变压器顶层油温短期预测模型研究及应用

油浸式变压器顶层油温是变压器热点温度的重要指标，直接影响变压器运行寿命和负载能力。相对于变压器油温超短期（5 min～1 h）预测值，电网运维和调度人员更关注短期（未来1～3天）预测值。在分析几种典型的变压器顶层油温超短期预测模型的基础上，提出了一种日顶层油温最大值短期预测模型，并给出了最适合的模型构建时间窗口。考虑到冷却器投运及变压器工况异常所造成的影响，对模型进行了相应的修正。实验结果表明，该模型具有较高的预测准确度。基于该模型开发了变压器油温监测预警系统，为江苏电网运维、检修和调度辅助决策提供了重要支撑。

陈锦铭[1]　吴　奕[2]　朱海兵[2]　郭雅娟[1]　李　斌[1]　胡成博[1]／1.江苏省电力公司电力科学研究院　2.江苏省电力公司

陈锦铭／工程师

关键词／Keywords

变压器·
顶层油温·
预测模型·

随着经济的飞速发展，电网规模逐步扩大，容量不断升级。与此同时，社会对于电力系统的安全性和可靠性提出了更高的要求。变压器是电力系统中最为重要的设备之一，在能量的传输、转换和分配过程中起到了关键的枢纽作用。变压器绕组过热将导致内部绝缘下降，并最终影响变压器的正常运行。然而，实际运行中对变压器绕组温度直接测量存在一定的困难，而对于顶层油温的监测已有较为成熟的手段，通常使用变压器顶层油温来间接表征或估算绕组的温度[1]。根据国家电网公司《输变电设备在线监测信息报警规则（试行）》，当自冷、风冷型变压器顶层油温高于85℃，强油循环型变压器顶层油温高于75℃时，属于严重缺陷，应尽快进行消缺处理[2]。因此，对变压器顶层油温进行预测并提前做好相关防护措施，对于确保变压器的安全稳定运行具有重要的意义。

对于变压器顶层油温相关模型的研究国内外学者已经开展了许多卓有成效的研究。IEEE C57.91—1995标准[3]提出了变压器顶层油温温升指数模型，但该模型未充分反映环境温度变化所造成的影响。麻省理工学院的Lesieutre提出了顶层油温预测模型[4]，将环境温度变化作为油温预测的一个重要因素；亚利桑那州立大学的Tylavsky等人对该模型进行改进，并提出了顶层油温预测的半物理模型[5]；重庆大学的陈伟根在半物理模型基础上，考虑滞后时间变量、热辐射和不同离散方法对模型预测结果的影响[6]。此外，人工神经网络、T－S和Kalman滤波等模型被用于进行油温预测[7-9]，这些模型较为抽象，需要依赖复杂的初始状态输入或进行细致的参数迭代调整才能达到较为理想的预测效果。

上述方法主要适用于顶层油温的超短期预测，可以较为准确地预测未来5 min～1 h内的油温值。然而，在实际工作中油温的超短期预测并非关注的重点。因为与负荷预测不同，油温在短时间内变化相对平稳，SCADA系统中5 min的采样频率已能够满足对于其变化趋势的分析和预判。电网调度和运维人员对于未来1～3天内变压器油温所能达到的最高值更为关注，其目的主要如下：

1）提前安排好变压器及其冷却装置的巡检和维护工作，为其平稳度过运行高峰保驾护航。

2）提前做好运行方式调整的准备，避免持续高负荷造成的变压器内部热损伤。

江苏省电力公司科技项目：J2015005。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

3）通过顶层油温的实测值与预测值的对比，分析变压器内部可能存在的缺陷或隐患[10-11]。

本文考虑了环境温度、负荷与历史油温等因素，提出了一种变压器顶层油温短期预测的线性回归模型，并给出了最适合的模型构建时间窗口。考虑到冷却器投运及变压器工况异常可能造成的影响，对模型进行了相应的修正。该模型在江苏电网设备状态监测预警工作中进行了实际的应用，并达到了理想的效果，为调度和检修辅助决策提供了重要的支撑。

基础模型

在变压器顶层油温超短期预测研究领域，业界已经开展了大量的理论工作并有了一系列广泛认同的基础模型，为顶层油温的短期预测模型的构建起到了重要的理论支撑作用。本文先递进地介绍几种经典的顶层油温超短期预测模型，之后引出了日顶层油温最大值短期预测初始模型。

1. 顶层油温温升模型

IEEE C57.91—1995提出了经典的变压器顶层油温预测模型[3]。该模型中，油温温升定义为随时间变化的函数，可由末态温升关于初态温升的一介模型进行表征。该模型的出发点在于考虑负载变化对温升的影响，利用线性回归进行近似建模后可表示为

$$\theta_{top}[n]=k_1\theta_{top}[n-1]+k_2I^2[n]+k_3 \quad (1)$$

式中，$\theta_{top}[n]$为n时刻的顶层油温；$I[n]$为n时刻的负荷；k_1、k_2和k_3为回归分析后得到的常量。该模型认为影响顶层油温主要因素是前一时刻的油温值及当前时刻的负荷值。

2. 顶层油温模型

温升模型未考虑环境温度变化对油温造成的影响，因此具有一定的局限性。顶层油温模型将环境温度作为影响因素，经过改进后的近似模型可表示为

$$\theta_{top}[n]=k_1\theta_{top}[n-1]+(1-k)\theta_{amb}[n]+k_2I^2[n]+k_3 \quad (2)$$

式中，$\theta_{amb}[n]$为n时刻的环境温度值。

3. 顶层油温半物理模型

顶层油温半物理模型将式（2）中环境温度的系数（$1-k_1$）置换为独立的系数，式（2）可变换为

$$\theta_{top}[n]=k_1\theta_{top}[n-1]+k_2\theta_{amb}[n]+k_3I^2[n]+k_4 \quad (3)$$

式（3）仅考虑到了当前环境温度和负荷以及上一时刻油温对当前油温所造成的影响。实际上，由于油温变化较为缓慢，具有一定的滞后性，有必要考虑前一时刻$(n-1)\Delta t$或更早时刻$(n-2)\Delta t$之前的环境温度、负荷和油温的测量值，具体表示为

$$\theta_{top}[n]=\sum_{i=1}^{a}k_{1,i}\theta_{top}[n-i]+\sum_{i=0}^{b}k_{2,i}\theta_{amb}[n-i]+\sum_{i=0}^{c}k_{3,i}I^2[n-i]+k_4 \quad (4)$$

实际应用中，可对式（4）进行一定的简化，典型的赋值方法为$(a,b,c)=(1,2,2)$。

4. 日顶层油温最大值短期预测初始模型

根据上述的顶层油温半物理超短期预测模型，可以知道影响变压器顶层油温的因素包括了历史的顶层油温值、当前和历史的负荷及环境温度值。受此启发，对日顶层油温最大值预测模型进行了初步的定义

$$\theta_{top-max}=k_1\theta_{ytd-top-stat}+k_2\theta_{amb-stat}+k_3I_{stat}^2+k_4 \quad (5)$$

式中，$\theta_{top-max}$为预测日的油温最大值；$\theta_{ytd-top-stat}$为预测日前一日的油温统计值；$\theta_{amb-stat}$为预测日的环境温度统计值；I_{stat}为预测日的负荷统计值。

该模型全面包含了环境温度、负荷和历史油温等影响因素。同时考虑到油温的滞后性以及环境温度、负荷并非同时达到峰值这一特性，模型中使用了一系列的统计值，这些统计值包括：最大值、最小值、平均值和95概率值等。后续将通过实验进行各项变量统计值的对比与选择。

参数选择与原始模型构建

式（5）中给出了日顶层油温最大值预测模型的初步定义，但尚未明确$\theta_{ytd-top-stat}$、$\theta_{amb-stat}$和I_{stat}三个参数的具体定义。下面通过历史数据线性关系分析的方式进行模型参数的选择，并利用这些参数来构建回归分析模型。

1. 历史数据准备

为了简化分析的过程，暂不考虑变压器内外

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

部工况异常所带来的影响，选择了南京运行工况长期稳定的某80 MV·A三相变压器作为分析对象，额定电压为110/35/10 kV，冷却方式为油浸自冷（ONAN）。从在线监测系统获得该主变压器所在变电站2013年全年的微气象气温数据，采样间隔为10 min；从SCADA系统获得该主变压器2013年全年的高压侧负荷与顶层油温监测数据，采样时间为5 min。

根据该主变压器的运行日志，剔除了因检修而停运的10天数据。对于油温，计算每日的日最大值和日平均值；对于负荷，计算每日负荷的最大值、平均值和95概率值；对于环境温度，统计每日气温的最大值、最小值和平均值。具体如表1所示。

表1　变压器顶层油温短期预测备选参数

名称	符号
日油温最大值	$\theta_{top-max}$
昨日油温最大值	$\theta_{ytd-top-max}$
昨日油温平均值	$\theta_{ytd-top-avg}$
日负荷最大值	I_{max}
日负荷平均值	I_{avg}
日负荷95概率值	I_{95}
日气温最大值	$\theta_{amb-max}$
日气温最小值	$\theta_{amb-min}$
日气温平均值	$\theta_{amb-avg}$

2. 相关性分析

根据上述的历史统计数据，以月为划分单元，依次进行了日油温最大值与环境温度、负荷及气温统计值的相关性分析。

首先开展的是油温与环境温度统计值的相关性分析。图1显示的是日油温最大值与日气温最大值、最小值与平均值的相关系数值。可以看到，油温最大值与日气温最大值及平均值的相关系数都在0.9以上，呈现出很强的相关性。与气温平均值相比，气温最大值的相关系数更高一些。

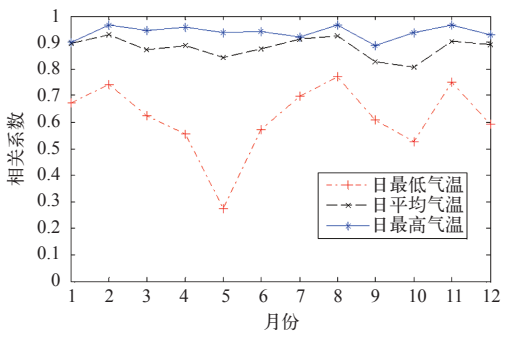

图1　油温与环境温度统计值相关性分析

其次开展的是日最高油温与负荷统计值平方之间的相关性分析。从图2可以看出电流95概率值的相关系数优于最大电流和平均电流。这是因为95概率值剔除了最大电流中可能的畸变点，较好地反映了整体的负荷特性。

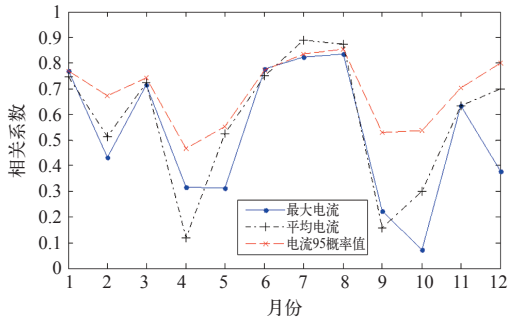

图2　油温与负荷统计值平方相关性分析

最后开展的是日最高油温与昨日油温统计值的相关性分析。通过实验发现昨日油温最大值、昨日油温平均值与日最高油温的相关系数基本接近，任选其一即可。

3. 模型构建及时间窗口选择

根据上述相关性分析的结果，选定了日气温平均值、日负荷95概率值以及昨日油温最大值作为日油温最大值预测模型的参数。于是，式（5）可改写为

$$\theta_{top-max}=k_1\theta_{ytd-top-stat}+k_2\theta_{amb-avg}+k_3I_{95}^2+k_4 \quad (6)$$

为了验证模型时间窗口对模型预测准确度的影响，使用上述中提及的变压器及其油温、负荷和环境温度等数据进行实验。预测目标共分4组，分别是：5.1－5.7、7.1－7.7、10.1－10.7和12.1－12.7的日最高油温，模型的时间窗口选项6组，分别是：7天、15天、30天、60天、90天和120天。

实验结果如图3所示，预测结果误差率呈现出两头高、中间低的分布趋势，即：随着时间窗口的增大，一开始误差值减小，但当时间窗口大于60天后，误差值又呈上升趋势。这是因为：当样本数量过小时（如小于15天），模型信息量不足

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

导致准确率偏低；当样本数量过大时（如大于60天），模型受历史数据影响无法准确体现当前具有一定季节性油温特征。因此，建议的模型时间窗口为30～60天之间。通过对其他自然冷却型变压器的大量实验结果表明，当模型时间窗口为30天时，模型预测准确率较为理想，误差率低于1%。

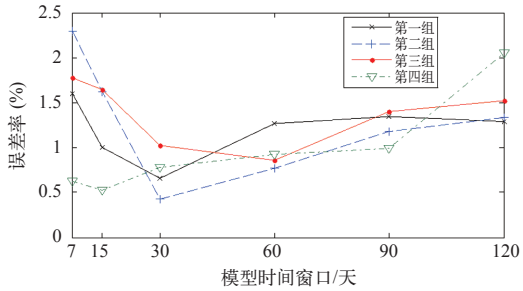

图3 预测结果误差率与模型时间窗口关系

模型修正

1. 考虑冷却器投运的模型修正

上述的顶层油温短期预测模型是基于油浸自冷型变压器，并不完全适用于油浸风冷（ONFN）、强迫油循环风冷（OFAF）等类型的变压器。因为这些类型变压器在一定条件下将投切冷却器，从而有效减缓了油温的上升，并将油温控制在理想的范围。因此，应对原有模型进行适当的修正（假设该变压器的整体运行工况正常）。通过分析该变压器两年内的历史油温数据，找出该变压器的顶层油温峰值$\theta_{top-max-total}$（一般情况下，在每年7～8月份迎峰度夏期间，该峰值及其附近油温值会多次出现）。油温预测模型表达式可修正为

$$\theta_{top-max}=\begin{cases}k_1\theta_{ytd-top-max}+k_2\theta_{amb-avg}+k_3I_{95}^2+\\ \quad k_4(\theta_{top-max}<\theta_{top-max-total})\\ \theta_{top-max-total}(\theta_{top-max}\geqslant\theta_{top-max-total})\end{cases}\quad(7)$$

以某台运行工况长期稳定的240 MV·A三相变压器作为实验对象，该主变压器额定电压为220/110/10 kV，冷却方式为油浸风冷。实验的时间段为2013年8月5日～12日，该段时间环境气温和负荷均达到全年较高水平。实验结果如图4所示。由于冷却器的作用，顶层油温被控制在了66℃之下。原模型未考虑冷却器投运因素，导致预测值明显偏离了真实值，而修正后的模型预测值与真实值高度拟合。

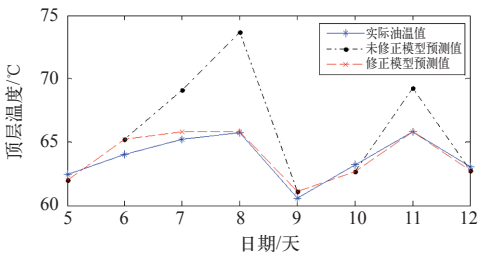

图4 原始模型与考虑冷却器投运修正模型预测结果对比

2. 考虑变压器异常工况的模型修正

在上述所讨论的变压器顶层油温预测模型都存在一个前提假设，即变压器及其附属设施运行工况正常。然而在变压器实际运行过程中会出现各种异常的状态，如冷却循环系统故障、分接开关接触不良、绕组匝间短路和内部绝缘老化等，从而导致变压器温升异常。这些异常状态给顶层油温预测模型的建模带来了困难，严重影响了预测的准确率。

针对非正常状态的变压器，建模方法应进行调整。这里假设具备该变压器60天以内的顶层油温、环境温度和负荷数据，其中至少有连续15天（第x～x+14天）变压器处于正常工况，同时有至少2天处于非正常状态。具体建模方法如下：

步骤1）：利用第x至x+14天的数据（将该数据集称为$dataset_{normal}$）进行顶层油温模型的初步构建，方法参照式（6）。如果变压器类型为油浸风冷或强迫油循环风冷型，按照式（7）建模。该步骤得到的模型称为$model_{normal}$。

步骤2）：从第x+15天开始，将当日的日气温平均值、日负荷95概率值和昨日油温最大值代入$model_{normal}$，得到期望值θ_{exp}并计算其当日油温真实最大值的偏差率绝对值dev，对于dev存在以下三种情况：

Case1：如果dev＜3%，认为该日数据有效，将该数据集加入$dataset_{normal}$并更新$model_{normal}$。

Case2：如果dev∈[3%，5%]，将其舍弃。

Case3：如果dev＞5%，认为该日变压器处于异常状态，将该日数据加入异常日数据集$dataset_{abnormal}$，当该集合的势等于2时，利用式（6）

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

进行建模得到异常油温预测模型$model_{abnormal}$。当异常日数据集的势继续增大时更新$model_{abnormal}$。

通过上述步骤完成了正常日预测模型$model_{normal}$和异常日预测模型$model_{abnormal}$的构建。

在实际预测工作过程中应用方法如下：

步骤1）：已知第N天的油温最大值、第$N+1$天的日平均气温预测值和日负荷95概率预测值，将这些值分别代入$model_{normal}$和$model_{abnormal}$得到正常油温预测值$\theta_{exp-normal}$和异常油温预测值$\theta_{exp-abnormal}$，如果第N天的变压器为正常，则第$N+1$天顶层油温预测值取$\theta_{exp-normal}$；反之则取$\theta_{exp-abnormal}$。

步骤2）：当获得第$N+1$天的真实油温最大值时，计算其与$\theta_{exp-normal}$的偏差率，如果小于3%则将第$N+1$天变压器状态置为正常，否则置为异常。

步骤3）：对于$N+2$天之后的顶层油温预测值的计算参考步骤1）。

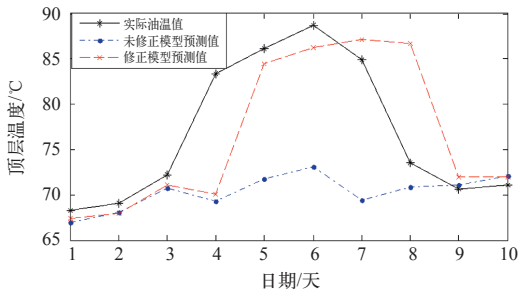

图5　原始模型与考虑异常工况修正模型预测结果对比

以某台投运多年，近期运行工况不稳定的180 MV·A三相变压器作为实验对象，该主变压器额定电压为220/110/10 kV，冷却方式为油浸风冷。实验的时间段为2013年7月1日～10日，根据工作日志提示，2013年7月4日～7月7日该变压器风扇工况异常。实验结果如图4所示。未修正的模型预测值明显偏离了真实值，而修正后的模型在异常工况发生后能主动进行识别，从而达到了较为准确的预测效果。

模型应用

在变压器顶层油温短期预测的应用过程中，需要提前预知下一天的气温最大预测值和负荷95概率预测值。气温预测值可从气象预警系统获得，该系统已实现对未来72 h内气象信息较为准确的预测。负荷短期预测基于相似日模型[12]，同时考虑了运行方式调整带来的影响，准确率在97%以上。

目前，江苏电力已依据该模型开发实现了变压器油温监测预警系统，实现对全省5 300多台35 kV及以上变压器的未来三天内油温的准确预测。该系统基于JavaEE开发框架，后台利用SPSS进行建模与预测，前台使用Flex技术进行展示。该系统于2014年7月底上线并发挥了重要作用，成功预测了数百次由于气温升高或运行方式调整所引起的变压器油温告警，同时通过预测值与真实值的比对发现了多起变压器工况异常，如散热器积灰或冷却器投切异常。变压器油温监测预警系统用户界面如图6所示。

图6　江苏电网变压器油温监测预警系统用户界面

结束语

本文在对大量顶层油温、负荷和气温等历史数据进行相关性分析的基础上，提出了一种变压器顶层油温短期预测的线性回归初始模型，并给出了最适合的模型构建时间窗口。考虑到冷却器投运及变压器工况异常可能造成的影响，对模型进行了相应的修正。实验结果表明，该模型对变压器顶层油温的预测准确度高，在变压器发生异常工况时能够主动识别并准确预测。基于该模型开发了变压器油温监测预警系统并已实用化，为江苏电网运维、检修和调度辅助决策提供了重要支撑。

(下转第109页)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

此不会出现熵权法不能保证方案独立性的问题。

4）应用DEA模型避免了求权重的过程，只以输出最大为目标函数，增强了客观性。

参考文献

[1] 高远望，顾雪平，刘艳，等．电力系统黑启动方案的自动生成和评估 [J]．电力系统自动化，2004，28 (13)：50-54．

[2] 林济铿，李童飞，等．基于熵权模糊综合评价模型的电力系统黑启动路径评估 [J]．电力系统自动化．

[3] 蒋越梅．电力系统黑启动的研究 [D]．天津：天津大学，2007．

[4] 刘艳，顾雪平，张丹．基于数据包络分析模型的电力系统黑启动方案相对有效性评估 [J]．中国电机工程学报，2006，26 (5)：32-37，94．

[5] 陈立伟．电力系统黑启动方案的模糊综合评判 [D]．保定：华北电力大学，2006．

[6] 林济铿，蒋越梅，岳顺民，等．基于DEA/AHP模型的电力系统黑启动有效方案评估 [J]．电力系统自动化，2007，31 (15)：65-69，110．

[7] 孟宪朋，么莉，林济铿．基于关联矩阵法的电网黑启动方案评估 [J]．电工电能新技术，2007，26 (4)：65-70．

[8] 张志毅，陈允平．基于模糊多属性决策的黑启动方案优选 [J]．高电压技术，2007，33 (3)：42-45，52．

[9] 高远望．黑启动决策支持系统中启动方案的自动生成和评估 [D]．保定：华北电力大学，2004．

[10] 倪静．基于TOPSIS法的黑启动决策方法 [J]．广东电力，2009，22 (12)：8-11，15．

[11] 林振智，文福拴，周浩．熵权决策理论及其在黑启动决策中的应用 [J]．电力系统及其自动化学报，2009，21 (6)：26-33．

（收稿日期：2014－10－10）EA

(上接第93页)

参考文献

[1] 操敦奎，许维宗，阮国方．变压器运行维护与故障分析处理 [M]．北京：中国电力出版社，2008．

[2] 国家电网公司．输变电设备在线监测信息报警规则 (试行) [S]．

[3] IEEE Standard C．57．91-1995 IEEE guide for loading mineral-oil-immersed power transformers [S]．

[4] Lesieutre B，Hagman W，Kirtley J．An improved transformer top oil temperature model for use in an on-line monitoring and diagnostic system [J]．IEEE Transactions on Power Delivery，1997，12 (1)：249-256．

[5] Tylavsky D J，He Q，Si J，et al．Transformer top-oil temperature modeling and simulation [J]．IEEE Transaction on Industry Application，2000，36 (5)：1219-1225．

[6] 陈伟根，苏小平，陈曦，等．变压器顶层油温预测热模型影响因素分析及其改进 [J]．高电压技术，2011，37 (6)：1329-1335．

[7] He Q，Si J，Tylavsky D J．Prediction of top-oil temperature for transformers using neural netwroks [J]．IEEE Transactions on Power Delivery，2000，15 (4)：1205-1211．

[8] 熊浩，陈伟根，杜林，等．基于T-S模型的电力变压器顶层油温预测研究 [J]．中国电机工程学报，2007，27 (30)：15-18．

[9] 王永强，岳国良，何杰，等．基于Kalman滤波算法的电力变压器顶层油温预测研究 [J]．高压电器，2014，50 (8)：74-79．

[10] 孙秋芹，周志成，赵科，等．变压器综合试验系统的设计与实现 [J]．江苏电机工程，2014，33 (3)：56-58．

[11] 王峰，王春宁．基于辨识模型的变压器故障诊断方法研究 [J]．江苏电机工程，2014，33 (1)：26-29．

[12] 黎灿兵，李晓辉，赵瑞，等．电力短期负荷预测相似日选取算法 [J]．电力系统自动化，2008，32 (9)：69-73．

（收稿日期：2015－02－05）EA

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net