

油浸式电力变压器动态载荷评估技术研究与应用

董旭柱, 张琛, 阮江军, 杜志叶, 邓永清, 程书灿
(武汉大学电气与自动化学院, 武汉 430072)

摘要: 为综合提高电力回路传输能力及利用率, 需对电力回路关键电力设备的动态载荷能力进行有效评估。开展油浸式电力变压器动态载荷评估可最大限度地发挥其动态载荷能力, 提高变压器利用率, 增强电力回路动态可载荷能力的可观性。针对现有的油浸式电力变压器动态载荷评估技术存在的问题, 总结归纳了油浸式电力变压器动态载荷评估典型应用场景, 分析了典型场景负荷曲线及环境温度曲线获取方法、热点温度辨识方法、绝缘寿命与健康状态评估等关键技术, 研究了油浸式电力变压器动态载荷评估计算方法, 并举例说明了现阶段变压器动态载荷技术在实际工程中的应用情况。最后从热点温度辨识、热老化与动态载荷关联规律、载荷能力综合评估等方面讨论了油浸式电力变压器动态载荷评估技术应用的特点及局限性, 并指出了未来的研究方向。

关键词: 变压器; 负荷曲线; 热点温度; 风险评估; 动态载荷

Research and Practices of Dynamic Thermal Rating for Oil-immersed Power Transformer

DONG Xuzhu, ZHANG Chen, RUAN Jiangjun, DU Zhiye, DENG Yongqing, CHENG Shucan
(School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: In order to explore the potential transmission capacity and maximize utilization of the power circuit, it is necessary to evaluate the dynamic thermal rating of the key power equipment in the power circuit. The dynamic thermal rating assessment of oil-immersed power transformers can maximize its dynamic load capacity, improve the utilization rate of transformers and enhance the observability of dynamic thermal rating of power circuit. By analyzing existing problems of the dynamic transformer rating applications, the paper discussed the typical application scenarios of dynamic transformer rating, and illustrated the key technologies, including deriving typical daily loading curves and ambient temperature curves, identifying hot spot temperature, evaluating insulation life and thermal condition assessment, and etc. The calculation process of transformer dynamic rating and its application examples were then described in detail. Finally, the characteristics and limitations of the practices of the dynamic thermal rating assessment technology for oil-immersed power transformers were discussed from the aspects of hot spot temperature identification, the correlation law between thermal aging and dynamic thermal rating, and the comprehensive evaluation of load capacity, and the future research direction was pointed out for researchers and engineers.

Key words: transformer; load curve; hot spot temperature; risk assessment; dynamic thermal rating

0 引言

随着新型电力系统和电力现货市场建设, 负荷呈现种类多样、时空多变、峰谷差加大、增长迅猛等特点, 受电力设备额定负载等约束, 常规系统规划和调度运行的方式与策略面临系统如下挑战: 充裕度不足、灵活性欠缺、投资乏力。在减缓系统投资、保证安全的情况下, 开展包含电力线路和变电设备的电力回路动态载荷能力评估, 确定载荷“瓶颈”设备, 合理挖掘已有设备动态载荷潜力, 增强

电力回路动态可载荷能力的可观性, 提高系统运行的灵活性, 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。

动态载荷技术最早在美国应用于架空输电线路, 可有效提高架空线路的输送能力, 其核心技术是根据环境和设备运行状态确定载荷^[1]。美国电科院分析, 使用该技术可使新线路工程建设推迟 5 年, 节省约 900 万美元费用^[2]。动态载荷技术进一步发展应用于地下电缆、变压器等电力回路的关键电力设备^[3-6]。

变压器动态载荷(dynamic transformer rating, DTR)定义为: 在负荷及环境温度变化下变压器运行

基金资助项目: 国家自然科学基金(U2066217; 51741708)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (U2066217, 51741708).

可承受的最大负载。对变压器进行动态载荷能力评估, 确定特定工况最大允许载荷, 在系统运行和变压器资产管理中具有以下价值:

- 1) 在系统规划中可有效减缓变电设备投资, 为电网投资和成本管控提供新的调节手段。
- 2) 有效提高系统的灵活性和设备利用率, 提高短时和超短时调节能力, 缓解负荷集中地区输电阻塞, 使系统更加透明可控。
- 3) 增强电力公司适应新能源为主体下的电力市场掌控能力, 丰富了调节资源, 增加了可控的辅助服务资源。
- 4) 实现变压器风险评估与系统运行风险有机结合, 提高了系统弹性和变压器管理水平。

目前, 油浸式电力变压器(后简称变压器)动态载荷评估技术已有较多研究^[7-11], 但存在以下问题: 首先现有动态载荷评估技术未将变压器健康状态纳入动态载荷计算的约束; 其次负荷及环境特性、热点温度等参数无法有效获取, 最终在应用上与现行调度运行方式不协调, 与电力市场环境不相适应, 使其在电力系统中未能得到广泛应用。针对上述问题, 本文分别从变压器动态载荷典型应用场景、影响因素、典型工况的评估计算方法、应用现状等方面开展研究, 讨论了现有动态载荷关键技术及其局限性, 最后指出了未来的研究方向。

1 动态载荷评估应用场景

1.1 应用场景

变压器载荷能力评估按应用目标和工况可分为系统规划、运行方式调整、设备停运检修计划调整、设备故障紧急支援等, 相应的在时间尺度上可分为长期过负荷、长时过负荷、短期过负荷及短时过负荷, 如图 1 所示, 描述了变压器动态载荷评估的应用场景。

系统短期规划时, 在评估已有变压器健康水平的基础上, 可挖掘其长期动态载荷能力, 以满足区域季节性负荷增长的需求。这种应用可有效减缓变电设备投资 3~5 a。

当系统面临迎峰度夏或冬季负荷高峰时, 为满足以周或月为单位的负荷高峰需求, 可充分考虑变压器以周为单位的长时动态载荷能力。当安排设备停运检修计划或电力现货市场出现输电阻塞等工况时, 变压器有可能承受以小时为单位的短期峰值负荷, 此时可充分利用变压器的 4~8 h 短期动态载荷

能力。

当电力回路设备发生故障或突发短时高峰负荷时, 变压器可能承受持续时间为分钟级峰值负荷, 此时可充分利用变压器 0.25~0.5 h 的短时动态载荷能力^[10]。

1.2 评估体系

图 2 给出了变压器动态载荷能力评估体系, 主要包含了典型负荷及环境温度曲线选取、热点温度测量与计算、变压器状态评估、载荷调整计算等关键技术。

负荷和环境温度直接影响运行变压器热点温度, 因此典型场景下的负荷曲线和环境温度曲线分析是变压器动态载荷能力评估技术的基础^[12-13]。变压器热点通常位于绕组端部 3—4 层线饼附近, 热点温度升高, 绝缘油纸的老化速率加快, 减损变压器绝缘寿命, 因此变压器绕组热点温度的精确获取

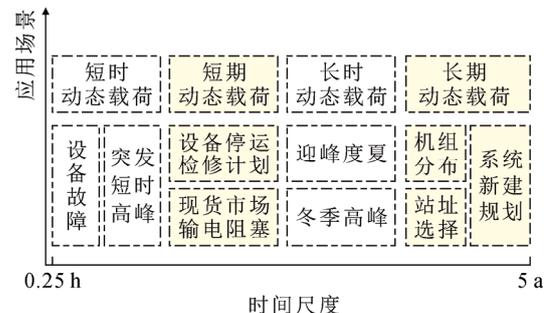


图 1 变压器动态载荷应用场景

Fig.1 Application scenario of DTR

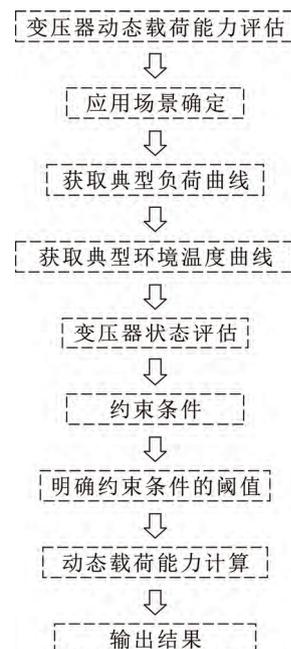


图 2 变压器动态载荷评估体系

Fig.2 Evaluation system of DTR

是动态载荷评估计算的关键环节^[14-16]。变压器在役运行历史不同, 累积负荷和检修历史也不同, 其绝缘状态存在差异, 且仅通过糠醛含量等单参量确定变压器油纸绝缘寿命误差较大, 因此有必要采用多特征参量对变压器的热老化健康状态和油纸绝缘寿命进行综合评估^[17-19]。同时在动态载荷计算中, 需要根据变压器热老化健康状态的评估结果确定不同工况下相应的热老化、热点温度、寿命损失等参数阈值^[20-21]。

2 典型场景负荷和环境温度分析

2.1 典型负荷曲线

负荷曲线为动态载荷能力计算的输入参量, 对于不同场景需要选取对应的负荷曲线^[22], 以图3为例, 在确定变压器正常周期性典型日负荷曲线后, 保持负荷曲线轮廓不变, 调整负载率动态系数可得到长期和短期动态载荷的典型日负荷曲线。

负荷特性受气象、人类生产生活规律等因素影响, 工业区、商用区、居民区等不同区域负荷特性不同, 如商用负荷在节假日呈现明显的负荷高峰, 民用负荷则呈现明显的季节性波动等。

对于日负荷曲线选取, 传统方法在获取历史负荷曲线后, 仅考虑日负载率这一指标, 选择与日平均负载率最为接近日负荷曲线, 该方法对负荷曲线的描述不具备代表性^[23]。文献^[24]则考虑负荷曲线的日负载率、峰谷差、最小负载率等指标, 分别建立上述指标的概率分布, 以分布曲线的期望作为该时刻的负荷值, 最终建立典型日负荷曲线, 但是该方法未考虑负荷曲线中异常数据的影响。针对上述问题, 研究学者提出采用模糊聚类的方法去除异常数据, 并采用关联度方法对负荷曲线的合理性进行评价^[25]。

此外, 随着统计方法和人工智能技术的发展, 还可以采用负荷预测的方法获得不同场景下的负荷曲线, 常用的负荷预测方法有灰色模型、时间序列模型、负荷相似度法、人工智能方法等^[26-28]。时间序列模型、负荷相似度法适用于超短期及短期负荷曲线预测。人工智能方法由机器学习算法向深度学习方向发展, 适用于短时、短期和中长期负荷预测^[29]。

2.2 典型环境温度曲线

环境温度是决定变压器载荷能力的另一个影响因素^[12], 以图4华东某地夏季及冬季的典型环境温度曲线为例, 可以看出, 环境温度受季节影响明

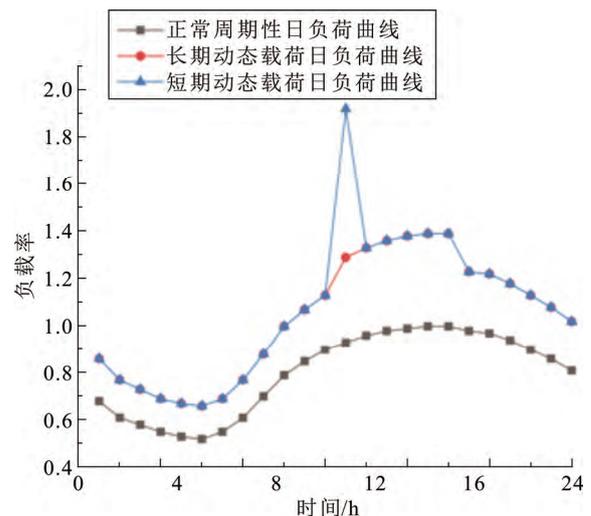
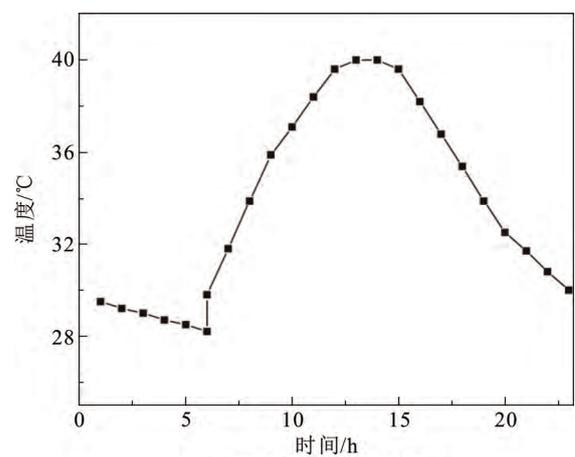
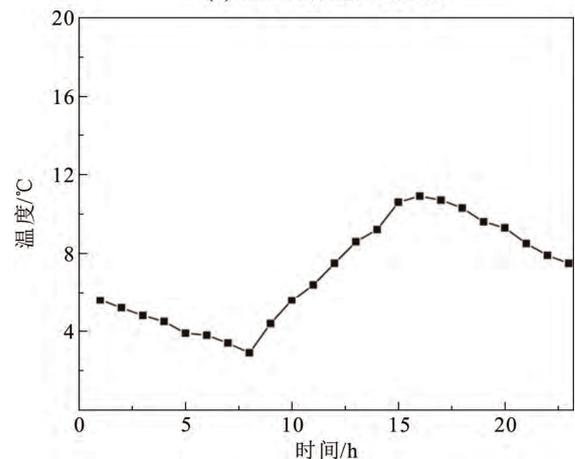


图3 变压器典型工况日负荷曲线

Fig.3 Daily load curve of transformer under typical working conditions



(a) 夏季日典型环境温度



(b) 冬季日典型环境温度

图4 不同季节变压器附近典型环境温度曲线

Fig.4 Typical ambient temperature curves of transformer in different seasons

显。此外对于不同地域、地形, 环境温度也存在差异, 因此需要研究典型场景微气象环境温度的曲线。

目前, 典型日环境温度曲线获取方法没有统一的规定, 和负荷曲线选取方法类似, 典型日环境温度曲线选取方法主要有固定日选取法和选取与日平均环境温度曲线最为接近的日环境温度曲线等方法。

近年来随着人工智能技术的发展, 机器学习也应用于环境温度的预测中, 通过建立包含湿度、太阳辐射、雨水和风速测量值等特征的历史数据库, 可开展以月、天、小时为单位的环境温度预测。在小时级环境温度预测研究中, 文献[30]提出了基于支持向量机的温度预测方法, 利用 1 a 的历史数据, 采用湿度、太阳辐射等 7 个气象变量开展小时级预报, 在 6 h 内预测的环境温度平均误差为 1.34 °C。文献[31]采用递归高阶神经网络(recurrent higher order neural network, RHONN)使用气象局 5 a 的历史环境温度数据预测次日环境温度, 预测精度相比前馈神经网络(pi-sigma neural network, PSNN)提高 1.038%。

上述研究中, 环境温度的历史数据来自于气象部门, 而变压器所处的运行环境不同, 湿度、风速、降雨等微气象环境对变压器运行产生的影响不容忽视^[32-33], 典型环境温度曲线的选取或预测, 使用的历史数据应来自变压器运行所处的微气象环境, 以体现环境温度的典型性。

3 变压器动态载荷评估技术

3.1 变压器热点温度实时测量和辨识

在动态载荷评估技术的应用中, 短时及短期应用场景需要实时获取绕组热点温度^[15], 对于长时和长期的应用场景, 变压器热点温度则通过热点温度计算模型得到^[34]。现有的变压器热点温度获取方法主要有变压器温度实时在线监测、热点温度计算和热点温度预测 3 种方法, 表 1 给出了上述方法的优势与不足、适用场景的比较。

3.1.1 热点温度实时测量

热点温度实时测量方法分为侵入式测量和非侵入式测量两种。典型的为光纤测温^[35-36]及红外测温^[37-38]。光纤传感器侵入式测温中, 传感器如果出现故障, 运维检修难度较大, 同时温度传感器处在高温环境中, 在长期的高温影响下, 传感器可靠性有待验证^[35,39]。碍于停电改装成本与既有绝缘设计改变的风险, 侵入式测温技术难以应用于大量已投运的变压器中。对于红外测温来说其测量结果易受到背景噪声及电磁环境干扰影响, 当外部存在短时

热源等环境因素干扰时, 辨识精度降低。

武汉大学阮江军教授团队针对非侵入式热点温度辨识方法在变压器中的应用开展了研究^[40-42]。如图 5 所示。

通过研究设备内部热源的流线散热模型, 建立外壳特征测温点与变压器内部热点温度的映射关系, 并研究短时热源及散热环境的随机性对热点温度辨识干扰的抑制方法。

热点温度辨识结果与光纤测温温升试验对比, 最大辨识误差不超过 3 °C, 验证了非侵入式变压器

表 1 变压器温度实时测量和辨识模型方法比较

Table 1 Comparison of transformer temperature real-time measurement and calculation models method of transformer

方式	种类	优势	不足	适用场景
侵入式测温	光纤测温	测量精度高	不适用于未预先布置光纤的在运变压器; 绝缘设计要求高	短期/短时
	红外测温	使用方便, 精度较高	易受环境因素及电磁干扰影响	短期/短时
	经验公式	简单易用, 适用范围广	未考虑结构影响, 负荷波动下误差大	中长期/长时/短期/短时
非侵入式测温	热路模型法	适用范围广, 精度高于经验公式	精确模型的热容、热阻阶数高, 同时参数选取依赖试验	中长期/长时/短期/短时
	数值模拟算法	精度高, 可准确定位	计算量大, 实时性差	中长期
	人工智能方法	直接构建热点温度与外壳温度、负荷以及环境因素之间的多维非线性关系	需要大量数据进行训练, 对异常数据敏感	中长期/长时/短期/短时

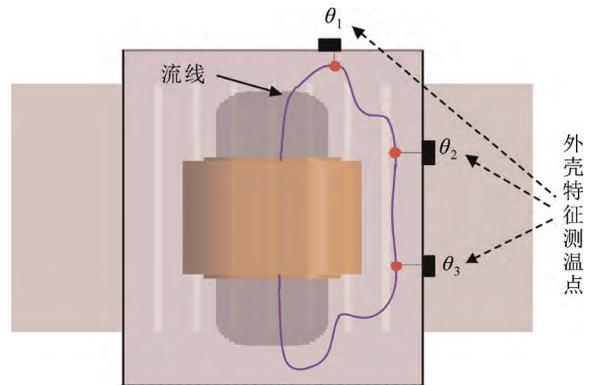


图 5 变压器热点温度逆问题辨识方法

Fig.5 Hot spot temperature inverse problem identification

热点温度辨识方法的有效性和准确性, 目前相关成果在山西省电网进行了试点应用。

3.1.2 热点温度计算方法

热点温度计算方法依据中国国家标准 GB/T 1094.7—2008^[43]、IEEE Standard C57.91—2011^[22]和 IEC 60076-7—2018^[44]中推荐的绕组热点温度计算经验公式、热路模型^[45]、多物理场数值计算^[46]等方法对变压器热点温度进行计算。研究表明, 标准推荐的经验公式方法在负荷突变情况下计算误差大^[34,47]。

在热路模型中, 需要根据变压器的结构, 确定热路模型中的热容及热阻参数, 同时热路模型计算结果的准确性依赖于求解阶数的选取^[48]。现阶段, 变压器热点温度数值计算方法主要是采用有限元方法或有限体积法对变压器开展磁-流-热等多物理场分析, 得到绕组的热点温度, 数值计算法的计算精度取决于材料参数和边界条件^[49], 但数值计算方法工作量大, 计算时间长, 难以满足在运电力设备实时温度检测的需求^[50]。

3.2 变压器热点温度预测方法

为提高短期运行工况下变压器热点温度计算精度, 国内外学者尝试利用人工智能算法对变压器短期热点温度趋势进行预测。文献[51-54]采用神经网络、改进的递归模糊神经网络等对变压器绕组热点温度预测开展了研究, 以变压器内部或外部的特征点作为输入量, 预测绕组热点温度, 研究中使用的样本数据来自于实验室试验, 未考虑风速、光照等因素的影响, 因此需要充分考虑影响热点温度的特征参量, 提高预测精度。除以上人工智能方法外, 支持向量回归机算法、Kalman 滤波算法、核极限学习机也被应用于变压器热点温度或顶层油温的计算中^[55], 热点温度预测误差 $<5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。对于热点温度预测方法来说, 预测结果的精度受模型的拓扑结构、训练样本的数量及样本的准确性影响, 可结合运维期间采集的温度数据开展研究。

3.3 绝缘寿命评估与健康状态评价

在变压器动态载荷过程中, 不同场景下的变压器寿命损失不同, 需要开展热老化健康状态和绝缘寿命评估, 并研究热老化状态与动态载荷能力的关联规律, 以提高动态载荷评估结果的可靠性。

3.3.1 基于统计模型的变压器寿命计算

中国国家标准 GB/T 1094.7—2008^[43]、IEC 60076-7—2018^[44]和 IEEE Standard C57.91—2011^[22]标准中推荐了基于统计模型的变压器油纸相对老化

率的计算公式, 计算时只需要变压器的热点温度这一个参量。除此之外, 变压器绝缘寿命评估方法还包括采用蒙特卡洛模拟法的绝缘寿命计算, 文献[56-57]采用蒙特卡洛法模拟变压器运行的历史, 并考虑了载荷的变化, 计算变压器的剩余寿命。也有研究采用加权移动平均法分析了负载系数变化对变压器年寿命损失的影响, 指出变压器年负载系数如果波动大, 现有绝缘寿命评估结果的误差会增加, 提出以 1 min 为间隔对变压器年寿命损失进行估算, 采用该方法计算得到的剩余寿命比改进前的方法减少 4.5 a^[58]。研究表明, 绝缘油纸老化后期老化速率变缓, 基于统计模型的变压器寿命计算方法不适用于评估变压器绝缘油纸老化后期的剩余寿命^[59]。

3.3.2 基于聚合度的寿命评估方法

绝缘纸老化的过程中, 纤维素分子链断裂导致链长变短, 聚合度值也随之减小。因此, 聚合度值随时间的变化规律能够直接反映绝缘纸的老化程度。Ekenstam 提出的基于聚合度降解速率的油纸老化 1 阶动力学模型是迄今为止应用最为广泛的模型, 而 Emsley 认为该模型不能表征油纸老化后期的状态, 在此基础上, 建立了油纸老化 2 阶动力学方程, 2 阶动力学方程同样存在着一定的不足, 其描述的油纸降解速率在老化过程中并不是一个常数, 同时, 这个指数规律是根据油纸在老化中后期降解速率逐渐变慢的试验数据而假定的, 缺乏较为清晰的物理意义, 因此限制了 2 阶动力学模型的进一步发展^[60]。

英国曼彻斯特大学的 Zhongdong W 等从分子层面出发, 对纤维素降解开展研究, 提出基于聚合度累积的老化动力学模型, 模型各个参量的物理意义明确, 是对纤维素降解动态理论的新发展^[61]。在此基础上, 重庆大学廖瑞金团队对比研究了变压器油中 CO 和 CO₂ 气体、呋喃含量和绝缘纸聚合度的关系, 结合上述累积模型, 建立了温度、水分双因子作用下变压器绝缘纸老化寿命模型。

3.3.3 基于健康指数的寿命评估方法

近年来变压器在线监测技术逐渐成熟, 研究学者在对变压器在线监测数据的处理中提出了变压器健康指数这一参数用于表征变压器健康状态。Jahromi A. 详细论述了变压器健康参数中变压器运行参数和状态参数的权重及健康指数的评价过程, 并提出了基于变压器健康指数的绝缘寿命评估和变压器更换策略^[62]。重庆大学王有元等对英国 EA 公

司提出的设备健康指数公式进行了改进，考虑了变压器主绝缘状态、异常工况带来的绝缘性能下降等因素，建立变压器状态评价与剩余寿命评估模型，形成体系全面的寿命评估模型^[63]。国家电网公司赵飞引入变压器健康指数表征变压器运行状态并采用随机模糊理论加以求解，随后采用改进马尔科夫法预测变压器绝缘寿命，引入变压器负载和环境温度等不确定因素修正变压器寿命损失，预测结果更接近变压器实际运行情况^[64]。

对比上述 3 种绝缘寿命评估方法，基于导则的变压器热点温度的绝缘寿命评估方法使用简单，可对运行中的变压器进行实时评估。基于聚合度的评估方法则可准确了解变压器绝缘油纸的老化程度，在此基础上进行的变压器寿命评估更为准确，但变压器绝缘油纸聚合度的测量手段复杂，实现难度远大于前者，导致了该方法的实际应用效果并不显著。基于健康指数的变压器绝缘状态评估方法大多用于变压器在线监测数据的处理，系统考虑了变压器运行参数、绕组分接头、变压器油中溶解气体和呋喃系列化合物含量及含水量等参数对变压器健康状态的影响，各参数的影响程度采用权重加以描述，因此采用变压器健康指数评估绝缘状态更为全面。

4 典型工况下变压器动态载荷计算方法

在讨论动态载荷评估技术评估体系、影响因素、关键技术的基础上，典型工况下变压器动态载荷计算的具体步骤如图 6 所示。首先获取变压器的负荷、环境温度及相关运维信息，确定动态载荷的场景和运行工况。进一步结合设备负载情况、运行年限、状态监测等信息开展热老化健康状态评价，在此基础上设定约束条件和相应的阈值，并对对应工况下的动态载荷能力进行计算，最后对动态载荷结果输出。对于短期和短时应用场景可结合热点温度在线监测数据对载荷方案调整。

气泡起始温度是影响绕组热点温度阈值的因素之一，气泡出现的温度称为气泡起始温度，对于绝缘油纸含水质量分数约为 2%的变压器来说，热点温度>140 °C时，可能产生气泡，影响变压器的绝缘性能^[65-67]。根据表 2 可以看出：在 2%的含水质量分数下，变压器热点温度 140 °C，在变压器内产生气泡的风险很低。在含水质量分数为 1%的情况下，气泡起始温度远高于含水质量分数为 2%的气泡起始温度。如果水分含量增加，温度阈值将会

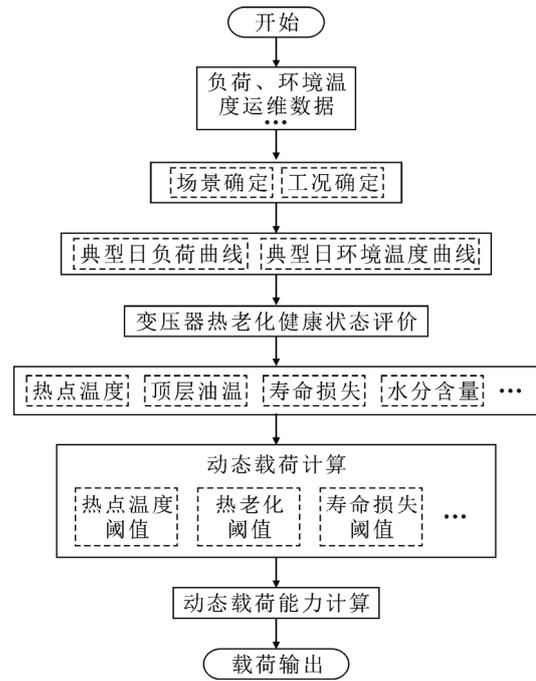


图 6 变压器动态载荷计算

Fig.6 Calculation of DTR

表 2 变压器绝缘油纸气泡起始温度^[68]

Table 2 Transformer insulation oil paper bubble start temperature^[68]

模型名称	气泡起始温度/°C	
	2%含水质量分数	1%含水质量分数
Oommen & Lindgen	142.9	169.3
Przybylek	134.2	160.1
Przybylek	143.8	186.5
Koch & Tenbohlen	156.3	174.8
Perkasa	140	161.4
Gao	151.3	176.1

降低。上述气泡起始温度试验是在未老化的绝缘纸上开展的，对于实际的变压器来说，运行初期，绝缘纸含水质量分数<0.5%，而临近服役年限时，含水质量分数为 4%~8%，因此对于新投运的变压器，可以提高热点温度阈值，对于健康状态较差的变压器有必要根据热老化健康状态评价结果降低热点温度阈值。

对于变压器动态载荷约束来说，除了满足热点温度阈值外还需要满足顶层油温温度阈值、变压器附件约束等，如下式所示^[10]

$$\begin{aligned}
 & \max K \\
 & \text{s.t.} \begin{cases} f_1(K, t) \leq \theta_{\text{top},1}, K \in [0, K_t], t \in [0, T] \\ f_2(K, t) \leq \theta_{\text{hs},1} \\ L(K, t) \leq L_1 \end{cases} \quad (1)
 \end{aligned}$$

式中： $\theta_{\text{hs},1}$ 为变压器绕组热点温阈值； K 为变压器

负载率; t 为运行时间; $\theta_{top,1}$ 为变压器顶层油温的温升阈值; L_1 为寿命损失阈值; K_1 为套管、分接开关等辅助设备容量等级阈值; T 为变压器的负荷周期。

对于绝缘寿命阈值来说, 长期动态载荷中, 需要牺牲变压器部分寿命提高负载能力^[69], 短时动态载荷仅在突发状况下才会出现且持续时间较短, 变压器短期动态载荷使热点温度迅速升高, 寿命损失加速, 除考虑寿命损失外, 还需要考虑辅助设备容量等级的约束^[25, 70-71]。对应不同工况, 如何设定上述约束条件的阈值仍是未来变压器动态载荷计算需要研究的问题。

此外, 在动态载荷其他约束条件的研究中, 文献^[72]考虑变压器安全风险、经济风险 2 个因素, 提出了油浸式风冷变压器短期动态载荷的决策方法, 认为最大载荷不超过额定负荷的 1.47 倍时经济性最优。文献^[73]提出了考虑变压器动态载荷的三阶段系统供电能力实时评估方法, 利用变压器短时动态载荷特性, 建立变压器的故障率约束、经济约束计算系统潮流越限风险, 文献^[3]同时将变压器和架空线路动态载荷技术与电力系统安全约束机组组合相结合, 开展日前调度研究。

5 工程应用

变压器动态载荷技术已在国内外开展了工程应用。1997 年美国电科院与电力公司合作开展了电压等级为 230 kV 的电力回路动态载荷应用^[74], 也是动态载荷技术第一次工程应用, 但是在电网运行层面上, 该技术没有考虑调度、控制决策。此外美国电科院还开发了变压器动态载荷计算软件 PT LOAD^[75], 系统采用离线评估的方式, 可计算不同工况下的热点温度、寿命损失等。

在英国, Alstom Grid UK 对苏格兰电网中的电压等级为 132 kV 的油浸式变压器开展了动态载荷应用^[76]。采用 IEC 60354 中温度计算模型对变压器热点温度进行了迭代计算, 将夏季 1 周载流量较之前提高了 18.3%, 变压器平均运行载流量为 1 648 A, 最大负荷为额定负荷的 1.51 倍。

国内在变压器动态载荷技术应用方面也开展了一定的研究, 2013 年上海交通大学设计了 1 套包含变压器过载能力风险评估、热点温度计算、绝缘寿命评估等模块的变压器动态载荷能力评估系统^[77]。2018 年贵阳地区建立了电网多维度风险调度技术与应急指挥系统, 将变压器动态载荷能力分析模块

纳入该系统, 可对指定变压器的动态载荷能力进行分析^[72]。2018 年西安交通大学对 1 台 220 kV 油浸式变压器动态载荷能力进行评估, 在环境温度为 34 °C 的条件下, 该变压器长期运行动态载荷能力为额定负荷的 1.2 倍^[10], 2021 年其对海南地区某站 220 kV 1 号主变压器退出运行后 2 号主变的动态载荷能力开展评估, 在环境温度为 34 °C 下, 该主变正常周期性动态载荷最大值为额定负荷的 97%^[78]。上述评估系统并未考虑变压器热健康状态及动态载荷调整与系统间动态潮流的约束, 未能应用于系统的调度运行中。因此, 在对变压器载荷能力准确计算的基础上, 结合系统潮流变化研究变压器载荷策略, 将会成为未来变压器动态载荷技术的重点研究方向。

6 结论

本文针对油浸式电力变压器动态载荷评估技术, 分析了该技术存在的问题, 结合应用目标归纳了该技术的典型应用场景, 并对评估关键技术进行研究, 给出了变压器动态载荷评估计算方法, 最后举例说明了现阶段油浸式电力变压器动态载荷技术在实际工程中的应用情况。

油浸式电力变压器动态载荷评估技术在提高变压器利用率的同时, 可缓解负荷集中地区输电阻塞, 为电力系统投资和成本管控提供新的调节手段。随着新型电力系统的建设和电力市场的不断发展, 可增强利益相关者适应新能源为主体下的电力市场掌控能力。针对现有的油浸式电力变压器动态载荷研究的局限性, 未来研究主要概括为以下几个方面。

1) 提高热点温度辨识方法的精度。

研究多物理场下影响热点温度的特征参量, 对各工况下反映变压器热点温度的内部多特征量的关联规律和外部扰动下特征量变化规律进行挖掘, 以提高热点温度辨识精度。

2) 研究动态载荷差异化约束条件。

研究变压器动态载荷能力评估应充分考虑设备热老化健康状态, 通过开展健康状态评估, 建立热老化健康状态与动态载荷的关联规律, 研究差异化的变压器热点温度和老化约束。

3) 实现电力回路动态载荷能力综合评估。

研究典型场景对应的动态潮流需求, 开展电力回路关联设备动态载荷能力影响机理研究, 考虑整体运行工况和运行环境等多个因素, 实现电力回路动态载荷能力综合评估。

参考文献 References

- [1] DAVIS M W. A new thermal rating approach: the real time thermal rating system for strategic overhead conductor transmission lines- part I: general description and justification of the real time thermal rating system[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1977, 96(3): 803-809.
- [2] MOORE T. Dynamic ratings boost transmission margins[J]. EPRI Journal, 2000(1): 18-25.
- [3] VIAFORA N, MOROZOVSKA K, KAZMI S, et al. Day-ahead dispatch optimization with dynamic thermal rating of transformers and overhead lines[J]. Electric Power Systems Research, 2019, 171: 194-208.
- [4] XIAO R, XIANG Y, WANG L, et al. Power system reliability evaluation incorporating dynamic thermal rating and network topology optimization[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6): 6000-6012.
- [5] YANG J, BAI X P, STRICKLAND D, et al. Dynamic network rating for low carbon distribution network operation-A U. K. application[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(2): 988-998.
- [6] KARIMI S, MUSILEK P, KNIGHT A M. Dynamic thermal rating of transmission lines: a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 91: 600-612.
- [7] ZHOU B, XU X L, OR S W, et al. Thermodynamic modelling of buried transformer substations for dynamic loading capability assessment considering underground heat accumulative effect[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 121: 106153.
- [8] KAZMI S, LANERYD T, GIANNIKAS K, et al. Cost optimized dynamic design of offshore windfarm transformers with reliability and contingency considerations[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 128: 106684.
- [9] DAMINOV I, PROKHOROV A, CAIRE R, et al. Assessment of dynamic transformer rating, considering current and temperature limitations[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 129: 106886.
- [10] 刘宁, 李元, 徐尧宇, 等. 役龄累积和状态诱因协同的变压器失效概率模型[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(22): 6783-6791.
- LIU Ning, LI Yuan, XU Yaoyu, et al. A failure probability model of transformers merging increasing service years and operating state inducements[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(22): 6783-6791.
- [11] VIAFORA N, HOLBOLL J, KAZMI S H H, et al. Load dispatch optimization using dynamic rating and optimal lifetime utilization of transformers[C]//2019 IEEE Milan PowerTech. Milan, Italy: IEEE, 2019: 1-6.
- [12] BRACALE A, CARPINELLI G, PAGANO M, et al. A probabilistic approach for forecasting the allowable current of oil-immersed transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(4): 1825-1834.
- [13] 周利军, 唐浩龙, 王路伽, 等. 基于顶层油温升的变压器过载建模与分析[J]. 高电压技术, 2019, 45(8): 2502-2508.
- ZHOU Lijun, TANG Haolong, WANG Lujia, et al. Modeling and analysis of transformer overload based on top oil temperature rise[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(8): 2502-2508.
- [14] 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.
- [15] ARIZA R O, 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.
- [16] DAMINOV I, PROKHOROV A, CAIRE R, et al. Receding horizon algorithm for dynamic transformer rating and its application for real-time economic dispatch[C]//2019 IEEE Milan PowerTech. Milan, Italy: IEEE, 2019: 1-6.
- [17] 廖瑞金, 孟繁津, 周年荣, 等. 基于集对分析和证据理论融合的变压器内绝缘状态评估方法[J]. 高电压技术, 2014, 40(2): 474-481.
- LIAO Ruijin, MENG Fanjin, ZHOU Nianrong, et al. Assessment strategy for inner insulation condition of power transformer based on set-pair analysis and evidential reasoning decision-making[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(2): 474-481.
- [18] CATTERSON V M, MELONE J, GARCIA M S. Prognostics of transformer paper insulation using statistical particle filtering of online data[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2016, 32(1): 28-33.
- [19] 龙凯华, 郭绍伟, 杨大伟, 等. 电力变压器技术寿命的评估预测[J]. 高电压技术, 2015, 41(增刊2): 154-157.
- LONG Kaihua, GUO Shaowei, YANG Dawei, et al. Evaluation and prediction of the technical life of power transformers[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(Supplement 2): 154-157.
- [20] HILL J, WANG Z D, LIU Q, et al. Analysing the power transformer temperature limitation for avoidance of bubble formation[J]. High Voltage, 2019, 4(3): 210-216.
- [21] ZHANG X, WANG Z D, LIU Q, et al. Numerical investigation of oil flow and temperature distributions for ON transformer windings[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 130: 1-9.
- [22] IEEE guide for loading mineral-oil-immersed transformers: IEEE Std C57.91—2011[S]. New York, USA: IEEE, 2011.
- [23] 蔡国伟, 王大亮, 王燕涛, 等. 一种基于最短距离聚类与关联度分析的典型日选取新方法[J]. 中国电力, 2008, 41(4): 15-18.
- CAI Guowei, WANG Daliang, WANG Yantao, et al. A new selection of the typical day based on the analysis of minimum distance cluster and interconnect degree theory[J]. Electric Power, 2008, 41(4): 15-18.
- [24] 唐学用, 万会江, 叶航超, 等. 贵州统调电网典型日负荷特性分析与预测[J]. 中国电力, 2015, 48(9): 24-30.
- TANG Xueyong, WAN Huijiang, YE Hangchao, et al. Analysis and forecast of typical daily load characteristic of Guizhou power grid[J]. Electric power, 2015, 48(9): 24-30.
- [25] 王潇笛, 刘俊勇, 刘友波, 等. 采用自适应分段聚合近似的典型负荷曲线形态聚类算法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(1): 110-118.
- WANG Xiaodi, LIU Junyong, LIU Youbo, et al. Shape clustering algorithm of typical load curves based on adaptive piecewise aggregate approximation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(1): 110-118.
- [26] BRACALE A, CARAMIA P, CARPINELLI G, et al. A bayesian-based approach for a short-term steady-state forecast of a smart grid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(4): 1760-1771.
- [27] WANG Q, LI S Y, LI R R. Forecasting energy demand in China and India: Using single-linear, hybrid-linear, and non-linear time series forecast techniques[J]. Energy, 2018, 161: 821-831.
- [28] YUAN C Q, LIU S F, FANG Z G. Comparison of China's primary energy consumption forecasting by using ARIMA (the auto-regressive integrated moving average) model and GM(1, 1) model[J]. Energy, 2016, 100: 384-390.
- [29] 罗澍忻, 麻敏华, 蒋林, 等. 考虑多时间尺度数据的中长期负荷预测方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(增刊1): 11-19.
- LUO Shuxin, MA Minhua, JIANG Lin, et al. Medium and long-term load forecasting method considering multi-time scale data[J]. Pro-

- ceedings of the CSEE, 2020, 40(Supplement 1): 11-19.
- [30] ORTIZ-GARCÍA E, SALCEDO-SANZ S, CASANOVA-MATEO C, et al. Accurate local very short-term temperature prediction based on synoptic situation support vector regression banks[J]. Atmospheric Research, 2012, 107: 1-8.
- [31] HUSAINI N A, GHAZALI R, MOHD N, et al. Jordan Pi-sigma neural network for temperature prediction[C]//Ubiquitous Computing and Multimedia Applications, Daejeon, South Korea: Springer Berlin Heidelberg, 2011: 547-558.
- [32] 付善强, 蔡富东, 王孟夏, 等. 地区天气实况数据用于架空导线动态扩容的方法[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(2): 207-212.
- FU Shanqiang, CAI Fudong, WANG Mengxia, et al. Dynamic capacity increase method of overhead line using practical regional weather data[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(2): 207-212.
- [33] 靳双龙, 迟永宁, 王勃, 等. 气象传感监测技术在电网中的应用研究[J]. 电力信息与通信技术, 2020, 18(4): 84-90.
- JIN Shuanglong, CHI Yongning, WANG Bo, et al. Application research of meteorological sensing and monitoring technology in power grid[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2020, 18(4): 84-90.
- [34] FENG D, WANG Z, 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.
- [35] LU P, LALAM N M. Distributed optical fiber sensing: review and perspective[J]. Applied Physics Reviews, 2019, 6(4): 41302.
- [36] 刘云鹏, 李昕焯, 李欢, 等. 内置分布式光纤传感的 35 kV 油浸式变压器研制[J]. 高电压技术, 2020, 46(6): 1886-1894.
- LIU Yunpeng, LI Xinye, LI Huan, et al. Development of 35 kV oil-immersed transformer with distributed optical fiber sensing[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(6): 1886-1894.
- [37] 王旭红, 李浩, 樊绍胜, 等. 基于改进 SSD 的电力设备红外图像异常自动检测方法[J]. 电工技术学报, 2020, 35(增刊 1): 302-310.
- WANG Xuhong, LI Hao, FAN Shaosheng, et al. Automatic detection method of infrared image abnormality of power equipment based on improved SSD[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(Supplement 1): 302-310.
- [38] JAFFERY Z A, DUBEY A K. Design of early fault detection technique for electrical assets using infrared thermograms[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 63: 753-759.
- [39] RAGHAVAN A, KIESEL P, TEEPE M, et al. Low-cost embedded optical sensing systems for distribution transformer monitoring[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 36(2): 1007-1014.
- [40] 全好, 阮江军, 龚若涵, 等. 基于流线和 SVR 的变压器热点温度反演方法[J]. 电工电能新技术, 2018, 37(11): 23-31.
- QUAN Yu, RUAN Jiangjun, GONG Ruohan, et al. Inversion method of transformer hot spot temperature based on streamline and SVR[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2018, 37(11): 23-31.
- [41] RUAN J J, DENG Y Q, QUAN Y, et al. Inversion detection of transformer transient hot spot temperature[J]. IEEE Access, 2021, 9: 7751-7761.
- [42] RUAN J J, DENG Y Q, HUANG D C, et al. HST calculation of a 10 kV oil-immersed transformer with 3D coupled-field method[J]. IET Electric Power Applications, 2020, 14(5): 921-928.
- [43] 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.
- Power transformers-part 7: loading guide for oil-immersed power transformer: GB/T 1094.7—2008[S]. Beijing, China: China Standard Press, 2009.
- [44] Power transformers-part 7: loading guide for oil-immersed power transformers: IEC 60076-7—2018[S]. London, England: IEC, 2018.
- [45] 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(3): 968-974.
- DING Yuqin, ZHANG Qiaogen, GAO Meng, et al. Distributed thermal circuit model of oil-immersed distribution transformers[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(3): 968-974.
- [46] 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 Changeng, et al. Transformer loss calculation and hot spot prediction based on magnetic-heat-current coupled model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(21): 4483-4491.
- [47] AMODA O A, TYLAVSKY D J, MCCULLA G A, et al. Acceptability of three transformer hottest-spot temperature models[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 27(1): 13-22.
- [48] 滕黎, 陈伟根, 孙才新. 油浸式电力变压器动态热路改进模型[J]. 电网技术, 2012, 36(4): 236-241.
- TENG Li, CHEN Weigen, SUN Caixin. Improved dynamic thermal circuit model of oil-immersed power transformer[J]. Power System Technology, 2012, 36(4): 236-241.
- [49] TSILI M A, AMOIRALIS E I, KLADAS A G, et al. Power transformer thermal analysis by using an advanced coupled 3D heat transfer and fluid flow FEM model[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2012, 53: 188-201.
- [50] SILVA J R, BASTOS J P. Online evaluation of power transformer temperatures using magnetic and thermodynamics numerical modeling[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2017, 53(6): 1-4.
- [51] 陈伟根, 滕黎, 刘军, 等. 基于遗传优化支持向量机的变压器绕组热点温度预测模型[J]. 电工技术学报, 2014, 29(1): 44-51.
- CHEN Weigen, TENG Li, LIU Jun, et al. Prediction model of transformer winding hot spot temperature based on genetic optimization support vector machine[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(1): 44-51.
- [52] 苏小平, 陈伟根, 奚红娟, 等. 采用 Kalman 滤波算法预测变压器绕组热点温度[J]. 高电压技术, 2012, 38(8): 1909-1916.
- SU Xiaoping, CHEN Weigen, XI Hongjuan, et al. Using Kalman filtering algorithm to predict the hot spot temperature of transformer windings[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(8): 1909-1916.
- [53] 廖才波, 阮江军, 蔚超, 等. 基于改进支持向量机的变压器实时热点温度预测方法研究[J]. 高压电器, 2018, 54(12): 174-179.
- LIAO Caibo, RUAN Jiangjun, YU Chao, et al. Research on transformer real-time hot spot temperature prediction method based on improved support vector machine[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(12): 174-179.
- [54] TAGHIKHANI M A. Power transformer top oil temperature estimation with GA and PSO methods[J]. Energy and Power Engineering, 2012, 4(1): 41-46.
- [55] 陈伟根, 奚红娟, 苏小平, 等. 广义回归神经网络在变压器绕组热点温度预测中的应用[J]. 高电压技术, 2012, 38(1): 16-21.
- CHEN Weigen, XI Hongjuan, SU Xiaoping, et al. Application of generalized regression neural network in predicting the hot spot temperature of transformer winding[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(1): 16-21.
- [56] ABU-ELANIEN A, SALAMA M. A Monte Carlo approach for calculating the thermal lifetime of transformer insulation[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2012, 43(1): 481-487.
- [57] 杜林, 袁蕾, 熊浩, 等. 应用蒙特卡罗模拟法的电力变压器热特性绝缘寿命评估[J]. 高电压技术, 2010, 36(4): 856-861.

- DU Lin, YUAN Lei, XIONG Hao, et al. Evaluation of insulation life of power transformer thermal characteristics using Monte Carlo simulation method[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(4): 856-861.
- [58] BIÇEN Y, ARAS F, KIRKICI H. Lifetime estimation and monitoring of power transformer considering annual load factors[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21(3): 1360-1367.
- [59] VASOVIC V, LUKIC J, MIHAJLOVIC D, et al. Aging of transformer insulation-experimental transformers and laboratory models with different moisture contents: part I-DP and furans aging profiles[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26(6): 1840-1846.
- [60] 廖瑞金, 孙会刚, 尹建国, 等. 水分对油纸绝缘热老化速率及热老化特征参量的影响[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 34-42.
- LIAO Ruijin, SUN Huigang, YIN Jianguo, et al. Influence on the thermal aging rate and thermal aging characteristics caused by water content of oil-paper insulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 34-42.
- [61] DING H Z, WANG Z D. On the degradation evolution equations of cellulose[J]. Cellulose, 2007, 15(2): 205-224.
- [62] JAHROMI A, PIERCY R, CRESS S, et al. An approach to power transformer asset management using health index[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2009, 25(2): 20-34.
- [63] 王有元, 陈璧君. 基于层次分析结构的变压器健康状态与综合寿命评估模型[J]. 电网技术, 2014, 38(10): 2845-2850.
- WANG Youyuan, CHEN Bijun. An integrated life estimation model of power transformer based on hierarchical architecture and health index[J]. Power System Technology, 2014, 38(10): 2845-2850.
- [64] 赵飞, 睦欢然, 戴岩, 等. 基于随机模糊理论和改进马尔科夫法的变压器寿命评估[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(15): 39-44.
- ZHAO Fei, SUI Huanran, DAI Yan, et al. Transformer life assessment based on random fuzzy theory and improved Markov method[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(15): 39-44.
- [65] KOCH M, TENBOHLEN S. Evolution of bubbles in oil-paper insulation influenced by material quality and ageing[J]. IET Electric Power Applications, 2011, 5(1): 168-174.
- [66] 张永泽, 唐炬, 潘成, 等. 流动变压器油中气泡动力学行为及电场分布仿真[J]. 高电压技术, 2020, 46(6): 157-165.
- ZHANG Yongze, TANG Ju, PAN Cheng, et al. Simulation of the bubble dynamics and electric field distribution in flowing transformer oil[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(6): 157-165.
- [67] 高萌, 张乔根, 丁玉琴, 等. 油浸式变压器匝间纸绝缘中水分扩散特性[J]. 高电压技术, 2019, 45(1): 117-123.
- GAO Meng, ZHANG Qiaogen, DING Yuqin, et al. Moisture diffusion characteristics in turn-to-turn paper insulation of oil-impregnated transformers[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(1): 117-123.
- [68] HILL J, WANG Z, LIU Q, et al. Analysing the power transformer temperature limitation for avoidance of bubble formation[J]. High Voltage, 2019, 4(3): 210-216.
- [69] RAITH J, BONINI C, SCALA M, et al. Simulation of long-term transformer operation with a dynamic thermal, moisture and aging model[C]//5th International Colloquium on Transformer Research. Opatija, Croatia: Springer, 2020: 211-226.
- [70] BRACALE A, CARAMIA P, CARPINELLI G, et al. Smar trafo: a probabilistic predictive tool for dynamic transformer rating[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 36(3): 1-4.
- [71] LUPANDINA I, GAWLIK W, SCHRAMMEL M, et al. Evaluation of dynamic loading capability for optimal loading strategies of power transformers[J]. E&I Elektrotechnik und Informationstechnik, 2020, 137(8): 515-522.
- [72] 章禹. 变压器健康状态评价及短期增容研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- ZHANG Yu. Research on transformer health state evaluation and short-term capacity increase[D]. Hangzhou, China: Zhejiang University, 2018.
- [73] 张行, 何迪, 章禹, 等. 一种计及主变可载性约束的三阶段配电网供电能力实时评估方法[J]. 电网技术, 2016, 40(8): 2430-2437.
- ZHANG Xing, HE Di, ZHANG Yu, et al. A three stage real-time evaluation method for power supply capability of distribution network with constraint of transformer overload capacity[J]. Power System Technology, 2016, 40(8): 2430-2437.
- [74] DOUGLASS D A, EDRIS A, PRITCHARD G A. Field application of a dynamic thermal circuit rating method[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(2): 823-831.
- [75] PTLOAD version 6.0 user manual[R]. Palo Alto, USA: The Electric Power Research Institute, 2002.
- [76] LLOYD G, BOUCHET R G, AN C, et al. Real-time thermal rating and active control improved distribution network utilisation[C]//2012 47th International Universities Power Engineering Conference (UPEC). Uxbridge, UK: IEEE, 2013: 1-6.
- [77] 朱柳慧. 变压器过载能力优化及运行风险评估方法[D]. 上海交通大学, 2013.
- ZHU Liuhui. Transformer overload capacity optimization and operation risk assessment method[D]. Shanghai, China: Shanghai Jiaotong University, 2013.
- [78] 张冠军. 知识+数据驱动的大型电力变压器状态评估与风险预测[R]. 西安: 西安交通大学, 2021.
- ZHANG Guanjun. Knowledge+data-driven state assessment and risk prediction of large power transformers[R]. Xi'an, China: Xi'an Jiaotong University, 2021.



DONG Xuzhu
Ph.D., Professor
Corresponding author

董旭柱(通信作者)

1970—, 男, 博士, 教授, 博导, 国家特聘专家
主要从事智能配电网和设备资产管理、计算高电压方等面的研究工作
E-mail: dongxz@whu.edu.cn



ZHANG Chen
Ph.D. candidate

张琛

1990—, 男, 博士生
主要从事变压器动态载荷计算方面的研究工作
E-mail: zhangchen@whu.edu.cn

收稿日期 2021-05-23 修回日期 2021-06-08 编辑 曾文君