

面向典型负荷曲线的油浸式电力变压器 动态载荷能力评估方法

张琛^{1,2}, 董旭柱^{1,2}, 阮江军^{1,2}, 邓永清^{1,2}, 陈乔峰^{1,2}

(1. 电网环境保护全国重点实验室(武汉大学), 湖北省 武汉市 430072;

2. 武汉大学电气与自动化学院, 湖北省 武汉市 430072)

Dynamic Thermal Rating Assessment Method of Oil-immersed Power Transformers Based on Typical Load Profiles

ZHANG Chen^{1,2}, DONG Xuzhu^{1,2}, RUAN Jiangjun^{1,2}, DENG Yongqing^{1,2}, CHEN Qiaofeng^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Power Grid Environmental Protection(Wuhan University), Wuhan 430072, Hubei province, China;

2. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei Province, China)

ABSTRACT: The development direction of asset lean management is to evaluate the power transformer's dynamic thermal rating and improve the transformer's utilization rate to ensure equipment safety. In this paper, a method for evaluating the dynamic thermal rating of the transformer is proposed to determine the dynamic load curve under different working conditions, which is combined with the operating conditions of the transformer. It comprehensively considers the constraints of hot spot temperature, top oil temperature, losses of life, bushing and on-load tap changer maximum allowable current, and so on. Meanwhile, the most sensitive constraints limiting the load are given. Firstly, by analyzing the thermal parameters of the dynamic temperature rise model, the thermal parameters and the temperature rise model are optimized according to the temperature data measured by the winding optical fiber. The maximum error of the hot spot temperature estimation does not exceed 3 K, which means the accuracy of the hot spot temperature estimation model is improved. Secondly, based on the historical data, the typical load curve and the corresponding ambient temperature curve are extracted as the input parameters of the evaluation model. Finally, several application examples for transformers in different scenarios are studied to analyze the limiting factors. The results show that the maximum allowable bushing and on-load tap changer currents may become the main factors limiting the dynamic load capacity of the transformer, and the load capacity can be improved by more than 28% in different scenarios compared to the rated operating conditions, which has a large load potential.

KEY WORDS: oil-immersed power transformer; hot spot temperature; thermal parameter optimization; typical load curve; dynamic transformer rating

摘要: 开展油浸式电力变压器动态载荷能力评估, 保障设备安全运行条件下提高设备利用率和迎峰能力, 是资产精益化管理的发展方向。该文首先分析动态温升模型的热参数, 使用光纤实测的绕组热点温度数据对热参数优化并对温升估算模型进行改进, 最终热点温度估算最大误差不超过 3K, 其次结合变压器运行工况, 综合考虑热点温度、顶层油温、寿命损失及套管和分接开关最大允许电流等约束, 提出了一种基于负荷循环迭代的变压器动态载荷能力评估方法, 并分析了典型负荷曲线及环境温度曲线的提取方法, 最后针对变压器在不同场景下的多个动态载荷能力评估应用实例进行研究, 确定变压器的动态载荷能力及限制因素。结果表明, 套管和分接开关最大允许电流可能成为限制变压器动态载荷能力的主要因素, 较额定工况, 不同场景下变压器载荷能力可提升 28%以上, 具有较大的载荷潜力。

关键词: 油浸式电力变压器; 热点温度; 热参数优化; 典型负荷曲线; 变压器动态载荷

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2023.1171

0 引言

近年来, 电力系统运行所呈现的“双峰”特性愈加明显, 2016—2019年, 南方五省(区)5%的单次尖峰负荷持续运行时间为 3~6h, 全年出现频次 10~40次, 3%尖峰负荷单次持续时间最长为 2~6h, 全年出现频次 6~25次。典型的场景是: 为满足未来一年之内仅出现数十小时的尖峰负荷, 必须投资相应的发电、输电、变电、配电容量并按比例预留备用, 造成投资浪费^[1-2]。电力设备动态载荷能力评

基金项目: 国家自然科学基金项目(U2066217)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (NSFC) (U2066217).

估技术是提高设备利用率的有效方法,成为新型电力系统运行关注的重大问题,也是新型电力设备资产管理现实而迫切的重大需求^[3]。油浸式电力变压器(无特殊说明时,下文中变压器均指油浸式电力变压器)是电网中的核心设备,开展变压器动态载荷能力评估(dynamic transformer rating, DTR),提高设备利用率的同时可为供电企业提供科学的运维策略,实现变压器资产全过程、精益化管理。

变压器动态载荷能力评估按工况可分为系统规划、迎峰度夏或冬季高峰负荷需求、设备停运检修、设备紧急故障支援等,对应了不同的时间尺度。针对变压器短期载荷能力评估,有学者从不同的负荷起始条件、不同的运行环境温度、不同的初始顶层油温等出发,以热点温度不超过给定的限制值作为约束,评估变压器的短期过负荷能力^[4-5],未来变压器负荷和环境温度分布都是未知的,需要结合运行工况进行分析或预测。此类研究中通常假设负荷和环境温度在任意时刻均为恒定值,评估结果具有较大裕度。

针对负荷和环境温度连续变化的影响,文献[6-7]提出了基于数据驱动的电力变压器长期动态载荷能力的估算方法,以电力变压器过去若干年的运行环境温度及负荷数据作为输入,以油纸绝缘寿命损失(无特殊说明时,下文中寿命损失均指油纸绝缘寿命损失)作为约束,确定未来电力变压器的负荷曲线。文献[8-10]从概率角度预测未来的环境温度,以热点温度阈值不超过 140℃作为约束,反推负载率 k ,得到未来的动态载荷曲线,适用于短期动态载荷能力评估。可以看出,现有的研究针对于不同时间尺度提出了不同的变压器载荷能力评估方法,但是对于动态载荷能力评估中的风险约束通常只考虑热点温度阈值或单位时间内的绝缘寿命损失阈值。

风险约束通常指动态载荷过程中热点温度阈值、顶层油温阈值、寿命损失阈值、辅助设备如分接开关、套管(无特别说明,下文中辅助设备指分接开关、套管)电流(电流为标么值)阈值等。针对于动态载荷能力评估中多风险因素约束,有研究将约束条件量化为设备的整体运行风险,从风险概率、故障概率等角度建立约束,确定变压器的动态载荷能力^[11-13]。此类研究从宏观上把握变压器动态载荷过程中的运行风险,而对于动态载荷能力评估方法中的风险约束,需要充分考虑热点温度、顶层油温、寿命损失、辅助设备电流阈值等给出运行的指导建议。

变压器动态载荷能力的研究通常基于温升特

性,IEC 60076—7^[14]、IEEE C57.91^[15]和 GB/T 1094.7—2008^[16]标准或导则中推荐的公式或变压器热路模型通常作为动态载荷能力评估的首选。热点温度的准确获取是实现负荷调控的关键因素之一^[17-18]。变压器动态载荷过程中负荷波动幅度大频率高,宽负荷范围的热参数不再是推荐值,沿用已有的标准、导则及解析方法势必会产生误差。现有研究表明,在负荷波动大的工况下,热点温度估算误差可达 20K^[19]。在提高热点温度估算模型的精度研究方面,通常分为两类,一类是改进热点温度估算模型^[17],另一类是对热点温度估算模型中的参数进行优化^[19-20],随着变压器在线监测技术的进步,基于机器学习、分布式光纤测温、基于典型热流线的绕组热点温度反演检测都可获取变压器实时的热点温度^[21-24],为热点温度估算模型的改进及若干热参数的确定奠定基础。

针对上述分析,开展变压器动态载荷能力评估需要充分考虑负荷波动和环境温度变化的影响,同时需要全面考虑限制变压器载荷能力的因素。本文首先结合变压器宽负荷范围内的温升试验数据改进了热点温度估算模型并结合优化算法确定最优热参数。其次以不同场景下的典型负荷曲线及环境温度数据作为输入量,提出了一种基于数据驱动的变压器的动态载荷能力综合评估方法。最后以历史负荷数据构造归一化的典型日负荷曲线及环境温度轮廓线,对不同场景下的动态载荷能力评估应用实例开展了研究。该方法考虑了变压器动态能力评估过程中的风险约束,同时可以灵活地根据变压器运行状态设置风险量的阈值,保证安全的同时提升变压器的利用率。

1 动态热点温度估算模型

1.1 动态热点温度估算模型改进及热参数优化

热点温度的准确估算是动态载荷能力评估的基础,IEC 60076—7^[14]、IEEE C57.91^[15]和 GB/T 1094.7—2008^[16]均给出了热点温度的估算模型(下文均指 GB/T 1094.7—2008 导则中的式(5)、式(6)),由于热设计的变化,变压器热参数不同,估算模型的精度及热参数选取需要进一步分析。

本文以 1 台型号为 SZ11-20000kVA/66kV 的三相油浸式自然油循环有载调压变压器为研究对象,该变压器装有绕组光纤测温系统,可以实时测量负载率变化下绕组的热点温度。安装前根据多物理场仿真计算的结果,热点位置出现在 B 相绕组,因此低压 A/B/C 三相绕组安装了 4 个点式温度传感器(B

相2个),同时对应绕组各安装4个光纤光栅串温度传感器测量绕组纵向温度。整个变压器温升试验分为5个阶段,具体如表1所示。前2个阶段持续试验主要是因为第1阶段试验受风的影响。试验时的负载率及对应的环境温度、顶层油温及绕组热点温度的实测值变化曲线图见附录A图A1,其中采集时各数据的时间分辨率为1min。

| 阶段 | 负载率/pu | 时间/h |
|----|--------|----------|
| 1 | 0.9 | 0~4.2 |
| 2 | 0.9 | 4.2~5.8 |
| 3 | 1.0 | 5.8~12.8 |
| 4 | 0.93 | 12.8~14 |
| 5 | 0 | 14~ |

首先采用热点温度估算模型及推荐的热参数进行热点温度估算,如图1中导则估算结果所示。可以看出,采用导则得到的估算结果偏大,最大估算误差超过10K,就本次研究的变压器而言,应进一步分析热点温度估算模型,确定其热参数,提高估算模型的精度,准确确定变压器在任意载荷下的热点温度。

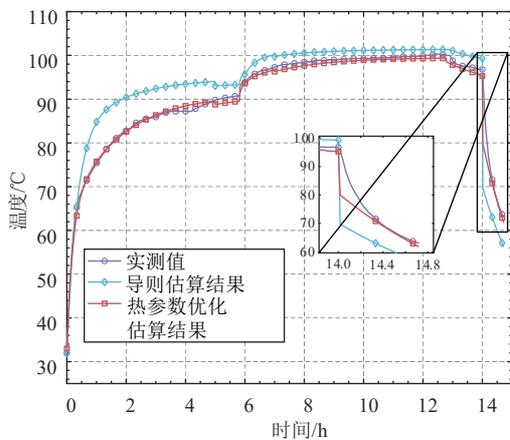


图1 热点温度估算结果对比

Fig. 1 Comparison of hot spot temperature estimation results

变压器的热点温度估算模型中的热参数主要有绕组时间常数 τ_w 、油时间常数 τ_o , 绕组指数 x 、油指数 y , k_{11} 为反映变压器顶油温升变化的常数; k_{21}, k_{22} 为反映热点温度相对于顶层油温温升变化的常数等。本文首先结合实测数据对热点温度估算模型中的上述热参数值进行优化,根据获取的数据情况,可采用两种方法:

方法1:以顶层油温的实测值及顶层油温的估算公式先估算 x, k_{11}, τ_o 等参数,之后将其作为已知条件结合热点温度的实测值及热点温度估算公式估算 $k_{21}, k_{22}, \tau_w, y$ 。

方法2:直接采用热点温度(温升)实测值及热点温度(温升)估算公式对上述参数进行估算。

L-M(Levenberg-Marquardt, L-M)算法作为非线性模型参数的估计方法之一,迭代速度快,求解精度较高,因此本文采用L-M算法结合方法2获取的数据对热点温度估算模型中的热参数进行寻优。由于温升试验过程中环境温度非恒定,因此以热点温升值进行估算,采用L-M算法估算热参数的具体过程见附录B。

L-M算法优化后的热参数值如表2所示。采用优化后的参数值对整个温升试验阶段的绕组热点温度重新进行估算,估算结果如图1中热参数优化估算结果所示,可以看出,0~12.8h(前3阶段)温度上升阶段热点温度估算误差很小,最大误差不超过3K。而在变压器负载率下降的4~5阶段中,对于负载率变化较小的第4阶段,热点温度估算的误差很小,但是当负载率变化较大时(对应第5阶段),热点温度的估算误差变大,但估算精度仍优于导则估算结果。对导则中的估算公式的误差来源进一步分析,可知负载率下降阶段的热点温度估算公式只考虑了稳态时热点温度相对于顶层油温的温升,而没有考虑热点温度相对于顶层油温温升的暂态过程,因此对应工况的热点温度估算误差变大。

| 变压器热参数 | 推荐值 | 优化值 |
|----------|-----|------|
| k_{11} | 0.5 | 0.5 |
| k_{22} | 2 | 1.1 |
| k_{21} | 2 | 2 |
| x | 0.8 | 0.75 |
| y | 1.3 | 1.15 |
| τ_o | 210 | 248 |
| τ_w | 10 | 10 |

本文进一步对导则中负载下降阶段的热点温度估算公式改进,考虑温度的暂态变化,引入变量 $\Delta\theta_{hi}-Hg_r K^y$ 及相应的时间函数 $f_4(t)$ 模拟热点温度相对于顶层油温温升变化的暂态过程,即负载率降低时的热点温度估算公式改进为式(1)所示。

$$\theta_{hst} = \theta_a + \Delta\theta_{or} \left[\frac{1+RK^2}{1+R} \right]^x + \{ \Delta\theta_{oi} - \Delta\theta_{or} \left[\frac{1+RK^2}{1+R} \right]^x \} \times f_3(t) + Hg_r K^y + \{ \Delta\theta_{hi} - Hg_r K^y \} f_4(t) \quad (1)$$

式中: $f_3(t) = e^{-t/(k_{11} \times \tau_o)}$; $f_4(t) = e^{-t/\tau_w}$; θ_a 为环境温度; $\Delta\theta_{or}$ 为额定负载下变压器顶层油温升; $\Delta\theta_{hi}$ 为估算开始时热点温度相对于顶层油温的温升; $\Delta\theta_{oi}$ 为估算开始时顶层油温的温升; R 为负载损耗和空

载损耗比值； K 为负载率； g_r 为额定负载下热点温度相对于顶层油温的温升； H 为热点系数。

用式(1)对第 4、第 5 阶段的负载率下降阶段的热点温度瞬态变化过程重新估算，负荷下降阶段各方法的估算误差对比结果如图 2 所示，和实测值相比，改进后的热点温度估算模型最大误差在 3K 以内。

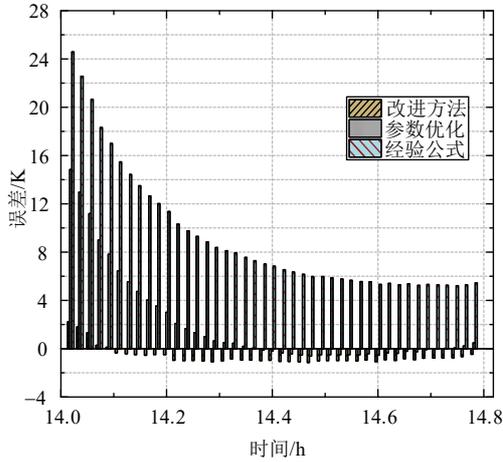


图 2 第 4、5 阶段不同方法估算误差对比

Fig. 2 Estimation errors of different methods in stage 4 & 5

以下 2 个误差指标用于估算模型的准确性，分别为平均绝对百分比误差(mean absolute percentage error, MAPE)和均方根误差(root mean square error, RMSE)。

$$e_{\text{MAPE}} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^N \left| \frac{A_i - P_i}{A_i} \right| \times 100\% \quad (2)$$

$$e_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^N \left(\frac{A_i - P_i}{A_i} \right)^2} \quad (3)$$

式中： A_i 为实际值； P_i 为估算结果； M 为数据总量。最终整个估算阶段的 e_{RMSE} 为 4.3866， e_{MAPE} 为 4.2817%。

2 变压器动态载荷能力评估方法

2.1 目标函数及约束条件

根据运行特性，变压器动态载荷能力评估类型分为正常周期性动态载荷能力评估、短期动态载荷能力评估和短时动态载荷能力评估 3 种。标准中对变压器的不同运行工况给出了相应的温度阈值^[16]，当变压器绝缘纸含水量约为 2%，热点温度超过 140℃ 时，水分可能析出，变压器的绝缘性能下降^[25]。为避免变压器绝缘系统故障，本文热点温度阈值采用 140℃，顶层油温温度阈值为 105℃^[16]。本文研究的变压器绝缘系统采用非热改性油浸式绝缘纸，因此以变压器热点温度 98℃ 时的油浸式绝缘纸老化速率为基准值，其相对老化率和寿命损失计算公式^[16]分别为

$$V = 2^{(\theta_{\text{hst}} - 98)/6} \quad (4)$$

$$L_{\text{tot}} = \int_{t_1}^{t_2} V dt \approx \sum_{n=1}^N V_n \times t_n \quad (5)$$

式中： V 表示油浸式绝缘纸相对老化率； L_{tot} 为时间段 t_1 至 t_2 内的寿命损失，h； N 为总的的时间间隔数； V_n 和 t_n 则分别为第 n 个时间间隔内的相对老化率和间隔时间。

热点温度、顶层油温、寿命损失可表示为负载率、环境温度及运行时间的函数，在评估变压器载荷能力时，可建立如式(6)(7)所示的目标函数及约束条件：

$$\max K_{(t)} \quad (6)$$

$$\begin{cases} 0 \leq K_{(t)} \leq K_l, \forall 0 \leq t \leq N \\ \theta_{\text{top}(t)} \leq \theta_{\text{topl}}, \forall 0 \leq t \leq N \\ \theta_{\text{hst}(t)} \leq \theta_{\text{hstl}}, \forall 0 \leq t \leq N \\ L_{\text{tot}(t)} \leq L_{\text{lim}}, \forall 0 \leq t \leq N \end{cases} \quad (7)$$

式中： θ_{top} 为顶层油温，℃； t 为运行时间，h； θ_{hstl} 为热点温度阈值，℃； θ_{topl} 为顶层油温阈值，℃； L_{lim} 为寿命损失阈值，h； K_l 为辅助设备最大允许电流阈值，pu； N 为评估时长。

2.2 评估流程

在开展动态载荷能力评估前需要以下数据和模型：

1) 变压器动态温升估算模型所需要的属性参数，包括空、负载损耗值、绕组及油的时间常数等热参数。

2) 确定评估时段变压器典型的 24h 负荷曲线和典型的运行环境温度曲线，在本文中对应数据的时间分辨率为 1h。

3) 确定顶层油温、热点温度及寿命损失估算公式及顶层油温温升、热点温升的起始值。

4) 确定热点温度、顶层油温、寿命损失及辅助设备最大允许电流的阈值。

动态载荷能力评估的流程如图 3 所示，具体步骤如下：

步骤 1：输入开展变压器动态温升估算模型所需要的属性参数、热参数、典型的 24h 负荷曲线、24h 环境温度曲线等数据。

步骤 2：根据变压器运行工况，确定动态载荷能力评估的时间范围，并确定热点温度、顶层油温温度、寿命损失、辅助设备最大允许电流等约束条件的阈值。

步骤 3：考虑负荷循环加载周期内变压器负荷剖面轮廓具有相似性，采用负荷曲线倍增或者倍减

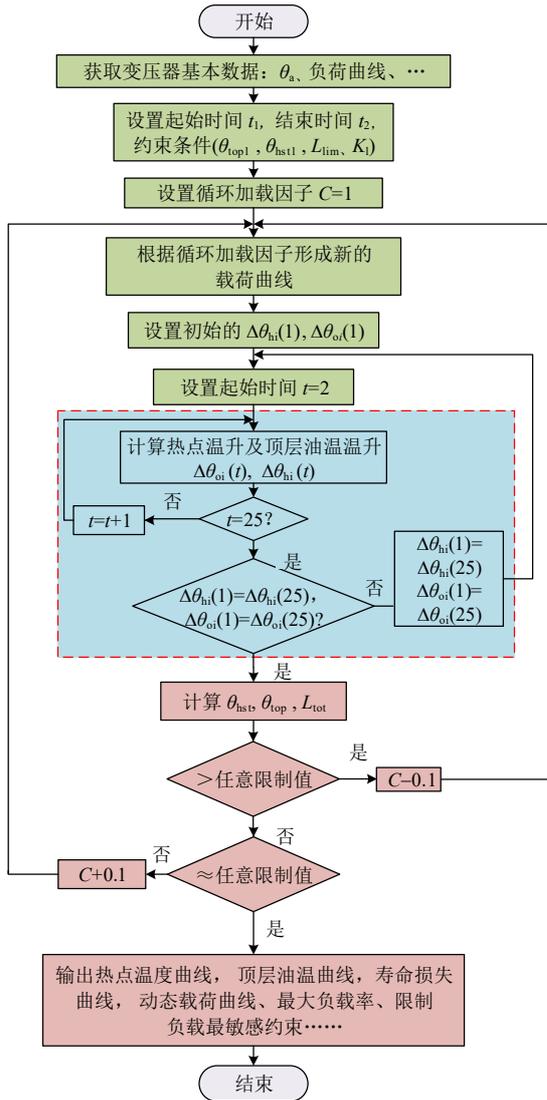


图 3 动态载荷能力评估计算流程

Fig. 3 DTR assessment calculation process

的方法确定变压器动态载荷能力, 因此需要设定负荷循环加载的迭代系数 C , 为加快迭代速度, 初始值通常设为 1。根据 C 的值及评估的时间区间形成新的载荷曲线。

步骤 4: 进行初始温度的迭代循环计算, 主要是保证一天结束时的热点温度相对于顶层油温的温升及顶层油温温升与第二天起始的热点温度相对于顶层油温值的温升及顶层油温温升值一致。

步骤 5: 将步骤 4 循环计算得到的值作为顶层油温及热点温度相对顶层油温温升的初始值, 使用动态温升估算公式及寿命损失估算公式估算 θ_{hst} 、 θ_{top} 、 L_{tot} 等。

步骤 6: 判断 θ_{hst} 、 θ_{top} 、 L_{tot} 等最大值是否超过阈值, 如果均未越限, 则增加循环加载因子 C , 重复步骤 2—6; 如果超过任意阈值, 则减少循环加载因子 C , 重复步骤 2—6; 直到满足任一阈值时, 循环结束。

步骤 7: 输出热点温度曲线、顶层油温曲线、寿命损失曲线、动态载荷曲线、最大负载率及限制负载最敏感的因素等, 评估结束。

上述步骤 6 在迭代中很难严格的达到热点温度、顶层油温、寿命损失及辅助设备最大允许电流的阈值, 为避免出现无限循环, 可采用限制迭代步数或限定估算误差的方法, 本文采用后者。因此图 3 中“ \approx ”的程度是进一步判断热点温度、顶层油温、寿命损失及电流的阈值和其最大值的差值是否为 0.01。

步骤 3—6 中给定一组典型的负荷曲线后开展动态载荷能力评估的示意图见附录 C 图 C1。

3 典型环境温度和负荷曲线确定

典型负荷特性曲线分析是在确定负荷曲线有效的聚类数的同时准确地反映评估对象的负荷水平, 也为动态载荷能力评估调整提供依据。而环境温度显著影响负载行为, 如夏季和冬季常出现负荷高峰, 因此, 本文通过季节进行环境及负荷特性的分析研究。根据时间划分季节, 其中 12—2 月为冬季, 3—5 月为春季, 6—8 月为夏季, 9—11 月为秋季。

3.1 典型环境温度曲线提取

为了表征典型环境温度曲线, 本文采用区域内的过去 4 年的环境温度数据, 建立具有统计性的温度提取方案。本文考虑 3 种温度特性, 分别为日平均温度最高、日平均温度最低和日平均温度, 表示为

$$T_{an} = \frac{\sum_{i=1}^{24} T_{ni}}{24} \quad (n=1, 2, \dots, n) \quad (8)$$

$$T_h = \text{Max}(T_{a1}, T_{a2}, \dots, T_{an}) \quad (9)$$

$$T_l = \text{Min}(T_{a1}, T_{a2}, \dots, T_{an}) \quad (10)$$

$$T_a = \left(\frac{\sum_{n=1}^n T_{n1}}{n}, \frac{\sum_{n=1}^n T_{n2}}{n}, \dots, \frac{\sum_{n=1}^n T_{n24}}{n} \right) \quad (11)$$

式中: T_{an} 为统计时间范围内每日 24 h 的平均温度, $^{\circ}\text{C}$; T_h 为统计时间范围内每日 24 h 平均温度的最大值, $^{\circ}\text{C}$; T_l 为统计时间范围内每日 24 h 平均温度的最小值, $^{\circ}\text{C}$; T_a 为统计时间范围内的所有日的平均温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

首先分析温度特征, 统计过去 4 年划定的季节范围内的每日 24h 平均温度 T_{an} , 对 T_{an} 进行对比, 确定 T_h 及 T_l 。例如, 提取春季典型环境温度曲线时, 对过去 4 年中 3—5 月的 168 天的日平均环境温度进行比较, 如果 4 月 2 日的日平均温度最高, 3 月 5 日的日平均温度最低, 则在最高温度方案下选择 4 月 2 日的 24h 温度曲线, 最低温度方案下选择 3

月 5 日的 24h 温度曲线, 平均温度方案下选择 168 天的 24h 平均温度。最终得到的典型环境温度曲线如图 4 所示。

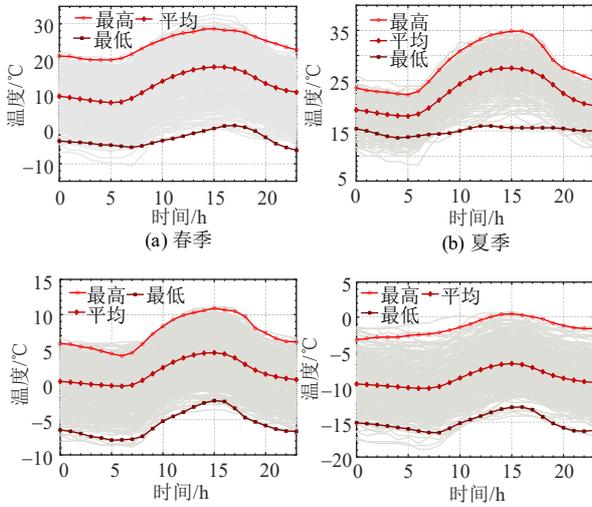


图 4 不同季节的典型环境温度曲线

Fig. 4 Typical ambient temperature profiles

3.2 典型负荷曲线提取

典型负荷特性曲线的提取通常采用数据挖掘算法中聚类方法, 本节采用改进的 K -Means (K -means clustering algorithm, K -Means) 聚类典型场景缩减算法, 仍按照上述春、夏、秋、冬 4 个季节提取典型负荷曲线。采用的数据归属于某规划区域内变电站对应若干年的日负荷数据, 变电站主要用电类型为居民用电。采用其中 4 年的负荷数据构造典型负荷曲线, 体现区域变电站的负荷特性, 为下一步动态载荷能力评估提供理论依据。

原始负荷数据每天间隔 10min 采样, 一天产生 144 个负荷数据, 首先对数据预处理按 1h 采样并进行归一化, 按照上文春夏秋冬 4 个季节对负荷数据划分并进行负荷特性聚类分析。数据集包含 q 条负荷曲线, 每条负荷曲线可表示为 H 维向量。

$$\mathbf{x}_q = \{x_q^{(h)}, h=1, 2, \dots, H\} \quad (12)$$

聚类有效性研究是通过建立有效性指标, 评价聚类质量并确定最佳聚类数的过程。典型的聚类有效性指标有误差平方和指标 (sum of squared error, SSE)、CHI 指标 (Calinski-Harabasz index, CHI)、DBI 指标 (Davies-Bouldin index, DBI) 等^[26-27]。本文采用 SSE 指标确定最佳的分类, 误差平方和 SSE 指标 I_{SSE} 用一个子类到所在簇的聚类中心的欧氏距离来表示, 即:

$$I_{SSE} = \sum_{i=1}^K \sum_{x \in X_i} d^2(c_i, x) \quad (13)$$

$$c_i = \frac{1}{m_i} \sum_{x \in X_i} x \quad (14)$$

式中: C_i 为类簇 X_i 的聚类中心; $d(c_i, x)$ 为向量间的欧氏距离。

随着聚类数增多, I_{SSE} 会减小, SSE 曲线的拐点表示在该点后再增加聚类数时误差平方和的减小幅度很小, 因此可以将 SSE 曲线的拐点作为最佳聚类数。通过对春、夏、秋及冬 4 个季节的负荷数据进行分析, 聚类数为 1 和 2 时候, 变化幅度较大, 聚类数达到 3 时 I_{SSE} 趋于稳定。因此选择最佳聚类数为 3。各季节数据的 SSE 变化曲线见附录 D 图 D1。

3.2.1 典型负荷曲线聚类结果

典型负荷曲线聚类最终结果如图 5 所示。从聚类结果可以看出, 所有用户用电量的总体趋势是在晚上达到峰值。从夏季典型负荷曲线聚类结果可以看出, 聚类 1 和 2 中接入的用户在一天中的大部分时间电能消耗都很高, 聚类 3 的用户在下午耗电量下降, 用电习惯存在差异; 对于冬季典型负荷曲线, 聚类 1 和聚类 2 的用户具有明显的峰值, 而聚类 3 的用户电能消耗较为稳定, 相对于其他两类负荷峰值更高; 对于秋季和春季, 电能消耗的趋势几乎一样, 这两个季节的典型负荷曲线聚类结果也相似。一类典型负荷曲线在下午 12h 到晚上 9h 点之间呈现稳定的负荷, 而另外两类负荷曲线呈现出两个峰谷, 主要在上 6h 和晚上 7h 左右。可以看出, 经过负荷特性聚类分析, 可以大幅缩减原始场景的数量, 从而获取典型的负荷特性曲线, 既能反映实际情况又能提供准确的结果。

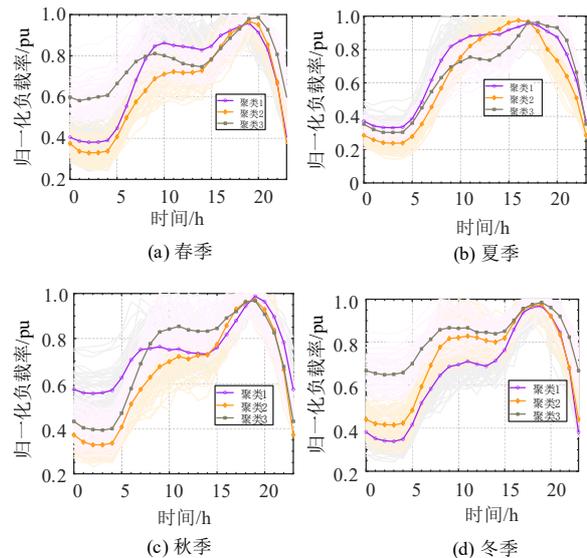


图 5 不同季节典型负荷曲线聚类结果

Fig. 5 Typical load clustering result for different seasons

4 具体工况分析

4.1 工况分类及评估原则

以上节提取的 24h 典型负荷曲线及环境温度曲

线作为输入，结合所提动态载荷能力评估方法对变压器的动态载荷能力进行评估，主要分为 2 类工况：

工况 1。周期性动态载荷能力评估。

原则 1。周期性动态载荷按时间尺度通常分为长期及长时，周期持续时间通常为 24h，为避免出现过热或过载故障，顶层油温及热点温度等满足阈值时，一个周期内绝缘寿命损失阈值通常不超过 24 h。

工况 2。短期动态载荷能力评估。

原则 2。满足热点温度、顶层油温度等阈值，同时短期运行时绝缘寿命损失阈值大于 24h，即短期内增加绝缘寿命损失提高变压器的载荷能力。但因日累积寿命损失超过 24h，在变压器紧急支援结束后，需要对寿命损失补偿。

4.2 周期性动态载荷能力评估

以图 5(b)夏季聚类 1 负荷曲线为输入，分析可知，归一化的平均负载率为 0.79pu，变压器在长时的周期性负载工况，最极端环境温度下，其顶层油温和热点温度在安全范围内波动。

设变压器运行的热点温度阈值为 140℃，顶层油温为 105℃，日累积寿命损失为 24h，并以夏季最高的环境温度曲线为输入，开展变压器动态载荷能力评估，评估结果如图 6 所示，此时对应的变压器最大载荷能力为 1.41pu，限制变压器载荷能力的主要因素是寿命损失。

从图 6 寿命损失变化曲线结合公式(4)和(5)，可以看出，变压器承受长时的周期性负载时，并非每个时刻的相对老化速率都为 1，图 6 中 17~21h 老化速率加快时间段增加的寿命损失已经由其它负载率较低或环境温度较低的时刻延长的寿命补偿，即短期内可以牺牲一定时间的绝缘寿命提高变压器的负载能力，同时将多消耗的绝缘寿命损失在其他

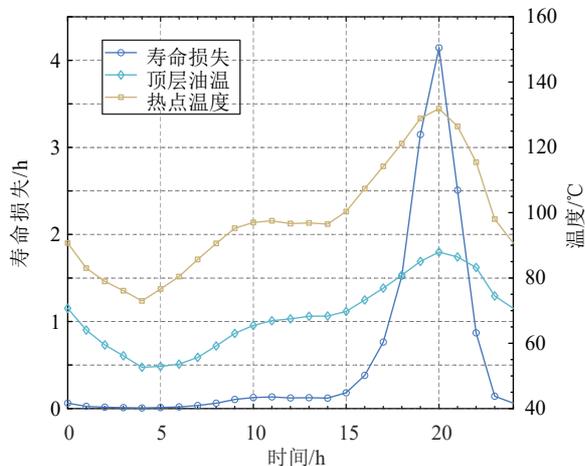


图 6 周期性动态载荷能力评估各参量变化曲线
Fig. 6 Cyclic DTR assessment of each parameter curve

负载率低或环境温度低的时间段进行补偿。

为进一步分析限制周期性载荷的主要因素，分别选取图 5(b)夏季和(d)冬季共计 6 条典型负荷曲线，对应的日环境温度曲线中，分别对应两类极端工况，冬季采用图 4(d)中环境温度最低的曲线，夏季采用图 4(b)中环境温度最高的曲线。评估结果对比如图 7 所示，其中工况 1—3 对应夏季的评估结果，工况 4—6 对应冬季的评估结果。

图 7 可以看出，对于夏季来说，限制变压器动态载荷能力的主要因素是日累积寿命损失，对于冬季来说限制变压器动态载荷能力的主要因素是套管及分接开关的最大允许电流约束。这主要是因为夏季热点温度及顶层油温的基准值高，同时环境温度高，加速油浸式绝缘纸老化使得寿命损失先达到约束，而对于冬季来说，其环境温度低，使得热点温度和顶层油温的增速慢，图 7 还可以看出，变压器达到允许电流约束时，任意工况的热点温度和顶层油温均与阈值有较大裕度，因此对于冬季，限制变压器动态载荷能力的主要因素是辅助设备最大允许电流约束。

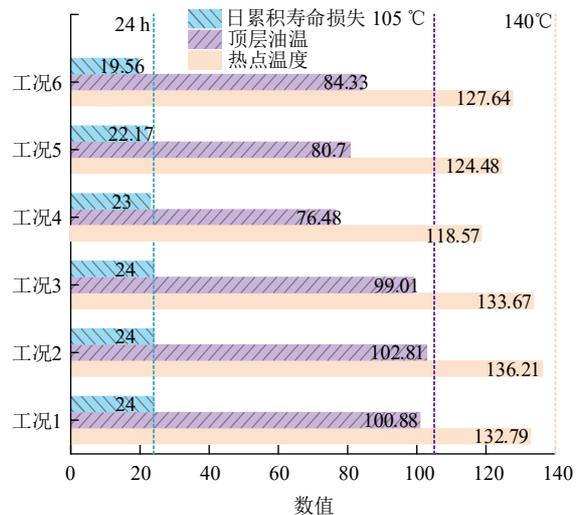


图 7 不同热点温度阈值下受限因素及寿命损失对比
Fig. 7 Comparison of limiting factors and losses of life at different hot spot temperature limits

4.3 短期动态载荷能力评估

变压器承受短期紧急负载时，持续时间通常为数小时，短期内必须牺牲一部分绝缘寿命提高变压器的载荷能力。因此，变压器短期动态载荷能力评估可以提升日累积寿命损失阈值。

假设区域内有两台变压器 T_1 、 T_2 ，其中 T_1 因监测数据异常需要停运检修，计划从 09:00—21:00，历经 12h。当 T_1 退出运行时，评估该时段 T_2 的负载能力，使得系统在安全稳定运行的前提下尽可能地保证供电量。

以图 5(b)夏季典型负荷曲线 1 为基础载荷开展分析, 图 8、图 9 给出了短期动态载荷能力评估曲线及对应的热点温度和寿命损失变化。

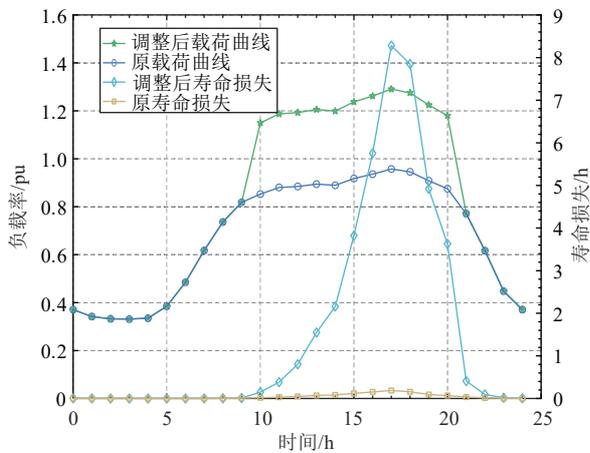


图 8 短期动态载荷能力评估结果
Fig. 8 Short-term DTR assessment results

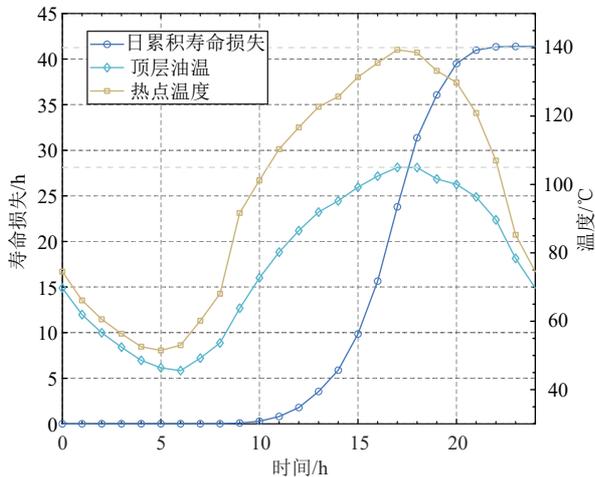


图 9 短期热点温度及顶层油温变化
Fig. 9 Short-term hot spot temperature and top oil temperature change

结果表明: 评估时间内平均负载率为 1.24pu, 较之前平均增加 0.35pu。变压器可承受的最大负载率为 1.28pu, 比额定负载能力高出 28%, 较之前提升 1.34 倍。短期内对应的热点温度迅速增加, 最高达 139.12℃, 累积寿命损失为 41.47h, 与正常周期性负载运行的 3.31h 增加了 38.16h。 T_1 恢复运行后, 该变压器正常运行 2 日后即可完成寿命损失的补偿。

上文分析认为, 辅助设备最大允许电流可能成为限制变压器动态载荷能力的主要因素, 接下来在短时动态载荷能力评估的应用场景中进行进一步分析。考虑负荷曲线的近似性, 以图 5(b)夏季负荷聚类 3 作为输入, 环境温度曲线对应冬季最低及夏季最高的两类极限工况, 约束条件保持一致, 评估时间段假设为图 10 纵坐标中的不同持续时间的 5 类时间段。图 10 给出了动态载荷能力评估结果对

比, 可以看出, 同时满足其它约束条件的情况下, 冬季变压器运行环境温度较低, 可承受的最大载荷值高, 均达到了辅助设备最大允许电流 1.5pu 的阈值, 结合文献[28]的调研分析可以看出, 辅助设备最大允许电流可能低于 1.5pu, 因此, 在冬季辅助设备最大允许电流更容易成为限制变压器动态载荷能力的瓶颈点。

对比冬季和夏季的最大载荷能力还可以看出: 环境温度越低, 变压器所能承受的载荷能力越高; 评估时段的平均负载率越接近额定值时, 对应时段的最大载荷能力会越低, 分别对应图 10 的 2~4h、10~13h; 如果评估时段的峰谷差越大, 对应时段的最大载荷能力越低, 分别对应图 10 的 2~4h、2~7h、2~9h 或 10~13h、10~17h。因此, 变压器需停运检修或短期动态增容, 可优先选择负载率较低的时间段或者峰谷差较大的时间段。负荷曲线的平均负载率及峰谷差对变压器动态载荷能力影响的具体规律在后续研究中会进一步开展。

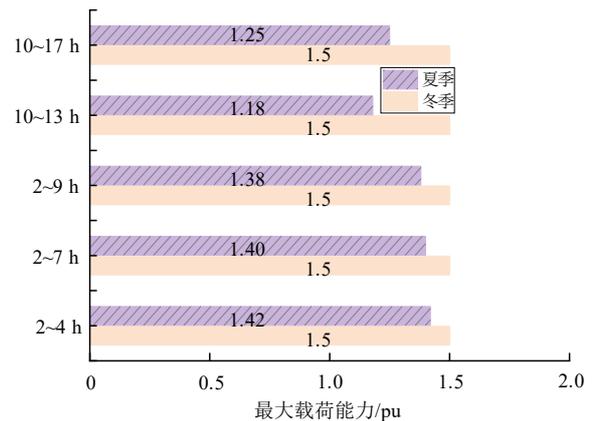


图 10 不同时间段下动态载荷能力评估结果对比
Fig. 10 Comparison of DTR assessment results under different time periods

5 结论

本文利用油浸式电力变压器绕组热点温度的实测数据, 优化了热参数并改进了动态温升估算模型, 提高了模型对负荷多变工况下的热点温度估算精度。在此基础上基于负荷相似性这一特征, 提出了考虑负荷循环加载的变压器的动态载荷能力评估方法, 可以为变压器未来的负荷优化管理提供参考。主要结论如下:

1) 和 GB/T 1094.7—2008(对应 IEC 60076—7)相比, 采用改进的热点温度估算模型及优化后的热参数, 热点温度估算结果精度更高, 平均相对误差减少 3.62%。

2) 变压器运行环境温度较高时, 正常周期性

动态载荷能力评估的主要限制因素是日累积寿命损失；短期载荷能力的限制因素可能是顶层油温；当环境温度较低时，动态载荷能力评估主要限制因素为辅助设备的最大允许电流。

3) 在周期性动态载荷能力评估中，该变压器夏季可承受的最大负载率为1.41pu，冬季为1.50pu，分别比其额定负载能力高出41%和50%，表明变压器仍有较大的负荷潜力。

因此开展变压器动态载荷能力评估，可以更好的发挥变压器载荷能力，提高变压器运维管理水平。需要指出，本文中优化的热参数适用于具有相同热设计的变压器，然而，本文提出的方法适用于不同设计结构的变压器；其次，在动态载荷能力评估方面，变压器的热老化健康状态也会影响变压器的动态载荷能力，仍有待后续研究。

附录见本刊网络版(<http://www.dwjs.com.cn/CN/1000-3673/current.shtml>)。

参考文献

- [1] 尹积军, 夏清. 能源互联网形态下多元融合高弹性电网的概念设计与探索[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 486-496.
YIN Jijun, XIA Qing. Conceptual design and exploration of multi-factor integrated high-elastic power grid in energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 486-496(in Chinese).
- [2] 马爱清, 张杨欢, 吕江平, 等. 首条国产公里级高温超导电缆输电特性分析[J]. 电网技术, 2022, 46(3): 1206-1213.
MA Aiqing, ZHANG Yangchuan, LÜ Jiangping, et al. Transmission characteristics analysis of first domestic km-level HTS cables[J]. Power System Technology, 2022, 46(3): 1206-1213(in Chinese).
- [3] 董旭柱, 张琛, 阮江军, 等. 油浸式电力变压器动态载荷评估技术研究与应用[J]. 高电压技术, 2021, 47(6): 1959-1968.
DONG Xuzhu, ZHANG Chen, RUAN Jiangjun, et al. Research and practices of dynamic thermal rating for oil-immersed power transformer[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(6): 1959-1968(in Chinese).
- [4] 文正其, 卢文华, 杜振波, 等. 油浸式非晶合金配电变压器过载能力核算方法研究[J]. 高压电器, 2016, 52(11): 102-106.
WEN Zhengqi, LU Wenhua, DU Zhenbo, et al. Overload capability calculation for oil-immersed amorphous alloy transformers[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(11): 102-106(in Chinese).
- [5] 陈晴, 吴国忠, 孙翔. 提高500kV大型变压器过载能力的研究[J]. 机电工程, 2010, 27(12): 94-97.
CHEN Qing, WU Guozhong, SUN Xiang. Research of 500 kV high-capacity transformer's overload capacity improvement[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2010, 27(12): 94-97(in Chinese).
- [6] DONG Ming. A data-driven long-term dynamic rating estimating method for power transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(2): 686-697.
- [7] GÓMEZ A M, MOROZOVSKA K, LANERYD T, et al. Optimal sizing of the wind farm and wind farm transformer using MILP and dynamic transformer rating[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 136: 107645.
- [8] SHAHBAZI B, SAVAGHEBI M, SHARIATI M. A probabilistic approach for power transformer dynamic loading capability assessment[J]. International Review of Electrical Engineering, 2010, 5(3): 952-960.
- [9] BRACALE A, CARPINELLI G, DE FALCO P. Probabilistic risk-based management of distribution transformers by dynamic transformer rating[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2019, 113: 229-243.
- [10] BRACALE A, CARAMIA P, CARPINELLI G, et al. SmarTrafo: a probabilistic predictive tool for dynamic transformer rating[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(3): 1619-1630.
- [11] ZAREI T, MOROZOVSKA K, LANERYD T, et al. Reliability considerations and economic benefits of dynamic transformer rating for wind energy integration[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2019, 106: 598-606.
- [12] ROCHA O D A, MOROZOVSKA K, LANERYD T, et al. Dynamic rating assists cost-effective expansion of wind farms by utilizing the hidden capacity of transformers[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 123: 106188.
- [13] 章禹, 何迪, 许奕斌, 等. 计及综合风险的油浸式变压器短期增容决策方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(13): 86-91, 118.
ZHANG Yu, HE Di, XU Yibin, et al. Short-term capacity increasing decision method for oil-immersed transformer considering comprehensive risk[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(13): 86-91, 118(in Chinese).
- [14] IEC. Power transformers-part 7: loading guide for oil-immersed power transformers: IEC 60076-7: 2005[S]. Geneva: IEC, 2005.
- [15] IEEE. IEEE guide for loading mineral-oil-immersed transformers and step-voltage regulators: C57.91-2011[S]. New York: IEEE, 2012.
- [16] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 电力变压器 第7部分: 油浸式电力变压器负载导则: GB/T 1094.7-2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [17] 李元, 刘宁, 梁钰, 等. 基于温升特性的油浸式变压器负荷能力评估模型[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(22): 6737-6745.
LI Yuan, LIU Ning, LIANG Yu, et al. A model of load capacity assessment for oil-immersed transformer by using temperature rise characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(22): 6737-6745(in Chinese).
- [18] 李永建, 闫鑫笑, 张长庚, 等. 基于磁-热-流耦合模型的变压器损耗计算和热点预测[J]. 电工技术学报, 2020, 35(21): 4483-4491.
LI Yongjian, YAN Xinxiao, ZHANG Changgeng, et al. Numerical prediction of losses and local overheating in transformer windings based on magnetic-thermal-fluid model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(21): 4483-4491(in Chinese).
- [19] GAO Yuan, PATEL B, LIU Qiang, et al. Methodology to assess distribution transformer thermal capacity for uptake of low carbon technologies[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2017, 11(7): 1645-1651.
- [20] FENG Dongyin, WANG Zhongdong, JARMAN P. Evaluation of power transformers' effective hot-spot factors by thermal modeling of scrapped units[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(5): 2077-2085.
- [21] ALVAREZ D L, RIVERA S R, MOMBELLO E E. Transformer thermal capacity estimation and prediction using dynamic rating

- monitoring[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(4): 1695-1705.
- [22] LIU Yunpeng, LI Xinyue, LI Huan, et al. Spatially continuous transformer online temperature monitoring based on distributed optical fibre sensing technology[J]. High Voltage, 2022, 7(2): 336-345.
- [23] DENG Yongqing, RUAN Jiangjun, QUAN Yu, et al. A method for hot spot temperature prediction of a 10 kV oil-immersed transformer[J]. IEEE Access, 2019, 7: 107380-107388.
- [24] 骆小满, 阮江军, 邓永清, 等. 基于多物理场计算和模糊神经网络算法的变压器热点温度反演[J]. 高电压技术, 2020, 46(3): 860-866.
LUO Xiaoman, RUAN Jiangjun, DENG Yongqing, et al. Transformer hot-spot temperature inversion based on multi-physics calculation and fuzzy neural network algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(3): 860-866(in Chinese).
- [25] HILL J, WANG Zhongdong, LIU Qiang, et al. Analysing the power transformer temperature limitation for avoidance of bubble formation [J]. High Voltage, 2019, 4(3): 210-216.
- [26] 孙玉芹, 王松雷, 黄冬梅, 等. 考虑簇间重叠关系的负荷曲线多重聚类集成算法[J]. 电网技术, 2022, 46(5): 1982-1989.
SUN Yuqin, WANG Songlei, HUANG Dongmei, et al. Multiple clustering integration algorithm for load curves considering overlapping relationships between clusters[J]. Power System Technology, 2022, 46(5): 1982-1989(in Chinese).
- [27] 白雅玲, 周亚同, 刘君. 基于深度卷积嵌入聚类的日负荷曲线聚类分析[J]. 电网技术, 2022, 46(6): 2104-2113.
BAI Yaling, ZHOU Yatong, LIU Jun. Clustering analysis of daily load curve based on deep convolution embedding clustering[J]. Power System Technology, 2022, 46(6): 2104-2113(in Chinese).
- [28] 陈晴. 提高大型变压器过载能力的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.



张琛

在线出版日期: 2024-05-08。

收稿日期: 2023-07-04。

作者简介:

张琛(1990), 男, 博士研究生, 研究方向为电力设备动态载荷能力评估及多物理场仿真计算, E-mail: zhangchen@whu.edu.cn;

董旭柱(1970), 男, 通信作者, 教授, 博士生导师, 研究方向为设备资产管理、智能电网等, E-mail: dongxz@whu.edu.cn;

阮江军(1968), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电气设备状态诊断、电磁多物理场耦合计算等, E-mail: ruan308@126.com。

(编辑 李健一)

附录 A

试验时的负载率及对应的环境温度、顶层油温及绕组热点温度的实测值变化曲线如图 A1 所示，其中采集时各数据的时间分辨率为 1min。

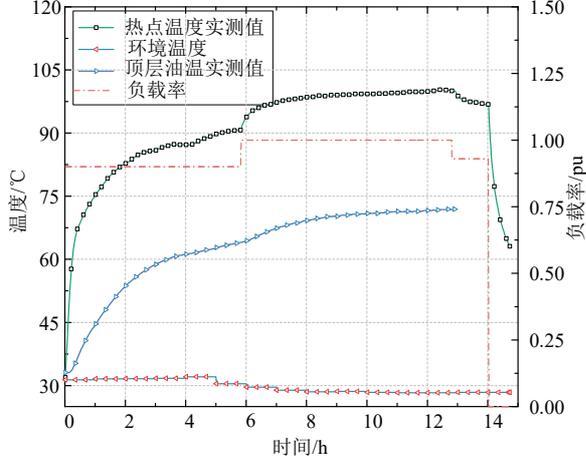


图 A1 多阶段温升试验数据

Fig. A1 Multi-stage temperature rise test data

附录 B

本文采用 L-M(Levenberg-Marquardt, L-M)算法结合方法 2 获取的数据对热点温度估算模型中的热参数进行寻优。估算热参数的具体过程为

1) 确定包含变压器特性参数及时间变量 t 的热点温度表达式 $\theta_{hst}(t)=f(t, \alpha)$ ，其中 α 为参数向量，即 $\alpha=(k_{11}, k_{21}, k_{22}, \tau_o, \tau_w, x, y)$ ，将热点温度实测值作为输入，即 (t_i, θ_{hsti}) ， $i=1, 2, \dots, n$ 。本文中 0-6 h 对应的热点温度数据作为输入。

2) 给定参数向量的初值 α_0 ，阻尼因子 λ ，阻尼系数 β 和迭代终止条件 ε 。

3) 确定残差平方和： $E(\alpha)=\sum_{i=1}^n [\theta_{hsti}-f(t_i, \alpha)]^2$ 。

4) 计算雅克比矩阵 $J(\alpha_k)$ ，构造增量方程并求解：

$$J(\alpha_k) = \begin{bmatrix} \frac{\partial E(\alpha_k)}{\partial k_{11}} & \frac{\partial E(\alpha_k)}{\partial k_{21}} & \frac{\partial E(\alpha_k)}{\partial k_{22}} \\ \frac{\partial E(\alpha_k)}{\partial \tau_o} & \frac{\partial E(\alpha_k)}{\partial \tau_w} & \frac{\partial E(\alpha_k)}{\partial x} & \frac{\partial E(\alpha_k)}{\partial y} \end{bmatrix}^T$$

5) 迭代终止判断：第 k 次迭代后，若 $E(\alpha_k) < \varepsilon$ ，则停止迭代，并输出 $\alpha_k=(k_{11}, k_{21}, k_{22}, \tau_o, \tau_w, x, y)$ ；否则，以 α_{k+1} 作为初值重新估算，直至满足条件。其中 α_{k+1} 的确定方法为

$$\textcircled{1} \alpha_{k+1} = \alpha_k - [\nabla^2 E(\alpha) + \lambda I]^{-1} J(\alpha_k),$$

式中： $\nabla^2 E(\alpha)$ 是海森矩阵， I 为单位矩阵， $J(\alpha_k)$ 是残差平方和 $E(\alpha)$ 对参数向量 α_k 的雅克比矩阵。

②若 $E(\alpha_{k+1}) > E(\alpha_k)$ ，则 $\alpha_{k+1} = \alpha_k$ ， $\lambda = \lambda \times \beta$ ；否则令 $k=k+1$ ， $\lambda = \lambda / \beta$ 重新进入(3)。

附录 C

图 C1 给出了 2.2 节中步骤 3—步骤 6 给定一组典型的负荷曲线时的评估示意。

首先确定初始负荷曲线，即图 5(a)负载率最低的曲线，设置循环加载因子 $C=1$ 对曲线各点进行倍增或者倍减。其次对热点温度、顶层油温等进行估算，并判断其最大值是否越限，未满足任意阈值时， C 按步长 0.1 增或减，对热点温度、顶层油温等循环迭代估算，从图 C1 可以看出，顶层油温、热点温度、辅助设备最大允许电流尚未达到阈值时，日累积寿命损失先达到 24h 的约束，评估结束，即可确定最终的变压器动态载荷曲线，最大载荷能力及载荷限制因素等。

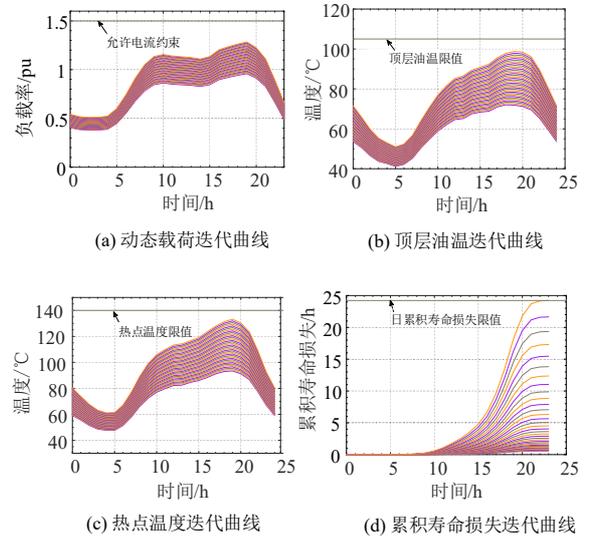


图 C1 评估方法迭代过程示意

Fig. C1 Illustration of the iterative process of the assessment method

附录 D

图 D1 给出了文中 3.2 节各季节负荷数据聚类的 SSE 变化曲线。可以看出聚类数为 1 和 2 时候，变化幅度较大，聚类数达到 3 时 I_{SSE} 趋于稳定。因此选择最佳聚类数为 3。

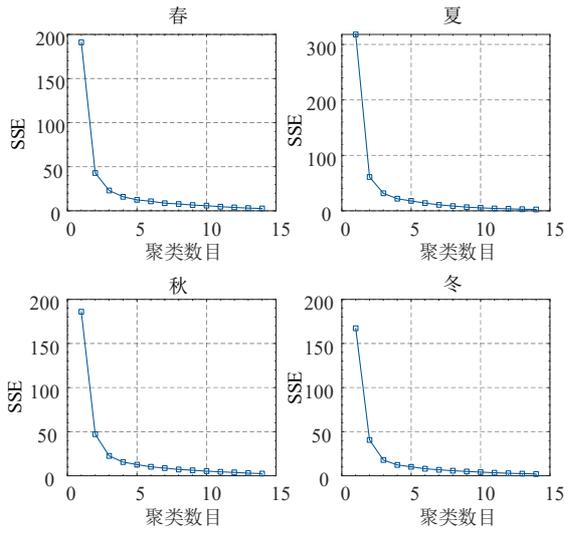


图 D1 聚类有效性指标误差平方和的变化
Fig. D1 Cluster effectiveness metric error change