

高压 XLPE 电缆绝缘层动态热行为 建模的优化分析

陈文教¹, 卞佳音¹, 张 珏¹, 黄宇平¹, 李 俊², 吴智恒², 刘 刚²

(1. 广东电网有限责任公司广州供电局, 广东 广州 510310; 2. 华南理工大学广东省绿色能源技术重点实验室, 广东 广州 510640)

摘 要:为了解决现有高压 XLPE 电缆热评估计算模型在连续波动负荷下计算精度不足的问题, 分析传统方法(包括 IEC 60853-2 和热电等效方法)中采用恒定绝缘层热容分配系数时的计算误差累积, 提出电缆绝缘集总热模型的优化方法, 以减少可能出现的误差累积。通过电缆动态升温实验, 验证所提出的改进热电等效(TEE)方法的可靠性。分析结果表明:改进 TEE 方法能够较好地反映电缆在连续波动负荷下真实的热性能, 其导体温度计算误差维持在 2.5 °C 以下。利用改进后的方法对电缆进行热评估, 能够较大限度地提高电缆的资产利用率, 并确保电缆安全可靠运行。

关 键 词:电力电缆; 绝缘热行为; 动态热额定值; 连续波动负载; 集总热模型

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.04.013 中图分类号: TM247 文章编号: 1673-9140(2023)04-0123-11

Research on dynamic thermal evaluation of high voltage XLPE cable insulation layer

CHEN Wenjiao¹, BIAN Jiayin¹, ZHANG Jue¹, HUANG Yuping¹, LI Jun², WU Zhiheng², LIU Gang²

(1. Guangzhou Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510310, China; 2. Guangdong Key Laboratory of Clean Energy Technology, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: In order to solve the problem of insufficient calculation accuracy in existing high-voltage XLPE cable thermal evaluation models under continuously fluctuating loads, this paper explores the traditional methods (including IEC 60853-2 and thermoelectric equivalent method) using constant insulation layer heat capacity distribution coefficient, and the accumulated calculation errors are investigated when subjected to continuously fluctuating loads. An optimized approach for the lumped thermal model of cable insulation is proposed to mitigate potential error accumulation. The proposed improved thermoelectric equivalent (TEE) method is validated through the dynamic cable temperature rise experiments. The analysis reveals that the improved TEE method can better predict the real thermal performance of cables under continuously fluctuating loads, with conductor temperature calculation errors being maintained within 2.5 °C. The methodology developed in this paper paves a way for electricity utilities to enhance cable utilization while ensuring cable reliability.

Key words: power cable; insulation thermal behaviour; dynamic thermal rating; continuously fluctuating load; lumped thermal model

收稿日期: 2022-03-11; 修回日期: 2022-05-20

基金项目: 国家高技术研究发展计划("863"计划)(2015AA050201)

通信作者: 刘 刚(1969—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事电力设备状态评估的研究; E-mail: liugang@scut.edu.cn

中国新型电力系统的构建与发展为电力企业带来了新的挑战和机遇。目前,可再生能源的大规模接入,进一步加强了输配电网负荷的波动特性^[1]。此外,城市用电需求的快速增长和土地资源的日益紧张,也使得电力运营商面临着城市负荷增长速度和线路新增速度不匹配的困境。充分挖掘输电线路在波动负荷下的资产利用率是解决这一困境的方法之一。

电缆导体允许最高工作温度(交流XLPE电缆为90℃)决定了电缆的载流能力,而电缆载流能力作为量化电缆性能的一个关键指标,其关系到电缆线路运行过程中的负荷控制,因此,有必要对电缆导体的稳态和暂态温度进行准确评估。高压XLPE电缆较大的热时间常数使其具备一定的过负荷运行能力,其可靠性和输电效率受到电力企业的广泛关注^[2-4]。为提高电力电缆资产利用率,如何准确实现电缆线路热评估成为了近年来的重要研究课题。目前,有3种实现电缆热评估的主要方法:①有限元分析法,该方法需要详细且准确的电缆及周围环境的物性参数和边界条件,可以实现不同环境及复杂工况下电缆导体温度的计算^[5-6],但对于复杂电力电缆系统的求解,有限元法往往需要较长的建模求解时间;②求解速度相对较高的半解析计算方法,此方法需要对边界条件进行简化与假设,接着通过求解齐次热传导方程对电缆温度场进行评估,但半解析方法中的简化可能会为热评估计算结果带来一定的误差^[7];③热电等效(thermoelectric equivalent, TEE)方法,因其具有求解时间短、计算效率高的特点被广泛使用^[8]。在TEE方法中,电缆的热行为由包含热源、热阻和热容的集总参数热路模型表征^[9]。已有研究表明,电缆的集总参数热路模型在进行稳态热评估时具有较好的计算精度,并在一定程度上能胜任动态热评估的工作^[10]。

对于在运电缆线路,其日负荷曲线往往是随着时间波动的,可以用阶梯式函数近似描述电缆的日负荷曲线^[11-12]。随着间歇式可再生能源的广泛应用,电缆线路的日负荷曲线呈现更强的不确定性^[13]。故相较于稳态热评估,电缆在连续波动负荷下的动态热评估更有利于线路潜在输送能力的挖掘。文献^[14]研究表明,半解析方法可以胜任阶跃

负荷情况下的电缆热评估。然而,在波动的电缆负荷条件下,电缆热评估的计算误差可能会有难以接受的累积^[10]。故TEE方法成为了兼顾电缆动态热评估求解速度和精度的更优选择。

在利用TEE方法计算电缆动态热额定值(dynamic thermal rating, DTR)时,需要电缆内部准确的热过程建模及参数计算。特别是占电缆大部分的绝缘层,对DTR计算结果的准确性也有重要影响。文献^[14]指出IEC方法推荐的绝缘集总热模型对于电缆的DTR评估不够准确;文献^[15]讨论了在电缆上施加阶跃负载时,引入绝缘层热容分配系数 p 后带来的DTR计算误差。虽然已有研究针对IEC方法进行改进^[16-18],但大多数关于DTR的研究中绝缘层仍采用 π 型热模型等效,并且绝缘的热容按照一定比例系数分配给导体和金属护套。

本文将绝缘层热容分配系数 p 视作变量,并利用绝缘层的暂态温度分布获得时变 p 系数的近似解。利用有限元模型分析IEC 60853推荐的集总 π 型绝缘热模型在计算导体温度时的误差,提出应用绝缘分层方法的改进电缆动态热评估模型。此外,在不同电缆绝缘厚度以及负载下,讨论使用改进模型提高电缆DTR计算精度的准确性。本文提出的改进模型和计算方法可以集成到现有实时电缆热额定值系统中,在保证电缆安全运行的前提下提高现有电缆资产利用率。

1 IEC 60853推荐的电缆动态热路模型

以非铠装高压单芯电缆为例,依据IEC 60853建立其动态热路模型^[19-21],如图1所示。

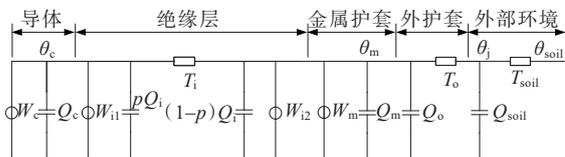


图1 IEC 60853推荐的电缆动态热路模型

Figure 1 IEC 60853 cable dynamic thermal model

图1中 θ_c 、 θ_m 、 θ_j 、 θ_{soil} 分别为导体温度、金属护层温度、外护套温度和环境温度, W_c 为电缆导体焦耳损耗, W_{i1} 、 W_{i2} 为绝缘层介质损耗, W_m 为金属护套损

耗, ρ 为绝缘层热容分配系数, Q_c 、 Q_i 、 Q_m 、 Q_o 、 Q_{soil} 分别为导体热容、绝缘层热容、金属护层热容、外护套热容和环境热容, T_i 、 T_o 、 T_{soil} 分别为绝缘层热阻、外护套热阻和环境热阻。经过一些细微的调整,图1模型也可以适用于其他类型的电缆。

在电缆动态热路模型的建立过程中,进一步简化热建模的复杂度^[22]:①对于半导体层和缓冲层这些厚度较小的结构,建模时归并入电缆绝缘层中;②由于电缆绝缘层的热容和径向温度梯度不是绝缘层厚度的线性函数,为了模拟电缆绝缘层的热量吸收和释放过程,用绝缘层热容分配系数将绝缘层热容分配到导体温度节点和金属护层温度节点;③由于铜导体和金属护层的热导率远高于其他电缆结构的热导率,忽略铜导体和金属护层的热阻。

计算电缆动态热路模型中的电缆各层结构的热容参数 Q_c 、 Q_i 、 Q_m 、 Q_o ^[20,23] 和绝缘层热容分配系数 ρ , 计算公式分别为

$$\begin{cases} Q_c = \frac{\pi}{4} C_c D_c^2 \\ Q_i = \frac{\pi}{4} C_i (D_i^2 - D_c^2) \\ Q_m = \frac{\pi}{4} C_m (D_m^2 - D_i^2) \\ Q_o = \frac{\pi}{4} C_o (D_o^2 - D_m^2) \end{cases} \quad (1)$$

$$\rho = \frac{1}{2 \ln(D_i/D_c)} - \frac{1}{D_i^2/D_c^2 - 1} \quad (2)$$

式(1)、(2)中, C_c 、 C_i 、 C_m 和 C_o 分别为导体、绝缘层、金属护层和外护层的体积比热容; D_c 、 D_i 、 D_m 和 D_o 为导体、绝缘层、金属护套和外护套的外径;式(2)表明绝缘层热容分配系数只取决于电缆的几何尺寸^[21]。

以直埋电缆为例,外部环境的热容为

$$Q_{soil} = \pi C_{soil} \left(L^2 - \frac{D_o^2}{4} \right) \quad (3)$$

其中, C_{soil} 为电缆周围环境的体积比热容。电缆动态热路模型中其他参数的计算公式详见文献[19]。

值得说明的是,图1所示的模型适用于负荷持续时间较长情况下(超过1h)电缆导体温度的动态计算,而对于负荷持续时间较短情况下(小于1h)电缆导体温度的动态计算,IEC 60853给出了相应的模型和求解方法。上述2种情况下电缆动态热路模

型最大的区别在于电缆绝缘层的等效热路模型及绝缘层热容分配系数的数值^[15]。

图1所示的模型用集总热阻参数和集总热容参数的形式分别表征电缆内部的热量传递过程和热量吸收或释放过程,电缆各层结构内部的温度被假设为只是时间的单变量函数而与几何位置无关,这种假设只有在同一时刻物体内部不同位置的温度是一致的情况下才能成立^[24]。对于电缆而言,拥有较高的导热系数的铜导体和金属护层可以被视为等温体,厚度较小且远离内热源的外护层内、外表面的温差不是很明显,因此,电缆的导体、金属护层和外护层都可以用集总参数热模型代表其动态热过程。但对于在电缆径向尺寸中占据很大一部分比例的电缆绝缘层,其材料的导热系数较低,导致沿绝缘层径向存在明显的温度梯度分布。因此,电缆绝缘层在热建模过程中不同位置间温度差异和不同位置处温度随时间的变化量差异不能够被忽略。在IEC 60853推荐的电缆动态热路模型中,用于分配电缆绝缘层热容的分配系数 ρ 的计算公式是依据稳态条件下电缆绝缘层的温度分布推导得到,但在电缆动态运行过程中绝缘层的温度分布是时变的,计算绝缘层的热容分配系数的数值时应该需要基于电缆绝缘层的暂态温度分布^[14]。采用依据稳态温度分布推导得到的恒定绝缘层热容分配系数计算电缆的动态热响应时,会给电缆导体温度的计算结果带来一些误差。

2 动态绝缘层热容分配系数的计算

2.1 绝缘层分布参数模型

选取单位长度的电缆绝缘层,研究电缆集总参数热模型中采用IEC推荐的恒定绝缘层热容分配系数给电缆导体温度动态计算带来的误差。假设沿电缆的轴向没有热流流动,选取空心圆柱形微元(如图2(a)所示)建立电缆绝缘层的分布参数热模型,作为电缆绝缘层的集总参数热模型的对比对象。对空心圆柱形微元应用热力学第一定律,可以得到公式^[25]如下:

$$2\pi r c \rho dr \frac{d\theta}{dt} = dQ_i + W_i + 2\pi r \lambda \frac{\partial \theta}{\partial r} \quad (4)$$

式中, r 为空心圆柱形微元的内径; W_1 为空心圆柱形微元的产热量; dQ_1 为流入空心圆柱形微元的热流。

假设空心圆柱形微元的厚度 dr 足够小, 则可视其为等温体, 式(4)定义的等效热模型如图2(b)所示。对于2个接触的绝缘层空心圆柱形微元, 若在两者的接触面上热力学第一定律成立, 则通过串联所有绝缘层空心圆柱形微元的等效热路模型可以得到电缆绝缘层的分布参数热路模型, 如图2(c)所示。值得说明的是, 对于电缆绝缘层的分布参数热模型, 绝缘层空心圆柱形微元的数量要足够多。图2中, $\theta_{i1}, \theta_{i2}, \dots, \theta_{in}$ 是绝缘各微元的温度, $T_{i1}, T_{i2}, \dots, T_{in}$ 是绝缘各微元的热阻, $C_{i1}, C_{i2}, \dots, C_{in}$ 是绝缘各微元的热容, W_1, W_2, \dots, W_n 是绝缘各微元的介质损耗。

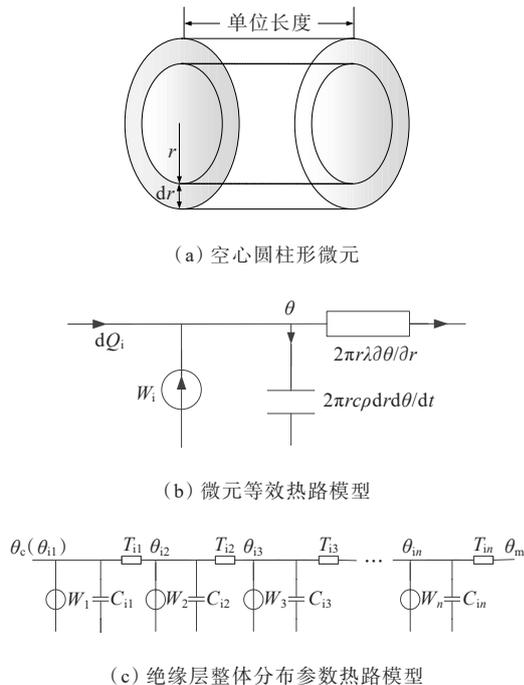


图2 电缆绝缘层的分布参数热路模型
Figure 2 Distributed parameter thermal model of cable insulation layer

为了使图1所示的电缆绝缘层集总参数热路模型等效于图2(c)所示的电缆绝缘层分布参数热路模型, 则集总热容 pC_i 和 $(1-p)C_i$ 吸收的总热量应始终等于所有分布热容参数 $C_{i1}, C_{i2}, \dots, C_{in}$ 吸收的热量之和, 即

$$pC_i d\theta_c(t) + (1-p)C_i d\theta_m(t) = C_{i1} d\theta_{i1}(t) + C_{i2} d\theta_{i2}(t) + \dots + C_{in} d\theta_{in}(t) \quad (5)$$

$$d\theta_k(t) = \theta_k(t) - \theta_k(0) \quad (6)$$

结合热容的定义, 式(5)对于任意时刻始终成立^[22]。由式(5)可以看出, 绝缘层的热容分配系数 p 取决于绝缘层内部各点的温度变化量 ($d\theta_c(t), d\theta_{m1}(t), d\theta_{i1}(t), \dots, d\theta_{in}(t)$)。假设电缆绝缘层在 $t=0$ 时等温, 即对应于零初始负荷条件, 基于传热学理论, 电缆绝缘层中径向温度分布曲线随阶跃负荷加载时间的变化趋势如图3所示, 稳态时刻 ($t=t_{state}$) 绝缘层的径向温度分布只取决于绝缘层热阻的分布情况。结合图3和式(5)可以推断出在电缆绝缘层温升过程中, 绝缘层热容分配系数 p 是一个时变的参数。这是因为在电缆绝缘层温升过程中, 绝缘层内部不同位置处温度随时间的变化量是不同的。

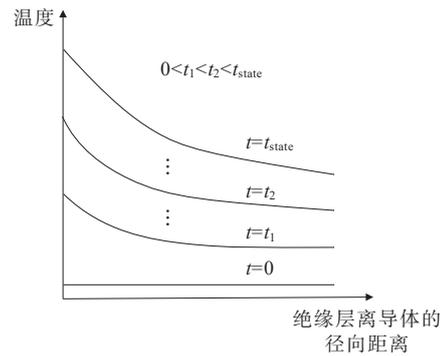


图3 零初始负荷条件下不同时刻电缆绝缘层径向温度分布曲线

Figure 3 Radial temperature distribution curves of cable insulation layer at different times under zero initial load

2.2 热容分配系数变化规律

由上述分析可知, 电缆绝缘层的热容分配系数会随着绝缘层温度的变化而波动, 为了研究电缆绝缘层热容分配系数的变化规律, 首先考虑2种极端的情况: ①电缆绝缘层热容分配系数 $p=1$, 即绝缘层的热容都被分配到导体温度节点; ②电缆绝缘层热容分配系数 $p=0$, 即绝缘层的热容都被分配到金属护层温度节点。对于第1种极端情况, 式(5)可以转化为

$$C'_i = C_{i1} \frac{d\theta_{i1}(t)}{d\theta_c(t)} + C_{i2} \frac{d\theta_{i2}(t)}{d\theta_c(t)} + \dots + C_{in} \frac{d\theta_{in}(t)}{d\theta_c(t)} \quad (7)$$

其中, C'_i 为 $p=1$ 时绝缘层的等效集总热容参数。结合图2(c)、3, 有

$$d\theta_c(t_i) = d\theta_{i1}(t_i) > d\theta_{i2}(t_i) > \dots > d\theta_{in}(t_i) > d\theta_m(t_i) \quad (8)$$

在 $0 < t_i < t_{\text{state}}$ 时,式(8)始终成立。由式(7)、(8)可以推断出 C_i' 和 C_i 之间的关系,即

$$C_i' < C_{i1} + C_{i2} + \dots + C_{in} \quad (9)$$

式(9)表明, $p=1$ 时绝缘层的等效集总热容参数 C_i' 的值小于绝缘层的真实集总热容参数 C_i 的值,即 C_{i1} 、 C_{i2} 、 \dots 、 C_{in} 之和。在电缆动态热评估的实际过程中,绝缘层的真实集总热容参数 C_i 被用来计算电缆导体的动态温度响应。当吸收的热量相同时,较大的绝缘层集总热容参数取值会导致较小的暂态温度变化量计算结果^[25]。由于式(9)在电缆的整个温升过程中始终成立,将绝缘层热容都分配到导体温度节点引起的电缆暂态温升计算误差始终是负误差。

对于第2种极端情况,式(5)可以转化为

$$C_i'' = C_{i1} \frac{d\theta_{i1}(t)}{d\theta_m(t)} + C_{i2} \frac{d\theta_{i2}(t)}{d\theta_m(t)} + \dots + C_{in} \frac{d\theta_{in}(t)}{d\theta_m(t)} \quad (10)$$

在 $0 < t_i < t_{\text{state}}$ 时,结合式(8)、(10)可以推断出 C_i'' 和 C_i 之间的关系,即

$$C_i'' > C_{i1} + C_{i2} + \dots + C_{in} \quad (11)$$

其中, C_i'' 为 $p=0$ 时绝缘层的等效集总热容参数。由式(11)可知, $p=0$ 时绝缘层的等效集总热容参数 C_i'' 的值大于绝缘层的真实集总热容参数 C_i 的值。这表明在电缆温升过程中,将绝缘层热容都分配到金属护层温度节点引起的电缆暂态温升计算误差始终是正误差。

在电缆实际运行过程中,可能出现电缆在稳态运行条件下电缆负荷突然增加的情况,此时绝缘层中越靠近导体热源处的温升越明显,因此式(8)仍然是有效的,对绝缘层热容都分配到导体温度节点和绝缘层热容都分配到金属护层温度节点给电缆动态热评估带来的误差分析也是适用的。实际的电缆绝缘层热容分配系数的取值为 $0 < p < 1$,对于合适的电缆绝缘层热容分配系数,应该保证由分配到导体温度节点的绝缘层热容部分带来的负误差等于分配到金属护层温度节点的绝缘层热容部分带来的正误差。最终电缆绝缘层集总参数热模型计算得到的电缆动态热响应等于绝缘层分布参数热模型计算得到的电缆动态热响应。

2.3 时变热容分配系数 $p(t)$ 的计算

分别计算电缆绝缘层集总热容参数吸收的总热量 $Q'(t)$ 和分布热容参数吸收的总热量 $Q(t)$:

$$\begin{aligned} Q'(t) &= pC_i d\theta_c(t) + (1-p)C_i d\theta_m(t) = \\ &= pC_i' d\theta_c(t) + (1-p)C_i'' d\theta_m(t) + \\ &= p(C_i - C_i') d\theta_c(t) + (1-p) \cdot \\ &= (C_i - C_i'') d\theta_m(t) \end{aligned} \quad (12)$$

$$Q(t) = C_{i1} d\theta_{i1}(t) + C_{i2} d\theta_{i2}(t) + \dots + C_{in} d\theta_{in}(t) \quad (13)$$

结合式(7)、(10)、(12)和(13),得到 $Q'(t)$ 和 $Q(t)$ 之间差值为

$$\begin{aligned} \Delta Q'(t) &= Q'(t) - Q(t) = p(C_i - C_i') \cdot \\ &= d\theta_c(t) + (1-p)(C_i - C_i'') d\theta_m(t) \end{aligned} \quad (14)$$

假设电缆绝缘层分布参数热模型中各空心圆柱形绝缘微元的热容是相等的,即 $C_{i1} = C_{i2} = \dots = C_{in}$,则式(7)、(10)可以化简为

$$\begin{cases} C_i' = \frac{C_{in}}{d\theta_c(t)} \sum_{j=1}^n d\theta_{ij}(t) \\ C_i'' = \frac{C_{in}}{d\theta_m(t)} \sum_{j=1}^n d\theta_{ij}(t) \end{cases} \quad (15)$$

相应地,式(14)可以变形为

$$\begin{aligned} \Delta Q'(t) &= pC_{in} \left(n - \frac{1}{d\theta_c(t)} \sum_{j=1}^n d\theta_{ij}(t) \right) d\theta_c(t) + \\ &= (1-p)C_{in} \left(n - \frac{1}{d\theta_m(t)} \sum_{j=1}^n d\theta_{ij}(t) \right) d\theta_m(t) \end{aligned} \quad (16)$$

只有当 $\Delta Q'(t)$ 的值始终为0时,电缆温升过程中任意时刻绝缘层的集总参数热路模型和分布参数热路模型才是等效的。因此,从式(16)可以推导出时变绝缘层热容分配系数为

$$p(t) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{d\theta_{ij}(t) - d\theta_m(t)}{d\theta_c(t) - d\theta_m(t)} \quad (17)$$

在应用式(17)求解时变绝缘层热容分配系数 $p(t)$ 时,需要知道电缆绝缘层内部任意时刻的径向温度分布曲线。通过数学解析方法很难直接实现对任意时刻电缆绝缘层内部径向温度分布的求解,因此,本文利用有限元仿真方法实现对绝缘层瞬态温度分布的获取,并分析 IEC 60853 推荐的集总绝缘热路模型在计算导体温度时的误差。

3 动态负荷作用下绝缘层等效热模型的误差分析

对于实际运行中的电缆线路,其日负荷曲线往往是随时间波动的,可用阶梯式的函数近似描述电缆的日负荷曲线^[12,26]。本文通过有限元仿真模型研究连续波动负荷作用下电缆绝缘层热容分配系数的时变特性,进而分析 IEC 60853 推荐的电缆动态热路模型应用于电缆动态热评估的误差。

3.1 仿真模型

以 110 kV、500 mm² 的电缆为研究对象,建立其二维温度场仿真模型,如图 4 所示,1,2,⋯, *n* 为每个绝缘层子部件的编号, V_1, V_2, \dots, V_n 为每个绝缘层子部件的体积 ($V_1 = V_2 = \dots = V_n$), T_1, T_2, \dots, T_n 为每个绝缘层子部件的温度采样点, $\theta_{i1}, \theta_{i2}, \dots, \theta_{in}$ 为每个温度采样点的温度采样结果;该模型中所有的电缆内部损耗参数依据 IEC 60287 中方法计算得到,对电缆的外护套表面施加第 3 类边界条件模拟隧道敷设情况。电缆详细结构和热物性参数如表 1 所示。

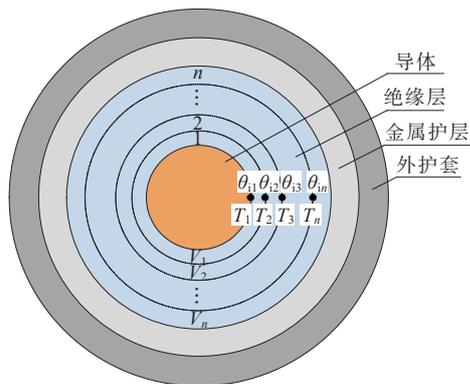


图 4 110 kV、500 mm² 电缆的径向二维温度场仿真模型

Figure 4 FEA model of 110 kV, 500 mm² cable

表 1 110 kV、500 mm² 电缆结构和热物性参数

Table 1 Parameters of the 110 kV, 500 mm² cable

结构	材料	外径/ mm	密度/ (kg/m ³)	比热容/ (J/(kg·K))	导热系数/ (W/(m·K))
导体	铜	26.6	8 920	386	400.000
绝缘层	交联聚乙烯	74.1	1 200	2 526	0.286
金属护层	铝	84.6	2 700	917	238.000
外护套	中密度聚乙烯	92.6	930	2 200	0.286

为了得到电缆绝缘层的瞬态温度分布结果,在电缆仿真模型中将绝缘层按照等体积的方式划分为 *n* 个子部件,在每个绝缘层子部件的内表面设置温度采样点,且温度采样时间间隔设置为 1 min。

3.2 连续波动负荷下的热容分配系数

用 *N* 步的阶梯式函数模拟电缆的连续波动负荷曲线,且假设波动过程中每一步负荷的持续时间均相等。设定电缆的负荷持续时长为 10 h,对图 4 中的电缆仿真模型施加 10 步阶梯式波动负荷。值得说明的是,对于式 (17) 而言,较大的绝缘层子部件数量意味着更高的时变绝缘层热容分配系数计算精度,同时也带来更重的计算量^[14]。因此,在式 (17) 的实施过程中,通常采用有限的绝缘层子部件数量在能够保证满意的计算精度的前提下尽可能减小求解的计算量。本文中绝缘层子部件的数量设定为 30。在负荷波动曲线作用下,将电缆各绝缘层温度采样点的结果代入式 (17),则可以得到连续波动负荷作用下绝缘层热容分配系数的时变曲线,如图 5 所示。

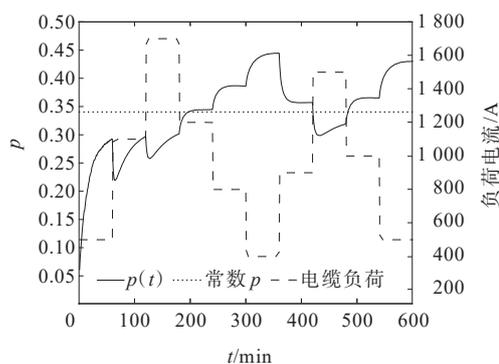


图 5 10 步阶梯式负荷波动曲线作用下时变绝缘层热容分配系数的计算结果

Figure 5 Calculation results of $p(t)$ under stepwise constant cable load profiles with $N=10$

结合热容参数的定义,要使电缆绝缘层集总参数热路模型等价于电缆绝缘层分布参数热路模型,意味着任意时刻 t_1 时的 2 个模型应该满足:

$$p(t_1)C_i d\theta_c(t_1) + (1 - p(t_1))C_i d\theta_m(t_1) = C_{i1}d\theta_{i1}(t_1) + C_{i2}d\theta_{i2}(t_1) + \dots + C_{in}d\theta_{in}(t_1) \quad (18)$$

由于电缆绝缘层分布参数热路模型中所有绝缘层子部件的体积相等,则式 (18) 可以转变成

$$d\theta_c(t_1) = \frac{\sum_{j=1}^n d\theta_{ij}(t_1) - n d\theta_m(t_1)}{np(t_1)} + d\theta_m(t_1) \quad (19)$$

基于电缆处于零初始负荷条件的假设,结合式(6),可以得到 $\theta_c(t)$ 和 $p(t)$ 的关系表达式:

$$\theta_c(t_1) = \frac{\sum_{j=1}^n \theta_{ij}(t_1) - n\theta_m(t_1)}{np(t_1)} + \theta_m(t_1) \quad (20)$$

3.3 误差分析

结合图4可以看出,相比于 $\theta_m(t_1)$ 的温度采样点, $\theta_{ij}(t_1)$ 的温度采样点位置更靠近导体热源,很明显,电缆内部越靠近导体热源的位置呈现的温度越高。因此, $\sum \theta_{ij}(t_1) - n\theta_m(t_1)$ 的值在任意时刻 t_1 时均为正,则基于式(20)可以推断出 $\theta_c(t)$ 的值反比于 $p(t)$ 的值。在连续波动负荷作用下,利用式(20)可以分析采用绝缘层集总参数热路模型(利用IEC 60853推荐的恒定 p 分配绝缘层的热容参数)对电缆导体温度动态计算带来的误差。如果时变 $p(t_1)$ 计算结果大于IEC 60853推荐的恒定 p ,也即是绝缘层集总参数热路模型采用了一个较小的绝缘层热容分配系数,则相比与真实值,由IEC推荐的电缆动态热路模型计算得到的导体温度 $\theta_c(t_1)$ 是一个偏高的结果,这意味着采用较小的绝缘层热容分配系数会给电缆的动态热评估带来正误差。如果时变 $p(t_1)$ 的计算结果小于IEC 60853推荐的恒定 p ,也即是绝缘层集总参数热路模型采用了一个较大的绝缘层热容分配系数,则相比与真实值,由IEC推荐的电缆动态热路模型计算得到的导体温度 $\theta_c(t_1)$ 是一个偏低的结果,这意味着采用较大的绝缘层热容分配系数会给电缆的动态热评估带来负误差。

结合图5可以看出,当电缆负荷出现连续增长的变化趋势时,计算得到的时变绝缘层热容分配系数 $p(t)$ 始终小于IEC推荐的恒定绝缘层热容分配系数,此时由IEC推荐的电缆动态热路模型给电缆导体温度动态计算带来的负误差会出现累积效应。当电缆负荷出现连续下降的变化趋势时,计算得到的时变绝缘层热容分配系数 $p(t)$ 始终大于IEC推荐的恒定绝缘层热容分配系数,此时由IEC推荐的电缆动态热路模型给电缆导体温度动态计算带来的

正误差也会出现累积效应。在电缆负荷出现连续增长或者连续下降的情况下,由绝缘层集总参数热路模型中采用恒定绝缘层热容分配系数引起的误差累计现象对电缆准确动态热评估的实现非常不利。因此,在连续波动负荷作用下,提出一种缓解由IEC推荐的电缆动态热路模型导致电缆导体温度动态热计算过程中出现的误差累计现象的方法具有重要意义。

4 改进的电缆动态热路模型及验证

文献[14]提出,IEC推荐的电缆动态热路模型具有以增加模型求解计算时长为代价从而提高模型求解精度的特性。将厚度大、热阻大的绝缘层划分成多个子部分,在电缆动态热模型中,分别用 π 型热模型表征每一个绝缘层子部件,进而实现更准确地获取动态电缆导体温度的目的。本文仍采用电缆绝缘层分层的方法来减小IEC推荐的电缆动态热路模型中采用恒定绝缘层热容分配系数给电缆动态热评估带来的误差,改进后的电缆动态热路模型也可称为电缆的近似分布参数热路模型。

4.1 改进的TEE方法

为了分析改进电缆动态热路模型用于电缆动态热评估的计算精度,选取现有研究中求解电缆导体温度动态响应使用最广泛的热电类比方法(经典TEE方法)和IEC 60853方法作为对比。经典TEE和IEC 60853方法求解的实现都需要依赖于图1所示模型。

对于经典TEE方法,图1所示模型的动态热分析可以采用一阶微分方程组来描述:

$$\begin{cases} \frac{d\theta_c}{dt} = \frac{1}{Q_1} (W_1 - \frac{\theta_c - \theta_m}{T_i}) \\ \frac{d\theta_m}{dt} = \frac{1}{Q_3} (W_2 + \frac{\theta_c - \theta_m}{T_i} - \frac{\theta_m - \theta_o}{T_o}) \\ \frac{d\theta_o}{dt} = \frac{1}{Q_4} (\frac{\theta_m - \theta_o}{T_o} - \frac{\theta_o - \theta_{soil}}{T_{soil}}) \end{cases} \quad (21)$$

其中, $Q_1 = Q_c + pQ_i$, $Q_3 = (1-p)Q_i + Q_m + Q_o$, $Q_4 = Q_{soil}$, $W_1 = W_c + W_{i1}$, $W_2 = W_{i2} + W_m$ 。对于式(21)的电缆各温度节点的热平衡方程,其矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_c \\ \dot{\theta}_m \\ \dot{\theta}_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{Q_1 T_i} & \frac{1}{Q_1 T_i} & 0 \\ \frac{1}{Q_3 T_i} & -\left(\frac{1}{Q_3 T_i} + \frac{1}{Q_3 T_o}\right) & \frac{1}{Q_3 T_o} \\ 0 & \frac{1}{Q_4 T_o} & -\left(\frac{1}{Q_4 T_o} + \frac{1}{Q_4 T_{soil}}\right) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \theta_c \\ \theta_m \\ \theta_o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{Q_1} \cdot (W_c + W_{i1}) \\ \frac{1}{Q_3} \cdot (W_m + W_{i2}) \\ \frac{1}{Q_4 T_{soil}} \cdot \theta_{soil} \end{bmatrix} \quad (22)$$

式(22)通常用于电缆动态热响应的计算^[14]。选取合适的特征值(λ_1 、 λ_2 和 λ_3)和特征向量(\mathbf{v}_1^- 、 \mathbf{v}_2^- 和 \mathbf{v}_3^-),则式(22)的解析解^[27]为

$$\begin{bmatrix} \theta_c(t) \\ \theta_m(t) \\ \theta_o(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_c(\infty) \\ \theta_m(\infty) \\ \theta_o(\infty) \end{bmatrix} + [c_1 \mathbf{v}_1^- \cdot e^{\lambda_1 t} + c_2 \mathbf{v}_2^- \cdot e^{\lambda_2 t} + c_3 \mathbf{v}_3^- \cdot e^{\lambda_3 t}] \quad (23)$$

其中,3个常数 c_1 、 c_2 和 c_3 的值可以通过如下公式计算得到:

$$[\mathbf{v}_1^- \quad \mathbf{v}_2^- \quad \mathbf{v}_3^-] \cdot \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_c(0) \\ \theta_m(0) \\ \theta_o(0) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \theta_c(\infty) \\ \theta_m(\infty) \\ \theta_o(\infty) \end{bmatrix} \quad (24)$$

式中, $\theta_c(0)$ 、 $\theta_m(0)$ 和 $\theta_o(0)$ 分别为导体、金属护套和外护套在每个负载周期的初始温度; $\theta_c(\infty)$ 、 $\theta_m(\infty)$ 和 $\theta_o(\infty)$ 分别为电缆维持当前运行条件足够长时间后导体、金属护层和外护套的稳态温度。

对于IEC 60853方法,将整个热路模型划分为2个独立的部分来计算电缆导体的动态温度响应,其中,第1部分模拟电缆部分,第2部分模拟电缆周围的环境。值得注意的是这两部分热路模型各自的响应都是局部暂态响应,以此来建立电缆的整体动态响应。对于第1部分热路模型的暂态温度响应计算,不同负荷持续时长的情况要分别讨论。对于负荷持续时长较长的情况(持续时长超过1h),电缆绝

缘层的动态热路模型见图1,但对于负荷持续时长较短的情况(持续时长小于1h),绝缘层按照等热阻的方式划分为2个部分后再建立电缆绝缘层的动态热路模型,其具体计算方法在IEC 60853中有详细描述^[19]。

对于改进的电缆动态热路模型,现有研究展示了多种电缆绝缘层的划分方法,包括文献[28]提出的绝缘层等厚度划分方法、文献[13,19]提出的绝缘层等热阻划分方法和文献[29]提出的绝缘层的等热容划分方法。文献[30]提出利用指数离散化方法对电缆周围土壤环境的热建模进行优化细分,这种划分方法同样可以用来细化电缆绝缘层的热建模。本文即采用指数离散化方法细化电缆绝缘层热建模的改进模型并与传统模型进行对比试验。首先,设定改进电缆动态热路模型中绝缘层划分后子部件的数量为 n ,采用指数离散化方法的改进电缆动态热路模型,第 j 个绝缘层子部件的外径为

$$D_{ij} = D_c + (D_i - D_c) \cdot \frac{e^{rj} - 1}{e^r - 1} \quad (25)$$

其中, r 是指数离散化改进电缆动态热路模型中的控制系数。然后,对于IEC推荐的电缆动态热路模型中各热参数的计算方法,经过一些改动后仍可以用来计算各绝缘层子部件 π 型热路模型中的热参数。

应用改进电缆动态热路模型实现对电缆导体温度动态响应的计算称为改进TEE方法。值得说明的是,改进TEE方法的求解可以在经典TEE方法求解的基础上实现,两者最大的区别在于改进电缆动态热路模型中温度节点数量的增加,这导致电缆导体温度动态计算过程中式(22)~(24)中所有矩阵的阶数增加。相比于经典TEE方法求解的实现,电缆绝缘层子部件的数量是改进TEE方法求解实现过程中需要的唯一额外参数。

4.2 实验验证

为了验证提出的改进TEE方法能否在保持较高求解速度的同时获得较好的求解精度,利用短电缆温升实验系统设计110kV、1000mm²电缆的动态温升实验,如图6所示,实验电缆的详细结构参数如表2所示。

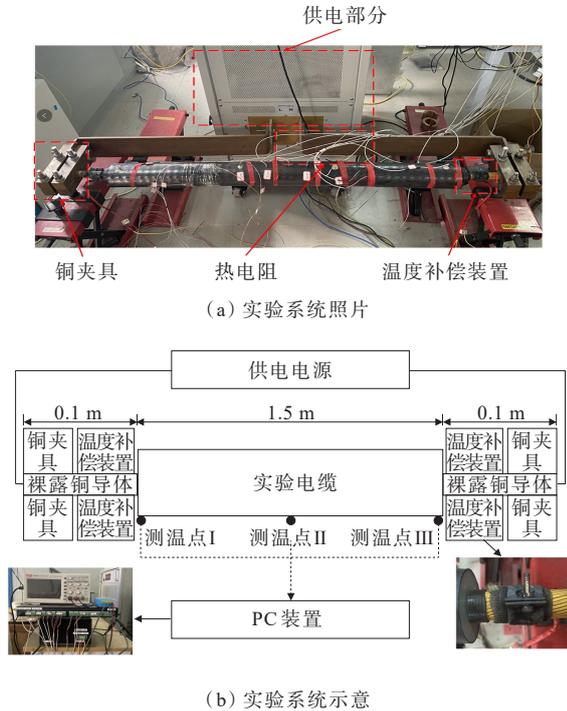


图 6 实验平台设置
Figure 6 Experimental setup

表 2 110 kV、1 000 mm²实验电缆的结构参数

Table 2 Structural parameters of 110 kV, 1 000 mm² cable

结构	材料	外径/mm
导体	铜	43.8
绝缘层	交联聚乙烯	78.5
金属护套	铝	91.0
外护套	中密度聚乙烯	110.0

提出改进 TEE 方法的目的是缓解电缆动态热评估中采用具有恒定绝缘层热容分配系数的绝缘层集总 π 型热路模型可能造成的误差累积现象,为了说明改进 TEE 方法对电缆导体温度动态计算精度的改善效果,对比经典 TEE、IEC 60853 和改进 TEE 方法应用于电缆动态热评估的求解精度。

实验的目的是研究电缆内部绝缘层暂态热行为对电缆动态热评估的影响,进而实现对绝缘层动态热建模的优化。因此,为了简化经典 TEE、IEC 60853 和改进 TEE 方法的求解复杂度,IEC 推荐的电缆动态热路模型和改进电缆动态热路模型的求解起点都设置为电缆外表面,通过实时测量的电缆表面温度和负荷数据来实现对电缆导体温度的动态计算^[31]。对实验电缆施加整体持续时长为 9 h 的六段阶跃负荷(图 6),则在电缆载荷条件下应用经

典 TEE、IEC 60853 及改进 TEE 方法得到的电缆导体温度动态计算结果和电缆导体温度的实测结果的对比如图 7 所示。在持续总时长为 9 h 的六段阶跃负荷温升实验过程中,平均室温为 16.2 °C 且室温的波动范围不超过 1.3 °C。

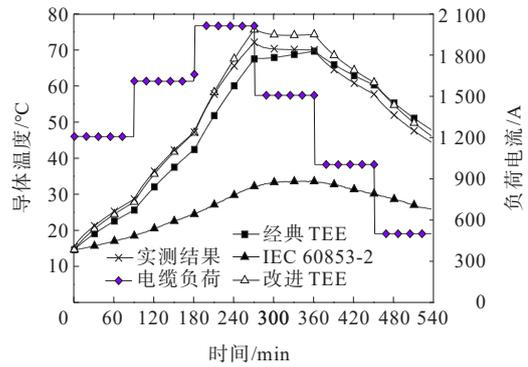


图 7 波动负荷持续总时长为 9 h 情况下不同方法导体温度动态计算结果和实测结果的对比

Figure 7 Calculation results of 9-hours fluctuating load experiment

由图 7 可知,经典 TEE 和 IEC 60853 方法不能准确地模拟连续波动荷载作用下电缆的动态热行为,同时可以观察到误差累积现象出现,这与文 3 中采用具有恒定绝缘层热容分配系数,由 IEC 推荐的电缆动态热路模型给电缆动态热评估带来的误差分析是一致的。

相比于经典 TEE 和 IEC 60853 方法,改进 TEE 方法呈现较好的电缆动态热评估求解精度,计算得到的电缆导体温度动态结果曲线和实测结果曲线能够很好地吻合,大部分时刻改进 TEE 方法的导体温度计算误差都在 2.5 °C 以内。结果表明,对 IEC 推荐的电缆动态热路模型的改进,能够有效地提高模型在连续波动负荷作用下模拟电缆现场运行情况的能力。

5 结语

本文在电力电缆瞬态温度计算中,将热容分配系数作为一个时变变量,推导了动态负荷下热容分配系数的计算公式,得到了近似解。文中通过有限元模型分析了 IEC 60853 方法中采用恒定热容分配系数对电缆动态热额定值的影响,并对可能出现的

误差累积现象进行了分析。最后通过短电缆温升实验验证了理论分析的有效性和改进方法的优越性。

1) 通过本文的仿真模型及结果分析,电缆绝缘层的热容分配系数会随着绝缘层温度的变化而波动,在电缆负荷出现连续增长或者连续下降的情况下,由绝缘层集总参数热路模型中采用恒定绝缘层热容分配系数引起的误差累计现象对电缆准确动态热评估的实现非常不利。

2) 通过短电缆温升实验发现,传统 TEE 和 IEC 60853 方法不能准确地模拟连续波动荷载作用下电缆的动态热行为,同时可以观察到误差累积现象出现,这与文中仿真结果中采用恒定热容分配系数时的误差分析是一致的。

3) 通过分析本文的短电缆温升实验结果,改进 TEE 方法能够较好地反应电缆在连续波动负荷下真实的热性能,其导体温度计算误差维持在 $2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内。改进后的方法是现有 DTR 方法的有效补充,能够较大幅度地提高电缆的资产利用率,并确保电缆安全可靠运行。该方法可方便地集成到现有的 DTR 系统中,实时监测电缆在波动负荷下的热稳定状态,校验电缆在短期转供电运行方式下能否维持热稳定运行。

参考文献:

- [1] 侯金鸣,孙蔚,肖晋宇,等.电力系统关键技术进步与低碳转型的协同优化[J].电力系统自动化,2022,46(13):1-9.
HOU Jinming, SUN Wei, XIAO Jinyu, et al. Collaborative optimization of key technology progress and low-carbon transition of power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(13): 1-9.
- [2] 单秉亮,李舒宁,杨霄,等.XLPE 配电电缆缺陷诊断与定位技术面临的关键问题[J].电工技术学报,2021,36(22):4809-4819.
SHAN Bingliang, LI Shuning, YANG Xiao, et al. Key problems faced by defect diagnosis and location technologies for XLPE distribution cables[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(22): 4809-4819.
- [3] 周韞捷,杨天宇,周宏,等.高压 XLPE 电缆缓冲层状态模糊综合评估方法[J].高压电器,2022,58(6):137-143.
ZHOU Yunjie, YANG Tianyu, ZHOU Hong, et al. Fuzzy comprehensive condition assessment method of buffer layer in HV XLPE cables[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(6): 137-143.
- [4] 刘维功,王昊展,时振堂,等.基于改进 XGBoost 算法的 XLPE 电缆局部放电模式识别研究[J].电测与仪表,2022,59(4):98-106.
LIU Weigong, WANG Haozhan, SHI Zhentang, et al. Research on partial discharge pattern recognition of XLPE cable based on improved XGBoost algorithm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59 (4): 98-106.
- [5] 王宁,康宇先,闫振宏,等.单杆异步高压无线核相器设计与实现[J].电力系统保护与控制,2021,49(24):150-158.
WANG Ning, KANG Yuxian, YAN Zhenhong, et al. Design and implementation of a single-rod asynchronous high voltage wireless phase detector[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49 (24): 150-158.
- [6] 王风华,牟龙华.考虑内部结构的低压交流电缆短路故障检测方法[J].供用电,2022,39(12):28-36.
WANG Fenghua, MOU Longhua. Short circuit fault detection method of low voltage AC cable considering internal structure[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39 (12): 28-36.
- [7] JERZY G, MAREK Z. The simplified method for transient thermal field analysis in a polymeric DC cable[J]. Electrical Engineering, 2011, 93(4): 209-216.
- [8] 李高潮,卢怀宇,孙启德,等.基于可再生能源的冷热电联供系统集成配置与运行优化研究进展[J].电网与清洁能源,2021,37(3):106-119.
LI Gaochao, LU Huaiyu, SUN Qide, et al. Research progress in configuration and operation optimization of combined cooling, heating and power (CCHP) systems based on renewable energy[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37 (3): 106-119.
- [9] 高昇宇,李超群,王春宁,等.智能配电系统电缆导体温度推算与应急能力评估[J].电力自动化设备,2017,37(3):45-49+54.
GAO Shengyu, LI Chaoqun, WANG Chunqing, et al. Cable conductor temperature calculation and emergency capability assessment for smart distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(3): 45-49+54.
- [10] OLSEN R, HOLBOELL J, GUDMUNDSDOTTIR U S. Electrothermal coordination in cable based transmission grids[J]. IEEE Transactions on Power Systems: A

- Publication of the Power Engineering Society,2013,28(4): 4867-4874.
- [11] Rasoulpoor M, Mirzaie M, Mirimani S M. Thermal assessment of sheathed medium voltage power cables under non-sinusoidal current and daily load cycle[J]. Applied Thermal Engineering, 2017,123:353-364.
- [12] GIOVANNI M. Analysis of the combined effects of load cycling, thermal transients, and electrothermal stress on life expectancy of high-voltage AC cables[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007,22(4):2000-2009.
- [13] SUGIHARA H, FUNAKI T. Fundamental analysis of electrothermal coordination of underground cables toward high-penetration renewable generation[C]//IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), Portland, OR, USA, 2018.
- [14] OLSEN R S, HOLBOLL J, GUDMUNSDOTTIR U S. Dynamic temperature estimation and real time emergency rating of transmission cables[C]//IEEE Power and Energy Society General Meeting, San Diego, CA, USA, 2012.
- [15] WANG P, MA H, LIU G, et al. Dynamic thermal analysis of high-voltage power cable insulation for cable dynamic thermal rating[J]. IEEE Access, 2019,7:56095-56106.
- [16] 田燕山,李宗蔚,牟泽刚,等.单芯电缆热路模型的改进及其在载流量计算中的应用[J].电线电缆,2017(3):5-8.
TIAN Yanshan, LI Zongwei, MU Zegang, et al. Improvement of the thermal circuit model for single-core cable and its application in ampacity computation[J]. Wire & Cable, 2017(3): 5-8.
- [17] 王航.考虑非线性负荷的电缆温度和载流量评估[D].武汉:武汉大学,2019.
WANG Hang. The estimation of the cable temperature and ampacity in presence of non-linear loads[D]. Wuhan: Wuhan University, 2019.
- [18] 于希娟,李洪涛,马喜欢,等.非线性负荷接入高压一超高压系统评估方法对比[J].中国电力,2021,54(12):54-62.
YU Xijuan, LI Hongtao, MA Xihuan, et al. Comparison of assessment methods for the connection of nonlinear loads to HV-EHV power systems[J]. Electric Power, 2021, 54 (12): 54-62.
- [19] IEC 60853—1989. Calculation of the cyclic and emergency current rating of cables[S].
- [20] GOUDA O, OSMAN G, SALEM W, et al. Cyclic loading of underground cables including the variations of backfill soil thermal resistivity and specific heat with temperature variation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33 (6):3122-3129.
- [21] STOJANOVIC M, TASIC D, RISTIC A. The influence of daily load profile on the heating of single-core XLPE cables buried in the ground[J]. Autom Control Robot, 2013, 12:57-67.
- [22] VAN WORMER F C. An improved approximate technique for calculating cable temperature transients[J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1955, 74(3):277-281.
- [23] OLSEN R, ANDERS G, HOLBOELL J, et al. Modelling of dynamic transmission cable temperature considering soil-specific heat, thermal resistivity, and precipitation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(3): 1909-1917.
- [24] GOLEBIEWSKI J, ZAREBA M. The simplified method for transient thermal field analysis in a polymeric DC cable[J]. Electrical Engineering, 2011, 93(4):209-216.
- [25] BAEHR H, STEPHAN K. Heat and Mass transfer[M]. Berlin, Germany: Springer, 2006:43-51.
- [26] RASOULPOOR M, MIRZAIE M, MIRIMANI S. Thermal assessment of sheathed medium voltage power cables under non-sinusoidal current and daily load cycle[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 123:353-364.
- [27] PERKO L. Differential equations and dynamical systems (3rd ed)[M]. New York, NY, USA: Springer-Verlag, 1991: 24-36.
- [28] BONTEMPI G, VACCARO A, VILLACCI D. Semiphysical modelling architecture for dynamic assessment of power components loading capability[J]. IEEE Proceedings-Generation and Distribution, 2004, 151(4):533-542.
- [29] 刘刚,王鹏宇,周凡,等.电力电缆暂态热路模型中绝缘层的优化[J].高电压技术,2018,44(5):1549-1556.
LIU Gang, WANG Pengyu, ZHOU Fan, et al. Optimization on the insulating layer of transient thermal circuit model of power cable[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(5): 1549-1556.
- [30] LIU S, KOPSIDAS K. Reliability evaluation of distribution networks incorporating cable electro-thermal properties [C]//Power Systems Computation Conference (PSCC), Genoa, Italy, 2016.
- [31] LIANG Y, LIU Q, SUN H, et al. Cable load dynamic adjustment based on surface temperature and thermal circuit model[C]// International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), Beijing, China, 2008.