

# 微电网日前优化调度的研究

朱祎晨

长沙理工大学数学与统计学院, 湖南 长沙

收稿日期: 2023年11月25日; 录用日期: 2023年12月19日; 发布日期: 2023年12月29日

## 摘要

微电网在考虑风能、光伏等新能源和蓄电池储能环节的综合调度方案中, 经济性的影响变得复杂而至关重要。首先, 根据微电网实际运行需求, 建立了包括负荷情况、购电电价、售电电价、新能源发电及储能环节等条件的约束模型。我们分别探讨了直接从电网购电和充分利用可再生能源作为主要供电方式的平均购电电价情况。随后, 基于全天最小供电成本作为优化目标, 并考虑了蓄电池参与调控、风力和光伏启用的决策因子以及优利用率, 在多种约束条件下采用了改进的粒子群算法。通过计算和调度微电网系统中风能、光能和蓄电池的运行状态, 实现经济效益的最大化, 最终降低了总供电成本。

## 关键词

微电网, 优化调度, 非线性规划模型, 粒子群算法

# Research on the Optimization of Microgrid Scheduling

Yichen Zhu

School of Mathematics and Statistics, Changsha University of Science & Technology, Changsha Hunan

Received: Nov. 25<sup>th</sup>, 2023; accepted: Dec. 19<sup>th</sup>, 2023; published: Dec. 29<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

In the integrated dispatch scheme of microgrids considering new energy sources such as wind energy and photovoltaic energy, as well as battery energy storage, the economic impact becomes complex and crucial. Firstly, according to the actual operation requirements of the microgrid, a constraint model was established including load conditions, power purchase price, electricity sales price, new energy power generation and energy storage links. We look at the average PPA for purchasing electricity directly from the grid and for making full use of renewable energy as the primary mode of power supply. Subsequently, based on the minimum power supply cost of the

whole day as the optimization goal, and considering the decision-making factors of battery participation in regulation, wind power and photovoltaic activation, and optimal utilization rate, the improved particle swarm optimization was adopted under multiple constraints. By calculating and scheduling the operating status of wind, solar, and storage batteries in the microgrid system, the economic benefits are maximized, and the total power supply cost is ultimately reduced.

## Keywords

Microgrids, Optimize Scheduling, Nonlinear Programming Models, Particle Swarm Algorithm

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

2021年,中国首次提出了实现“碳达峰”和“碳中和”的目标[1],随后电力行业积极响应,表明我国电力能源体系正逐步从以化石燃料为主体转变为以新能源为主体。在各种新能源中,光伏发电和风力发电目前被认为是最有发展前景的两大领域。根据国家能源局的统计数据,2021年全年我国光伏新增装机容量为30,656万千瓦,同比增长20.9%;风电新增装机容量为32,848万千瓦,同比增长16.6%。这清晰展示了国家对光伏和风力发电的积极推动。

前段时间,湖南省发展和改革委员会发布了《湖南省电力支撑能力提升行动方案(2022~2025年)》,明确提出强有力地推进电力绿色低碳转型行动,积极推动风电和光伏发电的发展,同时围绕终端用户探索储能融合发展新场景、发展分布式能源等,明确了这些任务作为主要目标。然而,可再生分布式能源发电面临一些挑战,主要是由于其间歇性导致的。这使得像传统电网一样优化发电计划变得相当困难。不可预见的电力波动将需要昂贵的备用或辅助服务,从而导致微电网的运行不够经济。面对上述挑战,国外学者Lasseter提出了建设微电网的方案[2]。微电网其实可以被视为一种小型电力系统,其主要利用当地的自然资源来进行分布式发电,用来满足当地负荷需求。微电网的发电方式主要包括风能、光伏等相互补充的形式,有些还配置了储能设备,因此能够较好地克服光伏发电和风力发电波动性和随机性较大的缺点[3]。此外,由于微电网主要为当地负荷提供电力,无需架设输电线路,这样就减少了资金的投入,提高了整体的经济适配度。

微电网的优化调度需要综合考虑分布式可再生能源发电系统、储能系统、需求端负荷以及可能涉及主电网交易等多重约束,有时需要进行多目标、多约束的优化调度。在文献[4]中,提出了一种两阶段的随机微电网能源调度模型。第一阶段针对日前能源交易进行最优决策,第二阶段模拟实时操作,考虑风能和太阳能的变动性,以最小化微电网的预期运行成本和电力损失,同时适应可再生能源的间歇性特性。文献[5]考虑了不同的成本变化,采用了带有风险厌恶的随机规划方法。然而,这些方法通常需要预先了解不确定性统计分布的信息。

为了解决统计分布不适用的问题,文献[6]采用了稳健优化的方法,从可能的最坏情况中得出最佳解决方案。然而,这些研究不能及时响应实时的非计划性变化。在传统方法中,微电网的能量管理问题通常使用基于模型的框架来描述微电网的动态。然后,通过使用预测器估计不确定性,并利用优化问题求解器获得最优调度。其中包括采用滚动水平法[7],为每个决策步骤解决混合整数优化问题。此外,文献[8]提出了一种凸模型预测控制(MPC)方法,用于微电网中多个电池存储系统的动态最优潮流。其他研究设计了一种层次化的控制结构,以整合多个相互连接的微电网的运行管理,中央控制器监督所有微电网,

辅助控制器执行不同的模型预测策略来管理局部运行。

尽管这些方法在能源管理领域证明了它们的有效性，但它们高度依赖于专家对微电网动态的精确建模。由于微电网的规模、容量和动态可能随时间发生变化，发电和需求的不确定性曲线将发生显著变化[9]。这可能限制了这些方法在大规模微电网能源实时问题上的适用性，而且对于高维状态变量，上述方法建立的模型稳定性不高。

本文将一个调度周期划分为 96 个阶段，每个阶段为 0.25 小时，相较下来调度更加灵活。首先讨论了直接从电网购电和可再生能源全额利用的电价情况；然后以最小平均负荷单价为优化目标，以用电负荷、风、光能的装机容量、蓄电池的充放电限制作为约束条件，在蓄电池参与调控及引入关于风机和光伏是否启用的决策因子和利用率后，计算所得总供电成本下降。

## 2. 考虑可再生资源是否利用的微电网模型

图 1 为微电网中各时段负荷预测以及各时段可再生能源最大出力(风力、光伏)情况，能够看出未来风机出力主要集中在 0 点到 12 点，未来光伏出力主要集中在 6 点到 18 点，而负荷需求从 0 点呈现稳步增长趋势，到 19 点到峰值，从图 1 中能够看出，负荷需求与风机出力的关系呈现负相关，而与光伏主要出力的相关性较弱。

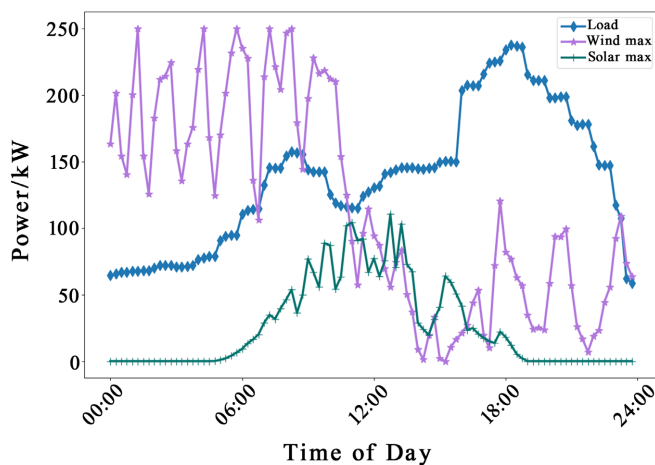


Figure 1. Load forecasting, maximum wind power in the future, photovoltaic output  
图 1. 负荷预测、未来最大风力、光伏出力

根据各时段负荷需求，能够求出全天总负荷需求为 13229.5 kW。根据成本、功率、单价、时段之间的关系，以及发电与负荷相等的原则，得到无可再生能源和可再生能源全额利用时负荷的供电构成(见表 1、表 2)，全天无可再生能源利用时，即全天负荷需求都向主网购买，根据各时段购电价格得到总供电费用为 1976.41 元，平均购电单价 0.5976 元/kW·h，当可再生能源时全额利用时，某时段风机、光伏出力若不足以满足负荷需求，则向主网购电补充，若某时段风机、光伏出力大于负荷需求，则剩余电力可售卖给主网，相较于无可再生能源利用的情况，全额利用可再生能源情况需要先比较各时段下风机、光伏出力与负荷需求，再考虑风机、光伏发电成本以及向主网售电的盈利，最终得到全天总供电费用为 2275.17 元，平均购电单价 0.6879 元/kW·h。

当允许弃风弃光的时候，即利用可再生能源出力但可以不用全额出力，要综合考虑各方面因素。为了使总成本最低，可以先将可再生能源发电的价格分别与各时段电网售价以及购电价格进行对比，将风机、光伏发电划分为全部不弃、全部弃、全部自给三种情况(见表 3)。

**Table 1.** The power supply structure without the use of renewable energy  
**表 1.** 无可再生能源利用下的供电构成

时段	负荷(kW)	购电量(kW)	售电量(kW)	供电费用(元)
00:00~06:00	1790.9	1790.9	0	111.931
06:00~12:00	3172.2	3172.2	0	458.189
12:00~18:00	4018.9	4018.9	0	656.073
18:00~24:00	4247.5	4247.5	0	750.221
合计		总供电费用：1976.41 元		

**Table 2.** Composition of power supply for full utilization of renewable energy  
**表 2.** 可再生能源全额利用的供电构成

时段	购电状态	风机出力(kW)	光伏出力(kW)	供电费用(元)
1	0	163.1	0	15.769
2	0	201.47	0	18.713
3	0	154.26	0	15.238
4	0	140.29	0	14.201
		.....		
70	1	9.95	15.06	30.470
71	1	72.19	13.59	30.379
		.....		
96	0	63.8	0	7.759
合计		总供电费用：2275.17 元		

**Table 3.** Status comparison  
**表 3.** 状态比较

情况	状态
发电价格小于电网售价	全部不弃
发电价格大于电网购价	全部弃
发电价格大于电网售价但小于电网购价	全部自给

注：全部自给指可再生能源出力只用于用负荷消耗，不用于售卖给电网。

通过上述划分，整理得到各时段的可再生能源的发电状态，进而求得可再生能源发电的费用，再通过负荷所需为各项代数和，得到微网与主网各时段的交换功率，将上述光伏、电机发电，交换功率求和即为全天最低总供电费用 1785.15 元，平均购电单价 0.5397 元/kW·h。

### 3. 多重约束下带蓄电池的微电网模型

优化目标：

$$\text{Min } W = W_L + W_w + W_s + W_c$$

其中  $W$  为总供电成本,  $W_L$  为与主网交换成本,  $W_w$  为风力出力成本,  $W_s$  为光伏出力成本,  $W_c$  为蓄电池充放电成本。

主要约束条件如下:

1) 微网和主网交换功率受约束即存在最大交换功率:

$$-150 \leq P_{Li} \leq 150$$

2) 对于蓄电池而言, 存在充放电次数的约束:

$$0 \leq N_1 \leq 8$$

$$0 \leq N_2 \leq 8$$

其中  $N_1$  为充电次数,  $N_2$  为放电次数。

3) 对于蓄电池, 为防止蓄电池过充和过放的发生, 蓄电池的荷电状态(SOC, State-of-Charge, 即电池剩余电量与电池容量的比值)应满足上、下限值约束:

$$S_{\min} \leq S_t \leq S_{\max}$$

其中,  $S_t$ 、 $S_{\min}$ 、 $S_{\max}$  分别为为蓄电池  $t$  时段的 SOC 状态及其上、下限值。即当 SOC 到达电池最大值 ( $S_{\max} = 0.95$ ) 时, 电池停止充电; 当 SOC 到达最小值 ( $S_{\min} = 0.3$ ) 时, 电池停止放电。

4) 考虑到在同一时间间隔  $\Delta t$  内, 蓄电池不能同时处于充电和放电状态, 因此 蓄电池的充放电状态需要满足以下约束:

$$X_t \cdot Y_t = 0$$

其中  $X_t$ 、 $Y_t$  分别为蓄电池的充电状态和放电状态,  $X_t \in \{0, 1\}$ ,  $Y_t \in \{0, 1\}$ 。

5) 蓄电池在参与系统的运行优化过程中, 其能量状态需满足在调度周期始末相等的约束:

$$S_0 = S_T$$

6) 同时, 考虑到蓄电池充放电功率大小与电池的寿命有关, 单位时间内充放电最大功率为蓄电池组额定容量的 20%, 即:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{cha,t} \leq 0.2E_b X_t \\ 0 \leq P_{dis,t} \leq 0.2E_b Y_t \end{cases}$$

其中  $P_{cha,t}$ 、 $P_{dis,t}$  分别为蓄电池在第  $t$  个时段的充电和放电功率;  $E_b$  为蓄电池容量。

其他参数:

在单位时间间隔  $\Delta t$  内, 蓄电池的充、放电功率均恒定, SOC 数值变化由下式决定:

$$S_t = S_0 + \frac{\sum_{i=1}^t P_{cha,i} X_i \Delta t - \sum_{i=1}^t P_{dis,i} Y_i \Delta t}{E_b}$$

综上, 建立以下求解最小供电成本的非线性模型:

本文采用粒子群算法对上述模型进行求解, 由于数据量不大, 粒子群种群大小及迭代次数分别选取 200 和 100, 该模型简化后有三个主要约束条件, 对它们加上相应的惩罚项, 由于三个约束条件都很重要, 所以惩罚项系数取相同。

每次迭代适应度、蓄电池 SOC 变化、风力发电、光伏发电与主电网功率交换和电池功率状况如图 2~4 所示:

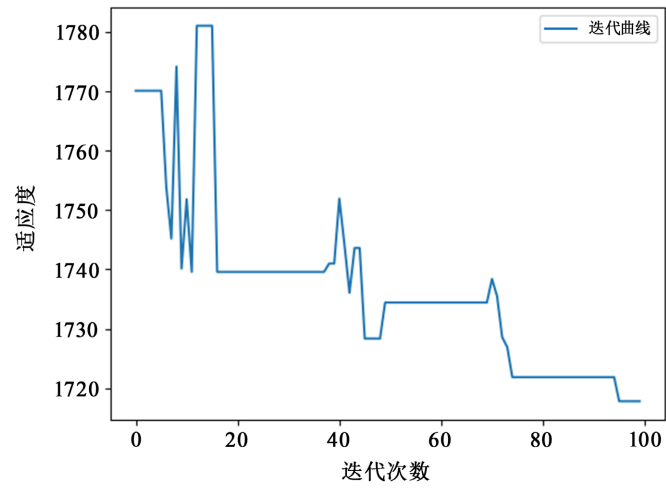


Figure 2. The iterative fitness  
图 2. 迭代适应度

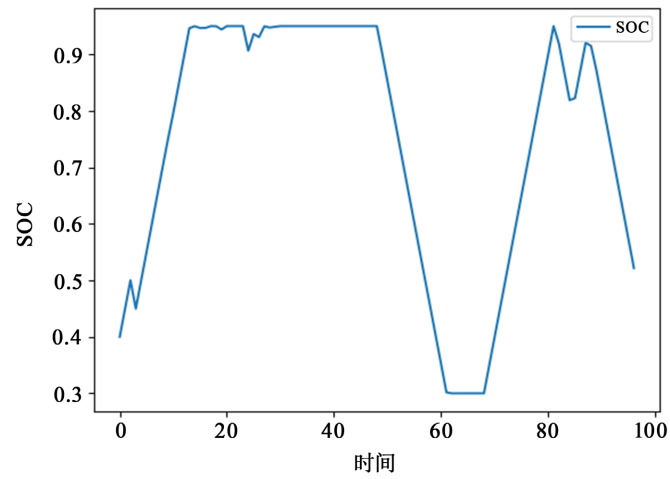


Figure 3. The changes in the SOC  
图 3. SOC 变化情况

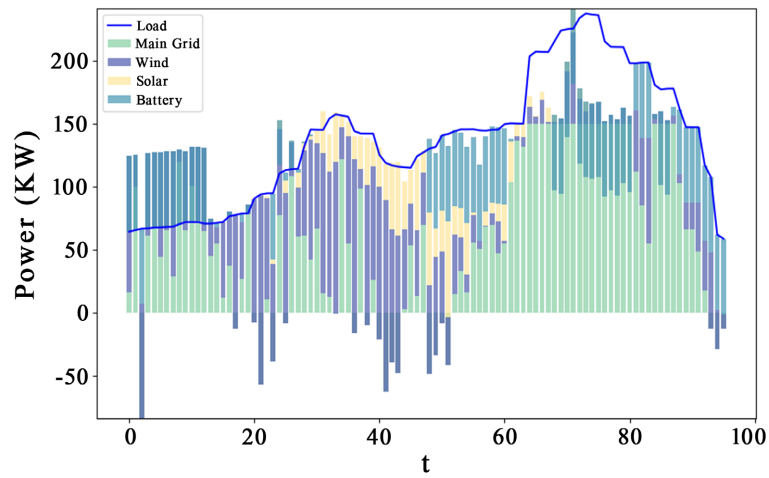


Figure 4. The output of each part  
图 4. 各部分出力情况

最终通过粒子群算法寻找到的全天最小供电成本为 1717.794 元, 平均购电单价 0.519 元/kW·h, 相较于全额利用可再生能源出力的微电网模型的供电成本, 含蓄电池的微电网优化模型一天的供电成本降低了近 30%。可见通过对微网各资源的合理分配调度, 可再生能源的可控调节, 使得整个微网经济性更强。

#### 4. 结语

本文构建了一个以最小全天供电成本为目标的非线性优化调度模型。在模型设计中, 考虑了微网与电网之间功率交换的限制、是否允许弃风弃光、蓄电池是否参与调度以及充放电次数的限制等因素。研究表明, 在蓄电池积极参与微网调节、且允许弃风弃光的条件下, 采用分时定价策略可以有效降低微电网运营成本。通过合理利用储能设备的能源, 确保满足负荷需求, 同时提高电力用户供电质量和系统供电的灵活性, 最终得出了经济且能够满足需求的最佳供电方案。

#### 参考文献

- [1] Bouscayrol, A., Chevallier, L., Cimetiere, X., *et al.* (2018) EPE'13 ECCE Europe, a Carbon-Neutral Conference. *EPE Journal*, **28**, 43-48. <https://doi.org/10.1080/09398368.2018.1425183>
- [2] Lasseter, R.H. and Paigi, P. (2004) Microgrid: A Conceptual Solution. 2004 *IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference*, Aachen, Germany, 20-25 June 2004, 4285-4290. <https://doi.org/10.1109/PESC.2004.1354758>
- [3] Shuai, Z., Sun, Y., Shen, Z.J., *et al.* (2016) Microgrid Stability: Classification and a Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **58**, 167-179. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.201>
- [4] Wang, H., Alattas, K.A., Mohammadzadeh, A., *et al.* (2022) Comprehensive Review of Load Forecasting with Emphasis on Intelligent Computing Approaches. *Energy Reports*, **8**, 13189-13198. <https://doi.org/10.1016/j.egyvr.2022.10.016>
- [5] Hadri, S., Naitmalek, Y., Najib, M., *et al.* (2019) A Comparative Study of Predictive Approaches for Load Forecasting in Smart Buildings. *Procedia Computer Science*, **160**, 173-180. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.09.458>
- [6] Laouafi, A., Mordjaoui, M., Laouafi, F. and Boukelia, T.E. (2016) Daily Peak Electricity Demand Forecasting Based on an Adaptive Hybrid Two-Stage Methodology. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, **77**, 136-144. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.11.046>
- [7] Khuntia, S.R., Rueda, J.L. and van Der Meijden, M.A.M.M. (2016) Forecasting the Load of Electrical Power Systems in Mid- and Long-Term Horizons: A Review. *IET Generation, Transmission & Distribution*, **10**, 3971-3977. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2016.0340>
- [8] Sturt, A. and Strbac, G. (2011) Efficient Stochastic Scheduling for Simulation of Wind-Integrated Power Systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, **27**, 323-334. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2011.2164558>
- [9] Pappala, V.S., Erlich, I., Rohrig, K. and Dobschinski, J. (2009) A Stochastic Model for the Optimal Operation of a Wind-Thermal Power System. *IEEE transactions on Power Systems*, **24**, 940-950. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2009.2016504>