此图中只有其

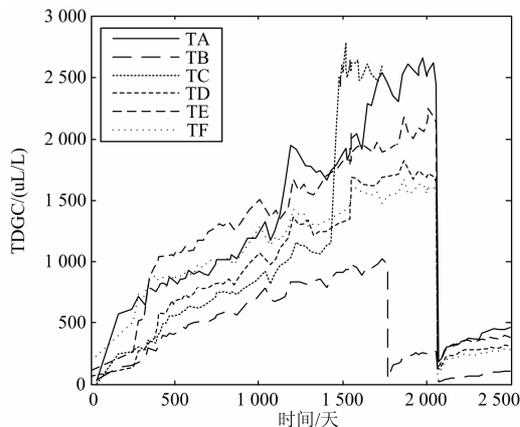


图 2 变压器 TDGC 信息

Fig. 2 Diagram over TDGC for transformers

0~1739 天的信息, 属于故障数据。其余 5 台变压器在运行期间进行了维护, 因此均为截断数据, 其中变压器 TA、TD、TE、TF 在 2052~2072 天期间进行了油过滤, TB 在 1739~1763 天、2052~2072 天期间进行了两次油过滤。

对这 6 台变压器组成的样本, 利用 2.3 节中所述参数估计方法, 对本文提出的模型进行参数估计后, 得到  $\beta=6.6973$ , 协变量系数  $\gamma=2.6659$ 。

(1) 在变压器服役时间等于等效运行时间的条件下, 将变压器状态参数  $Z(t)$  分别恒定在良好状态、注意状态、严重状态, 做出其故障率函数  $h(t)$  和可靠度函数  $R(t)$ , 如图 3。

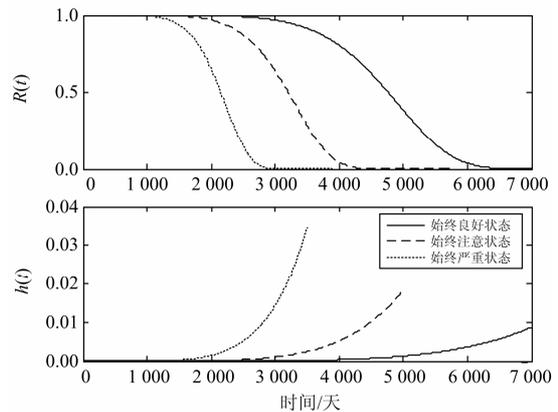


图 3 不同状态条件的可靠度函数和故障率函数

Fig. 3 Survival function and hazard rate function under different conditions

图中可以明显看出, 相同服役时间的情况下, 处于良好状态下的设备故障率  $h(t)$  远小于处于注意状态下的故障率, 注意状态下的故障率远小于严重状态下的故障率。模型能够反映变压器所处不同状态对于故障率的影响。

表 2 列出了图 3 中服役时间  $t=1000$ 、1500、2000、2500、3000 时, 三种状态下的  $h(t)$ 、 $R(t)$  值。

可靠度函数  $R(t)$  表征了设备服役到时刻  $t$  都不失效的概率, 即设备在时刻  $t$  仍然存活的概率。从表中数据可以看出, 在相同的服役时间下, 状态越

表 2 不同时刻故障率及可靠度函数值

Table 2 Hazard rate and survival probability at certain times

服役时间	1 000	1 500	2 000	2 500	3 000	
$h(t)$	良好	$1.33 \times 10^{-7}$	$1.34 \times 10^{-6}$	$6.89 \times 10^{-6}$	$2.46 \times 10^{-5}$	$6.94 \times 10^{-5}$
	注意	$1.91 \times 10^{-6}$	$1.92 \times 10^{-5}$	$9.91 \times 10^{-5}$	$3.53 \times 10^{-4}$	$9.98 \times 10^{-4}$
	严重	$2.75 \times 10^{-5}$	$2.77 \times 10^{-4}$	0.001 4	0.005 1	0.014 4
$R(t)$	良好	1.000 0	0.999 7	0.997 9	0.990 9	0.969 4
	注意	0.999 7	0.995 7	0.970 8	0.876 5	0.639 5
	严重	0.995 9	0.939 9	0.653 4	0.150 1	0.001 6

差的变压器其存活概率越低。例如在  $t=3\ 000$  的时刻, 始终处于严重状态的变压器故障率达到 0.014 4, 存活概率仅为 0.001 6, 而良好状态的变压器故障率仅为  $6.94 \times 10^{-5}$ , 存活概率为 0.969 4。

对 TA、TB、TC 三台变压器在  $t=1\ 642$  天时刻的故障率进行考察。它们分别是某一直流输电线路一端换流站的 3 台单相变压器, 运行历史中变压器负载率基本一致, 外界环境温度相同, 因此其等效运行时间相同。依据其 DGA 信息, TA、TC 处于严重状态(状态 3), TB 则处于注意状态(状态 2)。此时刻 TA、TC 变压器的故障率为  $3.996 \times 10^{-4}$ , TB 故障率为  $2.779 \times 10^{-5}$ 。

状态差异对计算结果影响非常显著, 印证了模型考虑设备状态的必要性。若不考虑状态信息, 只能得出统计意义下的均值, 不具有个体差异性。

(2) 对单台变压器完整运行周期进行考察, 以变压器 TD 为例, 其经历过一次油过滤, 做出其故障率函数  $h(t)$ , 如图 4。

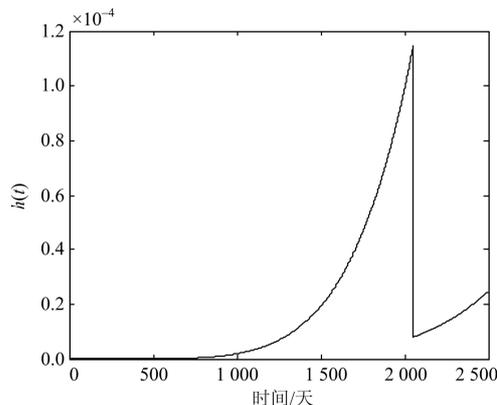


图 4 变压器 TD 的故障率

Fig. 4 Hazard rate of transformer TD

此变压器在 2 050 天时故障率达到  $1.1468 \times 10^{-4}$ , 经过在第 2 052 天时的油过滤维护, 变压器 TD 的状态重新回到良好状态 1, 此时其故障率  $8.0635 \times 10^{-6}$  相比维护前有明显下降, 这反映了设备状态的影响, 然而此时故障率仍比变压器刚投运时 ( $t=100$ ) 故障率  $2.6659 \times 10^{-13}$  有明显的升高, 这反映了变压器的绝缘老化过程的影响, 整个过程中故障率的变化较为符合实际情况。说明了本文提出的计及变压器老化情况和设备状态的故障率模型很有必要。

## 4 结论

本文提出的基于比例故障率模型的油浸变压器故障率模型, 综合考虑了与运行时间相关的设备老化情况和表征变压器状态的油中溶解气体信息。

与仅采用油中溶解气体的故障率模型相比, 本模型能够良好地反映油过滤等维护性操作对于变压器故障率的影响。针对变压器故障数据不足, 存在大量截尾数据的条件下, 给出了相应的参数估计方法。算例分析表明本模型达到了较好的效果。

此模型为建立变压器故障率模型提供的新的思路, 目前本模型中连接函数利用油中溶解气体信息来体现变压器状态, 未来可进一步加入更多反映设备状态、运行环境的协变量, 对可靠性、平均剩余寿命进行评估, 得到更为精确合理的故障率模型与可靠性指标。

## 参考文献

- [1] 张钊, 陈金木, 陈昊. 一种基于可用率约束的电气设备计划维护优化模型[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(23): 85-88.  
ZHANG Zhao, CHEN Jin-mu, CHEN Hao. An optimized planned-maintenance model based on availability constraint for electrical equipment[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(23): 85-88.
- [2] 马仲能, 钟立华, 卢楷, 等. 基于电力设备全寿命周期成本最优的检修策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(16): 34-39.  
MA Zhong-neng, ZHONG Li-hua, LU Kai, et al. Study on the maintenance strategy of power equipment based on the optimal life cycle cost[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(16): 34-39.
- [3] 张翔, 宋子彤, 杨致慧, 等. 一种基于负载率和设备检测信息的油浸式变压器故障率模型[J]. 电网技术, 2013, 37(4): 1159-1165.  
ZHANG Xiang, SONG Zi-tong, YANG Zhi-hui, et al. A failure model for oil-immersed transformer based on load factor and equipment inspection information[J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 1159-1165.
- [4] 张黎, 张波. 电气设备故障率参数的一种最优估计算法[J]. 继电器, 2005, 33(17): 31-34.  
ZHANG Li, ZHANG Bo. An algorithm for optimal parameter estimation of the failure rate of electrical equipment[J]. Relay, 2005, 33(17): 31-34.
- [5] 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.
- [6] 何剑, 程林, 孙元章, 等. 条件相依的输变电设备短期可靠性模型[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(7): 39-46.  
HE Jian, CHENG Lin, SUN Yuan-zhang, et al. Condition dependent short-term reliability models of transmission equipment[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(7):

- 39-46.
- [7] 郭永基. 中小容量电力变压器寿命评估的新方法[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(21): 38-41.  
GUO Yong-ji. New methodology for lifetime evaluation of medium and small sized power transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(21): 38-41.
- [8] 王昌长, 李福祺, 高胜友. 电力设备的在线监测与故障诊断[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [9] PATHAK J, JIANG Y, HONAVAR V, et al. Condition data aggregation with application to failure rate calculation of power transformers[C] // System Sciences, 2006. HICSS'06. Proceedings of the 39th Annual Hawaii International Conference on. IEEE, 2006, 10: 241a.
- [10] SOTIROPOULOS F, ALEFRAGIS P, HOUSOS E. A hidden Markov models tool for estimating the deterioration level of a power transformer[C] // Emerging Technologies and Factory Automation, 2007. ETFA. IEEE Conference on. IEEE, 2007: 784-787.
- [11] 宁辽逸, 吴文传, 张伯明. 运行风险评估中的变压器时变停运模型 (一)基于运行工况的变压器内部潜伏性故障的故障率估计方法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(15): 9-13.  
NING Liao-yi, WU Wen-chuan, ZHANG Bo-ming. Time-varying transformer outage model for operational risk assessment part one condition based failure rate estimation method for transformer internal latent fault estimation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(15): 9-13.
- [12] 郭创新, 王越, 王媚, 等. 表征内部潜伏性故障的变压器时变停运模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(1): 63-69.  
GUO Chuang-xin, WANG Yue, WANG Mei, et al. Time-varying outage model for transformers representing internal latent fault[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(1): 63-69.
- [13] SAHA T K. Review of modern diagnostic techniques for assessing insulation condition in aged transformers[J]. IEEE Trans on Dielectrics and Electrical Insulation, 2003, 10(5): 903-917.
- [14] 廖瑞金, 郝建, 杨丽君, 等. 变压器油纸绝缘频域介电特征量与绝缘老化状态的关系[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 43-49.  
LIAO Rui-jin, HAO Jian, YANG Li-jun, et al. Relationship between frequency domain dielectric characteristic quantity and aging status of transformer oil-paper insulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 43-49.
- [15] IEEE Std C57.104-2008. IEEE Guide for the interpretation of gases generated in oil-immersed transformers[S]. IEEE Power & Energy Society, 2009.
- [16] 曹晋华, 程侃. 可靠性数学引论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012.
- [17] COX D R. Regression models and life-tables[J]. Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological), 1972: 187-220.
- [18] MUTHANNA K T, SARKAR A, DAS K, et al. Transformer insulation life assessment[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21(1): 150-156.
- [19] 廖瑞金, 杨丽君, 郑含博, 等. 电力变压器油纸绝缘热老化研究综述[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 1-12.  
LIAO Rui-jin, YANG Li-jun, ZHENG Han-bo, et al. Reviews on oil-paper insulation thermal aging in power transformers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 1-12.
- [20] IEEE Std C57. 91-1995 IEEE guide for loading mineral-oil-immersed transformers[S]. 1995.
- [21] 陈伟根, 刘冰洁, 周恒逸, 等. 变压器油中溶解气体光声光谱检测的温度特性[J]. 电工技术学报, 2010, 25(11): 15-20.  
CHEN Wei-gen, LIU Bing-jie, ZHOU Heng-yi, et al. The temperature characteristics of photoacoustic spectroscopy detection for dissolved gases in transformer oil[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(11): 15-20.
- [22] KALBFLEISCH J D, PRENTICE R L. The statistical analysis of failure time data[M]. John Wiley & Sons, 2011.
- [23] BANJEVIC D, JARDINE A K S, MAKIS V, et al. A control-limit policy and software for condition-based maintenance optimization[J]. INFOR-OTTAWA, 2001, 39(1): 32-50.
- [24] KARLSSON S. A review of lifetime assessment of transformers and the use of dissolved gas analysis[D]. The Royal Institute of Technology, 2006.

收稿日期: 2013-12-16; 修回日期: 2013-12-28

作者简介:

鹿鸣明(1988-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为变电设备状态监测和故障诊断; E-mail: lumingming@zju.edu.cn

王逸飞(1988-), 男, 博士研究生, 研究方向为输变电设备状态评估与可靠性评估;

郭创新(1969-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为智能电网和分布式能源并网、智能信息处理技术及其在电力系统中的应用。