

[电力调度]

企业微电网优化调度与经济性分析

文/司文旭¹ 胡晓²

1. 江苏安科瑞微电网研究院有限公司; 2. 贵州省建筑设计研究院有限责任公司

以微电网系统运行成本最小为目标, 构建微电网经济优化调度模型, 并采用改进的粒子群算法对目标函数进行求解, 获取系统经济最优的调度策略。结合某生产型企业微电网进行测试, 结果验证所提改进算法下系统模型能够实现微电网经济最优, 对企业微电网优化调度与经济运行有一定的指导意义。

“双碳”目标下的电力改革, 推动以新能源为主体的新型电力系统的快速发展, 促进传统能源向新能源的转变, 未来新能源在电力系统的占比也将逐渐增加。但因传统发电受自然灾害的影响、分时电价政策的出台, 作为用电侧的企业用户其供电可靠性与用电成本也增加企业正常运行的负担。随着新能源装机成本的下降, 越来越多的企业通过构建内部的微电网来解决用电需求及用电成本过高的问题。企业微电网作为分布式电源的主要载体, 将企业内部的“源网荷储充”及监测装置有机结合, 具有高度自治的能力, 不仅能够满足并网条件下的企业正常用电, 同时也能在电网出现故障时, 通过离网模式, 保证重要负荷的正常运行。但分布式光伏因受环境、地理的影响, 其出力具有一定波动性和随机性, 给微电网的供电质量造成一定的影响, 同时也导致新能源有效利用降低, 造成企业综合用电成本居高不下。如何在保证安全、可靠的供电情况下, 通过微电网内部资源的灵活调度, 实现企业微电网的经济优化运行, 成为当前最大的问题。因此本文针对此问题展开研究与分析。

企业微电网经济调度模型

1. 系统结构

典型的企业微电网系统主要由市电、分布式光伏、储能等分布式电源以及负荷(含可调负荷、如

充电桩、空调等)各部分组合而成, 系统结构如图1所示。在并网运行情境下, 企业微电网的运行策略: 优先利用光伏给负荷供电, 当光伏不足时, 比较市电与储能的放电价格, 如果是高峰电价, 则分布式光伏和储能共同为负荷供电, 否则分布式光伏和市电共同给负荷供电。在离网运行情境下, 企业微电网的运行策略是储能作为主电源, 为光伏系统提供参考电源, 共同为企业微电网内的负荷供电。

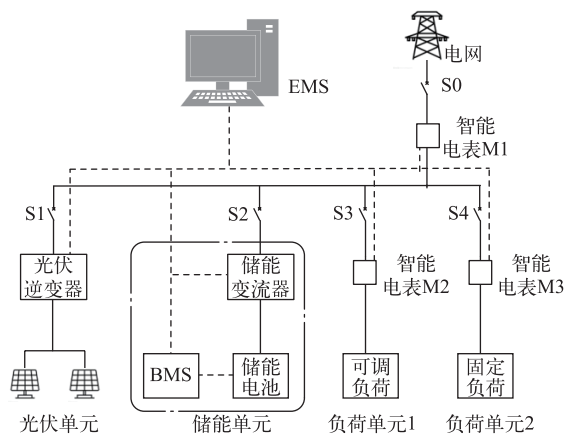


图1 企业微电网系统结构

2. 数学模型

考虑企业微电网主要工作在并网模式下, 且以市电+光伏+储能为供电单元, 因此本文主要研究企业微电网内的光储模型。

(1) 光伏数学模型

对于光伏系统来说，系统出力主要取决于光伏系统接收到的光照强度和温度，因此光伏系统的出力可以表示为

$$P_{pv} = \frac{G}{G_{ref}} [P_{max,0} + \mu_{pmax}(T - T_{ref})] \quad (1)$$

式中， P_{pv} 为光伏发电的输出功率； $P_{max,0}$ 为光伏发电系统在标准测试条件下的最大输出功率； μ_{pmax} 为温度引起输出最大功率变化系数； G 为太阳能辐射强度； T 为光伏电池绝对温度； G_{ref} 为标准环境下太阳能辐照强度； T_{ref} 为标准温度。

(2) 储能数学模型

$$SOC(t) = \begin{cases} (1-\varepsilon) \times SOC(t-1) - P_{b,c} \times \Delta t \times \eta_c / E_b \\ (1-\varepsilon) \times SOC(t-1) - P_{b,d} \times \Delta t \times (\eta_d \times E_b) \end{cases} \quad (2)$$

式中， $SOC(t)$ 、 $SOC(t-1)$ 为 t 、 $t-1$ 时刻的电池剩余电能； ε 为自放电率； E_b 为电池的容量； $P_{b,c}$ 、 $P_{b,d}$ 为电池充放电功率； η_c 、 η_d 为充放电效率。

(3) 负荷数学模型

企业内部的负荷主要为固定负荷和可中断负荷，其负荷系统的数学模型为

$$P'_{Load}(t) = P_{Load0}(t) - \mu_L \times P_{Load}(t) \quad (3)$$

式中， $P'_{Load}(t)$ 为 t 时段企业内部的实际负荷需求量； $P_{Load}(t)$ 为 t 时段负荷可调整量； $P_{Load0}(t)$ 为 t 时段可中断负荷用户需求量； μ_L 为可中断负荷的投切变量，若 $\mu_L=0$ ，表示投可中断负荷，若 $\mu_L=1$ ，表示切可中断负荷。

3. 目标函数

为了充分消纳分布式光伏发电，减少弃光的情况；同时结合分时电价水平和光伏发电特征，动态调节电化学储能的充放电过程，在保证企业安全可靠用电的基础上，建立企业微电网运行费用最小的目标函数。目标函数 F 为总成本，包括用电成本 C_{grid} 、维护成本 C_m 和环境成本 C_{en} 。

$$F(t) = \min(C_{grid} + C_{en} + C_m) \quad (4)$$

其中，用电成本为

$$C_{grid} = \sum_{t=1}^T [e_{sell}(t) \times P_{grid.sell}(t) + e_{buy}(t) \times P_{grid.buy}(t)] \times \Delta t \quad (5)$$

式中， C_{grid} 为用电成本； $e_{sell}(t)$ 、 $e_{buy}(t)$ 分别为 t 时售电价格和购电价格； $P_{grid.sell}(t)$ 、 $P_{grid.buy}(t)$ 分别为微电网向电网售电量和购电量； t 为时间； T 为优化周期； Δt 为第 t 时段的时长。

维护成本为

$$C_m = \sum_{t=1}^T \left(\sum_{i=1}^N (C_i \times (P_i(t)) + K_{om,i} \times P_i(t)) \times \Delta t \right) \quad (6)$$

式中， C_i 为设备 i 的发电成本系数； $K_{om,i}$ 为设备的运行维护系数； $P_i(t)$ 为所需维护的设备容量大小； N 为设备总数； t 为时间； T 为优化周期。

环境成本为

$$C_{en} = \min \sum_{t=1}^T \left(\sum_{i=1}^N \left(\sum_{j=1}^M (K_{tre,i,j} \times K_{ex,i,j} \times f_i(t)) \right) \times \Delta t \right) \quad (7)$$

式中， $f_i(t)$ 为设备排放的污染物； $K_{tre,i,j}$ 为相应污染物的治理成本； $K_{ex,i,j}$ 为相应污染物 j 的排放系数； N 为设备总数； M 为污染物种类； t 为时间； T 为优化周期。

4. 约束条件

为保证企业微电网安全稳定运行，系统还需满足功率平衡约束、爬坡率约束、出力上下限约束，表达式为

$$P_{grid}(t) + P_{bat}(t) + P_{pv}(t) = P_{load}(t) \quad (8)$$

式中， $P_{grid}(t)$ 微电网与大电网交换功率， $P_{grid}(t)>0$ 表示电能从大电网流向微电网， $P_{grid}(t)<0$ 表示电能从微电网流向大电网； $P_{bat}(t)$ 为储能充放电功率， $P_{bat}(t)>0$ 表示储能系统放电， $P_{bat}(t)<0$ 表示储能系统充电； $P_{pv}(t)$ 表示光伏系统的有功功率输出， $P_{load}(t)$ 表示负荷系统所吸收的有功功率；为保障微电网安全稳定的运行，延长分布式电源的使用寿命，还需要保证微电网中光伏发电单元始终保持在其发电功率的上限和下限范围之内运行。

储能容量约束为

$$\begin{aligned} SOC^{\min} &< SOC(t) < SOC^{\max} \\ 0 &< P_{bat}^{dis}(t) < P_{bat}^{dis,max} \\ 0 &< P_{bat}^{cha}(t) < P_{bat}^{cha,max} \end{aligned} \quad (9)$$

式中， $SOC^{\min}$ 为保持电池正常运行的荷电水平下限； $SOC^{\max}$ 为保持电池正常运行的荷电水平上限； $SOC(t)$ 为储能剩余容量与额定容量的百分比； $P_{bat}^{dis}(t)$ 为储能的放电功率； $P_{bat}^{cha}(t)$ 为储能的充电功率； $P_{bat}^{dis,max}(t)$ 为放电功率上限； $P_{bat}^{cha,max}(t)$ 为充电功率上限。

改进粒子群优化算法

粒子群优化(PSO)算法，是通过研究鸟类觅食等复杂群体行为演变而来。数学描述： D 维空间内，种群粒子数量 N ，每个粒子在 t 时刻，其坐标位置为 $X_i(t) = (X_{i1}, X_{i2}, X_{i3}, \dots, X_{in})$ ，速度为

$V_i(t)=(V_{i1}, V_{i2}, V_{i3}, \dots, V_{iD})$, 第*i*个粒子迄今搜索到的个体最优位置为 $P_{\text{best}}=(P_{i1}, P_{i2}, P_{i3}, \dots, P_{iD})$, 种群的全局最优位置为 $g_{\text{best}}=(g_{i1}, g_{i2}, g_{i3}, \dots, g_{iD})$, 依据追随原则, 粒子 X_i 的速度和位置更新公式为

$$\begin{aligned} V_{id}(t+1) &= wV_{id}(t) + c_1r_1(P_{id} - X_{id}(t)) + c_2r_2(P_{gd} - X_{id}(t)) \\ X_{id}(t+1) &= X_{id}(t) + V_{id}(t+1) \end{aligned} \quad (10)$$

式中, w 表示权重系数, 一般取1; c_1 和 c_2 分别表示个体学习因子和群体学习因子, 一般取2; r_1 和 r_2 表示[0,1]之间均匀分布的随机数; $i=1, 2, 3, \dots, N$, 其中 N 表示粒子的数量。

在求解微电网优化调度问题时, 基本粒子群算法容易陷入局部最优而过早出现收敛, 因此本文针对企业微电网特点, 在基本粒子群算法的基础上做了一些改进。算法改进的思路是对现有算法中涉及的参数进行细化, 通过改进粒子的速度变化过程, 来优化原有算法的收敛性。

对权重系数、学习因子进行改进

$$\begin{aligned} \omega &= \omega_{\min} + (\omega_{\max} - \omega_{\min}) \cdot e^{-\tau/T} \\ c_1 &= c_{1,\min} + (c_{1,\max} - c_{1,\min}) \cdot e^{-\tau/T} \\ c_2 &= c_{2,\min} + (c_{2,\max} - c_{2,\min}) \cdot e^{-\tau/T} \end{aligned} \quad (11)$$

式中, $\omega_{\min}$ 、 $\omega_{\max}$ 分别为惯性权重系数的最小值和最大值, 一般取0.4、0.9; $c_{1,\min}$ 、 $c_{1,\max}$ 和 $c_{2,\min}$ 、 $c_{2,\max}$ 分别为 c_1 、 c_2 的最小值和最大值, 一般取0.5、2.5。

对速度和位置更新进行改进

$$\begin{aligned} V_{id}(t+1) &= wV_{id}(t) + c_1r_1(\beta_1P_{id} - X_{id}(t)) + c_2r_2(\beta_2P_{gd} - X_{id}(t)) \\ X_{id}(t+1) &= X_{id}(t) + V_{id}(t+1) \end{aligned} \quad (12)$$

式中, 通过引入步长弹性系数 β_1 、 β_2 , 对粒子的更新速度进行提高算法摆脱局部最优解的能力, 其中 $\beta_1=\beta_2$, β_1 和 β_2 由-1依次到1, 间隔0.1。

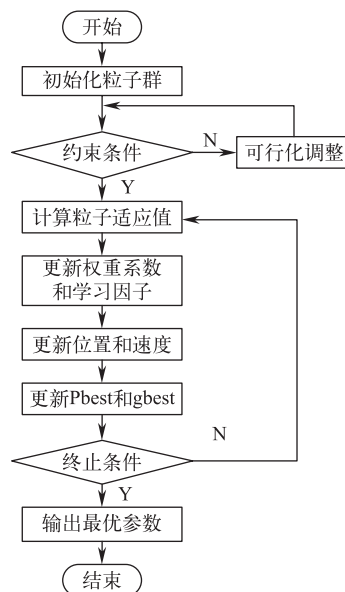


图2 算法改进流程图

算例

为了检验改进粒子群算法对企业微电网能量调度模型的优化, 以江苏某10 kV电压等级的企业为研究对象进行验证。企业微电网包括800 kW光伏机组、400 kW/2 400 kW·h的磷酸铁锂储能系统、350 kW的固定负荷及350 kW的可变负荷, 微电网运行在并网条件下。负荷、光伏功率预测曲线如图3所示。

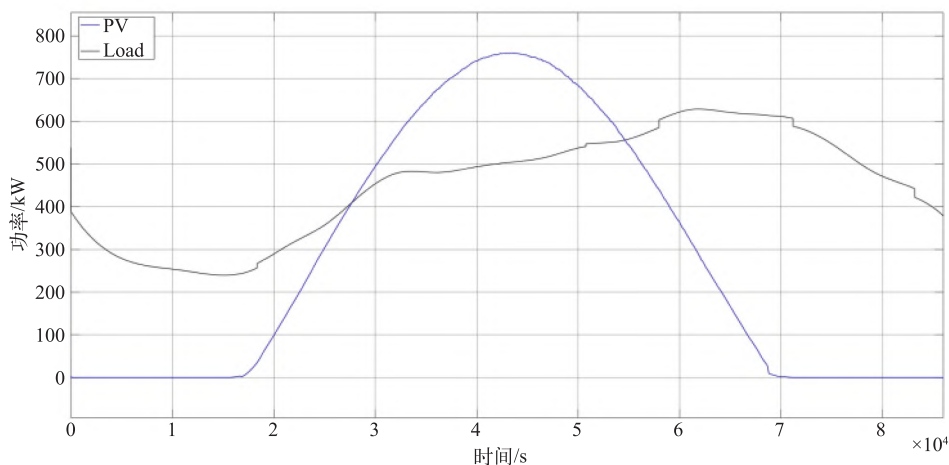


图3 光伏、负荷功率预测

各分布式电源、购售电价格见表1、表2。

表1 各系统参数

类型	下限功率/kW	上限功率/kW	运行成本/[元/(kW·h)]
光伏	0	800	0.015
储能	-400	400	0.027

其中储能总容量为2 400 kW·h，初始容量为50%，SOC正常运行范围为0.2~0.8之间。

表2 企业购售电价格

时间区间	购电价格/[元/(kW·h)]	售电价格/[元/(kW·h)]
0:00-08:00	0.283 5	0.3
08:00-11:00	1.165 0	0.35
11:00-17:00	0.677 5	0.35
17:00-22:00	1.165 0	0.35
22:00-24:00	0.677 5	0.3

环境治理成本主要是污染气体的治理成本。污染气体主要是SO₂和氮氧化合物的治理，具体的排

放系数和治理费用见表3。

表3 污染物种类和治理费用

污染气体	排放系数/[g/(kW·h)]			治理费用/(元/kg)
	电网	光伏	储能	
SO ₂	0.85	0	0	6.14
NO _x	0.63	0	0.021	25.46

规定种群规模 $N=100$ 、粒子维度 $D=30$ ，最大迭代次数 $T=500$ 。各系统出力曲线如图4所示。

通过仿真分析，系统首先利用夜间低谷时段对储能进行第一次充电，其次白天优先利用光伏发电对负荷进行供电，当光伏出力小于负荷需求时，负荷由光伏和储能共同供电，满足用电平衡；当光伏出力大于负荷需求时，光伏多余的电量优先给储能充电；同时利用白天平时时段对储能进行第二次充电；最后在晚高峰时，负荷主要由储能和市电共同供电，降低晚高峰时从市电所需电量，以此降低用电成本，如图5所示。

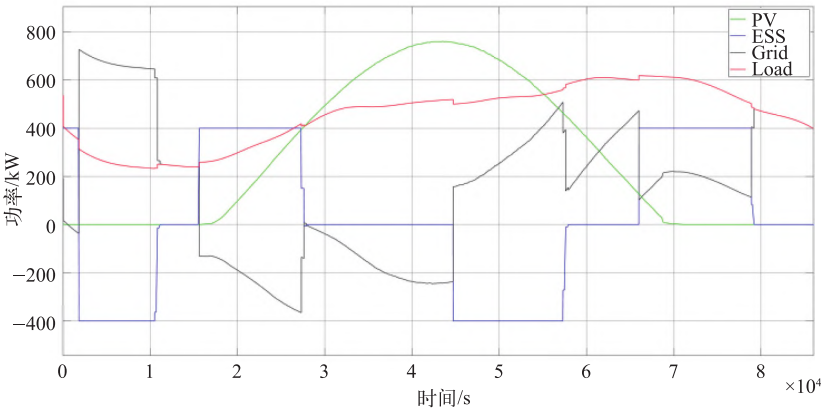


图4 各系统出力曲线

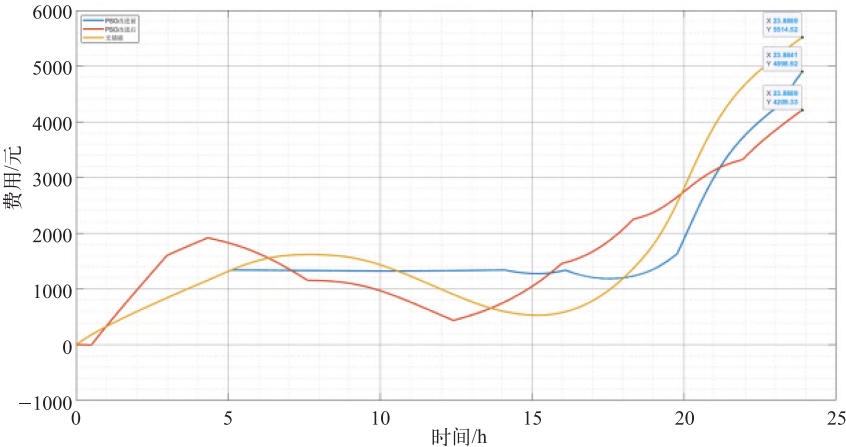


图5 费用对比

对比微电网系统在无储能、PSO改进前和PSO改进后的用电成本,可以看出,通过在配有分布式光伏系统的企业微电网中,加入储能系统。

通过改进后的粒子群算法相比于无储能和未改进前,微电网用电成本分别节约了1 305元、689元。因此在企业微电网中通过配置光伏、储能系统,并结合改进粒子群优化算法制定一个用电成本最优的调度计划,能够降低企业微电网运行的综合成本。

结束语

本文通过分析目前企业微电网存在的问题,对企业微电网内部系统的建模,在考虑企业微电网用电安全、可靠与经济下,构建企业微电网最优经济运行模型与目标函数,结合改进的粒子群算法对多维、多约束条件的目标函数进行求解,获取企业微电网最优的调度计划。结合某生产型企业微电网进行仿真验证,结果表明经过对微电网内部的资源灵活协调控制,能够有效降低企业综合用电成本,对企业微电网的优化调度与经济运行有一定的指导意义。EA

(收稿日期: 2024-08-07)

参考文献

- [1] 王明明. 微电网源网荷储协调优化调度策略研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2022.
- [2] 陈晓华, 吴杰康, 陈盛语, 等. 基于改进粒子群算法的微电网经济运行优化方法[J]. 黑龙江电力, 2023, 4(1): 23-29.
- [3] 钟雨哲, 周有为, 高忠江, 等. 基于ICA和NSGA-II组合算法的微电网优化调度[J]. 电气应用, 2022, 41(11): 78-84.
- [4] 陈丹凤, 赵才, 张志飞, 等. 基于改进差分进化算法的微电网调度研究[J]. 广西大学学报: 自然科学版, 2022(4): 47.
- [5] 周磊, 董学育, 朱建忠, 等. 基于改进蜂群算法的微电网优化调度[J]. 电气自动化, 2020, 42(5): 3.
- [6] 孙佳星, 王培宇, 胡兴媛, 等. 并网型微电网优化调度及经济性分析[J]. 东北电力技术, 2018, 39(9): 5.
- [7] 龚舒, 江雄峰, 刘雯, 等. 改进粒子群算法在电力调度自动化中的应用研究[J]. 自动化仪表, 2023, 44(2): 5.
- [8] 高杰. 基于粒子群算法的微电网经济调度优化[D]. 武汉: 长江大学, 2021.

