

[优化调度]

含多类型分布式电源的微电网优化调度方法

文/杨夏喜 魏兵兵
苏州市产品质量监督检验院

针对含多类型分布式电源的微电网在并网运行模式下的优化调度问题，对风能、太阳能、微型燃气轮机和蓄电池在内的四种能源形式，结合实时电价和蓄电池损耗因素，提出了三种不同的电网交互策略。基于改进的多目标粒子群算法增强了初始解的分布均匀性，从而有效提升算法的搜索效率和解的质量。仿真结果验证所述方法的可行性和有效性。

微电网整合分布式电源、用电负荷和储能设备等多种电力组件，具备传统电网所不具有的灵活性，能够根据需求和环境条件自主选择运行模式，包括并网运行和孤岛运行，有效提高供电的可靠性和能源利用效率^[1]。微电网大多利用间歇性、波动性的可再生能源，其优化调度至关重要。

在微电网优化调度方面，文献[2]采用高斯回归方法，构建基于区间概率不确定性集合的微电网最优调度模型，从而提高微电网的运行效率。文献[3]在此基础上，针对微电网的季节性特征，建立考虑碳排放的电力网络模型，利用全生命周期评价方法，对微电网内分布式电源运行状态进行优化。文献[4]针对光伏发电的间歇性特点，开展相应的调度策略优化研究。文献[5]以提升微电网能量利用效率为目标，结合“双碳”战略，构建微电网运行状态下的实时能耗管理策略，实现微电网的高效利用。文献[6]研究微电网中存在大量电动车的情况下，对微电网的调度策略进行优化，确保微电网在大规模负载接入情况下的稳定运行和供电可靠性。文献[7]提出了一种基于二阶导数的最优搜索梯度算法，并利用该算法对不同类型的分布式电源进行优化调度。文献[8]以含风电的微电网为研究对象，针对风

电功率的动态变化，采用 SVM 等方法对风电功率进行预测，实现微电网的精准调度。文献[9]以海岛微电网为研究对象，以降低风电弃用率为目标，采用模糊隶属函数进行优化调度。

微电网优化调度是一个复杂的多目标非线性问题，涉及多种约束和变量。需要先进的计算方法来求解，粒子群算法以其高效性和适应性，可有效管理微电网中的资源，实现成本最优化，同时保证电力供应的稳定性和可靠性。本研究针对含风电、光伏、燃气轮机和蓄电池等多种分布式电源的并网型微电网的优化调度问题，在构建各类电源的详细发电模型的基础上，研究以经济成本和环保成本为双重优化目标，确保电网在运行过程中的成本效益和环境影响最优化。

微电网优化模型

1. 优化目标

微电网优化调度是一类具有多目标、多模型的复杂非线性问题，需要考虑环境效益以及经济成本两方面的优化目标。

(1) 环境效益

以降低微电网污染治理成本为目标，尤其是

CO、CO₂、SO₂等主要污染物的治理成本。公式为

$$\min c_1 = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J a_j \left(\sum_{i=1}^N \beta_{ij} p_{it} + \beta_{mj} p_{mt} \right) \quad (1)$$

式中， c_1 为微电网污染物治理的运行成本； β_{ij} 为用于处理第*i*类污染物的成本； α_j 为第*j*种污染物在微电网发电单元中的折算系数； β_{mj} 为与电网进行电力交换时，大电网中污染物质的单位功率换算系数； p_{it} 为微电网在*t*时刻各电源的实际输出功率； p_{mt} 为在*t*时刻与电网的交互功率。

(2) 经济成本

经济费用目标是保证微电网运营费用最小，包括燃料费用、检修费用、电网建设费用和与其他电网之间的电力交易费用。这个经济费用函数用公式表示为

$$\min c_2 = \sum_{t=1}^T \left(c_f(t) + c_{ma}(t) + c_v(t) + k c_{grid}(t) \right) \quad (2)$$

$$c_f(t) = \sum_{i=1}^N c_{fuel} \times \frac{1}{LHV} \times \sum_{i=1}^T \frac{p_i(t)}{\eta_i(t)} \quad (3)$$

式中， c_{fuel} 为燃料的市价；LHV为所使用的原材料的低热值； $p_i(t)$ 为微电网系统的第*i*个发电装置在时间点的主动能量； $\eta_i(t)$ 为微电网系统的第*i*个发电装置的燃烧效率。 $c_{ma}(t)$ 是微电网的例行维修费用，包含了对设备的维修、线路的维修和维修人员的费用，具体的维修费用计算公式为

$$c_{ma}(t) = \sum_{i=1}^N K_{ma, it} * p_i(t) \quad (4)$$

式中， $p_i(t)$ 为微电网系统的第*i*个发电元在*t*时刻的有功； $K_{ma, it}$ 为微电网系统第*i*个电压时所需要的维护系数。

$c_v(t)$ 为配套一套完整的微电网系统所需要的投入费用，用公式表示为

$$c_v(t) = \sum_{i=1}^N \frac{c_i}{8760 K_i} \times \frac{d_i(1+d_i)^{r_i}}{(1+d_i)^{r_i} - 1} \times p_i(t) \quad (5)$$

式中， N 为微电网的电源类型； c_i 为构建该第*i*种微电网的发电装置的安装费； K_i 为该电网中的第*i*种电源的额定容量，其中， K_i 为第*i*个发电装置单位小时生产的电力， d_i 是电源的折旧成本， r_i 是电池的折旧年龄。

当微电网连接到大电网时，依赖于电价的电力交换费用表示为 c_{grid} ，计算公式为

$$c_{grid}(t) = C_b(t) N_b(t) - C_s(t) N_s(t) \quad (6)$$

式中， $c_b(t)$ 大电网对微电网的售电电价； $c_s(t)$ 微电网对大电网的售电电价； $N_b(t)$ 微电网对微电网的购电量； $N_s(t)$ 微电网的剩余可售电量。

2. 约束条件

(1) 能量平衡约束

微电网能量平衡约束公式为

$$\sum_{t=1}^T (p_m(t) + p_s(t)) = \sum_{t=1}^T \left(\sum_{i=1}^N p_i(t) + p_g(t) \right) \quad (7)$$

式中， $p_m(t)$ 为*t*时刻的负荷； $p_i(t)$ 为*t*时刻微电网发电功率； $p_s(t)$ 为*t*时刻的网损； $p_g(t)$ 为微电网与上级电网的功率交换。

(2) 各发电单元出力约束

分布式电源出力约束公式为

$$p_{i, \min} \leq p_i(t) \leq p_{i, \max} \quad (8)$$

式中， c 为第*i*种电源可输出的最小功率； $p_{i, \max}$ 为第*i*种电源可输出的最大功率。

(3) 电网功率交换约束

当微电网的分布式电源出力不能满足负荷需求时，需要与大电网进行功率交换，功率交换约束公式为

$$p_{g, \min} \leq p_g(t) \leq p_{g, \max} \quad (9)$$

式中， $p_{g, \min}$ 为微电网和大电网间的交流电力最小； $p_{g, \max}$ 为微电网与大电网间的交流电力最大。

(4) 储能装置容量与充放电约束

储能具有容量约束及充放电约束，可表示为

$$0 \leq p_D(t) \leq p_{D, \max} \quad (10)$$

$$0 \leq p_C(t) \leq p_{C, \max} \quad (11)$$

$$SOC_{\min} \leq SOC(t) \leq SOC_{\max} \quad (12)$$

式中， $p_D(t)$ 为电池的放电功率； $p_C(t)$ 为电池充电功率； $p_{D, \max}$ 为最大放电功率； $p_{C, \max}$ 为最大充电功率； $SOC(t)$ 为蓄电池在*t*时刻剩余容量； $SOC_{\min}$ 为蓄电池最小剩余容量； $SOC_{\max}$ 为蓄电池最大容量。

基于改进多目标粒子群算法的微电网优化调度

微电网的优化调度是一个典型的多目标优化问题。采用多目标粒子群优化算法求解，该算法采用基于外部存档和帕累托解集，每一次迭代都会产生一组非劣解。在迭代过程中，算法侧重于粒子间的互相学习，以及如何储存这些非劣解以保持解的多样性，并选取合适的样本进行学习。

在多目标粒子群算法中，起始解的质量对算法能否有效搜索到最优解具有显著影响。由于系统内随机数生成的不可预测性，算法难以确保解的分布均匀性，这可能导致粒子过度聚集。为了在处理微电网多目标优化问题时获得更优质的结果，改进其初始解的生成过程。为增强数据在搜索空间的分布均匀性，确保粒子在该空间内广泛分布，并增加初始解的覆盖范围，本文通过引入佳点集实现对算法的改进。

佳点集的概念最初由知名数学家华罗庚提出，定义如下：假定 G_s 表示一个 s 维单位立方体空间，在这个空间中，存在一个所谓的佳点 r ，此点满足 r 属于 G_s 。在相同的 s 维空间中，定义了一个偏差函数 $\varphi(n)$ ，具体公式为

$$C(r,\varepsilon)\varphi(n)=C(r,\varepsilon)n^{-1+\varepsilon} \tag{13}$$

式中， $C(r,\varepsilon)$ 是 r 与 ε 相关的常数点。佳点集函数 $P_n(k)$ 表示为

$$Pn(k)=\left\{\left\{r_1^{(n)}\times k\right\},\dots,\left\{r_s^{(n)}\times k\right\}\right\},1\leq k\leq n \tag{14}$$

在佳点集函数中令 $r=\left\{2\cos\left(\frac{2\pi k}{p}\right),1\leq k\leq s\right\}$ ，其中 p 为最小素数且满足 $\frac{p-3}{2}\geq s$ ，将设定的佳点集函数在多目标粒子群算法搜索空间内进行映射，获得映射后的公式为

$$X_{i,j}=(ub-lb)\times\left\{r_j^{(i)}\times k\right\}+lb \tag{15}$$

在采用佳点集思想进行改进的多目标粒子群优化算法中，与传统粒子群算法相比，在种群初始化阶段，改进算法能生成更均匀的初始种群分布，从而得到了比传统多目标粒子群算法更优的帕累托解。

仿真分析

1. 参数设置

微电网系统中，分布式电源的特性参数对系统运行效率和环境成本有直接影响。表1和表2为与分布式电源有关的污染排放量因子的有关技术参数，表3为不同时段微电网与大电网电能交换价格。

表1 微电网中相关参数

电源类型	额定功率 /kW	燃料费用 /[元/ (kW·h)]	运行费用 /[元/ (kW·h)]	折旧年限 /年	安装费用 /[元/ (kW·h)]	容量因素 (%)
WT	10	0	0.0450	10	2.375	22.13
PV	10	0	0.0096	20	6.650	29.34
MT	65	0.211	0.1280	10	1.306	54.99
FC	40	0.211	0.0293	10	4.275	36.73
Grid	50	0	0.0450	10	0.084	32.67

表2 微电网中污染物排放系数

污染物类型	污染物治理费用 (元/kg)	污染物排放系数/[g/ (kW·h)]				
		WT	PV	MT	FC	Grid
CO	10.29	0	0	0.047	0	0.081
CO ₂	0.21	0	0	724	489	889
SO ₂	14.842	0	0	0.003 6	0.003	0.8
NO _x	62.946	0	0	0.2	0.014	0.6

表3 不同时段微电网与大电网电能交换价格表

	分时电价[元/ (kWh)]			固定电价 /[元/ (kWh)]
	谷时段	平时段	峰时段	
购电	0.17	0.49	0.83	0.50
售电	0.13	0.38	0.65	0.39

2. 结果分析

本文考虑微电网在并网模式下的三种运行方式进行仿真分析。

1) 电网仅向微电网供电。如果微电网的总发电

量未能满足用户的需求，则必须购买大电网的电力以补充不足；反之，如果发电量超过需求，则将多余的电能储存于蓄电池中。

2) 电网与微电网之间的能量交换为双向的。

微电网的发电能力超出电网的负荷要求时，储能系统将首先储存在储能系统中。当电池电量达到80%以上时，就可以把剩余的电量卖给电网，从而获得利润。

3) 本项目将考虑电力价格及储能损失系数，在电网与微电网间实现能量的双向转换。此时，蓄电池的充放电操作将受到特定的约束，并对蓄电池的损耗进行计算，通过比较电价差异来确定最佳的充放电策略。

以综合效益最优为目标，对以上所提出的各种模拟方案进行分析。按方案1运行后，各个微源在微电网中的输出情况如图1所示。这种运行方式没有考虑到电力价格的影响，能量只从大电网传输到微电网。仿真结果表明，风电、光伏发电均已达到最大功率，并优先提供给当地负荷；当风光出力不能满足负荷需求时，采用小型燃气轮机提升功率。在连续运行的情况下，微型燃气轮机的出力比较大；当电力供应不足时，需要依靠储能及燃料电池等辅助设备。另外，当光伏、风电和小型燃气轮机发电总量超出当地用电负荷时，多余的电能会被储存在储能装置中；最后，若本地电源仍无法满足负荷需求时，则可从上级电网购买电能。

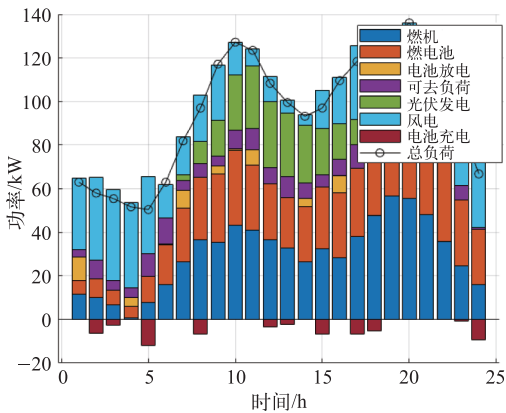


图1 方案1的系统出力情况

按方案2运行后，图2展示了微电网系统中各个微源的输出。与第一种方法最大的不同是要考虑电网和微电网间的能量流向。模拟结果表明，该方法能显著提高电池在系统中的充电和放电行为；当电网产生超过当地需要的功率时，多余的电力被卖给大电网，特别是在早上5:00—8:00和晚上8:00—24:00期间。在其他时间段，则根据电力需求和电价变化向大电网购电。

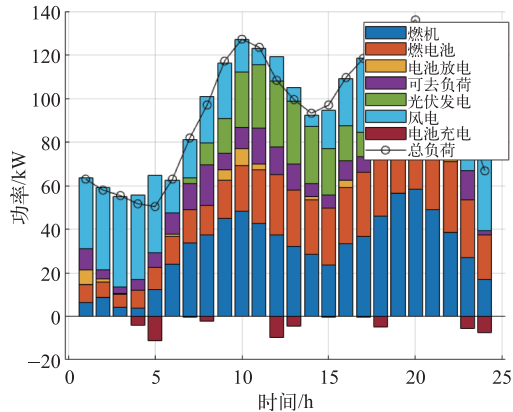


图2 方案2的系统出力情况

按方案3运行后，图3中显示了微电网系统中的单独的微源输出。除考虑电力价格因素外，还考虑了电能在大电网与微电网之间的双向流动及蓄电池损失。应优先利用太阳能、风能等新能源，确保最大的经济效益；同时通过对电力价格进行动态调节，实现了发电效率的最优。在充电和放电时考虑到电池的损耗费用，依据电力价格的变化和损耗费用，对蓄电池的充放电策略进行调节。

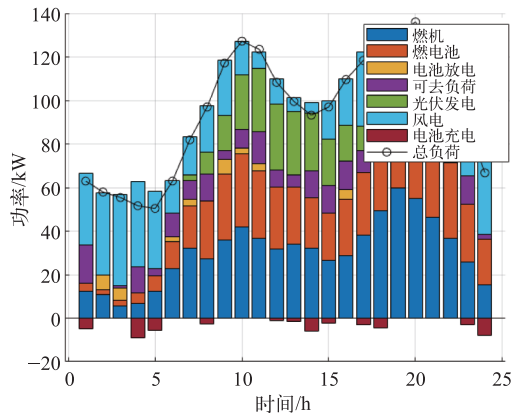


图3 方案3的系统出力情况

3种运行方案运行情况下微电网系统的运行成本、环境成本以及总成本见表4。

表4 不同运行方案下成本
(单位: 元)

运行方案	运行成本	环境成本	总成本
方案1	1 479.8	123.1	1602.9
方案2	1 469.9	122.6	1592.5
方案3	1 407.6	121.7	1529.3

从表4中的数据分析可以看出：前两种方案均采用固定价格，方案2采用能量双向流动，方案3进一

步采用分时电价以及蓄电池的损耗因素,三种方案的总成本分别为1 602.9元、1 592.5元和1 529.3元。

方案2与方案1相比,总成本降低0.65%,运行成本下降0.67%,环境成本降低0.41%。方案3与方案1和2相比,其总成本分别降低了4.59%和3.97%,运行成本分别下降4.88%和4.24%,环境成本分别下降1.14%和0.73%,显示出最佳的优化效果。

根据分析可知,方案3综合考虑分时电价和蓄电池损耗因素,并实现能量的双向流动,具有更优的经济和环境效益。

结束语

本文对并网模式下的微电网的优化调度进行研究和仿真分析,引入多种分布式电源和考虑环境及经济因素,分析不同调度策略对系统性能的影响。通过粒子群优化算法优化微电网的运行策略,实现成本和环境双重优化目标。仿真分析表面,方案3综合考虑电价、蓄电池损耗及能量双向流动的策略,相较于其他方案显示出更高的经济性和环境效益。研究成果为含多种分布式电源的微电网高效、环保、经济运行及能源管理优化提供技术支撑。**EA**

(收稿日期: 2025-09-05)

参考文献

[1] Dong Haiyan, Fu Yanbo, Jia Qingquan, et al. Low carbon optimization of integrated energy microgrid based on life cycle analysis method and multi time scale energy storage[J]. Renewable Energy, 2023, 206.

[2] 任昊, 邱晓燕, 张志荣, 等. 含电动汽车的交直流混合微电网优化调度研究[J]. 电气传动, 2022, 52(15): 23-30.

[3] Bai Cong, Li Qiang, Zhou Weihao, et al. Weighted matrix based distributed optimization method for economic dispatch of microgrids via multi-step gradientdescent[J]. Energy Reports, 2022, 8(S15).

[4] Mathiesen Patrick, Stadler Michael, Kleissl Jan, et al. Techno-economic optimization of islanded microgrids considering intra-hour variability[J]. Applied Energy, 2021, 304.

[5] 薛泽华. 基于风电功率预测信息的需求响应微电网优化调度研究[D]. 兰州理工大学, 2022.

[6] 叶清泉, 林厚飞, 金建新, 等. 考虑经济性和灵活性的海岛微电网优化调度策略[J]. 浙江电力, 2022, 41(3): 54-64.

[7] Yavuz Abdurrahman, Celik Nurcin, Chen Chun-Hung, et al. A Sequential Sampling-based Particle Swarm Optimization to Control Droop Coefficients of Distributed Generation Units in Microgrid Clusters[J]. Electric Power Systems Research, 2023, 216.

[8] 彭伟款, 郭紫娟, 张先勇, 等. 基于NSGA-II和模糊决策的交直流混合微电网多目标优化调度[J]. 广东电力, 2023, 36(2): 42-51.

[9] 王怡文, 李洁, 李泽宽, 等. 基于改进生物地理学算法的并网型微电网优化调度[J]. 电力科学与工程, 2023, 39(2): 55-63.

