

基于动态修正技术的电力变压器可靠性评估模型研究

郭晓斌¹,程乐峰²,王国平²,许爱东¹,简淦杨¹,余 涛²,魏文潇¹

(1. 南方电网科学研究院, 广东 广州 510080; 2. 华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640)

摘要:选取变压器油纸绝缘系统作为评估的对象,取热点温度(HST)为核心点,结合 Weibull 分布和 Arrhenius 反应定律,建立基于 HST 的变压器老化故障模型,该模型用于描述变压器的老化过程,目的是计算绕组 HST 并求解变压器油纸绝缘系统的故障率。然后,基于电力变压器油中溶解气体分析(DGA)数据,结合灰色理论对模型进行修正,确保评估值能很好地跟踪并反映变压器的实际可靠性水平。最后,以江门供电局数据作为实例分析,验证了所建立模型的有效性,通过分析可知该模型能够很好地跟踪变压器的运行状态。

关键词: 电力变压器; 可靠性; 热点温度; Weibull 分布; Arrhenius 反应定律; 溶解气体分析; 灰色理论
中图分类号: TM 411 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.06.022

0 引言

大型油浸式电力变压器作为电力系统的枢纽设备,其运行可靠性直接关系到电力系统的安全和稳定。因此,准确评估其可靠性水平是电网安全稳定运行的重要保证。在状态评估和维修方面,文献[1]提出基于云理论和前景理论的变压器状态维修策略综合评价模型,文献[2]提出基于合作博弈和云模型的变压器状态评估方法;在变压器可靠性分析方面,研究尚处于起步阶段,方法单一,理论发展不完善,其中,文献[3-4]通过故障树分析法对电力变压器可靠性进行了分析,文献[5]基于马尔可夫过程,建立了综合的变压器可靠性评估模型。这些研究方法大多基于统计规律,缺乏对变压器的个体差异性的考虑。变压器是由多个系统构成的复杂集合体,绕组油纸绝缘系统作为变压器最核心的部分,决定了变压器的寿命,其可靠性水平直接关系着变压器能否正常运行,准确评估其可靠性水平,对于防止绝缘故障过早发生具有重要意义^[6]。目前,变压器油纸绝缘的相关研究主要集中在老化特征参量时效老化规律方面,对其可靠性评估方法的研究比较少,文献[7]在对相关特征参量进行深入分析的基础上,选取聚合度、糠醛体积分数等作为反映变压器油纸绝缘可靠性的特征参量,建立了混合威布尔(Weibull)模型,但是模型本身停留在实验室层面,考虑到现阶段供电企业不具备测试聚合度的条件,且很少对糠醛含量进行测试,特征参量获取比较困难。此外预防

性试验规程规定糠醛的测试周期为 6 a,期间变压器滤油、检修等操作对糠醛含量影响很大,影响了模型的准确性,这造成了模型推广的难度。相对而言,溶解气体分析 DGA(Dissolved Gas Analysis)蕴含数据量大且数据容易获得,是研究变压器内部特性的首推特征量,DGA 数据既可以离线获取也可以通过在线监测的手段获取,具有独特的优势。文献[8]针对油纸绝缘系统建立了热老化模型,但其输入维度单一,模型建立后不能根据变压器健康状态进行动态修正,模型尚未成熟。基于此,本文选取变压器油纸绝缘系统作为评估对象,取热点温度 HST(Hot Spot Temperature)为核心点,结合 Weibull 分布和 Arrhenius 反应定律,建立了基于 HST 的变压器老化故障模型,并利用油中溶解气体分析数据,结合灰色理论对模型进行修正,确保评估值能反映变压器的实际可靠性水平。

1 基于 HST 的变压器老化故障模型

影响变压器油纸绝缘性能,造成绝缘老化的因素有多种,但变压器内部温度,特别是绕组 HST 对油纸绝缘系统的影响是最核心的^[9]。鉴于目前变压器热点位置很难确定,且大部分已经服役的变压器并未预先安装温度传感器,后期植入传感器的实现难度较大^[10-11],近年来,国际上推荐采用建立热模型对变压器热特性进行评估和研究。IEEE Std C57.91—2011 和 IEC Std 60076-7 推荐了变压器绕组 HST 计算经验模型,前者对计算变压器顶层油温和绕组 HST 的经验公式进行了定义,即 HST 由环境温度、顶层油温或底层油温以及绕组热点对油温的温度梯度计算得到;后者假设绕组温升分布曲线(本文中为直线)与油温温升分布曲线为 2 条平行直线,即二者斜率相等,如图 1 所示。本文采用 IEEE 规程^[9]所给的 HST 计算方法计算绕组 HST。

收稿日期:2016-03-10;修回日期:2016-05-07

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2013CB-228205);国家自然科学基金资助项目(51177051,51477055);中国南方电网公司重点科技项目(KY2014-2-0018)

Project supported by the National Key Basic Research Program of China(973 Program)(2013CB228205),the National Natural Science Foundation of China(51177051,51477055) and the Science and Technology Projects of China Southern Power Grid(KY2014-2-0018)

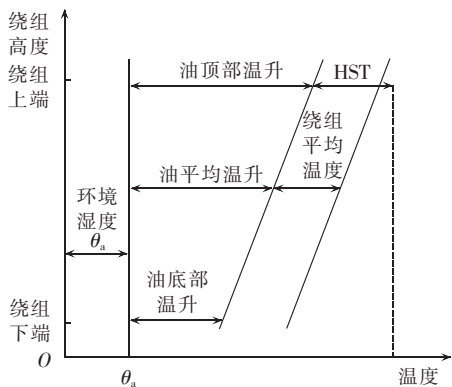


图1 油浸式变压器内部温度特性曲线

Fig.1 Internal temperature characteristic curve of oil-immersed transformer

1.1 Weibull 分布

Weibull 分布是可靠性工程中非常重要的一种分布形式,其分布适用性非常好,可以模拟多种失效率变化形式。运用 Weibull 故障分布可以对递减和递增故障率进行建模,Weibull 分布的故障率函数定义为:

$$\lambda(t) = \frac{\beta t^{\beta-1}}{\eta^\beta} \quad (1)$$

其中, η 为尺度参数, $\eta > 0$; β 为形状参数, $\beta > 0$; t 为时间,单位为 a。 η 和 β 的值可通过最大似然估计法得到^[7,12]。根据形状参数 β 的不同,Weibull 分布可简化为指数分布或瑞利分布,这使得其具有很强的兼容性,通过参数的变化可以很好地表示不同分布特点的函数分布,因此该故障率表达式可以很好地对退化设备损耗时期的设备故障率进行描述。

1.2 计算绕组 HST

变压器绝缘老化故障率与绕组 HST 存在非常紧密的联系,而 HST 主要取决于环境温度以及变压器所带的负荷,最热点常常位于电力变压器的高压绕组或低压绕组的顶部或中部。IEEE 规程^[9]推荐的 HST 计算流程如图 2 所示。

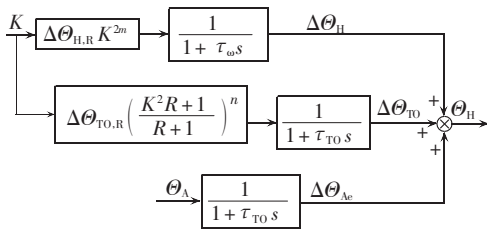


图2 绕组热点温度计算流程图

Fig.2 Flowchart of winding HST calculation

图 2 中, K 为变压器实际负荷与额定负荷的比值; R 为额定负荷状态下的负荷损耗与空载损耗的比值; m 和 n 为经验常数,其值与变压器的冷却方式有关; s 为复频率; τ_ω 为在温度点位置的时间常数,单位为 h; τ_{TO} 为变压器油的时间常数,单位为 h; θ_a 为

瞬时环境温度, $\Delta\theta_{TO,R}$ 为额定负荷下的顶层油温升, $\Delta\theta_{H,R}$ 为额定负荷下 HST 相对于顶层油温的温升, $\Delta\theta_H$ 、 $\Delta\theta_{TO}$ 和 $\Delta\theta_{Ae}$ 分别为绕组 HST 相对于变压器顶部油温的增量、顶层油温相对于环境温度的温升及滞后的环境温度,单位都为 $^{\circ}\text{C}$ 。

根据图 2 得到绕组 HST 的计算式为:

$$\theta_H = \Delta\theta_H + \Delta\theta_{TO} + \Delta\theta_{Ae} \quad (2)$$

1.3 变压器故障率 λ 计算

油浸式电力变压器绕组绝缘系统的老化过程是一个单向不可逆的过程,随着时间的推移,绝缘材料的机械性能、介电强度和电阻性能都会下降,如果变压器由于绝缘老化而失效,那么变压器的寿命也将终止。诺贝尔化学奖的获得者 Arrhenius 指出了绝缘材料在使用过程中,温度与绝缘材料化学反应速率的内在关系,并推导出著名的 Arrhenius 方程:

$$L = C \exp\left(\frac{B}{T+273}\right) \quad (3)$$

其中, L 为绝缘材料的预期寿命;系数 B 、 C 与绝缘材料的种类、激活能量有关,可通过耐热试验测得; T 为材料温度,即变压器持续运行时的绕组 HST。

当 Weibull 分布应用于描述老化进程时,故障率由式(4)表示:

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (4)$$

令 $\eta = L$, 则 Arrhenius-Weibull 模型的故障率函数为 $\lambda_a(t|\theta_H)$, 将式(3)代入式(1), 得到故障率函数如式(5)所示:

$$\lambda_a(t|\theta_H) = \frac{\beta}{C \exp\left(\frac{B}{\theta_H+273}\right)} \left[\frac{t}{C \exp\left(\frac{B}{\theta_H+273}\right)} \right]^{\beta-1} \quad (5)$$

其中,参数 β 、 B 、 C 的求取通常采用最大似然估计法。本文充分参考国内外相关文献^[13-19], 采用了借助高斯分布来估计参数的新方法,具体包括 2 个步骤:首先,借助高斯分布中 σ 、 μ 的值对 Weibull 分布的参数 η 、 β 进行估算;然后,对于 Arrhenius-Weibull 模型,令 β 保持不变,用 η 的值来估算 B 和 C 的取值。

2 基于灰色理论的动态修正模型

在变压器正常老化条件下,上节建立的基础模型可以很好地反映油纸绝缘系统的故障率水平;但变压器投运之后,局部放电、高温过热等一些不可预知因素打破了正常老化的连续性,导致变压器绝缘恶化、故障率水平增高,基础模型的评估准确性大幅降低,此时就需要对模型进行修正,以保证曲线预测的准确性。

2.1 基于灰色理论的 DGA 修正模型

一般而言,变压器在正常工作状态下不产生特

征气体,但是当变压器内部存在局部过热或电弧高温等故障时,会分解产生气体并不断溶解在变压器油中。气体的产生意味着变压器内部发生故障,内部故障缩短了变压器油纸绝缘系统的预期寿命,而变压器的预期寿命与 HST 满足指数关系^[13]。因此,通过对变压器预期寿命的修正,可得到等效 HST,进而实现将局部过热或电弧过热等故障对绝缘的影响用等效 HST 进行量化。

本文选取了 DGA 数据中的氢气(H₂)、甲烷(CH₄)、乙烷(C₂H₆)、乙烯(C₂H₄)、乙炔(C₂H₂)这 5 种气体作为电力变压器油纸绝缘状态的评估指标。这些气体与内部故障的对应关系如表 1 所示。使用灰色理论中的灰关联分析方法对数据进行处理,得到灰色靶心度 $Q(0.33 \leq Q \leq 1)$,评估对象的等级由靶心度决定,同时结合变压器的实际故障分布情况将变压器健康状态分为 5 个等级^[20-22],分别为[0.9,1.0]、[0.6,0.9)、[0.5,0.6)、[0.4,0.5)和[0.33,0.4)。

表 1 不同故障类型产生的气体
Table 1 Gases generated by different fault types

故障类型	主要气体组分	次要气体组分
油过热	CH ₄ , C ₂ H ₄	H ₂ , C ₂ H ₆
油和纸过热	CH ₄ , C ₂ H ₄ , CO, CO ₂	H ₂ , C ₂ H ₆
油纸绝缘中局部放电	H ₂ , C ₂ H ₂	C ₂ H ₂ , C ₂ H ₆ , CO ₂
油中火花放电	H ₂ , C ₂ H ₂	—
油中电弧	H ₂ , C ₂ H ₂	CH ₄ , C ₂ H ₄ , C ₂ H ₆
油和纸中电弧	H ₂ , C ₂ H ₂ , CO, CO ₂	CH ₄ , C ₂ H ₄ , C ₂ H ₆

变压器健康状态与变压器预期寿命存在着必然联系,即变压器运行状态良好,相应的变压器油纸绝缘系统的预期寿命就会延长;变压器健康状态恶劣,相应的变压器油纸绝缘系统劣化加快,预期寿命缩短。为了建立两者之间的对应关系,本文参考相对劣化度的模型架构^[23-24],建立变压器预期寿命修正模型。

引入级差系数 $\alpha_i(i=1,2,3,4)$ 和 $\delta_i(i=1,2,3,4)$ 来调整变压器油纸绝缘系统的故障程度与变压器预期寿命的对应关系,其中, α_i 用来调整靶心度与变压器预期寿命的比例关系; δ_i 是考虑靶心度与变压器预期寿命可能不满足线性关系而引入的, δ_i 值越大,对应的寿命缩短趋势越平缓,两者的值采用专家预测的方法确定,具体对应关系如下。

第 1 级别:靶心度范围为[0.9,1.0)。对应的变压器预期寿命修正系数为:

$$L_1=\alpha_1\left(\frac{Q-0.33}{1-0.33}\right)^{\delta_1} \quad 0.9 \leq Q \leq 1.0 \quad (6)$$

第 2 级别:靶心度范围为[0.6,0.9)。对应的变压器预期寿命修正系数为:

$$L_2=\alpha_2\left(\frac{Q-0.33}{1-0.33}\right)^{\delta_2} \quad 0.6 \leq Q < 0.9 \quad (7)$$

第 3 级别:靶心度范围为[0.5,0.6)。对应的变压器预期寿命修正系数为:

$$L_3=\alpha_3\left(\frac{Q-0.33}{1-0.33}\right)^{\delta_3} \quad 0.5 \leq Q < 0.6 \quad (8)$$

第 4 级别:靶心度范围为[0.4,0.5)。对应的变压器预期寿命修正系数为:

$$L_4=\alpha_4\left(\frac{Q-0.33}{1-0.33}\right)^{\delta_4} \quad 0.4 \leq Q < 0.5 \quad (9)$$

第 5 级别:靶心度范围为[0.33,0.4)。若能修好,根据变压器维修后的恢复情况,结合寿命损失恢复因子,再计算相应的故障率。

修正后的预期寿命 Z_{eq} :

$$Z_{eq}=\alpha_i\left(\frac{Q-0.33}{1-0.33}\right)^{\delta_i} Z \quad (10)$$

其中, Z 为由基础模型求得的原始预期寿命。

则修正后的寿命损失量 Z' :

$$Z'=\left[1-\alpha_i\left(\frac{Q-0.33}{1-0.33}\right)^{\delta_i}\right] Z \quad (11)$$

其中, α_i, δ_i 为经验值,需要根据实际变压器历史运行、检修数据进行确定。为了便于说明,本文假定变压器绕组绝缘系统的寿命损失量与变压器的状态量成严格正比例关系,取 $\alpha_i=\delta_i=1(i=1,2,3,4)$,则变压器各状态等级对应的寿命损失范围如表 2 所示。

表 2 变压器绕组绝缘系统的状态等级与预期寿命的关系

Table 2 Relation between status grade and expected life of transformer winding insulation system

靶心度范围	状态等级	预期寿命修正系数
[0.9,1.0]	健康	[0.85,1.00]
[0.6,0.9)	正常	[0.40,0.85)
[0.5,0.6)	轻度故障	[0.25,0.40)
[0.4,0.5)	中度故障	[0.10,0.25)
[0.33,0.4)	严重故障	[0,0.10)

可见,HST 是基础评估模型和修正模型的连系纽带,灰色修正模型通过对变压器状态数据的处理,建立状态数据值和 HST 的对应关系,进而求得等效 HST,实现了对基础模型的动态修正。

2.2 考虑检修后的模型修正方法

变压器在投运之后,根据变压器的运行情况会进行相应的检修(本文仅考虑变压器油纸绝缘系统的检修)。检修是变压器状态连续性的中断,经过检修后,变压器的预期寿命延长,对应的等效 HST 降低。结合役龄回退因子的概念^[25-26],本文引入预期寿命损失恢复因子 χ ,变压器在经历大修或滤油等涉及绕组绝缘系统的维修后,预期寿命 Z'' 可表示为:

$$Z''=Z'+\chi Z'_{eq} \quad (12)$$

其中, Z'' 为变压器新预期寿命; Z' 为维修前一次修正后的预期寿命; Z'_{eq} 为维修前一次修正后的寿命损失

量。由预期寿命和 HST 的对应关系,可得到该预期寿命下对应的等效 HST,即 H_{eq} ,从而实现对原始模型的修正。

修正后的故障率曲线是一条动态曲线,从几何意义来说,修正后的曲线由一条静态的指数曲线变成了一条动态阶梯状曲线。

3 实例分析

为验证本文所提的可靠性模型的有效性,以广东电网公司江门供电局某变电站 110kV 2 号主变压器为例进行计算分析,表 3 为变压器的设计参数。

表 3 待评估变压器的设计参数
Table 3 Design parameters of transformer to be evaluated

参数	取值	参数	取值
变压器型号	SFZ8-40000/110	负载损耗	178.1kW
额定电压	110kV	冷却方式	ONAN
额定容量	40MV·A	投运时间	2002 年
线圈/顶层油温升	65K/55K	$\Delta\theta_{TO,R}$	36.0℃
空载损耗	33.8kW	$\Delta\theta_{H,R}$	28.6℃

表 4 为变压器可靠性评估模型的相应参数,其中 χ_i 为滤油时变压器的预期寿命损失恢复因子, χ_j 为大修时变压器的预期寿命损失恢复因子,两者均为经验参数; $\tau_{TO,R}$ 为额定负荷下变压器油的时间常数。

表 4 相关系数取值表
Table 4 Value of correlation coefficients

参量	数值	参量	数值
B	1500	χ_i	0.8
C	0.56	m	0.8
$\tau_{TO,R}$	3.5h	n	0.8
χ_j	0.5	R	5.3

从江门气象局取得该地区历年的温度数据,统计区间为 1957—2013 年,其中,历年 1 月份平均气温如图 3 所示。

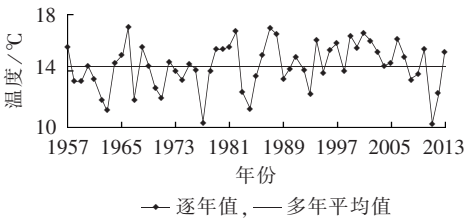


图 3 江门市历年 1 月份平均气温变化曲线
Fig.3 January average temperature curve of Jiangmen from 1957 to 2013

本文求取历年温度的平均值作为温度的基准值,即取 57 组温度数据的平均值,以月平均气温为基准,得到全年 12 个月的每月平均气温,其中 1 月份的平均气温为 13.9℃,同理可求得其他月份的气温平均值,如表 5 所示。

表 5 江门市月平均气温
Table 5 Monthly average temperatures of Jiangmen

月份	温度/℃	月份	温度/℃
1	13.9	7	28.6
2	15.4	8	29.2
3	18.1	9	28.3
4	23.2	10	25.5
5	25.8	11	21.4
6	27.6	12	17.9

为了更好地反映变压器所带负荷的大小,需要考虑以下两方面:

- (1)短期内负荷是按日循环的,即日循环曲线;
- (2)长期内变压器负荷是按年循环的,一年内随季节的不同,用电负荷会展现一定规律,为了全面把握负荷变动,同时考虑计算量和可行性。

基于上述 2 点,制定以下等效方案。

- (1)取每月 1 日、11 日、21 日的负荷,全年取 36d。
- (2)以 h 为单位对负荷曲线进行量化。工程实践中,变压器负荷常用电流进行度量,本文延续这个做法,使用实际电流值与额定电流值的比值作为负荷率标么值,选取 2013 年 1 月 1 日的 HST 计算方法进行说明,其变化率曲线如图 4 所示。

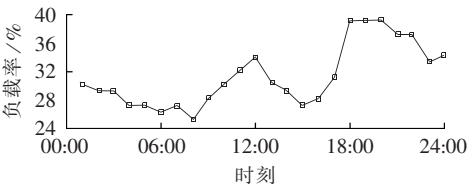


图 4 主变负荷率曲线
Fig.4 Load rate curve of main transformer

首先,求取变压器的 HST,采用 IEEE 规程推荐的 HST 计算模型可以求得各个小时段的热点温升,如图 5 所示。

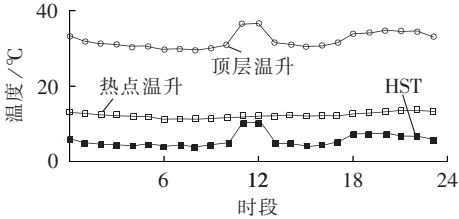


图 5 温升曲线
Fig.5 Temperature rise curve

基于主负荷率曲线,可求得全天的平均 HST θ_{HD} ,即 $\theta_{HD} = \sum_{i=1}^{24} \theta_{Hi} / 24 = 30.24(℃)$ 。

同理,可以得到其他抽样日期的 HST,对抽样的 36 d 温度取平均值可得到年 HST 平均值 θ_{HY} ,即 $\theta_{HY} = \sum_{j=1}^{36} \theta_j / 36 = 43.42(℃)$ 。

文献[13]对 154 台电力变压器的寿命分布情况进行了统计分析,借助高斯分布确定了 Arrhenius 方程的经验值,借助 MATLAB 仿真得到 HST 与预期寿命对应曲线图,如图 6 所示。参照该对应关系,变压器在 43.42 ℃ 的 HST 下预期寿命可达 64.12 a,将得到的温度与相应的参数代入故障率公式可得:

$$\lambda_a(t \mid 43.42) = \frac{5}{0.56 \times e^{\frac{1500}{(43.42+273)}}} \times \left(\frac{t}{0.56 \times e^{\frac{1500}{(43.42+273)}}} \right)^{5-1} \approx 4.6141 \times 10^{-9} t^4$$

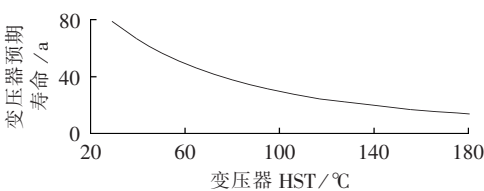


图 6 变压器特征寿命与 HST 对应关系曲线
Fig.6 Curve of expected life vs. HST of transformer

使用 MATLAB 对故障率公式进行仿真,可得变压器故障率随投运时间变化的关系曲线见图 7。

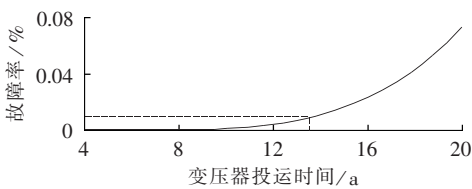


图 7 变压器故障率曲线
Fig.7 Failure rate curve of transformer

可见,投运 12 a 后,该变压器的故障率仅 0.01%,是相当低的,这主要是由于变压器所带负荷控制在 40% 左右,变压器运行状态良好。但是变压器在实际过程中难免会出现短时过负荷、涌流等极端情况,同时,变压器在设计方面可能存在的缺陷也会对变压器的故障率产生比较大的影响。因此,必须结合变压器的实际情况对故障率曲线进行修正。由江门供电局检修所得到该变电站 2 号主变 DGA 测试数据值如表 6 所示。

由表 6 数据可得,DGA 数据连续,该变电站 2 号主变从投运到目前为止没有进行过有关绕组绝缘系统的解体检修或滤油等维修。由于数据的积累性,需考虑最后一次 DGA 数据来修正可靠性模型,现对 2014 年的识别序列 $\omega' = (0, 18.82, 3.08, 3.53, 0)$ 进行灰色相关性分析,得到靶心度为 0.9508。对应第 1 级别[0.9,1.0],可得修正后的寿命值,计算结果为: $Z' = \alpha_1 \times \left(\frac{0.9508 - 0.33}{1 - 0.33} \right)^{\delta_1} \times 64.12 = 59.46(a)$ 。

利用 HST 与预期寿命对应关系图,可得到变压器的等效 HST, $H_{eq} = 48.53 \text{ }^{\circ}\text{C}$,得到变压器修正后的

表 6 2002 到 2014 年 DGA 测试数据
Table 6 Data of DGA test from 2002 to 2014

年份	气体含量/($\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$)				
	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂
2002	3.00	1.20	1.00	0	0
2003	6.00	3.20	0	2.10	0
2004	7.00	5.49	0.85	3.03	0
2005	4.00	6.22	0.99	3.10	0
2006	4.00	8.53	1.24	3.49	0
2007	4.00	10.25	1.63	4.16	0
2008	3.00	11.70	1.80	4.14	0
2009	3.00	11.66	1.79	4.14	0
2010	2.00	14.86	2.09	3.81	0
2011	3.00	13.02	1.84	3.14	0
2012	3.00	13.80	2.06	3.20	0
2013	0	19.72	3.06	3.65	0
2014	0	18.82	3.08	3.53	0

故障率曲线,如图 8 所示。

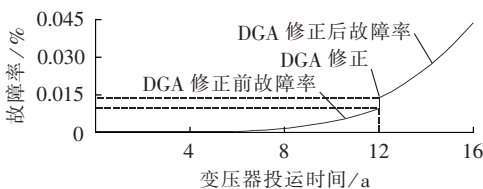


图 8 DGA 修正后的变压器故障率曲线图
Fig.8 Failure rate curve of transformer after DGA correction

由于变压器 DGA 数据良好,所以修正后的故障率也只有 0.014%。通过分析变压器各种预试数据并向运维人员核实,得到的情况为变压器运行状态良好,各项检测数据正常,从而验证了本文所提方法的正确性。

假设变压器从投运到现在已经有过 1 次检修,对应的 DGA 测试数据如表 7 所示。

表 7 变压器 DGA 数据参考值
Table 7 References of transformer DGA data

投运时间/a	检修	特征气体含量/($\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$)				
		H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂
5	检修前	25.80	15.50	6.38	20.54	0
6	检修	66.00	8.27	8.21	9.21	8.21
7	检修后	0	0.81	0	0.12	0

首先,对检修前变压器的预期寿命损耗进行计算,由 DGA 试验数据可得靶心度为 0.5705,对应第 3 级别,对应的预期寿命计算结果为: $Z_{eq} = \left(\frac{0.5705 - 0.33}{1 - 0.33} \right) \times 64.12 = 23.016(a)$ 。

此时变压器的预期寿命降低至 23.016 a,由 HST 和预期寿命对应曲线可得到变压器等效 HST 为 130.66 ℃,故障率曲线如图 9 所示。

可见,如果不考虑检修的影响,运行到第 6 年故障率已经达到 0.1%,内部绝缘情况已经开始劣化,故障率上升较快。

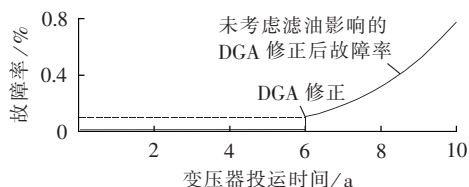


图 9 没有考虑滤油影响的变压器故障率曲线

Fig.9 Failure rate curve of transformer without influence of oil separation

经过检修之后,变压器内部绝缘故障得到及时处理,系统运行条件改善,预期寿命损失量减少,得到实际的寿命修正值 Z'' ,计算结果为: $Z''=Z_{eq}+\lambda_i Z'_{eq}=23.016+0.5\times 41.10=43.57$ (a)。

由 HST 和预期寿命对应曲线可得到变压器等效 HST 为 71.50°C ,得到变压器在滤油之后的故障率曲线如图 10 所示。

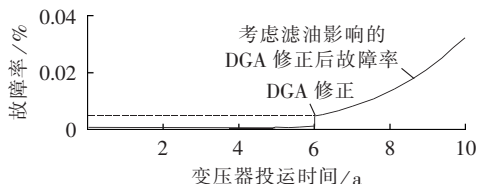


图 10 考虑滤油影响后的变压器故障率曲线

Fig.10 Failure rate curve of transformer with influence of oil separation

考虑滤油影响后,变压器运行到第 6 年的故障率为 0.005%,远低于修正前的 0.1%,同样的方法可得到变压器在实施涉及油纸绝缘系统的检修后的故障率修正值。

将变压器基础故障率曲线和加入动态修正后的曲线作对比分析,如图 11 和图 12 所示。

未加入修正的变压器故障率曲线是一条近似指数分布的静态曲线,在一定程度上能反映变压器的故

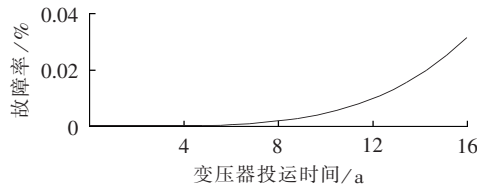


图 11 变压器原始故障率曲线

Fig.11 Original failure rate curve of transformer

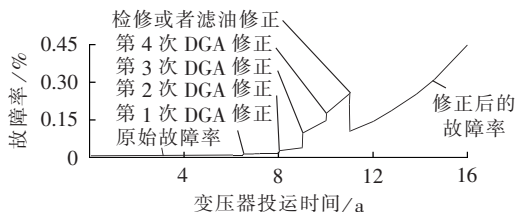


图 12 变压器实际的故障率曲线

Fig.12 Actual failure rate curve of transformer

障率随投运时间的变化关系;加入修正后的故障率曲线是一条类似阶梯状的分段曲线,变压器的故障率会随着变压器所经历的运行情况做出更新,是一条动态的可靠性评估曲线。

4 结论

本文首次将动态修正的概念引入变压器可靠性评估中,为变压器可靠性评估提供了新途径,经过大量的实验分析,该方法具有较强的有效性,从本文的研究结果可以得到以下结论:

a. 模型的建立没有采用传统可靠性模型对面不对点的评估模式,使评估结果能够很好地兼顾变压器的个体差异性,结果更可靠;

b. 模型采用基础模型加动态修正模型的结构,动态修正的加入使得整个可靠性评估模型能够根据评估对象的运行状态做出调整,可信度更高;

c. 选择 DGA 数据作为动态修正的信息来源,并基于灰色理论进行处理,能较准确地诊断出变压器内部故障,确保评估值能很好地跟踪并反映变压器实际运行状态。

参考文献:

- [1] 李如琦,唐林权,凌武能,等. 基于云理论和前景理论的变压器状态维修风险决策[J]. 电力自动化设备,2013,33(2):104-108.
LI Ruqi,TANG Linqun,LING Wuneng,et al. Risk decision-making based on cloud theory and prospect theory for conditional maintenance of power transformer[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(2):104-108.
- [2] 徐岩,陈昕. 基于合作博弈和云模型的变压器状态评估方法[J]. 电力自动化设备,2015,35(3):88-93.
XU Yan,CHEN Xin. Transformer status assessment based on cooperative game and cloud model[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(3):88-93.
- [3] 杨洋,谢开贵,孙鑫. 基于 FTA 法的宁夏电网运行元件故障率分析[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(18):134-137,141.
YANG Yang,XIE Kaigui,SUN Xin. Operating component failure rate analysis based on FTA for power system[J]. Power System Protection and Control,2009,37(18):134-137,141.
- [4] 高明,李文云,袁德君,等. 使用故障树理论对电网调度自动化系统应急预案完备度的量化分析[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(17):58-63,69.
GAO Ming,LI Wenyun,YUAN Dejun,et al. Completeness degree quantitative analysis of dispatching automation system emergency preplan based on FTA[J]. Power System Protection and Control,2010,38(17):58-63,69.
- [5] 廖瑞金,肖中男,巩晶,等. 应用马尔科夫模型评估电力变压器可靠性[J]. 高电压技术,2010,36(2):322-328.
LIAO Ruijin,XIAO Zhongnan,GONG Jing,et al. Markov model for reliability assessment of power transformers[J]. High Voltage Engineering,2010,36(2):322-328.
- [6] 郑君亮,江修波,蔡金铨. 变压器油纸绝缘等效电路参数辨识及

- 绝缘状态对参数的影响分析[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(8): 168-172.
- ZHENG Junliang, JIANG Xiubo, CAI Jinding. Parameter identification for equivalent circuit of transformer oil-paper insulation and effect of insulation condition on parameters[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(8): 168-172.
- [7] 王有元, 袁园, 李剑, 等. 变压器油纸绝缘可靠性的威布尔混合评估模型[J]. 高电压技术, 2010, 36(4): 842-848.
- WANG Youyuan, YUAN Yuan, LI Jian, et al. Weibull mixed evaluation model for reliability of oil-paper insulation in transformer[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(4): 842-848.
- [8] MCNUTT W J. Insulation thermal life considerations for transformer loading guides[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1992, 7(1): 392-401.
- [9] IEEE Working Group for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers. IEEE guide for loading mineral-oil-immersed transformers and step-voltage regulators; IEEE C57.91-2011 [EB/OL]. [2015-12-10]. <http://standards.ieee.org/findstds/standard/C57.91-2011.html>.
- [10] 毛一之, 王秀春, 韩鹏. 应用绕组测量装置测量变压器绕组温度的必要性和可行性分析[J]. 变压器, 2004, 41(9): 13-17.
- MAO Yizhi, WANG Xiuchun, HAN Peng. Analysis of feasibility and necessity to measure transformer winding temperature by winding thermometric device[J]. Transformer, 2004, 41(9): 13-17.
- [11] 江海莎. 基于底层油温的油浸式变压器热点评估方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009.
- JIANG Taosha. Study on estimating method of hottest spot temperature in oil-immersed transformers[D]. Chongqing: Chongqing University, 2009.
- [12] 孙鹏, 陈绍辉, 张彩庆. 基于 Marquardt 法参数估计的变电设备寿命周期故障率评估[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(1): 85-90.
- SUN Peng, CHEN Shaohui, ZHANG Caiqing. Assessment of failure rate for substation equipment life cycle based on Marquardt parameter estimation method[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(1): 85-90.
- [13] AWADALLAH S K E, MILANOVIC J V, JARMAN P N. The influence of modeling transformer age related failures on system reliability[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2015, 30(2): 970-979.
- [14] LI W. Evaluating mean life of power system equipment with limited end-of-life failure data[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(1): 236-242.
- [15] CHIODO E, MAZZANTI G. Bayesian reliability estimation based on a Weibull stress-strength model for aged power system components subjected to voltage surges[J]. IEEE Trans on Dielectrics and Electrical Insulation, 2006, 13(4): 935-937.
- [16] FU W, MCCALLEY J D, VITTAL V. Risk assessment for transformer loading[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2001, 16(3): 346-353.
- [17] 赵文清. 基于选择性贝叶斯分类器的变压器故障诊断[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(2): 44-47.
- ZHAO Wenqing. Transformer fault diagnosis based on selective Bayes classifier[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(2): 44-47.
- [18] 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, 133.
- 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, 133.
- [19] 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, 165.
- 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, 165.
- [20] 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 Jiyin, 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.
- [21] 李建坡. 基于油中溶解气体分析的电力变压器故障诊断技术的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2008.
- LI Jianpo. Study on power transformer fault diagnosis technology based on dissolved gases analysis[D]. Changchun: Jilin University, 2008.
- [22] 李俭, 孙才新, 陈伟根, 等. 基于灰色聚类分析的充油电力变压器绝缘故障诊断的研究[J]. 电工技术学报, 2002, 17(4): 80-84.
- LI Jian, SUN Caixin, CHEN Weigen, et al. Study on fault diagnosis of insulation of oil-immersed transformer based on grey cluster theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2002, 17(4): 80-84.
- [23] 王谦. 基于模糊理论的电力变压器运行状态综合评估方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2005.
- WANG Qian. Study of the comprehensive assessment method for the power transformer condition in service with fuzzy theory[D]. Chongqing: Chongqing University, 2005.
- [24] 张德仪, 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): 13-19.
- 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): 13-19.
- [25] 韩帮军, 范秀敏, 马登哲. 有限时间区间预防性维修策略的优化[J]. 上海交通大学学报, 2003, 37(5): 679-682.
- HAN Bangjun, FAN Xiumin, MA Dengzhe. Optimal policy research of preventive maintenance in finite time horizon[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2003, 37(5): 679-682.
- [26] 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.

作者简介:



郭晓斌

郭晓斌(1975—),男,广东紫金人,高级工程师,硕士,从事智能配电网、新能源和微电网研发与管理工作(E-mail:guoxb@csg.cn);

程乐峰(1990—),男,湖北黄冈人,硕士,主要研究方向为配网自动化、智能电网技术、电力系统运行与控制等(E-mail:lefengg@126.com);

王国平(1988—),男,河南商丘人,硕士研究生,主要研究方向为配网自动化、电力系统运行与可靠性

评估(E-mail:w.gp@mail.scut.edu.cn);

许爱东(1977—),男,江苏东台人,教授级高级工程师,硕士,从事智能配电网和微电网研究与管理工(E-mail:xuad@csg.cn);

简淦杨(1989—),男,广东增城人,工程师,硕士,从事智能配电网和微电网研究工作(E-mail:jiangy@csg.cn);

余涛(1974—),男,云南昆明人,教授,博士,主要研究方向为复杂电力系统的非线性控制理论和仿真、智能控制等(E-mail:taoyu1@scut.edu.cn);

魏文潇(1990—),女,黑龙江鸡东人,工程师,硕士,从事智能配电网和微电网研究工作(E-mail:weiwx@csg.cn)。

Research of power transformer reliability evaluation model
based on dynamic correction technique

GUO Xiaobin¹,CHENG Lefeng²,WANG Guoping²,XU Aidong¹,
JIAN Ganyang¹,YU Tao²,WEI Wenxiao¹

- (1. China Southern Power Grid Electric Power Research Institute,Guangzhou 510080,China;
- 2. College of Electric Power,South China University of Technology,Guangzhou 510640,China)

Abstract: With the oil-paper insulation system of transformer as the evaluation target and the HST(Hot Spot Temperature) as the core point,a HST-based transformer aging fault model is built according to the Weibull distribution and Arrhenius reaction law,which is used to describe the transformer aging process and calculate the winding HST for obtaining the failure rate of transformer oil-paper insulation system. Based on the data of DGA(Dissolved Gas Analysis) in power transformer oil,the built model is corrected according to the grey theory to ensure the evaluation better tracking the actual reliability level of transformer. As an example,the actual data of Jiangmen power-supply bureau are analyzed to verify the validity of the built model and the results show the built model can well track the operational status of transformer.

Key words: power transformers; reliability; hot spot temperature; Weibull distribution; Arrhenius reaction law; dissolved gas analysis; grey theory