

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.10.032

基于时域介电法和动态贝叶斯网络的变压器油纸绝缘老化状态评估

吴晋媛, 夏国强, 李 通, 高 波, 吴广宁

(西南交通大学电气工程学院, 成都 611756)

摘要: 为了能够实现对变压器油纸绝缘老化状态的准确评估,文中在极化/去极化电流方法的基础上,提出6种表征油纸老化的特征量,并将动态贝叶斯网络引入到油纸绝缘老化状态评估问题中,建立了相应的老化阶段预测模型,针对该模型进行了实例验证。结果表明:从PDC及拓展Debye模型提取的绝缘纸电量 Q_{paper} 、稳定平均电导电流 $\bar{i}_\sigma$ 以及平均极化时间常数 $\bar{\tau}_{\text{paper}}$ 对油纸老化状态反映敏感,且与聚合度有良好的拟合关系,可作为表征绝缘纸老化的特征量;油纸绝缘老化状态评估问题符合动态贝叶斯网络的应用条件,通过划分特征量状态及老化阶段,可以反映变量之间的时序关系;油纸老化状态评估模型验证的准确率为91.3%,平均相对误差为0.108,故验证了动态贝叶斯网络应用于油纸绝缘老化状态评估的准确性和稳定性。

关键词: 油纸绝缘; 老化状态; 介电响应; 特征提取; 动态贝叶斯网络

Assessment of Aging State of Transformer Oil-paper Insulation Based on Time Domain Dielectric Method and Dynamic Bayesian Network

WU Jinyuan, XIA Guoqiang, LI Tong, GAO Bo, WU Guangning

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

Abstract: In order to make an accurate assessment of the oil-paper insulation aging state of transformers, six characteristic quantities are extracted based on polarization/depolarization current method. Dynamic Bayesian network is introduced into the assessment of oil-paper insulation aging state, and an aging step prediction model that verified by the experiment is established. The results indicate that: the quantity of insulation paper electricity Q_{paper} , the stable average conduction current $\bar{i}_\sigma$, and the average polarization characteristic time $\bar{\tau}_{\text{paper}}$ are sensitive to oil-paper insulation aging state, and fit well with the degree of polymerization, so that, these can be used as characteristics to represent the aging of insulation paper. The assessment of oil-paper insulation is in accordance with the application conditions of dynamic Bayesian network, by dividing the characteristics state and aging stage, it can reflect the timing relationship between variables. The accuracy of the assessment model of oil-paper insulation aging state is 91.3%, relative average error is 0.108. So the accuracy and stability of applying dynamic Bayesian network to the assessment of oil-paper insulation aging state.

Key words: oil-paper insulation; aging state; dielectric response; feature extraction; dynamic Bayesian network

0 引言

油浸式电力变压器是电力系统不可或缺的组成部分,它的安全、可靠运行对保障电力系统正常

运行至关重要^[1-2]。在复杂的运行环境中,变压器油纸绝缘受多种外界因素的影响而逐渐老化,绝缘纸在老化过程中逐步降解,变压器绝缘性能下降,影响其安全稳定运行^[3]。因此,实现对变压器油纸绝

收稿日期:2019-02-20; 修回日期:2019-04-25

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助(2682015CX032)。

Project Supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities(2682015CX032).

缘老化状态的准确评估是目前国内外学者研究的热点^[4]。

近年来,基于介电响应的检测方法^[5-7],由于具有不吊芯,对绝缘系统无损等特点,被广泛应用在变压器老化状态评估问题的研究中。其中,极化/去极化电流法(PDC)由于其含信息量大,具有测量简便等优点受到学者的广泛关注。目前,针对基于PDC法的油纸绝缘老化特征量已经做了大量的研究工作^[8-10],但是大多特征量并不能准确地评估油纸绝缘的老化状态,仍需要进一步的研究分析。

在智能算法中,贝叶斯网络算法由于其处理不确定性问题的独特优点,已经在信息、医学和国防等领域广泛应用,近些年在设备故障诊断也有一定的应用^[11-13]。杨志波等^[11]利用动态贝叶斯网络对机械设备的剩余寿命进行了研究,成功将动态贝叶斯应用在了设备剩余寿命的预测中,且结果表明准确度要高于其他算法;郝英等^[12]研究贝叶斯网络框架,并将研究结果应用在了发电机的寿命评估中,实现对发电机剩余寿命的预测;赵文清等^[13]将贝叶斯网络引入到变压器的故障评估中,取得了良好效果,但内容并未涉及到油纸绝缘。因此,为了能够实现油纸绝缘老化状态的准确评估,文中将动态贝叶斯网络引入到油纸绝缘老化状态评估中。

首先在PDC法的基础上提取了6个能反映油纸绝缘老化的特征量,针对特征量及老化阶段进行状态划分,建立了油纸绝缘老化状态评估的动态贝叶斯网络,利用试验数据对模型进行了训练,最终对模型的可行性进行了验证。

1 理论基础

1.1 动态贝叶斯理论

贝叶斯网络称为因果网络,是一种基于网络结构的有向概率模型,它能够表示变量之间的联合概率分布以及相互关系,利用贝叶斯网络可以实现预测、聚类、因果分析等数据处理^[14]。动态贝叶斯网络(dynamic Bayesian network, DBN)是在静态贝叶斯网络(static Bayesian network, SBN)的基础上,将彼此相连的时间状态之间的相互影响考虑进去,能够描述实际动态系统不同时刻的状态变化^[15]。

典型DBN网络可以定义为 (B_0, B_{-}) ,其中 B_0 定义了初始时刻的概率分布,见图1(a)。 B_{-} 表示多个时间片的BN所组成的网络,见图1(b)。DBN利用概率理论在网络节点中进行计算,通过初始概率分布,

沿着网络图之间的条件概率不断计算,最终获得各个节点的概率分布^[16]。

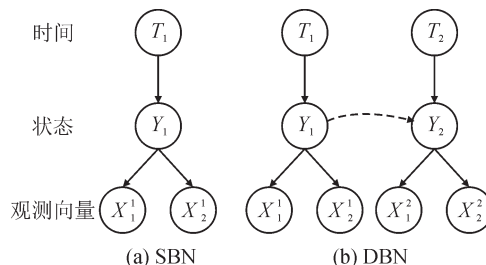


图1 SBN和DBN的典型模型

Fig. 1 Typical model of SBN and DBN

1.2 极化/去极化电流理论

典型油纸绝缘PDC测量电路见图2。根据电介质理论^[17],当图2中 K_a 闭合, K_b 打开时,在介质两端加一个电压后,介质两端会产生电流,此电流由电导电流和松弛电流构成,称为极化电流,表达式见式(1)。当电压撤去之后调整开关使 K_a 打开, K_b 闭合,此时所产生的电流为介质中多种弛豫过程的电流总和,称为去极化电流,表达式见式(2)。

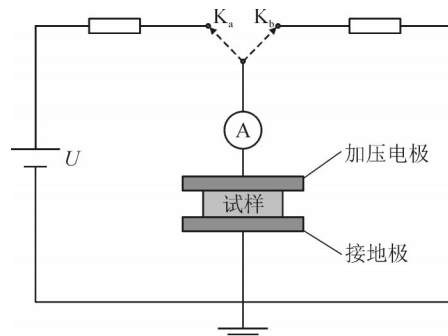


图2 典型油纸绝缘PDC测量电路

Fig. 2 Typical PDC measuring circuit of oil-paper insulation

$$i_p(t) = C_0 U_0 \left[\frac{\sigma}{\epsilon_0} + f(t) \right] \quad (1)$$

$$i_d(t) = -C_0 U_0 [f(t) - f(t + t_c)] \quad (2)$$

式(1)、(2)中: U_0 为电压源; C_0 为几何电容; $f(t)$ 为电介质响应函数; σ 和 ϵ_0 直流电导率和真空介电常数。

1.3 拓展Debye模型

油纸绝缘是一种非均匀结构,不均匀结构电介质的极化/去极化过程可由一系列电阻 R 和电容 C 的串并联组成^[18]。T.K.Saha等的研究内容^[17,19]中模型等效图见图3。图3中: R_0 为绝缘电阻; C_0 为几何电容; R_i 与 C_i 模拟不同弛豫过程。拓展Debye模型的参数求解通常可通过PDC法中去极化电流求得,具体方法见文[20]。

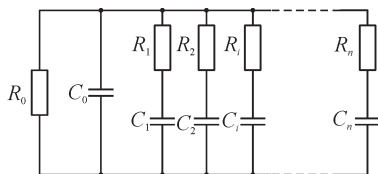


图3 油纸绝缘扩展Debye模型

Fig. 3 Extended Debye model for oil-paper insulation

2 试验设计

文中在实验室中进行油纸绝缘加速热老化试验,试验材料选用25号变压器油与普通牛皮绝缘纸。油纸绝缘样品的制备过程为:绝缘纸在90℃/50 Pa的真空箱中干燥48 h,同时将变压器油脱气后加热至40℃;将处理过的变压器油和绝缘纸板一同放入40℃/50 Pa的真空箱中浸渍48 h;将脱气后的绝缘油与油浸绝缘纸以20:1的比例放入碘量瓶中,并加入适量的铜片;将瓶在开口状态下放入到氮气预处理的温控精度为±0.5℃的试验箱中。

试验在130℃的温度下加速热老化60天,每4天测量其中一组(共15组)的PDC数据,利用滴定法测量油纸绝缘的聚合度。试验数据一方面作为模型学习的样本数据,另一方面用于老化特征量提取。实验室自制的三电极测试装置见图4。PDC试验设备为PDC-Analyser-1MOD极化/去极化电流测试仪,极化直流电压为500 V,测试时间为10 000 s。在每次取样测试时,需将整个装置放入到恒温箱,以防止环境温度变化对测试结果产生影响,并待内外温度达到平衡后进行PDC测试。

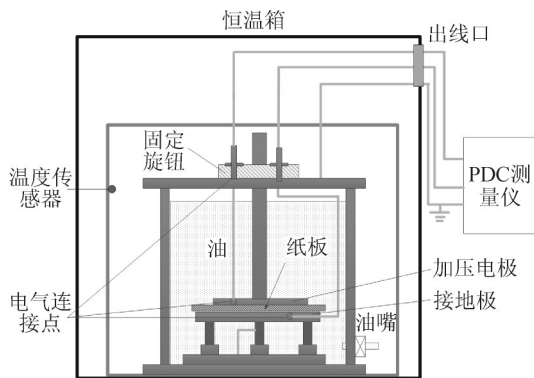


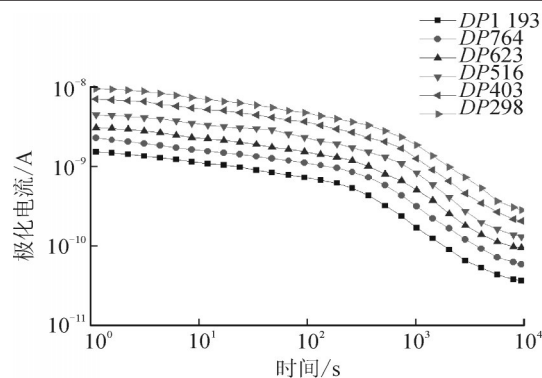
图4 三电极测试装置

Fig. 4 Structure of three-electrode measuring device

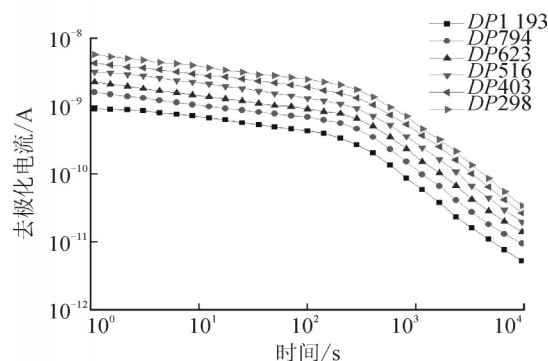
3 油纸绝缘的动态贝叶斯模型建立

3.1 数据分析与特征量提取

老化样品的极化/去极化电流图见图5。从图5可以看出,随着油纸绝缘老化过程中聚合度的降低,极化/去极化电流曲线整体上移。



(a) 极化电流曲线



(b) 去极化电流曲线

图5 不同老化时间的极化/去极化电流曲线图

Fig. 5 PDC curves of oil-paper insulation under different aging times

在油纸绝缘系统中,主要极化过程为油中、油纸界面以及绝缘纸中的不均匀极化。根据文[21-22]中可知,油中极化一般在初期就完成,时间常数不超过10 s;油纸界面极化的时间常数一般在1 000 s以内,绝缘纸中的不均匀极化时间常数可以达到数千秒。绝缘油,绝缘纸的老化状态主要影响去极化电流的首端与尾端^[17]。为了排除油等因素对评估绝缘纸劣化的影响,文中在拓展Debye模型参数的基础上,选取时间常数大于1 000 s的支路进行积分作为衡量绝缘纸老化的特征量,计算公式分别为

$$Q_{\text{paper}} = \int_{1000}^{10000} i_{\text{d-paper}}(t) dt \quad (3)$$

$$i_{\text{d-paper}} = \sum A_{\text{paper}} \exp(-t/\tau_{\text{paper}}) \quad (4)$$

在油纸拓展Debye模型支路参数中,当老化状态加深时,每条极化支路的时间常数 τ_i 能够反映不同偶极子松弛电流的衰减速率^[20]。为了排除干扰因素的影响,提出采用时间常数大于1 000 s的时间常数取平均值来反映绝缘纸的老化状况,计算方法为

$$\bar{\tau}_{\text{paper}} = \frac{\sum \tau_{\text{paper}}}{n} \quad (5)$$

文[23]认为当极化电流时间达到8 000 s后,松弛过程基本完成,极化电流的后期可作为电导电流,能够表示油纸绝缘的电导性能强弱。如图5所

示,可以看出,在8 000 s后去极化电流的衰减仍未完成,故直接取去极化电流尾端作为电导电流存在偏差。为了排除上述影响,作者提出以极化电流尾端与去极化电流尾端之差作为表征参量,将其定义为稳态电导电流 i_{σ} 。同时为了消除因单点畸变所引起的误差,文中选取的2 000~8 000 s的差值进行平均值计算,方法见式(6)。

$$\bar{i}_{\sigma} = \left\{ \int_{2000}^{8000} [i_d(t) - i_p(t)] dt \right\} / 6000 \quad (6)$$

上述特征量与聚合度的拟合关系见图6。从图6中可以看出,随着聚合度的逐渐降低,老化程度的增加,绝缘纸电量 Q_{paper} 和稳定平均电导电流 $\bar{i}_{\sigma}$ 均与聚合度呈指数关系,绝缘纸平均极化时间 $\bar{\tau}_{\text{paper}}$ 与聚合度呈线性拟合关系,拟合优度分别为0.982、0.978、0.906,特征量对老化时间反映敏感,因此可作为表征油纸老化的特征量,但仍无法实现老化状态准确评估,需要进一步处理后作为动态贝叶斯网络的特征量输入。

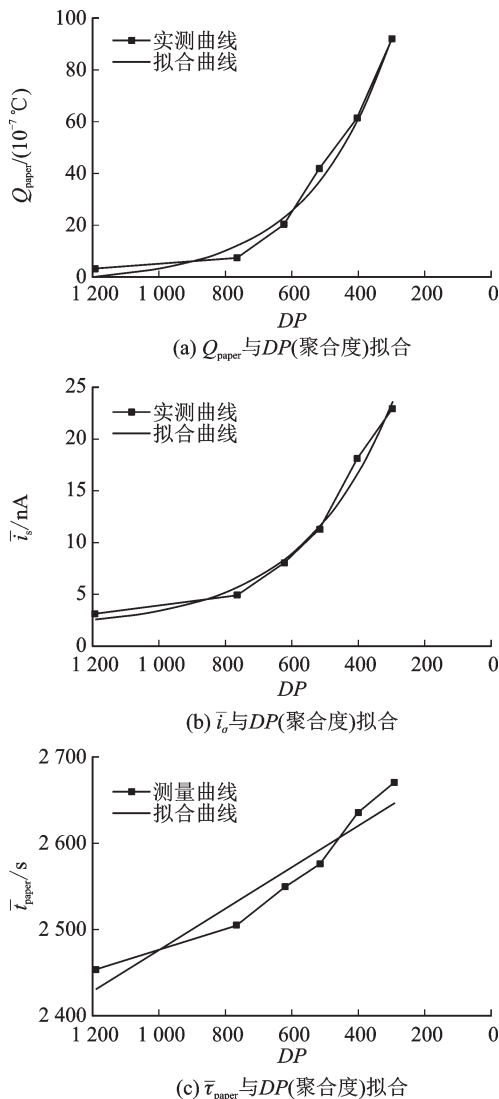


图6 特征量与油纸绝缘老化关系拟合曲线

Fig. 6 The relationship between oil-paper insulation and feature quantities

3.2 状态区间划分

在基于PDC及拓展Debye模型所提取的3个特征量之外,再引入绝缘电阻 R_{60s} 、吸收比 K 和介质损耗角 $\tan\delta$ 3个传统电气特征量,计算公式见式(7)、(8)。因此,文中总共选取 Q_{paper} 、 $\bar{i}_{\sigma}$ 、 $\bar{\tau}_{\text{paper}}$ 、 K 、 R_{60s} 、 $\tan\delta$ 这6个参数作为油纸绝缘老化状态评估模型的观测特征量,油纸绝缘的老化状态作为隐藏变量。其中前3个特征量为PDC测试数据,属于微观极化特性参数,而后3个特征量则是宏观测试参数,将宏观与微观参数结合起来,有利于提高模型的预测精准性。

$$R_{60s} = \frac{U_0}{i_p(60)} \quad (7)$$

$$K = \frac{R_{60s}}{R_{15s}} = \frac{i_p(60)}{i_p(600)} \quad (8)$$

结合模糊集合理论^[24],对6种特征量数据进行模糊分类从而划分状态区间。通过计算每个特征变量的数据与不同模糊集间的隶属度,获得数据属于各个状态区间的概率^[25],文中的特征量状态集合划分见表1。

表1 特征量状态区间划分

Table 1 The division of state interval of the feature quantity

名称	特征量					
	$\bar{i}_{\sigma}$	Q_{paper}	$\bar{\tau}_{\text{paper}}$	K	R_{60s}	$\tan\delta$
状态集合	大	高	长	高	强	大
	中	中	中	低	弱	小
	小	低	短	—	—	—

在利用动态贝叶斯网络对油纸绝缘进行老化状态评估时,需要对油纸绝缘老化状态进行划分,使模型能更为准确的预测老化阶段。依据油纸绝缘老化过程中聚合度的变化规律,参考文[7],将油纸老化阶段分为9个阶段,见表2。其中,前3个老化阶段是油纸绝缘老化初期;3~6老化阶段属于油纸绝缘老化中期;7~9老化阶段油纸绝缘正逐渐走入末期,甚至完全丧失绝缘性能。

表2 油纸绝缘老化阶段划分

Table 2 The division of aging step of oil-paper insulation

阶段	1	2	3	4	5
DP	1 200~900	900~700	700~600	600~500	500~400
阶段	6	7	8	9	—
DP	400~350	350~300	300~250	250~0	—

3.3 老化状态评估模型结构确立

油纸绝缘在不同的老化状态下,特征量值会发生很大的变化。特征量与油纸老化关系关联性强,下个时刻老化的状态与上一时刻所处的老化状态

与特征量之间关系密切。油纸老化状态评估问题符合动态贝叶斯网络的研究条件,故本文将提取的特征量与传统特征量作为DBN系统的观测变量,油纸绝缘的老化状态作为隐藏变量,油纸绝缘状态与文中提取特征量组成的静态贝叶斯网络图见图7。

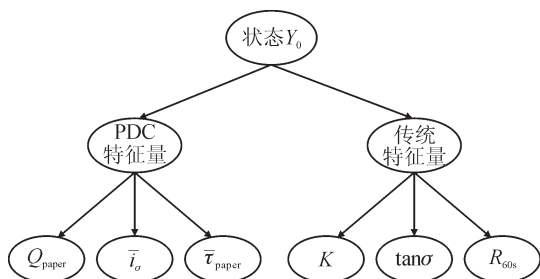


图7 油纸绝缘老化状态评估的静态贝叶斯网络

Fig. 7 SBN of aging state assessment for oil-paper insulation

动态贝叶斯网络是以图7所示的静态网络为基础,在时间序列上进行拓展。3个时间片上的DBN结构图见图8。通过DBN的建立,能够清晰的看到不同时刻下,油纸不同特征量与老化状态的对应关系。且加入时序的条件后,下一个时刻老化的状态受到上一个时刻老化状态的影响,符合文中所研究的问题。

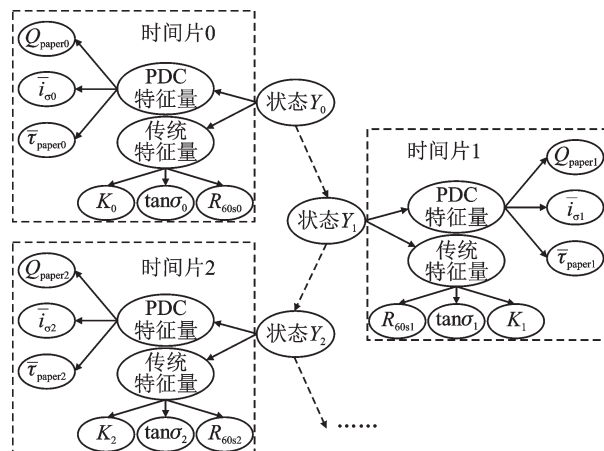


图8 油纸绝缘老化阶段评估的动态贝叶斯网络

Fig. 8 DBN of aging state assessment of oil-paper insulation

3.4 模型节点参数计算

模型的参数训练在确定了老化状态评估模型网络结构与初始概率分布后进行,通过数据不断更新节点参数,从而不断提高影响因素之间的依赖关系的准确性^[15]。根据表1的特征量模糊状态以及表2油纸不同老化状态阶段的划分,结合试验的历史数据,给出了6种观测变量的状态区间在不同老化状态下的初始概率分布,见表3。

表3 初始状态概率分布

Table 3 Initial state probability distribution

老化 状态	Q_{paper}			$\bar{\tau}$			$\bar{i}_{\sigma}$			K		R_{60s}		$\tan\delta$	
	大	中	小	高	中	低	弱	中	强	高	低	强	弱	大	小
1	0.00	0.11	0.89	0.00	0.14	0.86	0.90	0.10	0.00	0.91	0.09	0.07	0.93	0.10	0.90
2	0.00	0.19	0.81	0.00	0.23	0.77	0.81	0.19	0.00	0.82	0.18	0.11	0.89	0.14	0.86
3	0.00	0.25	0.75	0.03	0.51	0.46	0.65	0.33	0.02	0.75	0.25	0.16	0.84	0.19	0.81
4	0.02	0.33	0.65	0.08	0.70	0.22	0.50	0.47	0.03	0.67	0.33	0.24	0.76	0.21	0.79
5	0.05	0.53	0.32	0.32	0.64	0.04	0.22	0.71	0.07	0.58	0.42	0.35	0.65	0.40	0.60
6	0.19	0.71	0.10	0.52	0.46	0.02	0.07	0.66	0.27	0.46	0.54	0.52	0.48	0.51	0.49
7	0.32	0.67	0.01	0.69	0.31	0.00	0.02	0.51	0.47	0.30	0.70	0.64	0.36	0.64	0.16
8	0.62	0.38	0.00	0.80	0.20	0.00	0.00	0.26	0.74	0.15	0.85	0.86	0.14	0.80	0.20
9	0.84	0.16	0.00	0.92	0.08	0.00	0.00	0.11	0.89	0.07	0.93	0.94	0.06	0.89	0.11

文中所研究的问题数据完整,因此采用极大似然估计法,通过最大化似然函数来计算各节点的概率分布。设给定数据变量集 $X=\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 为网络节点数据变量,且针对每个节点变量值域为 $x_i=\{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ir}\}$, $C=\{c_0, c_1, \dots, c_m\}$ 为样本数据集合, $F_i=P_a(x_i)$ 表示父节点集,故记 $p(x_i|F_i)=\theta_{ijk}$ 。根据似然函数^[25],给出一个推导的过程。

$$L = \sum_i \sum_m \lg \prod_{j,k} \theta_{ijk}^{I_{ijk,m}} = \sum_i \sum_m \sum_{j,k} I_{ijk,m} \lg \theta_{ijk} = \sum_{i,j,k} \sum_m I(x_i^k, F_i^j | c_m) \lg \theta_{ijk} \quad (9)$$

式(9)中, $\sum I_{ijk,m}$ 表示样本数据中 θ_{ijk} 出现的次数。最大似然函数 θ_{ijk} 可由式(10)得到。

$$\theta_{ijk} = \frac{\sum_m I(x_i^k, F_i^j | c_m)}{\sum_m \sum_k I(x_i^k, F_i^j | c_m)} \quad (10)$$

4 实例验证

由于在同一台变压器搜集长期数据有困难,文中采用实验室条件下油纸绝缘数据进行模型的验证。在实验室条件下设置了15组油纸绝缘样品,特

征量的提取及处理如前述。针对试验数据对老化过程中不同的油纸绝缘样品进行老化状态评估,通过模型推理得出当前时刻的不同老化状态概率分布,见表4。在表4中,列出其中一组中一个油纸试样的推理概率数据。表4中的预测栏代表预测的老

化状态阶段,每一列为当前时刻试样对不同老化状态的推理概率分布。油纸绝缘预测的老化状态阶段,是选取在当前时刻下的概率分布中,概率值最大的老化状态作为该时刻油纸绝缘的预测老化阶段,在表4中已用灰色标出。

表4 油纸绝缘样品的推理概率分布

Table 4 Inference probability distribution of oil - paper insulation samples

名称	组别														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
状态1	0.408	0.272	0.178	0.149	0.127	0.095	0.084	0.043	0.034	0.025	0.015	0.011	0.008	0.006	0.003
状态2	0.307	0.326	0.233	0.210	0.174	0.130	0.123	0.076	0.069	0.060	0.030	0.021	0.012	0.009	0.006
状态3	0.135	0.180	0.293	0.313	0.232	0.175	0.168	0.112	0.101	0.084	0.060	0.045	0.022	0.018	0.011
状态4	0.089	0.134	0.175	0.188	0.250	0.192	0.181	0.133	0.125	0.111	0.084	0.075	0.039	0.031	0.020
状态5	0.033	0.049	0.071	0.079	0.138	0.211	0.227	0.181	0.170	0.153	0.113	0.086	0.061	0.054	0.039
状态6	0.014	0.017	0.024	0.028	0.040	0.113	0.121	0.201	0.219	0.232	0.172	0.157	0.119	0.108	0.076
状态7	0.007	0.010	0.012	0.014	0.017	0.042	0.050	0.149	0.159	0.166	0.221	0.232	0.184	0.165	0.134
状态8	0.005	0.008	0.009	0.012	0.013	0.029	0.031	0.074	0.083	0.114	0.191	0.209	0.326	0.335	0.314
状态9	0.002	0.004	0.005	0.007	0.009	0.013	0.015	0.031	0.040	0.055	0.114	0.164	0.229	0.274	0.397
预测	1	2	3	3	4	5	5	6	6	6	7	7	8	8	9

油纸绝缘老化状态评估的准确度与误差见表5。从表5中结果可看出,准确度的平均值为91.3%;*MRE*为0.108。通过运用动态贝叶斯网络方法,油纸绝缘老化状态评估的准确度达到了91.3%,*MRE*值仅为0.108,预测精度非常高,相对误差很小,说明预测的波动性非常小,同时验证了动态贝叶斯网络在预测油纸绝缘的老化状态阶段的有效性。

$$MRE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_i - \hat{y}_i|$$

(11)

表5 油纸绝缘老化状态评估的准确度与误差

Table 5 Life prediction accuracy and error of oil-paper insulation

组别	准确度/%	最大误差	<i>MRE</i>	组别	准确度/%	最大误差	<i>MRE</i>
1	91.6	1	0.084	11	86.2	2	0.204
2	90.7	3	0.146	12	93.7	1	0.062
3	92.4	2	0.107	13	89.7	1	0.102
4	93.3	2	0.093	14	90.7	1	0.093
5	87.6	1	0.111	15	87.6	2	0.173
6	87.1	2	0.178	16	94.2	2	0.075
7	96.0	1	0.040	17	95.1	1	0.049
8	92.0	1	0.080	18	96.0	3	0.062
9	95.1	3	0.084	19	89.3	1	0.107
10	88.9	2	0.151	20	88.4	2	0.160

5 结论

为了对变压器油纸绝缘老化状态进行评估,文中在实验室条件下开展油纸热老化实验,提出能够表征油纸老化程度的6种特征量,并建立油纸绝缘的动态贝叶斯网络模型,通过模型参数训练与推理最终实现对不同老化状态的油纸绝缘样品的老化状态评估。得到结论如下:

1)基于PDC法提取的特征量,绝缘纸电量 Q_{paper} 、绝缘纸平均极化时间常数 $\bar{\tau}_{\text{paper}}$ 和稳定平均电导电流 $\bar{i}_g$ 对聚合度的变化十分敏感,且与聚合度具有良好的拟合优度,可以作为表征油纸绝缘,尤其是绝缘纸老化程度的特征量。

2)将动态贝叶斯网络引入到油纸绝缘老化状态评估中,结合提取的6种特征量与老化状态阶段,建立了油纸绝缘的动态贝叶斯网络老化状态评估模型。最终验证油纸绝缘的老化阶段预测准确度达到91.3%,*MRE*仅为0.108,证明了该模型的在油纸老化状态评估方面的有效性。

参考文献:

[1] LUNDGAARD L E, HANSEN W, Linhjell D, et al. Aging of oil - impregnated paper in power transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(1): 230-239.
[2] 黎成林, 曹保江, 孙健翔, 等. 基于FDS的变压器油浸纸

- 老化程度与水分含量评估方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(1): 217-223.
- LI Chenglin, CAO Baojiang, SUN Jianxiang, et al. FDS-based assessment of aging degree and moisture content for oil-paper in transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(1): 217-223.
- [3] 吴广宁, 宋臻杰, 杨飞豹, 等. 基于时域介电谱和去极化电量的变压器油纸绝缘老化特征量研究[J]. 高电压技术, 2017, 43(1): 195-202.
- WU Guangning, SONG Zhenjie, YANG Feibao, et al. study on aging characteristics of transformer oil-paper insulation based on the time domain dielectric spectroscopy and depolarization charge quantity[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(1): 195-202.
- [4] FOFANA I, HEMMATJOU H, FARZANEH M, et al. Polarization and depolarization current measurements of oil impregnated paper insulation system under thermal runaway [C]/IEEE International Conference on Solid Dielectrics. [S.l.]: IEEE, 2010: 5447-5451.
- [5] 王林, 周利军, 李先浪, 等. 应用极化/去极化电流法分析油纸绝缘微水扩散暂态过程[J]. 高电压技术, 2013, 39(2): 354-359.
- WANG Lin, ZHOU Lijun, LI Xianlang, et al. Analysis of transient moisture diffusion in oil-paper insulation using polarization and de-polarization current method[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(2): 354-359.
- [6] 段宗超, 吴广宁, 高波. 油纸绝缘频域介电谱特性与聚合度的关联影响规律研究[J]. 电网技术, 2014, 38(10): 2881-2887.
- DUAN Zongchao, WU Guangning, GAO Bo. Study of linkage effects between degree of polymerization and frequency domain dielectric spectroscopy characteristics of oil-paper insulation[J]. Power System Technology, 2014, 38(10): 2881-2887.
- [7] 王凯, 蔡金锭. 油纸绝缘变压器介质响应极化谱的探索与研究[J]. 电工电能新技术, 2015, 34(1): 41-46.
- WANG Kai, CAI Jinding. Studies on dielectric response characteristic parameters of oil-paper insulation transformers[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2015, 34(1): 41-46.
- [8] 黄云程, 蔡金锭. 应用去极化能量谱评估变压器绝缘老化受潮状态[J]. 电工电能新技术, 2016, 35(1): 53-59.
- HUANG Yuncheng, CAI Jinding. Diagnosis of insulation condition of transformers by using depolarization energy spectrum[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2016, 35(1): 53-59.
- [9] 吴广宁, 宋臻杰, 辛东立. 基于扩展Debye模型仿真的回复电压特征量分析[J]. 高压电器, 2017, 53(1): 8-13.
- WU Guangning, SONG Zhenjie, XIN Dongli. Analysis of RVM characteristics based on the extended Debye model simulation[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(1): 8-13.
- [10] 魏建林, 王世强, 彭华东, 等. 变压器油纸绝缘的介电响应特性研究—加速热老化的介电谱[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 56-62.
- WEI Jianlin, WANG Shiqiang, PENG Huadong, et al. Investigation of dielectric response characteristics of transformer oil-paper insulation—Dielectric spectroscopy of accelerated thermal aging[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 56-62.
- [11] 杨志波, 董明. 动态贝叶斯网络在设备剩余寿命预测中的应用研究[J]. 计算机集成制造系统, 2007, 13(9): 1811-1815.
- YANG Zhibo, DONG Ming. Dynamic Bayesian networks for predicting remaining useful life of equipment[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2007, 13(9): 1811-1815.
- [12] 郝英. 基于智能技术的民航发动机故障诊断和寿命预测研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006.
- HAO Ying. Research on civil aviation engine fault diagnosis and life predication based on intelligent technologies [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2006.
- [13] 赵文清, 朱永利, 姜波, 等. 基于贝叶斯网络的电力变压器状态评估[J]. 高电压技术, 2008, 34(5): 1032-1039.
- ZHAO Wenqing, ZHU Yongli, JIANG Bo, et al. Condition assessment for power transformers by bayes networks [J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(5): 1032-1039.
- [14] CODETTA-RAITERI D, PORTINALE L. Dynamic Bayesian networks for fault detection, identification, and recovery in autonomous spacecraft[J]. IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics Systems, 2015, 45(1): 13-24.
- [15] 肖秦琨. 动态贝叶斯网络推理学习理论及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- XIAO Qinkun. Dynamic Bayesian network inference learning theory and its application[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007.
- [16] 董雷, 周文萍, 张沛, 等. 基于动态贝叶斯网络的光伏发电短期概率预测[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(s1): 38-45.
- DONG Lei, ZHOU Wenping, ZHANG Pei, et al. Short-term photovoltaic output forecast based on dynamic bayesian network theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(s1): 38-45.
- [17] SAHA T K, PURKAIT P. Investigation of polarization and depolarization current measurements for the assessment of oil-paper insulation of aged transformers[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2004, 11(1): 144-154.
- [18] 李景德, 沈寒, 陈敏. 电介质理论[M]. 北京: 科学出版社, 2003.

- LI Jingde, SHEN Han, CHEN Min. Dielectric theory[M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [19] SAHA T K, PURKAIT P, MULLER F. Deriving an equivalent circuit of transformer paper-oil system[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 1999, 15(1): 11-20.
- [20] 刘捷丰. 基于介电特征量分析的变压器油纸绝缘老化状态评估研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
- LIU Jiefeng. Condition assessment of transformer oil-paper insulation based on analysis of dielectric characteristic parameters[D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.
- [21] ZAENGL W S. Dielectric spectroscopy in time and frequency domain for HV power equipment, Part I: Theoretical considerations[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation Magazine, 2003, 19(5): 5-14.
- [22] 陈 杨, 蔡金锭, 林燕桢. 基于油纸绝缘等效电路的变压器微水含量研究[J]. 电工电能新技术, 2015, 34(5): 47-53.
- CHEN Yang, CAI Jinding, LIN Yanzhen. Research of micro water content of oil-paper transformer based on oil-paper insulation system's equivalent circuit method[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2015, 34(5): 47-53.
- [23] 王世强, 张冠军, 魏建林, 等. 纸板的老化状态对其PDC特性影响的实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(34): 177-183.
- WANG Shiqiang, ZHANG Guanjun, WEI Jianlin, et al. Experimental study of the aged states effects on pressboard PDC characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(34): 177-183.
- [24] LIU J Q, WANG X R, LU Y. A novel hybrid methodology for short-term wind power forecasting based on adaptive neuro-fuzzy inference system[J]. Renewable Energy, 2017, 103(1): 620-629.
- [25] 史建国, 高晓光, 李相民. 离散模糊动态贝叶斯网络用于无人作战飞机目标识别[J]. 西北工业大学学报, 2006, 24(1): 45-49.
- SHI Jianguo, GAO Xiaoguang, LI Xiangmin. Improving identification capability of unmanned combating air vehicle [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2006, 24(1): 45-49.
- 吴晋媛(1994—), 女, 硕士, 研究方向为高压设备故障诊断与在线检测。
- (上接第 195 页)
- 2016, 36(2): 136-140.
- [16] 秦耀东. 土壤物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- QIN Yaodong. Soil physics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2003.
- [17] 文习山, 胡建平, 唐 炬. 复杂电力网络短路电流分布及地网分流系数[J]. 高电压技术, 2011, 37(9): 2233-2240.
- WEN Xishan, HU Jianping, TANG Ju. Fault current distribution and current division factor of grounding grid in complex power system network[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(9): 2233-2240.
- [18] 李 谦, 蒋愉宽, 肖磊石. 变电站内短路电流分流系数实测和分析[J]. 电网技术, 2013, 37(7): 2060-2065.
- LI Qian, JIANG Yukuan, XIAO Leishi. Measurement and analysis on short-circuit current shunt coefficient inside substation[J]. Power System Technology, 2013, 37(7): 2060-2065.
- [19] 吴锦鹏, 张 波, 蒋愉宽, 等. 基于相分量模型的变电站短路电流分流系数计算[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(1): 122-130.
- WU Jinpeng, ZHANG Bo, JIANG Yukuan, et al. Calculation method of fault current distribution and shunt coefficient in substation based on phase-coordinate model[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(1): 122-130.
- [20] 李显鹏, 顾用地, 唐志伟, 等. 特高压站用 110 kV 低抗匝间短路电流分析及其保护改进[J]. 电力电容器与无功补偿, 2018, 39(3): 106-110.
- LI Xianpeng, GU Yongdi, TANG Zhiwei, et al. Inter-turn short circuit current analysis for 110 kV reactor in UHV substation and its protection improvement[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2018, 39(3): 106-110.
- [21] IEEE guide for safety of AC substation: ANSI/IEEE std 80—2000[S]. 2000.
- [22] 接地装置特性参数测量导则: DL/T 475—2006[S]. 2006.
- Guide for measurement of grounding connection parameters: DL/T 475—2006[S]. 2006.
- [23] 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合: DL/T 620—1997[S]. 1997.
- Overvoltage protection and insulation coordination for AC electrical installations[S]: DL/T 620—1997[S]. 1997.
- 马 力(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事防雷与接地技术的应用与研究。
- 曹晓斌(1974—), 男, 博士, 副教授, 硕导, 主要从事特高压输电、防雷与接地、过电压及接地技术的应用与研究。