

考虑绝缘剩余寿命的变压器健康状态评估方法

李振柱¹, 谢志成², 熊卫红¹, 张宏志², 李正天², 林湘宁², 涂长庚¹

(1. 国家电网公司华中分部, 湖北 武汉 430077;

2. 华中科技大学 强电磁工程与新技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要: 在现有的健康指数理论和绝缘寿命计算方法的基础上进行延伸和拓展, 建立变压器运行状态评估结果与其剩余寿命的映射关系, 提出了一种考虑绝缘剩余寿命的油浸式变压器健康状态评估方法。利用变压器负荷记录和环境温度数据计算设备热点温度, 继而计算设备的绝缘剩余寿命; 再根据分级评估的思想对变压器运行状态进行分级评估, 考虑不同因素的影响, 形成不同层级的健康指数修正因子, 最终得到反映变压器的综合运行状态的设备剩余寿命及健康指数评分。通过实际变电站算例分析证明了该方法的有效性和优越性。该方法并不局限于油浸式变压器, 对于其他油绝缘设备(如电抗器)同样适用。

关键词: 变压器; 绝缘剩余寿命; 健康指数理论; 分级评估; 修正因子

中图分类号: TM 41

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.08.021

0 引言

电力变压器是电力系统中最重要和最昂贵的电气设备之一, 提高电力变压器, 特别是大型电力变压器运行的可靠性, 无论对整个电网的安全可靠运行, 还是降低电网运行成本都具有十分重要的意义。除了在变压器设计制造过程中提高其可靠性外, 更关键的是要在变压器的运行过程中提高其维护与检修水平。而制定变压器运维检修计划的关键是对设备的运行状态有准确的评估。然而由于变压器是一个复杂系统, 其老化、故障机理复杂且具有不确定性, 如变压器运行工况、历史运行记录不同, 同类型变压器的状态就可能不相同; 相同工况下不同类型变压器的状态也可能不同。因此, 变压器状态评估是一项复杂而艰巨的工作。

电力变压器状态评估是状态检修的基础。对运行中的电力变压器健康状态进行有效的评估是国内外研究的热点问题之一, 评估的关键是根据预防性试验得到的非破坏性指标量及在线检测指标量建立合理的状态评估模型, 从而判断变压器的运行状态。目前, 国内外学者在该领域已有较多的研究, 主要是使用人工智能方法实现综合评估变压器运行状态的目的, 常见的有物元理论、模糊综合评判、贝叶斯网络、灰靶理论等方法^[1-6]。现有的方法在很大程度上推进了设备状态评估的研究, 但也存在考虑的影响因素不够全面、对专家知识依赖程度较高的问题。

此外, 健康指数理论^[7]在变压器状态评估方面的应用也较多, 其基于设备老化原理, 提出设备健康水平与设备服役年龄之间的经验公式, 并做了如下假设:

a. 假设设备初始投运时健康状态良好, 对应的健康指数为初始设定值;

b. 假设设备达到设计寿命时老化严重, 故障率极高, 对应的健康指数为故障状态设定值。

根据上述假设, 可以确定在初始运行时间和设计寿命时对应的健康指数, 结合经验公式, 即可得到任意服役时间下对应的健康指数, 进而对设备进行状态评估。然而, 在实际运行当中, 许多变压器运行时间远远超过了其设计寿命, 且依旧保持着良好的运行状态。因此假设 **b** 并不一定成立, 存在改进的空间。

因此, 通过对现有的健康指数理论和绝缘寿命计算方法进行延伸和拓展, 本文提出了一种考虑绝缘剩余寿命的油浸式变压器健康状态评估方法, 利用变压器负荷记录和环境温度数据计算得到设备热点温度, 并采用基于热点温度的绝缘寿命计算模型得到设备的绝缘剩余寿命。根据分级评估思想将与变压器运行状态强相关的状态量进行分级, 结合健康指数理论得到不同层级对应的健康指数修正因子, 由此得到反映变压器的综合运行状态的设备剩余寿命及健康指数值, 以此指导检修计划的制定。

1 变压器剩余绝缘寿命评估模型

油浸式变压器的绝缘寿命很大程度上取决于其绕组所处的温度, 根据设备的运行负载、环境温度及设计参数等计算绕组热点温升, 得到阶段寿命损失率, 从而完成变压器绝缘剩余寿命的评估。其中绝缘剩余寿命是指考虑损耗之后, 油浸绝缘材料的预

收稿日期: 2015-09-14; 修回日期: 2016-06-29

基金项目: 中央高校基本科研业务费资助项目(HUST:2014QNR-C042); 国家电网公司科技项目

Project supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities (HUST:2014QNR-C042) and the Science and Technology Program of State Grid Corporation of China

期剩余使用年限。

IEC60076-7 导则^[8]中给出了热点温度的计算公式:

$$\Theta_{\text{HST}} = \Theta_a + \Delta\Theta_{\text{TO}} + \Delta\Theta_w \quad (1)$$

其中, Θ_{HST} 为热点温度; Θ_a 为环境温度; $\Delta\Theta_{\text{TO}}$ 为顶层油温升; $\Delta\Theta_w$ 为热点温度相对于顶层油温的温度差。

为了描述热点温度对设备绝缘寿命的影响, 采用 Arrhenius 模型进行分析:

$$L(\Theta_{\text{HST}}) = a \cdot e^{\frac{b}{\Theta_{\text{HST}}}} \quad (2)$$

其中, $L(\Theta_{\text{HST}})$ 为量化的绝缘寿命值; Θ_{HST} 为由式(1)计算得到的热点温度(单位为 K); a 和 b 为常数。在式(2)的基础上, IEEE Std C57.91—1995 导则^[9]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的定义:

$$F_{\text{ins}} = e^{\frac{15000}{383} - \frac{15000}{\Theta_{\text{HST}}}} \quad (3)$$

因此, 对应的绝缘寿命损耗 T_1 为:

$$T_1 = \sum_{i=1}^n F_{\text{ins},i} \Delta t_i \quad (4)$$

其中, Δt_i 为时间间隔; $F_{\text{ins},i}$ 为时间间隔 Δt_i 下对应的绝缘寿命老化因子。

假定变压器预期的绝缘寿命为 T_a (本文参考设备设计使用寿命将其取为 30 a), 可由式(5)计算得绝缘剩余寿命 T_b 。

$$T_b = T_a - T_1 \quad (5)$$

考虑到进行绝缘寿命评估时变压器已经服役了 T_{suV} 时间, 则实际绝缘寿命 T_{ins} 为:

$$T_{\text{ins}} = T_{\text{suV}} + T_b \quad (6)$$

其中, T_{ins} 为从设备投运开始绝缘材料的预期使用寿命, 其作为寿命的特征参数应用于健康指数模型, 用于评估变压器的健康状态, 并计算设备剩余寿命。

2 变压器健康指数评估模型

2.1 健康指数的定义

健康指数(HI)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。

本文采用的是英国 EA 公司所提出的健康指数计算公式^[10], 其在英国的所有电力公司以及澳大利亚、加拿大、美国等地区得到了相当成功的应用, 具有实际指导意义。计算公式为:

$$H_t = H_0 \cdot e^{B(T_t - T_0)} \quad (7)$$

其中, H_t 为当前或未来某年的健康指数; H_0 为设备的初始健康指数, 由设备的原始信息确定, 包括原始技术规格、生产厂家、运行经验等; T_t 为进行健康指数 H_t 评估时对应的年份; T_0 为设备初始投运时对应的年份; B 为老化系数。

健康指数的取值范围为 $[0, 10]$, 其数值越低, 表明设备状况越好、故障风险越小。Q/GDW169—2008《油浸式变压器(电抗器)状态评价导则》^[11]中将变压器的状态评估结果划分为正常状态、注意状态、异常状态和严重状态 4 种情况, 对应采用定期检修与异常状态检修相结合的检修策略。本文中为了实现特别健康的设备实现免检修目标, 将文献[10]中给出的评价结果细化为 5 个部分, 健康指数与设备故障风险之间的定性关系如表 1 所示。

表 1 健康指数与设备故障风险的对应关系
Table 1 Health index and corresponding failure risk of equipment

状态	健康指数	故障风险
很差	(7,10]	高
差	(5.5,7]	中
一般	(4,5.5]	低
较好	(1.5,4]	很低
好	[0,1.5]	无安全隐患

当健康指数处于 $[0, 1.5]$ 时, 表明设备的性能优秀, 老化程度非常低; 当健康指数处于 $(1.5, 4]$ 时, 表明设备存在早期的正常老化现象, 性能良好; 当健康指数处于 $(4, 5.5]$ 时, 设备已有明显的老化, 属于正常的老化现象, 该阶段下, 设备故障率有上升趋势; 当健康指数处于 $(5.5, 7]$ 时, 设备存在严重的老化, 老化程度已超出正常阈值, 故障率明显上升, 应采取及时检修维护或替换充油设备措施, 保证设备运行的可靠性; 当健康指数处于 $(7, 10]$ 时, 设备已经接近报废, 故障率非常高, 必须更换设备。

2.2 变压器健康状态评估信息分类

在服役期间内, 变压器内部各个器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设备的状态。从变压器的设计规划、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 3 类: 基础信息、运行环境信息和试验信息。

基础信息即为变压器自身的固有参数。运行环境信息可以分为两部分: 一是通过日常数据记录、在线监测装置等方式获得的, 另一部分是根据历史运行检修情况得到的各种故障信息。试验信息具体包括油简化试验信息(酸度、击穿电压、微水、介质损耗)、油色谱试验信息、糠醛试验信息。

2.3 基于健康指数的变压器分级评估模型

本文将基于健康指数的变压器评估模型分为以下 3 级: 基础级、试验级和修正级。三者之间的相互关系如图 1 所示。

通过前 2 级评估获取设备的综合健康指数, 再利用第三级评估对其进行修正, 得到最终的状态评估

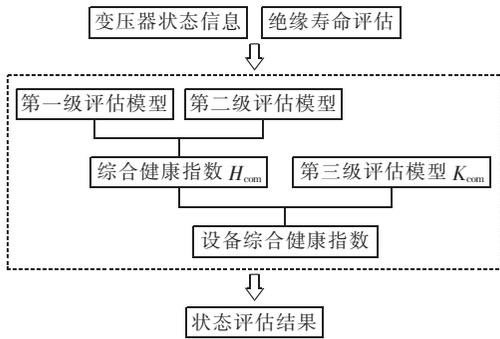


图 1 分级评估模型结构

Fig.1 Structure of classification evaluation model

结果。

2.3.1 第一级评估模型

第一级为基础级,主要目的是完成第一级健康指数 H_1 的计算。本级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。

根据式(1)可推导得:

$$B = \frac{\ln(H_i/H_0)}{T_i - T_0} \quad (8)$$

令 $T_{end} = T_i - T_0$ 为变压器的预期运行年限。假设变压器投运 T_{end} 之后,其故障风险非常高,临近寿命的终结,需要更换设备,此时的健康指数将达到 7。同时,假设变压器开始投运时健康指数 $H_0 = 0.5$,则有:

$$B = \frac{\ln 7 - \ln 0.5}{T_{end}} \quad (9)$$

厂商在对变压器进行设计时,已经确定了其设计寿命 T_{des} ,但考虑到设备在运行过程中,负荷水平及运行环境会影响老化进程,在变压器维护检修得当、运行环境良好的情况下,其实际的服役年龄可以超过出厂设计使用寿命 T_{des} ,因此可以提前 T_{set} 对预期使用年限进行调整(本文取为 5a),结合前文所提绝缘剩余寿命计算方法,修正预期使用年限 T_{end} 。

(1)当服役年龄 $T_{surv} < T_{des} - T_{set}$ 时:

$$T_{end} = \frac{\min(T_{des}, T_{ins})}{K_L K_T} \quad (10)$$

其中, K_L 为负荷水平修正因子; K_T 为运行环境修正因子。

(2)当服役年龄 $T_{surv} > T_{des} - T_{set}$ 时:

$$T_{end} = \frac{T_{ins}}{K_L K_T} \quad (11)$$

负荷修正因子 K_L 与变压器的负荷水平相关,表 2 给出了两者之间的对应关系^[12],其中负荷率 β 的计算公式为:

$$\beta = \bar{S} / S_N \quad (12)$$

其中, \bar{S} 为变压器运行过程中平均负荷大小; S_N 为额定容量。

环境修正因子 K_T 的大小与设备安装地所处的

表 2 负荷水平修正因子

Table 2 Correction factor of load level

负荷率/%	修正因子	负荷率/%	修正因子
[0,40]	1.0	(70,80]	1.25
(40,60]	1.05	(80,100]	1.3
(60,70]	1.1	>100	1.6

地理环境相关,根据温度、设备表面污损情况等对运行环境进行评级,进而得到运行环境修正因子 K_T ,具体对应关系如表 3 所示^[12]。

表 3 运行环境修正因子

Table 3 Correction factor of operational environment

环境等级	环境描述	修正因子
0	室内	0.96
1	室外,年最高温 < 39℃,污损低	1.00
2	室外,年最高温 < 39℃,污损高	1.05
3	室外,年最高温 > 39℃,污损低	1.15
4	室外,年最高温 > 39℃,污损高	1.30

因此,第一级健康指数计算结果为:

$$H_1 = H_0 \cdot e^{B(T_i - T_0)} = 0.5 \cdot e^{Bt} \quad (13)$$

其中, $t = T_i - T_0$ 为设备从投运开始到进行健康评估时经历的时间。通过第一级评估,可以获得充油设备的第一级健康指数,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、负荷水平对寿命的影响。

2.3.2 第二级评估模型

第二级评估主要利用试验数据(油简化试验、油色谱试验、糠醛试验)完成设备老化进程的状态评估。由于不同试验的不同参数指标对设备老化进程的影响程度各不相同,因此需要合理地确定各试验指标的权重系数,本文采用改进层次分析法^[13]得到的各指标权重系数如表 4 所示。

表 4 试验项目指标权重

Table 4 Index weights of test items

试验名称	测试项目	权重系数
油简化试验 H_{2a}	酸值 C_{11}	0.2191
	击穿电压 C_{12}	0.2191
	微水含量 C_{13}	0.2191
	介质损耗 C_{14}	0.3425
油色谱试验 H_{2b}	氢气 C_{21}	0.1923
	甲烷 C_{22}	0.1154
	乙烷 C_{23}	0.1154
	乙烯 C_{24}	0.1154
	乙炔 C_{25}	0.4615

实验中各测试项目对应的等级划分如表 5、6 所示。

相应地可以得到:

$$H_{2a} = \sum_{m=1}^4 V_{1m} C_{1m} \quad (14)$$

$$H_{2b} = \sum_{n=1}^5 V_{2n} C_{2n} \quad (15)$$

表 5 油简化试验各因素等级划分表
Table 5 Classes of different factors for simplified oil test

等级	测试项目			
	酸值 V_{11} / (mgKOH·g ⁻¹)	击穿电压 V_{12} /kV	微水含量 V_{13} /(mg·L ⁻¹)	介质损耗 V_{14} /%
0	[0,0.03)	≥50	[0,5)	[0,0.5)
2	[0.03,0.07)	[40,50)	[5,10)	[0.5,1)
4	[0.07,0.12)	[30,40)	[10,15)	[1,1.5)
8	[0.12,0.13)	[0,30)	≥15	[1.5,2)
10	≥0.13			≥2

表 6 油色谱试验各因素等级划分表
Table 6 Classes of different factors for oil chromatograph analysis

等级	测试项目				
	氢气 V_{21}	甲烷 V_{22}	乙烷 V_{23}	乙烯 V_{24}	乙炔 V_{25}
0	[0,20)	[0,10)	[0,10)	[0,10)	[0,0.5)
2	[20,40)	[10,20)	[10,20)	[10,20)	[0.5,1)
4	[40,100)	[20,40)	[20,40)	[20,40)	[1,3)
8		[40,65)	[40,65)	[40,65)	[3,5)
10	[100,200)	[65,150)	[65,150)	[65,150)	≥5
16	≥200	≥150	≥150	≥150	

设备的聚合度(DP)与糠醛含量(FFA)之间的关系满足如下的经验公式^[12]:

$$DP = -121 \times \ln(FFA) + 458 \quad (16)$$

考虑材料全新状态,聚合度 $DP = 1\ 000$,此时 $FFA \approx 0.01$ 。由于设备刚投运,相应的健康指数为 0.1。考虑绝缘材料已经发生严重的老化, $DP = 250$,此时 $FFA \approx 5$ 。由于设备老化严重,此时对应的健康指数为 7,需要立即更换。因此可以得到:

$$H_{2c} = 2.33 \times (FFA)^{0.68} \quad (17)$$

根据前 2 级的评估结果 $H_1, H_{2a}, H_{2b}, H_{2c}$, 可以确定综合健康指数 H_{com} :

$$H_{com} = f_{com} \cdot \max(H_1, H_{2a}, H_{2b}, H_{2c}) \quad (18)$$

其中, f_{com} 为常数,其取值与 $H_1, H_{2a}, H_{2b}, H_{2c}$ 的大小相关。

2.3.3 第三级评估模型

第三级为修正级,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、历史故障检修情况等),修正前 2 级得到的评估结果。其中健康状态修正因子可以分为两大类:基于运行状况数据的修正和基于故障检修记录的修正。

以现有的 Q/GDW169—2008《油浸式变压器(电抗器)状态评价导则》为基础,结合输变电站的在线监测系统的情况,从导则的评分项目中选取部分对评估模型进行修正,通过采用主成分分析法^[14-16]、模糊综合评判法^[17-18],对各修正项目的的影响权重进行确定,进而得到对应的修正系数。

(1)修正项目:设备投运时间 T (单位为 a)。

当 $0 \leq T \leq 5$ a 时, $K_{11} = 1$; 当 5 a $< T \leq 10$ a 时, $K_{11} = 1.01$; 当 10 a $< T \leq 20$ a 时, $K_{11} = 1.02$; 当 20 a $< T \leq 30$ a

时, $K_{11} = 1.05$; 当 $T > 30$ a 时, $K_{11} = 1.09$ 。

(2)修正项目:铁芯接地电流 I (单位为 A)。

当 $I = 0$ 时, $K_{12} = 1$; 当 $0 < I \leq 0.1$ A 时, $K_{12} = 1.05$; 当 0.1 A $< I \leq 0.3$ A 时, $K_{12} = 1.1$; 当 $I > 0.3$ A 时, $K_{12} = 1.2$ 。

(3)修正项目:变压器外观等级 L 。

选取变压器本体、冷却系统、分接开关、非电量 4 个组件中外观等级最高的一个进行修正。 $K_{21} = 0.9 + 0.1L$, 其中 L 取值为 1、2、...、5(等级 1 表明外观状况最佳,无损坏)。

(4)修正项目:套管可靠等级 R 。

套管可靠性等级 R 取值在 1~5 之间。当 $R = 1$ 时, $K_R = 0.9$; 当 $R = 2$ 时, $K_R = 1$; 当 $R = 3$ 时, $K_R = 1.1$; 当 $R = 4$ 时, $K_R = 1.2$; 当 $R = 5$ 时, $K_R = 1.4$ 。对于三相变压器而言,考虑高、中、低侧套管具有不同的可靠性等级,此时,若 $\max(K_{R_h}, K_{R_m}, K_{R_l}) > 1$, $K_{22} = K_{R_h} + K_{R_m} + K_{R_l}$; 若 $\max(K_{R_h}, K_{R_m}, K_{R_l}) \leq 1$, $K_{22} = \min(K_{R_h}, K_{R_m}, K_{R_l})$ 。

(5)修正项目:冷却方式。

油浸自冷 ONAN 及油浸风冷 ONAF, $K_{23} = 1$; 强迫油循环冷却 OF, $K_{23} = 0.96$; 强迫导向油循环冷却 OD, $K_{23} = 0.95$ 。

(6)修正项目:家族缺陷。

如果同系列设备从未发生过问题,则 $K_{24} = 0.96$; 如果同系列设备发生过少数缺陷,但并未危及运行,则 $K_{24} = 1$; 如果同系列设备发生重复故障,存在安全隐患,则 $K_{24} = 1.04$ 。

(7)修正项目:近五年故障、缺陷次数 n 。

当 $n = 0$ 时, $K_{25} = 0.96$; 当 $n = 1$ 时, $K_{25} = 1$; 当 n 为 2、3、4 时, $K_{25} = 1.04$; 当 n 为 5、6、...、10 时, $K_{25} = 1.2$; 当 $n > 10$ 时, $K_{25} = 1.4$ 。

(8)修正项目:近区短路。

若发生过近区短路,则 $K_{26} = 1.04$; 若未发生过近区短路,则 $K_{26} = 1$ 。

(9)修正项目:局部放电。

若存在局部放电现象,则 $K_{27} = 1.2$; 若不存在局部放电现象,则 $K_{27} = 1$ 。

其中若某一项指标缺省,则该项对应的修正系数为 1。

综合修正因子 K_{com} 即为:

$$K_{com} = \prod_{m=1}^2 K_{1m} \cdot \prod_{n=1}^7 K_{1n} \quad (19)$$

通过第三级评估,可以得到最终的变压器健康指数:

$$H = K_{com} H_{com} \quad (20)$$

设备剩余寿命评估是根据变压器当前健康指数,代入到式(7)中,推算出当健康指数 $H_i = 7$ 时,设备报废所需要的时间。假设基于前文所述的 3 级评

估模型得到的设备当前健康指数为 H , 剩余寿命为 T_L , 则有:

$$H_L = H \cdot e^{BT_L} \quad (21)$$

因此, 健康指数 H 与设备剩余寿命 T_L 之间的对应规则为:

$$T_L = \frac{\ln 7 - \ln H}{B} \quad (22)$$

本文所提出的方法对绝缘寿命的计算是依据油浸式绝缘材料的老化特性实现的, 因此对油浸式电力变压器、油浸式电抗器等油纸绝缘设备具有通用性。同时所采用的健康指数评估模型是具有通用性的, 并非针对某一类设备。通过根据设备特点对模型中的状态量及其上下限阈值进行相应修改即可扩展应用于其他设备的状态评估。

3 算例分析

某变电站 1982 年投运的电压等级为 500 kV、单相容量为 250 MV·A、工作地点为室外的变压器(型号 ODFPSE-250000/500), 设计使用寿命为 30 a, 设备年平均负荷率为 75%, 当地年最高气温为 35.2 °C, 同系列产品未发现家族缺陷, 变压器采用强迫导向油循环冷却, 测量得到的铁芯接地电流为 0.03 A, 巡检记录中变压器外观(包括设备本体、冷却系统、分接开关等部件)状况良好, 并且不存在近区短路和严重局部放电现象, 近五年没有发生严重缺陷或者故障, 根据预防性试验中套管主绝缘电阻、末屏电阻、套管电容量和套管介损正切值等数据确定套管的可靠性等级为 1。本文算例中将针对 1998 年 9 月 12 日和 2008 年 6 月 2 日的 2 组数据进行分析。其中, 油简化试验数据记录、油色谱记录分别如表 7 及表 8 所示。

(1) 首先针对 1998 年的数据进行分析, 从投运

表 7 油简化试验数据

Table 7 Data of simplified oil test

油简化试验项目 (部分)	试验日期	
	1998-09-12	2008-06-02
酸值/(mg(KOH)·g ⁻¹)	0.02	0.04
击穿电压/kV	60.3	74.6
微水含量/(mg·L ⁻¹)	3.4	4.6
介质损耗	0.45	0.32

表 8 油色谱分析数据

Table 8 Data of oil chromatograph analysis $\mu\text{L}/\text{L}$

油色谱分析项目	试验日期	
	1998-09-12	2008-06-02
氢气	0	18.4
甲烷	9.7	8.7
乙烷	11.2	12.4
乙烯	1.6	0.1
乙炔	0	0

以来, 设备总计运行时间为 146832 h, 利用历史环境温度、历史负荷水平和历史顶层油温数据, 得到全年热点温度数值。通过式(3)得到变压器绝缘寿命老化因子 F_{ins} , 代入式(4), 可以计算得到绝缘寿命损耗 T_1 为 14914.8 h, 因此绝缘剩余寿命 T_b 为 247885.2 h (约为 28.29 a), 由式(6)可得实际绝缘寿命 T_{ins} 约为 44.3 a。

根据设备的负荷水平及安装地的环境等级, 由表 2 及表 3 可得对应的修正因子 $K_T = 1, K_L = 1.25$ 。由于此时服役年龄 $T_{sun} < T_{des} - 5$, 采用式(10)得到预期运行年限 T_{end} 为 24 a, 再代入式(9), 计算老化系数 $B = 0.11$, 完成第一级评估 $H_1 = 2.9044$; 根据各试验数据确定各试验项目所处等级, 结合权重系数, 得到 $H_{2a} = \sum_{m=1}^4 V_{1m} C_{1m} = 0, H_{2b} = \sum_{n=1}^5 V_{2n} C_{2n} = 0.2308, H_{2c} = 0$ 。根据式(18), 得到第二级健康指数 $H_{com} = 2.4687$; 根据设备冷却方式、家族缺陷情况、近五年故障缺陷次数等信息完成修正系数的确定 $K_{com} = 0.94$, 因此最终健康指数即为 $H = K_{com} H_{com} = 2.3207$ 。根据表 1 可知, 此时设备健康状态较好, 存在早期正常老化现象, 设备性能良好, 故障率较低, 健康指数和故障率在一段时间内变化不大。将其代入式(22)得到此时设备剩余寿命 T_L 为 10.004 a。

(2) 针对 2008 年的数据进行分析, 采用与(1)中相同的步骤, 根据历史环境温度、历史负荷水平和历史顶层油温数据, 得到全年热点温度。通过式(3)得到变压器绝缘寿命老化因子 F_{ins} , 代入式(4), 可以计算得到绝缘寿命损耗 T_1 为 73583.7 h, 因此绝缘剩余寿命 T_b 为 189216.3 h (约为 21.6 a), 并计算得实际绝缘寿命 T_{ins} 约为 47.6 a。

根据设备的负荷水平以及安装地的环境等级, 可以得到对应的修正因子 $K_T = 1, K_L = 1.25$ 。由于此时服役年龄 $T_{sun} \geq T_{des} - 5$, 采用式(11)得到预期运行年限 T_{end} 为 38.08 a, 再代入式(9), 计算老化系数 $B = 0.069$, 第一级评估结果为 $H_1 = 3.0305$, 第二级评估结果为 $H_{com} = 2.8790$, 第三级评估中 $K_{com} = 0.9677$, 因此最终设备健康指数为 $H = K_{com} H_{com} = 2.7859$ 。将其代入式(22)得到此时设备剩余寿命 T_L 为 13.2942 a。此时, 预期总运行寿命达到 39.29 a, 可以正常运行至 2021 年, 超过设备设计使用寿命(30 a)。由实际情况可以知道, 该变压器截止到 2015 年 5 月依旧正常运行, 超出设计使用寿命, 与计算结果相符合。

4 结论

在现有健康指数理论和绝缘寿命计算方法的基础上进行延伸和拓展, 本文提出了一种考虑绝缘剩余寿命的油浸式变压器健康状态评估方法。利用变压

器负荷记录和环境温度数据计算得到设备热点温度,并采用基于热点温度的绝缘寿命计算模型得到设备的绝缘剩余寿命。根据分级评估思想将与变压器运行状态强相关的状态量进行分级,结合健康指数理论得到不同层级对应的健康指数修正因子,由此得到反映变压器的综合运行状态的设备剩余寿命和健康指数值。通过实际算例分析证明了该方法的有效性和优越性。该方法的结果可以对设备检修计划的制定提供理论指导,同时该方法不局限于油浸式变压器,对设备的状态量及其上下限阈值进行修改即可适用于油浸式电力变压器、油浸式电抗器等油纸绝缘设备。

参考文献:

- [1] 于发威. 基于物元理论的电力变压器运行状态分级评估[D]. 郑州:郑州大学,2010.
YU Fawei. Classification evaluation of transformer operation condition based on matter-element theory[D]. Zhengzhou:Zhengzhou University,2010.
- [2] 杨丽徙,于发威,包毅. 基于物元理论的变压器绝缘状态分级评估[J]. 电力自动化设备,2010,30(6):55-59.
YANG Lixi,YU Fawei,BAO Yi. Classification evaluation of transformer insulation condition based on matter-element theory[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(6):55-59.
- [3] 国连玉,李可军,梁永亮,等. 基于灰色模糊综合评判的高压断路器状态评估[J]. 电力自动化设备,2014,34(11):161-167.
GUO Lianyu,LI Kejun,LIANG Yongliang,et al. HV circuit breaker state assessment based on gray-fuzzy comprehensive evaluation[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(11):161-167.
- [4] 刘从法,罗日成,雷春燕,等. 基于 AHP 灰色定权聚类的电力变压器状态评估[J]. 电力自动化设备,2013,33(6):104-107.
LIU Congfa,LUO Richeng,LEI Chunyan,et al. Power transformer condition assessment based on AHP grey fixed-weight clustering[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(6):104-107.
- [5] 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):1032-1040.
ZHAO Wenqing,ZHU Yongli,JIANG Bo,et al. Condition assessment for power transformers by Bayes networks[J]. High Voltage Engineering,2008,34(5):1032-1040.
- [6] 田丰. 基于改进灰靶理论的变压器状态评估[D]. 北京:华北电力大学,2011.
TIAN Feng. Transformer condition assessment based on improved grey target theory[D]. Beijing:North China Electric Power University,2011.
- [7] 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):80-86.
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):80-86.
- [8] IEC. Power transformer-part 7:loading guide for oil-immersed power transformers:IEC60076-7[S]. Geneva,Switzerland:IEC Office,2005.
- [9] IEEE. IEEE guide for loading mineral-oil-immersed transformers:IEEE Std C57.91-1995[S]. Piscataway,NJ,USA:The Institute of Electrical and Electronics Engineering,1996.
- [10] 潘乐真,张焰,俞国勤,等. 状态检修决策中的电气设备故障率推算[J]. 电力自动化设备,2010,30(2):91-94.
PAN Lezhen,ZHANG Yan,YU Guoqin,et al. Prediction of electrical equipment failure rate for condition-based maintenance decision-making[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(2):91-94.
- [11] 国家电网公司. 油浸式变压器(电抗器)状态评价导则:Q/GDW169—2008[S]. 北京:中国电力出版社,2008.
- [12] 梁博渊,刘伟,杨欣桐. 变压器健康状况评估与剩余寿命预测[J]. 电网与清洁能源,2010,26(11):37-43.
LIANG Boyuan,LIU Wei,YANG Xintong. Transformer condition assessment and residual life prediction[J]. Power System and Clean Energy,2010,26(11):37-43.
- [13] 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.
- [14] 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.
ZHENG Hanbo. Study on condition assessment and fault diagnosis approaches for power transformers[D]. Chongqing:Chongqing University,2012.
- [15] 杨廷方,张航,黄立滨,等. 基于改进型主成分分析的电力变压器潜伏性故障诊断[J]. 电力自动化设备,2015,35(6):149-153.
YANG Tingfang,ZHANG Hang,HUANG Libin,et al. Incipient fault diagnosis based on improved principal component analysis for power transformer[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(6):149-153.
- [16] 苑津莎,尚海昆. 基于主成分分析和概率神经网络的变压器局部放电模式识别[J]. 电力自动化设备,2013,33(6):27-31.
YUAN Jinsha,SHANG Haikun. Pattern recognition based on principal component analysis and probabilistic neural networks for partial discharge of power transformer[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(6):27-31.
- [17] 贾卫军. 基于组合赋权的变压器状态模糊综合评估模型及其专家系统[D]. 保定:华北电力大学,2010.
JIA Weijun. Transformer condition assessment model and MIS based on combination weighing[D]. Baoding:North China Electric Power University,2010.
- [18] 赖显光,管霖,王滔,等. 基于模糊综合评判的直流输电系统检修时机选择方法[J]. 电力自动化设备,2014,34(9):90-94.
LAI Yuguang,GUAN Lin,WANG Tao,et al. HVDC maintenance timing based on fuzzy comprehensive evaluation[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(9):90-94.

作者简介:



李振柱

李振柱(1961—),男,湖北襄阳人,高级工程师,硕士,研究方向为变压器状态评估及状态检修;

谢志成(1990—),男,广东韶关人,博士研究生,研究方向为电网设备状态评估、故障诊断及检修策略制定(E-mail:zcxie@hust.edu.cn)。

(下转第 169 页 continued on page 169)

- XU Boqiang,SUN Liling,LI Heming. A detection method for rotor fault in induction motors based on high frequency resolution spectrum estimation technique and optimization algorithm [J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(3):140-147.
- [14] 张波,李健君. 基于 Hankel 矩阵与奇异值分解(SVD)的滤波方法以及在飞机颤振试验数据预处理中的应用[J]. 振动与冲击,2009,28(2):162-166.
- ZHANG Bo,LI Jianjun. Denoising method based on Hankel matrix and SVD and its application in flight flutter testing data preprocessing[J]. Journal of Vibration and Shock,2009,28(2):162-166.
- [15] 赵学智,叶邦彦,陈统坚. 基于小波-奇异值分解差分谱的弱故障特征提取方法[J]. 机械工程学报,2012,48(7):37-48.
- ZHAO Xuezhi,YE Bangyan,CHEN Tongjian. Extraction method of faint fault feature based on wavelet-SVD difference spectrum [J]. Journal of Mechanical Engineering,2012,48(7):37-48.
- [16] 赵学智,叶邦彦. 分量形成方式对奇异值分解信号处理效果的影响[J]. 上海交通大学学报,2011,45(3):368-374.
- ZHAO Xuezhi,YE Bangyan. The influence of formation manner of component on signal processing effect of singular value decomposition[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University,2011,45(3):368-374.
- [17] 何子述,夏威. 现代数字信号处理及其应用[M]. 北京:清华大学出版社,2009:5.

作者简介:



许伯强

许伯强(1972—),男,河北保定人,教授,博士,主要从事大型电机的状态监测与故障诊断方面的研究(E-mail:xbq_ncepu@126.com);

李金卜(1990—),男,河北石家庄人,硕士研究生,主要从事异步电机故障诊断方面的研究(E-mail:zdsjlb@163.com)。

Rotor fault detection based on SVD filtering and APES algorithm for asynchronous motor

XU Boqiang,LI Jinbo

(School of Electrical & Electronic Engineering,North China Electric Power University,Boding 071003,China)

Abstract: The principles of SVD(Singular Value Decomposition) filtering and APES(Amplitude and Phase EStimation) algorithm are introduced and a method combining SVD filtering and APES algorithm is proposed for detecting the rotor fault of asynchronous motor. Its feasibility is verified by the simulative results. The experimental results of broken bar fault detection show that,immune to the noise,the proposed method can quite precisely identify the fault component frequency of stator current and accurately calculate its amplitude and initial phase angle according to the signals of short time period.

Key words: asynchronous motors; APES; rotor fault; SVD filtering

(上接第 142 页 continued from page 142)

Transformer health condition assessment considering insulation remaining life

LI Zhenzhu¹,XIE Zhicheng²,XIONG Weihong¹,ZHANG Hongzhi²,LI Zhengtian²,

LIN Xiangning²,TU Changgeng¹

(1. Central China Electric Power Company,Wuhan 430077,China;2. State Key Laboratory of Advanced

Electromagnetic Engineering and Technology,Huazhong University of Science and Technology,Wuhan 430074,China)

Abstract: A method of health condition assessment considering its insulation remaining life is proposed for oil-immersed power transformers,which extends the existing health index theory and the insulation life calculation method to establish the mapping relationship between the result of transformer operating condition assessment and its remaining life. The hot-spot temperature of transformer is calculated according to its load records and environmental temperature data,based on which,its insulation remaining life is calculated. The concept of classification evaluation is applied to evaluate the operating conditions of transformer in different classes,which considers different influencing factors to form the health index correction factors for different classes and calculates the remaining life and health index score to reflect the comprehensive operating condition of transformer. Sample analysis for an actual substation proves the validity and superiority of the proposed method. The method can also be applied to other oil-charged equipments(such as reactor).

Key words: electric transformers; insulation remaining life; health index theory; classification evaluation; correction factor