

采用热路模型参数辨识的油浸式配电变压器绕组温升预测方法

温国豪¹, 李佳玲², 张凡¹, 张贺斌¹, 陈泓韬³, 郑志曜², 于丛维², 胡于家², 汲胜昌¹

(1. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 710049, 西安;

2. 浙江华电器材检测研究院有限公司, 310022, 浙江杭州;

3. 南京工程学院, 210000, 南京)

摘要: 为解决油浸式配电变压器温升时间长、效率低的问题, 提出了一种采用热路模型参数辨识预测油浸式配电变压器绕组温升的方法。基于热电类比原理, 构建包含铁心和高低压绕组损耗的油浸式配电变压器五阶热路模型。为获得热路参数, 该研究引入扩展卡尔曼滤波算法, 结合五阶热路模型并利用 2 h 实测数据, 实现对热路参数的动态辨识。通过数值求解计算油顶层、高低压绕组温升曲线, 实现温升预测的目的。研究结果表明: 辨识得到 400 kVA 变压器的低压绕组、高压绕组、油和油箱的热容分别约为 66.1、110.1、255.7 和 125.6 $\text{kJ}\cdot\text{K}^{-1}$, 低压绕组-油、高压绕组-油、油-油箱、油箱-空气的热阻分别约为 8.76 $\text{mK}\cdot\text{W}^{-1}$ 、6.61 $\text{mK}\cdot\text{W}^{-1}$ 、0.56 $\text{mK}\cdot\text{W}^{-1}$ 和 10.96 $\text{mK}\cdot\text{W}^{-1}$, 各参数波动范围小于 10%; 高压绕组-油热阻随变压器容量的提高显著降低, 400 kVA 时为 6.61 $\text{mK}\cdot\text{W}^{-1}$, 800 kVA 时降至 4.00 $\text{mK}\cdot\text{W}^{-1}$; 额定损耗功率下, 400 kVA、630 kVA 及 800 kVA 变压器顶层油稳态温升预测的相对误差最大值为 4.86%, 最大绝对误差为 2.6 K; 基于不同损耗功率下的预测结果表明, 1 倍总损耗功率下的预测精度低于 2 K, 0.5 倍总损耗功率下参数在低温升下的非线性偏移, 误差增至 7.3 K。所提出的方法可用于油浸式配电变压器温升的快速检测与评估。

关键词: 油浸式配电变压器; 五阶热路模型; 扩展卡尔曼滤波; 温升预测

中图分类号: TM411+.2 **文献标志码:** A

DOI: **文章编号:**

A Winding Temperature Rise Prediction Method for Oil-Immersed Distribution Transformers by Using Thermal Circuit Model Parameter Identification

WEN Guohao¹, LI Jialing², ZHANG Fan¹, ZHANG Hebin¹, CHEN Hongtao³, ZHENG Zhiyao², YU Congwei², HU Yujia², JI Shengchang¹

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation of Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Zhejiang Huadian Equipment Testing and Research Institute Co. Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310022, China;

3. Nanjing Institute of Technology, Nanjing 210000, China)

Abstract: To address the issues of prolonged temperature rise and low efficiency in oil-immersed distribution transformers, a method is proposed that employs thermal path model parameter identification to predict the winding temperature rise of oil-immersed distribution transformers. Based on the thermoelectric analogy principle, a fifth-order thermal circuit model for oil-immersed distribution transformers incorporating core and high/low-voltage winding losses is constructed. To obtain thermal path parameters, this study introduced an extended Kalman filter algorithm. Combined with a fifth-order thermal path model and utilizing two hours of actual measurement data, it achieved dynamic identification of thermal path parameters. The temperature rise curves for the oil top layer and the high/low-voltage windings are calculated using numerical solutions, thereby achieving the goal of temperature rise prediction. The extant research findings indicate the following: The identified thermal capacities of the low-voltage winding, high-voltage winding, oil, and oil tank for a 400 kVA transformer are approximately 66.1 $\text{kJ}\cdot\text{K}^{-1}$, 110.1 $\text{kJ}\cdot\text{K}^{-1}$, 255.7 $\text{kJ}\cdot\text{K}^{-1}$, and 125.6 $\text{kJ}\cdot\text{K}^{-1}$, respectively. The thermal resistances between the low-voltage winding-oil, high-voltage winding-oil, oil-oil tank, and tank-to-air thermal resistance are approximately 8.76 $\text{mK}\cdot\text{W}^{-1}$, 6.61 $\text{mK}\cdot\text{W}^{-1}$, 0.56 $\text{mK}\cdot\text{W}^{-1}$, and 10.96 $\text{mK}\cdot\text{W}^{-1}$ respectively, with parameter fluctuations less than 10%. The oil thermal resistance

收稿日期: 2025-7-21。作者简介: 温国豪 (1999—), 男, 硕士生; 张凡 (通信作者), 男, 副教授, 博士生导师。陕西省重点研发计划资助项目 (2023GXLH-014)

网络出版时间: 网络出版地址:

of high-voltage windings decreases significantly with increasing transformer capacity, dropping from $6.61 \text{ mK} \cdot \text{W}^{-1}$ at 400 kVA to $4.00 \text{ mK} \cdot \text{W}^{-1}$ at 800 kVA. At rated loss power, the maximum relative error in predicting the steady-state temperature rise of the top oil layer for 400 kVA, 630 kVA, and 800 kVA transformers is 4.86%, with a maximum absolute error of 2.6 K. The prediction results under varying loss power conditions suggest that the prediction accuracy is less than 2 K at 1 times total loss. At 0.5 times total loss, the nonlinear offset of parameters under low temperature rise increases the error to 7.3 K. The proposed method has the potential for application in the rapid detection and evaluation of temperature rise in oil-immersed distribution transformers.

Keywords: oil-immersed distribution transformer; fifth-order thermal circuit model; extended kalman filter; temperature rise prediction

温升试验是评估配电变压器热性能的关键手段,在变压器设计与考核中具有不可替代的作用。传统温升试验通常需要持续数十小时,耗时耗能,制约现场快速试验的开展,亟需提出高效温升试验与热性能评估方法。

目前油浸式配电变压器热性能评估主要依赖数值仿真^[1-2]、等效热路模型和直接测温技术。数值仿真虽然能够获得详细的温度分布云图,但要求解复杂的流体动力学方程,单次瞬态仿真计算耗时可达 6~8 h,且模型精度高度依赖于绕组结构、油道布置等参数,仅适用于产品设计阶段^[3-5]。等效热路模型因其物理意义明确、计算效率高的特点,在工程实践中得到广泛应用。一阶热路模型将油-空气之间的热传递等效为热容、热阻电路的响应,虽然计算速度极快但只能反映油温,无法计算绕组温度^[6-7];三阶热路模型可以计算铁心、绕组和顶层油温,但无法区分多个线圈的温度^[8];热网络模型虽可以实现绕组区域的整体计算,但热阻热容参数极多,参数获取难度大^[9-11]。以热电阻为测量原理的直接测温技术仅能实现油温监测,无法获得绕组温度^[12-15]。

针对快速温升检测需求和现有评估方法的瓶颈,本文构建了计及铁心损耗和绕组损耗的五阶热路模型,基于扩展卡尔曼滤波算法对 2 h 实测数据进行热路模型热容、热阻参数辨识,最后计算得出油顶层、高低压绕组温升曲线,从而实现油浸式配电变压器稳态温升预测。研究成果可指导油浸式变压器绕组温升的快速检测。

1 热路模型参数辨识与绕组温升预测

1.1 油浸式配电变压器的五阶热路模型

配电变压器铁心和绕组的损耗发热经固体传至其表面,引起温度上升^[16-18]。绝缘油受热后通过传导和对流将热量从变压器内部传至油箱和散热片,再通过通过对流散热和辐射将热量传递给周围空气^[19-22]。根据上述物理过程,将变压器高低压绕组损耗和空载损耗视为 3 个理想热源,将环境温度类比为一个理想温度源,变压器铁心、绕组、油、外界空气之间

的热量传递类比于电路的电阻与电容^[23-25],本文创新性构建变压器的五阶热路模型,如图 1 所示,红色虚线区域表示热源区。其中, Q_C 、 Q_L 、 Q_H 分别为变压器铁心、低压绕组和高压绕组损耗; C_C 、 C_L 、 C_H 、 C_O 、 C_T 分别为铁心、低压绕组、高压绕组、油和油箱的等效热容; R_{C-O} 、 R_{L-O} 、 R_{H-O} 、 R_{O-T} 、 R_{T-A} 分别表示铁心-油、低压绕组-油热阻、高压绕组-油、油-油箱间的热阻以及油箱-环境之间的等效热阻; T_C 、 T_L 、 T_H 、 T_O 、 T_T 、 T_A 分别表示变压器铁心、低压绕组平均温度,高压绕组平均温度、顶层油温、油箱和环境温度。

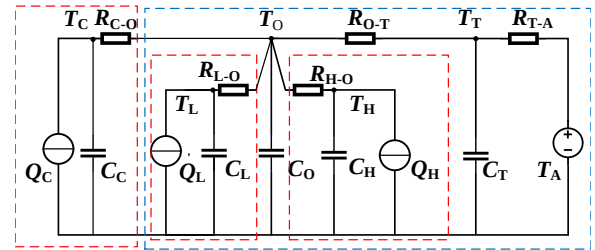


图 1 油浸式配电变压器的五阶热路模型

Fig. 1 Fifth-order thermal circuit model of oil-immersed transformers

由上述热路模型,可列写为以下微分方程组

$$C_C \frac{dT_C}{dt} + \frac{T_C - T_O}{R_{C-O}} = Q_C \quad (1)$$

$$\frac{T_O - T_C}{R_{C-O}} + C_O \frac{dT_O}{dt} + \frac{T_O - T_T}{R_{O-T}} + \frac{T_O - T_L}{R_{L-O}} + \frac{T_O - T_H}{R_{H-O}} = 0 \quad (2)$$

$$C_L \frac{dT_L}{dt} + \frac{T_L - T_O}{R_{L-O}} = Q_L \quad (3)$$

$$C_H \frac{dT_H}{dt} + \frac{T_H - T_O}{R_{H-O}} = Q_H \quad (4)$$

$$C_T \frac{dT_T}{dt} + \frac{T_T - T_A}{R_{T-A}} + \frac{T_T - T_O}{R_{O-T}} = 0 \quad (5)$$

高低压绕组损耗是电阻损耗及涡流损耗之和,其中 Y 或 YN 联结组电阻损耗为

$$P = 1.5 I_r^2 R_n \quad (6)$$

D 联结组电阻损耗为

$$P = 4.5I_r^2 R_n \quad (7)$$

式中: P 为绕组的电阻损耗; I_r 为绕组的额定电流; R_n 为直流电阻。涡流损耗^[26]为

$$Q_a = \frac{\omega^2 B_a^2 t_a^2}{24\rho} \quad (8)$$

式中: Q_a 为绕组轴向涡流损耗; ω 为磁场角频率; B_a 分别为轴向磁通密度峰值; t_a 为电磁线轴向尺寸; ρ 为电阻率。高低压绕组损耗正比于直阻损耗, 占总负载损耗的比例为

$$Q_H = \frac{P_H}{P_H + P_L} Q_w, \quad Q_L = \frac{P_L}{P_H + P_L} Q_w \quad (9)$$

式中: Q_H 和 Q_L 分别为高低压绕组的负载损耗; Q_w 为总负载损耗; P_H 和 P_L 分别为高低压绕组的电阻损耗。

由上面的推导过程可知, 油浸式变压器的温升是一个以 Q_C 、 Q_L 、 Q_H 及环境温度 T_A 为输入, 以铁心、绕组和油温为输出的系统, 在已知热路模型集总参数和各温度节点初值的前提下, 可通过求解上述微分方程组获得温升曲线和稳态温度。文献[27-30]给出了通过传热学理论及相关工程经验、相似准则计算热容热阻参数, 但由于变压器内部结构复杂、各部件对流换热系数、特征尺寸等难以直接获得, 造成 C_L 、 C_H 、 C_o 、 C_T 、 R_{H-O} 、 R_{L-O} 、 R_{O-T} 、 R_{T-A} 计算精度低, 温升计算误差大。

1.2 参数辨识方法

卡尔曼滤波^[31-33]是一种基于状态空间模型的最优估计算法, 通过对观测数据以及状态预测数据进行加权, 实现复杂系统和高斯噪声环境下状态预测。扩展卡尔曼滤波将非线性系统在当前估计点附近局部线性化后再应用卡尔曼滤波进行处理, 其核心方程为

$$\mathbf{x}_k = f(\mathbf{x}_{k-1}, \mathbf{u}_k) \quad (10)$$

$$\mathbf{P}_k = \mathbf{F}_k \mathbf{P}_{k-1} \mathbf{F}_k^T + \mathbf{Q}_k \quad (11)$$

$$\mathbf{K}' = \mathbf{P}_k \mathbf{H}_k^T (\mathbf{H}_k \mathbf{P}_k \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k)^{-1} \quad (12)$$

$$\mathbf{x}_k' = \mathbf{x}_k + \mathbf{K}' (\mathbf{z}_k - \mathbf{h}(\mathbf{x}_k)) \quad (13)$$

$$\mathbf{P}_k' = \mathbf{P}_k - \mathbf{K}' \mathbf{H}_k \mathbf{P}_k \quad (14)$$

式(10)、(11)为预测公式, 式(12)、(13)、(14)为更新公式; $\mathbf{x}_k$ 为 k 时刻的状态向量, 即热容热阻参数; $\mathbf{F}_k$ 为状态转移矩阵; $\mathbf{u}_k$ 为控制向量; $\mathbf{K}'$ 为卡尔曼增益矩阵, 权衡预测和实测数据, 从而更新得到最优数据; $\mathbf{P}_k$ 为状态向量的协方差矩阵; $\mathbf{Q}_k$ 为预测

状态的高斯噪声协方差矩阵, 用以衡量模型的精确度, 预测模型越精确其值越小; $\mathbf{z}_k$ 为观测值; $\mathbf{H}_k$ 为转换矩阵, 将 $\mathbf{x}_k$ 映射到 $\mathbf{z}_k$ 中; $\mathbf{R}_k$ 为测量值的高斯噪声协方差矩阵; f 与 h 函数分别对应着 $\mathbf{F}_k$ 与 $\mathbf{H}_k$ 的雅各比矩阵。与标准卡尔曼滤波相比, 扩展卡尔曼滤波的状态转移矩阵和观测矩阵都是状态信息的雅克比矩阵。

利用扩展卡尔曼滤波算法, 将未知的热容热阻参数作为状态向量的一部分, 计算各个节点的温度响应, 利用实测的油温数据修正热容、热阻参数, 具体步骤如下。

步骤 1 输入温度初值、时间、功率, 根据测得的绕组直阻和负载电流计算绕组总损耗, 再根据式(9)计算获得高低压绕组损耗。

步骤 2 设置扩展卡尔曼滤波器的初始状态、过程噪声协方差矩阵 $\mathbf{Q}_k$ 和观测噪声方差矩阵 $\mathbf{R}_k$ 。 $\mathbf{Q}_k$ 矩阵表征系统模型的不确定性, 包括参数时变特性和线性化误差等因素, 设为对角矩阵以体现状态变量噪声的独立性。 $\mathbf{R}_k$ 反映测量噪声, 其取值为传感器精度的平方。

步骤 3 定义观测矩阵 $\mathbf{H}_k$, 这里由于观测值可以被直接映射为模型预测值, 且仅有顶层油温被观测, 故将 $\mathbf{H}_k$ 设置为 $[0 \ 0 \ 1 \ 0 \ \text{zeros}(1,8)]$, $\text{zeros}(1,8)$ 表示一个 1 行 8 列的全零行向量。

步骤 4 进行卡尔曼滤波主循环, 主要包括预测、更新两个步骤, 通过前一时刻的修正预测值得到此时刻的先验预测值, 观测值与先验预测值经由卡尔曼系数加权得到此时刻的修正预测值, 如此往复, 使得状态向量趋于最优, 且待辨识的参数逐渐收敛。循环过程如下:

利用欧拉离散化将连续微分方程转为离散形式, 引入顶层油温观测值与最优估计值之间的残差, 利用残差控制参数的变化。通过式(12)、(13)、(14)实现状态向量及其协方差矩阵的更新。

雅各比矩阵的第 i 列是 $f(x)$ 对 x_i 的偏导数, 通过中心差分近似为

$$\frac{\partial f}{\partial x_i} \approx \frac{f(x + \varepsilon e_i) - f(x)}{\varepsilon} \quad (15)$$

式中: e_i 是第 i 个单位向量, ε 为扰动步长, 其值为 $1e^{-6}$ 。

最后调用状态转移方程、雅各比矩阵计算, 补充预测状态变量的协方差矩阵。

1.3 温升计算方法

在已知热路模型的热容和热阻参数、输入功率以及各个节点温度初值的基础上,利用 Matlab 的 ODE45 求解器计算式(1)~式(5)对应的各个节点的温度曲线。通过差分法计算各节点温度梯度(dT/dt),当顶层油温度连续 3 小时小于 1 K/h 时触发稳态终止条件,停止计算。输出温度预测曲线(包括高低压绕组温度及顶层油温),并与实测温升曲线作对比,计算稳态温度误差并结束计算。

基于上述的参数辨识和温升计算方法可以计算任意功率输入下变压器的温度响应曲线和稳态温升。

2 试验验证

2.1 温升试验平台及试验方法

采用的温升试验平台如图 2 所示,通过短路电流法进行,将被试变压器的低压侧端子 a、b、c 短接,高压侧端子 A、B、C 连接调压器 T1 供电进行温升试验。试验电源与电网相连,调压器改变被试变压器的电压、电流,电压、电流互感器(TV、TA)的测量精度均为 0.2 级,功率测量误差 $\leq \pm 0.5\%$ 。采用 K 型热电偶温度传感器测定温升试验数据,热电偶的测量精度为 ± 0.2 K,显示终端测量分辨率为 0.01 K,测量范围为-213 K~373 K。

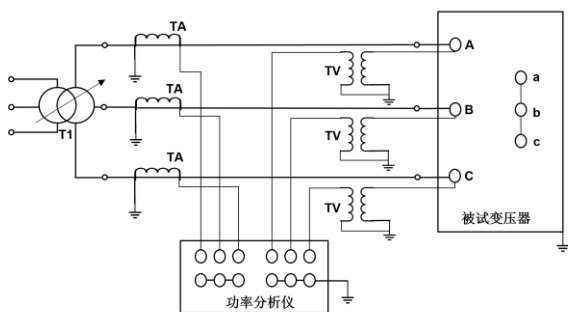


图 2 配电变压器温升试验平台的原理图

Fig. 2 Schematic of the temperature-rise test platform of distribution transformers.

试验共布置 9 个温度测点,如图 3 所示。4 个环境温度测点,分布于试验变压器四周,取其平均即视为实测环境温度;4 个散热片测点,分别置于变压器前后面的散热片上下两端,取其平均得到油平均温度;1 个顶层油温度测点位于变压器进油口,该测点测量得到的温度即为顶层油实测温度值。为了使参数辨识结果准确度更高,温度采集间隔为 1 min。

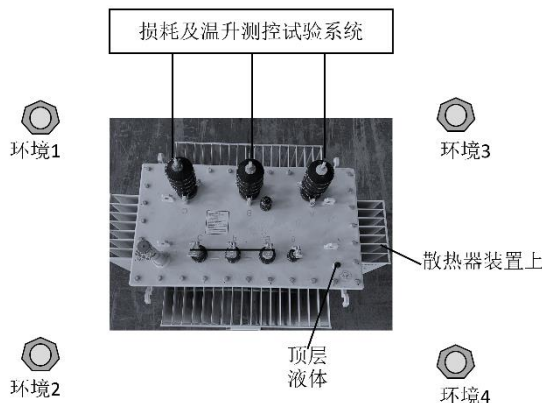


图 3 温度传感器的测量位置

Fig. 3 Location of the temperature sensors.

试验分为施加总损耗和施加额定电流两个阶段。当顶层油温度变化率至少连续 3 h 小于 1 K/h,由总损耗阶段转为额定电流阶段。此后,每 1 分钟要记录顶层油温度、外部冷却介质温度,试验进行 1 小时后,迅速断开电源,并拆除短路连接线,测量高低压绕组电阻,通过测得的绕组电阻数据计算被试变压器高低压绕组平均温升。直流电阻的测量精度为:高压($1 \pm 0.2\%$) $\mu\Omega$; 低压($0.2 \pm 0.2\%$) $\mu\Omega$,最小分辨率为 0.1 $\mu\Omega$ 。

利用该平台对来自不同厂家相同容量的 400 kVA、630 kVA 和 800 kVA 各 3 台共计 9 台配电变压器温升特性进行试验和预测。变压器损耗及典型高低压绕组直流电阻如表 1 所示,高低压绕组均采用层式线圈。

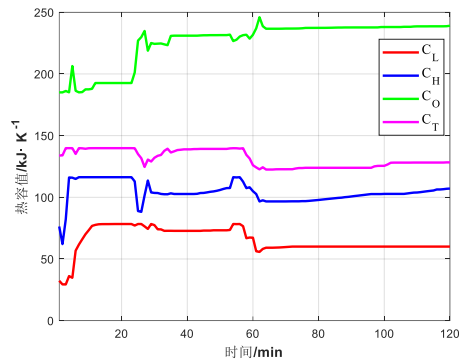
表 1 变压器损耗与绕组直流电阻
Table 1 Transformer losses and winding DC resistance

型号	容量/kVA	负载损耗/kW	空载损耗/kW	高压直流电阻/ Ω	低压直流电阻/m Ω
S20-M-400/10	400	3.615	0.37	3.312	1.494
S20-M-630/10	630	4.96	0.6	1.771	8.087
S20-M-800/10	800	6.0	0.63	1.483	4.641

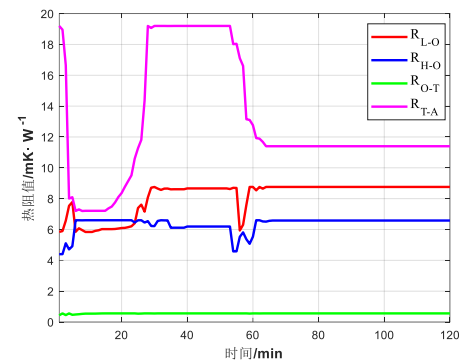
2.2 热路模型参数辨识结果

2.2.1 400kVA 变压器的热容、热阻

根据前文所述的参数辨识方法,对正常温升前 2h 的数据进行热路模型参数辨识,获得辨识过程中的参数及结果如图 4 所示。



(a) 热容参数随时间变化



(b) 热阻参数随时间变化

图 4 400 kVA 容量变压器热容、热阻参数辨识过程
Fig. 4 400 kVA capacity transformer temperature parameter identification process

由图 4 可知，经过 120 min 的辨识过程，变压器热路模型中的热容参数和热阻参数均随时间不断修正且趋向稳定值，后期参数波动低于 5%。以此得到 3 台 400 kVA 容量变压器热容和热阻参数辨识结果如表 2 和表 3 所示。

表 2 3 台 400 kVA 容量变压器热容参数辨识结果
Table 2 Results of thermal capacity parameter identification for three 400 kVA-capacity transformers

序号	$C_H /$ ($\text{kJ}\cdot\text{K}^{-1}$)	C_L / $(\text{kJ}\cdot\text{K}^{-1})$	$C_O /$ ($\text{kJ}\cdot\text{K}^{-1}$)	$C_T /$ ($\text{kJ}\cdot\text{K}^{-1}$)
第 1 台	109.6	66.3	246.2	125.2
第 2 台	114.5	63.2	263.5	124.7
第 3 台	106.2	68.8	257.3	126.9
平均值	110.1	66.1	255.7	125.6

表 3 3 台 400 kVA 容量变压器热阻参数辨识结果
Table 3 Results of thermal resistance parameter identification for three 400 kVA-capacity transformers

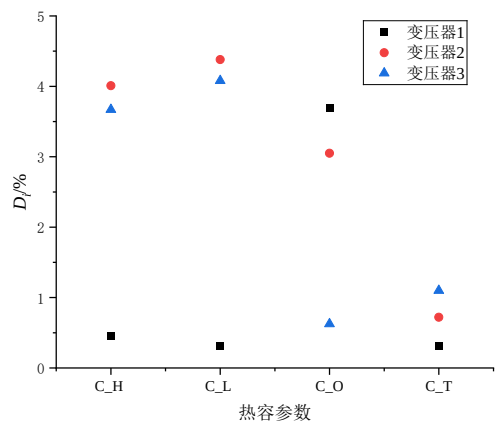
序号	$R_{H-O} /$ ($\text{mK}\cdot\text{W}^{-1}$)	$R_{L-O} /$ ($\text{mK}\cdot\text{W}^{-1}$)	$R_{O-T} /$ ($\text{mK}\cdot\text{W}^{-1}$)	$R_{T-A} /$ ($\text{mK}\cdot\text{W}^{-1}$)
第 1 台	6.581	8.762	0.562	11.403

第 2 台	6.432	8.193	0.538	10.911
第 3 台	6.821	9.428	0.580	10.576
平均值	6.611	8.764	0.560	10.962

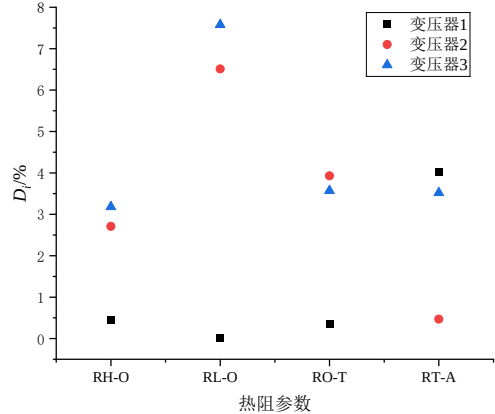
这些辨识出的参数值相对于它们的平均值的偏差百分比计算见式(16)，结果如图 5 所示，用于评估参数辨识结果的离散程度。

$$D_i = \frac{|X_i - \bar{X}|}{\bar{X}} \times 100\% \tag{16}$$

式中： X_i 是第 i 个参数值； $\bar{X}$ 是参数的平均值； D_i 表示第 i 个参数值相对于平均值的偏差百分比。



(a) 热容的 D_i 分布



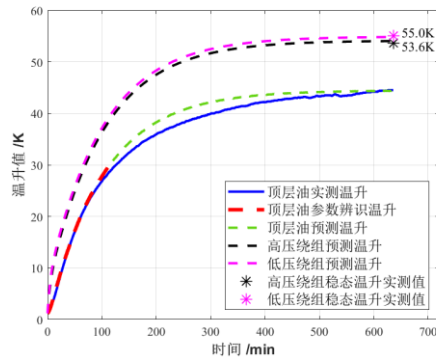
(b) 热阻的 D_i 分布

图 5 热容、热阻的 D_i 分布
Fig. 5 D_i Distribution of Thermal Capacity and Thermal Resistance Parameters

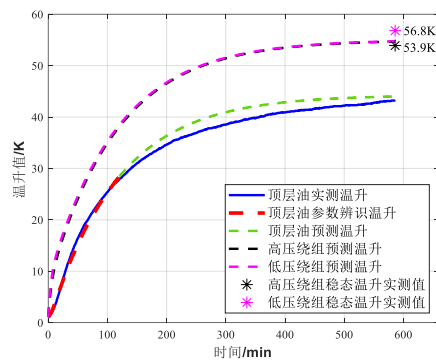
由辨识结果可知，同一型号变压器的等效热路集总参数波动范围小于 10%，分散性低；低压绕组热容为 63.2~68.8 $\text{kJ}\cdot\text{K}^{-1}$ ，高压绕组热容为 106.2~114.5 $\text{kJ}\cdot\text{K}^{-1}$ ，油热容为 246.2~263.5 $\text{kJ}\cdot\text{K}^{-1}$ ，油箱热容为 124.7~126.9 $\text{kJ}\cdot\text{K}^{-1}$ 。热阻参数 $R_{T-A} > R_{L-O} > R_{H-O} > R_{O-T}$ ， R_{T-A} 范围是 10.576~11.403 $\text{mK}\cdot\text{W}^{-1}$ ， R_{L-O} 为 8.193~9.428 $\text{mK}\cdot\text{W}^{-1}$ ， R_{H-O} 为 6.432~6.821 $\text{mK}\cdot\text{W}^{-1}$ ， R_{O-T}

为 $0.538\sim 0.580\text{ mK}\cdot\text{W}^{-1}$ 。由于低压绕组散热条件差于高压绕组,所以对应的热阻参数偏大。同时,由于绕组外侧包裹绝缘纸,其对应热阻远大于油-油箱的热阻。

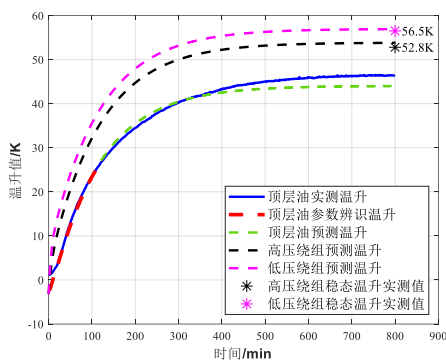
基于辨识的参数,根据输入的功率曲线计算获得的 3 台 400 kVA 的温升曲线如图 6 所示,图 6 中 3 台变压器的顶层油温升实测曲线进入稳态时间基本在 600 min 以上。



(a) 1 号变压器的温升曲线



(b) 2 号变压器的温升曲线



(c) 3 号变压器的温升曲线

图 6 400kVA 容量变压器温升预测曲线与实测结果对比

Fig. 6 Comparison of temperature rise prediction curves and actual measurement results for 400 kVA transformers

预测过程中,任意时刻 t 下的顶层油温升预测曲线相对误差为

$$R(t) = \frac{|\Delta T_p(t) - \Delta T_a(t)|}{\Delta T_a(t)} \times 100\% \quad (17)$$

式中: ΔT_a 为预测温升; ΔT_p 为实测温升,单位为 K。

由图 6 可知,稳态的顶层油温升值预测误差分别为 0.1 K, 0.2 K 和 1.9 K, 3 台变压器温升预测曲线误差最大值计算结果分别为 4.78%、4.86%、3.36%,说明温升 2 h 曲线辨识参数计算的顶层油温升曲线与实测曲线吻合度较高。3 台 400 kVA 容量变压器高压绕组的平均温升误差分别为 0.2 K, 0.4 K 和 0.8 K; 低压绕组的平均温升误差分别为 0.3 K, 2.1 K, 0.4 K。三台变压器的预测结果中,除一台变压器低压绕组的预测误差为 2.1 K 外,其余预测误差均小于 1 K。

2.2.2 不同容量变压器的热容、热阻

由 2 h 温升曲线辨识获得的不同容量变压器的平均等效热容、热阻参数如表 4、表 5 所示。

表 4 400、630、800 kVA 容量变压器热容参数辨识结果
Table 4 Identification results of thermal capacity parameters for 400, 630, and 800 kVA capacity transformers

容量 /kVA	$C_H /$ ($\text{kJ}\cdot\text{K}^{-1}$)	$C_L /$ ($\text{kJ}\cdot\text{K}^{-1}$)	$C_o /$ ($\text{kJ}\cdot\text{K}^{-1}$)	$C_T /$ ($\text{kJ}\cdot\text{K}^{-1}$)
400	110.1	66.1	255.7	125.6
630	154.6	90.9	393.3	197.2
800	260.4	113.3	628.8	256.6

表 5 400、630、800 kVA 容量变压器热阻参数辨识结果
Table 5 Identification results of thermal resistance parameters for transformers with capacities of 400, 630, and 800 kVA

容量 /kVA	$R_{H-o} /$ ($\text{mK}\cdot\text{W}^{-1}$)	$R_{L-o} /$ ($\text{mK}\cdot\text{W}^{-1}$)	$R_{O-T} /$ ($\text{mK}\cdot\text{W}^{-1}$)	$R_{T-A} /$ ($\text{mK}\cdot\text{W}^{-1}$)
400	6.611	8.764	0.560	10.962
630	4.784	7.921	0.471	7.307
800	4.001	7.079	4.731	6.235

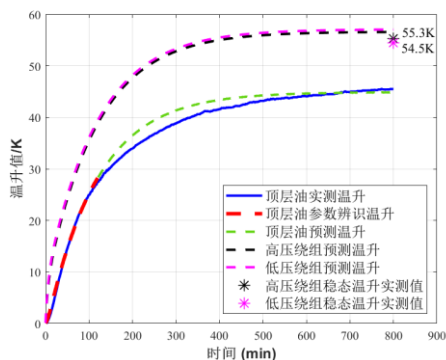
由表 5、表 6 可知,热容随着变压器容量的增加而增大,以油热容为例,400 kVA 容量下为 $256\text{ kJ}\cdot\text{K}^{-1}$, 800 kVA 容量时增至 $629\text{ kJ}\cdot\text{K}^{-1}$ 。热阻随容量增大呈下降趋势,400 kVA 容量的高压绕组-油热阻值为 $6.6\text{ mK}\cdot\text{W}^{-1}$, 800 kVA 容量时降至 $4.0\text{ mK}\cdot\text{W}^{-1}$; 400 kVA 容量的油箱-环境热阻值为 $10.9\text{ mK}\cdot\text{W}^{-1}$, 800 kVA 容量时降至 $6.2\text{ mK}\cdot\text{W}^{-1}$ 。上述特性可从热物理机制的角度解释如下:随着变压器容量的提升,其结构体积增大,绝缘油填充量增加,导致整个热系统的热容显著提高;另一方面,容量增大也使得总发热功率上升,为满足标准所规定的温升限值,必须通过优

化散热设计以降低整体热阻。上述辨识结果与热力学规律相一致, 体现出明确的工程物理意义。

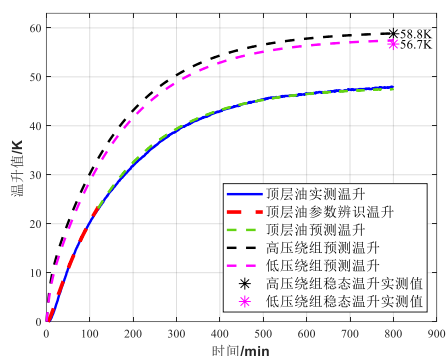
2.3 温升预测结果与影响因素

2.3.1 不同容量变压器温度预测

试验和预测获得的典型 630 kVA 和 800 kVA 容量变压器油、绕组温升曲线如图 7 所示。



(c) 630 kVA

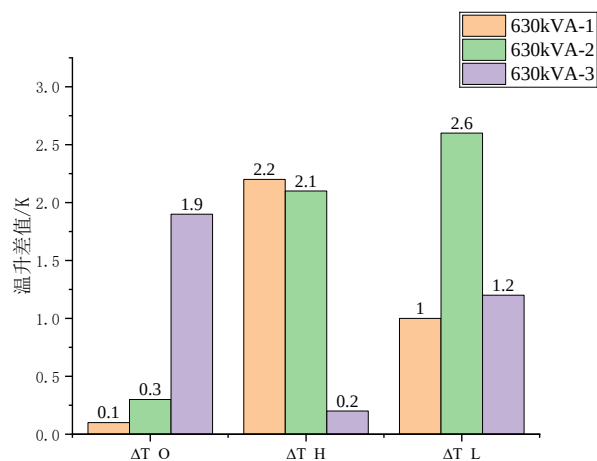


(d) 800 kVA

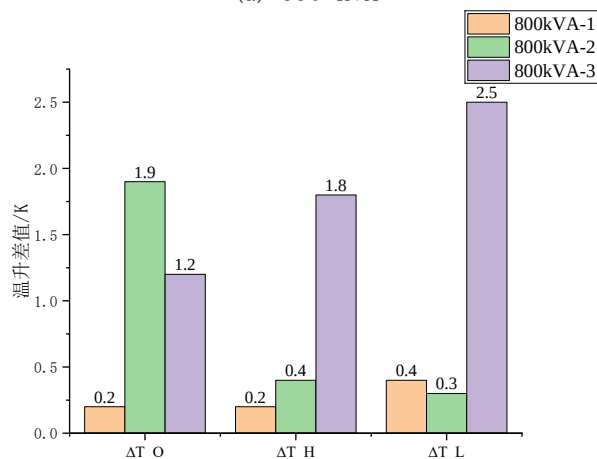
图 7 630、800 kVA 容量变压器温度辨识及预测结果

Fig. 7 630 and 800 kVA capacity transformer temperature identification and prediction results

基于图中预测的数据, 根据式(17)计算得到 3 台 630 kVA 和 3 台 800 kVA 容量变压器的温升预测相对误差最大值分别为 4.33%、3.06%、3.89%、1.74%、2.68%、2.54%, 说明从温升开始直至稳态过程中, 预测与实测温升曲线吻合度较高。630 kVA 和 800 kVA 容量变压器高低压绕组及顶层油温稳态温升值及与预测温升值的误差绝对值如图 8 所示。其中, ΔT_O 、 ΔT_H 、 ΔT_L 分别表示顶层油、高压绕组和低压绕组的稳态温升值与预测温升值的误差绝对值。



(a) 630 kVA



(b) 800 kVA

图 8 630、800 kVA 容量变压器的温升误差

Fig. 8 Temperature rise error of 630 and 800 kVA capacity transformers

温升预测结果表明, 预测模型对顶层油温温度节点的预测精度较稳定, 均低于 2 K; 高压和低压绕组温升的最大预测误差分别为 2.2 K 和 2.6 K。由上述结果可知, 所有测试变压器的稳态温升预测最大误差为 2.6 K, 满足误差小于 3 K 的工程需求。

2.3.2 损耗功率对预测结果的影响

温升试验时需要施加的总损耗随变压器容量增大而增大, 在低功率下和短时间内对大容量变压器进行温升试验可以节约能源。为了探究不同损耗功率下参数辨识的准确性与可行性, 对 800 kVA 变压器研究 $0.5 Q_w$ 、 $1.0 Q_w$ 、 $1.2 Q_w$ 、 $1.5 Q_w$ (Q_w 表示负载损耗) 下 2h 温升曲线进行参数辨识, 然后用于预测 $1.0 Q_w$ (即额定工况) 下的温升曲线, 获得的结果如图 9 所示。

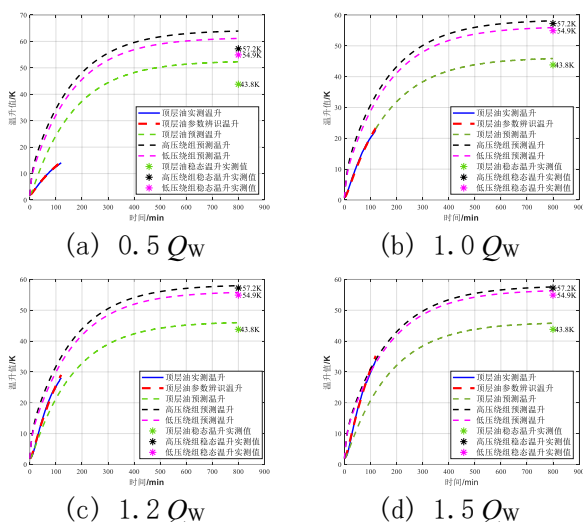


图 9 800 kVA 变压器不同损耗功率下预测温度对比

Fig. 9 Comparison of predicted temperature rise under different power losses for an 800 kVA transformer

由结果可知, 2 h 温升试验过程中, 同一台变压器 4 种损耗功率下的顶层油温的增长分别为 14.7 K、23 K、28.1 K、35.4 K, 对应的归一化温升为 $29.4 \text{ K}/Q_w$ 、 $23 \text{ K}/Q_w$ 、 $23.4 \text{ K}/Q_w$ 、 $23.6 \text{ K}/Q_w$ 。上述结果说明, 0.5 倍总损下的测量结果可能受低温升下的系统非线性影响。对 4 种损耗功率下稳态顶层油温升预测误差分析, 如图 10 所示。

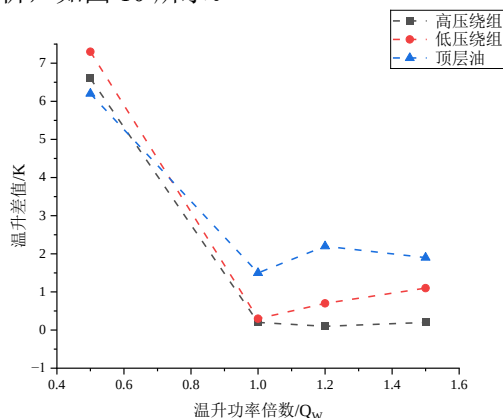


图 10 不同损耗功率下油温和绕组温升计算误差

Fig. 10 Comparison of predicted and measured node temperature rise values under different power loss conditions

由图 10 可知, 在不同损耗功率下辨识到的热路模型参数中, 1、1.2、1.5 倍总损耗功率的温升数据辨识到的参数用于预测各节点稳态温度的温升与实际温升误差均低于 2.5 K。原因在于施加高功率损耗开展 2 h 温升试验时, 1 倍总损耗功率以上的温升满足线性系统响应的变化规律; 而 0.5 倍总损耗功率下

辨识到的热路参数用于预测各节点稳态温度的温升与实际温升误差总体最大, 最大误差值达到了 7.3 K, 这与低温升下的系统非线性相关。在工程应用中, 可以使用 1 倍总损耗功率下开展温升试验的温升数据用于预测绕组和顶层油温升。

3 结论

本文提出了配电变压器的五阶热路模型, 基于扩展卡尔曼滤波算法, 利用温升曲线对热路模型参数进行辨识, 并预测了不同容量和损耗功率下的变压器温升特性, 得出以下结论:

- (1) 通过算法优化, 热容和热阻参数随辨识过程趋向定值, 波动范围小, 验证了辨识方法的稳定性, 参数辨识结果表明, 低压绕组—油热阻高于高压绕组—油热阻, 油—固热阻低于固—气热阻; 等效热容与容量呈正相关, 等效热阻则随容量增大而减小;
- (2) 利用辨识的参数计算的 400 kVA、630 kVA 及 800 kVA 变压器的温升预测曲线与实测曲线相对误差均在 5% 以内, 稳态温升预测误差最大为 2.6 K, 预测方法和精度能够满足工程需求;

- (3) 1 倍总损耗功率工况的辨识参数预测精度最优, 高损耗工况次之, 低损耗功率下表现出的温升非线性特性偏移, 导致模型预测误差增大, 误差均超过 6 K。工程实践中宜采用 1 倍以上总损耗功率下的温升曲线辨识参数再计算稳态温升。

本文研究成果可指导油浸式配电变压器绕组温升的快速检测。

参考文献:

- [1] 李元, 陈智秋, 刘志豪, 等. 伴随网格自适应剖分优化变压器内部温度仿真模型计算效率方法[J/OL]. 西安交通大学学报, 1-9 [2025-10-22].
LI Y, CHEN Z, LIU Z, et al. Adjoint Mesh Adaptive Refinement Method for Enhancing Computational Efficiency of Transformer Internal Temperature Simulation Models [J/OL]. 1-9 [2025-10-22].
- [2] WEN Q, ZHANG B, HE Z, et al. Simulation and analysis of oil-immersed transformer based on thermal-fluid coupled field[J]. International Conference on Power System Technology, 2014.
- [3] 刘刚, 胡万君, 郝世缘, 等. 油浸式变压器绕组瞬态温升降阶快速计算方法[J]. 电工技术学报, 2024, 39(03): 643-657.
LIU Gang, HU Wanjun, HAO Shiyuan, et al. Reduced Order Calculation Method of Steady Temperature Rise of Oil Immersed Power Transformer [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(03): 643-657.
- [4] 俞潺潺. 大型油浸式自冷变压器温升的研究[D]. 浙江工业大学, 2014.
YU Chanchan. Research of large oil-immersed self-cooled transformer temperature rise [D]. Zhejiang University of Technology, 2014.
- [5] 袁小娟, 马桂芬. 油浸式电力变压器非额定条件下的温升试验研究[J]. 电工材料, 2016, (05): 25-27.
YUAN Xxiaojuan, MA Guifen. Temperature Rise Stud

- y for Oil-immersed Transformer under Non-nominal Conditions [J]. *Electrical Engineering Materials*, 2016, (05): 25-27.
- [6] WANG Q Y, YU X, PENG Z, et al. 3D coupled electromagnetic-thermal-fluid method for computation of temperature field of converter transformer RIP bushings [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(22): 6334-6341.
- [7] 丁玉琴,张乔根,高萌,等. 油浸式配电变压器分布式热路模型 [J]. *高电压技术*, 2019, 45(03): 968-974.
DING Yuqing, ZHANG Qiaogen, GAO Men, et al. Distributed Thermal Circuit Model of Oil-immersed Distribution Transformers [J]. *High Voltage Engineering*, 2019, 45(03): 968-974.
- [8] SUSAN D, LEHTONEN M, NORDMAN H. Dynamic thermal modelling of power transformers [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2005, 20(1): 197-204.
- [9] SWIFT G, MOLINSKI T S, LEHN W. A fundamental approach to transformer thermal modeling. I. Theory and equivalent circuit [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2002, 16(2): 171-175.
- [10] GERLING D, DAJAKU G. Novel lumped-parameter thermal model for electrical systems [C]//*European Conference on Power Electronics and Applications*. IEEE, 2006.
- [11] LI H, LIU Y, ZHUANG X, et al. Test and analysis on extended temperature rise of 110 kV transformer based on distributed temperature sensing [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2023, 38(2): 12.
- [12] 苏中信. 分布式光纤测温技术在植物油配电变压器上的应用[J]. *电工技术*, 2025, (03): 114-116.
Su Z. Application of Distributed Optical Fiber Temperature Measurement Technology in Vegetable Oil Distribution Transformers [J]. *Electric Engineering*, 2025, (03): 114-116.
- [13] 邓建钢,郭涛,徐秋元,等. 变压器绕组测温光纤光栅传感器设计及性能测试[J]. *高电压技术*, 2012, 38(6): 8.
DENG Jiangang, GUO Tao, XU Qiuyuan, et al. Design and Performance Test for Fiber Bragg Grating Sensors of Transformer Winding Temperature Measurement [J]. *High Voltage Engineering*, 2012, 38(6): 8.
- [14] 贾红元,冀增华,李彬,等. 变压器绕组温度的软件计算值与光纤实测值之间的差异对比分析[J]. *变压器*, 2014, 51(4): 4.
JIA Hongyuan, JI Zenghua, LI Bin, et al. Comparative Analysis of Value Differences Between Software Calculation and Optical Fibre Measurement of Transformer Winding Temperature [J]. *Transformer*, 2014, 51(4): 4.
- [15] 王恩,赵振刚,曹敏,等. 基于光纤 Bragg 光栅的油浸式变压器多点温度监测[J]. *高电压技术*, 2017, 043(005): 1543-1549.
WANG En, ZHAO Zhengang, CAO Min, et al. Multi Point Temperature Monitoring of Oil Immersed Transformer Based on Fiber Bragg Grating [J]. *High Voltage Engineering*, 2017, 43(5): 1543-1549.
- [16] LIU Y, LI X, LI H, et al. Experimental and numerical investigation of the internal temperature of an oil-immersed power transformer with DOFS [J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(16): 5718.
- [17] 刘鉴民. 传热传质原理及其在电力科技中的应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006: 137-140.
LIU Jianmin. Principles of Heat and Mass Transfer and Its Applications in Power Technology [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2006: 137-140.
- [18] WANG P, CAO H, XIAO J. Structure Design of a Four - Pillar Magnetically Integrated Fractional - Turn Planar Transformer and its Loss Analysis[J]. *IEEE Transactions on Electrical & Electronic Engineering*, 2025, 20(2).
- [19] 苏小平,陈伟根,胡启元,等. 基于解析-数值技术的变压器绕组温度分布计算[J]. *高电压技术*, 2014, 40(10): 3164-3170.
SU Xiaopin, CHEN Weigen, HU Qiyuan, et al. Calculation for Transformer Winding Temperature Distribution by Numerical Analytical Technology [J]. *High Voltage Engineering*, 2014, 40(10): 3164-3170.
- [20] 郝钰,石华林,范瑞祥,等. 基于动态热路模型的配电变压器过载工况下温升研究[J]. *变压器*, 2020, 57(12): 22-26.
HAO Yu, SHI Hualin, FAN Ruixiang, et al. Study on Temperature Rise of Distribution Transformer Under Overload Condition Based on Dynamic Thermal Circuit Model [J]. *Transformer*, 2020, 57(12): 22-26.
- [21] 万萌,应展烽,张旭东,等. 功率器件集总参数热路模型及其参数提取研究[J]. *电工技术学报*, 2015, 30(21): 31-38.
WAN Meng, YING Zhanfeng, ZHANG Xudong, et al. Research on the Lumped Parameter Thermal Circuit Model and the Parameter Extraction Method of Power Devices [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2015, 30(21): 31-38.
- [22] TAGHIKHANI M A. Heat transfer modeling in a transformer using magneto-CFD analysis and GWO algorithm considering dynamic thermal model [J]. *Results in Engineering*, 2024, 23: 000.
- [23] JI N S, XU X, WANG H, et al. Thermal behavior calculation model of oil-immersed transformer winding based on thermoelectric analogy theory [J]. *Control and Instruments in Chemical Industry*, 2019.
- [24] 李元,王晨,张冠军. 传热学与电学问题的迁移类比研究: (1)理论基础[J]. *西安交通大学学报*, 2021, 55(08): 78-84.
LI Y, WANG C, ZHANG G. Analogical Transfer Between Heat Transfer and Electrodynamics: (1) Theoretical Fundamentals [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2021, 55(08): 78-84.
- [25] MONFARÉ H J. Thermoelectric analogy thermal models of power transformers [J]. 2016.
- [26] KULKARNI S V, KHAPARDE S A. Transformer engineering: design, technology, and diagnostics [M]. 2017.
- [27] DING Y, ZHANG Q, GAO M, et al. Distributed thermal circuit model of oil-immersed distribution transformers [J]. *High Voltage Engineering*, 2019, 45(3): 968-974.
- [28] WANG F, ZHANG X, GAO, et al. Improved thermal circuit model of hot spot temperature in oil-immersed transformers based on heat distribution of winding [J]. *High Voltage Engineering*, 2015, 41(3): 895-901.
- [29] CHEN W, PENG C, YU Y. Power transformer top-oil temperature model based on thermal-electric analogy theory [J]. *European transactions on electrical power engineering*, 2009.
- [30] MIKHAK-BEYRANVAND M, FAIZ J, REZAEI ALA M B. Thermal analysis of power transformer using an improved dynamic thermal equivalent circuit model [J]. *Electric Power Components and Systems*, 2019.
- [31] 张旭辉,林海军,刘明珠,等. 基于蚁群粒子群优化的卡尔曼滤波算法模型参数辨识[J]. *电力系统自动化*, 2014, 38(4): 44-50.
ZHANG Xuhui, LIN Haijun, LIU Mingzhu, et al. Model Parameters Identification of UKF Algorithm Based on ACO-PSO [J]. *Automation of Electric Power Systems*

ms, 2014, 38(4): 44-50.

- [32] 王磊,李宏,武明珠,等.基于扩展卡尔曼滤波的永磁同步电动机参数辨识[J]. 微特电机, 2012, 40(7): 19-22.
WANG Lei, LI Hong, WU Mingzhu, et al. Parameters Identification of PMSM Based on Extended Kalman Filter [J]. Small & Special Electrical Machines, 2012, 40(7): 19-22.

- [33] 田晓宇,李明干,刘沛.基于 Kalman 滤波的神经网络学习算法及其应用[J]. 计算机与数字工程, 2005, 33(2): 4.
TIAN Xiaoyu, LI Minggan, LIU Pei. Kalman Filter Learning Algorithm for Feedforward Neural Network and its Application [J]. Computer & Digital Engineering, 2005, 33(2): 4.