

基于遗传算法的风光微电网储能优化配置研究

周海航

华北电力大学，河北保定，071000；

摘要：随着可再生能源的快速发展，风光储微电网系统因其灵活性和高效性成为未来能源系统的重要组成部分。然而，风光能源的随机性和间歇性对储能系统的容量配置提出了挑战。本文针对这一问题，构建了以总投资成本、负荷缺电率和弃风弃光率为目标函数的储能容量优化配置模型，并采用遗传算法对模型进行求解，通过不同配置方案的模拟验证了模型的有效性。研究结果表明，合理的储能容量配置与优化的运行策略可显著提高微电网系统的经济性和供电可靠性，系统负荷缺电率由 10% 降至 5%，弃风弃光率由 30% 降至 10%，同时减少了购电成本。

关键词：储能容量优化；风光微电网；遗传算法

DOI：10.69979/3029-2727.25.02.013

引言

随着全球能源结构的转型与可持续发展的要求，风能和光伏能作为清洁能源的重要组成部分，逐渐成为微电网系统中的核心能源来源。微电网作为一种能够独立或与主电网相连接的分布式能源系统，因其具备较高的灵活性和可调度性，已成为智能电网建设中的重要组成部分^[1]。然而，风光资源的波动性和间歇性，导致了微电网在运行过程中面临供电不稳定、弃风弃光等问题，如何优化储能系统的配置以提高微电网的供电可靠性和经济性，成为当前研究的热点之一。

许多学者通过优化算法和数学模型，探讨了储能系统的容量配置问题，主要聚焦于降低系统总投资成本、提高供电可靠性以及减少弃风弃光现象。同时，需求响应技术的引入为储能系统的优化提供了新的思路，通过动态调节负荷需求，实现了更为精准的电力调度和资源配置^[2-3]。本文提出一种风光微电网储能优化配置的多目标优化模型，模型以系统总投资成本、供电可靠性和弃风弃光率作为优化目标，并通过设定合理的约束条件来保证系统运行的稳定性和安全性。

1 微电网系统模型

1.1 光伏发电出力模型

在微电网系统中，光伏发电系统是重要的能源来源之一，其发电能力受到多个因素的影响，包括光照强度、环境温度以及光伏组件的性能等^[4]。光伏发电出力模型如下所示：

$$P_{PV} = N_{PV} P_{STC} \frac{E_c}{E_{STC}} [1 + \mu (t_c - t_{STC})] \quad (1)$$

其中， P_{PV} 表示光伏系统的实际输出功率， N_{PV} 是光伏组件的数量， P_{STC} 是在标准测试条件 (STC) 下每个光伏组件的额定功率， E_c 和 E_{STC} 分别是当前和标准测试条件下的光照强度，单位为 W/m^2 。 μ 表示温度对光伏组件功率的影响，取值为 $-0.0043/^\circ C$ ， t_c 和 t_{STC} 分别是当前温度和标准测试条件下的温度。

1.2 风力发电出力模型

风力发电系统的出力受到风速的直接影响。为了准确描述风力发电机组在不同风速条件下的输出功率，可以采用如下风力发电出力模型：

$$P_{WT} = \begin{cases} 0 & 0 \leq v < v_{ci} \text{ 或 } v_{co} \leq v \\ P_e \frac{v-v_{ci}}{v_c-v_{ci}} & v_{ci} \leq v < v_e \\ P_e & v_e \leq v < v_{co} \end{cases} \quad (2)$$

其中， P_{WT} 表示风力发电机的输出功率， v 是当前风速， P_e 是风力发电机在额定风速 v_e 下的最大输出功率。模型中涉及的三个风速阈值包括启动风速 v_{ci} ，即风速低于此值时风机无法启动；额定风速 v_e ，即风机达到最大输出功率时的风速；和切出风速 v_{co} ，即风速超过此值时风机停止运行以避免损坏^[5]。

1.3 储能系统模型

在风光储微电网系统中，储能系统是保证系统稳定运行的关键组件。以磷酸铁锂电池为储能设备，该电池具有较高的能量密度和较长的使用寿命，是当前微电网中常用的储能技术之一^[6]。储能系统模型通过以下描述：

$$S_{OC}(t) = S_{OC}(t_0) + \frac{n P_{LB}}{C_{LB} U_{LB}} \Delta t \quad (3)$$

其中， $S_{OC}(t)$ 表示储能电池在时间 t 时刻的电池状

态 (SOC, State of Charge)， $S_{\text{soc}}(t_0)$ 为初始时刻的电池状态， η 是充放电效率， P_{LB} 是电池的充放电功率， C_{LB} 是电池的额定容量， U_{LB} 是电池的额定电压， Δt 是时间步长。

2 储能容量优化配置模型

2.1 目标函数

在储能容量优化配置模型中，目标函数的设计旨在综合考虑系统的经济性和可靠性，以实现储能系统配置的最优化^[7]。目标函数为：

$$\min F = \sum_{i=1}^T (C_A, \eta_{\text{LPSP}}, \eta_{\text{EWR}})_{\min} \quad (4)$$

其中， F 是优化目标函数，表示需要最小化的总目标值。该目标函数综合了三个关键因素：系统的投资成本 C_A ，电力系统的可靠性指标 η_{LPSP} （即负荷放电能力可靠性指标），以及系统的能量交换效率 η_{EWR} （即储能设备的能量转化效率）。投资成本 C_A 包括了储能设备的采购、安装及维护等费用，目标是通过合理配置储能容量来减少总投资。 η_{LPSP} 反映了系统在特定运行条件下满足负荷需求的可靠性，优化过程中需确保系统能够在不同负荷情况下稳定供电。 η_{EWR} 则表示储能系统的能源转换效率，优化目标是提高储能过程中的能量利用率。

2.1.1 系统总投资成本

在储能容量优化配置模型中，需要对不同类型的成本进行详细分析，包括固定成本、运行维护成本、主网购电成本以及售电收益等方面的因素。

固定成本是储能系统在安装和部署过程中不可避免的一部分，它主要包括设备采购成本、安装费用以及系统调试费用。设备采购成本 $C_{\text{fixed}}^{\text{equipment}}$ 是指购买储能设备（如电池、变流器、逆变器等所需的支出^[8]。安装费用 $C_{\text{fixed}}^{\text{install}}$ 包括储能设备的安装、接入系统的电力设施建设以及相关的基础设施建设费用。调试费用 $C_{\text{fixed}}^{\text{commission}}$ 是指系统投入使用前所需的调试费用。固定成本可以通过以下表示：

$$C_{\text{fixed}} = C_{\text{fixed}}^{\text{equipment}} + C_{\text{fixed}}^{\text{install}} + C_{\text{fixed}}^{\text{commission}} \quad (5)$$

储能系统的运行维护成本 C_{OM} 包括日常的维护费用、定期的检查和修理费用、设备的更换费用等。具体而言，维护费用 $C_{\text{OM}}^{\text{maint}}$ 包括对储能系统进行例行检查和维护所需的人员和材料费用，而设备更换费用 $C_{\text{OM}}^{\text{replace}}$ 则是指在系统运行过程中，由于储能设备的老化或故障而需要更换部分设备所发生的支出。运行维护成本的总和可以表

示为：

$$C_{\text{OM}} = C_{\text{OM}}^{\text{maint}} + C_{\text{OM}}^{\text{replace}} \quad (6)$$

主网购电成本 C_{purchase} 反映了微电网与主电网之间的电能交换所产生的费用。在微电网无法满足本地负荷需求时，需从主网购电以补充电力供应。假设每小时从主网购电的电量为 $P_{\text{purchase}}(t)$ ，单位电价为 P_{price} ，则主网购电成本可以通过以下公式计算：

$$C_{\text{purchase}} = \sum_{t=1}^T P_{\text{purchase}}(t) \cdot P_{\text{price}} \cdot \Delta t \quad (7)$$

其中， T 是分析的时间段， Δt 是时间步长，而 $P_{\text{purchase}}(t)$ 是在时间 t 从主网购电的功率，单位为千瓦 (kW)。主网购电成本的增加通常会对微电网的经济性产生负面影响，因此，优化储能系统的配置与调度可以有效减少购电成本。

售电收益 R_{sell} 是指微电网将多余的电力出售给主网或其他用户所获得的收入。在有充足的光伏、风力和储能电池供电时，微电网可以向外部售电^[9]。在时间段 t 的售电功率为 $P_{\text{sell}}(t)$ ，单位电价为 $P_{\text{sell_rice}}$ ，则售电收益可以通过以下公式表示：

$$R_{\text{sell}} = \sum_{t=1}^T P_{\text{sell}}(t) \cdot P_{\text{sell_rice}} \cdot \Delta t \quad (8)$$

总投资成本 C_{total} 可以通过综合考虑固定成本、运行维护成本、主网购电成本和售电收益来计算。具体而言，总投资成本由以下几个部分构成：

$$C_{\text{total}} = C_{\text{fixed}} + C_{\text{OM}} + C_{\text{purchase}} - R_{\text{sell}} \quad (9)$$

其中，固定成本、运行维护成本和主网购电成本是正向成本，而售电收益则是负向收益。通过优化这些成本和收益，能够在满足系统可靠性和运行效率的前提下，最小化总投资成本。最后，通过将上述各类成本和收益纳入到储能容量优化配置模型中，微电网可以实现经济性和可靠性的最佳平衡^[10]。

2.1.2 系统供电可靠性

在储能容量优化配置模型中，系统供电可靠性是衡量微电网在满足负荷需求方面的能力，通常用负荷放电能力可靠性指标 η_{LPSP} 来表示^[11]。该指标反映了在特定时间段内，微电网能否提供足够的电力以满足用户负荷需求的程度。其计算公式如下：

$$\eta_{\text{LPSP}} = \frac{\sum_{i=1}^N (P_{\text{UL}}(t_i) - P_g(t_i)) \Delta t}{\sum_{i=1}^N P_{\text{UL}}(t_i) \Delta t} < \eta_{\text{LPSP,max}} \quad (10)$$

其中， $P_{\text{UL}}(t_i)$ 是在时间 t_i 时刻的用户负荷需求， $P_g(t_i)$ 是微电网在同一时刻的发电功率， Δt 是时间步长（通常为小时），而 $\eta_{\text{LPSP,max}}$ 是系统允许的最大负荷放电能力可靠性。该公式的物理意义是，在每个时间步长内，

微电网提供的电力 $P_g(t_i)$ 能够部分或全部满足负荷需求 $P_{UL}(t_i)$ ，当发电功率低于需求时，系统供电可靠性会下降。该指标反映了储能系统的作用，尤其是在负荷高峰时，通过储能放电或外购电力来弥补发电不足，确保系统可靠运行。为了保证系统的可靠性，通常需要将其供电可靠性 η_{LPSP} 控制在预设的最大值 $\eta_{LPSP,max}$ 以内，以确保微电网能够应对多变的电力需求和外部环境条件。

2.1.3 弃风弃光率

在储能容量优化配置模型中，弃风弃光率（EWR, Energy Wasted Ratio）是衡量风光资源未能被有效利用的一个重要指标。它反映了在一定时间内，微电网所生产的风能和光伏电能中，未能用于满足负荷需求而被浪费掉的电量占总发电量的比例^[12]。弃风弃光率的计算如下：

$$\eta_{EWR} = \frac{\sum_{t=1}^T [P_g(t) - P_{UL}(t)] \Delta t}{\sum_{t=1}^T [P_{PV}(t) + P_{WT}(t)] \Delta t} \quad (11)$$

其中， $P_g(t)$ 是微电网在时间 t 的发电功率， $P_{UL}(t)$ 是时间 t 的用户负荷需求， $P_{PV}(t)$ 和 $P_{WT}(t)$ 分别是光伏发电和风力发电的输出功率。通过计算，可以评估微电网中风力和光伏发电资源的利用效率，并反映储能系统在减少弃风弃光方面的潜力。

2.2 约束条件

约束条件包括功率平衡约束、储能电池的 SOC 约束、锂电池储能系统的容量、充放电功率限制、一天充放电次数限制以及风光能源的功率限制。这些约束条件共同构成了优化模型的核心部分，确保微电网能够在多变的环境条件下稳定运行^[13]。

功率平衡约束要求微电网在任意时间点的供电功率等于负荷需求功率与储能电池释放的电能之和。表示为：

$$P_g(t) + P_B(t) = P_{UL}(t) \quad (12)$$

其中， $P_g(t)$ 表示微电网在时间 t 时的发电功率， $P_B(t)$ 是储能系统在时间 t 时释放的功率， $P_{UL}(t)$ 是用户负荷需求功率。

储能电池的 SOC 约束限制了电池的充电状态。SOC 代表电池剩余能量的百分比，必须保持在电池的允许充电范围内。SSOC 的约束可以通过以下表示：

$$SOC_{min} \leq SOC(t) \leq SOC_{max} \quad (13)$$

其中， SOC_{min} 和 SOC_{max} 分别表示电池的最小和最大 SOC 值， $SOC(t)$ 是时间 t 时刻的 SOC 值。

储能系统的总容量 C_{LB} 应满足微电网的实际需求，并且不能超过电池的设计容量。该约束可以表示为：

$$C_{LB} \geq C_{LB,actual} \quad (14)$$

其中， $C_{LB,actual}$ 是实际所需的储能容量， C_{LB} 是电池的设计容量。

锂电池的充放电功率有一定的上限，超出这一范围可能会对电池造成损害。充放电功率的限制如下：

$$P_{B,charge} \leq P_{B,max}, \quad P_{B,discharge} \leq P_{B,max} \quad (15)$$

其中， $P_{B,charge}$ 和 $P_{B,discharge}$ 分别是充电和放电功率， $P_{B,max}$ 是储能系统的最大充放电功率。

电池的充放电次数越多，电池的使用寿命就越短，因此需要对电池的充放电次数进行限制。设定一天内的最大充放电次数 N_{cycle} ，可以通过以下表示：

$$N_{charge}(t) + N_{discharge}(t) \leq N_{cycle,max} \quad (16)$$

其中， $N_{charge}(t)$ 和 $N_{discharge}(t)$ 分别表示在时间 t 的充电和放电次数， $N_{cycle,max}$ 是最大充放电次数。

风力和光伏发电具有波动性和间歇性，因此需要根据负荷需求和储能系统的容量来合理配置风光资源。假设风力发电的功率 $P_{WT}(t)$ 和光伏发电的功率 $P_{PV}(t)$ 满足以下约束：

$$P_{WT}(t) \leq P_{WT,max}, \quad P_{PV}(t) \leq P_{PV,max} \quad (17)$$

其中， $P_{WT,max}$ 和 $P_{PV,max}$ 分别表示风力发电和光伏发电的最大功率。

2.3 微网运行策略

微电网全年（8,760 h）并网运行过程中，当风光能源输出超过用户负荷时，能量控制系统向储能电池下达充电命令，储能电池存储多余电能，不仅减少能源浪费，还为未来的负荷峰值提供电力支持，同时可通过逆变器将多余电能反馈至主电网。

当风光发电无法满足负荷需求时，能量控制系统指令储能电池放电，快速响应，保证电力供给的连续性。在极端天气条件下，微电网可向主电网购电，以确保对关键负荷的可靠供电。

2.4 模型求解方法

本文采用遗传算法作为智能优化方法，以高效求解储能容量优化配置问题。首先，对问题的设计变量进行编码，构建初始种群，种群中每个个体表示一个储能容量配置方案。其次，基于本文提出的目标函数计算个体的适应度值，适应度值的高低直接反映了该方案的优劣。

性。通过选择操作，优良个体得以保留并参与后续的交叉和变异过程，以产生下一代种群。交叉操作模拟了自然界遗传信息的重组，进一步提升了解的多样性，而变异操作则通过对部分基因位的随机改变，避免算法陷入局部最优。整个算法迭代过程中，不断优化种群的适应度值，最终获得储能容量的全局最优配置。

3 算例分析

本文以某典型并网运行的风光储微电网系统为研

究对象，该系统包含光伏、风机及储能三大核心模块，光伏装机容量为 50 kW，风机装机容量为 10 kW。为研究优化配置效果，对系统进行了全年（8760 小时）运行仿真，仿真以系统总投资成本、年负荷缺电率和弃风弃光率为优化目标函数，采用遗传算法进行求解，设定种群规模为 120，最大迭代次数为 200，并根据不同运行情景的参数设置模拟微电网的实际工作状态，得出三种典型配置方案，其详细优化结果如表 1 所示。

表 1

方案	光伏电池板/块	风力发电机/台	储能电池/块	固定成本/万元	维护成本/万元	购电成本/万元	售电收益/万元	总投资成本/万元	负荷缺电率/%	弃风弃光率/%
1	10	1	0	4.40	0.15	1.50	0.20	5.85	10	30
2	10	1	5	5.40	0.23	0.80	0.80	5.63	8	15
3	15	1	10	6.60	0.34	0.10	1.50	5.54	5	10

方案 1 未配置储能系统，仅依靠光伏和风力发电，固定成本较低（4.4 万元），但由于缺乏储能调节，年购电成本高达 1.50 万元，弃风弃光率为 30%，负荷缺电率为 10%。尽管投资较低，但无法满足高效能源利用和供电可靠性需求。

方案 2 配置了 10 kW 储能系统，固定成本增加至 5.4 万元。通过储能系统的能量调度，主网购电费用降至 0.80 万元，弃风弃光率和负荷缺电率分别降至 15% 和 8%。虽然储能容量有限，部分电量未能完全存储，但系统性能得到有效提升。

方案 3 为最优配置，储能装机容量提升至 20 kW，固定成本为 6.6 万元。几乎无需购电，购电费用降至 0.10 万元，负荷缺电率和弃风弃光率分别降至 5% 和 10%。该方案通过充分吸收和调度多余电量，显著提升了能源利用效率和供电可靠性，展示了在经济性和环境效益上的优势。

4 结论

在未配置储能系统的情况下，固定成本为 4.4 万元，负荷缺电率和弃风弃光率分别为 10% 和 30%，表现出明显的资源浪费与供电不足问题；引入部分储能系统后，固定成本增加至 5.40 万元，负荷缺电率和弃风弃光率分别下降至 8% 和 15%，购电费用由 1.50 万元减少至 0.80 万元，系统综合性能得到显著改善；进一步优化储能容量和运行策略后，系统实现了最优配置，固定成本为 6.60 万元，负荷缺电率和弃风弃光率分别降至 5% 和 10%，

购电费用进一步减少至 0.10 万元，充分体现了优化配置对微电网系统性能的提升作用。

本文提出的优化配置模型与运行策略，不仅显著提升了系统对可再生能源的利用效率，还降低了系统运行成本，为并网风光储微电网系统的设计与运行提供了重要的参考依据。未来研究可进一步结合动态电价机制与更高精度的负荷预测模型，以进一步提升系统的经济效益与运行稳定性。

参考文献

- [1] 徐林, 阮新波, 张步涵等. 风光蓄互补发电系统容量的改进优化配置方法 [J]. 中国电机工程学报, 2012.
- [2] 马溪原, 吴耀文, 方华亮等. 采用改进细菌觅食算法的风/光/储混合微电网电源优化配置 [J]. 中国电机工程学报, 2011.
- [3] 丁明, 王波, 赵波等. 独立风光柴储微网系统容量优化配置 [J]. 电网技术, 2013.
- [4] 王成山, 于波, 肖峻等. 平滑可再生能源发电系统输出波动的储能系统容量优化方法 [J]. 中国电机工程学报, 2012.
- [5] Min You, Yunguang Wang et al. "Research on Capacity Configuration for Green Power Substitution in an Isolated Grid Containing Electrolytic Aluminum." Energies (2024).
- [6] Mohammed Amine Hoummadi, Manale Bouderbala et al. "Survey of Sustainable Energy Sources f

- or Microgrid Energy Management: A Review.” Energies (2023).. Mohammed Amine.
- [7] Ling Li, Jiarui Pei et al. “A Review of Research on Dynamic and Static Economic Dispatching of Hybrid Wind - Thermal Power Microgrids.” Energies (2023).
- [8] Jinhua Zhang, Xinzhi Xue et al. “Optimization of Energy Storage Allocation in Wind Energy Storage Combined System Based on Improved Sand Cat Swarm Optimization Algorithm.” Processes (2023).
- [9] 窦晓波, 袁简, 吴在军等. 并网型风光储微电网容量改进优化配置方法 [J]. 电力自动化设备, 2016.
- [10] Sooyoung Jung, Y. Yoon. “Optimal Operating Schedule for Energy Storage System: Focusing on Efficient Energy Management for Microgrid.” Processes (2019).
- [11] 郭力, 刘文建, 焦冰琦等. 独立微网系统的多目标优化规划设计方法 [J]. 中国电机工程学报, 2014.
- [12] 李玲玲, 王鑫, 郎永波等. 基于改进鲸鱼算法的微网复合储能系统容量优化配置 [J]. 电测与仪表, 2019.
- [13] Xin Wang, Bo Sun et al. “Research on distributionally robust energy storage capacity allocation for output fluctuations in high permeability wind and solar distribution networks.” PLOS ONE (2024).