

城市轨道交通连续冲击负荷 对主变压器热寿命影响研究

叶青¹, 赵文彬¹, 郑欣², 徐斌¹
(1. 上海电力大学 电气工程学院, 上海 200090;
2. 上海申通地铁集团有限公司, 上海 201103)

摘要: 主变压器作为连接主网与城市轨道交通电网的关键电力设备, 其安全稳定运行具有重要意义。但由于地铁负荷的冲击特性不同于一般电网的电力负荷, 对主变压器的热寿命损失影响更复杂。为分析地铁冲击负荷对主变压器热寿命损失的变化, 本文根据地铁冲击负荷时变性, 对实测地铁冲击负荷波形分解及特征提取, 设置多类模拟场景, 验证热传递微分方程法在地铁冲击场景中的适用性, 并总结多场景下地铁负荷对变压器的影响, 确定地铁主变压器的寿命损失。分析结果表明: 热传递微分方程法可作为地铁冲击负荷场景的计算方法, 且相比于常规电力负荷, 地铁冲击负荷作用下的主变压器寿命损失更严重, 对地铁场景下的主变压器需提前开展寿命预测与设备管理。

关键词: 冲击负荷; 主变压器; 城市轨道交通; 电网; 热传递微分方程法; 热老化评估
中图分类号: U239.5 **文献标识码:** A

A study on the effect of continuous impact load on thermal life of main transformer in urban rail transit

YE Qing¹, ZHAO Wenbin¹, ZHENG Xin², XU Bin¹

(1. School of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;
2. Shanghai Shentong Metro Group Co., Ltd., Shanghai 201103, China)

Abstract: The main transformer is key power equipment connecting the main network with the urban rail transit grid, and therefore, its safe and stable operation has great significance. However, the impact characteristics of the metro load is different from the general power load of the grid, resulting in a more complex effect on the thermal life loss of the main transformer. In order to analyze the change of thermal life loss of the main transformer due to the impact load of the metro, in this paper, the waveform of the measured impact load of the metro was decomposed and its characteristics were extracted according to the time-varying characteristics of the impact load of the metro. Multiple simulation scenarios were set up to verify the applicability of the heat transfer differential equation method in the metro impact scenario, and the effect of the metro load on the transformer in multiple scenarios was summarized to determine the life loss of the main transformer of the metro. The analysis results show that the heat transfer differential equation method can be used as a calculation method for impact load scenarios of the metro. The life loss of the main transformer under the action of the impact load of the metro is more serious than that of the conventional electric load. The life prediction and equipment management shall be performed in advance for the main transformer in metro scenarios.

Keywords: impact load; main transformer; urban rail transit; grid; heat transfer differential equation method; thermal aging assessment

通信作者: 赵文彬 (1977—), 男, 高级工程师, 研究方向为电气设备状态管理和高压新技术应用; E-mail: zhaowenbin@shiep.edu.cn

引用格式: 叶青, 赵文彬, 郑欣, 等. 城市轨道交通连续冲击负荷对主变压器热寿命影响研究[J]. 机车电传动, 2023(1): 122-130.

Citation: YE Qing, ZHAO Wenbin, ZHENG Xin, et al. A study on the effect of continuous impact load on thermal life of main transformer in urban rail transit[J]. Electric Drive for Locomotives, 2023(1): 122-130.

0 引言

城市轨道交通是低碳生活时代的主要出行选择, 越来越多的人选择地铁出行, 伴随行车密度大幅提升, 造成地铁供电需求激增, 供电变压器负载水平逐渐接近或超过规划容量, 给供电安全带来隐患^[1]。

目前上海地铁已经成为全球最大的城市轨道交通系统, 主要采用集中供电模式^[2]。集中供电模式是我国城市轨道交通供电系统的主要形式, 其中主变负荷由牵引负荷和非牵引负荷两部分组成^[3]。由于牵引负荷受多列车运行影响, 因而整体呈现出连续冲击特性^[4-6], 这与电网变压器的负荷特性有较大差异。由此导致地铁冲击负荷对变压器绝缘寿命影响具有特殊性, 关系到地铁供电和运行安全^[7]。相关学者对变压器冲击负荷效应进行了针对性研究。文献[8]通过有限元仿真, 建立考虑负荷特性的牵引变压器热负荷预测模型, 并进行温度场耦合计算, 证明了负载率对牵引变压器的热点温度有较大影响; 文献[9]分析牵引负荷引起的电、热和机械应力对变压器绝缘系统性能的破坏作用, 研究牵引负荷中大量谐波对变压器绝缘的损害, 认为牵引冲击性负荷是造成牵引变压器寿命损失的主要因素; 文献[10]改进基于顶层油温的热点温度估算模型, 综合考虑多种约束条件, 评估在不同负荷下变压器的负荷能力, 发现常规工况下变压器的周期性负荷能力约为额定值115%左右; 文献[11]提出一种基于顶层油温升的变压器过负载计算模型, 得出油浸式变压器过负载运行下的温升变化规律及关键性热参数; 文献[12]分析了电力变压器的总负载曲线并计算热点温度, 结果表明变压器温度超过热极限将使其寿命低于规定的正常寿命。

由文献研究成果可知, 冲击负荷会对变压器寿命造成不利影响^[13]。因此, 本文以时间为自变量, 对地铁冲击负荷进行波形分解, 设置不同负荷模拟场景。在选取适用于地铁冲击负荷非线性变化的变压器热点温度计算模型过程中, 总结多种模拟场景下变压器热老化效应的一般规律。通过强化计算模型的输入条件, 使模拟仿真逐步与实际运行一致, 在此过程中, 根据所得变压器热点温度与寿命损失曲线, 分析地铁场景下冲击负荷变化与其他变量对变压器热老化效应的影响程度, 对比了地铁负荷与电网负荷对主变压器热寿命的影响。

1 时变冲击负荷下变压器绝缘寿命损失建模

地铁供电网络大多采用集中式供电, 该供电方式从110 kV电网取电, 经过主变压器降压到35 kV^[14], 再由电缆线路传输给地铁变电所, 典型的拓扑结构如图1

所示。

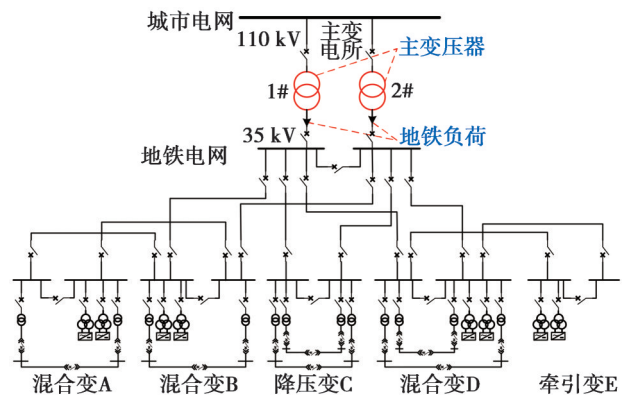


图1 地铁供电系统结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram for structure of the metro power supply system

由图1可知, 地铁供电网包含多类型变电所, 不同变电所排列组合时对应地铁负荷存在差异, 且牵引负荷会随多列车频繁启停发生变化, 这些因素均导致地铁负荷呈现非线性特征。在建模中, 为保障地铁冲击负荷被准确表述, 首先对其进行波形分解获取典型特征, 设置负荷多种局部变化场景; 其次提出一种适用于地铁冲击负荷场景的电力变压器热老化计算方法, 确定所提方法的优越性; 最后根据冲击负荷典型波形, 列举多种模拟场景方案。

1.1 冲击负荷的典型特征

地铁供电变压器与电网变压器设计相同, 但供电负荷间却存在较大差异, 两者的典型日负荷特性对比如图2所示, 其中地铁负荷曲线为秒级采样实测数据, 电网负荷同样存在功率快速波动现象, 但幅度变化范围较小^[15-16]。

由图2可知, 电网变压器所带负荷波动较小, 整体上变化缓慢, 可等效为恒定负荷。地铁供电变压器所带负荷上下波动较为频繁, 难以获取规律, 且相邻时间段内负荷变化差别较大。

为充分说明地铁负荷变化中的时变性, 以冲击负荷波形变化为主要研究对象, 应用文献[17]中变压器在过励磁情况下的多种负荷曲线的实例讨论分析模式, 通过规则的三角波模拟冲击负荷变化场景, 对冲击负荷波形分解并确定典型特征。

根据实测冲击负荷数据, 将其等效为多个不同三角波与恒定负荷组成的波形。考虑到冲击负荷连续性变化的特点, 在分析地铁供电变压器热老化效应时, 应计及相邻负荷的影响。因变压器的散热过程需要一定时间, 所以可通过多种连续三角波模拟不同的冲击负荷场景, 如图3所示, 可通过4种典型负荷场景进行模拟, 包括单个不同冲击、两个相同冲击、两个不同冲击、冲击与恒定负荷, 其中两个不同冲击又包含小冲击接大冲击和大冲击接小冲击两种情况。为便于讨

论, 此处以一个规则三角波为例, 规定冲击峰值表示一个三角波的最大值, 规定时间尺度表示一个三角波从起点到终点之间的时间大小。

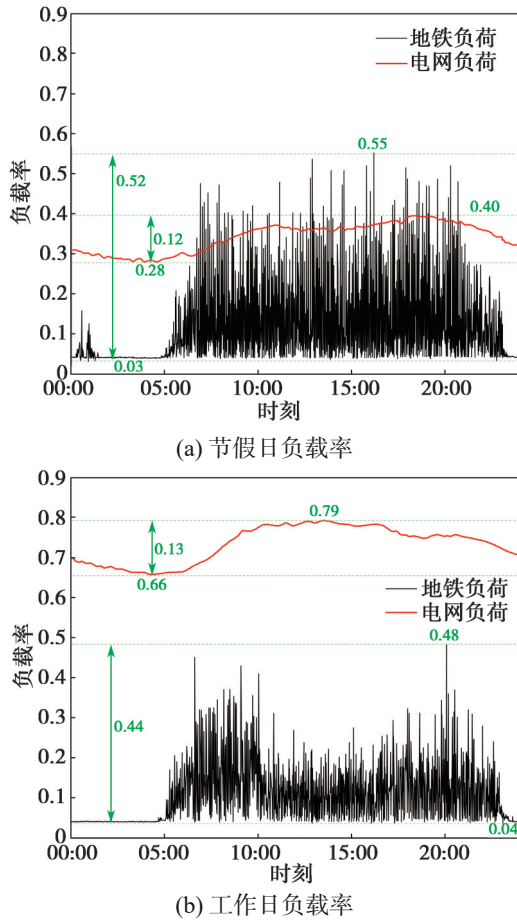


图2 地铁与电网变压器典型日负荷变化图

Fig. 2 Typical daily load changes of transformers for the metro and the grid

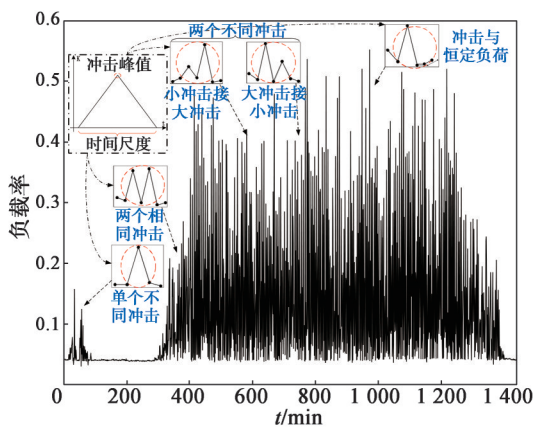


图3 节假日实测曲线中典型负荷场景

Fig. 3 Typical load scenarios in the measured curves during holidays

当实测负荷数据用规则三角形模拟时, 均可通过此4种基础冲击负荷场景排列组合来近似等效, 且由于选取的典型负荷场景较为简单, 便于根据结果验证所选取的变压器热老化计算模型的有效性, 同样有利于从本质分析冲击负荷对变压器热老化的影响。

1.2 适用于地铁冲击负荷场景的电力变压器热老化效应计算方法

电力变压器热老化效应与设备内部绝缘纸的热寿命损失有关, 而变压器绝缘纸的剩余使用寿命很大程度上取决于绕组热点温度^[18], 本文提出一种将地铁负荷作为输入量计算绕组热点温度值, 适用于变压器热老化效应分析。

由于地铁冲击负荷具有时变特性, 且负载随时间呈不规则变化, 选取适用于任意时变负载与时变环境温度下的微分方程法求解。通过热模型常数、时间常数及变化的负载率 K , 对热点温度计算公式中的各部分修正, 得到新的随环境温度和负载率变化的热点温度 θ'_h 与寿命损失 L 的公式^[19]如式(1)。

$$\left. \begin{aligned} \theta'_h &= \theta'_a + \Delta\theta'_o + \Delta\theta'_h \\ V_n &= e^{\left(\frac{15000}{110+273} - \frac{15000}{\theta'_a+273} \right)} \\ L &= \sum_{n=1}^N V_n \times t_n \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: θ'_a 为基于变化环境温度下的底层油温; $\Delta\theta'_o$ 为基于变化负载率下的顶层油温对底层温度的梯度; $\Delta\theta'_h$ 为基于变化负载率下的热点温度对顶层油温的梯度, V_n 表示热改性纸的相对老化率, t_n 表示时间间隔。

在分析负载率变化影响的过程中, 考虑负载突变可能导致热点温度上升, 以及热点的油流变化率对热点温度的缓慢作用。使用 a_1 、 a_2 、 a_3 分别表示变化的环境温度与负载率对热点温度公式中各参数的回归系数。具体的关系式如下:

$$\theta'_a = a_1 \times \theta_a = \frac{\theta_{ar}}{1 + K_{11} \times \tau_0 \times S} \quad (2)$$

$$\theta'_o = a_2 \times \Delta\theta_o = \frac{\theta_{or}}{1 + K_{11} \times \tau_0 \times S} \times \left[\frac{1 + K^2 \times R}{1 + R} \right]^x \quad (3)$$

$$\Delta\theta_o = a_3 \times \Delta\theta_h = K^y \times \Delta\theta_{hr} \times \left[\frac{K_{21}}{1 + K_{22} \times \tau_w \times S} - \frac{K_{21} - 1}{1 + (\tau_0 / K_{22}) \times S} \right] \quad (4)$$

公式中各参数表示含义如表1所示。

通过实测数据分析可知变量环境温度 θ_{ar} 和负载率 K 难与时间形成精准且有规律性的函数关系, 因此在计算中需实时获取 θ_{ar} 和 K 值, 并求解对应时刻的热点温度值。为得到相关数据, 首先需确定采样周期大小, 该值与在差分方程中叠加计算的时间增量 dt 相同。为保证计算精度, 要求 dt 值应小于时间常数的一半, 由此确定 dt 值范围。

$$dt \leq \min\left(\frac{\tau_0}{2}, \frac{\tau_w}{2}\right) \quad (5)$$

将微分方程转化为差分方程形式简化计算, 求出各 dt 间隔中变化的顶层油温值 $d\theta'_o$ 与由变化负载率而产生的 $d\Delta\theta'_h$ 。其中 $\Delta\theta'_h$ 有两部分相减构成, 分别表示为 $\Delta\theta'_{h1}$ 与 $\Delta\theta'_{h2}$ 。

表1 公式中部分参数含义

Table 1 Meanings of some parameters in the formula

参数	含义
K_{11}	热模型常数1
K_{21}	热模型常数2
K_{22}	热模型常数3
τ_0	油时间常数的均值
τ_w	绕组时间常数
S	拉普拉斯算子
x	油指数
y	绕组指数
R	额定电流下负载损耗与空载损耗的比值
θ_{ar}	变化的环境温度
$\Delta\theta_{or}$	额定电流下热点温度对顶层油温的梯度
$\Delta\theta_{hr}$	额定损耗下顶层油温的稳态温升

$$d\theta'_o = \frac{dt}{K_{11} \times \tau_0} \times \left[\left(\frac{1 + K^2 \times R}{1 + R} \right)^x \times \Delta\theta_{or} - (\theta'_o - \theta'_a) \right] \quad (6)$$

$$d\Delta\theta'_{h1} = \frac{dt}{K_{22} \times \tau_w} \times [K_{21} \times K^y \times \Delta\theta_{hr} - \Delta\theta'_{h1}] \quad (7)$$

$$d\Delta\theta'_{h2} = \frac{dt}{\tau_0 / K_{22}} \times [(K_{21} - 1) \times K^y \times \Delta\theta_{hr} - \Delta\theta'_{h2}] \quad (8)$$

式(2)和式(3)转化为式(6), 式(4)转化为式(7)和式(8)。通过将差分值叠加获得经各时间间隔后的 θ'_o 、 $\Delta\theta'_{h1}$ 、 $\Delta\theta'_{h2}$ 值。以第 n 个时间段为例, 热点温度表示为:

$$\Delta\theta'_{h(n)} = \Delta\theta'_{h1(n)} - \Delta\theta'_{h2(n)} \quad (9)$$

$$\theta'_{h(n)} = \theta'_{o(n)} + \Delta\theta'_{h(n)} \quad (10)$$

热传递微分方程法适用于环境温度与负载率变化下变压器热点温度计算, 文献[20-22]均使用与本节原理相同的方法计算非线性负载下的变压器寿命损失, 说明此计算方法可应用在非线性负载下的场景分析中, 但地铁冲击负荷变化不仅非线性, 而且具有随机性和时变性的特点, 微分方程解法能否满足对较短时间内

持续发生变化的负荷状态求解, 仍需进一步分析。

1.3 仿真场景设置

实测场景中地铁负荷变化十分复杂, 为更好地研究冲击负荷变化对变压器的作用, 并区分不同输入变量对变压器的影响程度, 通过设置多种仿真场景, 对模型的输入条件进行迭代, 使模拟仿真逐步与实际运行相一致。仿真场景设置如图4所示。

场景设置包括4部分, 表2为具体的4个案例。其中, K 、 K_1 、 K_2 是不同的负载率值, 整体上案例设置呈现出一种递进关系, 将前一个案例的研究作为后一个案例的基础, 在模拟过程中不断增加案例的复杂性, 达到逐渐还原真实场景的目的。在案例设定的基础上, 结合所提出的适用于地铁冲击负荷场景的电力变压器热老化效应计算方法, 下面将进行仿真模拟与结果分析。

2 仿真结果与讨论

根据以上章节中多种模拟场景与案例设置, 采用适用于地铁冲击负荷场景的电力变压器热老化效应计算方法, 对4种案例进行计算, 获得不同场景设置下变压器热点温度变化与寿命损失变化, 对结果进行分析并获得相关结论。

2.1 案例1(4种典型特征的冲击负荷)

设置4类典型冲击负荷波形, 通过改变计算模型中冲击负荷波形的输入峰值模拟不同场景。在场景设置中, 冲击负荷波形的时间尺度以1 min为单位进行计量, 冲击峰值在0到1之间以0.1为间隔进行变化。此时不考虑环境温度变化的影响, 由GB/T 1094.7计算出等效环境温度值^[19], 代入计算。冲击负荷模拟输入与模拟结果如表3和表4所示。其中 K_{max} 为冲击负荷峰值, θ_{hmax} 为热点温度最大值。

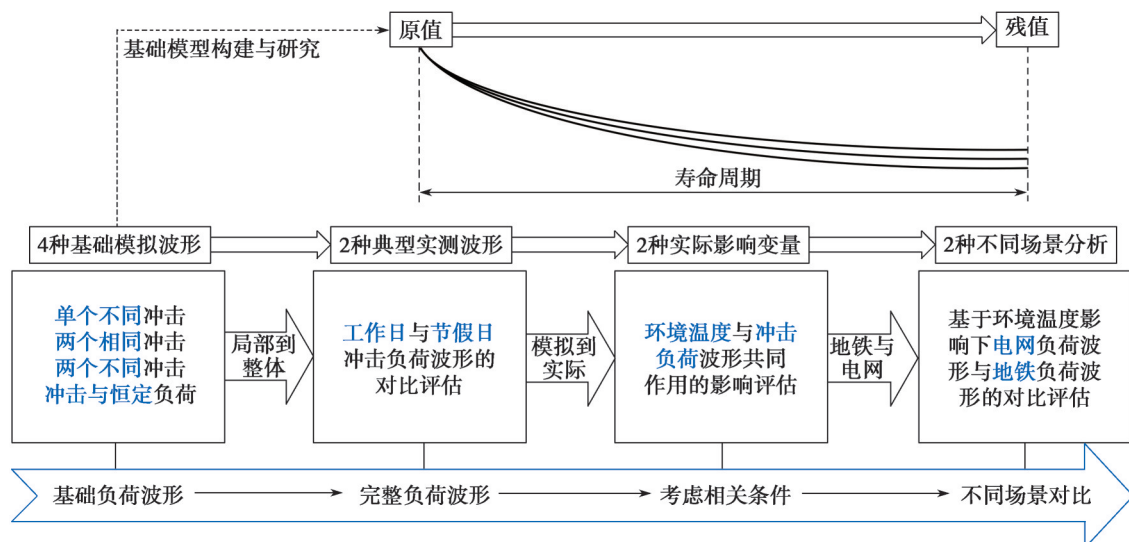


图4 仿真场景关系说明图

Fig. 4 Illustration of simulation scenario relationship

表2 场景说明情况表
Table 2 Illustration of scenarios

序号	案例内容	模型的输入
案例1	单个不同冲击	K 从0.1变化到1
	两个相同冲击	K_1 与 K_2 均为0.5, 时间间隔从1 min到10 min
	两个不同冲击	K_1 为0.5, K_2 从0.6变化到1或从0.4变化到0
	冲击与恒定负荷	K_1 为0.5, K_2 与 K_3 值或平均值取0.1、0.3、0.5
案例2	不同种类的每日冲击负荷对比	环境温度恒定为年加权环境温度, 负荷为工作日与节假日的实测波形负荷
案例3	环境温度与冲击负荷共同作用	环境温度为实时变化的环境温度, 负荷为工作日与节假日的实测波形负荷
案例4	冲击负荷与恒定负荷之间对比	环境温度为实时变化的环境温度, 负荷为一周内地铁负荷与电网负荷的实测波形负荷

表3 仅有冲击负荷作用下部分模拟所得结果
Table 3 Partial simulation results only under impact load

类型	K_{\max}	$\theta_{h \max} / ^\circ\text{C}$	$\theta_{h(t=60 \text{ min})} / ^\circ\text{C}$	$\Delta L/h$
单个不同冲击	$K:[0.1, 1]$	[30.69,34.43]	[30.51,30.66]	[0.002 1,0.002 5]
两个相同冲击	$K_1:0.5; K_2:0.5$	[32.72,33.36]	[30.57,30.60]	[2.37e ⁻³ , 2.38e ⁻³]
小冲击接大冲击	$K_1:0.5; K_2:[0.6, 1]$	[33.61,35.57]	[30.60,30.71]	[0.002 4,0.002 7]
大冲击接小冲击	$K_1:0.5; K_2:[0, 0.4]$	[32.04,32.78]	[30.54,30.56]	[0.002 2,0.002 3]

表4 冲击负荷与恒定负荷共同作用下部分模拟所得结果
Table 4 Partial simulation results under the action of impact load and constant load

类型	K_{\max}	$\theta_{h \max} / ^\circ\text{C}$	$\theta_{h(t=300 \text{ min})} / ^\circ\text{C}$	$\Delta L/h$
单冲击与恒定负荷	$K_1:0.5; K_2:0.3; K_3:[0.1,0.5]$	[40.72, 52.86]	[32.35, 52.86]	[0.019 8, 0.234 8]
多冲击与恒定负荷	$K_1:0.5; K_2:0.3; \bar{K}_3:[0.1,0.5]$	[43.91, 52.89]	[35.66, 52.89]	[0.028 7, 0.246 3]

由表3和表4可知, 当选取热传递微分方程法计算典型冲击模型对应热点温度变化时, 能明显观测出热点温度的积累与散失。当频繁施加冲击负荷时, 温度会对应快速升高, 但散热却随时间变化缓慢, 此现象与实际变压器热量变化过程相吻合, 验证了热传递微分方程法在快速冲击负荷场景下的适用性, 可运用在地铁场景分析。

不同类型模拟场景对电力变压器热点温度和寿命损失的影响, 总结规律如下:

① 单个冲击时, 热点温度变化曲线由冲击峰值决定。越高的冲击峰值, 对应寿命损失越严重。寿命损失不随冲击峰值的等差增长而等差变化, 反而不断增大。

② 两个相同冲击波形在负荷层面上并没有出现负载率值的叠加, 但是在热点温度层面上会出现热点温度值的叠加。两个相同冲击波形的间隔时间越短, 产生的热点温度越高, 对应的寿命损失越严重。

③ 施加小冲击和大冲击时, 热点温度值会随着第二个冲击的施加而快速上升, 同一时间下, 等效为在第一个冲击负荷产生热点温度变化曲线的基础上, 叠加第二个冲击负荷对应热点温度变化曲线。

④ 施加大冲击和小冲击时, 当第一个冲击与第二个冲击的幅值相差过大时, 热点温度会出现上升, 但上升的幅度不大, 整体上会呈现出热点温度下降的趋势; 当第一个冲击与第二个冲击的幅值相差不大时,

热点温度会出现较大幅度的上升, 整体上会呈现出热点温度上升的趋势, 甚至出现新的热点温度峰值。

⑤ 在一个单冲击后施加 K 值为0.3恒定负荷, 热点温度不断上升, 当上升到一定程度后会趋于稳定状态, 不会无限增长。施加的恒定负荷分别选取 K 值为0.1、0.3、0.5的不同情况进行对比, 无论多大 K 值施加的情况下, 热点温度曲线均会逐渐升高并达到稳定状态, 不会无限上升; 无论多小 K 值施加的情况下, 热点温度曲线均会逐渐下降并达到稳定状态, 不会无限下降。同时, 所施加的恒定负荷的 K 值越大, 热点温度从上升并达到稳态所需的时间越长, 稳态值越大, 寿命损失越严重。

⑥ 将⑤中讨论的恒定负荷均转化为 K 值为0.5的冲击负荷来讨论, 即使采用冲击负荷代替恒定负荷, 所获得热点温度曲线变化仍与⑤中所述恒定负荷时的规律类似。仅考虑施加冲击负荷时, 无论热点温度是在上升还是在下降过程中, 对应的热点温度值均比恒定负荷时所得到的值更大, 相比于恒定负荷时造成的寿命损失也更大。

2.2 案例2(不同种类的每日冲击负荷对比)

结合实测数据可知, 地铁负荷曲线变化大致可分为工作日和节假日两类, 不同种类的负荷变化趋势不同。将实测负荷数据分别代入仿真模型中计算变压器热点温度及寿命损失, 如图5和图6所示, 汇总结果如表5所示。

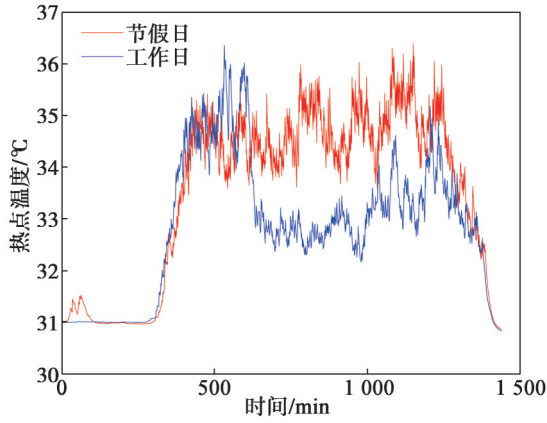


图5 冲击负荷变化下热点温度变化曲线

Fig. 5 Change curve of hot spot temperature under impact load change

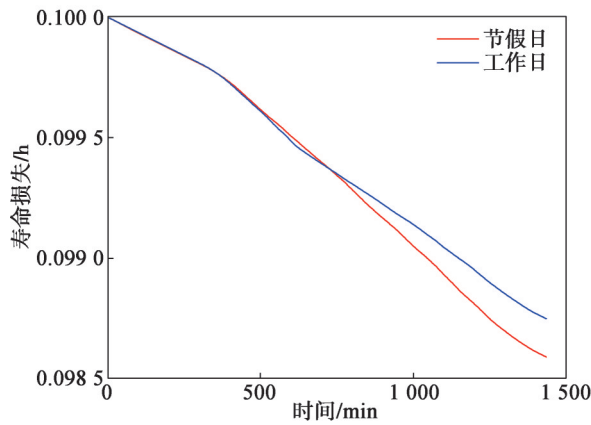


图6 冲击负荷变化下变压器寿命损失变化曲线

Fig. 6 Change curve of life loss of transformer under impact load change

表5 不同种类负荷输入所得结果

Table 5 Input results of different types of loads

时间	K	$\theta_h/^\circ\text{C}$	$\Delta L/h$	\bar{K}	$T_a/^\circ\text{C}$
节假日	[0.031, 0.552]	[30.88, 36.39]	0.001 4	0.115 6	19.55
工作日	[0.036, 0.484]	[30.84, 36.36]	0.001 3	0.104 3	19.55

由于热点温度曲线变化与所施加的时变负荷变化趋势相似, 因此不同时变负荷输入对应热点温度变化曲线不同, 所得变压器的寿命变化不同。此时输入模型的环境温度是每日温度变化的均值, 对比图2与图5, 热点温度峰值与负荷曲线峰值并不同步, 热点温度峰值相对比负荷曲线峰值更晚出现。

2.3 案例3(环境温度与冲击负荷的相互作用)

上述分析均未考虑环境温度变化评估了冲击负荷变化对变压器的影响, 本节将设置变化的环境温度, 通过当天的最高温度和最低温度模拟气温日变化曲线。根据上海地铁某号线实测负荷数据, 最高气温出现在13~14时, 最低温度出现在05~07时^[23], 如图7所示。

结合图7气温日变化曲线, 与冲击负荷共同作为模型输入条件, 计算节假日和工作日的热点温度和寿命

损失, 如图8和图9所示。汇总结果如表6所示。

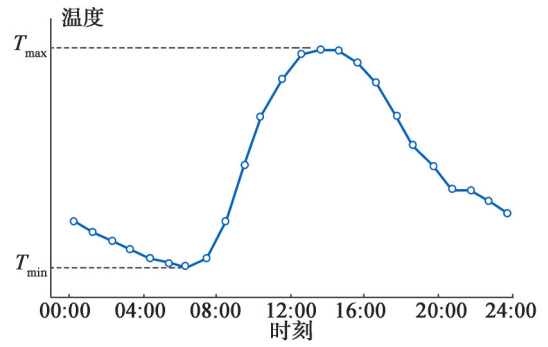


图7 秋季市区气温日变化曲线

Fig. 7 Diurnal variation curve of temperature in urban area in autumn

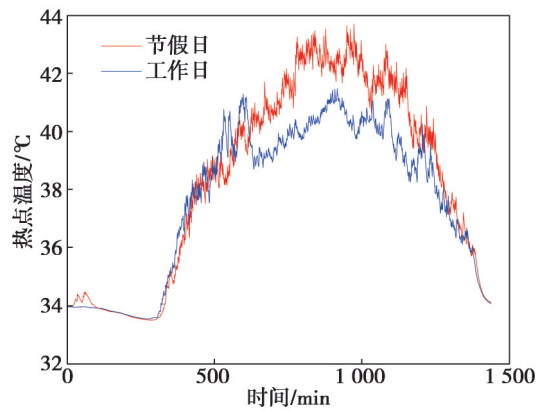


图8 环境温度变化下热点温度曲线

Fig. 8 Hot spot temperature curve under changes in ambient temperature

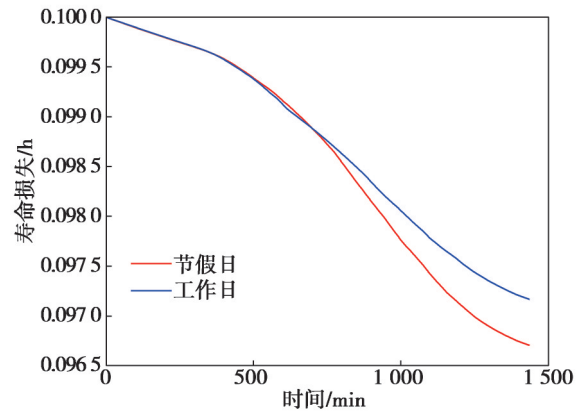


图9 环境温度变化下变压器寿命损失曲线

Fig. 9 Life loss curve of transformer under changes in ambient temperature

表6 环境温度输入所得结果

Table 6 Input results of ambient temperature

时间	K	$\theta_h/^\circ\text{C}$	$\Delta L(h)$	\bar{K}	$T_a/^\circ\text{C}$
节假日	[0.031, 0.552]	[33.50, 43.69]	0.003 3	0.115 6	[22, 28]
工作日	[0.036, 0.484]	[33.54, 41.47]	0.002 8	0.104 3	[22, 28]

对比图7与图8, 节假日与工作日的热点温度曲线整体上均呈现出与气温均值日变化曲线类似的变化过程。相比图7中负载率平均值较小时地铁冲击负荷对变

压器热点温度曲线的影响, 可知环境温度比负荷变化作为输入条件对变压器的影响更大。此外, 由于环境温度升高与冲击负荷增大均会导致变压器热点温度升高, 该两者产生的影响可正向叠加, 从而生成更大热点温度值。

2.4 案例4(冲击负荷与恒定负荷的对比影响)

一般情况下, 电网内的负荷特性变化较小, 所以电网内的负荷多采用恒定功率负荷模型^[24]。地铁冲击负荷明显区别于电网恒定负荷, 比较冲击负荷和恒定负荷的区别, 有利于提高冲击负荷对电力变压器影响研究的准确性。

图10和图11为计及环境温度影响的一周内变压器的热点温度和寿命损失曲线, 汇总结果如表7所示。由图10和图11可知, 无论是节假日还是工作日, 相比于恒定负荷持续作用对变压器产生的影响, 冲击负荷造成的变压器热点温度变化更大, 产生的变压器寿命损失更多。

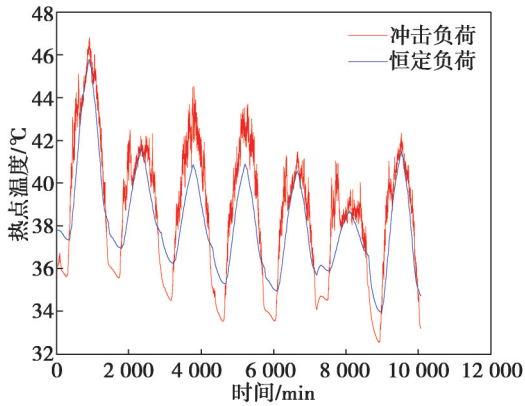


图10 一周内冲击负荷与恒定负荷对比的热点温度曲线
Fig. 10 Hot spot temperature curves for comparison of impact load and constant load in one week

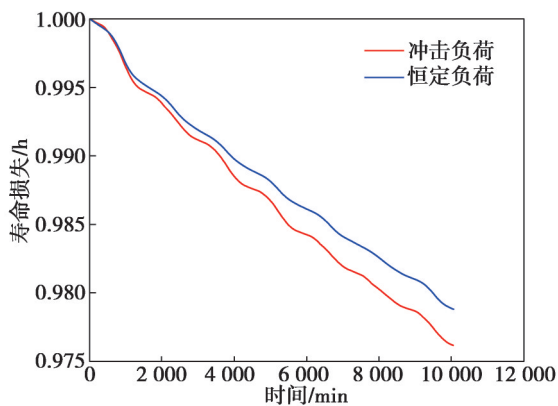


图11 一周内冲击负荷与恒定负荷对比的变压器寿命损失曲线
Fig. 11 Life loss curve of transformer for comparison of impact load and constant load in one week

表7 冲击负荷与恒定负荷输入所得结果

Table 7 Input results of impact load and constant load

负荷	K	$\theta_h / ^\circ\text{C}$	$\Delta L/h$	\bar{K}	$T_a / ^\circ\text{C}$
冲击负荷	[0.027, 0.574]	[32.54, 46.81]	0.023 9	0.109	[21, 33]
恒定负荷	[0.102, 0.118]	[33.94, 45.79]	0.002 8	0.109	[21, 33]

图11曲线对比了冲击负荷与恒定负荷对应的变压器热寿命变化, 由此映射电网场景与地铁负荷场景在相同负载率水平下的寿命损失。常规主变压器对应设计年限及使用场景均依托于实际电网展开应用, 现阶段有关地铁场景下主变压器寿命损失评估缺少相关标准做依据, 因此在既有条件下进行延伸计算, 即由电网场景下变压器的寿命损失, 延伸对应地铁场景中应用的实际变压器寿命损失, 如图12所示, 由地铁冲击负荷对应负载率的上下限值, 限定地铁冲击负荷的寿命变化曲线范围, K_{\min} 、 K_{\max} 和 $K_{\text{平均}}$ 分别为地铁负荷的最小负载率、最大负载率和平均负载率。在相同平均负载率水平下, 分别绘制电网负荷作用下和地铁负荷作用下的主变压器寿命损失曲线, 电网场景中主变压器的正常设计寿命为20.55 a时, 地铁场景中主变压器的实际寿命相比于电网场景下主变压器的寿命减少约2.5 a, 使用时间更短, 因此地铁场景下主变压器设备更换需提前考虑。

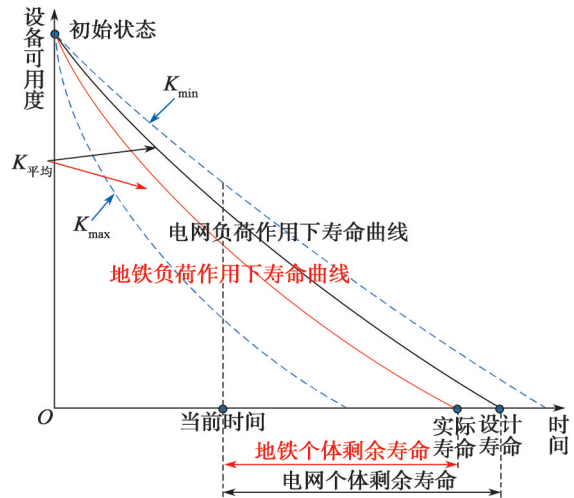


图12 地铁与电网下电力变压器寿命预测曲线
Fig. 12 Life prediction curve of power transformers for the metro and the grid

3 总结

本文对地铁供电变压器施加模拟和实测的冲击负荷, 通过微分方程解法计算出变压器的实时热点温度变化, 并求解出对应寿命损失, 得出如下结论:

① 使用国标中规定的基于时变负载的变压器热点温度计算方法, 可以作为地铁冲击负荷对主变压器老化评估计算的理论依据。通过计算其对应变压器热点温度变化和寿命损失, 验证了微分方程解法在地铁冲击负荷场景的适用性。

② 对实测的负荷波形特征提取获得模拟冲击负荷, 将典型特征作为模型输入, 分析不同类型冲击负荷对变压器的影响, 总结相关规律, 有利于在更复杂的实际冲击负荷场景中定量分析。

③ 将实测的复杂冲击负荷施加于主变压器, 考虑在不同负荷变化、计及环境温度影响、与恒定负荷相比较的输入条件下, 变压器的热点温度和寿命损失。得知相比于电网主变压器, 地铁主变压器寿命损失更大, 热老化加速, 需提前考虑对地铁场景下主变压器开展寿命预测与设备管理。

本文的研究为地铁特殊场景下的冲击负荷对主变压器的影响提供了部分理论与实践支撑。但地铁电网对应下电力变压器所带冲击负荷的限值估计还有待开展进一步研究。

参考文献:

- [1] 郑欣. 上海轨道交通新建线路主变电所的资源优化共享[J]. 城市轨道交通研究, 2015, 18(6): 79-82.
ZHENG Xin. Optimazation of main substation resource sharing for new urban mass transit lines in Shanghai[J]. Urban Mass Transit, 2015, 18(6): 79-82.
- [2] 刘成刚. 城市轨道交通供电系统及电力技术分析[J]. 智慧城市, 2021, 7(8): 64-65.
LIU Chenggang. Analysis of urban rail transit power supply system and power technology[J]. Intelligent City, 2021, 7(8): 64-65.
- [3] 杨瑞青. 城市轨道交通非牵引负荷配电变压器容量计算方法[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(3): 80-83.
YANG Ruiqing. Capacity calculation of the non-traction load distribution transformer in rail transit[J]. Urban Mass Transit, 2018, 21(3): 80-83.
- [4] 谷峰, 王耀辉, 湛锋. 基于MATLAB的地铁列车牵引模型研究及其仿真[J]. 工业控制计算机, 2017, 30(12): 39-41.
GU Feng, WANG Yaohui, ZHAN Feng. Research and simulation of subway traction model based on MATLAB[J]. Industrial Control Computer, 2017, 30(12): 39-41.
- [5] RIOFRIO A J, CHAMBA M S, CEPEDA J C, et al. Probabilistic assessment of underground railway systems impact over distribution grids[C]//IEEE. 2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Latin America (ISGT Latin America). Gramado: IEEE, 2019: 1-6.
- [6] CHANG Jinrong, DA Chaozong, GUO Hailong, et al. Probabilistic power flow calculation method for subway traction load based on quasi-Monte Carlo and semi-invariant method [C]//IEEE. 2020 7th International Forum on Electrical Engineering and Automation (IFEEA). Hefei: IEEE, 2020: 586-591.
- [7] 张力强, 罗文杰, 吕利军. 电气化铁路牵引负荷的不利影响及治理方案[J]. 电网技术, 2006(增刊1): 196-198.
ZHANG Liqiang, LUO Wenjie, LYU Lijun. Disadvantage and manage project on electrization railway draught load[J]. Power System Technology, 2006(Suppl 1): 196-198.
- [8] ZHANG Yiyi, WEI Xingxiao, FAN Xianhao, et al. A prediction model of hot spot temperature for split-windings traction transformer considering the load characteristics[J]. IEEE Access, 2021, 9: 22605-22615.
- [9] 周利军, 吴广宁. 牵引负荷对变压器绝缘老化和寿命损失的影响[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(18): 90-94.
ZHOU Lijun, WU Guangning. Effect of traction loads on insulation aging and loss-of-life of transformers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(18): 90-94.
- [10] 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.
- [11] 周利军, 唐浩龙, 王路伽, 等. 基于顶层油温升的变压器过负载建模与分析[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.
- [12] UTAKRUE M, HONGESOMBUT K. Impact analysis of electric vehicle quick charging to power transformer life time in distribution system[C]//IEEE. 2018 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific). Bangkok: IEEE, 2018: 1-5.
- [13] IEEE. IEEE guide for loading mineral-oil-immersed transformers and step-voltage regulators: C 57.91-2011[S]. New York: IEEE, 2012.
- [14] 陈维荣, 王璇, 李奇, 等. 光伏电站接入轨道交通牵引供电系统发展现状综述[J]. 电网技术, 2019, 43(10): 3663-3670.
CHEN Weirong, WANG Xuan, LI Qi, et al. Review on the development status of PV power station accessing to traction power supply system for rail transit[J]. Power System Technology, 2019, 43(10): 3663-3670.
- [15] 全国电压电流等级和频率标准化技术委员会. 电能质量供电电压偏差: GB/T 12325—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
National Technical Committee for Standardization of Voltage, Current Level and Frequency. Power quality - Deviation of supply voltage: GB/T 12325—2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [16] 全国电压电流等级和频率标准化技术委员会. 电能质量电压波动和闪变: GB/T 12326—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
National Technical Committee for Standardization of Voltage, Current Level and Frequency. Power quality - Voltage fluctuation and flicker: GB/T 12326—2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.
- [17] CASTRO C R T, BARBOSA S R, FERREIRA H L, et al. Power transformer loading studies considering overexcitation[C]//IEEE. 2004 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. Sao Paulo: IEEE, 2004:

- 651-656.
- [18] AIZPURUA J I, MCARTHUR S D J, STEWART B G, et al. Adaptive power transformer lifetime predictions through machine learning and uncertainty modeling in nuclear power plants[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(6): 4726-4737.
- [19] 全国变压器标准化技术委员会. 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, 2008.
- National Technical Committee for Transformer Standardization. Power transformers part 7: loading guide for oil-immersed power transformers: GB/T 1094.7—2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [20] LOITONGBAM N, GHOSE T. Impact of demand response on transformer loss of life[C]//IEEE. 2020 International Conference on Computer, Electrical & Communication Engineering (ICCECE). Kolkata: IEEE, 2020: 1-5.
- [21] YAZDANI-ASRAMI M, MIRZAIE M, AKMAL A A S. Investigation on impact of current harmonic contents on the distribution transformer losses and remaining life[C]//IEEE. 2010 IEEE International Conference on Power and Energy. Kuala Lumpur: IEEE, 2010: 689-694.
- [22] ACHARYA S, TAPRE P C. Life assessment of transformer using thermal models[C]//IEEE. 2017 International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS). Chennai: IEEE, 2017: 3515-3520.
- [23] 朱智慧, 王琴, 李丽. 上海市区与洋山港区气温日变化差异分析[J]. 气象科技进展, 2020, 10(3): 30-35.
- ZHU Zhihui, WANG Qin, LI Li. Difference of the diurnal temperature variations between urban and harbor area in Shanghai[J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2020, 10(3): 30-35.
- [24] 高超, 程浩忠, 李宏仲, 等. 大容量冲击负荷对地区电网暂态稳定性的影响[J]. 电网技术, 2008, 32(1): 31-35.
- GAO Chao, CHENG Haozhong, LI Hongzhong, et al. Influence of high-capacity impact loads on transient stability of regional power system[J]. Power System Technology, 2008, 32(1): 31-35.

收稿日期: 2022-04-22

修回日期: 2022-09-30