

DOI:10.20033/j.1003-7241.(2026)02-0133-05

基于负荷预测和K均值聚类的农村配电变压器位置优化

马占青, 马国立, 尤索夫, 晁孝正, 高旭

(国网青海省电力公司海东供电公司, 青海海东 810600)

摘要: 受到农村电力需求急剧增长, 但电网运行效率低下的影响, 在设计农村配置变压器配置方法时, 通常会出现因电网负荷区域划分不准确的问题, 导致优化性能差。对此, 提出基于负荷预测的K均值聚类的农村配电网变压器位置优化方法。根据采集的农村配电网运行数据, 计算自回归系数, 构建配电网节点的负荷预测模型。利用K均值聚类算法, 结合计算的节点负荷预测值。先计算数据点到初始聚类中心的距离, 再对初始聚类中心进行更新, 由此划分配电网的负荷区域。以变压器位置优化最小成本和线路最小损耗为目标, 设定多目标函数和相应的约束条件。构建变压器位置优化模型, 在整数规划的作用下建立求解函数。通过多次迭代, 对优化模型进行求解。实验结果表明, 该方法在实际应用配变利用率高达86.42%, 优化性能较好。

关键词: 负荷预测; K均值聚类; 农村配电网; 负荷区域; 优化模型

中图分类号: TP391; TM714.2

文献标志码: A

文章编号: 1003-7241(2026)02-0133-05

Optimization of rural distribution transformer location based on load forecasting and K-means clustering

MA Zhanqing, MA Guoli, YOU Suofu, CHAO Xiaozheng, GAO Xu

(Haidong Power Supply Company, State Grid Qinghai Electric Power Company, Haidong 810600, Qinghai, China)

Abstract: Due to the rapid increase in rural electricity demand and the low operational efficiency of the power grid, when designing transformer configuration methods for rural areas, there is often a problem of inaccurate division of power grid load areas, resulting in poor optimization performance. A method for optimizing the location of transformers in rural distribution networks based on load forecasting using K-means clustering is proposed. Based on the collected operational data of rural distribution networks, the method calculates the autoregressive coefficient and constructs a load forecasting model for distribution network nodes. Using the K-means clustering algorithm, combined with the calculated node load forecast values, First, it calculates the distance between the data points and the initial cluster center, and then updates the initial cluster center to divide the load area of the distribution network, sets multiple objective functions and corresponding constraints with the goal of minimizing the cost of optimizing transformer position and minimizing line losses, constructs a transformer position optimization model and establishes a solution function under the action of integer programming, solves the optimization model through multiple iterations. The experimental results show that this method has a high utilization rate of 86.42% in practical applications, with good optimization performance.

Keywords: load forecasting; K-means clustering; rural distribution network; load area; optimization the model

在当前乡村振兴战略的深入实施背景下, 农村电力需求的急剧增长。然而, 这一快速增长的电力需求与相对滞后的农村电网基础设施建设之间形成了鲜明对比, 尤其是电网运行效率普遍低下的问题日益凸显, 成为制约农村电力供应可靠性和经济性的关键因素。传统的电网规划与变压器配置方法往往基于历史数据或经验判断, 难以准确预测并适应快速变化的负荷需求, 特别是在负荷分布不均、季节性波动大的农村地区, 这一问题尤为突出。电网负荷区域的划分不准确是导致变压器配置不合理、运行效率低下的主要原因之一。不恰当的负荷分区不仅会造成

电力资源的浪费, 还可能引发局部过载、电压不稳等供电质量问题。因此, 探索一种能够科学预测负荷变化、精准划分负荷区域, 并据此优化变压器配置位置的方法, 对于提升农村配电网的供电能力、运行效率和经济效益具有重要意义。在该研究背景下, 国内外不少研究学者对此展开了研究, 并提出了自己的观点。彭林欣等提出了基于非线性分析的变压器位置优化方法^[1], 以最小化变压器运行成本为优化目标, 设定目标函数及约束条件, 收集配电网运行数据, 明确电网节点负载情况, 在非线性分析的基础上, 建立非线性优化模型, 利用梯度下降法, 对该优化模型进行迭代计算, 求出最优解。该方法是基于静态数据构建的

收稿日期: 2024-07-29; 录用日期: 2024-08-13

作者简介: 马占青(1996—), 男, 助理工程师, 研究方向: 电网规划、建设工作。

引用本文: 马占青, 马国立, 尤索夫, 等. 基于负荷预测和K均值聚类的农村配电变压器位置优化[J]. 自动化技术与应用, 2026, 45(2): 133-137. (MA Zhanqing, MA Guoli, Yousofu, et al. Optimization of rural distribution transformer location based on load forecasting and K-means clustering[J]. Techniques of Automation and Applications, 2026, 45(2): 133-137.)

优化模型,但配电网是一个动态系统,这会导致优化结果存在一定的偏差。刘乐等提出了基于龙伯格观测器的变压器位置优化方法^[2],先建立电力系统的数学模型,设计龙伯格观测器,先对电网状态进行实时估计,并构建实时状态矩阵,对电网状态进行实时分析,由此开发位置优化算法,再考虑变压器容量、负载分布等多个因素的情况,制定相应的位置优化方案。该方法需要将已有的变压器进行迁移,这个过程需要花费较多的时间成本和金钱成本,优化成本较高。王婧等提出了基于刚度最优区间的变压器位置优化方法^[3],先分析电力系统的整体情况,并建立变压器的运行状态模型,在有限元软件的分析下,计算变压器在位置下的刚度特性,确定变压器刚度达到最优的位置区间,由此实现对变压器位置的优化。该方法容易受到风载等因素的影响,导致其存在不确定性,从而影响最优结果的准确性。莫秋云等提出了基于 CFD 数值模拟和模型试验的变压器位置优化方法^[4],先建立变压器模型,利用 CFD 软件,对建立的模型进行网格划分,明确模型的边界和初始条件,并模拟变压器在不同位置下的流体流动和热传递情况,再评估变压器位置对系统性能的影响,由此实现对变压器位置的优化。该方法应用 CFD 数值模拟需要花费大量的计算资源和时间,导致方法的优化时间较长。

在以往研究的基础上,本文设计了基于负荷预测的 K 均值聚类的农村配电网变压器位置优化方法。本研究通过负荷预测和位置优化,可以更加合理地配置电力资源,减少不必要的电力损失,提高电网的整体运行效率,可以减少电网的维护和升级成本,降低电网的运行成本。同时,本研究可以确保在用电高峰时段电网的稳定运行,避免因供电不足而导致的停电事故,提高农村电网的供电能力和服务质量,为农村地区的经济发展提供有力支持。

1 优化方法设计

1.1 配电网负荷区域划分

利用传感器采集农村配电网的运行状态,对状态数据进行规范化处理,提高状态数据的质量。基于此,分析状态数据的特性,对电网节点负荷进行预测。在配电网各个节点进行负荷预测的过程中,需要先计算负荷预测模型的自回归系数^[5],再构建相应的模型。其自回归系数的计算过程为

$$p_i = \frac{\theta_b \cdot Z_t \cdot B_c \cdot f_x}{|K_c|} \quad (1)$$

式中, p_i 表示自回归系数, θ_b 表示配电网负荷数据的迁移算子, Z_t 表示状态数据的噪声序列, B_c 表示配电网节点的状态滞后参数, f_x 表示配电网节点的实际负荷值, K_c 表示配电网节点状态值。

再构建配电网节点负荷预测模型,确定配电网的负荷节点^[6]。其构建的负荷预测模型为

$$y_{t+h} = \kappa_z \sum_{i=1}^z p_i \cdot y_{t+h-i} + \sum_{j=1}^j q_j \cdot e_{t+h-j} \quad (2)$$

式中, y_{t+h} 表示配电网节点在 $t+h$ 时刻的负荷预测值, κ_z

表示最大似然估计参数, y_{t+h-i} 表示配电网节点在 $t+h-i$ 时刻的实际负荷值, q_j 表示移动平均系数, e_{t+h-j} 表示配电网节点在 $t+h-j$ 时刻的预测结果的残差项。

利用 K 均值聚类算法,结合式(2)计算的配电网节点负荷预测值,确定配电网的负荷区域。K 均值聚类算法作为一种应用较广的聚类算法,能够将数据集划分为多个簇^[7],并使得同一个簇内的数据点较为接近,不同簇内的数据点存在明显区别。利用该算法,能够有效划分配电网中不同负荷值的负荷区域^[8]。其具体分类过程如图 1 所示。

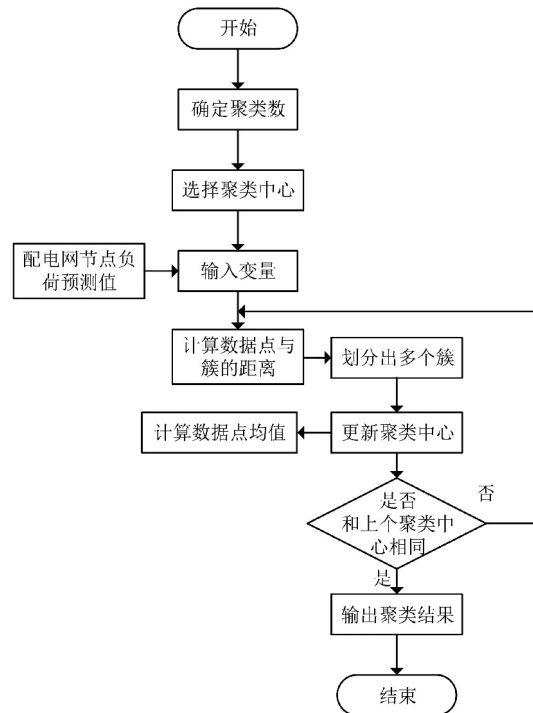


图 1 基于 K 均值聚类算法的配电网节点状态分类过程

Fig. 1 The process of distribution network node state classification based on K-means clustering algorithm

如图 1 所示,先确定聚类数,从数据集中随机抽取部分数据点作为数据中心。将式(2)计算出的节点负荷预测值作为初始数据点,先计算其到随机聚类中心的距离。并对比该数据点到不同数据中心的距离^[9],选择其中距离最小的数据点,将该数据点分配到该数据点所在簇中。重复上述过程,计算所有初始数据点到数据中心的距离,并将所有数据点的簇进行划分。完成上述操作后,对每个簇所有数据点的均值,确定新的聚类中心。通过多次迭代,直到数据中心不再发生改变^[10]。在该过程中,数据点到聚类中心距离的计算公式为

$$\begin{cases} y_{t+h} \rightarrow x_i \\ d(x_i, q_k) = \sqrt{\sum_{m=1}^M (x_{im} - q_{km})^2} \end{cases} \quad (3)$$

式中, $d(x_i, q_k)$ 表示数据点到聚类中心的距离, x_{im} 表示第 m 个初始数据点, q_{km} 表示第 m 个聚类中心, x_i 表示将配电网节点负荷预测值作为输入变量的数据点。

确定数据点所处的簇后,再对该簇的聚类中心进行更

新^[11]。其具体过程为

$$q_k^* = \frac{1}{|C_k|} \sum_i^{C_k} x_i \quad (4)$$

式中, q_k^* 表示第 k 个簇聚类中心的更新结果, C_k 表示第 k 个簇内所有数据点的集合。

若 q_k^* 不再发生改变, 则完成对电网负荷区域的划分。每个 q_k^* 值所在的簇均为该配电网的负荷区域, 以此为基础, 为后续构建变压器位置优化模型奠定基础。

1.2 模型构建

根据划分的负荷区域, 以变压器位置优化的最小成本和电网线路最小损耗为优化目标^[12], 设定目标函数。其设定的目标函数为

$$\begin{cases} F_b = \alpha_c(C_z + C_a + C_x) + \alpha_s S_h \\ C_a = \delta_f \sum_{j=1}^n (C_l^j + C_m^j) \\ C_x = \sum_i^{L_i} L_i \cdot C_i \\ S_h = \sum_i^{L_i} I_i \cdot 2R_i \cdot L_i \end{cases} \quad (5)$$

式中, F_b 表示变压器位置优化的目标函数, C_z 表示变压器自身的购买成本, C_a 表示变压器的迁移成本, C_x 表示基于变压器位置迁移的电网线路建设成本, S_h 表示配电网的损耗值, α_c 、 α_s 分别表示两个控制目标对应的权重参数, δ_f 表示迁移系数, C_l^j 表示正常电网节点所需变压器的迁移成本, C_m^j 表示负荷节点所需变压器的迁移成本, L_i 表示电网中线路的总长度, C_i 表示线路单位长度的建设成本, I_i 表示线路所能承载的电流, R_i 表示线路总电阻值。

结合式(2), 再设定相应的约束条件^[13-14]。其具体的约束条件为

$$\begin{cases} P_j \leq y_{i+h}^i \leq D_i \\ I_i^{\min} \leq I_i \leq I_i^{\max} \\ M_i^{\min} \leq M_i \leq M_i^{\max} \end{cases} \quad (6)$$

式中, y_{i+h}^i 表示电网节点的负荷预测值, P_j 表示负荷需求, D_i 表示电网最大输出功率, I_i^{\min} 、 I_i^{\max} 分别表示电网在运行过程中其线路所能承载的最小电流和最大电流, M_i 表示变压器容量, M_i^{\min} 、 M_i^{\max} 表示在该电网中, 变压器的最小容量和最大容量。

根据式(5)和式(6), 完成对变压器位置优化模型的构建。

1.3 模型求解

根据构建的变压器位置优化模型, 在考虑约束条件的基础上, 对其进行求解。在求解过程中, 设计一个求解函数, 先对目标函数进行初始求解^[15]。其求解函数的计算公式为

$$Q_t = \frac{z_k \cdot (\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \delta_4)}{k_p \cdot \vartheta_c \cdot l_i} \quad (7)$$

式中, Q_t 表示求解函数, z_k 表示迭代次数, δ_1 、 δ_2 、 δ_3 、 δ_4 分别表示设定的目标函数中, 不同变量的决策值, k_p 表示组

合参数, ϑ_c 表示更新参数, l_i 表示可行解遍历函数。

利用该求解函数, 对变压器位置优化模型进行多次求解。其具体求解结果为

$$F_b^* = \frac{Q_t(F_b)}{|r_b \cdot z_g \cdot g_c|} \quad (8)$$

式中, F_b^* 表示变压器位置优化模型的求解结果, r_b 表示变压器位置的稳定性参数, z_g 表示离散参数, g_c 表示变压器位置可变化量。

利用式(8), 进行多次迭代, 从而得到最终的求解结果, 实现对变压器位置的优化, 确保配电网的稳定运行。

2 实验测试

将本文设计的优化方法定义为方法1, 基于非线性分析的加肋板肋条位置无网格优化中的变压器位置优化方法定义为方法2, 基于龙伯格观测器的感应电机预设性能位置跟踪优化控制中的变压器位置优化方法定义为方法3, 设计对比实验, 分析三种方法在实际应用中的效果。

2.1 实验准备

以某农村配电网为研究对象, 该配电网电压等级为10 kV, 采用JKLYJ-10 kV-70 mm² 导线, 线路长度约为5 km。其电网的拓扑结构如图2所示。

如图2所示, 在配电网中, 存在多个变电站候选位置。在该配电网中, 变压器容量为630 kVA, 额定电压为10 kV, 短路阻抗为2.3%, 线路首端最大负荷电流约为36 A。此外, 设定所提方法的实验参数如表1所示。

表1 实验参数

Tab. 1 Experimental parameters

实验参数	参数设置	
K 均值聚类参数	聚类数	10
	迭代次数	50
后移算子 θ_b		0.45
节点状态滞后参数 B_c		0.27
最大似然估计参数 κ_z		0.36
移动平均系数 q_j		1.05

利用本文设计的方法对配电网的节点负荷进行预测, 统计部分电网节点负荷预测值。其具体统计结果如图3所示。

如图3所示, 根据节点负荷预测值的变化情况看, 节点2和节点3其节点负荷预测值变化趋势较为相近, 其可能处于同一负荷区域中。

将设计方法的优化结果与其余两种方法优化结果进行对比, 验证本文设计方法的性能。

2.2 实验结果讨论

利用三种方法对某配电网变压器位置进行优化, 统计优化后配电网的线损为评价指标, 对比三种方法的优化性能。其具体统计结果如表2所示。

如表2所示, 与优化前线路损耗相比, 方法1对变压器位置进行优化后, 有效降低了线路损耗。方法2和方法3虽然也降低线路损耗, 但其幅度并不高。因此, 本文方法在实际应用中优化性能较好。

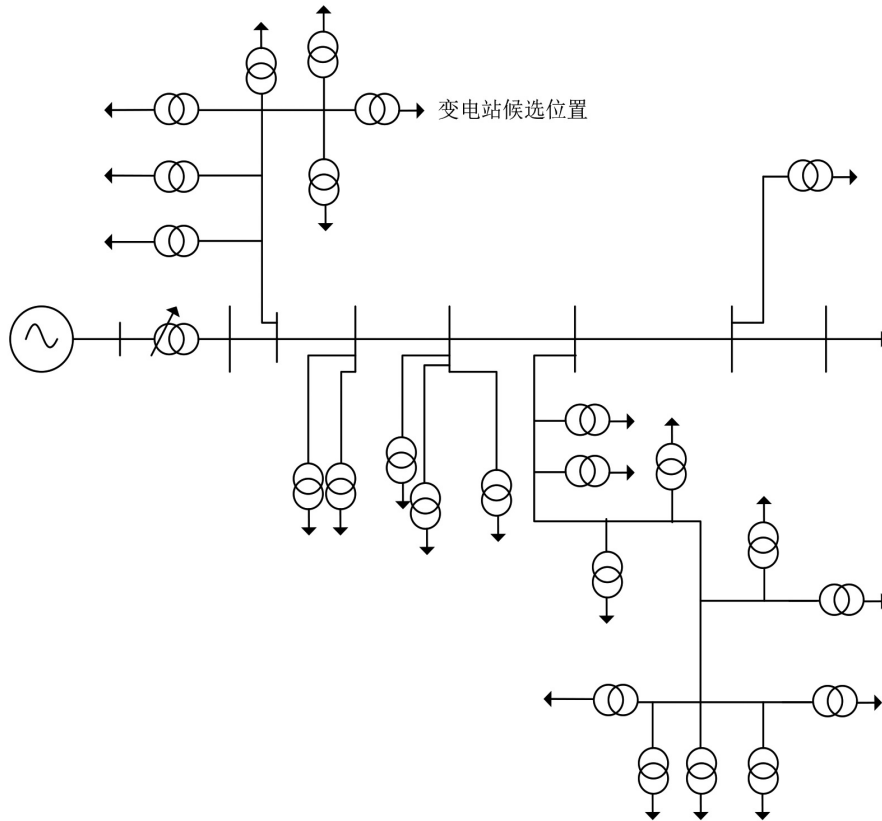


图2 配电网的拓扑结构

Fig. 2 Topology of distribution network

表2 三种方法的线损

Tab. 2 Line loss of the three methods

实验次数	线损/%			
	优化前	方法1	方法2	方法3
1	25.12	5.42	20.12	15.36
2	26.33	5.33	21.33	16.72
3	24.15	5.62	24.32	18.24
4	26.25	5.15	25.12	17.25
5	27.15	5.24	23.12	18.21
6	23.25	5.26	20.15	19.21
7	24.58	5.48	22.36	17.15
8	25.12	5.26	21.24	16.25
9	23.25	5.36	22.85	16.24
10	27.31	5.45	21.36	15.45

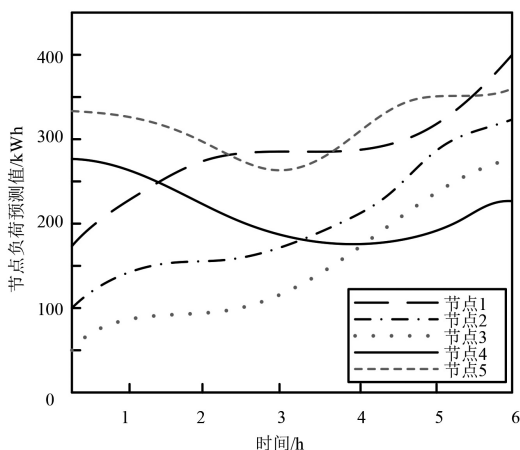


图3 部分电网节点负荷预测值变化

Fig. 3 Partial power grid node load prediction value change

为进一步验证上述三种方法在实际应用中的效果,以方法的配变利用率为评价指标,对比三种方法的优化性能。其具体优化结果如图4所示。

如图4所示,利用方法1优化后,其配变利用率较高,平均为86.42%,远高于其余两种方法。由此可见,其在实际应用中的优化性能更好。

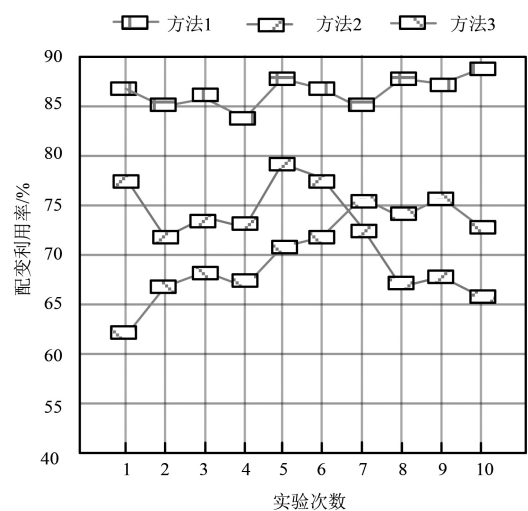


图4 三种方法的配变利用率

Fig. 4 Utilization of the configuration of the three methods

3 结论

所提出的基于负荷预测和K均值聚类的农村配电变压器位置优化方法,在应对农村电力需求急剧增长与电网

运行效率低下的问题上,取得显著成效。通过构建精准的负荷预测模型,结合K均值聚类算法对配电网负荷区域进行科学划分,有效解决了传统方法中负荷区域划分不准确的问题。在此基础上,以变压器位置优化最小成本和线路最小损耗为目标,构建并求解了变压器位置优化模型。实验结果表明,该方法在实际应用中,配电变压器的利用率高达86.42%,显示出优异的优化性能。这一研究成果不仅提升了农村配电网的运行效率和供电质量,减少了电力资源的浪费,还降低了电网的运营成本和维护难度,具有较高的推广应用价值。

参考文献

- [1] 彭林欣, 李知闲, 项嘉诚, 等. 基于非线性分析的加肋板肋条位置无网格优化[J]. 力学学报, 2022, 54(12):3366-3382.
- [2] 刘乐, 刘鹏, 王馨, 等. 基于龙伯格观测器的感应电机预设性能位置跟踪优化控制[J]. 控制理论与应用, 2023, 40(6):1043-1052.
- [3] 王婧, 潘志远, 赵义术, 等. 基于可再生能源的配电网电力调度优化模型研究[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(10):65-68,85.
- [4] 莫秋云, 刘艳艳, 郭荣滨, 等. 垂直轴风力发电机非定常流场分析及能量收集器位置优化[J]. 机械设计与研究, 2022, 38(6):186-190.
- [5] 刘效睿, 刘杨, 谭志勇, 等. 基于混沌优化算法的列车动力学模型参数辨识[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(6):5-9.
- [6] 刘燕德, 崔惠桢, 李斌, 等. 基于可见-近红外光谱技术的苹果糖度光照位置优化研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2022, 42(11):3373-3379.
- [7] 张万衡, 种小雷, 刘桂松, 等. 基于利用率和跑道占用时间的军用机场快速出口滑行道位置优化模型[J]. 交通信息与安全, 2022, 40(5):120-128.
- [8] 李永振, 方志伟, 鲁煜建, 等. 大型自然通风奶牛舍空气颗粒物浓度监测方法中测点数和位置优化[J]. 农业工程学报, 2023, 39(9):201-209.
- [9] 姚胜旺, 付海明, 王文锋, 等. 拱形地铁站厅火灾排烟口位置优化及补风方式研究[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2023, 49(3):122-129, 148.
- [10] 邢莹莹, 王朝兵, 王海龙, 等. 某型城市轨道交通车辆空调风道关键位置优化设计[J]. 铁道机车车辆, 2023, 43(2):168-172.
- [11] 吕正风, 李焯旭, 孙有政, 等. 某铝合金T型材双模孔反向挤压变形分析及模孔位置优化[J]. 锻压技术, 2023, 48(3):144-151.
- [12] 张付祥, 郑雨, 黄永建, 等. 成捆棒材贴标机器人系统部件空间位置优化[J]. 机械传动, 2022, 46(10):49-54, 129.
- [13] 苗思雨, 夏经德, 邵文权, 等. 基于铁磁特性虚拟相位在变压器保护中的研究[J]. 自动化仪表, 2023, 44(3):26-33.
- [14] 黄丹, 曹有霞, 刘单华, 等. 基于MBD技术的配电变压器潜在故障风险控制系统设计[J]. 自动化技术与应用, 2025, 44(6):38-41,55.
- [15] 宋平岗, 陈紫君, 魏文龙, 等. 单相电力电子变压器整流级复合无源控制[J]. 计算机仿真, 2024, 41(2):905-100.
- (上接第44页)
- [3] 李楠, 刘佳佳, 赖心怡, 等. 基于时间序列神经分层插值模型的光伏功率超短期多步预测[J]. 智慧电力, 2024, 52(4):69-77.
- [4] 黄牧涛, 邢芳菲, 陈兴邦, 等. 基于K-means聚类和极限学习机组合算法的短期光伏功率预测[J]. 水电能源科学, 2024, 42(2):217-220, 216.
- [5] 杨菁, 张欢, 张焯宇, 等. 基于双池化的多层感知机光功率预测方法[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(4):247-251, 261.
- [6] HUANG J, GUO W, WEI R, et al. Short-term power forecasting method for 5G photovoltaic base stations on non-sunny days based on SDN-integrated INGO-BP and RGAN [J]. IET Renewable Power Generation, 2024, 18(6):1019-1039.
- [7] 沙伟燕, 胡伟, 何宁辉, 等. 大规模虚拟储能平抑新能源功率预测误差优化调度方法[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(6):167-174.
- [8] 刘宇超, 高妍, 张红娟. 矿用带式输送机多目标参数协同优化控制储能方法[J]. 煤炭技术, 2024, 43(4):246-249.
- [9] 王新菊, 王小敏. 双重化PWM整流器自抗扰模型预测直接功率控制[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(7):45-56.
- [10] 薛邵锴, 秦文萍, 张东霞, 等. 基于模型数据混合驱动的大规模双馈风电场并网数字孪生建模[J]. 高电压技术, 2024, 50(3):1025-1033.
- [11] LIN W, ZHANG B, LU R. A novel hybrid deep learning model for photovoltaic power forecasting based on feature extraction and BiLSTM [J]. IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2024, 19(3):305-317.
- [12] TIAN C, LIN L, YAN Y, et al. Photovoltaic power prediction based on dilated causal convolutional network and stacked LSTM [J]. Mathematical Biosciences and Engineering: MBE, 2024, 21(1):1167-1185.
- [13] SHEN H, WANG L, DENG L, et al. Analysis of the effect of meteorological elements on new energy power prediction based on machine learning [J]. Recent Advances in Electrical & Electronic Engineering, 2024, 17(4):408-428.
- [14] 王斌, 王栓虎, 张文慧. 基于多时间尺度的风电场无功补偿装置协调控制研究[J]. 自动化技术与应用, 2025, 44(5):52-56.
- [15] 邢国新. 基于IPSO-Elman神经网络的建筑暖通空调系统能耗预测方法[J]. 自动化技术与应用, 2022, 41(4):91-94.