

[微电网]

基于多目标粒子群优化的微电网最优调度

文/陈利君 魏兵兵
苏州市产品质量监督检验院

针对包含光伏、风力发电机、蓄电池和柴油发电机的微电网经济优化问题，构建以功率平衡、分布式资源出力与运行等为约束条件，以最小运行成本 and 环境污染物排放量为优化目标的多目标优化调度模型，基于多目标粒子群算法对微电网经济优化问题进行求解。算例仿真验证该优化方法具有更优的准确性和性能，可有效支撑微电网的经济优化运行。

“双碳”背景下，可再生能源将在很大程度上代替传统化石能源，发展新型电力系统是新型能源体系的重要组成。而微电网作为一个分布式的自治系统，可以实现分布式清洁能源的就地消纳和就地平衡。微电网在功能、结构和运行方式上与传统电网存在较大区别。其具有多种结构，灵活性较大，可以根据当地具体的环境特点和资源分布，满足一些用户具体的供电需求。微电网既可视作小型电力系统，又可视作配电网中的虚拟电源或负荷。它的运行特性包括：与外部电网的相互作用，并网运行时提供或接受电能；自身的独立运行，在发生故障或电能质量问题时与大电网断开，进入孤岛运行模式。

目前已有不少学者针对微电网的经济运行优化问题进行研究。文献[1]提出一种结合一致性算法和能源路由器的分布式经济调度方法，建立一个多目标模型，将环境效益纳入经济调度框架，使微电网达到最优经济调度状态。文献[2]同时考虑经济性和环境保护的重要性，运用快速精英非支配排序遗传算法（NSGA-II）来处理具有经济成本和污染物排放双重目标的优化问题。文献[3]设计并实现一种新的经济调度模型，用于优化微电网的管理。该模型全面评估运营成本与环境影响，利用改进的

海鸥优化算法处理问题。通过自适应权重方法，将多目标挑战转换为单一目标问题，从而确定最佳配置方案，实现成本效益和环境保护双重目标。文献[4]建立一个多目标优化模型，该模型涵盖运维折旧成本、环境效益成本以及联络线偏差的惩罚费用，通过采用相对目标接近度技术，成功地将复杂的多目标问题简化为单一目标问题，实现不同目标之间的有效平衡。同时使用层次分析法和熵权法结合赋权，确保各目标权重的科学性和合理性。文献[5]制定最小化运行成本和环境整治成本的目标函数，通过NSGA-II-PSO算法进行多目标优化。该算法结合NSGA-II算法的非支配排序和精英策略以及PSO算法的快速收敛特性，实现微电网的高效运行和管理。

本文微电网包括光伏、风力发电机、蓄电池和柴油发电机，针对微电网孤岛运行，采用多目标粒子群算法（Multi-Objective Particle Swarm Optimization, MOPSO）对微电网进行多目标优化调度。以最小化运行成本和最小化环境污染物排放量为目标函数，运用具有高寻优速度和强大搜索能力的多目标粒子群算法来解决优化问题，并通过具体的算例验证所提出的优化模型与方法的准确性和有效性。通过微电网的经济运行，使整个系统的经济收

益及效率均相应增加。

含可再生能源的微电网供电系统

本文研究的微电网系统包含柴油发电机、储能单元、光伏电池及风机。在本文中，微电网采用孤岛模式运行，由微电网内部各独立微电源向微电网中的负荷提供电力。

1. 光伏电池

光伏电池的功能是将太阳能转换为直流电。这种转换是非线性的，其中电压和电流的变化随光照强度和温度的变化而呈现非线性特性。光伏电池的输出功率计算公式为

$$P_{PV} = P_{STC} \frac{G_c}{G_{STC}} [1 + k(T_c - T_{STC})] \quad (1)$$

式中， P_{STC} 为在标准测试条件下，即光照强度为 $1\,000\text{ W/m}^2$ 和环境温度为 25°C 时，光伏电池的最大输出功率； G_c 为光照强度； G_{STC} 为 STC 条件下的光照强度； k 为发电功率系数； T_c 为电池板工作温度； T_{STC} 为参照温度。

光伏电池的输出受外界条件影响很大，主要的两个影响条件是光照强度和温度，它们对输出的影响具有非线性特点。通过控制变量实验：在温度（光照强度）不变，改变光照强度（温度）的条件下，测量光伏电池的开路电压和短路电流，可以得到其伏安特性与伏瓦特性曲线。从曲线可知在任何温度和光照强度下，光伏电池板总有一个温度点（光照强度点）可以获得最大输出功率。

2. 风力发电机

风能作为一种具有巨大潜力的清洁能源，据估计全球可用于发电的风能资源达到 100 亿kW ，而我国的可开发风力资源约为 10 亿kW 。风力发电主要是将风的动能转换成机械能，再将机械能转换成电能。具体来说，风力驱动风轮旋转，通过增速器增加旋转速度，然后通过机械传动系统将机械能传递给发电机，发电机进一步将机械能转换为磁场能，最终产生电能。由于风力发电的燃料成本和气体排放治理成本均为零，使其成为经济效益显著的能源解决方案。风力发电机组的输出功率与风速密切相关，风机的实际功率的表达式为

$$\begin{cases} P_{WT} = 0 & v < v_{ci} \\ P_{WT} = av^3 - bP_r & v_{ci} < v < v_r \\ P_{WT} = P_r & v_r < v < v_{co} \\ P_{WT} = 0 & v > v_{co} \end{cases} \quad (2)$$

$$a = \frac{P_r}{v_r^3 - v_{ci}^3}, b = \frac{v_{ci}^3}{v_r^3 - v_{ci}^3}$$

式中， P_r 为风机的额定功率； v_{ci} 为风机的切入风速，本文取 3 m/s ； v_r 为风机的额定风速，本文取 14 m/s ； v_{co} 为风机的切出风速，本文取 25 m/s 。

3. 蓄电池储能

微电网中蓄电池可以提供短时供电，可以根据光伏和风机的出力变化进行充放电调整，也可以在微电网没有能量来源或能量源不稳定时做后备能源，持续稳定地供电给负荷，保证微电网的稳定。同时其电力调峰功能可以在负荷低谷期间，贮存系统多余的电力，并在负荷高峰期间将其反馈到微电网中，以实现功率调节。蓄电池在充放电过程中均存在一定的损耗、随时间消散等特性，蓄电池的能量表达式为^[8]

$$E_{SB}(t) = (1 - \tau_{SB})E_{SB}(t-1) + \left(P_{SB,chr}(t)\eta_{SB,chr} - \frac{P_{SB,dis}(t)}{\eta_{SB,dis}} \right) \Delta t \quad (3)$$

式中， $E_{SB}(t)$ 为蓄电池在 t 时刻的剩余能量， $\text{kW}\cdot\text{h}$ ； $P_{SB,chr}(t)$ 为 t 时刻蓄电池的输入功率， kW ； $P_{SB,dis}(t)$ 为 t 时刻蓄电池的输出功率， kW ； τ_{SB} 为蓄电池的自放电率； $\eta_{SB,chr}$ 为蓄电池能量输入转化效率； $\eta_{SB,dis}$ 为蓄电池能量输出转化效率。

4. 柴油发电机

柴油发电机作为一种产生电能的设备，先通过内燃机燃烧柴油产生热能，再将热能转化为机械能，然后驱动发电机来产生电能。该设备通常用作备用电源，可以在电网故障时为微电网提供稳定的电力。其燃料成本计算公式为

$$F_{DE} = \alpha + \beta P_{DE} + \gamma P_{DE}^2 \quad (4)$$

式中， F_{DE} 为柴油机的燃料成本； P_{DE} 为柴油机的输出功率； α 、 β 、 γ 为柴油机燃料成本的系数，本文取 $\alpha=6$ 、 $\beta=0.12$ 、 $\gamma=8.5 \times 10^{-4}$ 。

微电网的运行优化

在微电网孤岛运行的条件下，考虑到系统约束条件，建立一个多目标优化调度模型，以实现微电网系统的运行成本和污染物排放量的双重最小化，

综合考虑其经济性、可靠性和环保性。

1. 目标函数

(1) 运行成本目标函数

$$\min F_1 = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N CO_{i,t}(P_{i,t}) \quad (5)$$

式中, T 为微电网优化周期总时段数; N 为微电源的数量; $P_{i,t}$ 为微电源 i 在时间 t 的输出功率; $CO_{i,t}$ 为微电源 i 在时间 t 的发电费用。

本文中微电网的运行成本主要包括机组的燃料成本、设备折旧成本和维护成本。假设光伏和风机在生产电能的整个过程中消耗的化石燃料为零, 故微电源的发电费用表达式为

$$CO_{i,t} = CF_{i,t} + IV_{i,t} + OM_{i,t} \quad (6)$$

式中, $CF_{i,t}$ 为微电网 i 在时间 t 的燃料费用; $IV_{i,t}$ 为微电源 i 折算到单位时间的折旧费用; $OM_{i,t}$ 为微电源 i 在时间 t 的维护费用。

折旧费用计算公式为

$$IV_{i,t} = \frac{C_{INS,i}}{8760 \times P_{r,i} \times f_{c,i}} \times \frac{d(1+d)^m}{(1+d)^m - 1} \quad (7)$$

式中, $C_{INS,i}$ 为微电网 i 的安装成本; $P_{r,i}$ 为微电源 i 的额定功率; $f_{c,i}$ 为微电源 i 的容量因子; d 为利率或折旧率; m 为微电源的使用寿命。

(2) 污染物排放量目标函数

化石燃料热机组产生的硫化物和氮氧化物等环境污染物可以一起建模^[11], 这些污染物的(总吨/小时)排放计算公式为

$$\min F_2 = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N 10^{-2} (\alpha_i + \beta_i P_{i,t} + \gamma_i P_{i,t}^2) + \zeta_i \exp(\lambda_i P_{i,t}) \quad (8)$$

式中, α_i 、 β_i 、 γ_i 、 ζ_i 、 λ_i 为不同微电源 i 的排放特性系数。

2. 约束条件

(1) 功率平衡约束

$$P_{MT}(t) + P_{WT}(t) + P_{PV}(t) + P_{SB,dis}(t) + P_{IL} = P_L(t) + P_{SB,chr}(t) \quad (9)$$

式中, $P_{MT}(t)$ 、 $P_{WT}(t)$ 为在 t 时间微型燃气轮机、风机的输出功率; $P_{PV}(t)$ 、 $P_{batt}(t)$ 为在 t 时间时光伏、蓄电池的输出功率; $P_L(t)$ 为在 t 时间时总的负荷功率需求。

(2) 微电源出力约束

$$P_i^{\min} \leq P_i(t) \leq P_i^{\max} \quad (10)$$

式中, $P_i^{\min}$ 为微电源 i 的最小出力; $P_i^{\max}$ 为微电源 i 的最大出力。

(3) 微电网线路传输功率约束

$$P_{line,min} \leq P_{line} \leq P_{line,max} \quad (11)$$

式中, $P_{line,min}$ 、 $P_{line,max}$ 分别为微电网线路的最小传输功率和最大传输功率。

(4) 蓄电池运行约束

$$P_{BS,min} \leq P_{BS} \leq P_{BS,max} \quad (12)$$

$$E_{BS,min} \leq E_{BS} \leq E_{BS,max} \quad (13)$$

式中, $P_{BS,min}$ 、 $P_{BS,max}$ 分别为蓄电池的最小、最大充放电功率; $E_{BS,min}$ 、 $E_{BS,max}$ 分别为蓄电池的最小、最大容量。

3. 问题建立

将目标函数和约束条件综合起来, 问题可以用数学形式表示为非线性约束多目标优化问题, 计算公式为

$$\begin{aligned} &\text{minimize}[F_1(X), F_2(X)] \\ &\text{subject to: (9)-(13)} \end{aligned} \quad (14)$$

式中, X 为 n 维优化变量。

多目标粒子群算法

粒子群优化(PSO)自1995年问世以来, 受到了世界各地众多研究者的关注, 产生了大量的基本算法变体以及许多参数选择和控制策略。粒子群算法实现简单, 设置参数少, 收敛速度快, 同时能有效地保持群体的多样性。该算法通过考虑粒子运动和群体协作对自身进行评估, 并倾向于向当前全局最佳位置 X_{gbest} 和自身最佳位置 X_{pbest} 移动。粒子群算法可以概括为更新粒子速度和位置、粒子适应度评价、全局和局部最优适应度。

PSO具有简单的计算公式, 包括在 n 维解空间中更新的位置和速度矢量。对于迭代 k 时的粒子 i , 其速度更新公式和位置更新公式为

$$v_i^{k+1} = wv_i^k + c_1r_1(X_{pbest,i}^k - x_i^k) + c_2r_2(X_{gbest,i}^k - x_i^k) \quad (15)$$

$$X_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \quad (16)$$

式中, v_i^k 为第 k 次迭代第 i 个粒子的速度; x_i^k 为第 k 次迭代第 i 个粒子在 n 维粒子空间中的位置; $X_{pbest,i}$ 为到目前为止粒子 i 的最佳位置; $X_{gbest,i}$ 为全局最佳位置。

如果一个粒子违反速度极限, 设它的速度等

于适当的极限。如果一个粒子违反了它在任何维度上的位置限制，将它的位置设置在适当的限制上。

$$w_i = w_{\max} - \frac{\text{inter}(w_{\max} - w_{\min})}{\text{inter}_{\max}} \quad (17)$$

式中， w_i 为粒子群当前惯性权重值； $w_{\max}$ 、 $w_{\min}$ 分别为最大、最小惯性权重； inter 为当前迭代次数； $\text{inter}_{\max}$ 为最大迭代次数。

除了这些参数外，还需要定义种群大小和迭代次数。基本粒子群算法的原理可以描述为评估粒子适应度值，找到局部和全局最佳适应度和位置，然后更新速度和位置。

针对本文的环境经济调度问题，利用多目标粒子群算法（MOPSO）求解微电网最优经济运行。对比PSO和MOPSO的更新公式可以发现其大体相同，实际上两种算法的区别主要体现在局部最优位置（ p_{best} ）和全局最优位置（ g_{best} ）的选择上。故将粒子群算法运用于多目标优化问题的关键是如何确定每个粒子的 p_{best} 和 g_{best} 。因为在处理多目标优化问题时，并不存在唯一的最优解，而是有一系列的Pareto最优解存在，故不能直接确定粒子局部和全局最优位置。计算流程如图1所示。

MOPSO基于Pareto支配对个体进行选择。在更新 p_{best} 的过程中，如果粒子 i 支配当前的 p_{best} ，则将粒子 i 的当前位置设为新的 p_{best} 。如果粒子 i 与其 p_{best} 互不支配，则随机选择一个作为新的 p_{best} 。

在选取 p_{best} 的过程中，公式中的 p_{best} 变成了 $\text{REP}[h]$ 。REP是外部储存库，专门用于保存搜索过程中识别出的非支配粒子。因此，多目标粒子群优化算法（MOPSO）的主要任务是从这个储存库中选择一个粒子作为全局最优解（ p_{best} ）。此过程称为确定外部储存库索引 h 的值。这需要将目标空间划分成一个个网格，每个网格中有不同数目的例子，这些粒子数目值当成适应度值用轮盘赌的方式进行选择。轮盘赌选择到的粒子是REP中的第 m 个例子，则 $h=m$ ，索引值 h 确定完毕。将 $\text{REP}[h]$ 替换 g_{best} ，粒子的速度更新就完成了，从而MOPSO可以完整运行，使其在求解多目标优化问题时能够得到更优的Pareto前沿。

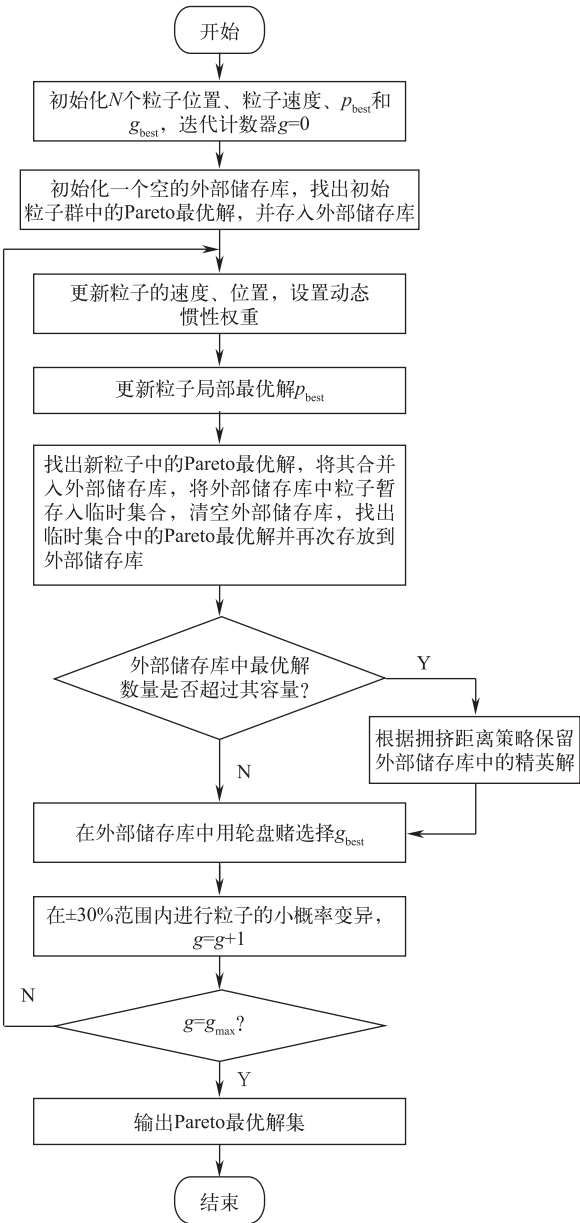


图1 本文算法流程图

算例分析

1. 系统参数设置

本文所提出的MOPSO优化在计算机环境为Windows 11，内存RAM为16 GB，处理器CPU为Inter (R) Core (TM) i7，主频为1.8 GHz下编写。本文编程采用MATLAB R2021b，为验证所提出的优化模型，本研究通过分析一个真实微电网系统进行实证，计算周期定为一天，采用典型日的24 h负荷数据进行分析。峰值负荷取568 kW。

柴油发电机最大功率为600 kW，最小功率为200 kW。储能装置最大充电功率为-200 kW，最大放电功率250 kW。微电网中各分布式电源的参数见表1。微电网中各分布式电源污染物排放特性系数见表2。在MOPSO算法中，设定的参数为：粒子总数设为100，最大迭代次数为100。惯性权重的最大值和最小值分别设为0.9和0.4。两个学习因子 c_1 和 c_2 均设定为1.2。外部储存库的容量设置为100。突变概率为0.1。

表1 微电网各分布式电源参数

参数名称	光伏	风机	柴油发电机
功率上限/kW	200	300	400
功率下限/kW	0	0	100
运维单价/[元/(kW·h)]	0.3	0.4	1.3

表2 污染物排放特性系数

排放系数	光伏	风机	柴油发电机
α	0	0	4.258
β	0	0	-5.094
γ	0	0	4.586
ζ	0	0	1.0E-6
λ	0	0	8.000

2. 优化结果与分析

为实现微电网经济性与环保性的优化调度，在本研究中，通过使用MOPSO算法进行100代的迭代，最终确定43个Pareto最优解。如图2所示，这些解集展示了运行成本和环境成本之间的最优权衡。分析可知，微电网运行成本与其污染物排放量之间存在逆相关关系。要获取到最优解集，必须在两个目标之间做出平衡的选择。

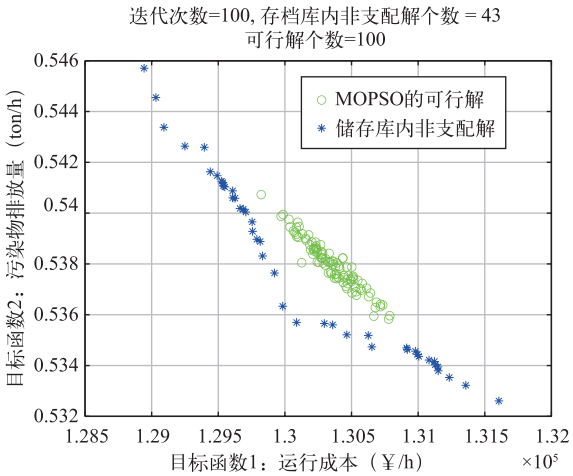


图2中，x轴表示第一个目标函数的值（运行成本），y轴表示第二个目标函数的值（环境污染物排放量）。图2中的两种符号（圆圈和星号）代表两个不同的解集。绿色的圆圈代表当前可行的解集，也就是说这些点是满足所有约束条件的解，在帕累托前沿上占据一定的区域。蓝色的星号表示储存库内非支配解集，也就是在目前迭代中未被其他解支配的解决方案。图2为决策者提供一组可行的优化方案集合，有助于决策者依据方案 and 实际需求做出最终选择。通过比较MOPSO可行解与储存库内非支配解，可以看出通过反复迭代Pareto前沿面更平滑，多目标粒子群算法可以更精确地逼近Pareto前沿，证明多目标优化算法的性能更好。

图3为总光伏功率和已消纳光伏功率的变化趋势。由图3可知，总光伏发电功率峰值为148 kW，对比其200 kW的功率上限，运行效率大约为74%，由此可知光伏板性能良好，已消纳光伏功率峰值为130 kW。通过运行结果可知，光伏消纳比例为78.04%。此结果表明，通过本文优化，光伏发电的消纳率已经达到绿色、可持续的程度。

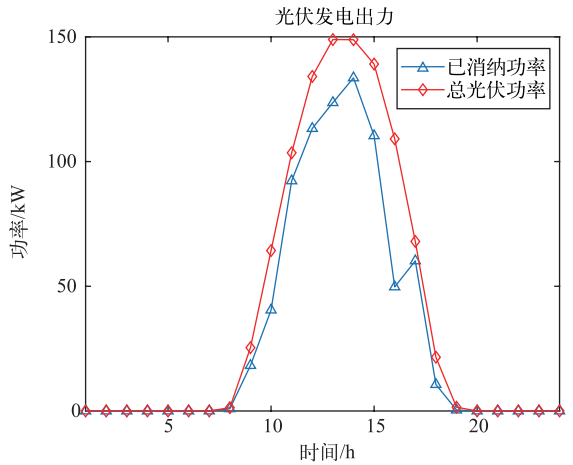


图4为总风电功率和已消纳风电功率的变化趋势。已知风机容量为300 kW，由图4可知，总风机发电的峰值为218 kW，其运行效率为73%，说明当前条件下风机工作正常。通过运行结果可知，风机消纳比例为64.93%，说明风电资源有较好的利用率。

图5展示了一天内的负荷波动情况，负荷在12时功率最小，约为350 kW，在17时功率最大，约为

570 kW。负荷低谷时表明设备耗能少，负荷高峰时表明设备耗能多、负荷需求大。图5中呈现的负荷变化情况符合其周期性波动、昼夜差异等规律，通过研究其负荷曲线也可以了解系统的用电模型，从而有利于优化负荷管理。

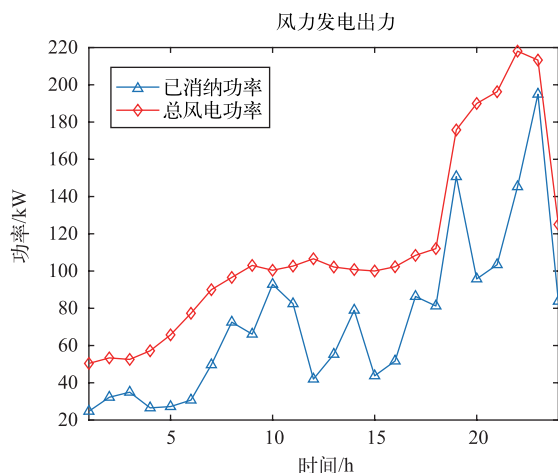


图4 风机出力曲线

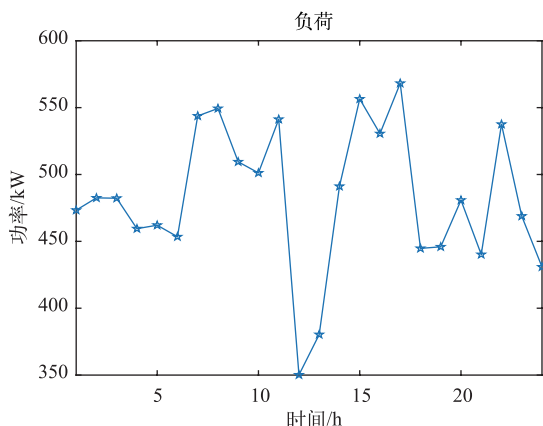


图5 负荷曲线

图6包含优化后储能、光伏、风机和柴油发电机的优化结果。图6中光伏和风机功率曲线为已消纳的功率曲线，展示了消纳后的结果，与光伏和风机原始出力数据对比可知，优化后可再生能源的吸收率较好。柱状图展示了储能装置的充放电情况，在早上和晚上光伏不工作时放电，来满足负荷需求；在中午时段，光伏发电达到峰值时，储能装置充电，将多余的电力储存起来。柴油发电机的功率曲线保持在功率上限400 kW和功率下限100 kW之间，由于柴油发电机没有达到满发状态，所以可以保证负荷的正常供电。

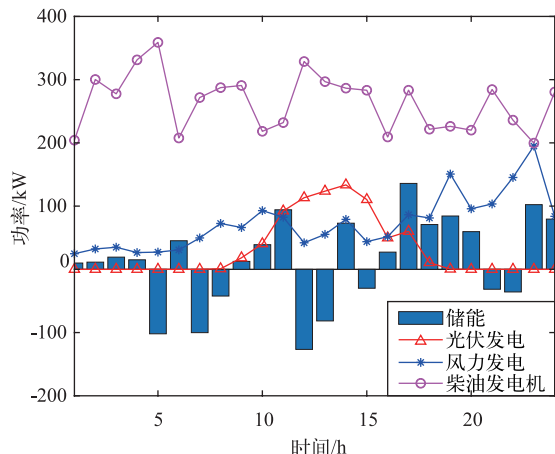


图6 微电网运行优化结果

结束语

本文研究探讨了孤岛微电网在不同目标下的经济运行优化调度问题。在优化过程中，确保系统约束得到充分满足的基础上，兼顾环境效益和经济效益，构建一个结合运行成本和环境污染物排放量的微电网多目标优化调度模型，并使用多目标粒子群算法来解决该问题。本优化调度模型既能确保光伏、风机有较高的消纳率，也能确保正常可靠供电。仿真结果验证本文提出的模型和算法可以找到更合理的解集，在微电网经济优化调度中有很好的适应性，为微电网调度管理提供有价值的参考。EA

(收稿日期：2024-04-23)

参考文献

- [1] 安宝祥, 陈珍萍, 贺文, 等. 基于一致性的智能微电网多目标经济调度研究[J]. 计算机仿真, 2023, 40(10): 86-93+171.
- [2] 师伟. 孤岛微电网能量管理策略研究[D]. 济南: 山东大学, 2023.
- [3] 白丽丽, 陈海龙, 於瑞金, 等. 基于改进海鸥算法的微电网经济调度研究[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2023, 41(2): 227-235.
- [4] 吴晓雯, 顾雪平, 范辉, 等. 基于相对目标接近度的并网型微电网多目标优化调度[J]. 现代电力, 2024, 41(1): 36-46.
- [5] 董海, 曹晓兰. 基于策略驱动的混合能源微电网动态调度[J]. 太阳能学报, 2023, 44(7): 22-29.