

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2015.02.021

基于广义回归神经网络的油纸绝缘变压器的寿命预测

林 喆, 兰 生, 张宇航

(福州大学电气工程与自动化学院, 福州 350008)

摘要: 文中基于广义回归神经网络(GRNN)技术挖掘数据变化规律,构建了 GRNN 神经网络预测模型,运用该模型对油纸绝缘变压器进行寿命预测。将变压器绝缘纸老化过程中生成的特征产物如糠醛、CO₂ 和 CO 的质量分数,以及相关时间参量作为模型输入。将所采集的多组油纸绝缘变压器的测试样本作为基础数据,运用该模型对相应的变压器进行寿命预测。结果表明,模型寿命预测的输出值与实际值基本一致,从而验证了模型的合理性,这对监测绝缘材料老化状态的进一步研究具有现实意义。

关键词: 广义回归神经网络;油纸绝缘变压器;寿命预测

Life Prediction of Oil Paper Insulation of Transformer Based on GRNN Neural Network

LIN Zhe, LAN Sheng, ZHANG Yuhang

(College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350008, China)

Abstract: This paper is based on the generalized regression neural network (GRNN) theory, finding the rules of data by it, constructing prediction model of GRNN, then use it to forecast the life of oil paper insulation transformers. In the process of aging, insulating paper of a transformer will generate feature products such as furfural, CO₂ and CO. The content of each product and the corresponding time parameter is used as the model input. The test samples are collected as the basic data, to predict the life of corresponding transformers by using this model. Comparison of the results of GRNN and the measured data show that the results of GRNN are in accordance with the measured values, which proves the rationality of the model. And it is also significant for the further study of material aging status of insulation monitoring.

Key words: GRNN; transformer oil paper insulation; life prediction

0 引言

目前,电网中不少变压器已接近或超过其设计年限,但鉴于经济因素的考量仍挂网运行。因此,为确保老旧变压器安全可靠地运行,有效地监测变压器的固体绝缘老化状况,并采取相应的措施,已日益受到关注。

现今,监测固体绝缘老化状况的常规项目有:①测量电气量,由于局部放电量^[1]只能反映局部故障,而绝缘电阻、介损^[2-3]、表面极化谱等电气法对固体绝缘老化的监测并不敏感,且测量时易受水分干扰,所以不宜采用该方法;②测量机械量,因为测量绝缘纸抗张强度和聚合度^[4-5]时必须对变压器施以吊芯取样,而且该方法的准确度易受溶液配制、测试

环境等因素的影响^[6],所以,该方法不具有现实意义;③测量化学量,包括油中溶解气体分析(DGA)^[7-8]、采用高性能的液相色谱技术(HPLC)^[9-10]或傅里叶变换红外吸收光谱技术(FT-IR)^[11]测量油中糠醛质量分数、X射线衍射法分析物质化学结构、分子量(MW)及凝胶渗透技术(GPC)测量分子量的分布^[12-13]等。

鉴于变压器绝缘纸(纸板)劣化降解导致纤维的分子结构与分子量分布发生改变,致使分子量和聚合度值降低的同时,伴有糠醛、CO₂ 和 CO 等产物的生成^[14-16]。所以,既能全面反映设备整体绝缘劣化状况,又切实可行的方法就是直接监测分析绝缘材料老化特征产物的质量分数变化。

故文中选取变压器固体绝缘老化的特征产物,通过组分间的相关性分析筛选出相关性显著的参量作为模型输入参量,将可靠性与剩余年限作为寿命

收稿日期:2014-09-13; 修回日期:2014-10-15

评估的指标输出,采用广义回归神经网络构建两者的关系模型,并运用该模型对油纸绝缘变压器的测试样本进行相关的寿命预测。

1 GRNN 神经网络

1.1 GRNN 神经网络结构

GRNN 神经网络作为径向基函数神经网络(RBF)的重要分支,是基于非线性回归理论的前馈型神经网络,通过激活神经元来逼近目标函数。它是由输入层、隐含层和线性输出层构成。其结构见图1。

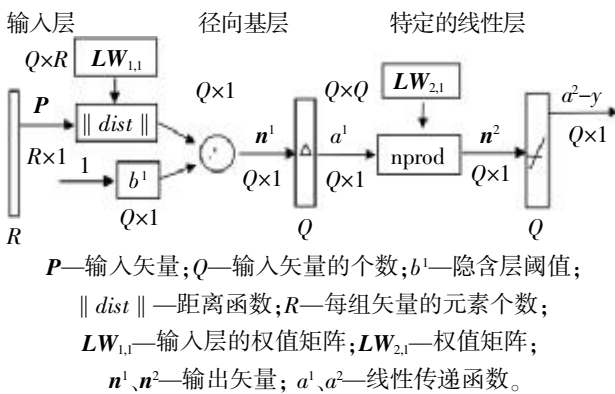


图1 GRNN 神经网络结构示意图

Fig. 1 GRNN neural network structure

网络的第1层为输入层,输入矢量传送至隐含层,隐含层含有 Q 个神经元其节点函数为高斯函数。输出层是一个特定的线性层,也含有 Q 个神经元,其节点函数为纯线性函数,权值函数为归一化点积权函数。该网络的第3层是特定的线性输出层,该层传递函数为线性函数,该层的权值矩阵 $LW_{2,1}$ 先与隐含层的输出作归一化点积运算,再作为权输入传递函数。GRNN 网络的输出表达式可表示为

$$y = a^2 = \text{purelin}(LW_{2,1} \times a^1 / \text{sum} a^1)。$$

1.2 GRNN 网络的特点

相较于最普遍的前馈神经网络(BP 神经网络),文中选取的广义回归神经网络(GRNN 神经网络),具有以下几项优越性:

1)网络结构简单。一般只有两个隐含层:模式层和求和层。

2)网络训练快速。训练样本通过隐含层的同时,训练随即完成。而BP神经网络则需要长时间的训练和较高的计算成本。

3)调试参数少。它引申自径向基函数,因此仅含有扩展常数 $spread$ 一个自由参数,通过交叉验证法便可得到其优化值。而BP网络的隐藏层数和隐藏单元的个数必须进行估算和猜测。

4)计算结果的全局收敛性好。BP神经网络的计算结果常常止于局部收敛,不能达到全局收敛。

1.3 GRNN 网络的训练及参数确定

对于GRNN神经网络而言,学习样本集一旦确定,则相应的网络结构和各层神经元之间的连接权值矩阵 $LW_{1,1}$ 、 $LW_{2,1}$ 也随之确定,训练网络的目的实际上只是为了确定最优的扩展常数 $spread$ 。

2 可靠性与剩余寿命预测

2.1 可靠性

实际上,变压器的可靠性评估是基于绝缘老化相关数据,应用概率统计技术对设备进行评估。它可为现场技术人员管理老龄变压器提供更加科学的依据。

根据文[17],变压器的可靠性与绝缘纸板的抗张强度的关系为

$$R = \left(\frac{TS}{TS_0} \right)^{1.4427}。 \quad (1)$$

式(1)中: R 为设备的可靠性, $0 \leq R \leq 1$; TS 为绝缘纸板的抗张强度, N/mm^2 , 且有, $0 \leq \frac{TS}{TS_0} \leq 1$ 。

同时,根据文[18]可知,油浸式电力变压器绝缘纸板的抗张强度与聚合度之间的关系为

$$TS = 137.35 e^{\frac{-135}{DP}}。 \quad (2)$$

式(2)中: TS 为绝缘纸板的抗张强度, N/mm^2 ; DP 为聚合度。故,联立式(1)、(2)可推出的油纸绝缘变压器可靠性与绝缘纸聚合度关系式^[19]

$$R = 1.215 e^{\frac{-194.7645}{DP}}。 \quad (3)$$

综上,可由油中糠醛质量分数计算出固体绝缘的平均聚合度值,代入式(3)即可求得对应的油纸绝缘变压器的可靠性。

2.2 基于糠醛质量分数的剩余寿命预测

文中搜集了福建省福州市及近郊在运变压器的现场实测数据用于相关数理统计分析,见表1,以获取糠醛质量分数与剩余寿命的对应关系,以及油中部分溶解气体组分的相关性。

表1中: t 为投运年限; t^* 为大修后的运行时间; $furan$ 代表油中糠醛的质量分数; $CO+CO_2$ 为溶解于油中碳的氧化物总量; CO_2/CO 为两种碳氧化物的比值; y_1 为可靠性; n 为预测剩余寿命年限。

2.2.1 糠醛与投运年限关系

将表1中的20组糠醛质量分数取常用对数值与变压器使用年限之间存在直线关系,见图2。再对图2中的数据作线性回归,并画出糠醛质量分数常用对数值与变压器投运年限之间的直线关系,见图3。

对图3作线性回归分析,得出变压器油中糠醛

表 1 20 组训练样本结果
Table 1 The result of 20 group of training samples

序号	输入矢量						输出矢量	
	t/a	t^*/a	$furan/(mg \cdot L^{-1})$	$CO_2/(\mu L \cdot L^{-1})$	$CO_2+CO/(\mu L \cdot L^{-1})$	$CO_2/CO/(\mu L \cdot L^{-1})$	y_1	n/a
1	25	1	0.568	25 000	26 000.0	25.00	0.818	0.63
2	27	1	0.300	77	79.0	38.50	0.872	0.95
3	28	1	0.580	2 300	2 450.0	15.33	0.815	0.62
4	8	3	0.025	9 200	10 150.0	9.68	0.993	9.90
5	3	3	0.015	3 000	3 460.0	6.52	1.007	12.90
6	14	4	0.032	290	295.4	53.70	0.984	11.69
7	1	1	0.002	1 100	1 104.7	234.04	1.051	22.42
8	18	3	0.006	4 300	4 551.0	17.13	1.030	22.51
9	5	5	0.018	4 600	5 800.0	3.83	1.002	19.52
10	11	1	0.008	7 500	8 800.0	5.77	1.023	6.19
11	9	4	0.013	14 000	15 000.0	14.00	1.011	18.60
12	15	1	0.003	8 800	9 780.0	8.98	1.044	13.45
13	2	2	0.003	510	740.0	2.22	1.044	26.90
14	22	2	0.190	6 643	6 821.0	37.32	0.903	2.44
15	15	5	1.080	20 834	22 808.0	10.55	0.742	1.76
16	25	5	0.250	7 325	7 564.0	30.65	0.885	5.26
17	6	6	0.010	980	1 160.0	5.44	1.018	32.43
18	11	1	0.050	2 904	3 112.0	13.96	0.968	2.36
19	1	1	0.040	457	863.0	1.13	0.977	2.62
20	3	3	0.009	2 000	2 230.0	8.70	1.021	17.27

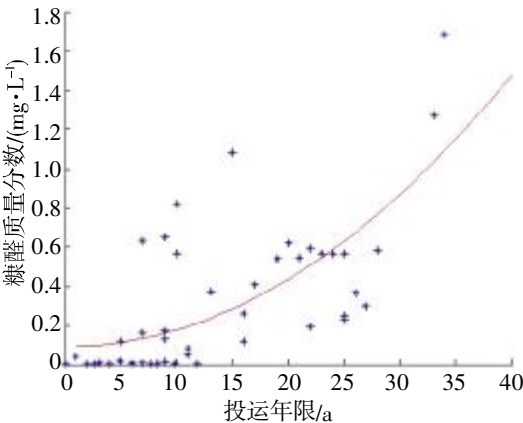


图 2 糠醛质量分数与投运年限
Fig. 2 Curve of furfural content and transformer operation time

质量分数与其投运年限之间的关系式为
$$\lg furan = -2.0849 + 0.0743t \quad (4)$$
式(4)中: $furan$ 为糠醛质量分数, mg/L ; t 为投运年限, a 。

2.2.2 糠醛与聚合度

鉴于国内外学者通过模拟实验和运行变压器实测,并采用数理统计方法论证证实:糠醛浓度的对数值与聚合度 DP 呈负线性关系^[20-22]。故采用糠醛质量分数判定变压器绝缘老化状况被认为是目前最有效

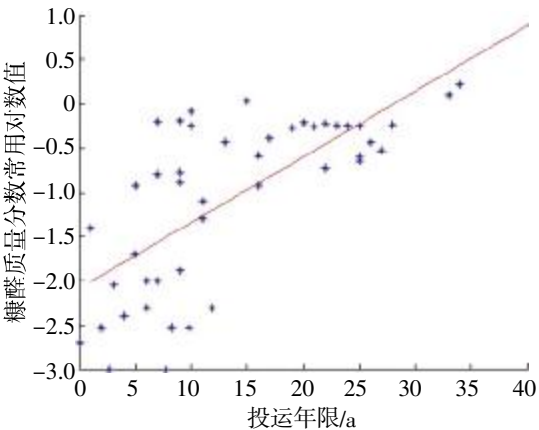


图 3 糠醛质量分数常用对数值与变压器投运年限
Fig. 3 Common logarithm of furfural content and transformer operation time

的在线监测手段之一。
由于糠醛质量分数相同时,计算得到越小的平均聚合度对变压器进行剩余寿命预测越为精确,更有利于对变压器剩余寿命进行研究。所以,文中选择 Scholniket 模型
$$DP = \frac{1.17 - \lg furan}{0.00288} \quad (5)$$
据绝缘纸老化寿命的判断标准,必须令 $DP \geq 250$,则

$$\frac{1.17-\lg furan}{0.002\ 88} \geq 250。$$

再将式(4)代入,即

$$\frac{3.254\ 9-0.074\ 3t}{0.002\ 88} \geq 250;$$

$$3.254\ 9-0.074\ 3t \geq 0.72; 0.074\ 3t \leq 2.534\ 9。$$

可得 $t \leq 34.1\ a$ 。

正常情况下,变压器寿命在 30 a 左右,推算结果与实际情况相符。

设一台变压器运行了 t 年,通过其运行年限 t 可求得其绝缘纸板的聚合度值应与式(5)一致,即

$$DP=1\ 130.17-25.80t。 \quad (6)$$

由式(6)可知,聚合度 DP 与变压器运行年限 t 之间呈反比关系,聚合度的初始值为 1 130.17。

2.2.3 糠醛与剩余寿命的预测

设变压器的剩余寿命为 n ,由式(6)则有 $34.1=n+t$ 。文中采用平均剩余寿命法^[16]推算变压器的剩余寿命,该方法不受测量点数的数量限制。

$$L_R=L_0(1-r)^t。 \quad (7)$$

式(7)中: L_R 为变压器投运 t 年后的聚合度; L_0 为变压器的初始聚合度,根据上文推算,取为 1 130.17; r 为平均聚合度的下降率。

则代入变压器的糠醛质量分数、使用年限,联立式(6)、(7),即可求得预测的剩余寿命年限。

2.2.4 糠醛与部分溶解气体组分的相关性

多数文献认为 CO 和 CO_2 质量分数及比值只能作为反映绝缘老化的辅助参量。值得注意的是,月岗淑郎提出用变压器单位纸重分解溶解于油中的 CO 、 CO_2 的总量,即 $(CO+CO_2)$ 来诊断固体绝缘故障^[23]。在分析整体绝缘老化情况时,考虑全部纸重法较合理。

对现场运行实测数据进行糠醛质量分数与部分溶解气体组分的相关性分析。分析结果显示:DGA

测得的各项气体质量分数与糠醛质量分数的相关性呈现出波动性。总体上,糠醛质量分数仅与 CO_2 、 $(CO+CO_2)$ 、 CO_2/CO 呈现出显著的正相关性,而与其他气体的相关性不显著。

2.2.5 糠醛质量分数与油处理

鉴于国家电力行业标准规定:在变压器使用寿命期间,于投运后的 5 a 内要进行 1 次大修,此后每 5~10 a 要大修 1 次^[24]。但在实际中,变压器的大修周期针对不同的运行工况、不同的设备投运阶段有所区别。另一方面,在大修项目中包括了对绝缘油的过滤、补充或更换。大修将改变油中溶解的糠醛质量分数,但其油纸绝缘材料却无法得到更换。

故除了设备本身的投运年限外,文中还引入了“变压器自大修后的运行时间”,将两项时间参量同时输入预测模型,可在一定程度上降低大修时油处理对模型输出结果的影响,提高了预测模型的精度。

3 油纸绝缘变压器的 GRNN 预测模型

3.1 GRNN 神经网络模型

鉴于上述分析,笔者通过设备的投运时间、自大修后的运行时间、糠醛、 CO_2 、 CO 评估变压器固体绝缘的可靠性并预测其剩余寿命。

设输入的 6 个特征矢量为:投运年限、大修后的运行时间、糠醛、 CO_2 、 $CO+CO_2$ 、 CO_2/CO ;输出的 2 个特征矢量设置为:可靠性 y_1 、预测剩余寿命年限 n 。其中, y_1 输出范围为 0.5~1,随着数值的减少则预示着可靠性的降低。 n 输出范围为 0~34,随着数值的减少则预示着剩余寿命的缩短。

将 55 组在运变压器的相关数据分为两个部分,其中 45 组用于搭建 GRNN 神经网络模型,10 组作为验证组进行预测。表 1 列出了 20 组选自 45 组训练样本集的部分数据。表 2 为 10 组测试样本集。

表 2 10 组测试样本代入模型的测试结果

Table 2 10 group test samples were substituted into the model test results

序号	输入矢量						模型输出值		实际值		相对误差/%		与实际值比较
	t/a	t^*/a	$furan$ $/(mg \cdot L^{-1})$	CO_2 $/(μL \cdot L^{-1})$	CO_2+CO $/(μL \cdot L^{-1})$	CO_2/CO $/(μL \cdot L^{-1})$	y_1	n/a	y_1	n/a	y_1	n/a	
1	9	9	0.130	27 000	28 200	22.50	0.910	11.65	0.925	13.35	1.62	12.73	符合
2	15	6	0.260	6 700	6 870	39.41	0.885	5.26	0.883	6.18	0.23	14.89	符合
3	24	1	0.564	12 000	12 620	19.35	0.813	0.61	0.818	0.63	0.61	3.16	符合
4	21	1	0.546	12 000	12 770	15.58	0.813	0.61	0.821	0.64	0.97	4.64	符合
5	26	1	0.367	6 000	6 570	10.53	0.823	0.93	0.857	0.84	3.97	10.58	符合
6	20	1	0.617	20 000	20 710	28.17	0.818	0.63	0.809	0.59	1.11	6.80	符合
7	7	2	0.010	14 000	15 200	11.67	1.007	10.27	1.018	10.81	1.04	5.03	符合
8	5	5	0.020	1 800	3 000	1.50	1.005	20.73	0.999	18.48	0.58	12.18	符合
9	34	4	1.680	15 000	15 770	19.48	0.718	0.86	0.671	0.73	7.00	17.77	符合
10	25	5	0.230	4 330	4 549	19.77	0.885	5.26	0.891	5.51	0.67	4.54	符合

此外,在测试样本集中,当“ y_1 的相对误差小于10%”且“ n 的相对误差小于20%”时,判定为模型预测结果与实际情况相符。

模型隐含层的模式层中神经元的个数为45,经过交叉验证法得到该网络扩展常数 *spread* 的最优值为0.1。

3.2 模型测试样本的输出及分析

对10组测试样本进行分析:

1)福州市东郊一台型号为SFPSZ1-120000/220三相强油风冷有载变压器,挂网运行24 a,最近一次大修时间为2003年2月,1年后检测其油中糠醛质量分数为0.564 mg/L;CO体积分数为12 000 μ L/L;CO₂体积分数为620 μ L/L。将上述指标作为输入矢量,经广义神经网络计算可得: $y_1=0.818$; $n=0.63$ a。可知该变压器处于老化后期,固体绝缘老化迹象明显,该主变还能运行0.63 a左右。且该设备多部位渗漏油、冷却系统零配件损坏频繁更换、铁心多点接地、有载与本体怀疑相通等缺陷均存在发展、恶化的可能,综合以上运行工况,建议尽快安排技改更换。

2)某台变压器已投运25 a,大修5 a后测得油中糠醛质量分数为0.23 mg/L;CO₂、CO体积分数分别为4 330、219 μ L/L。将上述指标作为输入矢量,经网络计算可得: $y_1=0.885$; $n=5.26$ a。由此可判断该变压器处于老化中后期,虽整体绝缘可靠性逐步降低,但运行工况良好,该设备预计还能运行5.26 a左右。建议继续跟踪设备各项特征参数变化。

4 结论

1)笔者统筹分析油纸绝缘变压器老化特征参量与时间参量,基于GRNN神经网络理论,挖掘数据的变化规律以确定其发展趋势,从而获得了精度理想的预测模型。运用该模型对在运的变压器进行整体绝缘老化评估及寿命预测,为电力运行管理部门及时掌握油纸绝缘变压器老化状况,采取相应的应急措施提供参考意见。

2)糠醛质量分数高说明变压器绝缘纸的机械强度降至较低水平,发生故障的可能性较大;但考虑到变压器大修时油处理对糠醛质量分数的影响以及糠醛分布不均衡等干扰因素,较低的糠醛质量分数并不能说明设备必定具有较大的安全裕度。为此,文中引入了“自大修后的运行时间”作为输入参量之一,在一定程度上减小了干扰因素的影响,从而提高了模型的合理性与预测精度。

3)目前文中的样本库数据量有限,还应以多种运行工况下油纸绝缘变压器的相关数据集进一步丰富充实样本库,以获得准确度更高和泛化能力更强

的寿命预测模型。

参考文献:

- [1] 廖瑞金,杨丽君,孙才新,等.基于局部放电主成分因子向量的油纸绝缘老化状态统计分析[J].中国电机工程学报,2006,26(14):114-119.
LIAO Ruijin, YANG Lijun, SUN Caixin, et al. Aging condition assessment of oil-paper based on principal component and factor analysis of partial discharge[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(14):114-119.
- [2] 刘敏.不同含水量对油纸绝缘老化速率的影响[J].绝缘材料,2008,41(3):40-42.
LIU Min. Effect of different moisture content on oil paper insulation aging rate[J]. Insulating Materials, 2008, 41(3): 40-42.
- [3] POOVAMMA P K, AHMED A, VISWANATHA T R, et al. Evaluation of transformer oil by frequency domain technique[C]//2008 IEEE International Conference on Dielectric Liquids.[S.l.]:IEEE, 2008: 1-4.
- [4] EDMILSON O S, SILVA A, SANTANA A M, et al. Determination of degree of polymerization of insulating paper using near infrared spectroscopy and multivariate calibration[J]. Vibrational Spectroscopy, 2010, 52(2): 154-157.
- [5] YAMAGATA N, MIYAGI K, ETSUO O. Diagnosis of thermal degradation for thermally upgraded paper in mineral oil[C]// International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis. Beijing, China: [IEEE], 2008: 21-24.
- [6] 王万华. 变压器绝缘老化诊断中应注意的问题[J]. 高电压技术, 1995, 21(3): 79-82.
WANG Wanhua. Attention should be paid to the problem of transformer insulation ageing diagnosis[J]. High Voltage Engineering, 1995, 21(3): 79-82.
- [7] SIADA A A, ISLAM S A. A new approach to identify power transformer criticality and asset management decision based on dissolved gas-in-oil analysis [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(3): 1007-1012.
- [8] TARKESHWAR H M, JARIAL R K. Make use of DGA to carry out the transformer oil-immersed paper deterioration condition estimation with fuzzy-logic[C]//International Conference on Communication Technology and System Design 2011.[S.l.]:IEEE, 2012:569-576.
- [9] 杨启平,薛五德,蓝之达,等.变压器绝缘老化评估技术的研究[J]. 变压器, 2006, 43(5): 1-5.
YANG Qiping, XUE Wude, LAN Zhida, et al. Research on aging assessable technique of transformer insulation [J]. Transformer, 2006, 43(5): 1-5.
- [10] 李公波,徐刚,沈杨.变压器循环电流对无功自动补偿装置测量的影响[J]. 电力电容器与无功补偿, 2012, 33(6): 30-32.

- LI Gongbo, XU Gang, SHEN Yang. Influence of transformer circulating current on reactive power automatic compensation device[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2012, 33(6): 30-32.
- [11] PERCHERANCIER J P. Fourier transform infrared(FT-IR) spectrometry to detect additives and contaminants in insulating oils[J]. IEEE Trans. on EI, 1999, 14(3): 23.
- [12] SAHA T K. Electrical and chemical diagnostic of transformers insulation-part A: aged transformer sample[J]. IEEE Trans. on PD, 1997, 12(4): 1547.
- [13] SAHA T K. Electrical and chemical diagnostic of transformers insulation-part B: accelerated aged insulation samples[J]. IEEE Trans. on PD, 1997, 12(4): 1555.
- [14] AMROLLAHI M H, NAJAFI S Y, REZVANTALAB S, et al. Condition and life assessment of transformers using chemical analysis methods[C]//SPEEDAM 2010- International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion.[S.l.]:IEEE, 2010:298-302.
- [15] EMSLEY A M. Influence of cellulose degradation on insulation life in power transformers[C]//Proceedings of the International Conference on Cellulose and Cellulose Derivatives: Physico-chemical Aspects and Industrial Applications.[S.l.]:IEEE, 1993:115-124.
- [16] PRADHAN M K, RAMU T S. Criteria for estimation of end of life of power and station transformers in service[C]//Annual Report-conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena.[S.l.]:CEIDP, 2004:220-223.
- [17] MIRZAIE M, GHOLAMI A, TAYYEBI H. Life time estimation and reliability model for cellulose[C]//Insulation International Conference on Solid Dielectrics. Winchester: [s.n.], 2007:8-13.
- [18] MEMSLEY A, XXIAO R J. Degradation of cellulosic insulation in power transformers[J]. IEE Proc.-Sci. Meas. Technol., 2000, 147(3): 115-119.
- [19] 林朝晖. 油浸式电力变压器固体绝缘剩余寿命研究[D]. 成都: 西华大学, 2010.
- [20] 路长柏. 电力变压器绝缘技术[M]. 哈尔滨: 哈工大出版社, 1997.
- [21] DRVENIZA M. Investigations effective methods for assessing the condition of insulation in aged power transformers[J]. IEEE Trans. on PD, 1998, 13(4): 12-14.
- [22] MORAIS R M. Furfural analysis for assessing degradation of thermally upgraded papers in transformer insulation[J]. IEEE Trans. on D & EI, 1999, 6(2): 159.
- [23] 月冈淑郎. 变压器的老化诊断和剩余寿命诊断[J]. ソインテナンス(日), 1998(1): 12-17.
- [24] 刘光源. 实用电工手册[K]. 北京: 电子工业出版社, 2009.
- 林 喆(1989—), 女, 硕士研究生, 研究方向为高电压与绝缘技术。
- 兰 生(1971—), 男, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为高电压与绝缘技术。

(编辑 袁 妮)