

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2018.05.039

基于健康指数的电力变压器状态评估

王建¹, 朱文兵¹, 辜超¹, 吴奎华²

(1. 国网山东省电力公司电力科学研究院, 济南 250003; 2. 国网山东省电力公司经济技术研究院, 济南 250001)

摘要: 为提高变压器预测准确性,保证变压器可靠稳定运行,建立基于健康指数的变压器综合健康状况评估模型。该模型对变压器分层、分部件进行多参量统计分析,针对历史数据(运检数据、家族缺陷,设备基本信息、负载)和现状数据(例行试验数据)两个层面以及不同部件,建立量化指标体系。进一步提出采用统计工具SPSS(statistical product and service solutions),在研究变压器各参量之间关系的基础上,得出公共参量关联度及对健康指数的贡献值,最终利用统计方法确定量化权重及基于贡献度分析的健康指数评价模型。最后,以山东电网实际运行的变压器为例,验证了基于健康指数变压器状态评估模型的有效性,为输变电设备状态评价、检修提供科学依据。

关键词: 电力变压器; 健康指数; 状态评估; 统计分析; 模型

Condition Assessment of Power Transformer Based on Health Index

WANG Jian¹, ZHU Wenbing¹, GU Chao¹, WU Kuihua²

(1. Shandong Electric Power Research Institute, Jinan 250003, China;

2. Shandong Electric Power Economic Research Institute, Jinan 250001, China)

Abstract: To improve the forecasting accuracy and ensure reliable and stable operation of transformer, based on health index estimation model is proposed. The transformer data is divided into different levels and parts, so multi-parameter statistical analysis is carried on. The indicator system is scored and weighted by computing history data (inspection and maintenance, family defects, basic information and loading history) and condition data (such as routine test data). The condition parameters, which are classified on the component level, are scored and weighted, using statistical tools calculation. By using the statistical tools SPSS (statistical product and service solutions), multivariate statistical analysis is carried out. On the basis of studying the relationship between various parameters, a health evaluation model, which is based on contribution analysis, is presented. A condition-based evaluation tool, that quantifies power transformer degradation and clarifies the relationship between each health index, is put forward. The results are presented to verify the validity and feasibility of evaluating model and assessment algorithm. This paper provides a scientific method for the transmitting and transforming field.

Key words: power transformer; health index; condition assessment; statistic analysis; model

0 引言

电力变压器作为电网的枢纽设备,关系电网安全稳定运行,是电网中最为昂贵和重要的部分。每年由于计划停电检修所产生的直接、间接费用数字

庞大,其社会影响更是难以衡量。为了准确、高效地发现投运输电设备的缺陷,减少故障率,降低运行风险,目前,国内外采取状态检修的方式。这种检修方式依赖于科学、全面的评估指标体系和计算方法。因此,对于电力变压器健康状况评估,是

收稿日期:2018-01-13; 修回日期:2018-03-28

基金项目:国家电网公司技术革新项目(2016-18)。

Project Supported by State Grid Corporation's Technology Innovation (2016-18).

输变电设备全寿命周期评估中重要的环节^[1-4]。

有研究将变压器油特性参数作为主要特征量,对变压器的绝缘老化寿命进行评估,但是,反映变压器健康状况的特征参量是涉及多方面多变量的指标体系,文中按照变压器5个关键部件分层,结合历史和当前状态数据建立指标体系,其中包括基本信息、例行试验、运维数据3个主要方面。

目前,各指标权重的确定,通常依据专家经验或技术标准,并未对指标关系进行深入研究。文中采用统计工具,基于试验数据,针对变压器各参量之间的关系以及各参量对总健康指标的贡献值,进行分析研究,推导出各指标权重,给出健康指数的计算过程。

1 电力变压器健康指标体系

为了研究电力变压器健康状况,首先需要建立指标体系。反映变压器健康状态的特征量包括电学特性、化学特性、机械特性及外观表象。从部件层面分为本体、套管、分接开关、冷却系统和非电量保护,各部分在评价中所占比重通过最终健康指数计算反映出来。

1.1 油纸绝缘系统试验

由于油纸在电、热运行条件下,并伴随环境中过量的氧气、水分作用,发生降解,可通过测试油中降解生成的老化物质(如CO、CO₂、糠醛等)和纸绝缘聚合度,衡量变压器健康状况^[5-7]。

1)纸绝缘聚合度。聚合度反映纸的抗张强度机械特性,随着新材料的应用,聚合度判据也会不断更新。目前,普遍认为,新变压器纸绝缘的聚合度大多在1 000左右。纸绝缘聚合度判据见表1。

表1 纸绝缘聚合度限值

Table 1 Limit of the degree of polymerization of insulation paper

样品聚合度 DPV	> 500	500~250	250~150	< 150
诊断意见	良好	可以运行	注意	退出运行

2)糠醛。在纸板劣化过程中,纤维素大分子降解后,才形成的一种主要氧杂环化合物。变压器运行过程,影响糠醛体积分数的因素有多个方面,包括油纸比例和本身的制造工艺,变压器运行时间、运行条件、负载率,变压器油处理方式。变压器发生绝缘局部过热老化、过载等故障也会引起糠醛体积分数升高。糠醛体积分数通过变压器油采样测量,体积分数低则表明变压器油纸强度高,性能好,变压器整体状况良好^[7-8]。

3)油中溶解气体。油中溶解气体是一种广泛应用的故障监测和预防手段。变压器油和油纸绝缘系统在电热应力长期作用下,发生分子结构的改变,经过一系列化学反应产生各种特征气体,例如氢气、碳氢化合物、烃类。

国内外发展了一些方法,可用于判别油中溶解气体的比例来判断变压器内部故障如:过热、不良电接触、局部放电等。CO/CO₂<5,表明油纸快速降解。CO₂/CO>7时,表明绝缘老化或是大面积低温过热故障。当然,变压器发生故障时,变压器油也会分解出CO、CO₂气体。无论是变压器油纸劣化还是故障,都可归结为变压器健康状况,因此,综合考虑CO、CO₂。

1.2 运维数据和例行试验

设备基本信息主要包括变压器铭牌信息,电压等级、容量、短路阻抗等。例行试验包括绕组直流电阻、绕组介质损耗因数、电容量、频率响应测试、绕组绝缘电阻、吸收比或极化指数、泄漏电流等,是否满足技术规定要求^[9-13]。

1)缺陷数据。包括设备本身和家族缺陷两部分。缺陷记录应包含运行巡视、检修巡视、带电检测、检修过程中发现的缺陷,缺陷定级以及消缺处理情况。

2)负载历史。设备在近12个月内,每月记录的最大负载值,过载或长期急救负载运行规定,会使变压器性能劣化。

3)红外测温。红外热像可检测变压器本体、引线接头、电缆终端,红外热像图显示应无异常温升、温差和/或相对温差,可揭示变压器内部隐患。

4)外观检查。主要通过查阅巡视记录,设备外观完整无损,无异物;引线及汇流排、接头是否正常;接地是否可靠;噪声及振动;风道是否通畅无异物等。

1.3 变压器部件

1)变压器本体。变压器健康状况的重要考核部分,包括铁心绝缘、绕组介损、短路阻抗、泄漏电流以及油试验,红外测温和日常运检数据:外观、短路电流、渗漏油等情况。

2)变压器套管。包括油中溶解气体、红外测温、介损、绝缘电阻、外绝缘爬距是否满足要求。

3)变压器分接开关。分接开关的运维调试记录,包括渗漏油、油位、分接机构是否滑档、切换次数是否超过规定、在线滤油装置压力是否异常以及油中溶解气体。

4)变压器冷却系统。主要包括日常巡检中,电

机风机运行情况、冷却装置表面是否清洁、风道是否通畅无异物、是否有渗漏油、水控制器是否正常。

5)非电量保护。包括轻重瓦斯动作、压力释放阀以及油温油位等5个组成部件。

单一的试验数据,可以反映变压器某方面的性能,如果要全面评价变压器整体健康状况,需要综合各试验结果和相关缺陷信息。文中运用健康指数的方法,进行判定,数据来源有设备基本信息、现场运维记录、例行试验结果等。汇集整理国家、行业、企业等层面技术标准、反措、管理规定等,采用统计工具,研究了各指标的关系,对各项指标进行划分和加权^[5,14-17]。

2 基于统计工具的多变量分析

2.1 数据正态化

多变量分析的重要假设条件是数据属于正态分布。试验结果通常并非标准的正态分布,而是存在不同程度的偏差度。首先,通过SPSS工具,将非正态数据利用变换工具进行正态化处理。SPSS是一种数据统计分析工具,便于数据对接,具有内置VBA语言,强大的统计处理功能。利用SPSS对试验数据正态化处理后,原始数据中存在超出范围的过高异常值,在多变量分析中会被忽略,需要对异常值进行预处理,保留变压器故障原因产生的异常值。

2.2 公共系数分析

某几类变压器测试项目的结果,可能存在未知关联性,通过公共系数分析的方法,来确定各变量的关联性。文中利用SPSS工具,对多次测试结果进行统计分析,得出不同测试项目之间的联系和公共影响因素对各个项目的影响。

公共因素关联度分析图见图1。图1中方框代表测试结果, $x_1 \sim x_{12}$ 表示对测试结果有一定影响的未量化因素,例如环境温湿度、电磁环境干扰、测试误差等。 $F_1 \sim F_5$ 为公共因素,它们与各变量的关联程度越高,系数值越大。 $F_1 \sim F_5$ 彼此之间的关联程度是相互的,用双向箭头表示。

2.3 公共因素关联度分析

在电力变压器健康状态评价中,油纸绝缘系统的性能状况是最重要的指标之一。通常,油纸绝缘系统的寿命直接决定了油浸式变压器寿命。因此,文中主要针对87组变压器油样试验数据,进行统计分析,首先研究了各参量之间的关系,其次,得出各评价指标在评价变压器总体健康状况时的贡献值。

如图1所示,具有相近的性质或伴随同一化学

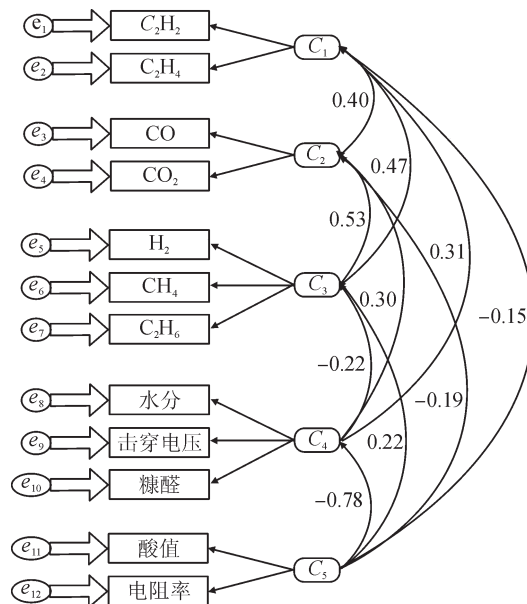


图1 公共因素关联度分析图

Fig. 1 The degree of correlation between factors

反应产生的物质,划分为一组。在电、热运行条件下,油纸降解老化或是变压器发生故障时,油中分解气体 CO 、 CO_2 通常是相伴而生的化学产物;变压器油中杂质、水分含量越高,越容易击穿,这种影响关系大的参量,划分为同一组。 H_2 、 CH_4 、 C_2H_6 是一组高度关联的参量,与公共因素 C_3 相关。

C_2 与 C_3 之间正关联度最强,为0.53; C_1 和 C_3 的关联度次之,关联系数为0.47; C_4 与 C_5 之间则为负相关的关系。各特征参量和公共因素彼此之间的关系分析,为进一步确定参量权重以及健康指数奠定了基础。

3 变压器健康指数评价模型

变压器健康指数计算步骤主要如下:

- 1)在公共因素关系分析的基础上,分析公共因素对健康指数 HI 的贡献值;
- 2)进一步确定各个健康指标权重;
- 3)根据专家经验和标准规定,制定修正因子;
- 4)将权重经过修正因子修正;
- 5)得出健康指数,评价变压器整体健康状况。

其中,第一步是关键的步骤,基于贡献度分析的健康指数评价模型见图2。

如图2所示, C_4 对健康指数的影响最大,其中包括击穿电压、糠醛、水分这3个参量,因此,在评价体系中对其赋予最高权重。变压器油中水分在变压器绝缘特性劣化过程,起了重要作用。糠醛体积分数一定程度反映了变压器油纸绝缘系统的性能,糠醛体积分数越高,则表明绝缘性能越差。通过统计

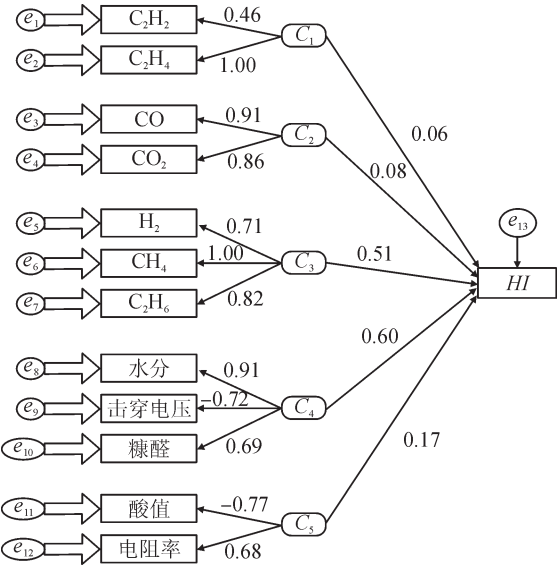


图2 基于贡献度分析的健康指数评价模型

Fig. 2 The HI estimate model on contribution degree analysis

分析得出的分组和权重与现有结论基本一致。在对变压器健康状况评价时,对权重分配还需进一步采用校正因子,加以校正,使评价过程更贴近生产

$$(\%)HI = \left(0.5 \frac{\sum_{i=1}^{12} (K_i HIF_i)}{\sum_{i=1}^{12} (HIF_{\max} K_i)} + 0.2 \frac{\sum_{i=13}^{16} (K_i HIF_i)}{\sum_{i=13}^{16} (HIF_{\max} K_i)} + 0.1 \frac{\sum_{i=17}^{17} (K_i HIF_i)}{\sum_{i=17}^{17} (HIF_{\max} K_i)} + 0.1 \frac{\sum_{i=18}^{21} (K_i HIF_i)}{\sum_{i=18}^{21} (HIF_{\max} K_i)} + 0.1 \frac{\sum_{i=22}^{22} (K_i HIF_i)}{\sum_{i=22}^{22} (HIF_{\max} K_i)} \right) 100\% \quad (1)$$

表2 健康指数分级

Table 2 Health index scale

HI/%	变压器健康状况	措施建议
85~100	状况极佳	正常运行维护
70~85	状况佳	正常运行维护
50~70	良好	可继续运行,加强监视
30~50	较差	接近或略微超过标准限值,应监视运行,适时安排停电检修
0~30	劣化严重	超过标准限值,尽快安排停电检修

表4中序号1对应正阳站2号主变压器数据,利用式(1),计算得110 kV正阳站2号变压器HIF%为49.182,位于30%~50%区间,总体运行状况较差,接近或略微超过标准限值,应监视运行,适时安排停电检修。该设备实际状况:氢气超标严重,并占氢烃总量的90%以上,总烃超标,CH₄占总烃75%以上,特征气体判据判断为局部放电。三比值法编码为010,判断为局部放电^[22-23]。高压侧中性点套管介损超标,电容量接近告警值,主变常规试验正常。综上,该设备总体运行状况较差,且接近报废年限。由此得出,文中健康指数法得出的计算值与实

现场实际。最终,得到各主要项目的权重和健康指数HIF^[18-20]。

按照电力变压器不同部件,对健康状况进行分层评估,计算式见式(1)。

式(1)中:K_i为权重,HIF_i为健康指数;HIF_{max}为健康状况最佳时对应的健康指数^[9,21]。

健康指数分级见表2,变压器健康状况评价因素权重及分值见表3。

4 典型案例

110 kV正阳站2号主变器,规格型号为SZ10-50000/110,电压等级为220 kV,容量为50 MVA,冷却方式为自冷,山东鲁能泰山电力设备有限公司生产,2008年4月投运,已运行22年,报废年限30年。

220 kV宝都变电站2号主变器,规格型号为SFPSZ9-150000/220,电压等级为220 kV,容量为150 MVA,山东电力设备有限公司生产,2002年12月投运,已运行14年,报废年限30年。两台变压器的运行及试验数据见表4。

际状况基本吻合。

为全面验证模型有效性,选取不同电压等级,不同工况和具有不同缺陷的220 kV宝都站主变压器,其中序号2为其基本信息和试验数据。与实例1相比,虽同样具有缺陷,但两者性质不同,且试验数据也相差较大,经过模型计算得到HIF为78.052,模型结果表明该设备运行状况良好。实际运行状况是该变压器运行14年,各项指标基本正常,无不良工况,虽有过冷却器方面严重缺陷,已消除,目前运行正常。评价结果与实际状况,吻合较好。

此外,为更好验证该模型评价的一致性,选取山东电网12台不同电气参数和缺陷性质的110 kV变压器,各台变压器健康指数HIF见图3。

计算结果中,最小值为54.346%,最大值为78.326%,50%~70%区间内的占25%,70%~85%区间的,占75%,整体运行状况良好,个别变压器由于家族缺陷或年检大修即将到期,健康指数偏低,与实际情况基本相符。通过从山东电网选取多台不同运行阶段和电气参数,不同评价状态的变压器,进行计算比较,验证评价模型和计算方法的有效性。

表3 变压器健康状况评价因素权重及分值
Table 3 Scaling and weighting of the transformer health condition

序号	评价项目	权重 K	不同劣化程度扣分值 F
1	纸绝缘聚合度	3	8,6,4,2,0
2	糠醛	3	8,6,4,2,0
3	油中溶解气体	4	8,6,4,2,0
4	水分	4	8,6,4,2,0
5	酸值	1	8,6,4,2,0
6	击穿电压	3	8,6,4,2,0
7	油介质损耗因素	1	8,6,4,2,0
8	红外测温	4	8,6,4,2,0
9	缺陷数据	3	8,6,4,2,0
10	负载历史	3	8,6,4,2,0
11	外观检查	1	8,6,4,2,0
12	基本信息和例行试验	3	8,6,4,2,0
13	套管—外观	2	8,6,4,2,0
14	套管—红外测温	3	8,6,4,2,0
15	套管—油中溶解气体	4	8,6,4,2,0
16	套管—绝缘电阻	3	8,6,4,2,0
17	冷却系统—巡视记录	3	8,6,4,2,0
18	分接开关—巡视记录	2	8,6,4,2,0
19	分接开关—运行数据	2	8,6,4,2,0
20	分接开关—动作特性	3	8,6,4,2,0
21	分接开关—油中分解气体	3	8,6,4,2,0
22	非电量保护—巡视记录	3	8,6,4,2,0

表4 变压器运行及试验数据

Table 4 Operation and measurement data of power transformer

序号	设备型号	负载历史	缺陷管理	直流电阻, 相间最大变化率/%	绕组绝缘电阻 R15S/ R60S/MΩ	吸收比	套管介损最大值/%	绕组直流泄漏电流	主绝缘电阻/MΩ	
设备基本信息和例行试验数据	1	SZ10-50000/110	无不良工况	严重/2次	1.40	49.8/53.3	1.24	2.575	无明显变化	10 000
	2	SFPSZ9-150000/220	无不良工况	严重/1次	1.22	1 500.0/2 500.0	1.53	0.350	无明显变化	10 000
序号	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂	总烃	试验日期	
油色谱试验数据/ (μL·L ⁻¹)	1	3 660.00	576.00	2 508.00	221.53	7.16	59.11	0.00	287.80	2015-05-27
	2	10.00	219.00	475.00	2.80	0.37	0.80	0.00	3.97	2012-06-27
序号	击穿电压/kV	闪点/℃	酸值/ (mgKOH·g ⁻¹)	PH 值	体积电阻率	介质损耗/%	水分/ (mL·g ⁻¹)	糠醛/(mg·L ⁻¹)	试验日期	
油简化试验数据	1	40.000	146.000	0.010	5.800	9.870×10 ¹¹	0.085	12.600	0.209	2012-06-28
	2	60.300	152.000	0.006	5.200	1.250×10 ¹²	0.048	11.300	0.024	2011-03-07

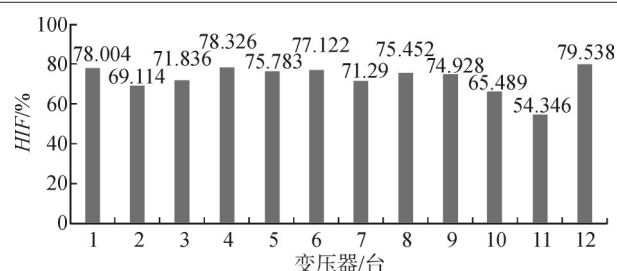


图3 变压器健康状况评价

Fig. 3 The health condition evaluation of transformer

5 结语

文中从分层建立电力变压器指标体系入手,进而通过采用统计工具 SPSS,对 87 组变压器油样试验数据进行了分析,研究了各因素之间的关系以及各参量对总健康指数的贡献值。利用统计工具 SPSS 可对指标体系实现加权,建立健康指标计算模型。未来可将该研究拓展到输变电设备评价领域推广应用。最后,以山东电网实际运行变压器为例,通过模型进行计算,证明该评价模型和计算方法的有效性。

参考文献:

- [1] LIAO Ruijin, ZHENG Hanbo, GRZYBOWSKI S, et al. An integrated decision-making model for condition assessment of power transformers using fuzzy approach and evidential reasoning[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011,

- 26(2):1111-1118.
- [2] DOMINELLI N, RAO A, KUNDUR P. Life extension and condition assessment: Techniques for an aging utility infrastructure[J]. IEEE Transactions on Power and Energy Magazine, 2006, 4(3): 24-35.
 - [3] WANG M, VANDERMAAR A J, SRIVASTAVA K D. Review of condition assessment of power transformers in service[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation Magazine, 2002, 18(6): 12-25.
 - [4] 程志华, 章剑光. 状态检修技术及其辅助分析系统的应用[J]. 电网技术, 2003, 27(7): 16-18.
CHENG Zhihua, ZHANG Jianguang. Application of condition based maintenance technology and its computer aided analysis system[J]. Power System Technology, 2003, 27(7): 16-18.
 - [5] 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 Ruirui, ZHAO Jiying, 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.
 - [6] 廖玉祥. 一种电力变压器运行状态综合评估模型的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.
LIAO Yuxiang. A study on the comprehensive evaluation model of the running state of power transformer[D]. Chongqing: Chongqing University, 2006.
 - [7] 乔维德. 基于模拟退火改进粒子群混合算法的变压器故障诊断[J]. 高压电器, 2008, 44(3): 208-210.
QIAO Weide. Transformer fault diagnosis based on SAPSO-BP hybrid algorithm[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(3): 208-210.
 - [8] SAHA T K. Review of modern diagnostic techniques for assessing insulation condition in aged transformers[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2003, 10(5): 903-917.
 - [9] 国家电网公司. 油浸式变压器(电抗器)状态评价导则[R]. 北京: 国家电网公司, 2008.
State Grid. Guide for condition evaluation of oil-immersed power transformers(reactors)[R]. Beijing: State Grid, 2008.
 - [10] 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 Xigui, CHANG Yan, LUO Yunbai, et al. Remnant life estimation of power transformer based on health index[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(12): 80-85.
 - [11] 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 Yongji. New methodology for lifetime evaluation of medium and small sized power transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(21): 38-41.
 - [12] SWIFT G, MOLINSKI T S, LEHN W. A fundamental approach to transformer thermal modeling. I. theory and equivalent circuit[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2001, 16(2): 171-175.
 - [13] 周淦, 徐智, 廖瑞金, 等. 基于云理论和核向量空间模型的电力变压器套管绝缘状态评估[J]. 高电压技术, 2013, 39(5): 1101-1106.
ZHOU Quan, XU Zhi, LIAO Ruijin, et al. Insulation condition assessment of power transformer bushing based on cloud model and kernel vector space model[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(5): 1101-1106.
 - [14] 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.
 - [15] 廖瑞金, 郑含博, 杨丽君, 等. 基于集对分析方法的电力变压器绝缘状态评估策略[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(21): 55-60.
LIAO Ruijin, ZHENG Hanbo, YANG Lijun, et al. A power transformer insulation condition assessment method based on set pair analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(21): 55-60.
 - [16] 张晗, 常安, 王奇, 等. 基于多源信息的变压器状态评价方案研究与应用[J]. 高压电器, 2016, 52(2): 19-27.
ZHANG Han, CHANG An, WANG Qi, et al. Research and application of transformer condition evaluation model based on multi-source information[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(2): 19-27.
 - [17] 范辉, 高树国, 王学磊, 等. 多指标加权分析的变压器故障油色谱诊断方法可靠性评估[J]. 高压电器, 2016, 52(6): 178-182.
FAN Hui, GAO Shuguo, WANG Xuelei, et al. Reliability assessment of the DGA fault diagnosis methodologies for transformers based on multi-indexes weighted analysis[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(6): 178-182.
 - [18] 张懿议, 廖瑞金, 杨丽君, 等. 基于云理论的电力变压器绝缘状态评估方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 13-20.
ZHANG Yiyi, LIAO Ruijin, YANG Lijun, et al. An assessment method for insulation condition of power transformer based upon cloud model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 13-20.
 - [19] 王钦, 文福拴, 刘敏, 等. 基于模糊集理论和层次分析法的电力市场综合评价[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(7): 32-37.
WANG Qin, WEN Fushuan, LIU Min, et al. Combined use

- lecular re-orientation dynamics of a surface stabilized ferroelectric liquid crystal[C]//In Proceedings of the 5th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics. [S.l.]:[s.n.], 2003:646.
- [15] POZHIDAIEV E, CHIGRINOV V, MURAUSKI A, et al. V-shaped electro-optical mode based on deformed-helix ferroelectric liquid crystal with subwavelength pitch[J]. The Journal of the Society for Information Display, 2012, 20(5): 273-278.
- [16] GUO Q, BRODZELI Z, POZHIDAIEV E P, et al. Fast electro-optical mode in photo-aligned reflective deformed helix ferroelectric liquid crystal cells[J]. Optics Letters, 2012, 37(12):2343-2345.
- [17] BRODZELI Z, SILVESTRI L, MICHIE A, et al. Sensors at your fibre tips: A novel liquid crystal-based photonic transducer for sensing systems[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(17):2940-2946.
- [18] 方春恩, 李 伟, 王佳颖, 等. 基于电阻分压的 10 kV 电子式电压互感器[J]. 电工技术学报, 2007, 22(5):58-63.
FANG Chun'en, LI Wei, WANG Jiaying, et al. 10 kV electronic voltage transformer based on resistor divider[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(5):58-63.
- [19] 王红星, 张国庆, 蔡兴国, 等. 电容分压型电子式电压互感器研究与设计[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(10):83-87.
WANG Hongxing, ZHANG Guoqing, CAI Xingguo, et al. Electronic capacitive voltage transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(10):83-87.
- [20] 段梅梅, 李振华, 李红斌, 等. 电阻分压型电子式电压互感器误差分析及对电能计量的影响研究[J]. 电测与仪表, 2015, 52(2):59-63.
DUAN Meimei, LI Zhenhua, LI Hongbin, et al. Error analysis of resistance dividing type electronic voltage transformer and its impact on electric power measurement[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2015, 52(2):59-63.
- [21] 聂一雄, 孙丹婷. 阻容分压型电压互感器的性能分析[J]. 变压器, 2007, 44(1):9-14.
NIE Yixiong, SUN Danting. Characteristic analysis of resistive-capacitive divider voltage transformer[J]. Transformer, 2007, 44(1):9-14.

赵 俊(1979—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为光纤通信及光传感技术。

(上接第 253 页)

- of fuzzy set theory and analytic hierarchy process for comprehensive assessment of electricity markets[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(7):32-37.
- [20] TANG W H, SPURGEON K, WU Q H, et al. An evidential reasoning approach to transformer condition assessments[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(4):1696-1703.
- [21] 廖瑞金, 王 谦, 骆思佳, 等. 基于模糊综合评判的电力变压器运行状态评估模型[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(3):70-75.
LIAO Ruijin, WANG Qian, LUO Sijia, et al. Condition assessment model for power transformer in service based on fuzzy synthetic evaluation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(3):70-75.
- [22] 巩学宾, 闫明发, 魏晶霞. 一例变压器内部故障的油色谱分析诊断和处理[J]. 高压电器, 2008, 44(3):275-276.
GONG Xuebin, YAN Mingfa, WEI Jingxia. Oil chromatogram analysis of a fault inside transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(3):275-276.
- [23] 程 锦, 钟 义, 兰孝富. 一起 750 kV 变压器内部故障分析与处理[J]. 高压电器, 2016, 52(2):200-204.
CHENG Jin, ZHONG Yi, LAN Xiaofu. Analysis and treatment of the inner fault in a 750 kV transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(2):200-204.

王 建(1983—), 女, 博士, 工程师, 主要从事电气设备状态评价和故障分析。