

基于故障本征证据和特征指标的换流变压器状态评估

皮杰¹, 宋佳翰¹, 张先捷¹, 李婧娇¹, 孙勇², 樊友平¹

(1. 武汉大学 电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072;

2. 中国南方电网超高压输电公司检修试验中心, 广东 广州 510663)

摘要:针对当前状态评估指标体系对带故障运行的换流变压器“评估死区”的问题,提出一种基于故障本征证据和特征指标的换流变压器状态评估方法。分析了换流变压器阀侧绕组的绝缘特性并选取适用于换流变压器状态评估的故障类型和指标量;采用数据驱动的模糊层次分析法提取故障类型的特征指标,并用关联规则提取故障类型的本征证据集,得到拓宽的状态评估指标体系;引入变权思想突出劣化指标对整体状态估计的影响,以反映换流变压器的真实运行状态,对故障设备的二次评估拓宽了状态评估的应用范围。实例分析结果表明,该方法对换流变压器故障判定的准确率更高,故障识别和故障程度的二次评估使状态评估结果更具实践价值。

关键词:换流变压器;模糊层次分析法;关联规则;故障本征证据集;状态评估

中图分类号:TM 73;TM 46

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202005002

0 引言

换流变压器是交直流输电工程中的核心设备,其稳定运行是保障输电网架和电力系统安全运行的前提^[1-2]。因此,对换流变压器运行状态进行准确、持续的评估是保障其安全运行的基础,更是实现换流站智能化管理的关键技术^[3-4]。

换流变压器具有独特的运行特征,而且状态指标数量庞大,因此构建全面科学的指标体系是状态评估的基础。换流变压器是典型的油浸式变压器,当前油浸式变压器状态评估研究对评估指标体系的重视程度不够,文献[5-6]根据导则和运行经验建立了结构完整的油浸式变压器状态评估指标体系,但其构建过程缺乏理论依据,主观性较强;文献[7]利用统计数据建立了客观的油浸式变压器状态评估关键指标体系,却忽略了公共指标量的劣化对真实故障的干扰,而且上述指标体系均未考虑带故障运行换流变压器状态评估的适用性。在评估方法上,层次分析^[8]、正态云理论^[9]均因隶属度的引入导致评估方法的主观性过强;人工神经网络^[10]、支持向量机^[11]等机器学习方法缺乏故障机理分析,评估模型易被训练数据固化;评估方法需要进一步改进,同时对已有方法进行融合达到优势互补的目的。

针对上述指标体系和评估方法上的缺陷,本文在分析换流变压器运行特征的基础上,选取适用于换流变压器状态评估的故障类型与初始指标量;再以故障统计数据为基础,利用数据驱动的模糊层次

分析法构建了换流变压器的状态评估指标体系,避免了主观权重的影响;利用关联规则法并结合故障特征,得到故障本征证据集,进而获得拓宽的状态评估指标体系,最后引入变权思想以突出劣化状态指标对换流变压器真实运行状态的影响。实例分析表明,拓宽的状态评估指标体系克服了单一指标体系的评估缺陷,能够准确地进行换流变压器的状态评估,故障识别和故障程度的二次评估使状态评估结果更具实践价值。

1 换流变压器运行特征

换流变压器的主绝缘采用油-纸绝缘策略,其运行特性与交流变压器相似,但阀侧绕组需要承受交流应力、直流应力及极性反转应力,使其绝缘结构更加复杂。同时,换流变压器在运行过程中受到谐波、直流偏磁及电动力的影响,使其运行环境更加恶劣。单相双绕组换流变压器接入6脉波整流器的电路拓扑结构如图1所示。图中, E_A 、 E_B 、 E_C 为交流侧三相等效电势; L_A 、 L_B 、 L_C 为交流侧三相等效电感; i_A 、 i_B 、 i_C 为交流侧三相电流;点 a 、 b 、 c 为各相换流变压器与阀侧绕组连接点; i_d 、 U_d 分别为直流电流与直流电压;

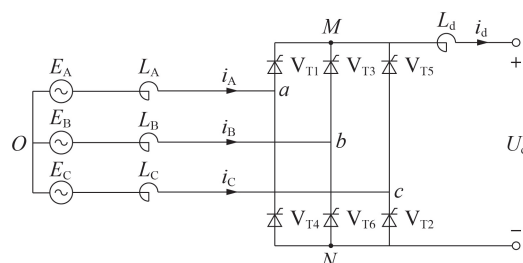


图1 6脉波整流器的电路拓扑

Fig.1 Circuit topology of six-pulse rectifier

收稿日期:2019-08-31;修回日期:2020-03-03

基金项目:中国南方电网公司科技项目(GY-2014-020)

Project supported by the Science and Technology Project of China Southern Power Grid(GY-2014-020)

L_d 为直流侧等效电感; V_{T1} — V_{T6} 为整流器的晶闸管。

以A相换流变压器为例,在一个工频周期 T 内,当 V_{T1} 或 V_{T4} 导通时,阀侧绕组将承受点 M 或点 N 的对地直流电压(U_{MO} 或 U_{NO}),点 M 、 N 的电角度均为 120° ;当 V_{T1} 和 V_{T4} 关断时,阀侧绕组将承受点 a 对中心点 O 的空载交流电压 U_{aO} ,点 a 对中心点 O 的电角度为2个 60° 。换流变压器阀侧承受的电压、电流波形如图2所示。图中, U_{aM} 为 V_{T1} 两端电压。

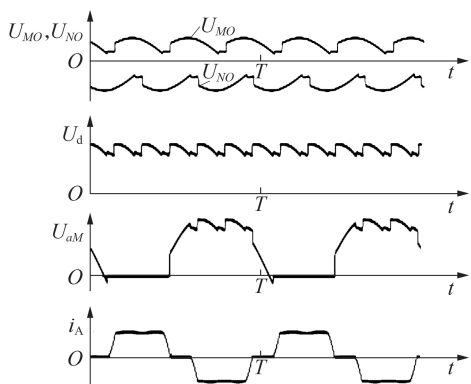


图2 换流变压器阀侧电压、电流波形

Fig.2 Voltage and current waveforms at valve side of converter transformer

在交流电压下,绝缘介质的电场遵循容性分布规律,绝缘纸板和绝缘油中的交流电场分布较为均匀;在直流电压下,绝缘介质的电场遵循阻性分布规律,绝缘纸板中的电场强度约为变压器油中的100倍;在动态直流电压下绝缘介质的电场分布将呈现更大的不确定性,绝缘环境的复杂性对阀侧绕组及其引线的绝缘状态监测提出了更高的要求^[12]。

换流变压器受到谐波电流和直流偏磁电流^[13-14]的影响,导致损耗、温升和振动噪声增加,加速绝缘部件的老化速率。同时,谐波电流还会引起箱体和某些金属部件的局部过热,威胁换流变压器的安全运行。另外,当发生短路故障时,由于短路电流的存在,换流变压器绕组和引线将承受较大的短路应力,而换流阀的换相失败也会导致其承受更多的电动力冲击,加大换流变压器整体的运行风险。

综上所述,在构建换流变压器状态评估指标体系时应重点考虑对阀侧绕组绝缘、谐波振动、电动力影响、温升及绝缘老化等方面的监测。

2 换流变压器状态评估模型

换流变压器结构复杂,其状态监测指标数据种类多数据量庞大,且与整体状态间的关系复杂。为实现科学全面的状态评估,本文建立了分层状态评估指标体系,该体系分为目标层、故障层和指标层。通过分析指标量与故障类型的映射关系得到故障特征指标,考虑单一特征指标的局限性,利用关联规则提取故障本征证据集,得到拓宽的状态评估证据指

标体系,再通过故障层变权判据得到换流变压器的真实状态。

2.1 状态评估指标

对换流变压器工作特征和故障统计数据进行分析,并参考换流变压器相关标准后^[15],选取表1所示的8种典型换流变压器故障类型作为故障层,选取表2所示的25种关键指标量作为指标层,故障类型与各指标量的映射关系需要通过数据驱动的模糊层次分析法进一步确定。表中, X_1 — X_8 为换流变压器故障类型编号; x_1 — x_{25} 为换流变压器关键指标量。

表1 换流变压器的故障类型

Table 1 Fault types of converter transformer

编号	故障类型	编号	故障类型
X_1	绕组故障	X_5	电弧放电
X_2	铁芯故障	X_6	固体绝缘老化
X_3	内部过热	X_7	局部放电
X_4	绝缘受潮	X_8	油流放电

表2 换流变压器的指标量

Table 2 Indicators of converter transformer

指标量	名称	指标量	名称
x_1	绝缘油介损	x_{14}	绕组及套管绝缘介损
x_2	油中微水	x_{15}	绕组及套管电容初值差
x_3	油击穿电压	x_{16}	绕组短路阻抗初值差
x_4	绕组及套管吸收比	x_{17}	绕组及套管直流电阻互差
x_5	绕组及套管极化指数	x_{18}	C_2H_2 含量
x_6	体积电阻率	x_{19}	C_2H_4 含量
x_7	H_2 含量	x_{20}	C_2H_6 含量
x_8	铁芯接地电流	x_{21}	局部放电量
x_9	铁芯绝缘电阻	x_{22}	油中含气量
x_{10}	总烃含量	x_{23}	中性点油流静电电流
x_{11}	CO 产生速率	x_{24}	油中糠醛
x_{12}	CO_2 产生速率	x_{25}	绝缘纸聚合度
x_{13}	CH_4 含量		

与普通电力变压器相比,换流变压器阀侧绕组的电磁环境更为复杂,提高了对阀侧绕组的指标量关注度。表3为换流变压器与传统变压器的状态评估指标量对比^[15-16]。

特征指标量及其警示值的差异导致换流变压器特征指标的定义更加严格,即提高了对绕组故障、发热故障和放电故障识别的灵敏度,同时增大了上述指标量对故障类型的权重。由于换流变压器指标量之间存在量纲和数值上的差异,因此在进行状态评估前需要对各指标量的状态值进行归一化处理,即:

$$g(x_i) = (x_{ic} - x_i) / (x_{ic} - x_{i0}) \quad i=1, 2, \dots, 25 \quad (1)$$

其中, $g(x_i)$ 为指标量 x_i 归一化后的状态值, x_i 为指标量的真实值, x_{i0} 为指标量的初始值, x_{ic} 为指标量的警示值, x_i 、 x_{i0} 、 x_{ic} 均按《油浸式变压器(电抗器)状态评价导则》^[17]中的要求确定。当指标量劣化至超过警示值时,取 $g(x_i) = 0$;当指标量优于初值时,取 $g(x_i) = 1$ 。

表3 换流变压器与传统变压器指标量对比

Table 3 Comparison of indicators between converter transformer and traditional transformer

变压器	指标量名称	警示值
换流变压器	绕组及套管吸收比	1.3
	绕组及套管极化指数	1.5
	铁芯绝缘电阻	500 MΩ
	绕组及套管绝缘介损	±0.3%
	绕组及套管电容初值差	±3%
	绕组短路阻抗初值差	2%
	绕组及套管直流电阻互差	2%
传统变压器	油中含气量	2%
	绕组吸收比	1.3
	绕组极化指数	1.5
	铁芯绝缘电阻	100 MΩ
	绕组绝缘介损	±0.5%
	绕组电容初值差	±5%
	绕组短路阻抗初值差	3%
	绕组直流电阻互差	2%
	油中含气量	3%

2.2 模糊层次分析法

2.2.1 故障层状态评价

模糊层次分析法是兼具定性与定量分析特征的权重系数确定方法。首先确定指标量对目标的模糊隶属度,并构建模糊判断矩阵 R ,再对 R 进行一致性校验。若满足校验条件,则通过模糊权重规则为各评价指标分配权重 ω ;若不满足校验条件,则调整 R 直至满足校验条件。

模糊隶属度反映指标量对系统的重要度,但根据经验确定的隶属度主观性较强,故本文基于样本统计数据对模糊隶属度进行改进,如式(2)所示。

$$r_{ij} = N_i / (N_i + N_j) \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

其中, r_{ij} 为指标量 x_i 的模糊隶属度; N_i 为统计数据中指标量 x_i 超标的次数; n 为指标量总数。根据式(2), r_{ij} 主要依赖于样本统计数据客观性。模糊判断矩阵 R 见式(3)。

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

模糊判断矩阵的一致性校验条件为:

$$r_{ij} = r_{ik} - r_{jk} + 0.5 \quad i, j, k = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

若满足文献[18]中的顺序一致性,则可对权重进行计算。

为提高各指标量间权重的分辨率,对文献[19]所述的指数权重计算方法进行改进,见式(5)。

$$\omega_i = e^{\frac{2}{n} \sum_{j=1}^n e^{2r_{ij}}} / \sum_{i=1}^n e^{\frac{2}{n} \sum_{j=1}^n e^{2r_{ij}}} \quad (5)$$

计算所得的故障类型状态评分 F_m 见式(6)。

$$F_m = \sum_{i=1}^n \omega_i g(x_i) \quad (6)$$

其中, m 为故障类型编号。

2.2.2 目标层状态评价

故障类型对换流变压器整体运行状态的影响程度取决于当前故障发生的概率,概率越大则对状态评估的影响程度越大,故利用变权思想^[21]构造换流变压器整体运行状态的判断矩阵,其隶属度计算公式为:

$$r'_{ij} = F_j / (F_i + F_j) \quad i, j = 1, 2, \dots, m_i \quad (7)$$

其中, m_i 为故障类型总数。

式(7)表明当故障类型的评分越低,其对整体状态的隶属度越大,影响越强烈。同理,构建状态评价矩阵,进行一致性校验,由式(5)求取故障类型的变权重 ω'_i ,则换流变压器整体状态评分为:

$$S = \sum_{i=1}^8 \omega'_i F_i \quad (8)$$

当 S 位于区间 $[0.8, 1]$ 时,状态等级为正常;当 S 位于区间 $[0.6, 0.8)$ 时,状态等级为注意;当 S 位于区间 $[0.2, 0.6)$ 时,状态等级为异常;当 S 位于区间 $[0, 0.2)$ 时,状态等级为严重。

上述基于数据驱动的模糊层次分析法克服了层次分析对主观经验过度依赖的问题,提升了评估结果的准确性,对正常运行的换流变压器状态评估具有较好的适应性。但对于带故障运行的换流变压器存在如下缺点。

(1)存在评估死区。此类设备的状态监测不仅要关注整体运行状态,而且要确定故障类型、跟踪故障发展状况,但故障设备的部分特征指标量已经超出警戒值,特征指标量已经无法反映故障的严重程度和发展速度。单一特征指标量体系已经不适用于带故障运行换流变压器的状态监测。

(2)存在共有特征指标的干扰。对于故障换流变压器,共有特征指标量超限会造成对于其他故障的误诊,影响真实故障的权重,掩盖其真实运行状态,如 H_2 含量是绕组故障、绝缘受潮、电弧放电和局部放电的共有特征指标量,当发生绕组故障时, H_2 含量超标,其他三者的评分也会降低,从而影响绕组故障的权重,掩盖其真实的运行状态。

针对上述问题,需要对换流变压器的状态指标信息进行深入挖掘,提取故障对应的本征证据集,确定此类换流变压器的故障类型,同时对超标指标量化,并对此类设备运行状态进行持续评估。

2.3 基于关联规则的故障本征证据集挖掘

为了实现对换流变压器故障本征证据集的挖掘,本节利用关联规则对故障类型的特征指标量进行分析,实现多指标量的有效组合、特征提取与合并,得到带故障本征证据集的状态评估指标体系,实现故障换流变压器的状态评估。

关联规则是揭示数据库中不同特征数据集之间相关关系的数据挖掘手段^[20],定义关联规则 $A \Rightarrow B$

为:对于事务数据库 Φ , A 、 B 为 Φ 中的特征子集,且 $A \subset \Phi, B \subset \Phi, A \cap B = \emptyset$, A 、 B 分别为关联规则 $A \Rightarrow B$ 的前提和结论。定义 $A \Rightarrow B$ 的支持度为 Φ 中包含事件 $A \cup B$ 的百分比,如式(9)所示。

$$e_{\text{sup}}(A \Rightarrow B) = P(A \cup B) = \frac{f(A \cup B)}{Z_{\Phi}} \times 100\% \quad (9)$$

其中, $P(A \cup B)$ 为事件 $A \cup B$ 发生的概率; $f(A \cup B)$ 为事件 $A \cup B$ 在 Φ 中的频数; Z_{Φ} 为事务数据库中所有子集事务的总数。 $A \Rightarrow B$ 的置信度如式(10)所示。

$$e_{\text{conf}}(A \Rightarrow B) = P(B|A) = \frac{f(A \cup B)}{f(A)} \times 100\% \quad (10)$$

其中, $f(A)$ 为 A 在 Φ 中的频数; $P(B|A)$ 为事件 $B|A$ 发生的概率。挖掘换流变压器的故障本征证据集时,先将每种故障类型的特征指标量进行组合形成故障证据集,再利用强相关性条件筛选故障本征证据集。本文定义的强相关性条件为最小支持度阈值为80%,最小置信度阈值为90%,故障本征证据集成立的条件为该集合中的指标量参数值均低于0.3。

为了评估换流变压器故障的严重程度,首先根据故障本征证据确定故障类型,对具有发展特性的特征指标量进行持续监测,取最严重的特征指标量,故障程度评判表见表4。表中, v_{ic} 为行业标准规定的指标量 x_i 的增长速率警示值; v_i 为发现故障时该指标量的速率; v_{i0} 为其初值。根据故障程度的评价结果,采取适当的运维策略。

表4 故障程度评判表

Table 4 Table of fault severity scale

故障程度	判别条件		运维策略
	状态量	增长速率	
异常	$x_i > x_{ic}$	$v_i < v_{ic}, v_i < v_{i0}$	加大巡检力度
严重	$x_i > x_{ic}$	$v_i > v_{ic}, v_i < v_{i0}$	召开专家会议
剧烈	$x_i > x_{ic}$	$v_i > v_{ic}, v_i > v_{i0}$	退出运行

2.4 状态评估流程

根据2.1—2.3节归纳基于模糊层次分析和关联规则的换流变压器状态评估法,具体流程图见图3。

3 实例分析

为验证本文利用模糊层次分析和关联规则得到的拓宽指标体系在换流变压器状态评估中的适用性,本文收集了80组换流变压器状态监测数据进行状态评估,与模糊层次分析法和关联规则法分析结果进行比较。同时,重点选取了某换流站内带故障运行换流变压器故障案例,验证本文方法在带可控故障运行情况下的可行性和准确性。

3.1 基础数据分析

本文收集整理了近20 a某电网公司辖区内换流变压器发生的798组故障统计数据,建立换流变压器状态评估特征指标体系和故障本征证据集。以电

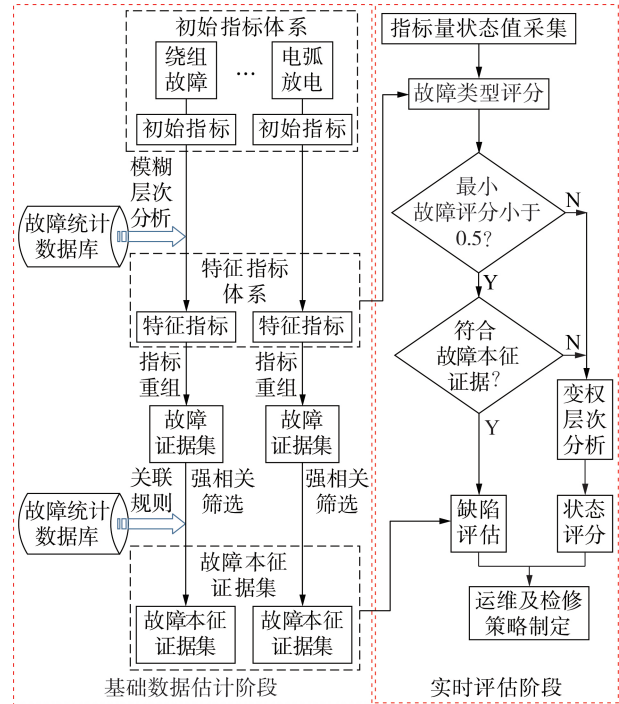


图3 状态评估流程图

Fig.3 Flowchart of state assessment

弧放电为例,电弧放电的初始值指标量的集合为{油介损,油击穿电压,绕组及套管极化指数, H_2 含量, C_2H_4 含量,绕组及套管直流电阻互差, C_2H_2 含量,局部放电量,油中含气量},统计数据中共有157组电弧放电故障,对应的指标量频数为{6,4,2,131,4,135,156,141,2},按式(2)求得模糊判断矩阵中的元素 r_{ij} ,所构建模糊判断矩阵如式(11)所示。

$R =$

$$R = \begin{bmatrix} 0.50 & 0.40 & 0.25 & 0.96 & 0.40 & 0.96 & 0.96 & 0.96 & 0.25 \\ 0.60 & 0.50 & 0.33 & 0.97 & 0.50 & 0.97 & 0.97 & 0.97 & 0.33 \\ 0.75 & 0.67 & 0.50 & 0.98 & 0.67 & 0.99 & 0.99 & 0.99 & 0.50 \\ 0.04 & 0.03 & 0.02 & 0.50 & 0.03 & 0.51 & 0.53 & 0.51 & 0.02 \\ 0.60 & 0.50 & 0.33 & 0.97 & 0.50 & 0.97 & 0.97 & 0.97 & 0.33 \\ 0.04 & 0.03 & 0.01 & 0.49 & 0.03 & 0.50 & 0.52 & 0.50 & 0.01 \\ 0.04 & 0.03 & 0.01 & 0.47 & 0.03 & 0.48 & 0.50 & 0.47 & 0.01 \\ 0.04 & 0.03 & 0.01 & 0.49 & 0.03 & 0.50 & 0.53 & 0.50 & 0.01 \\ 0.75 & 0.67 & 0.50 & 0.98 & 0.67 & 0.99 & 0.99 & 0.99 & 0.50 \end{bmatrix} \quad (11)$$

忽略偶然因素对权重的影响将模糊判断矩阵简化,最终获得特征指标集为{ H_2 含量,绕组及套管直流电阻互差, C_2H_2 含量,油中含气量},所对应的权重集为{0.218,0.231,0.301,0.250},将特征指标量重组得到初始证据集为 $E = \{e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, e_6\} = \{H_2$ 含量与绕组及套管直流电阻互差, H_2 含量与 C_2H_2 含量, H_2 含量与局部放电量,绕组及套管直流电阻互差与 C_2H_2 含量,绕组及套管直流电阻互差与局部放电量, C_2H_2 含量与局部放电量}。求取各证据对电弧放电的关联度与支持度,以关联证据 e_2 为例,157组电弧放电

故障中满足证据 e_2 的共有129组,而所有故障数据中证据 e_2 共发生138次,则其关联度和支持度分别如式(12)、(13)所示。

$$e_{2\text{sup}} = \frac{129}{157} \times 100\% \approx 82.2\% \quad (12)$$

$$e_{2\text{conf}} = \frac{129}{138} \times 100\% \approx 93.5\% \quad (13)$$

由式(12)和式(13)可知,故障本征证据集满足强相关性筛选条件。同理求得初始证据集的关联度和支持度向量分别如式(14)、(15)所示。

$$E_{\text{sup}} = [83.4\% \ 82.2\% \ 81.5\% \ 86.0\% \ 81.5\% \ 89.8\%] \quad (14)$$

$$E_{\text{conf}} = [58.7\% \ 93.5\% \ 57.7\% \ 94.4\% \ 56.4\% \ 92.6\%] \quad (15)$$

最终求得电弧放电故障本征证据集 $E_N = \{H_2 \text{ 含量与 } C_2H_2 \text{ 含量, 绕组及套管直流电阻互差与 } C_2H_2 \text{ 含量, } C_2H_2 \text{ 含量与局部放电量}\}$ 。按照同样的流程,得到特征指标体系和故障本征证据集见附录中表A1。

3.2 实时状态评估

3.2.1 案例1

某两极换流站内低端Y/Y型换流变压器C相于2014年8月23日出现在线油色谱异常,其中 C_2H_2 含量达 $7.57 \mu\text{L/L}$,远超于标准规定的注意值 $1.0 \mu\text{L/L}$,增长速率为 $1.43 \mu\text{L}/(\text{L}\cdot\text{d})$,增长速率过大。在随后进行的持续监测过程中, C_2H_2 含量与 H_2 含量无明显增长。该换流变压器指标量状态信息见表5。

表5 换流变压器指标量状态值

Table 5 Indicator values of converter transformer

指标量	注意值	初值	实测值	状态值
绝缘油介损	2	0.01	0.46	0.774
油中微水/ $(\text{mL}\cdot\text{L}^{-1})$	15	3.50	7	0.696
油击穿电压/kV	50	89	83	0.846
绕组及套管吸收比	1.3	1.48	1.44	0.780
绕组及套管极化指数	1.5	1.25	1.32	0.720
体积电阻率/ $(\text{G}\Omega\cdot\text{m})$	10	60	55	0.900
H_2 含量/ $(\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1})$	150	6.47	15.8	0.935
铁芯接地电流/A	0.3	0.065	0.132	0.714
铁芯绝缘电阻/M Ω	500	4120	5170	1
总烃含量/ $(\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1})$	150	1.41	17.59	0.891
CO产生速率/ $(\%\cdot\text{月}^{-1})$	100	0	14.5	0.855
CO ₂ 产生速率/ $(\%\cdot\text{月}^{-1})$	200	0	7.3	0.963
CH ₄ 含量/ $(\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1})$	100	0.8	7.73	0.930
绕组及套管绝缘介损/%	0.3	0.15	0.15	1
绕组及套管电容初值差/%	3	0	0.1	0.97
绕组短路阻抗初值差/%	2	0	0.068	0.966
绕组及套管直流电阻互差/%	2	0	109	0
C_2H_2 含量/ $(\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1})$	1	0	7.13	0
C_2H_4 含量/ $(\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1})$	50	0.33	2.38	0.959
C_2H_6 含量/ $(\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1})$	65	0	1.45	0.978
局部放电量/pC	500	40	290	0.457
油中含气量/%	2	0.64	0.923	0.792
中心点油流静电电流/ μA	1	0.02	0.07	0.949
油中糠醛/ $(\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1})$	0.004	0	0.00063	0.843
绝缘纸聚合度	250	1000	907	0.876

按式(6)求取故障类型的状态值集合为 $\{0.973, 0.902, 0.727, 0.828, 0.318, 0.867, 0.641, 0.701\}$,电弧放电故障的状态值低于0.5,则内部存在电弧放电的可能性较大,对其进行电弧放电本征证据判别,满足电弧放电第2条本征证据:绕组及套管直流电阻互差和 C_2H_2 含量同时越限,故判断该换流变压器内部极有可能存在电弧放电故障。

对电弧放电故障进行持续跟踪, $v_{C_2H_2}$ 最大值为 $0.21 \mu\text{L}/(\text{L}\cdot\text{d})$, $v_o > v_{C_2H_2} > v_{iC}$,故障程度评估结果表明该故障为严重故障。为了防止电弧放电故障引发其他故障进而导致更严重的后果,对换流变压器进行持续的故障程度评定和整体状态评估。其整体状态模糊判断矩阵如式(16)所示。

$$R = \begin{bmatrix} 0.500 & 0.481 & 0.428 & 0.460 & 0.246 & 0.471 & 0.397 \\ 0.519 & 0.500 & 0.446 & 0.479 & 0.261 & 0.490 & 0.416 \\ 0.572 & 0.554 & 0.500 & 0.532 & 0.304 & 0.544 & 0.469 \\ 0.540 & 0.521 & 0.468 & 0.500 & 0.278 & 0.512 & 0.436 \\ 0.754 & 0.739 & 0.696 & 0.722 & 0.500 & 0.732 & 0.668 \\ 0.529 & 0.510 & 0.456 & 0.488 & 0.268 & 0.500 & 0.425 \\ 0.603 & 0.584 & 0.531 & 0.564 & 0.332 & 0.575 & 0.500 \\ 0.581 & 0.563 & 0.509 & 0.541 & 0.312 & 0.553 & 0.478 \end{bmatrix} \quad (16)$$

进而得到各状态故障类型的变权权重为 $\{0.06, 0.07, 0.1, 0.08, 0.4, 0.07, 0.12, 0.1\}$,最终换流变的整体状态评分为 $S=0.43$,状态等级为异常,但公共指标量的干扰使得此状态值偏大,为验证公共指标量的干扰,假设将用于除电弧放电故障状态值评估的 H_2 含量、 C_2H_2 含量、绕组及套管直流电阻互差和局部放电量的状态值用故障前的状态值代替,其他指标值均不变,按式(6)求得故障类型的状态值集合为 $\{0.977, 0.902, 0.895, 0.831, 0.318, 0.868, 0.857, 0.881\}$,变权权重为 $\{0.018, 0.024, 0.024, 0.032, 0.821, 0.027, 0.028, 0.026\}$,则整体状态评分为 $S=0.41$,相比 $S=0.43$ 略有下降,公共指标量掩盖了换流变压器的真实运行状态。

由于电弧放电故障的存在,判定该换流变压器运行状态较差,需要加大监测力度并召开专家会议,专家会议结果表明该换流变压器内部发生过电弧放电,但在后续监测中 C_2H_2 与 H_2 含量无明显增长,内部的放电故障属于间歇性电弧放电,由于缺少合适的备用换流变压器,决定该故障换流变压器继续运行,要求加大其持续监测力度,并设定强制退出运行条件为 C_2H_2 含量增加至 $40 \mu\text{L/L}$ 。

对该换流变压器进行持续的状态检测和状态评估,选取故障发生到下一个年度检修期间 C_2H_2 与 H_2 的测量数据以及该换流变压器状态评估值绘制状态轨迹图,见图4。

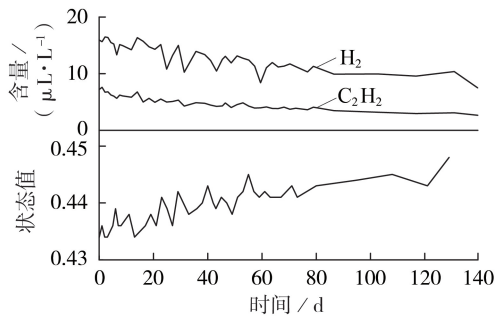


图4 换流变压器状态轨迹曲线图

Fig.4 State trajectory of converter transformer

从图4中看出该换流变压器内部的放电故障并未进一步恶化, C_2H_2 与 H_2 含量均呈下降趋势,故障程度由严重变为异常,该换流变压器运行状态比较稳定。在年度检修期间对该换流变压器进行了更换并返厂维修,发现该换流变压器网侧引线均压管连接处均压管外壁有大量碳化物,判定此处为电弧放电故障点。本文所提方法能够准确地判断该换流变压器内部存在的故障类型,并对故障程度进行评估,为该换流变压器提供了持续运行的依据,保证了整条输电线路的输送能力,减少了巨大的经济损失。

3.2.2 案例2

为验证本文方法的适用性,收集了80组换流变压器状态监测数据,采用文献[20]所述的关联规则法、文献[8]所述的模糊层次分析法评估结果与本文方法评估结果进行比较,对比结果如表6所示。

表6 本文方法与关联规则法、模糊层次分析法结果对比

Table 6 Comparison result among proposed method, association rule method and fuzzy analytic hierarchy process method

运行状态	样本数量	准确率 / %		
		本文方法	关联规则法	模糊层次分析法
正常	25	96.00	92.00	92.00
注意	13	92.31	92.31	92.31
异常	10	90.00		
故障 严重	6	100.00	83.33	85.71
剧烈	26	100.00		

依据表6的评估结果,与传统模糊层次分析或关联规则法相比,本文所提出的方法对故障判定的准确率更高且能判定故障类型,同时能对故障的严重程度进行二次评估,拓宽了状态评估的适用范围,使得状态评估结果更具现场指导价值。

4 结论

本文收集整理了大量换流变压器运维及故障统计数据,并以换流变压器的运行特征和故障发生机理为基础,建立了拓宽的状态评估指标体系。本文研究所具有的优势如下。

(1)基于换流变压器故障统计数据,利用模糊层

次分析法提取故障类型的特征指标量,引入改进指数法确定特征指标量权重,有效地避免了专家权重的主观性;在构建整体状态判断矩阵中引入变权方法,客观地反映故障评分对整体评估结果的贡献。

(2)针对模糊层次分析法对带可控故障运行换流变压器的评价“死区”,采用关联规则并结合故障机理提取故障本征证据集,对故障类型进行诊断,并评判其严重程度以确定运维策略,拓宽了状态评估的适用范围。

(3)实例及对比分析表明,本文所提方法对故障判定的准确率更高且能准确判定故障类型,同时能对故障严重程度做出二次评估,增强了评估结果的实践意义。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 郑劲. 换流变压器及监造技术[M]. 北京:中国电力出版社, 2016:2-5.
- [2] 国家电网公司. 向家坝—上海±800 kV特高压直流输电示范工程设备研制卷[M]. 北京:中国电力出版社, 2016:119-146.
- [3] 廖瑞金,王有元,刘航,等. 输变电设备状态评估方法的研究现状[J]. 高电压技术, 2018, 44(11):3454-3464.
LIAO Ruijin, WANG Youyuan, LIU Hang, et al. Research status of condition assessment method for power equipment[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(11):3454-3464.
- [4] 江秀臣,盛戈峰. 电力设备状态大数据分析的研究和应用[J]. 高电压技术, 2018, 44(4):1041-1050.
JIANG Xiuchen, SHENG Gehao. Research and application of big data analysis of power equipment condition[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(4):1041-1050.
- [5] 郝思鹏,张济韬,张仰飞,等. 融合在线监测数据的变压器状态评估[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(11):176-181.
HAO Sipeng, ZHANG Jitao, ZHANG Yangfei, et al. State evaluation of transformer based on information fusion of on-line monitoring data[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(11):176-181.
- [6] 石少伟,王可,陈力,等. 基于模糊综合评价和贝叶斯判别的电力变压器状态判别和预警[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(9):60-66.
SHI Shaowei, WANG Ke, CHEN Li, et al. Power transformer status evaluation and warning based on fuzzy comprehensive evaluation and Bayes discrimination[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(9):60-66.
- [7] 宋人杰,刘瑞英,刘耀伟,等. 基于层次灰关联分析的变压器状态评估关键指标体系构建应用[J]. 高电压技术, 2018, 44(8):2509-2515.
SONG Renjie, LIU Ruiying, LIU Yaowei, et al. Key indicator system establishment and application for transformer condition assessment based on hierarchy grey relation analysis[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(8):2509-2515.
- [8] 黄云程,蔡金锭. 融合改进层次分析与灰色关联法评估油纸绝缘状态[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(9):2083-2090.
HUANG Yuncheng, CAI Jinding. Fusing improved analytic hierarchy process and grey correlation method to evaluate oilpaper insulation condition[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(9):2083-2090.
- [9] 杨杰明,董玉坤,曲朝阳,等. 基于区间权重和改进云模型的变压器状态评估[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(23):

- 102-109.
YANG Jieming, DONG Yukun, QU Zhaoyang, et al. Condition assessment for transformer based on interval weight and improved cloud model[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(23): 102-109.
- [10] 唐麟, 张宏鹏. 基于BP网络改进模糊评判隶属度函数的变压器状态评估[J]. 计算机与数字工程, 2016, 44(3): 414-417.
TANG Lin, ZHANG Hongpeng. Improved fuzzy evaluation based on BP network membership function of the transformer condition assessment[J]. Computer & Digital Engineering, 2016, 44(3): 414-417.
- [11] 贾立敬, 张建文, 王传林, 等. 基于DGA的差分进化支持向量机电力变压器故障诊断[J]. 高压电器, 2015, 51(4): 13-18.
JIA Lijing, ZHANG Jianwen, WANG Chuanlin, et al. Fault diagnosis of power transformer based on DGA of algorithm for SVM[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(4): 13-18.
- [12] 李斌, 崔立飞, 孙赞, 等. 超高压换流变压器主绝缘特性研究[J]. 河北电力技术, 2016, 35(6): 14-15, 56.
LI Bin, CUI Lifei, SUN Yun, et al. Insulation characteristics research on ultra-high voltage converter transformers[J]. Hebei Electric Power, 2016, 35(6): 14-15, 56.
- [13] 张泽明. 直流偏磁及谐波条件下换流变压器损耗问题研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2017.
ZHANG Zeming. Losses research on converter transformer under effects of DC bias and harmonics[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2017.
- [14] 谢志成, 钱海, 林湘宁, 等. 直流偏磁下变压器运行状态量化评估方法[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(2): 216-223.
XIE Zhicheng, QIAN Hai, LIN Xiangning, et al. Quantitative state assessment method for transformer under DC bias[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(2): 216-223.
- [15] 国家能源局. 油浸式变压器(电抗器)状态检修导则: DL/T 1684—2017[S]. 北京: 中国电力出版社, 2017.
- [16] 国家能源局. 换流变压器交接及预防性试验规程: DL/T 1798—2018[S]. 北京: 中国电力出版社, 2018.
- [17] 国家能源局. 换流变压器、平波电抗器检修导则: DL/T 354—2010[S]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [18] 王艳梅, 赵希男, 郭梅. 一种调整模糊判断矩阵一致性的方法[J]. 模糊系统与数学, 2006, 20(3): 89-94.
WANG Yanmei, ZHAO Xinan, GUO Mei. A method for adjusting the consistency of fuzzy judgement matrix[J]. Fuzzy Systems and Mathematics, 2006, 20(3): 89-94.
- [19] 兰继斌, 徐扬, 霍良安, 等. 模糊层次分析法权重研究[J]. 系统工程理论与实践, 2006, 26(9): 107-112.
LAN Jibin, XU Yang, HUO Liangan, et al. Research on the priorities of fuzzy analytical hierarchy process[J]. Systems Engineering Theory and Practice, 2006, 26(9): 107-112.
- [20] 程宏波, 裴德新, 王勋, 等. 一种基于关联规则的变压器关键参量提取方法[J]. 华东交通大学学报, 2017, 34(4): 104-109.
CHENG Hongbo, QIU Dexin, WANG Xun, et al. Research on the extraction method of key parameters of transformer based on association rules[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2017, 34(4): 104-109.

作者简介:



皮杰

皮杰(1994—), 男, 湖北荆州人, 硕士研究生, 主要研究方向为电网主设备状态评估及检修(E-mail: pidingjie@whu.edu.cn);
樊友平(1970—), 男, 湖北荆州人, 教授, 博士, 主要研究方向为复杂电网中电气设备的状态监测与预警及故障诊断技术(E-mail: ypfan@whu.edu.cn)。

(编辑 王欣竹)

Condition assessment of converter transformer based on intrinsic fault evidences and characteristic indicators

PI Jie¹, SONG Jiahua¹, ZHANG Xianjie¹, LI Jingjiao¹, SUN Yong², FAN Youping¹

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Maintenance & Test Center, Extra-High Voltage Power Transmission Company of CSG, Guangzhou 510663, China)

Abstract: Aiming at the dead-zone problem of current condition assessment for faulty converter transformer, a condition assessment method of converter transformer based on intrinsic fault evidences and characteristic indicators is proposed. The insulation characteristics of the valve-side winding of converter transformer are analyzed, and the fault types and initial indicators suitable for condition assessment of converter transformer are selected. To obtain the indicator system of condition assessment, the characteristic indicators of fault type are extracted by data-driven fuzzy analytic hierarchy process, and the intrinsic fault evidence sets for fault types are extracted by association rules. The variable weight is introduced to highlight the impact of the degradation indicators on the whole condition assessment to reflect the actual condition of converter transformer. The secondary assessment of fault equipment broadens the application scope of condition assessment. The case analysis results show that the method has higher accuracy in judging the operation condition of converter transformer, and the secondary assessment of its fault degree enhances the practical significance.

Key words: converter transformer; fuzzy analytic hierarchy process; association rule; intrinsic fault evidence sets; condition assessment

附录

表 A1 换流变压器状态评估指标体系和本征证据集.

Table A1 Characteristic indicator system and intrinsic evidence sets for condition assessment of converter transformer

故障类型	特征指标	权重	证据集	故障类型	特征指标	权重	证据集
F ₁ : 绕组故障	S ₁₁ : H ₂ 含量	0.189	e ₁₁ : S ₁₁ ∩S ₁₃	F ₅ : 电弧放电	S ₅₁ : H ₂ 含量	0.218	e ₅₁ : S ₅₁ ∩S ₅₃ e ₅₂ : S ₅₂ ∩S ₅₃ e ₅₃ : S ₅₃ ∩S ₅₄
	S ₁₂ : 绕组及套管绝缘介损	0.293	e ₁₂ : S ₁₁ ∩S ₁₄		S ₅₂ : 绕组及套管直流电阻互差	0.231	
	S ₁₃ : 绕组及套管电容差初值差	0.215	e ₁₃ : S ₁₂ ∩S ₁₄		S ₅₃ : C ₂ H ₂ 含量	0.301	
	S ₁₄ : 绕组短路阻抗初值差	0.303	e ₁₄ : S ₁₃ ∩S ₁₄		S ₅₄ : 局部放电量	0.250	
F ₂ : 铁心故障	S ₂₁ : 铁芯接地电流	0.252	e ₂₁ : S ₂₁ ∩S ₂₂ e ₂₂ : S ₂₁ ∩S ₂₄ e ₂₃ : S ₂₂ ∩S ₂₃	F ₆ : 固体绝缘老化	S ₆₁ : 绝缘油介损	0.145	e ₆₁ : S ₆₁ ∩(S ₆₅ ∥ S ₆₆) e ₆₂ : S ₆₂ ∩(S ₆₅ ∥ S ₆₆) e ₆₃ : S ₆₃ ∩(S ₆₅ ∥ S ₆₆) e ₆₄ : S ₆₄ ∩(S ₆₅ ∥ S ₆₆)
	S ₂₂ : 铁芯接地电阻	0.226			S ₆₂ : 体积电阻率	0.142	
	S ₂₃ : C ₂ H ₆ 含量	0.217			S ₆₃ : 绕组及套管绝缘介损	0.169	
	S ₂₄ : C ₂ H ₄ 含量	0.177			S ₆₄ : 油中含气量	0.148	
	S ₂₅ : 总烃含量	0.128			S ₆₅ : 油中糠醛	0.197	
F ₃ : 内部过热	S ₃₁ : CO 产生速率	0.277	e ₃₁ : S ₃₁ ∩S ₃₃	S ₆₆ : 绝缘纸聚合度	0.199	e ₇₁ : S ₇₁ ∩S ₇₃ e ₇₂ : S ₇₁ ∩S ₇₅ e ₇₃ : S ₇₃ ∩S ₇₅ e ₇₄ : S ₇₅ ∩S ₇₆	
	S ₃₂ : CO ₂ 产生速率	0.27	e ₃₂ : S ₃₁ ∩S ₃₄	S ₇₁ : 油中微水	0.153		
	S ₃₃ : 绕组及套管直流电阻互差	0.213	e ₃₃ : S ₃₂ ∩S ₃₃	S ₇₂ : H ₂ 含量	0.145		
	S ₃₄ : C ₂ H ₄ 含量	0.24	e ₃₄ : S ₃₂ ∩S ₃₄	F ₇ : S ₇₃ : CH ₄ 含量	0.190		
F ₄ : 绝缘受潮	S ₄₁ : 绝缘油介损	0.158	e ₄₁ : S ₄₁ ∩S ₄₄ e ₄₂ : S ₄₂ ∩S ₄₄ e ₄₃ : S ₄₃ ∩S ₄₄ e ₄₇ : S ₁₃ ∩S ₄₄	局部放电	S ₇₄ : 绕组及套管直流电阻互差	0.140	e ₈₁ : S ₈₁ ∩S ₈₂ e ₈₂ : S ₈₁ ∩S ₈₅ e ₈₃ : S ₈₁ ∩S ₈₅ e ₈₄ : S ₈₂ ∩S ₈₅ e ₈₅ : S ₈₂ ∩S ₈₄ e ₈₆ : S ₈₂ ∩S ₈₅
	S ₄₂ : 油中微水	0.156		S ₇₅ : 局部放电量	0.215		
	S ₄₃ : 油击穿电压	0.140		S ₇₆ : 油中含气量	0.156		
	S ₄₄ : 绕组及套管吸收比	0.110		S ₈₁ : 绝缘油介损	0.186		
	S ₄₅ : 绕组及套管极化指数	0.091		F ₈ : S ₈₂ : 体积电阻率	0.205		
	S ₄₆ : 体积电阻率	0.093		S ₈₃ : 油中含气量	0.189		
	S ₄₇ : H ₂ 含量	0.140		S ₈₄ : C ₂ H ₂ 含量	0.174		
	S ₄₈ : 铁心绝缘电阻	0.112		S ₈₅ : 中性点流油静电电流	0.246		

注: $\cap$ 表示两指标量必须同时越限判据成立, $\parallel$ 表示指两指标量任一个判据成立, 越限条件为指标量状态低于状态值 0.3。