

文章编号: 2095-4980(2018)01-0153-05

基于灰靶理论的变压器绝缘状态监测

王 磊

(安康学院 电子与信息工程学院, 陕西 安康 725099)

摘 要: 变压器发生绝缘故障是电力系统事故的主要诱因, 要保证变压器在电力系统中的安全运行, 对其绝缘状态实施在线监测是非常必要的。变压器在线监测的关键是实现绝缘状态的评估, 评估结果受多个内外因素的随机性约束, 影响因子多, 建模复杂。针对这一问题, 本文建立了基于灰靶理论的变压器绝缘状态监测系统, 通过计算各项指标对绝缘状态的影响复合权重, 从而确保评估结果的合理性。经实验验证, 该系统能实现对变压器设备绝缘状态的有效判断, 为变压器的检修计划提供重要参考。

关键词: 灰靶理论; 变压器; 绝缘状态

中图分类号: TN102; TM406

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201801.0153

Insulation status online monitoring of transformer based on grey target theory

WANG Lei

(College of Electronics and Information Engineering, Ankang University, Ankang Shannxi 725099, China)

Abstract: According to statistics, the insulation fault is one of the most important reasons for electrical equipment, therefore the study of transformer insulating state monitoring has great significance to ensure safe operation of power system. The accuracy of insulation condition assessment is a key issue for online dynamic monitoring the transformer insulation status. The evaluation result is randomly influenced by various internal and external factors, which makes its modeling complex. An online monitoring system of transformer based on grey target theory is proposed. Through improving traditional grey target theory, and calculating the affection of different insulation indexes by weight coefficient method, the rationality of the evaluation result is guaranteed. Experiments show that this method can reasonably and objectively assess transformer insulating state, providing an important reference for maintenance plan of transformer.

Keywords: grey target theory; transformer; insulation status

变压器是一种重要的电气设备, 在工矿企业的日常运行中完成电压转换和功率传输工作, 其安全运行直接关系到电力系统的稳定, 确保电力变压器的长期可靠运行是需要关注的重要问题。根据相关统计, 变压器发生事故的主要原因是绝缘故障引起, 对变压器进行绝缘在线监测非常重要, 其关键问题在于对变压器绝缘状态的正确评估。当前, 国内外的相关研究将模糊理论、遗传算法、证据推理、支持向量机、层次分析法等理论方法应用在变压器设备绝缘状态评估方面^[1-3], 取得了一定效果。然而由变压器自身特性决定, 其故障情况复杂, 用于故障判断的信息极为有限, 使得这些方法具有明显的局限性。采用模糊多属性群决策方法评估变压器的运行情况, 采用折衷型群决策方法制定方案, 但是该方法只对油中的溶解气体进行分析, 仅通过单一指标来确定变压器状态, 无法取得良好的评估结果。用物元理论评估变压器, 通过层次分析法来计算各指标的影响权重^[4], 但是这一方法的主观随意性较大。贝叶斯网络评估变压器充分利用了历史、当前和预测状态, 虽然提高了结果的准确性, 但是也导致评估严重依赖对未来状态预测的精确度。改进证据推理的评估方法^[5], 其初始基本概率是经层次分析及模糊评估获取的, 同样存在权重计算的主观性较大的缺陷。通过支持向量机对变压器状态建立模型, 以变压器的油中所含气体作为支持向量机的输入来提取故障信息^[6]或者采用故障树分析法进行变压器状态评估^[7], 由于对现有故障机理的理论分析还不够深入, 而存在模型和故障树的建立比较困难的情况。

变压器绝缘状态的评估结果受内外多种因素的随机性约束，影响因素多，机理复杂，建立模型非常困难。同时影响绝缘状态的多个指标具有不同的权重，只有在复杂条件下提取绝缘特征量，同时合理分配各个指标的影响权重，才能实现对变压器绝缘状态的有效判断和正确评估。由于变压器设备的绝缘状态受各种随机因素影响，且影响程度各不相同，因此适合把变压器作为一个“灰色系统”来处理^[8]。

灰靶理论是灰色理论中进行灰评估和灰决策的重要方法，适用于研究已知信息非常贫乏的灰色系统，通过对有限的已知信息进行判断，提取其中的有价值部分。即使无标准模式，也可以经过灰靶设定，对系统的灰靶靶心进行理论计算，经等级划分来评估确定系统的状态^[8]。本文通过对变压器各个影响因素的研究，建立了基于灰靶理论的变压器绝缘状态监测系统，采用复合权重法计算各项指标对绝缘状态的影响权重，提高所得权重的合理性，完成变压器绝缘的有效评估。

1 系统设计

本文设计的变压器绝缘状态在线监测系统，通过在线监测绝缘套管的介质损耗、接地电流、油温升高、放电次数、输出电压、输出电流、环境温度、环境湿度等参数，实现对变压器的特征数据提取与绝缘状态判断^[9]，系统结构见图 1。

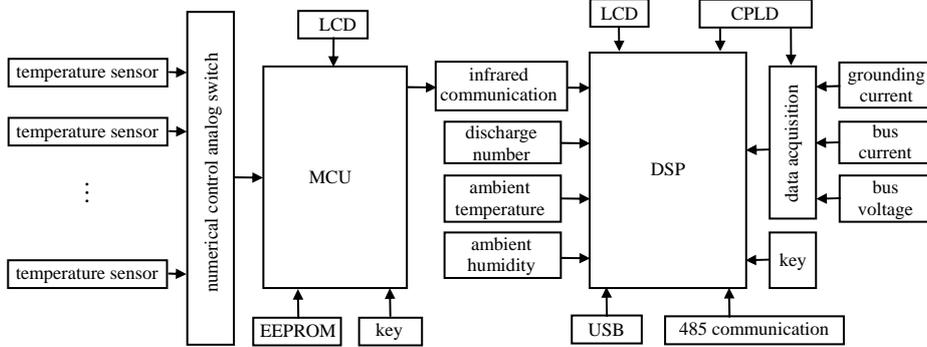


Fig.1 Schematic diagram of whole system hardware design
图 1 系统硬件设计图

系统采集油温升高幅值、环境温度、环境湿度、接地电流等信号，完成信号变换后，送入信号调理电路中，得到的实时数据传到上位机进行处理，数据通信采用 485 通信。系统所用的传感器主要有电流、电压传感器、温度和湿度传感器。其中测量接地电流选用的电流传感器，以电压输出，量程 10 μA~10 A，工作温度-50~90 ℃。电压传感器的量程 0~1 300 V，工作温度为-30~90 ℃。温湿度传感器选用 DHT11 温湿度传感器，作为温湿度复合传感器，它包括电阻式感湿元件和 NTC 测温元件，具有极高的可靠性与长期稳定性，同时能快速响应，抗干扰强。DHT11 传感器都进行过精确校准，其校准系数储存在 OTP 内存中的程序里，可以在信号处理过程中进行调用。温湿度测量的重复率均为±0.1，测量范围符合要求。DHT11 传感器的输出信号经信号调理电路调整到采样范围内，经 AD 采样送入上位机处理。系统工作流程见图 2。

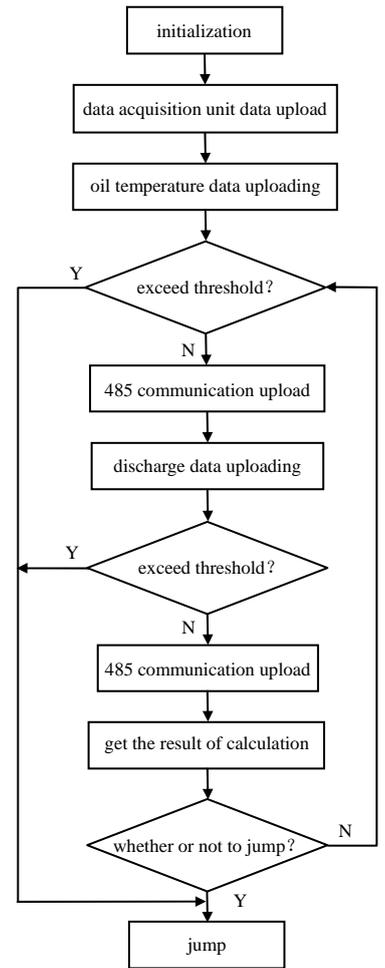


Fig.2 Flowchart of system
图 2 系统工作流程

2 灰靶理论及权重计算

2.1 靶心度的计算

灰靶理论是处理模式序列的灰关联分析理论，其关键之处在于按照命题信息域的要求，从一组模式序列中，找到最接近子命题目标值的数据构造标准模式。各模式与所构造的标准模式共同构成灰靶，以标准模式为靶心，以灰关联差异信息空间的模式与靶心的关联度，作为靶心度^[8]。基于靶心度可以进行模式分级，通过将各指标与标准模式进行比较，根据划定的等级来进行相关的评估决策。

假设 $\omega_i = \{\omega_i(1), \omega_i(2), \dots, \omega_i(n)\}$ 为变压器设备的第 i 个状态模式，其中， $\omega_i(k)$ 为第 k 个指标序列， $\omega(k) = \{\omega_1(k), \omega_2(k), \dots, \omega_m(k)\}$ 。 $\forall \omega_i(k) \in \omega_i \Rightarrow k \in K = \{1, 2, \dots, n\}$, $i \in I = \{1, 2, \dots, m\}$, $\forall \omega_i(k) \in \omega(k) \Rightarrow i \in I = \{1, 2, \dots, m\}$ 。 n 和 m 分别是变压器的状态模式数目和状态量个数。

令 POL(mem), POL(min)和 POL(max)分别代表适中、极小值和极大值, 则标准模式可按照如下方式构造。

当 $\text{POL}\omega(k)=\text{POL}\omega(\max)$, 取 $\omega_0(k)=\max \omega_i(k)$, $\omega_i(k)\in\omega(k)$;

当 $\text{POL}\omega(k)=\text{POL}\omega(\min)$, 取 $\omega_0(k)=\min \omega_i(k)$, $\omega_i(k)\in\omega(k)$;

当 $\text{POL}\omega(k)=\text{POL}\omega(\text{mem})$, 取 $\omega_0(k)=\text{avg} \omega_i(k)$ 或指定值, $\omega_i(k)\in\omega(k)$ 。

通过对各个指标的计算, 可以得到标准模式序列: $\omega_0=\{\omega_0(1),\omega_0(2),\dots,\omega_0(n)\}$, n 为变压器绝缘状态指标的数目。由于各个特征量的数据差别较大, 需要完成进一步的灰靶变换, 对各个指标进行统一测度转化。

若 $T\omega_0=x_0$, $x_0=\{x_0(1),x_0(2),\dots,x_0(n)\}=(1,1,\dots,1)$, 有 $T\omega_i(k)=x_i(k)$, $T\omega_i(k)$ 可按式(1)计算:

$$T\omega_i(k)=\frac{\min\{\omega_i(k),\omega_0(k)\}}{\max\{\omega_i(k),\omega_0(k)\}}=x_i(k) \quad (1)$$

式中 $T\omega_i(k)=x_i(k)\in[0,1]$, 并且具有以下含义: $\omega_i(k)\in\omega_0(k)$, 则 $x_i(k)=1$; $|\omega_i(k)-\omega_0(k)|$ 越小, 则 $x_i(k)$ 越接近 1; $|\omega_i(k)-\omega_0(k)|$ 越大, 则 $x_i(k)$ 越远离 1。

根据上式对标准模式的各个指标序列进行灰靶变换, 完成统一测度的转化。

@_{GRF} 为灰关联因子集, 其表达式为:

$$@_{\text{GRF}}=\{x_i|i\in I,x_i=T\omega_i,\omega_i\in @_{\text{INU}}\} \quad (2)$$

Δ_{GR} 为 @_{GRF} 的灰关联差异信息空间, 其表达式为:

$$\Delta_{\text{GR}}=(\Delta, \zeta, \Delta\omega_i(\max), \Delta\omega_i(\min)) \quad (3)$$

令 $\Delta=\{\Delta\omega_i(k)|i\in I,k\in K,\Delta\omega_i(k)=|x_i(k)-x_0(k)|=|x_i(k)-1|,x_0(k)\in x_0\}$, $x_0=T\omega_0$, 并且

$$\begin{cases} \Delta\omega_i(\max)=\max_i\max_k\Delta\omega_i(k)=\max_i\max_k|1-x_i(k)| \\ \Delta\omega_i(\min)=\min_i\min_k\Delta\omega_i(k)=\min_i\min_k|1-x_i(k)| \end{cases} \quad (4)$$

根据以上公式, 推导可得靶心系数 $\gamma(x_0(k),x_i(k))$ 的计算公式(5):

$$\gamma(x_0(k),x_i(k))=\frac{\min_i\min_k\Delta\omega_i(k)+0.5\max_i\max_k\Delta\omega_i(k)}{\Delta\omega_i(k)+0.5\max_i\max_k\Delta\omega_i(k)} \quad (5)$$

将 $\gamma(x_0,x_i)$ 称为 x_i 的靶心度, 其计算公式(6)为:

$$\gamma(x_0,x_i)=\frac{1}{n}\sum_{k=1}^n\gamma(x_0(k),x_i(k)) \quad (6)$$

这一计算公式为传统灰靶靶心度计算公式, 其靶心度是对各个指标特征量对应的靶心系数取平均值, 这是以各指标对靶心度的影响相同为前提的, 明显与工程实际相悖。对变压器设备而言, 其介质损耗与环境参数对于靶心度的影响程度具有明显的差异, 因此不能对各指标的靶心度系数做相同处理。为此, 本文构造了复合加权灰靶靶心度计算, 其公式如式(7)所示。

$$\gamma'(x_0,x_i)=\alpha_k\sum_{k=1}^n\gamma(x_0(k),x_i(k)) \quad (7)$$

式中 α_k 为复合加权灰靶靶心度系数, 其大小采用主客观复合权重方式来确定。

2.2 复合赋权

熵权法作为客观赋权法, 通过综合各种信息, 根据各特征量所含信息大小进行指标权重计算, 以避免人为因素的干扰。其缺点在于参考数据完全依赖于测量, 忽视了专家经验和系统历史数据的重要参考价值, 计算的权重往往具有一定的不合理性。

层次分析法是主观赋权法, 能够将一个多准则决策问题进行有效的分解, 并按照隶属关系构建相关联的有序层次递阶。层次分析法结合专家经验及系统历史数据进行指标分析, 将各项指标按照重要程度进行排序, 给出影响权重, 其缺点在于弱化了各指标的内在联系, 权重的计算过程与评价指标的数字特征之间不能保持足够的相关性。鉴于权重的单一计算方式具有极大的片面性, 本文采用了复合权重计算法以兼顾主观与客观因素, 既能充分发挥专家经验的主观作用, 又能尽量避免主观因素带来的随意性偏差, 使指标权重随数据的变动相应变化, 提高权重分配的合理性。

Z 为主观权重, 采用层次分析法确定; K 为客观权重, 通过熵权法确定, 那么第 i 个指标的最终复合权重 Q_i 可以由式(8)确定:

$$Q_i=\alpha K_i+(1-\alpha)Z_i \quad (8)$$

式中复合权重系数 $\alpha=0.5$, 表示在权重确定过程中, 始终保持客观和主观因素并重的标准。

2.3 靶心度的划分

根据变压器设备的故障诊断及维修的专家经验，经过灰色理论的分析，按照灰靶靶心度大小，将变压器的绝缘状态分为五级：良好、正常、小故障、中等故障和大故障，其中各等级的对应靶心度值范围及相应的检修决策，如表 1 所示。

表 1 变压器绝缘状态分级

gradation	state	approaching degree	overhaul decision
1	big fault	[0.90, 1.00]	emergency shutdown
2	medium fault	[0.80, 0.90]	overhaul
3	small fault	[0.60, 0.80]	make a maintenance plan
4	normal	[0.40, 0.60]	system normal
5	good	[0, 0.40]	overhaul plan is postponed

本文以某 10 kV 变压器(额定电流为 0.057 7 A)为研究对象，得到一组实验数据，可组成变压器的典型状态模式序列。变压器设备的绝缘状态评估所用指标为：绝缘套管的介质损耗、接地电流、油温升高值、放电次数、输出电压、输出电流、环境温度、环境湿度，见表 2，根据其中数据进行分析，可计算得到标准模式序列 ω_0 为：{0.65,100.0,65.0,22,12.0,0.071 0,50.0,100.0}。

表 2 变压器状态指标模式序列

dielectric loss/%	grounding current/mA	oil rise temperature/°C	discharge times	output voltage/kV	output current/kA	ambient temperature/°C	ambient humidity/(%rh)
0.65	89.3	49.2	21	10.2	0.057 8	22.5	63.3
0.50	82.2	65.0	20	10.1	0.056 2	12.6	55.4
0.46	100.0	43.3	18	10.2	0.055 2	26.5	74.8
0.57	88.5	50.6	17	12.0	0.045 4	12.2	62.7
0.49	76.7	37.9	22	9.9	0.034 3	33.7	65.0
0.55	69.3	47.8	13	10.0	0.071 0	26.8	45.7
0.48	59.6	33.6	11	10.3	0.044 9	50.0	35.9
0.62	68.8	54.2	12	10.2	0.050 6	23.3	100.0

某一待评估的数据序列 ω ： $\omega=\{0.58,83.8,46.7,15,10.0,0.062,21.3,75.1\}$ ，对 ω 进行灰靶变换，得到统一测度序列 T_ω ： $T_\omega=\{0.892 3,0.838 0,0.718 5,0.681 8,0.833 3,0.873 2,0.426 0,0.751 0\}$ ；计算可得灰关联差异信息空间 Δ_{GR} ： $\Delta_{GR}=\{0.107 7,0.162 0,0.281 5,0.318 2,0.166 7,0.126 8,0.574,0.249\}$ ；按照传统均权灰靶计算，可得其靶心度为： $\gamma(\omega_0,\omega)=0.780 5$ 。

按照复合权重法计算，主观权重 Z_i 为： $Z_i=\{0.271,0.161 5,0.161 5,0.271,0.055 6,0.038 6,0.016 4,0.024 5\}$ 。

客观权重 K_i 为： $K_i=\{0.156 1,0.147,0.136 4,0.198 8,0.093 3,0.110 5,0.075 5,0.083 1\}$ ；计算得到的复合权重 Q_i 为： $Q_i=\{0.213 55,0.154 25,0.148 95,0.234 9,0.074 45,0.074 55,0.045 95,0.053 8\}$ ；按照复合权重计算的靶心度： $\gamma_{zh}(\omega_0,\omega)=0.802 3$ 。

传统灰靶理论计算的靶心度为 0.780 5，与表 1 中的分级决策进行对照可知，根据这一靶心度，判断变压器的绝缘状态等级为 3 级，存在小故障，给出的决策为关注并制定检修计划；这与观察实际运行现场所得结论有明显偏差。

根据以上分析，采用复合权重的改进灰靶计算，能够针对各项指标给出更为科学的影响权重，其靶心度计算结果更加合理，评估结果更接近变压器的实际状态，有利于检修人员做出正确决策。

对多个数据序列采用传统灰靶和改进灰靶分别进行靶心度计算，结果如图 3 所示，在靶心度数值较大的大故障区和较小的正常区，传统灰靶计算与改进灰靶计算的结果相差不大，都能够与标准数据较好地吻合，真实反应变压器的绝缘状态，但是在靶心度为 0.6~0.9 的中小故障区间内，改进灰靶计算的结果明显优于传统灰靶，能够更好地反映变压器的真实状态，而传统灰靶的计算结果与标准数据之间有明显偏离，不能对变压器状态做出正确评估。

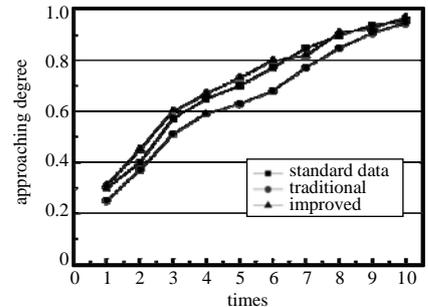


Fig.3 Comparison of approaching degree
图 3 靶心度的比较

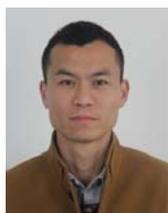
3 结论

经过复合权重法修正后的灰靶计算，可以得到待评估序列的靶心度为 0.802 3，经与表 1 中的分级决策进行对照可知，此时变压器的绝缘状态应归于第 2 级，存在中等故障，需要尽快检修。观察实际运行现场，在变压器的绝缘套管处有烧灼发黑现象，应该已经发生过局部放电现象，另外，由于日常运行的累积，套管存在较严重的污秽，虽能继续工作，但是故障会逐渐加重，应尽快进行检修。这一结果表明，采用复合权重法进行的评估决策，其结论和实际运行情况一致。

参考文献：

- [1] 宋绍民,王耀南,孙炜,等. 基于免疫聚类算法的变压器 DGA 数据故障诊断方法[J]. 变压器, 2008,45(8):70-72. (SONG Shaomin,WANG Yaonan,SUN Wei,et al. Fault diagnosis method with transformer DGA data based on immune recognition algorithm[J]. Transformer, 2008,45(8):70-72.)
- [2] 周爱华,张彼德,张厚宣. 基于人工免疫分类算法的电力变压器故障诊断[J]. 高电压技术, 2007,33(8):77-80. (ZHOU Aihua,ZHANG Bide,ZHANG Houxuan. Power transformer fault diagnosis by using the artificial immune classification algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2007,33(8):77-80.)
- [3] CANTELI M M,FERNANDEZ A O,EGUILUZ L I. Three-phase adaptive frequency measurement based on Clarke's transformation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015,21(3):1101-1105.
- [4] 熊浩,孙才新,杜鹏,等. 基于物元理论的电力变压器状态综合评估[J]. 重庆大学学报, 2006,29(10):24-28. (XIONG Hao,SUN Caixin,DU Peng,et al. Synthetic assessment of power transformer condition based on matter-element theory[J]. Journal of Chongqing University, 2006,29(10):24-28.)
- [5] 朱承治,郭创新,孙旻,等. 基于改进证据推理的变压器状态评估研究[J]. 高电压技术, 2008,34(11):2332-2337. (ZHU Chengzhi,GUO Chuangxin,SUN Min,et al. Power transformer condition assessment based on improved evidential reasoning[J]. High Voltage Engineering, 2008,34(11):2332-2337.)
- [6] MA H,SAHA T K,EKANAYAKE C. Statistical learning techniques and their applications for condition assessment of power transformer[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012,19(2):481-489.
- [7] SIHITE J F,KOHDA T. Power transformers condition assessment of GI Simangkuk switchyard sumatra interconnection in Indonesia[J]. Advanced Materials Research, 2012,19(2):452-453.
- [8] 曾波,刘思峰,谢乃明,等. 基于灰数带及灰数层的区间灰数预测模型[J]. 控制与决策, 2010,25(10):1585-1586. (ZENG Bo,LIU Sifeng,XIE Naiming,et al. Prediction model for interval grey number based on grey band and grey layer[J]. Control and Decision, 2010,25(10):1585-1586.)
- [9] 张建新,刘郁林,王开,等. 传感器网络中基于时空相关性的压缩感知算法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013, 11(1):96-100. (ZHANG Jianxin,LIU Yulin,WANG Kai,et al. Compressed sensing algorithm based on temporal and spatial correlation in wireless sensor networks[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013,11(1): 96-100.)

作者简介：



王 磊(1982-), 男, 陕西省安康市人, 硕士, 讲师, 主要研究方向为电路与系统设计及灰靶理论.email:wanglei_akxy@163.com.