

[优化调度]

配电网接入大规模可再生能源的调度优化模型

文/王登峰¹ 李登淘² 孟祥敬³

1. 济南光明电力服务有限公司商河分公司；2. 济南鲁源电气集团有限公司三维分公司；3. 国网山东省电力公司商河县供电公司

针对可再生能源出力随机波动的特点，建立考虑光伏、风电等多类型分布式电源的配电网调度优化模型。该模型以最小化系统运行成本和能源消纳为目标，综合考虑电网运行约束、储能系统特性和负荷响应能力，构建基于概率预测的滚动优化框架。算例分析表明，所提模型能够有效提升可再生能源消纳水平，降低弃风弃光率，同时保障配电网安全稳定运行。

能源转型背景下，可再生能源在配电网中的渗透率不断提高，传统“源随荷动”的调度模式已难以适应新形势需求。可再生能源的间歇性、波动性给配电网安全经济运行带来严峻挑战。国内外学者围绕可再生能源并网展开了广泛研究，主要集中在预测技术、调度模型和优化算法等方面。然而，现有研究普遍存在模型过于理想化、计算复杂度高等问题，且较少考虑多时间尺度协调和多类型不确定性的耦合影响。为此，亟需建立更加完善的调度优化模型，以实现可再生能源的高效消纳和配电网的

协调发展。

调度优化模型构建

1. 目标函数设计

配电网接入大规模可再生能源的调度优化目标函数包含三个主要部分：经济性、环保性和安全性^[1]。经济性目标考虑系统总运行成本的最小化，涵盖常规发电机组的燃料成本、启停成本，储能系统的充放电成本以及向上级电网购电成本。目标函数可表示为

$$\min F = \sum [w_1 (\sum C_i(P_i) + \sum SU_i + SD_i) + w_2 \sum (P_{\text{rcurt}} + P_{\text{wcurt}}) + w_3 \sum (\Delta V^2 + \Delta P^2)] \quad (1)$$

式中， $C_i(P_i)$ 为发电成本函数， SU_i 和 SD_i 分别为机组的启停成本； P_{rcurt} 和 P_{wcurt} 分别为弃光和弃风功率； ΔV 和 ΔP 分别为电压和功率波动偏差； w_1 、 w_2 、 w_3 为权重系数。

目标函数采用线性加权法进行多目标综合，权重系数的选取基于层次分析法确定，并通过敏感性分析验证权重选取的合理性。

2. 约束条件分析

调度优化模型的约束条件体系涵盖物理约束和运行约束两大类^[2]。物理约束包括潮流约束、节点

功率平衡约束和网络拓扑约束，其中节点功率平衡约束可表示为

$$\sum P_i + P_w + P_v + P_{\text{bd}} = \sum P_d + P_{\text{grid}} \quad (2)$$

$$\sum Q_i + Q_w + Q_v + Q_{\text{bd}} = \sum Q_d \quad (3)$$

式中， P_i 、 P_w 、 P_v 、 P_{bd} 分别为常规机组、风电、光伏和储能的有功出力； P_d 为负荷需求； P_{grid} 为与上级电网的交换功率。运行约束则包括

$$V_{i,\min} \leq V_i \leq V_{i,\max} \quad (4)$$

$$|S_{ij}| \leq S_{ij,\max} \quad (5)$$

$$P_{i,\min} \leq P_i \leq P_{i,\max} \quad (6)$$

$$-R_{id} \leq P_i(t) - P_i(t-1) \leq R_{iu} \quad (7)$$

储能系统需满足容量限制、充放电功率限制和荷电状态平衡约束。可再生能源出力受限于预测功率上限，并考虑其功率因数调节范围。负荷响应项目参与调度时需满足响应容量和持续时间限制，以及用户舒适度约束。约束条件的数学描述采用标准化形式，便于模型求解。

3. 不确定性表征

可再生能源出力和负荷需求的不确定性表征采用概率模型与区间模型相结合的方法。光伏发电出力的不确定性主要来源于气象条件变化，通过Beta分布描述其概率特性。风电出力的随机性则采用Weibull分布进行刻画，并考虑出力预测误差的时序相关性。负荷预测误差采用正态分布建模，基于历史数据统计分析确定其参数^[3]。为提高模型的鲁棒性，引入情景集方法处理多源不确定性的耦合效应。通过拉丁超立方抽样生成典型情景，并利用情景约简技术降低计算规模，在保持不确定性表征准确性的同时提高求解效率。

求解算法设计

1. 滚动优化框架

滚动优化框架通过动态更新预测信息和调度决策，实现配电网调度的实时优化。优化时域被划分为多个重叠的时间窗口，每个窗口包含预测区间 $[t, t+T]$ 和执行区间 $[t, t+\tau]$ 。预测区间长度 T 通常取24 h，执行区间长度 τ 取1 h，相邻时间窗口的重叠度为 $(T-\tau)/T$ 。预测区间的调度决策可表示为时序优化问题

$$X^*(t) = \arg \min \sum F(x(k), u(k), \omega(k)) \quad (8)$$

$$\text{s.t. } g(x(k), u(k), \omega(k)) = 0 \quad (9)$$

$$h(x(k), u(k), \omega(k)) \leq 0 \quad (10)$$

式中， $x(k)$ 为系统状态变量； $u(k)$ 为控制变量； $\omega(k)$ 为不确定量。

在每个执行周期结束时，基于最新的预测信息更新模型参数并重新求解优化问题，实现预测、优化和执行的闭环迭代。

2. 概率预测方法

概率预测方法采用深度学习与统计模型相结合的方式，构建可再生能源出力和负荷需求的概率分

布预测模型。光伏发电预测采用条件概率密度预测方法，预测结果表示为

$$P(y|x) = \sum \alpha_i \phi_i(y|\mu_i(x), \sigma_i(x)) \quad (11)$$

式中， ϕ_i 为高斯核函数； μ_i 和 σ_i 分别为条件均值和标准差，通过深度神经网络从历史数据中学习得到。

风电功率预测则基于改进的量化回归森林算法，输出分位点预测结果

$$Q(\tau|x) = F^{-1}(\tau|x), \tau \in [0,1] \quad (12)$$

式中， F^{-1} 为条件分布函数的逆函数。

预测准确度通过连续概率评分和区间覆盖率进行评估，并根据评估结果动态调整模型参数。

3. 鲁棒优化求解

鲁棒优化方法通过构建不确定集来描述系统随机性，将原随机优化问题转化为确定性问题。不确定参数 ξ 的波动范围由椭球形不确定集描述

$$U = \{\xi | (\xi - \xi_0)^T \Sigma^{-1} (\xi - \xi_0) \leq \Omega\} \quad (13)$$

式中， ξ_0 为名义值； Σ 为协方差矩阵； Ω 为不确定集大小。

通过引入对偶变量 λ ，原问题转化为最小-最大问题

$$\min \max L(x, \lambda) = f(x) + \lambda^T (Ax + B\xi - b) \quad (14)$$

$$x \in X, \xi \in U \quad (15)$$

采用列生成法求解转化后的问题，通过迭代添加约束违反最显著的情景点，直至达到预设准确度要求。算法的收敛性通过对偶间隙准则进行判断，保证求解结果的全局最优性。

调度策略实现

1. 多时间尺度协调

多时间尺度协调调度策略将配电网运行时间划分为日前、日内和实时三个层次。日前调度以经济性为主导目标，基于24 h预测数据制订储能系统调度计划和需求响应方案。日内调度以4 h为时间窗口，根据更新的短期预测结果对日前计划进行校正^[4]。实时调度以15 min为间隔，基于实测数据进行发电计划和需求响应的动态调整。不同时间尺度的协调通过前向信息传递和后向偏差反馈实现，日前计划为日内调度提供边界约束，日内计划引导实时调节，各层级的偏差通过反馈机制进行补偿和修正。协调策略通过分层递进方式降低了计算复杂

度，同时保证了调度决策的连续性和合理性。调度结果表明，多时间尺度协调策略能够有效应对可再生能源出力的随机性和波动性，提高系统运行的经济性和可靠性。

2. 储能系统优化

储能系统优化策略着眼于充放电功率和容量的合理调度。基于可再生能源出力预测曲线和负荷预测数据，将储能充放电过程划分为削峰填谷、平滑波动和备用容量三种运行模式。削峰填谷模式在负荷低谷期充电、高峰期放电，平滑波动模式针对可再生能源短期功率波动进行补偿，备用容量模式为系统提供紧急备用和频率调节支持^[5]。储能系统的荷电状态SOC动态变化满足以下约束：最大充放电深度不超过额定容量的80%，每日充放电次数不超过2次完整循环，充放电过程考虑储能效率损耗。多模式协同运行策略根据系统实时状态进行模式切换，实现储能效益最大化。仿真结果验证了储能优化策略在提高配电网运行灵活性和系统稳定性方面的显著效果。

3. 需求响应集成

需求响应集成策略构建了价格型和激励型相结合的混合响应机制。价格型响应采用分时电价和尖峰电价，引导用户主动调整用电行为。激励型响应通过签订削减负荷合同，在系统需要时执行负荷削减。响应资源按照响应速度和持续时间分为快速响应型和持续响应型，快速响应型主要用于平抑短期功率波动，持续响应型用于高峰时段负荷转移。用户参与响应的意愿度通过效用函数建模，考虑响应成本和用户舒适度的权衡。响应指令的执行采用分级分批方式，避免大规模负荷同时切换造成的次生波动。集成策略通过市场化机制调动用户参与积极性，提升系统调节能力。实际应用表明，该策略能够有效激励用户参与系统调节，实现经济效益和社会效益的双重提升。

算例分析与验证

1. 仿真系统构建

仿真算例基于IEEE 33节点配电系统进行构建，系统额定电压为10 kV，负荷总量为3.715 MW。系统中接入3个光伏电站，装机容量分别为500 kW、800 kW和1 000 kW，2个风电场，装机容量均为

1.5 MW。储能系统配置在负荷中心区域，总容量为2 MW·h，额定功率为500 kW。系统包含10组可控负荷，响应容量占总负荷的15%。仿真平台基于MATLAB/Simulink搭建，采用Python编写优化算法程序，通过TCP/IP协议实现数据交互。气象数据采用某地区2023年实测数据，包括太阳辐射强度、温度、风速等参数，时间分辨率为15 min。负荷数据采用典型日负荷曲线，并叠加随机扰动模拟实际波动特性。

2. 算例设置与分析

调度优化模型的仿真分析选取典型夏季日进行，分别设置三种场景进行对比：基准场景（不考虑储能和需求响应）、储能参与场景和综合优化场景。综合优化场景相比基准场景，弃风率和弃光率分别降低了11.1%和9%，系统运行成本降低了22%，见表1。储能和需求响应的协同参与显著改善了系统运行特性。进一步分析表明，储能系统通过峰谷套利和功率平滑，使系统峰谷差从2.85 MW降至1.45 MW，改善了负荷曲线特性。需求响应资源通过主动调节用电行为，有效平抑了可再生能源出力波动，使系统电压合格率提升至98.3%。三种场景的对比验证了所提出模型在提高可再生能源消纳和降低运行成本方面的优势，储能系统与需求响应的协同优化为配电网经济运行提供了有效解决方案。

表1 不同场景下系统运行指标对比

运行指标	基准场景	储能参与场景	综合优化场景
弃风率 (%)	15.3	8.7	4.2
弃光率 (%)	12.8	7.4	3.8
峰谷差/MW	2.85	1.92	1.45
运行成本 (万元/日)	4.82	4.15	3.76
电压合格率 (%)	92.5	95.8	98.3

3. 模型性能评估

模型性能评估从计算效率和优化效果两个维度展开，通过与传统确定性优化方法进行对比。表2的对比结果表明，本文提出的优化模型在计算效率和优化效果方面均优于传统方法。模型在保证优化效果的同时，显著降低计算时间和迭代次数，体现了较强的工程应用价值。算例结果显示，优化模型具有良好的收敛特性和数值稳定性，在处理大规模随机优化问题时表现出明显优势。传统确定性方法

在应对可再生能源出力随机波动时需要更多的安全裕度，导致系统运行成本增加。而本文模型通过概率预测和鲁棒优化相结合的方法，在保证供电可靠性的同时实现更优的经济性指标，可再生能源消纳率提升了11.3%。优化过程的计算时间从386 s降至245 s，为实际工程应用提供了重要支撑。

表2 不同优化方法性能对比

性能指标	确定性优化	本文模型	提升比例 (%)
计算时间/s	386	245	36.5
目标函数值/万元	4.12	3.76	8.7
可再生能源消纳率 (%)	82.5	91.8	11.3
预测误差适应度 (%)	75.3	89.2	18.5
收敛迭代次数	85	52	38.8

结束语

针对配电网接入大规模可再生能源的调度优化问题，构建了基于多时间尺度协调的优化模型。通过综合考虑系统运行成本、可再生能源消纳水平和网络安全约束，设计了适应性分时调度策略。所提模型充分利用储能系统的调节能力和需求响应的灵活性，有效应对可再生能源出力的随机波动。仿真结果验证模型的可行性和有效性，对提升配电网运

行效率和可再生能源消纳水平具有重要意义。后续研究将进一步考虑配电网故障情况下的应急调度机制，完善模型的实用性。EA

(收稿日期：2024-12-05)

参考文献

[1] 李媛媛, 王宇, 赵雪莲, 等. 基于能源互联网优化调度的仿真研究[J]. 长江信息通信, 2023, 36(7): 7-9.

[2] 李俊双, 胡炎, 邵能灵. 计及通信负载与供电可靠性的5G基站储能与配电网协同优化调度[J]. 上海交通大学学报, 2023, 57(7): 791-802.

[3] 吉兴全, 张旋, 于一潇, 等. 考虑综合能源系统运行灵活性的输配协同优化调度[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(23): 29-40.

[4] 司威, 刘慧芳, 傅文进, 等. 计及风光不确定性的主动配电网优化调度研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2022, 50(5): 73-77, 101.

[5] 朱俊澎, 袁越, 吴涵. 考虑移动氢储能和高密度可再生能源的主动配电网优化调度[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(12): 42-50.

