团 体 标 准

T/CSEE XXXX—YYYY

油浸式电力变压器绕组热点温度反演监测规程

Regulations for Inversion Monitoring of Power Transformer Windings Hot Spot Temperature

（草案）

20XX—XX—XX 发布 20XX—XX—XX 实施

中国电机工程学会 发 布

# 目 次

[目 次 I](#_Toc179733645)

[前 言 I](#_Toc179733646)

[1 范围 1](#_Toc179733648)

[2 规范性引用文件 1](#_Toc179733649)

[3 术语和定义 1](#_Toc179733650)

[4 电力变压器温度场分布建模及仿真技术要求 2](#_Toc179733657)

[4.1 仿真背景参数要求 2](#_Toc179733658)

[4.2 现场实测要求 2](#_Toc179733659)

[4.3 电力变压器温度场分布验证工况及仿真效果评价 2](#_Toc179733660)

[5 电力变压器绕组热点温度反演监测 3](#_Toc179733661)

[5.1 电力变压器绕组热点温度反演监测输入输出特征量确定 3](#_Toc179733662)

[5.2 绕组热点温度反演训练样本与测试样本建立 3](#_Toc179733663)

[5.3 绕组热点反演监测模型建立 4](#_Toc179733664)

[5.4 绕组热点反演监测效果评价 4](#_Toc179733665)

[5.5 绕组热点反演监测应用 4](#_Toc179733666)

[5.6 电力变压器过负荷风险评估与动态载荷能力预测 5](#_Toc179733667)

[附录 A 电力变压器温度场分布建模资料收集表 6](#_Toc179733671)

[附录 B 电力变压器温度场仿真与试验值对比 8](#_Toc179733672)

[附录 C 绕组热点温度反演训练样本与测试样本集 9](#_Toc179733673)

# 前 言

本文件按照《中国电机工程学会标准管理办法（暂行）》的要求，依据 GB/T 1.1—2020《标准化工 作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国电机工程学会提出。

本文件由中国电机工程学会电力系统标准专业委员会技术归口和解释。

本文件起草单位：广西电网有限责任公司电力科学研究院、武汉大学、西安交通大学、中国南方电网有限责任公司超高压输电公司电力科研院、南方电网科学研究院有限责任公司、国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司、中国电力科学研究院有限公司、武汉科技大学、国网安徽省电力有限公司电力科学研究院。

本文件主要起草人：阮江军、张磊、陈梁远、李锐、覃歆然、邓军、董旭柱、邓永清、刘承锡、祝令瑜、张凡、李斯盟、罗兵、程林、江翼、王邸博、许衡、应斯、龚宇佳、龚若涵、谢一鸣、杨海涛、吴兴旺、丁国成、吴杰。

本文件首次发布。

本文件在执行过程中的意见或建议反馈至中国电机工程学会标准执行办公室（地址：北京市西城区 白广路二条 1 号，100761，网址：http：[//www.cs](http://www.csee.org.cn/)e[e.org.cn](http://www.csee.org.cn/)，邮箱：[cseebz@csee.org.cn](mailto:cseebz@csee.org.cn)）。

油浸式电力变压器绕组热点温度反演监测规程

1. 范围

本标准（或本部分或本指导性技术文件）规定了电力变压器绕组热点温度反演监测的基本内容和方法。

本文件适用于10kV及以上电压等级自然风冷油浸式电力变压器绕组热点温度监测和运行管理。

1. 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件， 仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本 文件。

GB/T 1094.1-2013 电力变压器 第1部分：总则

GB/T 1094.2-2013 电力变压器 第2部分：液浸式变压器的温升

GBT 1094.7-2008 电力变压器 第7部分：油浸式电力变压器负载导则

GB/T 6451-2015 油浸式电力变压器技术参数和要求

GB 20052-2013 三相配电变压器能效限定值及能效等级

GB/T 9969 工业产品使用说明书

GB/T 13384 机电产品包装通用技术条件

GB/T 19582 基于Modbus协议的工业自动化网络规范 第1部分：Modbus应用协议

DL/T 1432.1 变电设备在线智能管理装置检验规范第1部分通用检验规范

JB/T 7510-1994．工艺参数优化方法——正交试验法

1. 术语和定义

电力变压器 Power transformer

10kV及以上电压等级的油浸式配电变压器、中型变压器以及大型变压器。



外壳特征测温点 Shell characteristic temperature measurement points

根据流经绕组和外壳散热区域的主热流流动路径提取的电力变压器外部可测测温位置。



顶层油温 Top oil temperature

电力变压器顶层油温度。



绕组热点温度 Windings hot spot temperature

变压器三相绕组中最热点温度。



绕组热点温度反演 Inversion of winding hot spot temperature

基于测量的运行电力变压器外部特征测温点温度和三相负载率，对运行变压器绕组热点温度进行反向推演计算



变压器动态载荷能力 Dynamic thermal rating of transformer

在一定外界散热环境作用下，变压器安全稳定运行所能带的最大负载

1. 电力变压器温度场分布建模及仿真技术要求
   1. 仿真背景参数要求

a）电力变压器温度场仿真模型应根据变压器实际电气结构和参数建立。

b）电力变压器温度场仿真模型应包含对绕组热点温度具有重要影响的结构，具体应包含变压器油箱、散热器、高压绕组、中压绕组、低压绕组以及变压器铁心等结构，各结构的具体结构参数参见附录A。

c） 应提交电力变压器出厂报告，包含变压器额定电压与额定容量参数、绕组连接组号、绕组电阻测量结果、空载损耗和空载电流测量结果、短路阻抗和负载损耗测量结果等等。

* 1. 变压器温升试验要求

为对电力变压器温度场分布计算结果准确性进行验证，需进行变压器多工况温升试验。

4.2.1 变压器温升试验

1. 可参考国标GB/T 1094.2-2013，采用短路法进行变压器温升试验。
2. 试验场地的冷却空气温度宜介于 5 ℃与变器设计所据的最高环境温度之间当试验场地的温度。
3. 应至少采用4个传感器，并取其读数的平均值来确定环境温度以对试验结果进行评估，在对大型变压器进行试验时，为减少不确定度对读数平均值的影响，传感器的数宜达到6个。
4. 每隔一定时间(例如每 min)记录温升数据。

4.2.2 变压器温升试验过程记录

试验过程中需记录以下数据。

1. 环境温度*T*a；
2. 顶层液体温度*T*o；
3. 外壳特征测温点温度*T*K；
4. 绕组热点温度*T*H；
5. 液体平均温升△*T*o；
6. 绕组平均温升△*T*W；
7. 绕组热点温升△*T*H。
   1. 电力变压器温度场分布验证工况及仿真效果评价

至少进行高中低三种负载率下的变压器温升试验验证仿真结果准确性，对冷却液体、绕组以及外壳特征测温点温度计算偏差应满足以下规定：

1. 顶层液体温升计算偏差：-3 K≤*T*o≤3 K；
2. 外壳特征测温点温度计算偏差：-3 K≤*T*K≤3 K；
3. 绕组热点温度计算偏差：-4 K≤*T*H≤4 K。

电力变压器冷却液体、绕组以及外壳特征测温点温度仿真值、试验值及其偏差△T(=试验值-仿真值)录入附录B.1中。

1. 电力变压器绕组热点温度反演监测

基于经验公式和热路模型的热点温度计算方法，其关键计算参数的准确确定需要结合大量的温升试验，计算结果受变压器运行条件影响较大；光纤植入式的热点温度检测方法要求在变压器生产或者安装时完成，碍于昂贵的停电改装成本与既有绝缘设计改变的风险，难以应用于已投运的变压器中；基于数值计算的热点温度计算方法难以应用于变压器绕组热点温度的实时检测中。基于人工智能算法的变压器热点温度计算方法，模型的建立依赖变压器试验数据或现场运行数据，难以全面考虑设备外界环境因素对设备热点温度的影响，同时按经验选择的模型输入特征量缺乏有效的物理依据，该过程限制了人工智能算法的应用。

变压器多物理场分析方法与人工智能算法相结合，变压器多物理场仿真分析方法可对变压器内部热流散热特性进行分析，同时可用于构建人工智能算法模型建立过程中所需要的训练样本，可以摆脱或减轻变压器热点温度检测模型建立过程中对试验以及运行数据的依赖，实现运行变压器绕组热点温度的“虚拟传感”。

* 1. 电力变压器绕组热点温度反演监测输入输出特征量确定
     1. 电力变压器绕组热点温度反演监测输入特征量

输入特征量包含外壳特征测温点温度以及负荷特征量。

1. 基于热流分析选择外壳特征测温点，外壳特征测温点为外部可测测温位置，根据流经绕组和外壳散热区域的主热流流动路径，选取至少3个外壳特征测温点；
2. 外壳特征测温点应包含变压器顶层油温测温位置；
3. 输入负荷特征量为变压器三相负载率。
   * 1. 电力变压器绕组热点温度反演监测输出特征量

输出特征量为变压器绕组热点温度。

* 1. 绕组热点温度反演训练样本与测试样本建立

a） 训练样本建立。

在变压器绕组热点温度反演检测模型的建立过程中，训练样本集的建立对反演模型的反演精度具有重要影响，为综合考虑变压器负载率和环境散热条件的影响，同时尽可能的降低样本的数量，采用正交试验法设计反演模型训练样本。

综合考虑变压器负载率以及环境温度和环境风速对变压器稳态热点温度的影响，训练样本考虑的各因素和对应的因素水平如附表C.1 所示，设计的3因素3水平训练样本正交表如附表 C.2所示。

b） 测试样本建立。

在通过训练样本集建立好变压器绕组热点温度反演检测模型后，为验证反演检测模型的准确性和有效性，使用建立好的反演模型对测试样本的稳态热点温度进行反演。测试样本考虑的各因素和对应的因素水平如附表 C.3所示，设计的3因素3水平测试样本正交表如附表 C.4所示。

* 1. 绕组热点反演监测模型建立

基于确定的电力变压器绕组热点温度反演监测输入输出特征量，以及建立的绕组热点温度反演训练样本数据集与测试样本数据集，采用支持向量回归机或人工神经网络等人工智能算法建立绕组热点反演监测模型。

* 1. 绕组热点反演监测效果评价

在通过训练样本集建立好支持向量回归机模型后，为验证模型在测试样本集中的应用效果，采用平均绝对百分比误差对测试样本集反演效果进行评估，绕组热点温度反演平均绝对百分比误差应≤5%。

平均绝对百分比误差（Mean Absolute Percentage Error, MAPE）：



式中，*A*i为第*i*个反演样本的试验值；*P*i为第*i*个反演样本的反演值；*N*为反演样本的个数。

* 1. 绕组热点反演监测应用

a）外部特征测温点温度测量。

采用外壳热电阻温度传感器对选定的外部特征测温点温度进行测量，外壳热电阻温度传感器采集周期为1 min。

b）外部特征测温点温度测量环境干扰抑制。

在外壳热电阻温度传感器上敷设隔热层以隔绝外部短时的环境干扰（短时的降雨、风吹等等），隔热阻滞层尺寸应在热电阻温度传感器本身长宽高基础上分别外延10mm。

c）绕组热点温度反演监测。

基于构建的绕组热点反演监测模型，以测量得到的外部特征测温点温度以及变压器三相负载率为输入，可即时反演得到运行变压器绕组热点温度，实现对绕组热点温度的反演监测。

d）环境温度测量

环境温度测量应符合下列规定：

测量范围：-25 ℃~+60 ℃；

测量误差：≤±0.5 ℃；

分辨率：0.1 ℃。

e）特征测温点温度传感器测量要求

测量范围：-50 ℃~+150 ℃；

测量误差：≤±1 ℃。

分辨率：0.1 ℃。

f）三相电流测量精度

电流互感器测量精度为0.5级。

* 1. 电力变压器过负荷风险评估与动态载荷能力预测
     1. 电力变压器过负荷风险评估。

GB/T 1094.7-2008中规定，变压器绕组热点温度为98℃时的油纸绝缘（非热改性纸）老化速率为1，在140℃以内，热点温度与油纸绝缘老化速率之间遵循6℃法则，即热点温度每升高6℃，绝缘老化速率加倍，同时一旦绕组热点温度超过了140℃，由于绕组油纸绝缘中水分在高温下析出产生气泡，导致绕组绝缘强度下降进而将容易导致运行变压器发生故障。

基于5.5节获取的运行变压器绕组热点温度，与绕组绝缘材料（A级绝缘）稳定运行温度（105℃）以及油纸绝缘高温析出气泡温度（140℃）进行对比，评估变压器过负荷风险，风险评估等级如下：

a) 运行温度低于98℃，正常运行；

b) 运行温度高于98℃，低于105℃，低风险；

c) 运行温度高于105℃，低于140℃，中风险；

d) 运行温度高于140℃，高风险。

* + 1. 电力变压器动态载荷能力预测。

基于5.5节获取的运行变压器当前绕组热点温度，同时结合获取的变压器运行负荷以及绕组热点温度历史数据，构建不同负荷下运行变压器绕组热点温度变化规律，进而获取下一关注时间间隔内，保障变压器安全稳定运行所能带的最大负载，进而实现电力变压器动态载荷能力预测，进而可为10kV及以上电压等级油浸式电力变压器绕组热点温度监测和运行管理提供指导和参考。

附 录 A  电力变压器温度场分布建模资料收集表

（资料性）

表 A.1 变压器箱体结构参数与主要结构质量

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 铁心质量（kg） |  | 变压器箱体长度（m） |  | 变压器箱体重（kg） |  |
| 绕组质量（kg） |  | 变压器箱体宽度（m） |  | 分接开关档位数 |  |
| 绝缘油的质量（kg） |  | 变压器箱体高度（m） |  | 额定分接开关位置 |  |

表 A.2 变压器电气参数

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 额定容量 | 高压侧（kVA） |  | 中压侧（kVA） |  | 低压侧（kVA） |  |
| 额定电压 | 高压侧（kV） |  | 中压侧（kV） |  | 低压侧（kV） |  |
| 额定电流 | 高压侧（A） |  | 中压侧（A） |  | 低压侧（A） |  |
| 额定损耗 | 空载（kW@75°C） |  | 负载（kW@75°C） |  | 各分接下电压变比 |  |
| 分接头电阻 | 高压绕组直阻(Ω) |  | 中压绕组直阻(Ω) |  | 低压绕组直阻(Ω) |  |

表 A.3 ONAN/ONAF变压器散热器冷却系统参数

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 片式散热器型号 |  |  |  |
| 片散组数 |  | 每台片散的散热片个数 |  |
| 整体片散高度（m） |  | 风扇组数（直径、转速、风量） |  |
| 整体片散宽度（m） |  | 片散上下油管（即水平油道）的直径（m） |  |
| 整体片散厚度（m） |  | 片散上下油管（即水平油道）的长度（m） |  |
| 片散每片间隙厚度（m） |  | 单片散热片厚度（m） |  |
| 自冷散热面积（m2) |  | 风冷散热面积（m2) |  |

表 A.4 变压器高中低压绕组结构参数表

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 变压器结构 | | 尺寸（mm）/型号 |
| 低压绕组 | 绕组内径 |  |
| 绕组外径 |  |
| 绕组高度 |  |
| 绕组高度方向层数 |  |
| 绕组厚度方向层数 |  |
| 绕组单圈撑条数量 |  |
| 绕组单圈垫块数量 |  |
| 绕组层间油道高度 |  |
| 绕组内侧圆筒厚度 |  |
| 绕组内侧圆筒内径 |  |
| 绕组外侧圆筒厚度 |  |
| 绕组外侧圆筒内径 |  |
| 低压绕组导线规格型号 |  |
| 低压绕组垫块长宽高 |  |
| 低压绕组撑条长宽高 |  |
| 高压绕组 | 绕组内径 |  |
| 绕组外径 |  |
| 绕组高度 |  |
| 绕组高度方向层数 |  |
| 绕组厚度方向层数 |  |
| 绕组单圈撑条数量 |  |
| 绕组单圈垫块数量 |  |
| 绕组层间油道高度 |  |
| 绕组内侧圆筒厚度 |  |
| 绕组内侧圆筒内径 |  |
| 绕组外侧圆筒厚度 |  |
| 绕组外侧圆筒内径 |  |
| 高压绕组导线规格型号 |  |
| 高压绕组垫块长宽高 |  |
| 高压绕组撑条长宽高 |  |
| 中压绕组 | 绕组内径 |  |
| 绕组外径 |  |
| 绕组高度 |  |
| 绕组高度方向层数 |  |
| 绕组厚度方向层数 |  |
| 绕组单圈撑条数量 |  |
| 绕组单圈垫块数量 |  |
| 绕组层间油道高度 |  |
| 绕组内侧圆筒厚度 |  |
| 绕组内侧圆筒内径 |  |
| 绕组外侧圆筒厚度 |  |
| 绕组外侧圆筒内径 |  |
| 中压绕组导线规格型号 |  |
| 中压绕组垫块长宽高 |  |
| 中压绕组撑条长宽高 |  |

表 A.5变压器铁心结构参数表

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 变压器结构 | | 尺寸（mm）/型号 |
| 铁心 | 外框长度 |  |
| 外框高度 |  |
| 外框厚度 |  |
| 内框宽度 |  |
| 内框高度 |  |
| 单芯柱在整体长度方向上厚度 |  |
| 单芯柱在整体厚度方向上半径 |  |

附 录 B 电力变压器温度场仿真与试验值对比

（资料性）

表B.1 变压器顶层液面温度及绕组温度等计算表

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 温度值  位置 | 仿真值/ ˚C | 试验值/ ˚C | 偏差△*T* / K |
| 特征测温点1 |  |  |  |
| 特征测温点2 |  |  |  |
| 特征测温点3 |  |  |  |
| 顶层油温 |  |  |  |
| 低压绕组平均温升 |  |  |  |
| 中压绕组平均温升 |  |  |  |
| 高压绕组平均温升 |  |  |  |
| 低压绕组热点温升 |  |  |  |
| 中压绕组热点温升 |  |  |  |
| 高压绕组热点温升 |  |  |  |

附 录 C 绕组热点温度反演训练样本与测试样本集

（资料性）

表 C.1 训练样本各因素和水平

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 因素  水平 | 负载率 | 风速 / m/s | 环境温度 / ˚C |
| 1 | 0.6 | 0 | -10 |
| 2 | 1.0 | 2 | 25 |
| 3 | 1.2 | 4 | 45 |

表 C.2 3因素3水平正交表（训练样本）

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 编号 | 负载率 | 风速 / m/s | 环境温度 / ˚C |
| 1 | 0.6 | 0 | -10 |
| 2 | 0.6 | 2 | 25 |
| 3 | 0.6 | 4 | 45 |
| 4 | 1.0 | 0 | 25 |
| 5 | 1.0 | 2 | 445 |
| 6 | 1.0 | 4 | -10 |
| 7 | 1.2 | 0 | 35 |
| 8 | 1.2 | 2 | -10 |
| 9 | 1.2 | 4 | 445 |

表 C.3 测试样本各因素和水平

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 因素  水平 | 负载率 | 风速 / m/s | 环境温度 / ˚C |
| 1 | 0.8 | 0 | 0 |
| 2 | 0.9 | 1 | 20 |
| 3 | 1.1 | 2 | 35 |

表 C.4 3因素3水平正交表（测试样本）

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 编号 | 负载率 | 风速 / m/s | 环境温度 / ˚C |
| 1 | 0.8 | 0 | 0 |
| 2 | 0.8 | 1 | 20 |
| 3 | 0.8 | 2 | 35 |
| 4 | 0.9 | 0 | 20 |
| 5 | 0.9 | 1 | 35 |
| 6 | 0.9 | 2 | 0 |
| 7 | 1.1 | 0 | 35 |
| 8 | 1.1 | 1 | 0 |
| 9 | 1.1 | 2 | 20 |