

基于耐久度的油浸绝缘电气主设备状态评估模型

通过分析油浸绝缘设备绝缘性能变化规律,研究油浸绝缘设备剩余绝缘寿命评估方法。并对设备环境温度、油温升及绕组热点温度的历史数据分析,总结其季节性的变化规律对绝缘寿命预测准确性的影响。在此基础上提出了以年为计算时间单位的油浸绝缘设备剩余绝缘寿命评估方法。同时,基于绝缘寿命评估结果和现有的国网状态评估导则,对现有健康指数理论进行了改进和修正,提出了耐久度指标,利用设备设计参数、运行工况、试验数据及检修记录等信息构建出由三类评估模型组成的健康状态评估综合模型,并通过实际案例计算验证了模型的可靠性。

徐 铭¹ 李正天² 关苏敏¹ 万 松¹ 徐 波¹ / 1.长江电力技术研究中心
2.华中科技大学电气工程学院

0 引言

20世纪末开始,变电设备的在线监测技术进入快速发展阶段,并且逐渐在各变电站得到了推广使用。与此同时,电子技术的发展和计算机的应用、新型传感器的研制以及各种智能算法的提出都进一步改善了在线监测的实用性和可靠性,监测结果的准确度也大为提高。以电力变压器为例,油中溶解气体分析、局部放电在线监测、绕组变形监测以及红外测温等技术已经在现场中得到了大量的应用,提供了设备的在线状态特征,为状态评估的实施奠定了基础。

状态评估是对设备的设计参数、运行工况、试验数据及检修维护情况等信息进行统计、整理和评估,为状态检修的安排提供依据,其主要包括以下任务。

1) 构建设备的运行档案,其中主要

包括设备的铭牌参数、负荷水平和油色谱等试验信息,运行环境情况以及故障记录等。

2) 依据前一部分构造的设备历史运行档案,对当前运行工况进行分析,完成设备健康状态的评估和分级,为状态检修提供依据。

本文主要通过对油浸绝缘主设备进行绝缘寿命评估,并结合现行的状态评估导则及标准,基于健康指数理论,利用基础信息、试验信息和运行环境信息等状态量构建了三类评估模型,并提出了耐久度的概念。利用评估模型对油浸绝缘主设备的健康状态进行了分析,并对设备的剩余寿命进行了评估。

1 基于耐久度油浸式设备状态评估模型

油浸绝缘电气主设备在整个运行服役期间内,内部各个元件都在缓慢地发生老化,无法直接观察、计量设备的老化程度,但是可以通过设备的外部特征、试验监测和日常数据记录来间接地了解油浸绝缘电气主设备的状态。考虑油浸绝缘电气主设备的整个生命周期,从设计规划、投产运行、例行试验和定期检修等数据记录中所获得的信息可以划分为三类:基础信息、运行环境信息和试验信息。

本文对这些数据进行有效的整合、深度挖掘,构建了油浸绝缘电气主设备多维时空关联示意图,如图1所示。

其中,图1中x轴为信息维度,其主



徐 铭/工程师

关键词/Keywords

油浸绝缘·
状态评估·
耐久度·

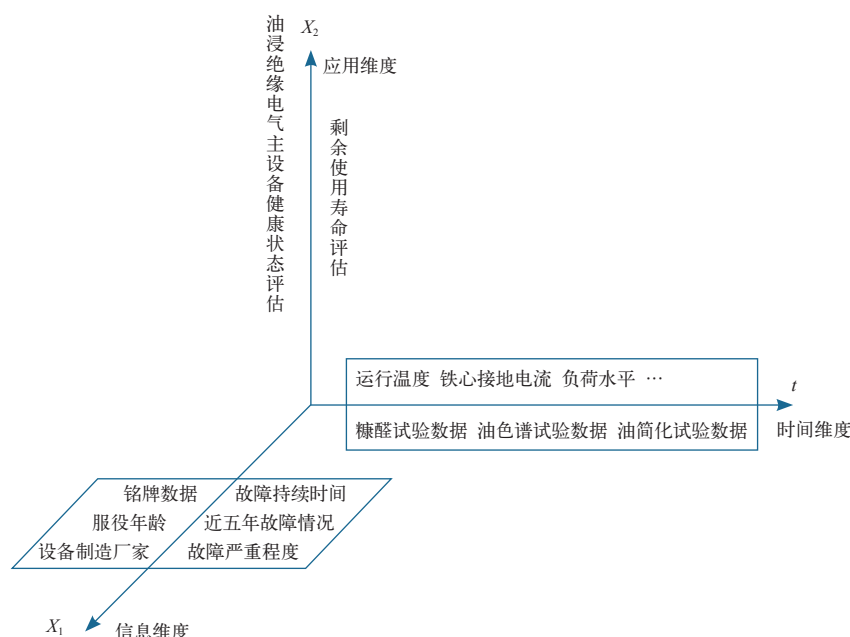


图1 油浸绝缘电气主设备多维信息时空关联示意图

要包括铭牌参数、故障情况等与时间无关的半结构化状态信息量；y轴为时间维度，主要包括运行温度、负荷水平等实时变化的信息量。

将历史运行工况对设备的影响进行了考虑，克服了现有健康指数无法针对达到或超过服役年龄的设备进行评估的缺陷，最终构建了如图2所示的基于耐久度的油浸绝缘电气主设备健康状态评估模型。

设备耐久度指数是一台设备运行状态的综合，其利用设备的基础信息、运行环境信息和试验信息，得到相关的特征量参数并确定其权重，通过建立和量化设备状态评估的层次指标体系，计算出设备的耐久度指标，并进一步得到剩余寿命和故障风险的大小，从而为检修策略的制定提供理论支持。

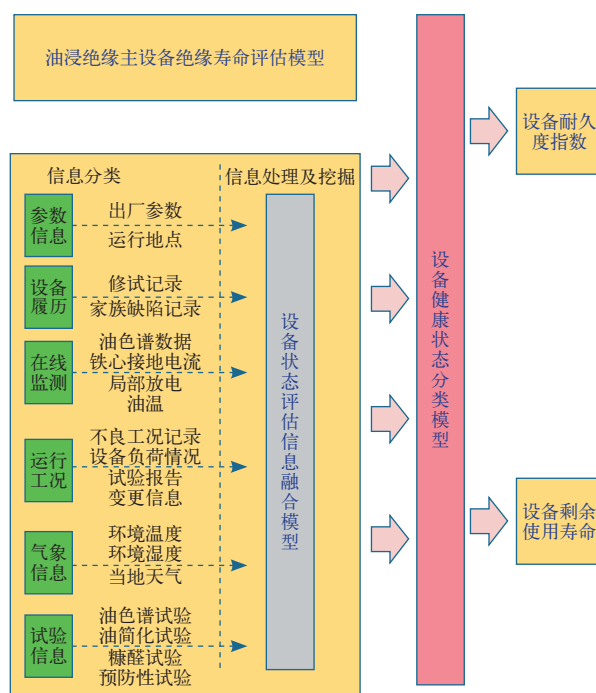


图2 油浸绝缘电气主设备健康状态评估流程图

2 基于耐久度状态评估模型构建

油浸绝缘电气主设备油纸绝缘系统的寿命很大程度上决定于其绕组所处的温度情况，在IEEE-C57.91-1995 (R2004)《油浸式电力变压器负载导则》中采用寿命损失参量 $L\%$ 来衡量由绕组热点温升所引起的油浸绝缘电气主设备绝缘纸寿命损失情况，可以根据油浸绝缘电气主设备的

运行负载及设计参数等计算绕组热点温升，从而导出阶段或累积寿命损失率，作为评估油浸绝缘电气主设备寿命的主要依据。油浸绝缘电气主设备的主要寿命影响因素是固体绝缘热应力，油浸绝缘电气主设备绝缘纸寿命损失情况主要是由绕组热点温升所引起的。而热点温度与变压器的寿

命之间的关系可以由阿伦尼乌斯公式得到,即

$$\text{per unit life} = Ae^{\frac{B}{\Theta_H+273}} \quad (1)$$

式中, A 、 B 为常量; Θ_H 为热点温度。

基于式(1), IEEE-C57.91-1995 (R2004)给出了在额定负载和参考温度下的变压器绝缘寿命老化因子,即

$$\text{per unit life} = 9.8 \times 10^{-18} e^{\frac{15000}{\Theta_H+273}} \quad (2)$$

$$F_{AA} = e^{\left[\frac{15000}{383} - \frac{15000}{\Theta_H+273} \right]} \quad (3)$$

需要指出,上式中设置的参考温度为110℃,即认为变压器在额定负载、绕组热点温度为110℃时一天(24h)的绝缘寿命损失为单位1。这样设置的考虑是因为变压器的绕组温升通常为65℃,这与在变电站调研所获知的情况相符。

变压器中的最高温度一般处在绕组热点温度和铁心温度之间,如果超过最高绕组热点温度,绕组绝缘就有被击穿的危险,继而导致变压器整体功能失效,所以变压器中最重要的温度是绕组热点温度。变压器的最高温度就是油的热点温度,由于顶层油温升是低于绕组温升的,同时随容量的增加,设备的顶层油温升会降低,因此根据调研的实际情况将参考温度设置为90℃,从而可以得到在额定负载和参考温度下的绝缘寿命老化因子

$$F_{AA} = e^{\left[\frac{15000}{363} - \frac{15000}{\Theta_H+273} \right]} \quad (4)$$

另外,通过不同热点温度下的 F_{AA} 就可以得到油浸绝缘电气主设备全生命周期的等效寿命老化因子

$$F_{EQA} = \frac{\sum_{n=1}^N F_{AA,n} \Delta t_n}{\sum_{n=1}^N \Delta t_n} \quad (5)$$

式中, $F_{AA,n}$ 为时间间隔 Δt_n 下的绝缘寿命老化因子。

剩余绝缘寿命计算流程如图3所示。

由式(1)~式(5)可以得到时间 t (单位:h)内的寿命损失

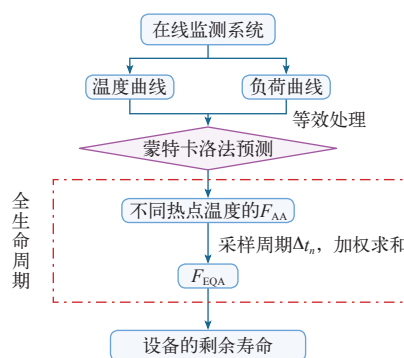


图3 剩余绝缘寿命计算流程图

$$T_l = \frac{F_{EQA} t \times 100}{T_{exp}} \quad (6)$$

式中, T_{exp} 为预期绝缘寿命, h。IEC 60354-1991给出的预期绝缘寿命为30年;通过在三峡电厂调研的情况来看,国内大部分的变压器和高抗服役年限都超过30年,所以本项目将采用下式计算油浸绝缘电气主设备剩余绝缘寿命

$$T_b = T_{exp} - F_{EQA} t \quad (7)$$

式中, T_b 为油浸绝缘电气主设备剩余绝缘寿命, h。

耐久度指数 D :在现有的运行状态下,完成规定功能的能力的量化表征。其与设备的老化程度密切相关,因此随着服役时间的增长其大小会不断发生变化。

设备的耐久度指数的计算公式为

$$D_t = D_{max} - \Delta D_0 e^{M(T_t - T_0)} \quad (8)$$

式中, D_t 为当前年或未来某年的耐久度指数; ΔD_0 为油浸绝缘电气主设备的初始耐久度指数损耗,由设备的原始信息确定,包括原始技术规格、生产厂家和运行经验等; T_t 为当前或未来年度; T_0 为设备开始服役的年度; M 为老化系数。本文中耐久度指数的取值范围为0~10之间,其数值越高,表明设备状况越好,故障风险越小。

假设变压器投运 $T_t - T_0$ 年之后,其故障风险非常高,处于寿命的终结,需要更换设备,此时的耐久度指数损耗将达到7。同时,假设变压器开始投运时耐久度指数损耗 ΔD_0 为0.5。根据式(8)的变换形式 $\Delta D_0 e^{M(T_t - T_0)} = D_{max} - D_t = \Delta D_t$ 则有

$$M = \frac{\ln(\Delta D_t - \Delta D_0)}{T_t - T_0} = \frac{\ln 7 - \ln 0.5}{T_t - T_0} \quad (9)$$

目前,国内外关于设备健康状态评估计算已经开展了相关研究,其中针对不同设备的类型,具体的计算方法略有差异,但模型的整体架构类似,均由三类评估确定。同样,本文中油浸绝缘电气主设备的状态评估模型同样分为三类:基础类、试验类和修正类。

2.1 第一类评估模型

第一类为基础类,主要目的是完成初始耐久度指数的计算。本类计算只考虑变压器最重要的状态量信息,例如生产厂商、型号规格、设计寿命、服役年龄、绝缘寿命评估、负荷水平和运行环境等。其中根据生产厂商和设备的型号规格,确定同系列产品有无家族缺陷,同时根据现场运行时的实际使用寿命对设计寿命进行修正;通过采用前文中的绝缘寿命评估模型,计算设备的预期绝缘寿命,与修正后的设计寿命进行比较;负荷水平方面主要考虑油浸绝缘电气主设备在服役过程中的负载情况,运行负荷的大小将直接影响到设备的温升,进而影响设备的使用寿命;运行环境主要考虑设备安装地的天气情况(降雨、降雪、雾霾及年平均气温等)以及设备表面的污损情况,其中湿度、污秽会导致设备的绝缘水平下降,而气温则会直接影响油浸绝缘电气主设备的油温,进而对设备的使用寿命产生影响。第一类评估结构如图4所示。

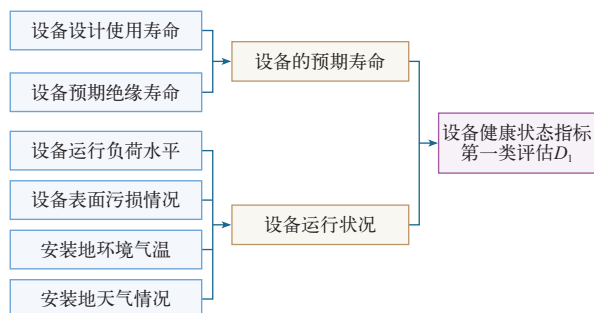


图4 油浸绝缘电气主设备健康状态第一类评估结构

通过第一类评估,可以获得油浸绝缘电气主设备的初始耐久度指数,其数值大小位于0~10之间,反映了设备的基本参数、运行环境及负荷水平对寿命的影响。

2.2 第二类评估模型

第二类为试验类,主要目的是通过试验结果完成设备老化进程的状态评估。其中的试验主要包括预防性试验、油简化试验(酸度值、击穿电压、微水和介质损耗)、油色谱试验及糠醛试验。第二类评估结构如图5所示。

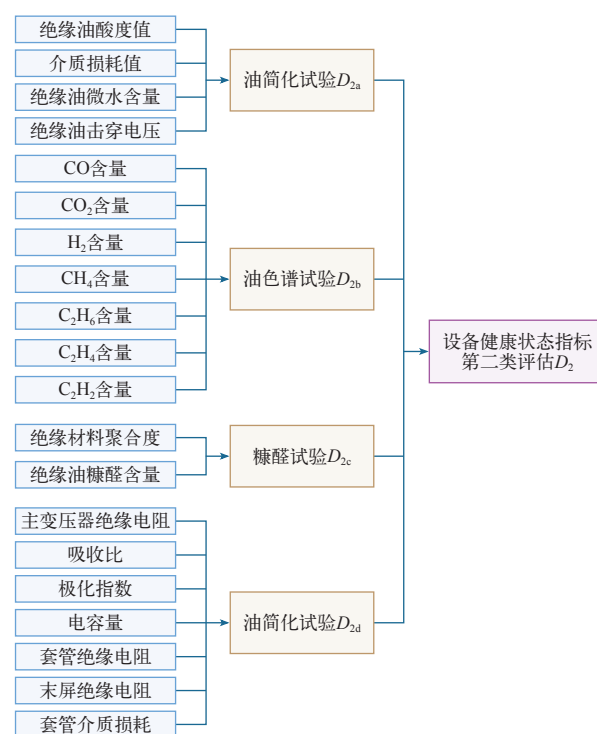


图5 油浸绝缘电气主设备健康状态第二类评估结构

其中预防性试验获得的信息包括:绕组介质损耗因数、绕组绝缘电阻、绝缘套管绝缘电阻、套管介质损耗因数、吸收比和极化指数;油简化试验主要是完成变压器油的击穿强度、酸度值、介质损耗及含水量等方面的评估;油色谱试验主要是测量变压器油中含有的 H_2 、 CH_4 、 C_2H_6 、 C_2H_4 、 C_2H_2 、 CO 及 CO_2 组分的含量;糠醛试验的目的是为了获取油中糠醛的含量,用于评价设备的健康状态。

通过第二类评估,可以获得基于试验参数得到的设备健康状态指标,通过与第一类评估模型得到的结果进行数据处理,得到综合耐久度指数。

2.3 第三类评估模型

第三类为修正类,主要目的是结合设备的运

行环境信息（包括负荷水平、环境情况及历史故障检修情况等），修正前两级得到的评估结果。其中健康状态修正因子可以分为两个部分：基于运行状况数据的修正和基于故障检修记录的修正。第三类修正结构如图6所示。

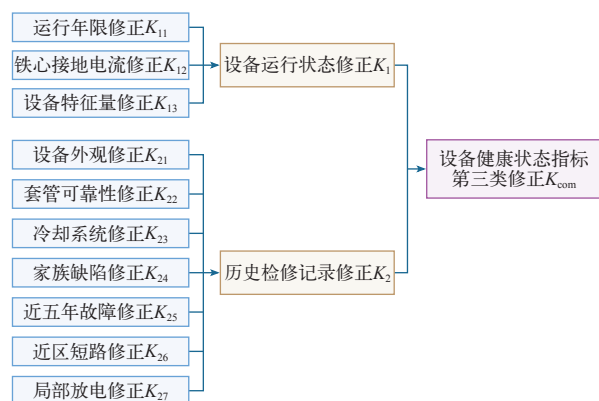


图6 油浸绝缘电气主设备健康状态第三类修正结构

其中基于运行状况数据的修正因子 K_1 主要考虑的是设备的服役年限、同系列产品的平均寿命、设备的运行环境、铁心接地电流大小及中性点直流电流大小（针对变压器）；基于故障检修记录的修正因子 K_2 主要考虑的是设备外观状况、家族缺陷、近五年故障情况、是否存在局部放电、设备的冷却方式以及部件的可靠性。通过第三类评估，再通过查询修正因子表和权重表带入公式计算就可以得到最终的油浸绝缘电气主设备耐久度指数，完成对设备的健康状态评估。状态评估流程如图7所示。

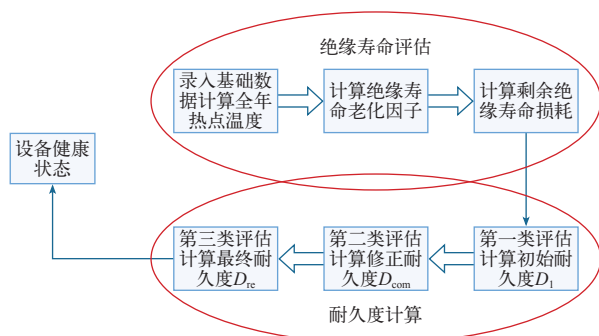


图7 状态评估流程图

经过三类评估后剩余寿命计算公式为

$$T_L = T_t - T_0 = \frac{\ln 7 - \ln (D_{\max} - D_{re})}{M} \quad (10)$$

3 案例分析

某变电站1982年投运的500 kV，750 MV·A的室外三相油浸式变压器，型号为ODFPSE-250000/500，设计使用寿命为30年，当地年最高气温为35.2℃，同系列产品未发现家族缺陷。本算例中将针对1998年9月12日和2008年6月2日的两组数据进行分析。其中，油简化试验数据记录、油色谱记录如表1和表2所示。

表1 油简化试验数据

(部分) 油简化试验项目	试验日期	
	1998年9月12日	2008年6月2日
酸度值/(mg(KOH)/g)	0.02	0.04
击穿电压/kV	60.3	74.6
微水含量/(mg/L)	3.4	4.6
介质损耗(%)	0.45	0.32

表2 油色谱分析数据 (B相)

气体组分	气体组分含量/(μL/L)	
	1998年9月12日	2008年6月2日
H ₂	0	18.4
CH ₄	9.7	8.7
C ₂ H ₆	11.2	12.4
C ₂ H ₄	1.6	0.1
C ₂ H ₂	0	0
CO	37.9	70.8
CO ₂	1 754.4	1 334.0
总烃	22.5	21.2

评估过程如下。

3.1 针对1998年9月12日的试验数据进行分析

3.1.1 剩余绝缘寿命评估

该变压器的设计使用寿命为30年，从1982年投运到1998年试验时已服役超过16年，总计运行时间为146 832 h。根据IEC-60076-7导则中给出的方法，利用历史环境温度、历史负荷水平和历史顶层油温升数据，采用上文中的方法，完成全年8 760 h级热点温度的计算。

利用全年小时级热点温度数据，根据式(3)和式(4)得到全年小时级变压器绝缘老化因子 F_{AA} ，并计算出绝缘寿命损耗： $T_1 = 14 914.8$ h。

根据式(7)，计算得到设备的剩余绝缘寿

命: $T_b = 247\ 885.2\ \text{h}$ 。

最终得到油浸绝缘电气主设备的实际绝缘寿命: $T_{\text{ins}} \approx 44.3$ 年。

实际绝缘寿命将作为寿命特征参数代入到三类评估模型中, 参与设备的健康状态评估。

3.1.2 第一类评估

变压器的设计寿命 T_{des} 为30年, 前一部分计算得到的实际绝缘寿命 T_{ins} 为44.3年, 设备服役年龄 T_{suv} 为16年。因为满足 $T_{\text{suv}} < T_{\text{des}} - 5$, 所以即有

$$T_{\text{end}} = \frac{\min(T_{\text{des}}, T_{\text{ins}})}{K_L K_T} \quad (11)$$

设备安装地环境等级为1, 通过查询修正因子表可以获得对应的修正因子的大小: $K_L = 1.25$, $K_T = 1$ 。代入到式(11)中, 计算得到预期运行年限 $T_{\text{end}} = 24$ 年。

根据老化系数计算公式式(9), 计算得到老化系数的数值: $M = (\ln 7 - \ln 0.5)/24 = 0.11$ 。

带入式(8), 第一类评估结果耐久度指数的计算: $D_1 = D_{\text{max}} - \Delta D_0 \times e^{M(T_1 - T_0)} = 10 - 0.5 \times e^{0.11 \times 16} = 7.095\ 6$ 。

3.1.3 第二类评估

通过查询修正因子表, 获取各项目试验数据等级及权重系数的大小。相应的油简化试验耐久度指数为: $D_{2a} = D_{\text{max}} - V_a C_a + V_b C_b + V_m C_m + V_l C_l = 10$ 。

通过查询修正因子表, 获取各气体组分含量等级及权重系数的大小。相应的油色谱试验耐久度指数为: $D_{2b} = D_{\text{max}} - V_{\text{H}_2} C_{\text{H}_2} + V_{\text{CH}_4} C_{\text{CH}_4} + V_{\text{C}_2\text{H}_6} C_{\text{C}_2\text{H}_6} + V_{\text{C}_2\text{H}_4} C_{\text{C}_2\text{H}_4} + V_{\text{C}_2\text{H}_2} C_{\text{C}_2\text{H}_2} = 9.769\ 2$ 。

糠醛试验数据缺省, 相应的糠醛试验健康状态指数为 $D_{2c} = 10$ 。可以得到综合系数的大小: $f_{\text{com}} = 0.85$, 得到第二类评估综合耐久度指数: $D_{\text{com}} = 7.531\ 3$ 。

3.1.4 第三类评估

由于设备已经运行了16年, 根据权重表, 确定运行年限修正因子 $K_{11} = 1.02$ 。由于数据缺乏, 无法获得铁心接地电流、中性点直流电流、设备外观情况、套管可靠性和家族缺陷等记录, 因此

对应的修正因子为默认缺省值1。

考虑到设备的冷却方式为强迫油循环冷却, 对应的冷却系统修正因子 $K_{23} = 0.96$ 。近五年变压器没有故障、缺陷记录, 也不存在近区短路和局部放电情况, 因此对应的修正因子即为: $K_{25} = 0.96$, $K_{26} = 1$, $K_{27} = 1$ 。

综上, B相综合修正因子即为: $K_{\text{com}} = (\prod_{m=1}^3 K_{1m}) \times (\prod_{n=1}^7 K_{1n}) = 0.94$ 。

最终B相耐久度指数为: $D_{\text{re}} = (1 - K_{\text{com}}) D_{\text{max}} + K_{\text{com}} D_{\text{com}} = (1 - 0.94) \times 10 + 0.94 \times 7.531\ 3 = 7.679\ 3$ 。

3.1.5 设备健康状态分析及剩余寿命评估

此时设备健康状态较好, 存在早期的正常老化现象, 设备性能良好, 故障率较低, 耐久度指数和故障率在一段时间内变化不大。将设备耐久度指数代入到剩余寿命计算公式式(10)中, 可得剩余寿命: $T_L = [\ln 7 - \ln (D_{\text{max}} - D_{\text{re}})]/M = [\ln 7 - \ln (10 - 7.679\ 3)]/0.11 = (\ln 7 - \ln 2.320\ 7)/0.11 = 10.040\ 4$ 年。

预期设备将正常运行到2009年, 总计使用寿命接近27年。

3.2 针对2008年6月2日的试验数据进行分析

3.2.1 剩余绝缘寿命评估

该变压器的设计使用寿命为30年, 从1982年投运到2008年试验时已服役超过26年, 总计运行时间为227 760 h, 采用与上一部分相同的处理方法, 完成全年8 760 h级热点温度的计算。

将全年小时级热点温度数据代入到式(3)及式(4)中, 得到全年小时级变压器绝缘老化因子 F_{AA} , 计算出绝缘寿命损耗: $T_1 = 40\ 770\ \text{h}$ 。

根据式(7)得到剩余绝缘寿命: $T_b = 222\ 030\ \text{h}$ 。

最终获得设备的实际绝缘寿命: $T_{\text{ins}} \approx 51.35$ 年。

实际绝缘寿命将作为寿命特征参数代入到三类评估模型中, 参与设备的健康状态评估。

3.2.2 第一类评估

变压器的设计寿命 T_{des} 为30年, 前一部分计算得到的实际绝缘寿命 T_{ins} 为51.35年, 设备服役年龄

T_{suV} 为26年。因为满足 $T_{\text{suV}} > T_{\text{des}} - 5$ ，所以即有

$$T_{\text{end}} = \frac{T_{\text{ins}}}{K_L K_T} \quad (12)$$

与前一部分相同，负荷修正因子 $K_L = 1.25$ ，运行环境修正因子 $K_T = 1$ 。代入到式(12)中，计算得到预期运行年限 $T_{\text{end}} = 41.08$ 年。计算得到老化系数的数值： $M = (\ln 7 - \ln 0.5) / 41.08 = 0.0642$ 。

完成第一类评估结果耐久度指数的计算： $D_1 = D_{\text{max}} - \Delta D_0 \times e^{M(T_1 - T_0)} = 0.5 \times e^{0.0642 \times 26} = 7.3431$ 。

3.2.3 第二类评估

采用与第一部分相同的方法，可以得到： $D_{2a} = D_{\text{max}} - V_a C_a + V_b C_b + V_m C_m + V_t C_t = 9.5618$ ； $D_{2b} = D_{\text{max}} - V_{\text{H}_2} C_{\text{H}_2} + V_{\text{CH}_4} C_{\text{CH}_4} + V_{\text{C}_2\text{H}_6} C_{\text{C}_2\text{H}_6} + V_{\text{C}_2\text{H}_4} C_{\text{C}_2\text{H}_4} + V_{\text{C}_2\text{H}_2} C_{\text{C}_2\text{H}_2} = 9.7692$ 。

糠醛试验数据缺省，相应的糠醛试验健康状态指数为 $D_{2c} = 10$ 。可以得到综合系数的大小为 $f_{\text{com}} = 0.85$ ，得到第二类评估的综合耐久度指数为 $D_{\text{com}} = 7.7417$ 。

3.2.4 第三类评估

由于设备已经运行了26年，根据修正因子表，确定运行年限修正因子 $K_{11} = 1.05$ 。其他修正因子的选取与前一部分规则相同，最终可以得到

综合修正因子的大小： $K_{\text{com}} = \left(\prod_{m=1}^3 K_{1m} \right) \times \left(\prod_{n=1}^7 K_{1n} \right) = 0.9677$ 。

最终B相的耐久度指数为 $D_{\text{re}} = 7.8147$ 。

3.2.5 设备健康状态分析及剩余寿命评估

此时设备健康状态较好，存在早期的正常老化现象，设备性能良好，故障率较低，耐久度指数和故障率在一段时间内变化不大。

将设备耐久度指数代入到剩余寿命计算公式(10)中，可得剩余寿命： $T_L = [\ln 7 - \ln (D_{\text{max}} - D_{\text{re}})] / M = [\ln 7 - \ln (10 - 7.8147)] / 0.0642 = (\ln 7 - \ln 2.1853) / 0.0642 = 18.1212$ 年。

预期设备将正常运行到2026年，总计使用寿命接近44年，超过设计使用寿命14年。实际中，

该变压器截至到调研时(2015年5月)依旧正常运行，未发生故障缺陷情况，与计算结果相符合。

4 结束语

本文在分析油浸绝缘设备绝缘性能变化规律的基础上提出了油浸绝缘设备剩余绝缘寿命评估方法。对设备环境温度、油温升及绕组热点温度的历史数据进行分析，总结其季节性的变化规律对绝缘寿命预测准确性的影响。并针对已有的寿命预测方法存在的不足，提出了绝缘材料劣化与热点温度变化的规律计算方法，在此基础上提出了以年为计算时间单位的油浸绝缘设备剩余绝缘寿命评估方法。同时，文中基于绝缘寿命评估结果和现有的国网状态评估导则，对现有健康指数理论进行了改进和修正，提出了耐久度指标，利用设备设计参数、运行工况、试验数据及检修记录等信息完成健康状态分类评估模型的构建。

上述案例若采用未经改进的健康指数模型，最终计算得到的健康状态指数HI为7.1740，计算得到的剩余寿命为-0.2232，与实际情况相矛盾。由此可以看出，通过采用基于耐久度的油浸绝缘电气主设备健康状态评估模型，可以针对服役年龄接近设计寿命的油浸绝缘电气主设备，完成健康状态评估，克服原有理论的不足之处。

参考文献

- [1] 许婧, 王晶, 高峰, 等. 电力设备状态检修技术研究综述[J]. 电网技术, 2000(8): 48-52.
- [2] 郑含博. 电力变压器状态评估及故障诊断方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- [3] 郭创新, 高振兴, 张健, 等. 油浸式电力变压器状态评估模型及方法[J]. 控制工程, 2011(11): 881-885.
- [4] 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(3): 70-74.

(收稿日期: 2016-02-14) EA