

油浸式电力变压器绝缘寿命在线评估技术研究

针对 ANSI/IEEE C57.91 和 IEC 354.9 导则中推荐的绕组热点温度预测方法存在物理上难以解释和预测的绕组热点温度低于实测值的问题,研究了基于热平衡及热吸收原理的温升计算方法,建立了基于底层油温的热点温度预测模型。利用在绕组电磁线安装光纤光栅传感器的 ONAN, 10 ± 5% / 0.4 kV 的配电变压器进行热点温度试验。试验结果表明,该方法在线预测变压器热点温度有效可行。最后在绕组热点温度计算的基础上,建立了绝缘寿命损失模型,实现变压器绝缘寿命在线预测,为油浸式变压器运维决策提供参考。

黄荣辉 黄炜昭 吕后深 / 深圳供电局有限公司

文正其 / 国网电力科学研究院



黄荣辉 / 高级工程师

关键词/Keywords

油浸式变压器 ·
底层油温 ·
热点温度 ·
绝缘寿命 ·

电力变压器是电网中的重要设备。实践证明,绕组热点温度与变压器的绝缘寿命有直接的关系,通过在线预测绕组热点温度及评估变压器绝缘寿命,将对变压器负荷调节、检修等运维决策提供有效支撑,从而提升变压器及电力系统运行可靠性。电力变压器负载导则^[1,2]建立了变压器绕组热点温度计算的模型,该模型假设绕组温度沿绕组高度线性增加,并与同样线性增加的油温平行,给出了变压器顶层油温和绕组热点温度的计算公式,该方法简单、适合预测稳态情况下的热点温度,而对于负载率 $K > 1$ 的情况预测效果并不理想^[3];另外,Swift 首先提出通过传热理论、热电类比方法建立变压器顶层油温和绕组热点计算模型,并定义了集总热容和非线性热阻的概念,建立了计算变压器顶层油温和绕组热点温度的微分方程^[4],但是该方法没有考虑油粘度、损耗随温度变化的影响。Susa、Lehtonen 等学者在 Swift 模型的基础上,考

虑了油粘度、损耗随温度的变化,提出了基于顶层油温、底层油温的变压器绕组热点温度计算模型^[5],模型结果与实测值相比取得了较好的效果。

本文在文献^[6]和上述研究的基础上,依据热平衡方程及热吸收理论,建立了基于底层油温的热点温度预测模型,并利用在绕组电磁线安装光纤光栅传感器在线测温的 ONAN, 10 (1 ± 5%) kV / 0.4 kV 的配电变压器进行温升试验验证。试验结果表明,该方法预测热点温度效果良好。最后在绕组热点温度预测的基础上,建立了绝缘寿命损失模型,实现变压器绝缘寿命在线评估。

热点温度模型

在导则 IEC 60076—7 和 IEEE Std C57.91 中,热点温度构成如式(1)所示,由环境温度 T_A 、顶层油温对环境温度的温升 ΔT_{TO} 及热点温度对顶层油温的温升 $\Delta T_{HS/TO}$ ^[3] 部分组成,并且相关公式的推导过程是基于经验的,即

$$T_{HS} = T_A + \Delta T_{TO} + \Delta T_{HS/TO} \quad (1)$$

文献^[6]中指出,在变压器过载运行时冷却油道油温与顶层温升存在一定的时间差,导致导则中预测的绕组热点温度低于实际值。针对以上不足,本文研究的模型基于热平衡方程和热吸收原理,并将热点温度模型分为底层油温等四个部分,可得

$$\begin{cases} Q_{GEN} = Q_{ABS} + Q_{LOST} \\ Q_{ABS} = MC_p \Delta T \end{cases} \quad (2)$$

式中, Q_{GEN} 为热源产生的热量; Q_{ABS} 为热源自吸收的热量; Q_{LOST} 为冷却介质吸收的

热量; M 为热源质量; C_p 为热源比热容; ΔT 为热源温度变化量。

$$T_{HS} = T_A + \Delta T_{BO} + \Delta T_{WO} + \Delta T_{HS/WO} \quad (3)$$

式中, T_A 为环境温度; ΔT_{BO} 为底层油温对环境温度的温升; ΔT_{WO} 为绕组热点处油道油温对底层油温的温升; $\Delta T_{HS/WO}$ 为绕组热点温度对绕组热点处油道油温的温升。

变压器内部热源为运行时绕组和铁心产生的空载损耗、负载损耗和杂散损耗等。绕组和铁心内部的热量先以传导的形式传递到表面, 再通过对流散发到变压器油中, 并形成自然循环 (或在外力推动下), 加速热量从变压器油传给油箱和散热器, 最后通过对流和辐射形式散到空气中。

1. 底层油温

依据热平衡及热吸收原理, 可得 Δt 时间间隔后油平均温度的变化 ΔT_{OAVG} 为

$$\Delta T_{OAVG} = \frac{Q_{OGEN} - Q_{OLOST}}{\sum MC_p} \quad (4)$$

式中, Q_{OGEN} 为绕组传递到油中的热量 Q_{WLOST} 、铁耗 Q_{Core} 和杂散损耗 Q_{Stray} 之和; Q_{OLOST} 为通过油箱和散热器传递到空气中的热量; $\sum MC_p$ 为油箱、铁心和油的质量及其相应比热容乘积的累加和。

$$Q_{OLOST} = \left(\frac{T_{OAVG} - T_A}{T_{OAVGR} - T_A} \right)^{\frac{1}{\gamma}} P_{TR} \Delta t \quad (5)$$

式中, γ 为平均油温升指数, ONAN 取 0.8, ON-FN/ONAF 取 0.9, ODAF 取 1; P_{TR} 为额定负载下变压器的总损耗; T_A 为环境温度。

Δt 时间间隔后油平均温度为

$$T_{OAVG,new} = T_{OAVG,old} + \Delta T_{OAVG} \quad (6)$$

底层油温 T_{BO} 为

$$T_{BO} = T_{OAVG} - \Delta T_{TO/BO}/2 \quad (7)$$

式中, $\Delta T_{TO/BO}$ 为顶层油温和底层油温的温差, 计算式为

$$\Delta T_{TO/BO} = (T_{TOR} - T_{BOR}) \left(\frac{Q_{OLOST}}{P_{TR} \cdot \Delta t} \right)^z \quad (8)$$

式中, z 为顶层对底层油温升指数, ONAN/ONFN 取 0.8, ONAF/ODAF 取 1。

2. 绕组热点处油道油温

依据热平衡及热吸收原理, 可得 Δt 时间间隔后绕组平均温度的变化 ΔT_W 为

$$\Delta T_W = \frac{Q_{WGEN} - Q_{WLOST}}{M_W C_{PW}} \quad (9)$$

式中, Q_{WGEN} 为绕组损耗; Q_{WLOST} 为绕组散发的热量; M_W 为绕组质量; C_{PW} 为绕组比热容, 则 Δt 时间间隔后的绕组温度 $T_{W,new}$ 为

$$T_{W,new} = T_{W,old} + \Delta T_W \quad (10)$$

绕组热点处油道油温为

$$T_{WO} = T_{BO} + HHS \cdot \Delta T_{TDO/BO} \quad (11)$$

式中, HHS 为绕组热点位置系数, 当热点处于绕组顶部时取 1, 处于绕组底部时取 0; $\Delta T_{TDO/BO}$ 为顶端油道油温对底部油温的温升。

$$\Delta T_{TDO/BO} = (T_{TDOR} - T_{BOR}) \left[\frac{Q_{WLOST}}{(P_{WR} - P_{ER}) \Delta t} \right]^x \quad (12)$$

式中, x 为油道油温升指数, ONAN/ONFN/ONAF 取 0.5, ODAF 取 1。

3. 绕组热点温度

依据热平衡及热吸收原理, 可得 Δt 时间间隔后绕组热点温度的变化 ΔT_{HS} 为

$$\Delta T_{HS} = \frac{Q_{HSGEN} - Q_{HSLOST}}{M_W C_{PW}} \quad (13)$$

式中, Q_{HSGEN} 为绕组热点处产生的热量; Q_{HSLOST} 为绕组热点处损耗的热量。因此, Δt 时间间隔内绕组热点温度的变化为

$$T_{HS,new} = T_{HS,old} + \Delta T_{HS} \quad (14)$$

绝缘寿命损失

变压器绝缘的寿命是温度、水份含量和氧气含量等因素的时间函数, 但由于变压器中水分和氧气含量可以得到有效的控制, 将大大减少这两者对绝缘寿命的影响, 因此温度成为变压器绝缘寿命最主要的影响因素。由于温度分布不均匀, 在最高温度下运行的那部分一般将遭受最严重的劣化, 因此, 以绕组热点温度为基准的相对老化率 V 可表示为

$$V = \begin{cases} 2^{(T_{HS}-98)/6} & \text{非热改性纸} \\ e^{(\frac{15000}{383}-\frac{15000}{T_{HS}+273})} & \text{热改性纸} \end{cases} \quad (15)$$

式中, T_{HS} 为绕组热点温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

在一定时期内的寿命损失 L 和等效加速老化率 F_{EQA} 分别为

$$L = \int_{t_1}^{t_2} V dt \text{ 或 } L = \sum_{n=1}^N V_n t_n \quad (16)$$

$$F_{EQA} = \frac{L}{\sum_{n=1}^N t_n} \tag{17}$$

式中， V_n 为第 n 个时间间隔内的相对老化率； t_n 为第 n 个时间间隔的时间； N 为所考虑期间内的时间间隔的总数；寿命损失百分数 $L\%$ 计算式如式（18）所示，它是变压器寿命损失的一个重要衡量指标。

$$L\% = \frac{100F_{EQA}t}{L_n}\% \tag{18}$$

式中， F_{EQA} 为等效老化值； t 为所考虑时间内的总时长； L_n 为变压器的正常寿命，是指在参考温度下充分干燥、无氧气的条件下绝缘系统寿命的统计值，导则 IEEE standard C57. 91：1995 提出了四种不同的剩余寿命标准，如绝缘保留的聚合度为 200，则基准寿命为 17. 12 年。

结果分析

将一台型号为 S9 系列三相油浸式无载调压配电变压器进行改造，为准确获取绕组热点温度，在变压器样机绕组、撑条、铁心以及油顶等关键部位布置了 14 根光纤，共 218 支光纤光栅传感器，如图 1 所示。变压器技术参数如表 1 所示。图 2 为在当时环境温度下对变压器施加的负载，为了解不同负载率对本模型的影响，在试验时间（50 h）内，负载率采取按照阶梯型逐步增加到 1. 2 倍额定负载，再逐步降低负载率的方法。

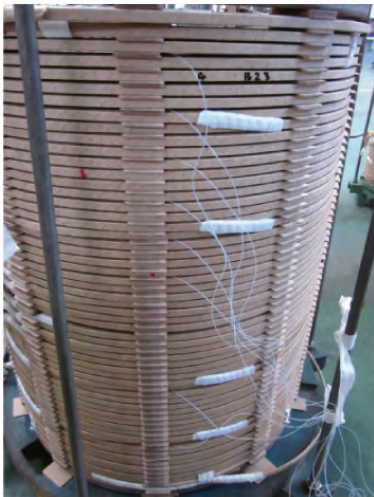


图 1 安装光纤光栅传感器的绕组

表 1 试验变压器参数

额定容量/kV · A	电压比/kV	铁耗/W	铜耗/W
30	10 ± 5% / 0. 4	130	600
冷却方式	器身重/kg	油重/kg	总重/kg
ONAN	160	85	285

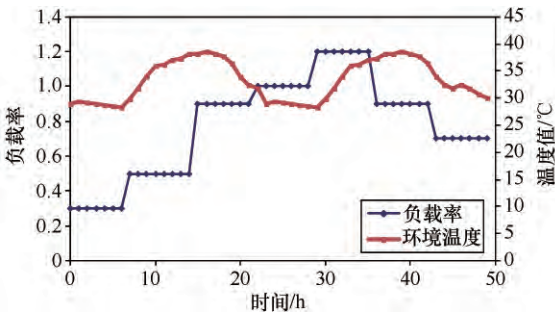


图 2 负载率和环境温度

通过试验测得的热点温度和本模型预测得到的变压器热点温度（见图 3）可以看出，本预测模型有较好的预测准确度，其缺陷是在过负载运行时，预测误差较大。从图 4 可以看出，本方法对绕组热点温度的预测效果明显好于 IEEE 导则推荐的方法。最后，在绕组热点温度预测的基础上，利用所提供的绝缘寿命损失预测模型，预测变压器在试验时间的绝缘寿命损失如图 5 所示。当变压器载荷超过额定负荷时，绝缘损失寿命急剧增加。

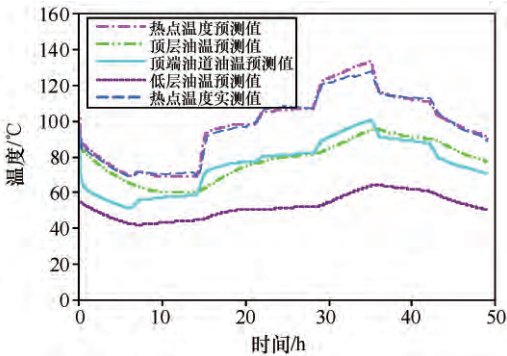


图 3 热点温度预测结果

结束语

针对目前导则推荐的绕组热点温度预测方法存在的问题，研究了基于热平衡及热吸收原理的变压器热点温度计算方法，并将热点温度分成环境温度、底层油温对环境温度的温升、绕组热点处油道油温对底层油温的温升以及绕组热点温度

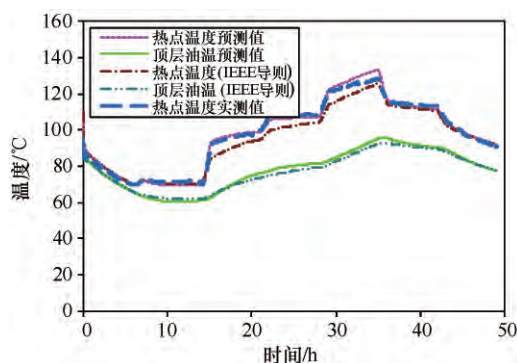


图4 与 IEEE 导则方法的比较

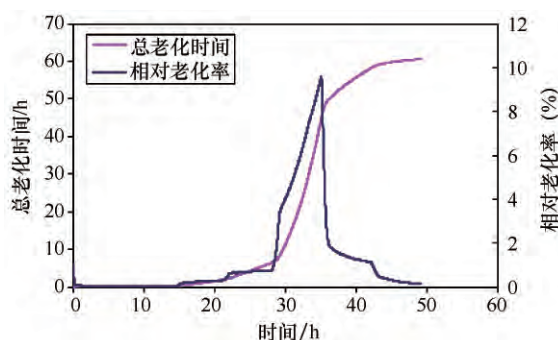


图5 变压器寿命损失

对绕组热点处油道油温的温升四部分,有效解决了油道油温和顶层油温的时间差问题,从试验验证结果中可以看出,本模型能较为有效地预测出绕组热点温度。同时在热点温度的计算基础上,研究了变压器寿命损失,实现对变压器绝缘寿命的大致预测,为变压器的运维决策提供重要的参考指标。但本方法在热点温度预测方面需要的设备相关参数较多,涉及设备设计和出厂试验参数。为满足对绝缘寿命更为准确的预测,下一步研究

应综合考虑微水含量、氧气及酸值等因素对变压器绝缘寿命的影响。

参考文献

- [1] IEC 60076 - 7 Loading Guide for Oil - Immersed Power Transformers [S]. 2005.
- [2] IEEE Std C57. 91: 1995 (R2002) IEEE Guide for Loading Mineral - Oil - Immersed Transformers [S]. 2002.
- [3] 江淘莎,李剑,陈伟根,等. 油浸式变压器绕组热点温度计算的热路模型 [J]. 高电压技术, 2009, 35 (7): 1635-1640.
- [4] Swift GIMolinski T S, Lehn W A. Fundamental approach to transformer thermal modeling - Part 1: Theory and equivalent circuit [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2001, 16 (2): 171-175.
- [5] Dejan Susa, MattiLehtonen, HasseNordman. Dynamic thermal modeling of power transformers [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20 (1): 197-204.
- [6] Linden W Pierce. Predicting liquid filled transformer loading capability [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1994, 30 (1): 170-178.
- [7] Kshira T Muthanna, AbhinandaSarkar, Kaushik Das, et al. Transformer insulation life assessment [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21 (1): 150-156.
- [8] 邓建钢,王立新,聂德鑫,等. 内置光纤光栅油浸式变压器的研制 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33 (24): 160-167.

(收稿日期: 2014-02-08) EA

(上接第 95 页)

- [4] 曹小龙,胡春梅,曹小虎,等. 变压器频率响应法测试结果的影响因素分析及改善 [J]. 高压电器, 2012, 48 (7): 81-86.
- [5] 李晨,李强,孙昭昌. 变压器绕组变形的影响因素及出口短路后分析 [J]. 变压器, 2013, 50 (8): 66-70.
- [6] 国家电网公司运维检修部. 十八项电网重大反事故措施(修订版)及编制说明 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.

- [7] 陈巧勇,任红,罗平,等. 电力变压器绕组变形的综合诊断法 [J]. 高压电器, 2011, 47 (7): 50-53.
- [8] 王丽君,刘勋. 一起电力变压器绕组变形的综合分析 [J]. 变压器, 2011, 48 (6): 68-70.
- [9] 刘海峰,刘宏亮,唐亮. 变压器绕组变形的诊断与分析 [J]. 变压器, 2008, 45 (6): 61-63.
- [10] 龙凯华,杨海超,马继先,等. 电力变压器绕组变形诊断有效性研究 [J]. 变压器, 2013, 50 (9): 54-57.

(收稿日期: 2014-01-03) EA