

DOI:10.20033/j.1003-7241.(2026)06-0098-05

考虑柔性负荷与节点可靠性需求的电网多参数规划方法

张艳¹, 左雅¹, 李香平¹, 郑伟东²

(1. 国网新疆电力有限公司, 乌鲁木齐 830000; 2. 国网新疆经研院, 乌鲁木齐 830000)

摘要: 电网多参数规划多采用故障树分析方法, 忽略电网运行风险的影响, 导致参数规划效果较差。为此, 提出考虑柔性负荷与节点可靠性需求的电网多参数规划方法。明确电网规划的目标与需求, 通过预测电力负荷为构建电网参数规划模型; 以系统运行成本最小为目标, 将负荷叠加约束、储能装置约束与节点可靠性约束拟合到模型中, 形成综合参数规划模型; 采用改进混合差分进化算法, 通过编码、变异交叉、约束筛选、适应度计算及混沌搜索等步骤, 实现考虑柔性负荷与节点可靠性需求的电网多参数规划。实验结果表明, 在不同运行时间下, 所提方法的系统减载百分比始终控制在60%以上; 在不同置信度条件下, 其运行成本均低于多目标协同优化算法与改进蚁群算法, 表现出更优的经济性。该方法能够有效降低电网运行成本, 提升电网运行的经济性与规划效果, 为电网多参数规划提供方案。

关键词: 柔性负荷; 节点可靠性; 电网系统; 参数规划; 改进混合差分进化算法

中图分类号: TP18; TN715

文献标志码: A

文章编号: 1003-7241(2026)06-0098-05

Multi parameter planning method for power grid considering flexible load and node reliability requirements

Zhang Yan¹, Zuo Ya¹, Li Xiangping¹, Zheng Weidong²

(1. State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830000, China;

2. State Grid Xinjiang Economic Research Institute, Urumqi 830000, China)

Abstract: The multi-parameter planning of power grids mostly adopts the fault tree analysis method, which ignores the influence of power grid operation risks, resulting in poor planning effects. Therefore, a multi-parameter planning method for power grids considering flexible loads and node reliability requirements is proposed. The goals and demands of power grid planning are clarified, and a power grid parameter planning model is constructed by predicting power loads; with the objective of minimizing system operation costs, load superposition constraints, energy storage device constraints, and node reliability constraints are fitted into the model to form a comprehensive parameter planning model; an improved hybrid differential evolution algorithm is adopted, through steps such as encoding, mutation crossover, constraint screening, fitness calculation, and chaotic search, to achieve multi-parameter planning of power grids considering flexible loads and node reliability requirements. Experimental results show that under different operation times, the percentage of system load reduction is always above 60%; under different confidence levels, its operation costs are lower than those of the multi-objective collaborative optimization algorithm and the improved ant colony algorithm, demonstrating better economic performance. This method can effectively reduce the operation cost of power grids, improve the economic efficiency and planning effect of power grids, and provide a solution for multi-parameter planning of power grids.

Keywords: flexible load; node reliability; power grid system; parameter planning; improved hybrid differential evolution algorithm

随着能源结构的转变和电力市场的逐步开放, 电网规划面临着越来越多的挑战。一方面, 柔性负荷的兴起导致电力需求的动态变化; 另一方面, 电网节点的可靠性要求也在不断提高, 以确保电力供应的稳定性和安全性^[1]。在这种背景下, 传统的电网规划方法已无法满足现代电网的发展需求。传统的电网规划方法主要关注电网的结构设计和运行优化, 而忽略了柔性负载和节点可靠性对电网规划的影响。导致电网规划与实际运营需求之间存在重大

偏差, 难以应对电力市场的快速变化。因此, 研究电网多参数规划方法具有重要的现实意义和紧迫性。

孙树文等^[2]通过采集系统在各种工况下的运行数据, 基于这些数据和热力学原理, 建立系统运行特性模型, 在模型的基础上, 对系统参数进行进一步的研究和优化。该方法通过建立详细的热特性模型, 可以更准确地预测和分析系统在不同工作条件下的热行为, 使得规划结果的精度较高。但建模热特性和优化冷却系统参数涉及多个因素

收稿日期: 2024-08-07; 录用日期: 2025-02-10

基金项目: 新疆国网新疆电力科技项目(SGXJY00SJS2100028)

作者简介: 张艳(1975—), 女, 高级工程师, 研究方向: 电力系统分析及投资管理。

引用本文: 张艳, 左雅, 李香平, 等. 考虑柔性负荷与节点可靠性需求的电网多参数规划方法[J]. 自动化技术与应用, 2026, 45(6): 98-101, 158. (Zhang Yan, Zuo Ya, Li Xiangping, et al. Multi parameter planning method for power grid considering flexible load and node reliability requirements[J]. Techniques of Automation and Applications, 2026, 45(6): 98-101, 158.)

和变量,使整个研究过程相对复杂。于静梅等^[3]建立相变储能箱和太阳能空气源热泵供暖系统的数学模型,并分析影响系统性能的关键参数,选择合适的优化算法,找到最优的参数组合。这种方法适用于不同类型的系统,具有很强的灵活性。但优化结果主要基于短期模拟和实验,长期性能的检测不确定性相对较高。Zhang等^[4]根据能源需求和可再生能源资源,确定系统的规模和组成,通过对系统运行数据的实时监测和分析,优化系统的运行策略。该方法能够通过互补效应提高能源供应的稳定性和可靠性。但水电和光伏设备的集成和管理需要高水平的技术熟练度,导致实际应用比较受限。Perumal等^[5]通过收集系统的运行数据,了解系统的运行状态和性能,根据数据分析结果,对系统进行参数规划。该方法通过降低峰值负荷,可以降低电力系统的运行和维护成本,提高经济效益。然

而,虽然从长远来看其具有一定的经济效益,但初始投资成本可能很高,这限制了它在一些地区的推广和应用。

基于以上分析,本研究旨在探索如何在电网规划中综合考虑柔性负荷和节点可靠性的要求,建立多参数优化模型。通过该模型,可以更全面地分析电网的运行状态和性能,为电网规划提供更准确、科学的决策依据。

1 电网多参数规划方法设计

1.1 考虑电力负荷预测

电网多参数规划旨在确保电网的安全性、经济性和可靠性等方面得到最优化的解决方案。首先需要明确电网规划的目标与需求,通过预测电力负荷为构建电网参数规划模型提供数据基础。

本文以智能电网为研究算例,其基本结构如图1所示。

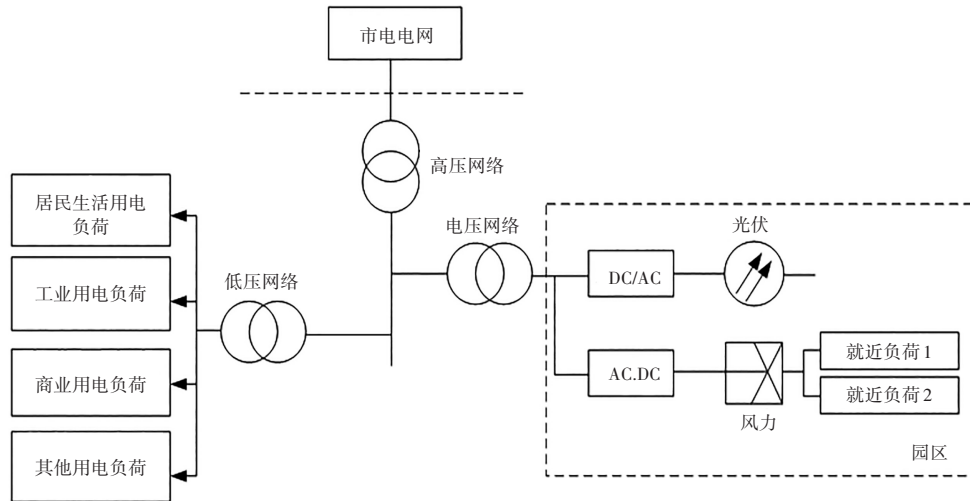


图1 智能电网基本结构

Fig. 1 Basic structure of smart grid

图1中,智能电网的中压网络包括光伏发电系统和风力发电系统,当电网负荷功率增加时,分布式储能和系统的频率都会发生变化^[6],则机组空载运行与额定条件运行时的频率差为

$$f_{\Delta} = a_0 \frac{f_1 - f_2}{f_x} \quad (1)$$

式中, f_1 、 f_2 分别表示分布式储能和系统的调差系数; f_x 表示固有频率; a_0 表示白化系数。

基于上式,可计算得到系统参与一次调频所需的备用容量为

$$P_h = f_{\Delta} \times \alpha_1 \sqrt{\frac{h_0}{g_s}} \quad (2)$$

式中, α_1 表示系统阻尼比; h_0 表示关键节点的电压跌落系数; g_s 表示控制线路潮流的功率因数。

通过光伏、风力等分布式电源的应用,可以在电网系统故障停电时提供备用电力,有效缩短负荷的供电时间,从而减小负荷停电损失^[7-8]。因此,结合园区电量不足期望值计算电网运行风险,表达式为

$$E_s = \sum P_h T_0 \parallel \frac{s_0}{k_p} \parallel^2 \quad (3)$$

式中, T_0 表示电网出现故障的概率; s_0 表示故障状态的持续时间; k_p 表示系统中负荷节点的个数。

由此可计算得到在故障状态下负荷的水平与削减量^[9],表达式为

$$\begin{cases} h_i = E_s \times \kappa_i / A_q \\ J_c = \sum \frac{h_i}{|z_x|} \end{cases} \quad (4)$$

式中, κ_i 表示采样间隔; A_q 表示系数矩阵; z_x 表示等长的时间步; h_i 、 J_c 分别表示负荷水平和负荷削减量。

进而采用下式预测电网系统的实际净负荷,即

$$Q_p = J_c s_w c_k \quad (5)$$

式中, s_w 表示分布式电源融合特征的嵌入式向量; c_k 表示储能系统的实际出力。

依据智能电网的基本组成结构,计算电网在运行过程中的风险,结合负荷水平与负荷削减量,对系统的负荷进行预测,为建立电网参数规划模型作准备。

1.2 参数规划模型建立

针对电网多参数规划问题,本文通过协调系统中分布式储能的容量与系统经济性的关系,充分考虑柔性负荷和节点可靠性需求,建立电网参数规划模型。因此,在电网频率稳定的基础上实现系统的经济性最优,则设置的目标函数表达式

$$\min W = w_1 + w_2 + w_3 \quad (6)$$

式中, w_1 、 w_2 、 w_3 分别表示光伏系统、风电机组和储能的运行成本; W 表示电网系统的总运行成本。 w_1 、 w_2 、 w_3 的计算公式为

$$\begin{cases} w_1 = \frac{x_t}{h_p \cdot R} \\ w_2 = \sum \sqrt{\frac{c_v}{m_0 \times \lambda_0}}^2 \\ w_3 = Q_p \sum_{j=1}^m e_s / C_k \end{cases} \quad (7)$$

式中, x_t 表示节点 t 的电压幅值; h_p 表示并联母线输出的交流信号; R 表示转换函数; c_v 表示系统电压稳定水平系数; m_0 表示权重系数; λ_0 表示暂态功角稳定性因子; Q_p 表示系统净负荷; m 表示系统支路数量; e_s 表示功率平衡系数; C_k 表示逆矩阵。

为保证建立的电网多参数规划模型能够得到最优的求解策略,对上述模型进行条件约束,主要包括负荷叠加约束、储能装置约束和节点可靠性约束^[10],具体计算过程如下。

$$\begin{cases} r_d = \eta_k X_u / S_v \\ p_r = \sqrt{\frac{\gamma_v}{g_i n_j}} \\ q_m = \sum \frac{\pi_c}{L_k} \end{cases} \quad (8)$$

式中, η_k 表示可平移负荷量; X_u 表示可削减负荷响应量; S_v 表示削减速率; γ_v 表示储能装置剩余电量; g_i 表示储能系统的自放电率; n_j 表示放电效率; π_c 表示节点冗余度; L_k 表示节点预测能力函数; r_d 、 p_r 、 q_m 分别表示柔性负荷叠加量、储能系统容量和节点可靠性。

基于上式,将约束条件拟合到模型中,得到综合参数规划模型为

$$\min W' [r_d, p_r, q_m] = \omega_0 (w_1 + w_2 + w_3) \quad (9)$$

式中, ω_0 表示连接权重。

在电网负荷预测结果基础上,以电网运行经济性为目标建立参数规划模型,并考虑柔性负荷和节点可靠性约束,构建综合多参数规划模型,便于最终规划参数的确定。

1.3 确定电网规划参数

针对上述构建的电网多参数规划模型,本文采用改进混合差分进化算法对其进行求解,具体流程如图2所示。

基于上图可得到求解电网多参数规划模型的具体实施步骤如下。

1) 输入原始数据,包括网络拓扑结构、线路参数、储能系统的出力和电网负荷以及算法需要的控制参数^[11]。

2) 对电网中的 n' 条线路进行编码,每个线路集对应一个交叉个体^[12]。

3) 利用下式进行变异交叉操作,以生成一个新的种群。

$$M^r = V^G + F_u \cdot \quad (10)$$

式中, M^r 表示更新种群; V^G 表示第 G 代中随机采样的个体; F_u 表示缩放因子。

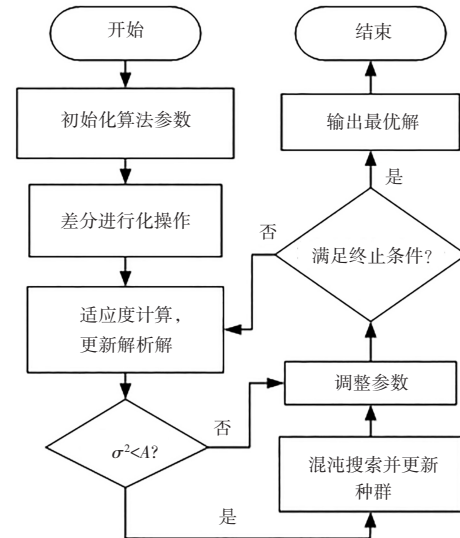


图2 电网多参数规划模型求解流程

Fig. 2 Solution process of the multi-parameter planning model for the power grid

4) 保留满足约束条件的个体,淘汰不满足约束条件的个体,并计算个体的适应度值^[13],即

$$o_r = M^r \times B_w \quad (11)$$

式中, B_w 表示最大交叉概率。

5) 计算适应度值的方差 σ^2 ,并将其与阈值 A 相比较,若 $\sigma^2 < A$,则对最优个体进行混沌搜索,否则进行下一步骤。

6) 根据差分进化代数调整算法参数,并判断当前算法是否满足终止条件,若是,则直接输出规划结果,若否,则重新更新解析解,并再次求取适应度值^[14-15]。至此,完成考虑柔性负荷与节点可靠性需求的电网多参数规划方法的设计。

2 实例论证分析

为验证本文设计的考虑柔性负荷与节点可靠性需求的电网多参数规划方法在实际应用中的效果,将柔性负荷与节点可靠性方法应用在某智能电网调度中,并对其进行多参数规划,根据实验结果分析该方法的规划效果。

2.1 实验准备

本次实验以某包含分布式电源的智能微电网为研究算例。该系统中配置了一定容量的储能装置,其拓扑结构如图3所示。

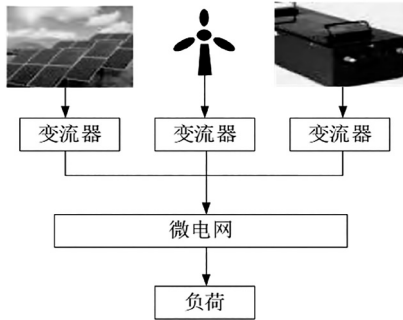


图 3 智能微电网结构
Fig. 3 Intelligent microgrid structure

该电网的基本运行参数如表 1 所示。

实验中采用配置 2 个 Intel Xeon Silver 4216 处理器、64 GB RAM 以及 1 TB SSD 和 2 TB HDD 存储的计算机作为服务器;采用配备 Intel Core i7-10700K 处理器、32 GB DDR4 内存和 NVIDIA GeForce RTX 3080 显卡的计算机作为工作站,用于数据分析和可视化;操作系统为 Ubuntu 20.04 LTS;使用 PSS/E 作为仿真建模软件,用于电网系统的建模和仿真,包括电源、负载、线路等;利用智能电表、传感器实时采集电网的各种参数数据;采用 Excel 预处理、清理和分析收集的数据。

表 1 微电网运行参数

Tab. 1 Operating parameters of microgrid

参数	统总 功率/kW	储能系统 容量/kWh	分布式电源 实际功率/kW	分布式电源 效率/%	负荷总功率/ kW	电网接入 电压/kV	微电网频率/ Hz	功率 因数	储能系统剩余 容量/kWh	储能系统充 放电功率/kW
数值	5 000	2 000	1 500	75	4 000	11	50	0.95	1 500	50/-30

实验将在上述配置的服务器和工作站上进行。服务器主要负责处理和存储大规模数据,工作站用于日常数据分析、模型训练和模拟实验。

根据实验要求,设置电网的节点数为 20、线路长度为 30 m、系统总容量为 5 000 kWh。电网中的常规负荷类型包括照明设备、电脑和电视等;柔性负荷类型为电动汽车、储能设备等。根据电网的供电可靠性标准,设置停电时间为 1h/年、停电频率为 1 次/年。

2.2 实验说明

根据文中所述方法对该电网的实际负荷进行预测,得到的结果如图 4 所示。

基于历史数据,对电网的农业负荷、商业负荷、工业负荷和居民负荷 4 种类型的负荷进行预测,并依据预测结果以电网运行成本最低为目标建立参数规划模型。设置改进混合差分进化算法的相关参数为:交叉因子为 0.7,变异因子为 0.5,差分权重为 0.02,选择策略采用贪婪选择。以上述设定的参数为基础,对构建的参数规划模型进行求解,以获取最优规划方案。

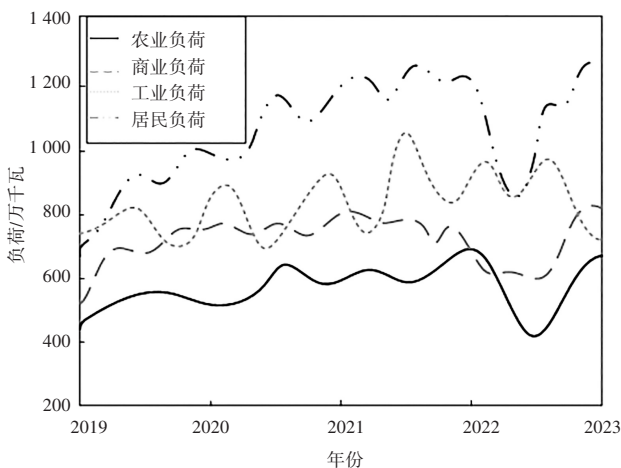


图 4 电网负荷预测结果
Fig. 4 Grid load forecasting results

2.3 电网多参数规划结果与分析

实验中引入多目标协同优化算法、改进蚁群算法作为柔性负荷与节点可靠性方法的对比方法。分别采用 3 种方法对该电网进行多参数规划,比较各种方法规划后的电网储能系统的减载百分比,减载百分比越低,说明储能系统的运行效率越高,电网的运行经济性越好。实验结果如图 5 所示。

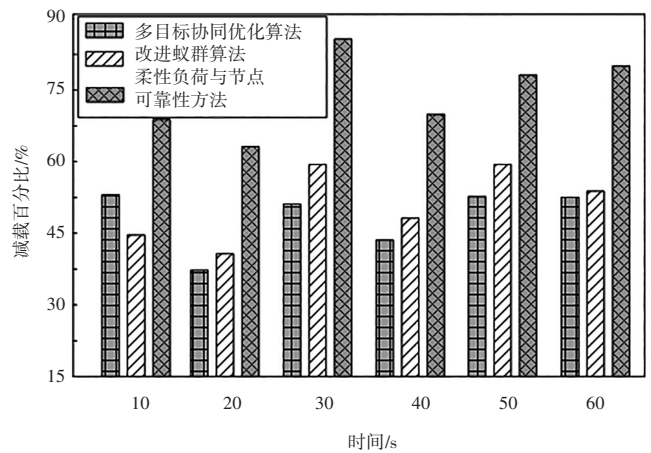


图 5 电网多参数规划结果

Fig. 5 Results of multi-parameter planning for power grid

由上图可以明显看出,在系统的不同运行时间条件下,应用柔性负荷与节点可靠性方法对电网进行多参数规划,得到的系统减载百分比显著高于对照组方法,在整个实验过程中,其减载率始终控制在 60% 以上。由此可以说明,柔性负荷与节点可靠性方法可以保证电网的经济性运行,规划效果较好。

2.4 对比实验与分析

为进一步验证柔性负荷与节点可靠性方法的有效性,在上述实验结果的基础上,统计不同规划方法后电网的运行成本,从而分析不同规划方法的应用性能,对比结果如表 2 所示。

(下转第 158 页)

据分类方法,并进行具体的研究分析。经过分类规则的生成、更新隶属度函数的过程,对计算得出的目标函数阈值,实现所有数据的模糊度量判定,完成有效数据分类。在保证分类精准度的同时还能提高分类效率。仿真实验证明,本文方法的分类效果较为优异,分类准确率较高、数据浓缩率较强,并且即使基于拓展因子的状态下分类精准度也未发生较大变化,可以实现有效的汉语文本数据分类。

参考文献

- [1] 苟和平, 景永霞, 韩强. 结合注意力机制的 BiLSTM 文本分类研究[J]. 洛阳理工学院学报(自然科学版), 2025, 35(4):82-87.
- [2] 赵旻, 刘凯, 鄢达铸, 等. 结合文本分类的业务自动化系统设计与应用[J]. 自动化技术与应用, 2025, 44(7):186-188.
- [3] 邓治文, 张龙健, 李锦辉, 等. 基于双通道和注意力机制的多特征融合的文本情感分类模型[J]. 软件工程, 2025, 28(12):1-5.
- [4] 张鸿彦. 基于特征聚类与降维的新闻文本智能分类算法[J]. 信息技术与信息化, 2024(4):106-109.
- [5] 文博, 高盛祥, 张勇丙. 基于注意力自适应迁移的零样本跨语言文本分类方法[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2025, 50(4):95-106.
- [6] 金晨曦, 韩坤. 基于多特征融合和数据增强的警情文本智能分类方法[J]. 智能计算机与应用, 2025, 15(12):88-93.
- [7] 徐胜超, 吕峻. 基于大语言模型的潜在语义文本分类技术[J]. 网络新媒体技术, 2025, 14(6):67-74.
- [8] 张鹏飞, 程俊, 张治坤, 等. 满足本地差分隐私的混合噪音感知的模糊 C 均值聚类算法[J]. 电子与信息学报, 2025, 47(3):739-757.
- [9] 赵凤萍, 韩党琴. 高敏感数据模糊 C 均值聚类方法优化仿真[J]. 计算机仿真, 2025, 42(6):363-367.
- [10] 张冬冬, 王静. 基于空间模糊 C 均值算法的 MRI 图像分割[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(6):15-18,59.
- [11] 刘辉舟, 倪妍妍, 齐红涛, 等. 基于特征识别与 FCM 的电力服务数据处理方法[J]. 电子设计工程, 2025, 33(2):72-76.
- [12] 田成诗, 袁宏俊, 相瑞兵. 基于联系数投影的三角模糊数组合预测模型及其应用[J]. 运筹与管理, 2024, 33(1):115-122.
- [13] 宋燕, 李元昊, 李明. 融合稀疏自表示和残差驱动的自适应模糊 C 均值聚类[J]. 控制与决策, 2024, 39(4):1333-1341.
- [14] 张妮, 杨阿庆, 韩立锋. 多源异构数据模糊 C 均值聚类挖掘方法仿真[J]. 计算机仿真, 2025, 42(4):347-351.
- [15] 吕侃, 陶奕, 顾捷飞, 等. 基于随机森林的中医电子病历数据分类系统设计[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(8):133-135.

(上接第 101 页)

表 2 电网运行成本对比结果

Tab. 2 Comparison results of grid operation costs

置信度/%	运行成本/万元		
	多目标协同优化算法	改进蚁群算法	柔性负荷与节点可靠性方法
10	66.12	56.23	45.23
20	69.78	54.78	35.69
30	70.21	69.47	36.12
40	58.46	55.07	41.02
50	59.07	57.42	39.52
60	63.72	63.50	33.41

分析上表中的数据可知,在系统不同置信度条件下,柔性负荷与节点可靠性方法应用下的电网运行成本远小于多目标协同优化算法和改进蚁群算法,说明柔性负荷与节点可靠性方法可以有效降低电网的运行成本,使得电网的运行经济性更高,电网参数规划性能更好。

3 结论

为解决传统方法在电网多参数规划中存在的不足,本文通过预测电网净负荷、建立参数规划模型,从而确定最佳规划参数,并通过实例应用证明了柔性负荷与节点可靠性方法的有效性。然而,该方法仍存在一些不足,如可再生能源的波动性,需要进一步改进和优化。因此,未来的研究可以集中在提高算法的效率和准确性以及增强对不确定性的鲁棒性等方面,以助于促进多参数规划方法在电网中的实际应用和发展。

参考文献

- [1] 张艳, 左雅, 韩立芝, 等. 计及多策略改进多目标遗传算法的电网

- 智能规划[J]. 自动化技术与应用, 2026, 45(1):41-45.
- [2] 孙树文, 高振涛, 乔云飞, 等. 高速电主轴热特性建模与冷却系统参数优化方法研究[J]. 制造技术与机床, 2023(10):90-97.
- [3] 于静梅, 赵广, 常云, 等. 相变储能箱耦合太阳能空气源热泵供热系统参数优化[J]. 热能动力工程, 2023, 38(8):141-150.
- [4] Zhang B, Qiu R, Liao Q, et al. Design and operation optimization of city-level off-grid hydro-photovoltaic complementary system [J]. Applied Energy, 2022(306):118000.
- [5] Perumal K M, Saibabu C, Satya G. Performance optimization of a Rooftop Hybridized Solar PV-AC Grid assisted power system for peak load management[J]. International Journal of Engineering Research and Applications, 2022, 30(12):120-126.
- [6] 文孝霞, 高爽, 杜子学, 等. 基于多目标协同优化算法的单轴式单轨车辆系统参数优化研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2023, 42(6):146-154.
- [7] 李胜男, 高源, 何廷一, 等. 新能源临界短路比对电网运行参数灵敏度分析方法[J]. 智慧电力, 2023, 51(5):96-102.
- [8] 冉秀敏, 韩玺江, 窦桑, 等. 基于变分模态分解联合注意力机制的电力负荷预测[J]. 自动化技术与应用, 2025, 44(11):57-60.
- [9] 徐鹏, 李铁柱, 职保平. 模拟 IC 设计中性能参数的几何规划法建模[J]. 核电子学与探测技术, 2023, 43(3):444-451.
- [10] 李煌, 葛红娟, 马莹等. 基于超平面 NSGA-II 的双输入双降压逆变器系统参数优化设计[J]. 浙江大学学报(工学版), 2023, 57(3):606-615.
- [11] 刘本学, 宋宇洋, 李霞, 等. 剪刀式高压隔离开关传动系统参数化设计[J]. 机械设计与制造, 2023(7):242-246.
- [12] 李雄, 陆家榆, 曹方圆, 等. 应对特高压直接地极电流影响的油气管道大功率阴保系统参数优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(6):2472-2483.
- [13] 王文新, 张珊, 秦超凡, 等. 基于风光气能源协同互补系统参数耦合研究[J]. 太阳能学报, 2023, 44(12):544-551.
- [14] 王勇, 王春生, 宋卓然, 等. 计及碳交易与柔性负荷的多能园区优化调度策略[J]. 电测与仪表, 2025, 62(10):54-64.
- [15] 李院霞, 梁栋, 杨晓茹, 等. 面向新能源接入的电网设备资源优化调度策略[J]. 自动化技术与应用, 2025, 44(9):49-53,78.