

基于多目标粒子群算法的微电网优化调度

摘要: 本研究的核心目标是实现微电网系统经济和环境双重目标的优化运行。我们研究了由光伏、风机、柴油发电机、燃气发电机和铅酸蓄电池组成的与主网交互的微电网系统。为了达到经济和环保的协调，我们提出了一种基于多目标粒子群算法微电网优化调度模型。该模型的目标是在满足系统约束条件的前提下，实现微电网的经济性和环保性的最佳平衡。通过仿真结果的分析，我们验证了该模型对微电网优化调度具有一定的指导作用。

关键词: 多目标粒子群算法，主网交互的微电网，经济与环境优化

背景

随着微电网技术的深入研究与应用，有效管理微电网内部的分布式电源成为一个重要的研究课题。这涉及到对微电网系统的经济效益和环境效益进行最大化的管理。微电网技术通过整合光伏、风能等分布式电源，实现了更加灵活和可持续的能源供应。为了实现经济效益的最大化，需要考虑成本、负荷需求和电源调度等因素，以优化微电网的电力生产和消费。同时，为了实现环境效益的最大化，需要综合考虑减少碳排放、降低能源浪费等环境指标。因此，如何在微电网中妥善管理分布式电源，以实现经济和环境效益的最大化，成为当前研究的重要课题之一。

当前国内外的研究涉及到微电网系统中分布式电源输出功率特性、储能装置容量优化和运行控制策略对经济效益、环境友好和可靠性的影响。其中，文献[4]将多目标经济调度问题转化为非线性单目标优化问题，但其实质上并不能被称为多目标优化问题。进一步研究可以探索如何更准确地应用多目标优化方法来解决微电网经济调度问题。另一方面，文献[5]以有功网损、污染物排放量和电压稳定程度作为多目标优化目标，为智能电网的监控运行提供了一定的思路。然而，该研究并未考虑微电网的经济运行，因此还需要进一步研究如何综合考虑经济性和环境友好性的多目标优化策略，以实现微电网系统的可持续发展。此外，文献[6]提出了多种遗传算法种群初始化方法，主要针对单目标遗传算法。然而，对于多目标进化算法，仍需要探索更适用的种群初始化方法，以提高算法的收敛性和搜索效率。综上所述，未来的研究可以进一步探究微电网系统中分布式电源的输出功率特性、储能装置容量优化和运行控制策略对经济效益、环境友好性和可靠性的综合影响。同时，应关注多目标优化方法在微电网经济调度中的应用，并提出更适用于多目标进化算法的种群初始化方法，以推动微电网系统的可持续发展和优化运行。

在本研究中，我们以经济和环境成本最小化为目标，建立了一个基于风能、光能和日负荷预测的微电网动态多目标优化调度的通用模型。为了求解该模型，我们采用了多目标粒子群算法 (Multi-Objective Particle Swarm Optimization, MOPSO)。通过应用 MOPSO 算法，我们能够有效地寻找到微电网系统中的最优调度方案，实现经济性和环境友好性的双重优化。该研究对于微电网系统的可持续发展和优化运行具有重要意义。

1. 系统模型

该系统中包含了光伏发电，风力发电，储能电池，柴油发电机，燃气轮机和主电网交互



图 1 微电网结构

1.1 风机模型

风力发电机的发电功率由风速的大小决定, 输出功率为:

$$P_{WT} = \begin{cases} 0, v \leq v_{ci} \text{ 或 } v \geq v_{co} \\ \frac{v^3 - v_{ci}^3}{v_r^3 - v_{ci}^3} P_r, v_{ci} < v \leq v_r \\ P_r, v_r < v < v_{co} \end{cases} \quad (1)$$

式中 P_{WT} 为 t 时刻风机的输出功率, P_r 为风机的额定输出功率, v_{ci} 为切入风速, 取 3m/s, v_r 为额定风速, v_{co} 为切出风速。

1.2 光伏模型

光伏发电功率取决于当地太阳辐射强度, 输出功率为:

$$P_{PV} = P_{STC} \frac{Q_{PV}}{Q_{STC}} [1 + \theta Q_{PV}] \quad (2)$$

式中, P_{PV} 为 t 时刻光伏的发电功率, Q_{PV} 为 t 时刻太阳辐射强度, Q_{STC} 为标准测试条件下的光照辐射强度, P_{STC} 为标准测试条件下光伏的输出电功率, θ 为辐射强度系数

1.3 蓄电池模型

蓄电池在时刻 t 、 $t-1$ 的荷电量以及从时刻 $t-1$ 到 t 系统能量的供求状况有密切关系. 所用模型忽略蓄电池每小时的自放电率, 并假设蓄电池的放电效率为 1. 当系统总发电量大于负荷用电量时, 蓄电池处于充电状态. 蓄电池在时刻 t 的荷电量为:

$$S_B(t) = S_B(t-1) + (S_{GA}(t) - S_L(t))\alpha_{Bat} \quad (3)$$

式中: $S_B(t)$ 和 $S_B(t-1)$ 分别为时刻 t 和 $t-1$ 蓄电池的荷电量; $S_{GA}(t)$ 为 t 时刻系统提供的总能量; $S_L(t)$ 为时刻 t 负荷用电量; α_{Bat} 为蓄电池充电效率。当系统总发电量小于负荷用电量时, 蓄电池处于放电状态。时刻 t 蓄电池的荷电量为:

$$S_B(t) = S_B(t-1) + S_{GA}(t) - S_L(t) \quad (4)$$

1.4 柴油发电机模型

柴油发电机通常作为备用电源, 燃料成本是其耗量特性函数, 可表示为:

$$C_{DE} = a + bP_{DE} + cP_{DE}^2 \quad (5)$$

式中: C_{DE} 和 P_{DE} 分别为为柴油发电机的燃料成本和输出功率; a, b, c 为燃料成本系数

1.5 微型燃气轮机模型

当微电网发电无法满足负荷时, 采用微型燃气轮机作为出力单元, 其成本数学模型为:

$$C_{MT} = \sum_{t=1}^T \frac{C \Delta t P_{MT}(t)}{LHV \eta_{MT}} \quad (6)$$

$$\eta_{MT} = 0.0753 \left(\frac{P_{MT}}{65} \right)^3 - 0.3095 \left(\frac{P_{MT}}{65} \right)^2 + 0.417 \left(\frac{P_{MT}}{65} \right) + 0.1068$$

式中, C_{MT} 为微型燃气轮机的燃料成本, C 为燃料气体单价, $P_{MT}(t)$ 为在 t 时刻燃气轮机的出力, LHV 为天然气低热值, 取 9.7 kWh/m^3 , η_{MT} 为微型燃气轮机的效率。

2. 系统优化模型

为简化微电网的实际运行, 本文假设光伏阵列和风力发电机组运行于最大功率点, 优先利用风光资源; 蓄电池组能够独立供电并满足最大负荷功率需求, 可跟踪光伏和风机的出力变化进行充放电; 柴油发电机组能够独立供电, 满足最大负荷和铅蓄电池充电需求。这些假设旨在确保供电可靠性和实用性。

2.1 目标函数

本文致力于以微电网运行成本和环境治理成本为多目标优化函数的研究。在保证微电网正常运行的前提下, 我们同时考虑运行成本和环境效益。我们建立了一个目标函数, 旨在实现微电网经济性运行成本的最小化。这一目标函数主要关注微电网系统中分布式电源的运行成本以及与外部电网的交互成本。

$$F_1 = \sum_{t=1}^T [C_{WT}(t) + C_{PV}(t) + C_{BESS}(t) + C_{MT}(t) + C_{DE}(t) + C_{BUY}(t) - C_{SELL}(t)] \quad (7)$$

式中, T 是调度周期, $C_{PV}(t)$, $C_{WT}(t)$, $C_{MT}(t)$, $C_{DE}(t)$ 分别为 t 时段光伏, 风机和微型燃气轮机和柴油发电机的运行成本, $C_{BESS}(t)$ 为 t 时段储能装置充放电成本, $C_{BUY}(t)$, $C_{SELL}(t)$ 分别为 t 时段微电网购电成本和售电利润。

微电网中产生污染气体的委员主要为微型燃气轮机和大电网, 单纯的将污染气体的排放总量相加无法反映其对环境的影响程度, 文中将微电网产生的污染气体的治理成本最少作为目标进行优化, 具体的数学表达式为:

$$F_2 = \min \sum_{i=1}^{24} \left\{ \sum_{k=1}^n (W_{MT,k} \cdot P_{MT} + W_{g,k} P_{g,p}) \cdot C_k \right\}_i \quad (8)$$

式中 F_2 为系统运行24小时产生污染气体的总的治理费用; k 表示污染气体的种类(包括 CO_2 , NO_x 和 SO_2); $W_{MT,k}$ 表示微型燃气轮机产生污染气体 k 的排放系数; $W_{g,k}$ 表示大电网产生污染气体 k 的排放系数; $P_{g,p}$ 表示从大电网的购电功率(售电时为 0); C_k 表示为污染气体 k 的单位治理成本。

污染物类型		CO2	SO2	NOx
治理费用 (元/kg)		0.21	14.824	62.964
污染物排放系数 (g/kW·h)	微型燃气轮机	724	0.0036	0.2
	大电网	922	2.295	3.583

表 1 污染物排放系数及治理成本

2.2 约束条件

1) 功率平衡约束

本文研究的是由光伏、风电等可再生发电单元、微型燃气轮机、柴油发电机, 储能装置和外部电网组成的微电网, 其中 各电源提供的功率应与负荷功率相等, 功率平衡约束为:

$$P_{DE}(t) + P_{BESS}(t) + P_{WT}(t) + P_{PV}(t) + P_{MT}(t) + P_{BUY}(t) - P_{SELL}(t) = P_{LOAD}(t) \quad (9)$$

式中, $P_{\text{BESS}}(t)$ 为 t 时段储能装置的充放电功率; $P_{\text{PV}}(t)$, $P_{\text{WT}}(t)$, $P_{\text{MT}}(t)$ 和 $P_{\text{DE}}(t)$ 分别为 t 时刻光伏, 风机, 微型燃气轮机和柴油发电机的放电功率; $P_{\text{BUY}}(t)$, $P_{\text{SELL}}(t)$ 分别为 t 时刻微电网购买, 出售的功率; $P_{\text{LOAD}}(t)$ 为 t 时段负载需求功率。

2) 发电单元出力约束

微电网发电单元模型应符合真实情况, 各发电单元 出力必须限制在一定范围之内:

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

式中, P_i^{\min} , P_i^{\max} 分别为 t 时段各发电单元输出功最小值和最大值

3) 爬坡速度约束

微电网中微型燃气轮机等分布式电源需要满足爬坡 速率限制, 即在某一时段内发电功率改变值应在最大上 坡速率和最大下坡速率之内:

$$-P_i^{\text{down}} \leq P_i(t) - P_i(t-1) \leq P_i^{\text{up}} \quad (11)$$

式中, P_i^{down} 是发电单元最大下坡功率, P_i^{up} 是发电单元最大上坡速度

4) 储能装置充放电约束

为保障储能装置的长期稳定运行, 对充电量进行限制:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{BESS}}(t) \leq P_{\text{dbat}}^{\max} \\ 0 \leq P_{\text{BESS}}(t) \leq P_{\text{cbat}}^{\max} \\ E_{\min} \leq E(t) \leq E_{\max} \end{cases} \quad (12)$$

式中, E_{\min} , E_{\max} 分别为储能装置荷电状态的上限制, P_{dbat}^{\max} 是储能装置放电最大值, P_{cbat}^{\max} 是储能放电最大值

5) 微电网与主网交互功率约束

微电网与主网交互功率应在一定范围之内:

$$P_{\text{grid}}^{\min} \leq P_{\text{grid}}^t \leq P_{\text{grid}}^{\max} \quad (13)$$

式中, P_{grid}^{\min} , P_{grid}^{\max} 分别为微电网与主网交互功率的最大值和最小值

3 微电网多目标优化调度

3.1 多目标优化问题

多目标优化问题中各目标之间通过决策变量相互制约, 而各目标的单位往往不一致, 对其中一个目标优化必须以其他目标为代价, 因此很难 客观地评价多目标问题解的优劣性. 与单目标优化 问题的本质区别在于, 多目标优化问题的解不是唯一的, 而是存在一个最优解集合, 即 Pareto 前沿, 集合中元素称为 Pareto 最优或非劣最优.

3.2 多目标粒子群算法

粒子群算法是由 Kennedy 和 Eberhart 在 1995 年首先提出的一种智能优化算法, 算法通过不断更新粒子的局部和全局最优值来达到寻优的目的. 多目标粒子群算法 (Multi-Objective Particle Swarm Optimization, MOPSO) 是一种优化算法, 用于解决具有多个目标函数的优化问题. 它基于粒子群优化算法 (Particle Swarm Optimization, PSO), 并扩展为多目标优化的情景.

MOPSO 的核心思想是通过模拟鸟群或鱼群中的协同行为来进行优化搜索. 算法通过在解空间中定义一组粒子, 每个粒子代表一个潜在解. 每个粒子根据自身当前位置和速度, 以及邻域粒子的经验, 来更新自己的位置和速度. 这样, 粒子群在搜索空间中逐渐收敛到最优解的附近. 算法具体流程见图 2

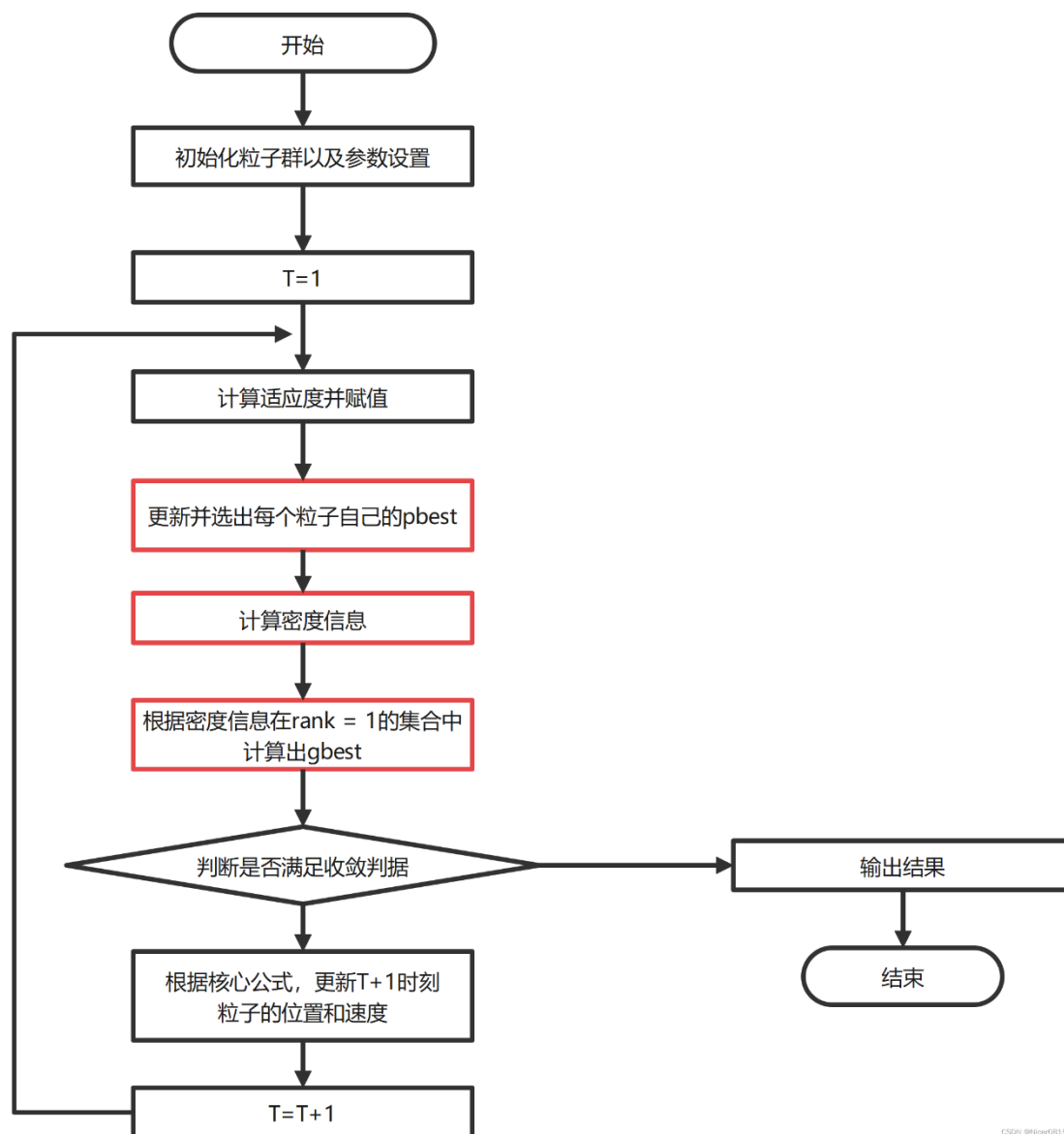


图 2 多目标粒子群算法流程图

4 仿真与验证

本研究对环境调度、经济调度以及多目标综合优化调度三种情况进行了仿真分析，并将仿真结果呈现在表 2 中。在环境调度方案中，以最小化环境成本为目标函数，系统在考虑经济性的同时，注重降低对环境的影响。在经济调度方案中，以最小化经济运行成本为目标函数，系统追求经济效益的最大化。而在多目标综合优化调度方案中，综合考虑了环境成本和经济运行成本，通过权衡两者，实现经济性和环境友好性的双重优化。

调度类型	环境调度/元	经济调度/元	综合调度/元
环境成本	2555. 14	34657. 27	5280. 01
运行成本	45624. 39	6225. 61	7029. 63

表 2 不同目标下微电网的调度结果

从表 2 的仿真结果可以得出以下结论：在进行经济调度时，微网的发电成本增加，这是由于柴油发电机组投入成本的增加所导致的。然而，这也带来了环境成本费用的增加，因为柴油发电机组通常会产生更高的污染物排放。相反，在进行环境调度时，为了减少污染物排放，对污染物的处理和惩罚费用会增加，从而导致机组的运行成本相对增加。然而，这种调度方案可以降低对环境的负面影响，使微网更加环境友好。综合调度考虑了经济成本

和环境成本两方面的影响，需要综合权衡多个因素来选择最佳的调度方案。在决策过程中，需要综合考虑风光资源的分布情况、燃油价格以及污染物处理费用等因素。通过合理的权衡和选择，可以实现经济性和环境友好性的双重优化。

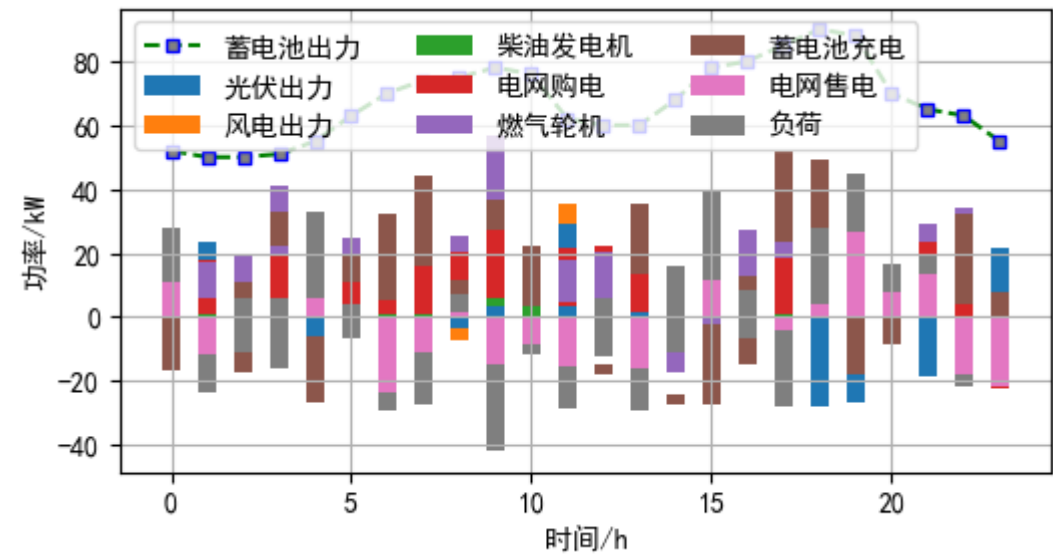


图 3 经济与环境综合调度结果

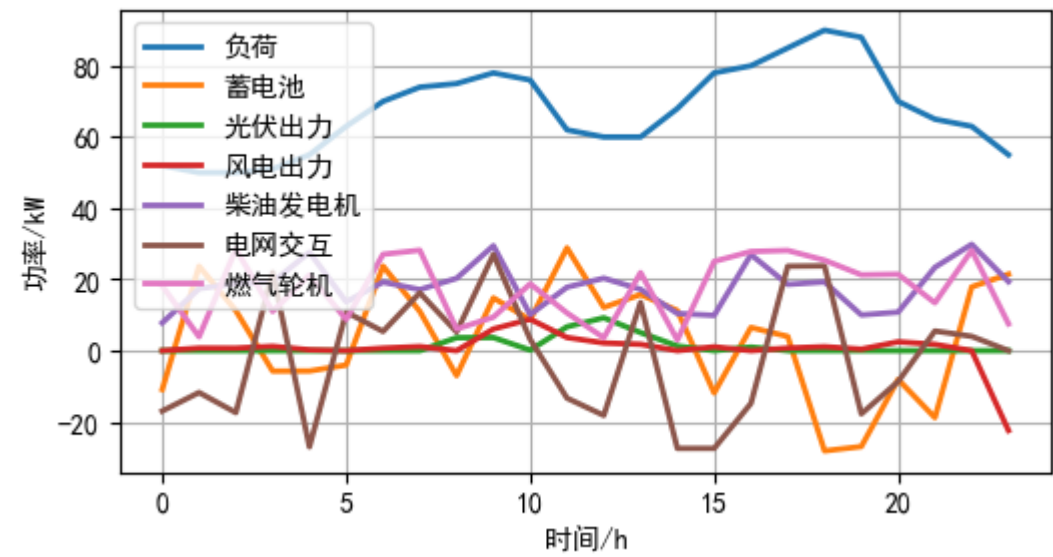


图 4 经济与环境综合调度结果

5 结论

文中研究了并网微电网运行时，在预测风光负荷情况下的动态优化调度问题，在计及风光发电机组输出功率随机性、间歇性，满足系统约束的前提下，考虑了微电网经济、环保性能，建立了微电网运行、环境成本多目标优化调度模型，并采用多目标粒子群算法进行了求解。仿真结果表明该模型对保证并网微电网运行、微电网内敏感负荷不间断供电具有一定的指导作用，可为节能减排的经济环保调度问题提供参考。

参考文献

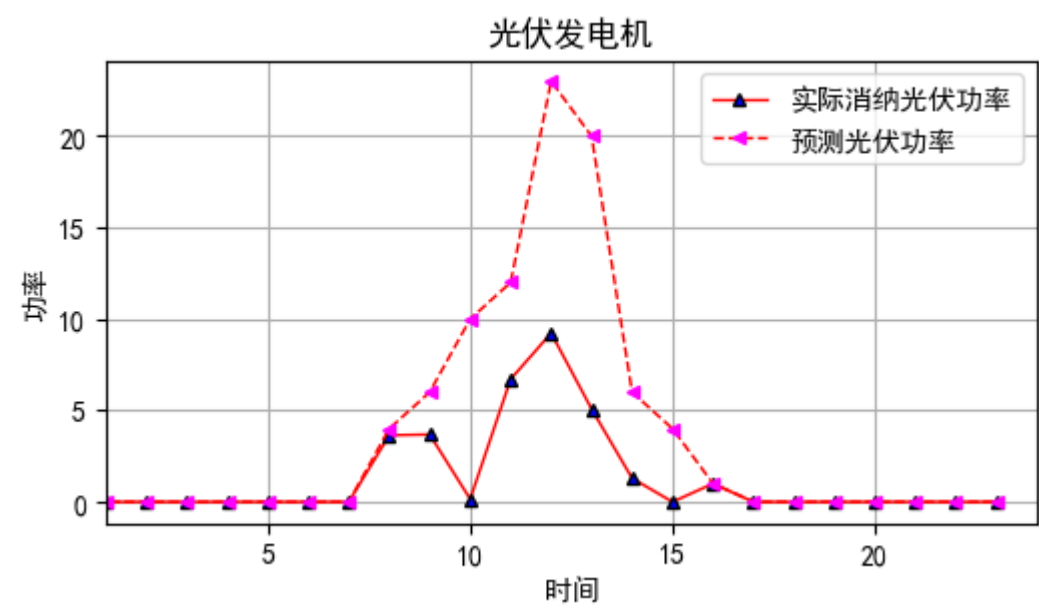
[1]程苒,常湧,黄华,李琦 & 桂俊平. (2017). 基于多目标的独立微电网电源容量优化设计. 水电能源科学(10), 198-202.

[2]刘梦璇,郭力,王成山,赵波,张雪松 & 刘云. (2012). 风光柴储孤立微电网系统协调运行控制策略设计. 电力系统自动化(15), 19-24.

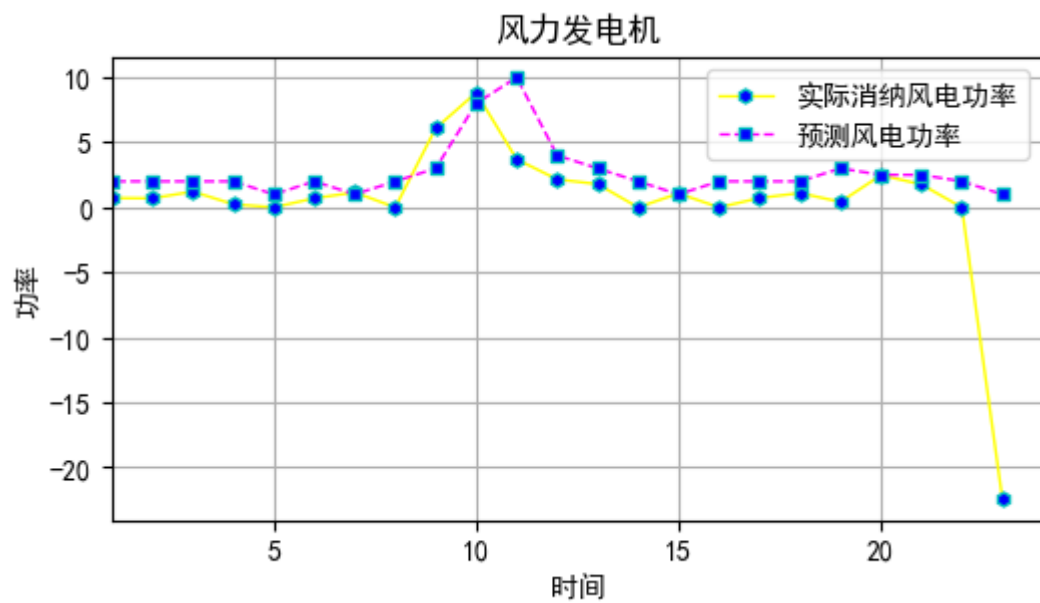
[3]严凤 & 楚非非. (2016). 微网多目标动态经济优化调度. 电测与仪表(09), 90-93+111.

[4]郑漳华,艾芊,徐伟华,施婕,解大 & 韩利. (2010). 智能电网经济运行的多目标调度优化策略(英文). 电网技术(02), 7-13. doi:10.13335/j.1000-3673.pst.2010.02.001.

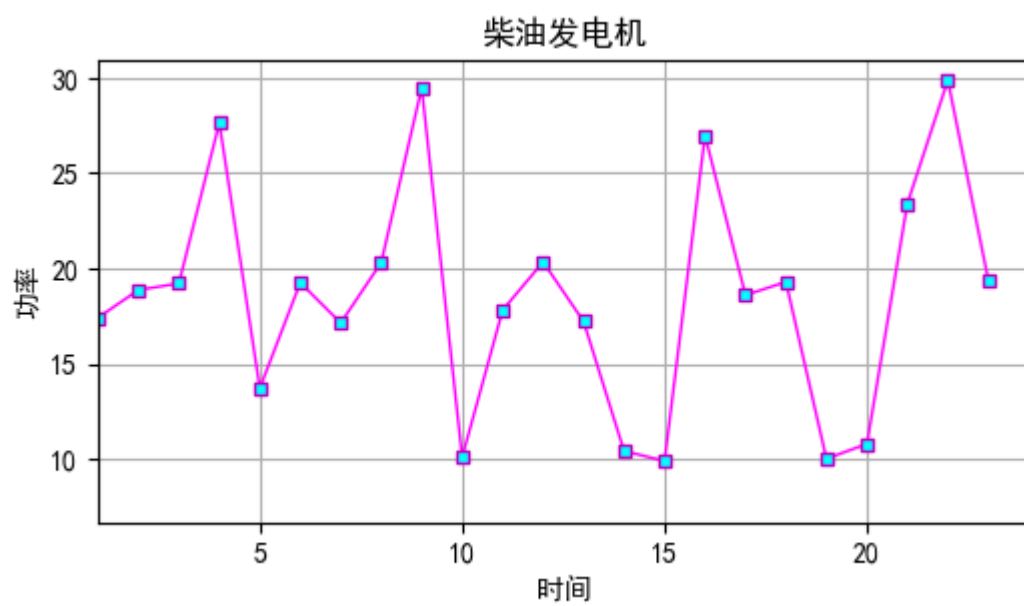
附录



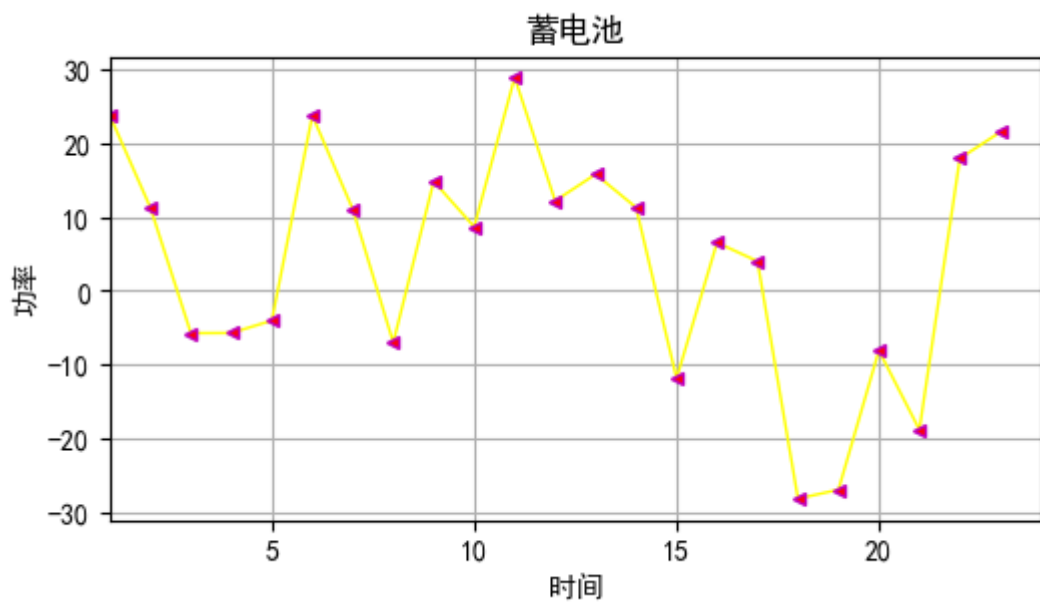
附图 1 经济与环境综合调度下光伏出力情况



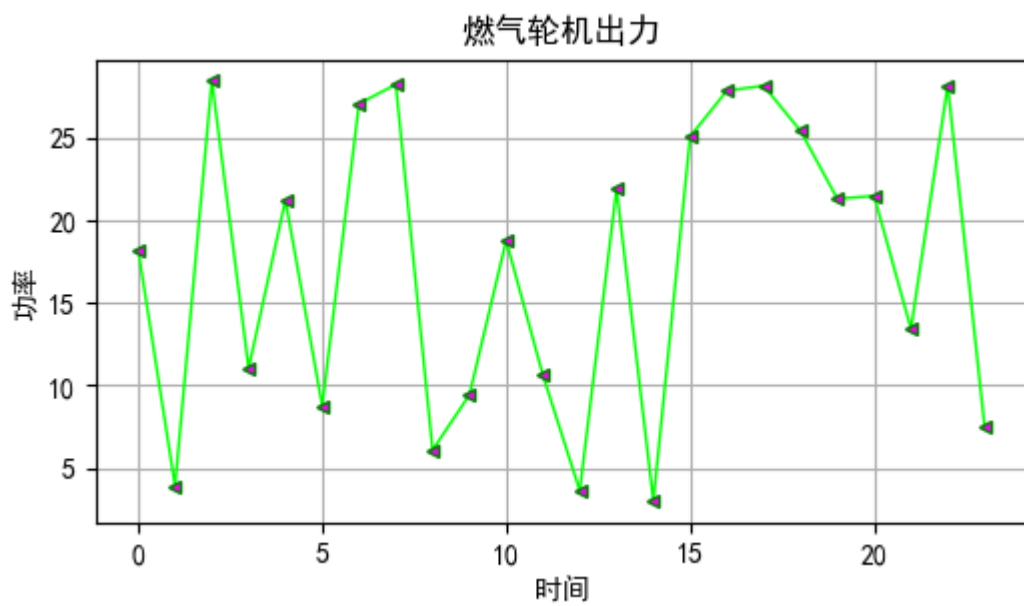
附图 2 经济与环境综合调度下风电出力情况



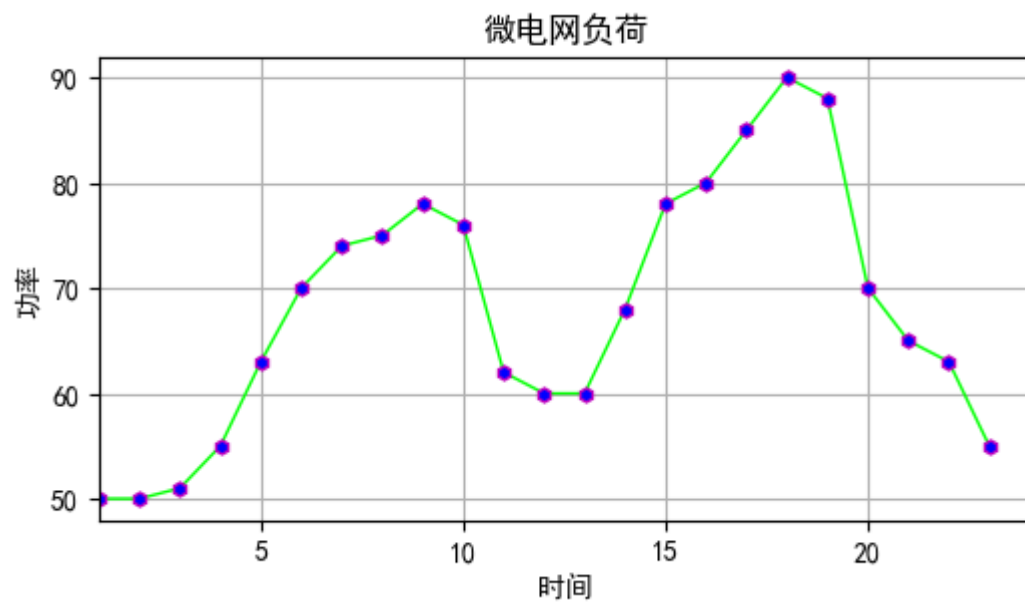
附图 3 经济与环境综合调度下柴油发电机出力情况



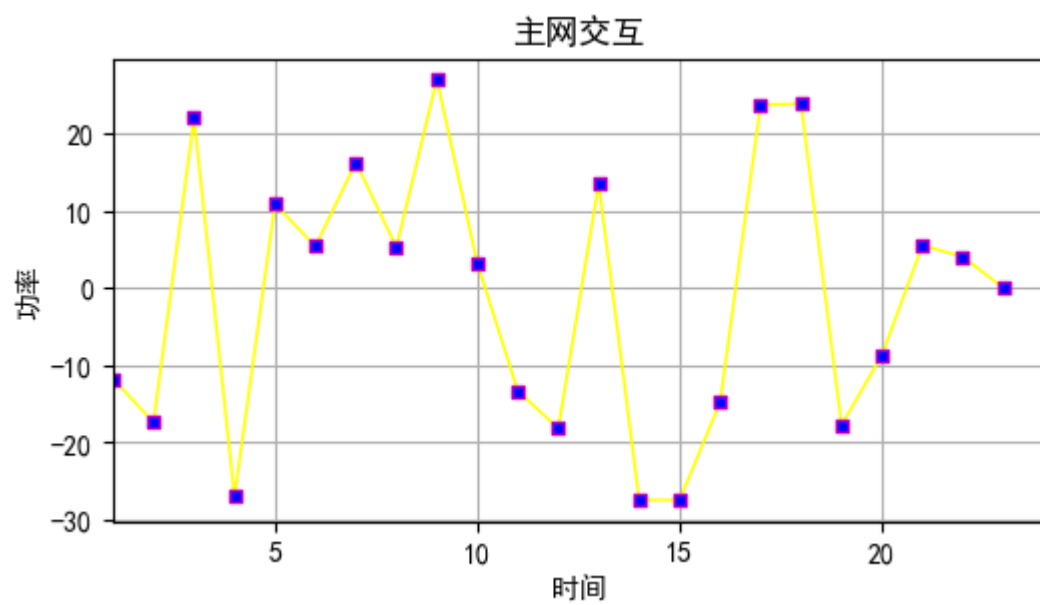
附图 4 经济与环境综合调度下蓄电池出力情况



附图 5 经济与环境综合调度下燃气轮机出力情况



附图 6 微电网负荷情况



附图 7 经济与环境综合调度下主网交互情况