

基于神经网络和温度特性曲线的 电缆故障率估计

何宁辉, 周 秀, 马 波, 沙伟燕, 王 玮, 罗 艳

(国网宁夏电力有限公司电力科学研究院, 宁夏 银川 750011)

摘 要: 电流产生的热效应是影响电缆使用寿命和老化故障的主要原因, 建立电缆温度特性模型极其重要。电力企业应能够正确估计配电网电缆的相关老化故障率, 然而现有的电缆故障率估计是在额定温度下进行计算的, 并没有考虑实际运行中温度变化的影响。采用一种基于人工神经网络的方法估计电缆最高温度, 该温度变化满足一定的日负荷曲线。人工神经网络只需 4 个容易获取的输入变量, 利用电缆绝缘组合电热寿命模型, 对预测温度曲线各阶段的寿命损失进行估计。最后, 利用该寿命模型和概率失效模型预测未来一段时间内电力电缆的故障率。结果表明, 失效概率的估计与实际结果一致性高, 说明所估算的电缆温度三级逐步变化曲线能够真实反映电缆瞬态温度变化。

关 键 词: 电力电缆; 配电网; 神经网络; 温度特性; 老化故障率

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2022.04.019 中图分类号: TM93 文章编号: 1673-9140(2022)04-0169-06

Cable failure rate estimation based on neural network and temperature characteristic curve

HE Ninghui, ZHOU Xiu, MA Bo, SHA Weiyan, WANG Wei, LUO Yan

(Electric Power Science Research Institute, State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd., Yinchuan 750011, China)

Abstract: The thermal effect of current is the main cause of cable service life and aging failure. It is very important to establish the cable temperature characteristic model. Power enterprises should be able to correctly estimate the related aging failure rate of distribution network cables. However, the existing cable failure rate estimations are calculated at the rated temperature and do not take into account the effect of actual operating temperature changes. Therefore, a method based on artificial neural network is used to estimate the maximum temperature of the cable. This temperature variation is in good agreement with the daily load curve in some extent. The artificial neural network only needs four easily obtained input variables, and the life loss at each stage of the predicted temperature curve is estimated by using the combined electric heating life model of cable insulation. Finally, the life model and probability failure model are used to predict the failure rate of power cables in the future. The results show that the estimation of failure probability is in good agreement with the actual results, which indicates that the three-stage gradual change curve of cable temperature can truly reflect the cable transient temperature change.

Key words: power cable; distribution network; neural network; temperature characteristic; aging failure rate

收稿日期: 2020-10-22; 修回日期: 2020-11-19

基金项目: 宁夏回族自治区重点研发计划(2020YCYF0112)

通信作者: 何宁辉(1986-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事电力设备状态监测技术研究; E-mail: 232464433@qq.com

在配电网电力市场不断友好开放的大环境下,其竞争也越来越激烈。配电网的电力设备主要朝着2个方向发展:高电能质量和低成本。降低设备的故障率能够提高供电可靠性,对高电能质量有重要意义,而减少设备的维修和更换最具有经济效益^[1]。然而,配电网的设备故障率并不是一个常量,通常受到各种各样的外界和内在因素影响,如:设备服役年限、制造缺陷、导体尺寸以及植物生长、动物和天气等等。

对于高压电力电缆(high voltage alternating cables, HAVC)而言,降低其故障率在原理上是可行的,原因在于设计单位忽略了负荷变化以及假定导体绝缘介质所处环境的温度是恒定的。由于设计阶段负荷的实际变化并不十分清楚,因此,高压电力电缆在设计阶段的寿命估计通常与负荷变化无关^[2-3],而实际上负荷电流是根据日负荷曲线变化的。除了短路和过载的电流外,大部分时间内负荷电流远远低于额定电流。在大多数实际工况下,因高压电力电缆流过的电流和功率都小于其额定值,故其最高温度也大多低于额定值。因此,高压电力电缆的实际寿命可能比设计寿命长^[4-5]。这种推断是基于对绝缘介质的历史负荷情况进行推测的,并以此来预测未来的负荷情况。

由于故障建模属于预测问题,故许多学者提出了多元线性/指数回归等参数化方法和人工神经网络等非参数化方法。目前,有人尝试将故障作为一个与外部因素有关的模型,如植物生长或天气。关于植物生长的问题有时会导致架空线路故障,目前,有关学者研究了4种模型(线性、指数、线性多元回归以及人工神经网络(artificial neural network, ANN))来估计植被相关故障。文献[6-8]采用双态模型模拟恶劣天气对架空线路故障率的影响,该模型表明,故障率在大部分时间保持较低,但在短时间的不利天气期间内会变得很高;文献[9]利用配电网历史故障事件数据对配电网电气设备寿命模型进行了参数化处理,其主要研究了寿命、电应力、机械应力和温度之间的关系,以及各参数对老化过程和设备可靠性的影响,进一步提出了基于年历数据的设备故障率的预测方法;文献[10]已将ANN应用于电力电缆的寿命估计,并根据其运行温度给出了其故障率估计方法。但是,上述文献中并没有考虑负

荷变化对电气元件的绝缘老化过程的影响,尤其是在地下电缆情况下,其影响更为突出。由于在地下电缆的散热能力较差,其工作温度将直接受到负荷变化的影响。对于聚合物材料制成的绝缘电力电缆,影响老化的最大因素是工作温度,因此,负载变化也会间接影响老化故障率。

本文将温度变化考虑进电力电缆的寿命估计中,由于对电缆热瞬态估计需要几个与其有关的输入变量,这些输入量取决于电缆在地下的结构、土壤类型和许多其他因素,故本文提出一种基于神经网络的电力电缆温度变化预测方法。此方法不需要任何关于电力电缆埋地方法的信息,不需要建立电缆层的热学模型,只需要一个经过训练的神经网络来预测电缆的最高温度。本文利用神经网络对其建模,仿真计算结果将与实际获得的老化率进行比较。

1 现有电缆老化故障率估算方法

影响电力电缆绝缘老化的主要因素:电压引起的电应力;由导电部分的欧姆损耗、绝缘部分的介电损耗以及在某些情况下来自环境的加热引起的热应力;制造、铺设、装配引起的机械应力;氧化、辐射和水分对环境的影响。然而,对于埋在地下的HVAC,使用外部保护层保护其不受腐蚀,防止水分通过阻水系统入侵,其氧化、辐射和水分的影响可以忽略不计^[11]。此外,HVAC电缆的制造、铺设和装配都以使机械应力最小化的方式进行,并且电缆的机械故障保持在1%左右。

因此在实际使用条件下,电应力和热应力及其因素的共同作用影响着HVAC电缆老化。对于负荷变化情况下HVAC的寿命估算问题,应当采用复合应力电热寿命模型;对于HVAC电缆的聚合物绝缘,其模型保持在典型的电气和热应力测试都处于实际应用的条件下。该模型是2种典型的单应力模型(热寿命的Arrhenius和电寿命的逆功率模型)的组合,其绝缘估计寿命表达式为

$$L = L_0 \left(\frac{E}{E_0} \right)^{-(n_0 - bcT)} e^{-bcT} \quad (1)$$

式中 E 为最大电场强度; $cT = 1/T_0 - 1/T$, 代表传统热效应,其中 T 为开氏最高温度, T_0 为参考温度,通常是环境温度; n_0 为参考温度下的耐压系数;

E_0 为电场门槛值,低于其值则电老化可以忽略不计; L_0 为参考温度和电场门槛情况下的寿命; B 为与热降解反应的活化能和玻尔兹曼常数有关的常数; b 为与电应力和热应力协同作用的参数。

根据电力系统可靠性计算,绝缘寿命与绝缘失败概率有关。通过电力电缆聚合物的绝缘寿命与绝缘失败概率的常用累积分布函数(cumulative distribution function, CDF)为

$$P(t, E, T) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{L_{63\%}}\right)^{\beta_t}\right] \quad (2)$$

式中 t 为绝缘失败时寿命的百分数; $L_{63\%}$ 为故障概率等于 63% 的寿命时间; β_t 为 CDF 的形状参数。

绝缘寿命概率随时间的估计模型为

$$t = [-\ln(1 - P)]^{\frac{1}{\beta_t}} \alpha_0 \left(\frac{E}{E_0}\right)^{-(n_0 - bcT)} e^{-BcT} \quad (3)$$

式中 α_0 为 L_0 等于 63% 时的概率。

通过函数可以估计电力电缆的故障率,即

$$h(t, E, T) = -\frac{R'(t, E, T)}{R(t, E, T)} = \frac{\beta_t}{L_{63\%}} \left[\frac{t}{L_{63\%}}\right]^{\beta_t - 1} \quad (4)$$

其中, $R'(t, E, T)$ 是 $R(t, E, T)$ 对 t 的导数。因此,对电缆故障的正确估计取决于对电缆寿命的正确估计。

2 热瞬态对电缆故障率估计的影响

在实际运行中,对 HVAC 最大的影响是绝缘中的最高温度和电场。而每天的负荷在电缆上的应力作用,长时间的积累最终导致电缆的老化。实际运行中电缆承受的电压只会在额定电压附近波动,因此,最大电场可以假设为随时间变化的常数,通常认为等于设计时的额定值。但实际运行中最高温度是变化的,这是由于功率损耗随负载的变化而变化,以及构成电缆及其外部环境各层的蓄热和交换特性。这些效应的结合产生了热瞬变过程,在此过程中温度从一个初始值开始,并趋向于一个稳定值。

电缆的日负荷百分数曲线如图 1 所示,分为 6 个阶段,电缆的温度变化曲线如图 2 所示,当电缆在阶段 3、5 内属于超载时,稳态温度超过绝缘的最高允许温度(90 °C),并且在轻载阶段(阶段 1、6),稳态温度远远低于最高温度,但每天负载并不会保持不

变,而是周期性地变化(图 1),可以看出电缆瞬态温度与稳态温度相差较大。在本例中,电缆温度始终保持在额定温度(90 °C)以下。因此,可以认为电缆的实际使用寿命应该超过设计寿命。

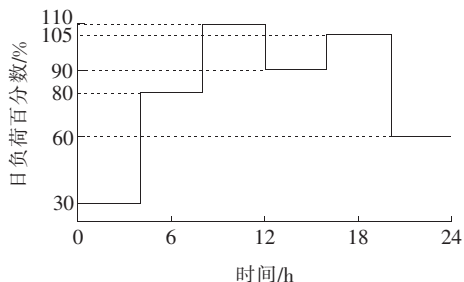


图 1 日负荷百分数曲线

Figure 1 Daily load percentage curve

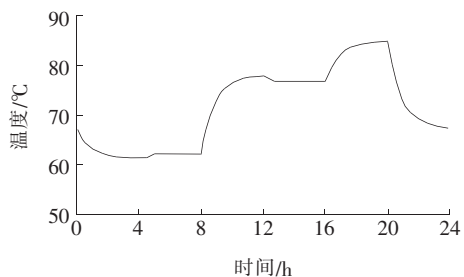


图 2 日负荷下电缆的温度变化曲线

Figure 2 Cable temperature variation curve under daily load

在实际运行工况下,根据文献[10]的计算结果,该电缆在额定寿命结束时的故障率将为 0.003 4 (次/(km/a))^[10]。然而,计算结果表明,该电缆在其额定寿命结束时的故障率为 0.000 1 (次/(km/a)),该电缆的热瞬态见图 2。这种巨大的差异突出了在电缆寿命和老化故障率估计时考虑电缆热瞬态的重要性。因此,本文通过假设日负荷逐级恒定来建立自适应暂态热模型^[11]。

通过计算 HVAC 及其周围环境对负载电流每个阶段变化的热响应,可以确定电缆导体温度在分阶段恒定负载循环中的变化。该模型采用集总参数梯形网络,该网络由串联热阻和分流热容组成,并通过在该网络中应用瞬态热模拟欧姆定律。利用热网络模拟计算 HVAC 的热瞬态,需要沿电缆路径的热阻和扩散常数、电缆轴向深度和埋深参数以及 24 h 在线计算得到电缆的温度剖面数据。

为了简化 HVAC 的寿命和老化故障率估计,本文提出一种基于神经网络的方法。首先,利用该方法预测电缆在日负荷下的温度曲线;然后,根据预测的温度曲线对电缆的寿命和老化故障率进行估计;

最后,验证该方法的准确性。

3 基于神经网络的电缆温度预测

电缆的温度变化与负荷大小有关。然而,负荷曲线是一段连续的复杂非线性函数,要对运行的电缆进行连续的热瞬态预测并不现实。因此,为了克服这种复杂性,将电缆温度变化进行近似,这种近似应能够根据负荷的变化进行调整,通常其负荷水平分为3种不同的阶梯,即基础负荷、中间负荷和峰值负荷。

典型的日负荷曲线如图3所示;电缆的离散近似温度变化曲线如图4所示,可以看出,在2~6、9~20 h之间,电缆分别处于最低温度和最高温度,在其他时间内,电缆处于加载过程,电缆温度处于中间状态。本文定义的负荷水平如下:

$$\begin{cases} 0 \leq x \leq \frac{1}{3}P_{\max}, & \text{基础负荷} \\ \frac{1}{3}P_{\max} \leq x \leq \frac{2}{3}P_{\max}, & \text{中间负荷} \\ \frac{2}{3}P_{\max} \leq x \leq P_{\max}, & \text{峰值负荷} \end{cases}$$

其中, P_{\max} 为最大负荷。

对电缆的三级阶段温度变化预测需要6个变量,即最高、最低和中位数温度及其相关的连续时

间。后3个量很容易从电缆每日负荷循环中得到。但是,前3个变量是未知的,应该加以确定。

1)最高温度估计。

利用人工神经网络的学习特性,从日负荷中提取的数据,学习如何预测电缆的最高温度。然后利用神经网络的泛化特性,预测不同负荷下电缆的最高温度。因此,最大温度是神经网络的唯一输出。本文采用 ANN 模型作为神经网络的学习方法,其网络具有4个输入变量,即最大负荷的规一化值、负荷系数、导体电阻和环境温度归一化值。

最大负荷值直接影响峰值负荷区间的温升速率,因此将电缆的最大载荷按电缆的最大允许载荷进行归一化。由于神经网络要预测不同类性质日负荷曲线,而最大负荷本身并不能引入负荷的性质。因此,本文采用负荷系数(load factor,LF)来表征日负荷的性质,其值定义为 P_{av} 与 P_{\max} 的比值。 P_{\max} 、 P_{av} 分别为最大载荷和平均载荷。由于导体的类型及其截面与电缆的温升有直接关系,利用电位长度电缆的电阻来表征。最后,电缆所处的环境温度会影响电缆的最高温度,因为电缆的空载温度大约等于环境温度,任何电缆负载的增加都会导致电缆温度的升高,从而增加环境温度。本文采用 20 °C 作为参考温度,将地面温度进行归一化。最大电缆温度预测的 ANN 模型如图5所示。

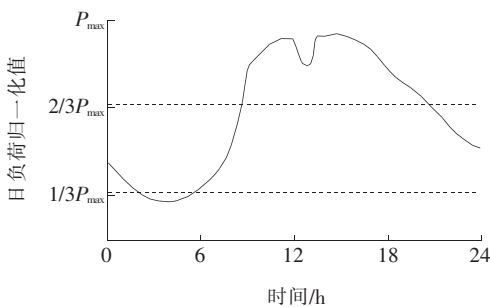


图3 典型日负荷曲线

Figure 3 Typical daily load curve

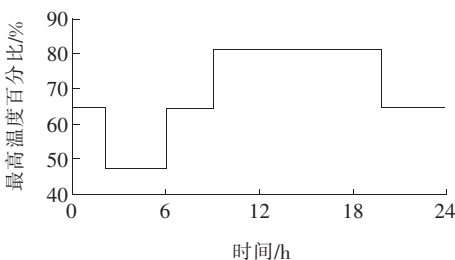


图4 离散化的三级温度变化曲线

Figure 4 Discrete three-stage stepwise temperature curve

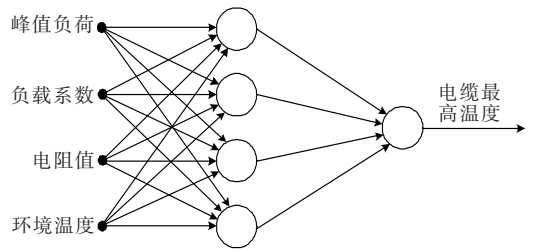


图5 最大电缆温度预测的神经网络模型

Figure 5 Neural network model for maximum cable temperature prediction

该模型具有多层感知器结构,隐含层神经元的激活函数为单极 sigmoid 函数。输出神经元具有线性累加的激活函数。模型使用数据来学习输入和输出之间的关系。具有自适应学习速率的梯度下降反向传播算法具有超越训练数据的泛化能力,可用于神经网络的训练。

2)最低温度估计。

电缆温度的变化与日负荷形状和大小有关。通

过对几种不同的日负荷曲线进行分析,负荷系数与电缆最高和最低温度之间的关系为

$$T_{\min} = f_{LF} \cdot T_{\max} \quad (5)$$

式中 T_{\min} 、 T_{\max} 分别为电缆的最低、最高温度。

3)中位数温度估计。

得到电缆的最高和最低温度后中位数温度为

$$T_{\text{med}} = \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} \quad (6)$$

若要对电缆的使用寿命进行估计,必须考虑电缆寿命期间温度变化的影响。现有的电缆老化寿命计算只考虑了恒定温度和电场作用下的结果。本文对电缆的温度变化抽象为一个逐级变化的曲线,因此,每个阶梯对应一个恒定的温度值。假定电缆使用中日负荷曲线相同,则电缆在每个阶梯上的寿命损耗为

$$S_i = \frac{\Delta t_i}{L[E_n, T_i(t)]} \quad (7)$$

其中, $L[E_n, T_i(t)]$ 表示电缆在电场和温度恒定情况下的寿命。因此,对于电缆绝缘情况,一天中的损耗率可以表示为

$$S = \sum_{i=1}^3 S_i \quad (8)$$

本文采用三级温度变化曲线, $i=3$ 。假定电缆寿命为 N 天,则损耗率、寿命天数满足 $N \cdot S = 1$ 。因此,考虑温度变化影响的电缆寿命为

$$L = \frac{N}{365} = \frac{1}{365S} = \frac{1}{365 \sum_{i=1}^3 \frac{\Delta t_i}{L[E_n, T(t)]}} \quad (9)$$

根据式(9),利用式(4)近似估算电缆的老化故障率。

4 仿真计算分析

本文利用不同条件下电力电缆温度变化的实验数据库建立样本数据,共计 14 组,将其中 10 个数据作为训练样本,剩余 4 个作为测试样本。训练样本数据如表 1 所示。

利用表 1 的样本数据对 ANN 进行训练,测试神经网络的学习效果,如表 2 所示,神经网络的输出结果存在一定的误差,误差产生的主要原因是缺少电力电缆在不同负荷循环下热特性的实验数据。

表 1 神经网络训练样本数据

Table 1 Training sample data of neural network

序号	电流/A		负荷系数	电阻/(Ω/km)	温度/℃	
	额定	峰值			环境	最高
1	400	530	0.64	0.050	25.9	88.0
2	350	480	0.63	0.058	25.9	86.5
3	840	840	0.70	0.038	20.0	80.0
4	350	500	0.35	0.058	23.5	82.0
5	1 000	1 088	0.71	0.031	20.0	78.0
6	400	550	0.50	0.050	30.3	87.9
7	350	480	0.50	0.058	30.3	86.5
8	400	475	0.75	0.050	20.2	74.5
9	350	450	0.75	0.058	16.0	86.5
10	900	1 023	0.71	0.031	20.0	92.0

表 2 神经网络的电缆最高温度估计

Table 2 Maximum temperature estimation of cable based on neural network

序号	电缆最高温度实际值/℃	神经网络输出温度/℃	误差/%
1	85.0	86.7	2.0
2	83.0	78.8	5.1
3	62.3	67.6	8.5
4	69.0	67.0	2.9

神经网络输出最高温度后利用式(5)对最低温度进行估计,计算结果如表 3 所示。采用表 3 数据,根据式(2)~(4)对电缆的老化故障率进行计算。本文对 2 种不同电缆进行估计,统计时间为 20 a,老化故障率估计结果如表 4 所示。

表 3 电缆最低温度的估计结果

Table 3 Minimum temperature estimated results of the cable

序号	电缆实际最低温度/℃	神经网络估计温度/℃	误差/%	实际估计最高温度/℃	误差/%
1	62.0	62.4	0.6	61.2	1.3
2	61.5	59.1	3.9	62.3	1.3
3	62.3	67.6	8.5	62.3	0.0
4	45.0	46.9	4.2	48.3	7.3

表 4 电缆故障率仿真计算结果

Table 4 Results of cable failure rate simulation results

序号	故障率/(10 ⁻⁴ 次/(km/a))		
	实际值	额定值	本文估计结果
1	2.2	34	8.7
2	2.4	34	3.0

由表4数据可知,电缆老化故障率的准确值远远小于其额定值。这是由于电缆在运行时,其温度基本处于额定温度之下,因此其寿命一般都比额定值更长,这使得老化故障率在额定寿命结束时较低。此外,表4故障率的实际值表明,额定的老化故障率并不能准确的估计电缆的可靠性从统计的数据中表明,在相同日负荷作用下,故障率的额定值和实际值差异很大,而本文提出的方法估计的老化故障率与实际值接近,其误差在能够接受的范围内,能够对可靠性进行较为准确的计算。应用该方法时,必须收集的数据是电缆负荷和传热试验数据以对神经网络进行训练,不过这些数据可以从电力企业获得,因此本文提出的方法具有实用性。

5 结语

本文提出了基于神经网络的方法对时变负荷情况下的电缆温度进行建模,并将该温度模型应用到老化故障率的估计方法中。实际计算结果表明,本文提出的方法具有较好的精度,因此可以避免对电缆热瞬态的复杂计算。本文利用神经网络的输出对电缆故障率进行仿真计,结果表明,额定老化故障率与实际老化故障率相比存在较大差异。因此,在可靠性研究中使用额定故障率值会产生误差较大的结果。与此相反,该方法对电缆老化故障率的估计值与实际值吻合较好,能够对可靠性进行更为准确的计算。

参考文献:

- [1] 蔡霖霖,郝丽丽,张柯琪.含可再生能源电力系统可靠性评估的非参数重要性分层抽样法[J].电力系统自动化,2022,46(7):104-115.
CAI Jilin,HAO Lili,ZHANG Keqi. Non-parametric stratified importance sampling method for reliability evaluation of power system with renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems,2022,46(7):104-115.
- [2] 姜臻,于力,黄彦璐,等.考虑分布式电源“即插即用”的配电网临界条件计算方法[J].中国电力,2020,53(4):22-31.
JIANG Zhen,YU Li,HUANG Yanlu,et al. Calculation method for critical conditions of distribution network considering distributed generation "plug and play"[J]. Electric Power,2020,53(4):22-31.
- [3] 李根,王航,周文俊,等.波纹护套高压XLPE电缆缓冲层空气间隙电场分布[J].高压电器,2021,57(10):167-175.
LI Gen,WANG Hang,ZHOU Wenjun,et al. Electric field distribution in air gap between the buffer layer and corrugated metallic sheath of HV XLPE cable[J]. High Voltage Apparatus,2021,57(10):167-175.
- [4] 冯晨.基于绝缘电阻的电缆用乙丙橡胶绝缘表面电痕故障诊断方法研究[D].太原:太原理工大学,2016.
- [5] 南保峰,卢雨欣,孙廷玺,等.基于三芯电缆自取能技术的热状态评估系统研制[J].智慧电力,2020,48(11):103-107.
NAN Baofeng,LU Yuxin,SUN Tingxi,et al. Development of thermal condition evaluation system based on energy self-harvesting technique for three-core power cables[J]. Smart Power,2020,48(11):103-107.
- [6] ANDRZEJ C,BARTOSZ S,MAREK K. Economic optimization of an underground power cable installation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2018,33(3):1124-1133.
- [7] LI Z G,WU W C,ZHANG B M,et al. Dynamic economic dispatch using lagrangian relaxation with multiplier updates based on a quasi-newton method[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2013,28(4):4516-4527.
- [8] GILL S,KOCKAR I,AULT G W. Dynamic optimal power flow for active distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2014,29(1):121-131.
- [9] 颜云松,孙宁,张楠,等.基于预防检修周期优化的电网稳定控制系统失效风险评估[J].电力系统保护与控制,2021,49(17):139-146.
YAN Yunsong,SUN Ning,ZHANG Nan,et al. Evaluation of unavailability risk of the security and stability control system of power systems based on optimization of the preventive maintenance period[J]. Power System Protection and Control,2021,49(17):139-146.
- [10] 傅晨钊,李红雷,张振鹏,等.土壤直埋单根电缆暂态温升热路模型的验证试验[J].高压电器,2021,57(2):159-165.
FU Chenzhao,LI Honglei,ZHANG Zhenpeng,et al. Verification test for thermal circuit model of transient temperature rise of soil direct buried single cable[J]. High Voltage Apparatus,2021,57(2):159-165.
- [11] 官国飞,宋庆武,刘恢,等.基于边缘计算的配网管理和运维体系研究[J].电网与清洁能源,2020,36(10):90-96.
GUAN Guofei,SONG Qingwu,LIU Hui,et al. Research on distribution network management and operation and maintenance system based on edge computing[J]. Power System and Clean Energy,2020,36(10):90-96.