

基于改进的 RBF 神经网络的光储充一体化建筑优化模型的研究

郑志文¹, 王明晓², 曹春兰¹, 严圣标¹, 申超亚²

1. 中国华电集团有限公司福建分公司, 福州 福建 350000

2. 华电电力科学研究院有限公司, 杭州 浙江 310000

Research on Optimization Model of Integrated Photovoltaic Storage and Charging Building Based on Improved RBF Neural Network

ZHENG Zhiwen¹; WANG Mingxiao²; CAO Chunlan¹; YAN Shengbiao¹; SHEN Chaoya²

1. Fujian Branch of China Huadian Corporation LTD.Fuzhou, Fujian 350000

2. Huadian Electric Power Research Institute Co., LTD.Hangzhou, Zhejiang 310000

ABSTRACT: In order to respond to the national “double carbon” policy, the integrated photovoltaic storage and charging building has been constructed in many places. In this paper, an optimization method based on improved RBF neural network is proposed. By establishing a demand response model with the change of electricity price, and on the basis of this model, an optimization model based on the improved RBF neural network is established for the integration of photovoltaic storage and charging. The load curve obtained from the optimized model is compared with the original load curve, which obviously has the effect of “peak shaving and valley filling”: the peak value of the load decreases by 205.343kW, the minimum value of the load rises by 135.767kW, and the difference between peaks and valleys decreases by 341.11kW. The research results provide an important reference for the optimal operation of the integrated building.

KEY WORDS: optical storage and charging integration; genetic algorithm; RBF neural network; optimization model

摘要: 为了响应国家“双碳”政策,多地建设了光储充一体化建筑。本文提出了一种基于改进的 RBF 神经网络的优化方法。通过建立阶段电价变化的需求响应模型,并在此基础上建立基于改进的 RBF 神经网络的光储充一体化优化模型。优化后的模型所得到的负荷曲线通过与原始负荷曲线进行对比,明显起到了“削峰填谷”的效果:负荷峰值下降了 205.343kW,负荷的最小值上升了 135.767kW,峰谷差减少了 341.11kW。可知,本研究成果为光储充一体化建筑的优化运行思路提供了重要参考。

基金项目: 国家重点研发计划 (2023YFB2406400)。

Project Supported by National Key Research and Development Program of China (2023YFB2406400).

关键词: 光储充一体化; 遗传算法; RBF 神经网络; 优化模型

引言

光储充是光伏、储能和电动汽车充电桩的简写形式,同时光储充一体化则是这三个部分相互结合而形成的微网,具有并网运行和孤岛运行两种运行模式^[1-2]。同时,该系统可以接入大电网中,在系统光伏电能过剩时可向大电网售电,在系统中电能不足时可以从大电网中购电^[3]。由于国家“双碳”政策的提出^[4],多地区采用光储充一体化建设,实现了耦合增效,平滑了该区域的用电负荷^[5]。

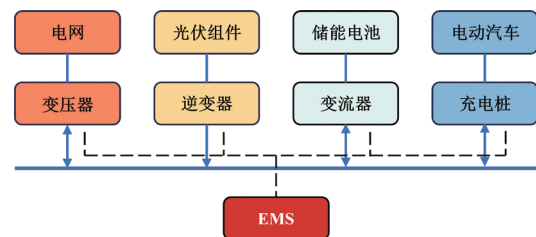


图1 光储充一体化系统结构图

Fig.1 Structural diagram of optical storage and charging integration system

当前,光储充一体化研究已经取得一些成果,文献^[6-7]提出了光储充一体化智能微电网工程应用关键技术,确定了光储充一体化建设的难点和重点;文献^[8-9]提出采用负反馈控制器的新型平滑切换运行方案、结合具体案例对微电网经济性进行建模分析;文献^[10-11]提出了用遗传算法求解的光储充一体化系统优化建模;文献^[12-14]提出了用粒子

群算法优化，起到“削峰填谷”的作用。

目前，光储充一体化优化建设仍然存在挑战，通过遗传算法优化神经网络，能够解决神经网络中参数未知，训练无目的性的问题^[15-16]。基于此，本文在对光储充一体化负荷优化模型建立的基础上，创新性的提出了遗传算法优化后的 RBF 神经网络，并与未经优化的系统进行对比，得到优化效果较好的结论。

1 算法介绍

1.1 RBF 神经网络

RBF 全称为 Radial Basis Function，RBF 神经网络即径向基函数神经网络。是基于 BP 神经网络改进而来一种算法，它是一种常用的三层前馈网络，既可用于函数逼近，也可用于模式分类。RBF 神经网络的特点是结构简单，学习速度快，具有优良的逼近性能^[17]。

RBF 神经网络的结构由如下三层组成：第一层为由系统输入组成的输入层；第二层为隐层，隐单元数则由系统的需要而定，隐单元的变换函数即为 RBF（径向基函数），其具有非负非线性；第三层则是对第二层神经元输出的线性组合。

RBF 神经网络的激活函数采用了径向基函数，可以对输入矢量进行变换，将低维的模式输入数据变换到高维空间内，使得在低维空间内的线性不可分问题在高维空间内线性可分。

本文所采用的径向基函数采用了高斯核，对应的激活函数表达式为：

$$R(X_p - c_i) = \exp\left(-\frac{\|X_p - c_i\|^2}{2\delta_i^2}\right), i = 1, 2, \dots, m \quad (1)$$

其中， X_p 代表网络的输入向量， c_i 代表高斯函数的中心， δ_i 是高斯函数的方差，决定着函数的宽度。

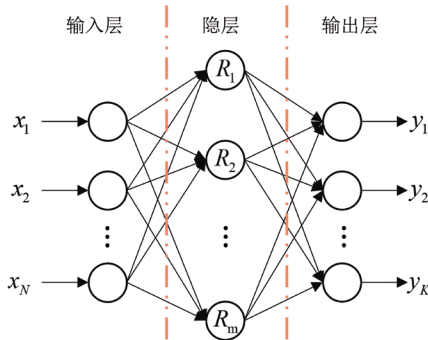


图 2 RBF 神经网络结构图

Fig.2 Diagram of RBF neural network structure

RBF 神经网络需注意设置以下参数：

1) 径向基函数的类型和数量：径向基函数是 RBF 神经网络的核心，它们的类型和数量会影响网络的性能。

2) 径向基函数的宽度：径向基函数的宽度决定了它们的覆盖范围，即对输入空间的哪些区域进行响应。宽度过大会导致网络过于平滑，逼近能力不足；宽度过小会导致网络过于敏感，容易过拟合。

3) 输出层权值的初始化：输出层权值的初始化会影响网络的收敛速度和性能。

4) 学习率和动量因子的设置：学习率决定了权值更新的步长，动量因子决定了权值更新的方向。

1.2 遗传算法优化的 RBF 神经网络

遗传算法是一种基于达尔文进化论的算法，它具有快速搜索性、潜在并行性、鲁棒性、随机性等突出优点，同时由于其具有很强的拓展性，能够和多种其他的方法相结合，在机器学习领域得到了极为广泛的应用。

遗传算法优化的 RBF 神经网络是一种结合了遗传算法和 BP 神经网络的预测方法，利用遗传算法优化 RBF 神经网络的相关参数，提高了 RBF 神经网络的预测精度和泛化能力。克服 RBF 神经网络容易陷入局部最优解、收敛速度慢、参数选择困难等问题。

遗传算法优化 RBF 神经网络的基本步骤如下^[18]：

1) 确定编码方式：

将 RBF 神经网络的参数（权值和阈值）编码成一个染色体，每个基因表示一个参数的取值。完成将该问题的可行解从其解空间转换到遗传算法的搜索空间的转换。

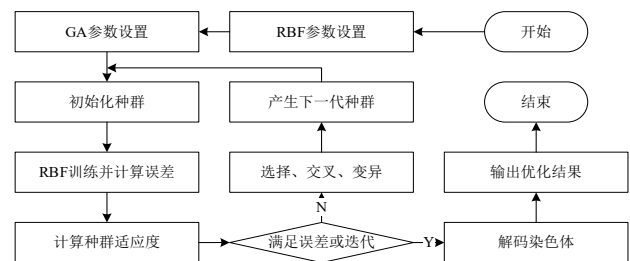


图 3 遗传算法优化的 RBF 神经网络流程图

Fig.3 Flowchart of RBF neural network optimized by genetic algorithm

在本文中采用二进制编码，具体解释如下：设某一参数的取值范围为 $[U_1, U_2]$ ，采用长度

为 k 的二进制编码符号来表示该参数, 则它共产生 2^k 种不同的编码, 可以使参数编码时的对应关系为:

$$U_i = U_1 + i \cdot \delta \quad (2)$$

其中:

$$\delta = \frac{U_2 - U_1}{2^{k-1}} \quad (3)$$

由上述二进制编码的解码公式为:

$$X = U_1 + \left(\sum_{i=1}^k b_i \cdot 2^{i-1} \right) \cdot \frac{U_2 - U_1}{2^{k-1}} \quad (4)$$

2) 初始化种群:

设置最大进化代数 T , 群体大小 M , 交叉概率 P_c , 变异概率 P_m , 随机生成 M 个个体作为初始化群体 P_0 。

3) 适应度值评估检测:

在对个体编码串进行解码处理后, 可得到个体的表现型, 并通过其计算出对应个体的目标函数值, 最后通过按一定的转换规则由目标函数值求出个体的适应度, 最终表明个体或解的优劣性。

4) 遗传算子:

遗传算法使用以下三种遗传算子: 选择算子、交叉算子和变异算子。其中, 若设种群数为 M , 个体 i 的适应度为 f_i , 则个体 i 被选取的选择概率为:

$$P_i = \frac{f_i}{\sum_{j=1}^M f_j} \quad (5)$$

5) 进化终止条件:

当达到最大进化代数或者找到满足要求的解时, 停止进化。最终得到 RBF 神经网络的相关参数。

2 光储充一体化负荷优化模型的建立

在系统中, 由于光伏出力具有随机性, 同时在考虑系统储能有限且放电能力有限的情况下, 系统可能会出现不能满足所有的负荷的需求而发生暂停运行的情况。

同时, 在光储充一体化的建筑中, 系统的运行费用在除去光伏系统和储能系统的运行费用后, 负荷的峰谷差为运行费用的决定性影响因素之一。故建立光储充一体化负荷优化模型, 达到“削峰填谷”的目的, 优化负荷曲线。

3 算例分析

下表所示为某地光储充一体化办公大楼未经优

化的原始负荷记录数据:

表 1 光储充一体化原始负荷记录数据
Tab.1 Raw Load Record Data for Photovoltaic Storage Charging Integration

时间	0:00	1:00	2:00	3:00
功率	468.28kW	429.46kW	424.36kW	478.51kW
时间	4:00	5:00	6:00	7:00
功率	478.67kW	462.54kW	482.36kW	493.91kW
时间	8:00	9:00	10:00	11:00
功率	733.24kW	1076.00kW	1212.13kW	1350.37kW
时间	12:00	13:00	14:00	15:00
功率	1507.56kW	1476.29kW	1378.68kW	1055.96kW
时间	16:00	17:00	18:00	19:00
功率	901.86kW	833.09kW	754.93kW	852.84kW
时间	20:00	21:00	22:00	23:00
功率	786.84kW	602.96kW	635.95kW	616.53kW

从上表中可以看出, 该办公大楼的日负荷峰值出现在 12 点左右, 低谷时刻出现在凌晨 3 点左右, 一天内负荷的最大值为 1507.556kW, 最小值为 424.356kW, 一天内的峰谷差为 1083.199kW。

已知电价“峰-谷-平”时间段如下表所示:

表 2 “峰-谷-平”时间段
Tab.2 “Peak-trough-flat”time periods

峰谷时段	时间段
高峰时段	8:00-14:00 18:00-22:00
平时段	14:00-18:00 22:00-0:00
低谷时段	0:00-8:00

假设实施峰谷分时电价前的实际电价为 0.48 元/kWh, 同时采用电量电价弹性矩阵 $M^{[19]}$:

$$M = \begin{bmatrix} -0.0870 & 0.0502 & 0.0201 \\ 0.0912 & -0.0526 & 0.0201 \\ 0.0915 & 0.0528 & -0.0201 \end{bmatrix} \quad (6)$$

采用遗传算法改进的 RBF 神经网络对模型进行求解^[20-21]。设种群个数设为 $M=200$, 最大遗传代数为 $T=1000$, 交叉率 $P_c=0.85$, 变异率 $P_m=0.05$, 比例系数 $P_f=0.25$; 同时, 设置 RBF 神经网络的最大迭代次数为 200, 学习率为 0.1^[22-23]。通过训练, 选取目标函数最小值为最终结果, 得到该区域各时段的分时电价具体方案如下表所示:

表3 分时电价具体方案

Tab.3 Specific programs for time-of-use tariffs

分时时段	高峰电价	平时段电价	低谷电价
电价 (元 /kWh)	0.684	0.468	0.307

日负荷曲线优化结果如下图所示：

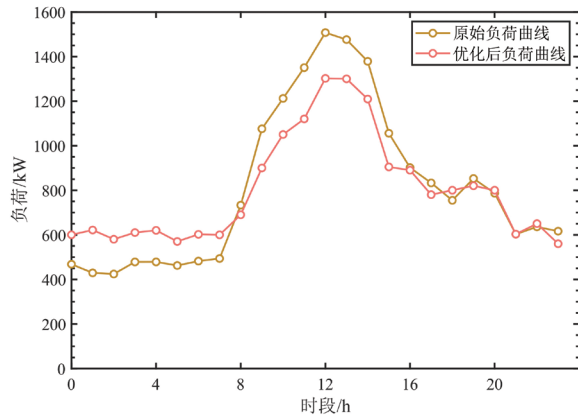


图4 日负荷曲线优化结果对比图

Fig.4 Diagram of Comparison of optimization results of daily load curve

由图中的相关信息可知：优化后的负荷曲线相较于原始曲线明显趋势变缓。同时在中午12点附近的用电高峰时段负荷有所降低，夜间和凌晨的用电负荷有所增加。优化后的负荷峰值为1302.213kW，最小值为560.123kW，峰谷差为742.089kW。为直观对比，结果展示于下表中：

表4 优化负荷趋势对比

Tab.4 Optimized Load Trend Comparison

对比分类	原始曲线 (kW)	优化后的曲线 (kW)
最大负荷	1507.556	1302.213
最小负荷	424.356	560.123
负荷峰谷差	1083.199	742.089

从表中的结果可以得出：经过分时电价需求响应后优化的负荷曲线得到了明显的改善，“削峰填谷”的效果非常明显。

综上所述，在光储充一体化系统中设置分时电价，可以使得系统中的负荷曲线得到优化。

4 结语

对光储充一体化系统内采用分时电价需求的响应能够有效的优化该系统的负荷曲线，完成了“削峰填谷”的效果。

引入遗传算法优化的 RBF 神经网络，以优化系统负荷为目标，建立了以分时电价为目标，每个阶段电价变化的需求响应模型。

最后进行算例分析，求解得到：负荷峰值下降了205.343kW，负荷的最小值上升了135.767kW，峰谷差减少了341.11kW，优化效果明显。

参考文献

- [1] 汲国强, 吴姗姗, 谭显东, 等. 2021年我国电力供需形势分析及展望 [J]. 发电技术, 2021, 42(5): 568-575.
JI G G, WU S S, TAN X D, et al. Analysis and Prospect of China's Power Supply and Demand Situation in 2021[J]. Power Generation Technology, 2021, 42(5): 568-575.
- [2] 高骞, 杨俊义, 洪宇, 等. 新型电力系统背景下电网发展业务数字化转型架构及路径研究 [J]. 发电技术, 2022, 43(6): 851-859.
GAO Q, YANG J Y, HONG Yu, et al. Research on Digital Transformation Architecture and Path of Power Grid Development Planning Business Under New Power System Blueprint [J]. Power Generation Technology, 2022, 43(6): 851-859.
- [3] 王守相, 何汝训, 张春雨, 等. 基于 FPGA 实时仿真的光储独立直流微电网协调控制策略 [J]. 电力建设, 2023, 44(4): 94-102.
WANG S X, HE R X, ZHANG C Y, et al. Cooperative control strategy based on FPGA real-time simulation for PV-ESS independent DC microgrid[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(4): 94-102.
- [4] 朱法华, 王玉山, 徐振, 等. 中国电力行业碳达峰、碳中和的发展路径研究 [J]. 电力科技与环保, 2021, 37(03): 9-16.
ZHU F H, WANG Y S, XU Z, et al. Research on the development path of carbon peak and carbon neutrality in China's Power Industry[J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2021, 37(03): 9-16.
- [5] 康俊杰, 赵春阳, 周国鹏, 赵良. 风光水火储多能互补示范项目发展现状及实施路径研究 [J]. 发电技术, 2023, 44(3): 407-416.
KANG J J, ZHAO C Y, ZHOU G P, ZHAO L. Research on Development Status and Implementation Path of Wind-Solar-Water-Thermal-Energy Storage Multi-Energy Complementary Demonstration Project [J]. Power Generation Technology, 2023, 44(3): 407-416.
- [6] 赵晶晶, 张宇, 杜明, 等. 基于模型预测控制的新型电力系统光储电站调频控制策略 [J]. 电力建设, 2022, 43(11): 99-107.

- ZHAO J J, ZHANG Y, DU M, et al. Frequency regulation control strategy based on model predictive control for combined PV and energy storage power station in new power system[J]. *Electric Power Construction*, 2022, 43(11): 99–107.
- [7] 胡清伟, 李星苇, 周昊. 光储充一体化智能微电网工程应用关键技术 [J]. *机电设备*, 2023,40(05):35–38.
- Hu Q W, Li X W, Zhou H. Key technologies for engineering application of optical storage and charging integrated smart microgrid[J]. *Electromechanical equipment*, 2023,40(05):35–38.
- [8] 张云龙, 康慨, 缪翼军等. 园区光储充微电网典型方案及运行模式研究 [J]. *电气技术与经济*, 2023(06): 8–11.
- Zhang Y L, Kang C, Miao Y J, et al. Research on typical scheme and operation mode of PV-storage-charging microgrid in park [J]. *Electrical technology and economy*, 2023 (06):8–11.
- [9] 陈宜, 徐英新, 徐东杰, 等. 终端型多能互补系统的最优配置与性能分析 [J]. *发电技术*, 2022,43(6):823–833.
- CHEN Yi, XU Y X, XU D J, et al. Optimal Configuration and Performance Analysis of Terminal Multi-energy Complementary System[J]. *Power Generation Technology*, 2022, 43(6):823–833.
- [10] 蒋甜甜. 基于需求响应的光储充一体化系统多目标优化运行研究 [D]. 郑州大学, 2021.
- Jiang T T. Research on multi-objective optimization operation of optical storage and charging integrated system based on demand response [D]. Zhengzhou University, 2021.
- [11] 赵明哲, 刘亚丽, 张国庆. 基于能源互联的分布式供能网络多目标优化 [J]. *电力科技与环保*, 2021, 37(06): 40–50.
- ZHAO M Z, LIU Y L, ZHANG G Q. Multi - objective optimization of distributed energy system based on energy interconnection[J]. *Electric Power Technology and Environmental Protection*, 2021, 37(06): 40–50.
- [12] 亢猛, 钟祎勃, 石鑫, 等. 计及负荷供给可靠性的园区综合能源系统两阶段优化方法研究 [J]. *发电技术*, 2023,44(1):25–35.
- KANG M, ZHONG Y Q, SHI X, et al. Research on Two-stage Optimization Approach of Community Integrated Energy System Considering Load Supply Reliability[J]. *Power Generation Technology*, 2023, 44(1):25–35.
- [13] 王萍萍, 许建中, 闫庆友, 等. 计及灵活性负荷资源需求响应和不确定性的楼宇微网调度双层优化模型 [J]. *电力建设*, 2022, 43(6): 128–140.
- WANG P P, XU J Z, YAN Q Y, et al. A two-level scheduling optimization model for building microgrids considering demand response and uncertainties of flexible load resources[J]. *Electric Power Construction*, 2022, 43(6): 128–140.
- [14] 孟令卓超, 杨锡运, 赵泽宇. 考虑光-荷不确定性和旋转备用约束的主动配电网经济优化调度策略 [J]. *电力建设*, 2022, 43(11): 63–72.
- MENG L Z C, YANG X Y, ZHAO Z Y. An economic optimal dispatch strategy for active distribution networks considering photovoltaic-load uncertainty and rotating reserve constraints[J]. *Electric Power Construction*, 2022, 43(11): 63–72.
- [15] 张敏, 祗会强, 张世锋, 等. 考虑配电网电能质量改善的分布式光伏优化调度方法 [J]. *电力建设*, 2022, 43(10): 147–157.
- ZHANG M, ZHI H Q, ZHANG S F, et al. Optimal scheduling method for distributed photovoltaic generation in distribution network considering power quality improvement[J]. *Electric Power Construction*, 2022, 43(10): 147–157.
- [16] 张尧翔, 刘文颖, 庞清仑, 等. 计及综合需求响应参与消纳受阻新能源的多时间尺度优化调度策略 [J]. *电力建设*, 2023, 44(1): 1–11.
- ZHANG Y X, LIU W Y, PANG Q L, et al. Multi-timescale trading strategies for the participation of multi-energy demand response in the consumption of blocked new energy sources[J]. *Electric Power Construction*, 2023, 44(1): 1–11.
- [17] 徐熊飞, 周晓华, 杨艺兴. 改进CS优化RBF神经网络的汽车热舒适性预测 [J]. *广西科技大学学报*, 2023, 34(04): 111–116.
- Xu X F, Zhou X H, Yang Y X. Prediction of vehicle thermal comfort based on improved CS optimized RBF neural network[J]. *Journal of Guangxi University of Science and Technology*, 2023,34 (04):111–116.
- [18] 冯旭刚, 黄鹏辉, 张泽辰等. 基于GA-模糊RBF的发电机组滑模自抗扰控制 [J]. *仪器仪表学报*, 2023,(8): 319–328.
- Feng X G, Huang P H, Zhang Z C, et al. Sliding mode active disturbance rejection control of generator set based on GA-fuzzy RBF [J]. *Instruments Journal*, 2023, (8):319–328.
- [19] 罗玮, 平博宇, 崔青汝, 等. 基于精准能量平衡与预

- 测控制的协调控制系统优化 [J]. 电力科技与环保, 2019, 35(2): 56-59.
- LUO W, PING B Y, CUI Q R, et al. Optimization of coordinated control system based on precise energy balance and predictive control[J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2019, 35(2): 56-59.
- [20] 王瑞, 王东, 李健, 等. 研究考虑需求响应的多能流系统两级协调优化 [J]. 电力科技与环保, 2022,38(6): 500-508.
- WANG R, WANG D, LI J, et al. Two-level optimal operation model of multi-energy carriers system considering demand response[J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2022, 38(6): 500-508.
- [21] 周楠, 樊玮, 刘念等. 基于需求响应的光伏微网储能系统多目标容量优化配置 [J]. 电网技术, 2016, 040(006): 1711-1718..
- Zhou N, Fan W, Liu N, et al. Multi-objective capacity optimization configuration of photovoltaic microgrid energy storage system based on demand response [J]. Grid technology, 2016, 040(006): 1711-1718..
- [22] 朱润泽, 王德军. 基于 LSTM 神经网络的光伏系统功率预测 [J]. 电力科技与环保, 2023,39(3): 201-206.
- ZHU R Z, WANG D J. Power prediction of photovoltaic system based on LSTM neural network[J]. Electric Power Technology and Environmental Protection , 2023, 39(3): 201-206.
- [23] 封啸. 光储充一体化直流微电网能量协调控制研究 [D]. 宁夏大学, 2023.
- FENG X. Study on energy coordinated control of DC microgrid integrated with optical storage and charging [D]. Ningxia University, 2023.



郑志文

作者简介:

第一作者: 郑志文 (1969), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为热能工程和信息技术。E-mail: 195498097@qq.com。

通讯作者: 王明晓 (1986), 男, 博士, 工程师, 研究方向为综合能源系统集成与运行优化。E-mail: wmxgood@126.com