

Scheduling Strategy for Micro Grid in Grid-Connected Mode

Xingxuan Wang^{1,2}, Xiangyang Zhao¹, Wen Luo²

¹School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing

²Jiangxi ENACS Renewable Energy Resources and Micro Grid Innovations Co. LTD, Ji'an Jiangxi

Email: kaileichen@163.com

Received: May 27th, 2015; accepted: Jun. 16th, 2015; published: Jun. 23rd, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

The generation mode of the traditional grid is generally fixed; the optimization for economic load distribution is in accordance with the equal consumed energy ratio. While the micro grid is composed of the intermittent new energy generation and the load power of great uncertainty; how to formulate the effective scheduling method is the key problem of the development of the micro grid. This paper studies the Priority Method of Battery's SOC (PMBC) and Dual Particle Swarm Optimization (DPSO) algorithm aiming at scheduling strategy under grid connected mode, which is based on the micro grid with solar system, battery, diesel generator, controllable load, sensitive load. An example shows that the two strategies are correct and effective, and analysis and comparison of optimization results are conducted.

Keywords

Micro Grid, Scheduling Strategy, Grid-Connected Operation, Priority Method

并网下微电网调度策略研究

王杏玄^{1,2}, 赵向阳¹, 罗文²

¹北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院, 北京

²江西仪能新能源微电网协同创新有限公司, 江西吉安

Email: kaileichen@163.com

收稿日期：2015年5月27日；录用日期：2015年6月16日；发布日期：2015年6月23日

摘要

传统电网的发电模式一般固定，按照等耗量微增率优化负荷经济分配，而微电网是由间歇性、随机性很大的新能源发电及不确定性负荷组成，如何制定有效的调度方法称为发展微电网的关键问题。本课题以含光伏、蓄电池、柴油发电机、可控制负荷、敏感负载的微电网为对象，研究其并网模式下的调度策略，提出基于电池的荷电状态(SOC)的优先次序法与双重粒子群优化算法，经过算例证明这两种策略的正确性与有效性，并对优化结果进行对比分析。

关键词

微电网，调度，并网，优先次序法

1. 引言

微电网一般由太阳能发电、风力发电、微型水电、燃料电池、小型柴油发电机等其中几种发电装置和负荷、平抑微电源波动性。的储能装置组成，它们靠近电力用户，对环境友好，是未来电网的发展方向。按其是否与配电网是否连接分为孤岛和并网两种运行模式。传统电网中由于供电源为无穷大，仅仅是负荷经济分配的优化结果[1]；然而微电网中新能源发电的间歇性、随机性、极大，并且负荷变化也不确定，由于微电源种类的繁多与其出力特性的多样化，其机组组合则是微电源协调出力和负荷需求侧管理的综合优化。

文献[2]利用直流电源、双向的电池放电转换器和电池 SOC 制定电池的有序充电放电策略；文献[3]在考虑电池寿命的基础上避免过充过放，其对文献[2]的电池有序充放电策略深入探讨并建立了微电网导入功率、导出功率时各机组的优先级顺序，但是文中仅对荷源动态变化后电池 SOC 及相应电压变化进行仿真，而没有对提出的整体调度策略给出实际的仿真效果以及相应分析。智能算法中粒子群算法[4] [5]和遗传算法等[6]在机组组合中应用越来越多。文献[8]采用双重粒子群优化算法，离散 PSO 分时段优化机组的启停状态，连续 PSO 优化相应机组出力，但文中对功率平衡约束的求解并没有指出；本文将文献[7]中部分解约束的思想将等式约束变为不等式约束，加快粒子收敛速度。本文研究的微电网中包含光伏系统、蓄电池、柴油发电机、大电网、可控制负荷(ID 依次为 1~5)，基于动态规划法的思想，将并网时一天的机组组合采用分时段优化[6] [8]，每个时段的调度总成本为运行费用的基础上增加本时段机组的启、停费用。分别采用基于电池 SOC 的优先次序法、双重粒子群优化算法进行求解，并将两种方法的计算结果进行对比分析。

2. 调度系统建立

2.1. 目标函数方程

本文优化机组组合总费用最小的目标函数为：

$$\min F = \sum_{t \in T} \sum_{i=1}^D \{A_{Gi} [P_{Gi}(t)] + QT_i(t)\} \quad (1)$$

$$QT_i(t) = ST_i \times u_{Gi}(t) \times (1 - u_{Gi}(t-1)) + SD_i \times u_{Gi}(t-1) \times (1 - u_{Gi}(t)) \quad (2)$$

式中,第 i 个机组 t 时段的功率出力 $P_{Gi}(t)$, 开停机状态 $u_{Gi}(t)$, 运行费用 $A_{Gi}[P_{Gi}(t)]$, 启停费用为 $QT_i(t)$, ST_i 为机组启动费用, SD_i 为停机费用。

本文将机组运行费用(具体见 2.2 节)分为管理费用和燃料费用,并且把各机组燃料费用都设为一次式,具体见表 1; 设定每个调度间隔 $\Delta t = 1\text{h}$, 一天共 $T = 24$ 个调度段, 调度的控制量个数 $D = 5$ 。

2.2. 微电网各单元的运行费用

2.2.1. 光伏发电单元

无消耗无污染, 假设光伏发电的管理费用单价 $glf(1)$, t 时段的管理费用[7]:

$$C_1(t) = |P_{G1}(t)| \times glf(1) \times \Delta t \quad (3)$$

2.2.2. 储能电池

无燃料消耗, 可充可放, 充放电的管理费用:

$$C_2(t) = |P_{G2}(t)| \times glf(2) \times \Delta t \quad (4)$$

式中, $P_{G2}(t)$ 为 t 时段的充/放电功率(kW), $glf(2)$ 为电池的管理单价(元/kW·h)。

2.2.3. 柴油发电机

本文将柴油发电机的能耗 - 功率输出特性简化为一次表达式:

$$C_3(t) = P_{G3}(t) \times glf(3) \times \Delta t + P_{G3}(t) \times dj(3) \times \Delta t \quad (5)$$

$P_{G3}(t)$ 是柴油机 t 时段的出力(kW); $glf(3)$ 是其管理费用单价(元/kW·h); 燃料消耗费用 $dj(3) = 0.49$ (元/kW·h);

2.2.4. 大电网

只有燃料消耗成本且与大电网的与电价有关:

$$C_4(t) = P_{G4}(t) \times dj(t,4) \times \Delta t \quad (6)$$

$P_{G3}(t)$ 为 t 时段配电网的交换功率, 正为购电负为售电, $dj(t,4)$ 为 t 时段的配电网电价, 本文假设 t 时段的购、售电价一样。

2.2.5. 削减负荷的赔偿费用 C_L

本文研究的各时段可控制负荷 PKL, 假设其可增加也可减少, 且增加减少的费用单价相同。

$$C_4(t) = P_{G4}(t) \times 0.68 \times \Delta t \quad (7)$$

所有可控负荷的赔偿成本为 0.68 元/kW·h, $P_{G4}(t)$ 实际削减或增加的负荷量(kW)。

2.3. 约束条件

2.3.1. 不等式约束

① 光伏功率出力约束:

$$P_{G1}(t) \leq P_G(t) \quad (8)$$

式中, t 时段的光伏出力功率 $P_{G1}(t)$ (kW), 预测功率 $P_G(t)$ (kW)。

② 电池充、放电功率约束:

$$|P_{G2}(t)| \times \Delta t \leq (1 - SOC(t)) \times RL, \quad P_{G2}(t) < 0 \text{ 电池作为负荷, 充电} \quad (9)$$

$$P_{G2}(t) \times \Delta t \leq SOC(t) \times RL, \quad P_{G2}(t) > 0 \text{ 电池作为电源, 放电} \quad (10)$$

t 时段的电池充/放电功率 $P_{G2}(t)$ (kW), 荷电量 $SOC(t)$, 电池容量 $RL = 54$ (kW·h)。

③ 柴油发电机的最短运行时间、爬坡功率及最大出力约束:

$$\varphi(u_{G3}(t), YX) \geq 0 \quad (11)$$

$$P_{G3}(t) - jzcl(3, t-1) \leq PP \quad (12)$$

$$P_{G3}(t) \leq pc \quad (13)$$

$\varphi()$ 为最小运行时间函数, $u_{G3}(t), YX$ 分别是柴油机的 t 时段开停机状态 1 或 0 及最小运行时间 3 h, $P_{G3}(t)$ 为 t 时段的柴油机出力, $jzcl(3, t-1)$ 为 $t-1$ 时段的柴油机出力, 爬坡功率限值 $PP = 10$ kW, pc 为柴油机的额定功率 40 kW。

④ 微电网与大电网交互功率的限制:

$$-P_{G4}(t) \leq -CSP, \quad P_{G4}(t) < 0 \quad (14)$$

$$P_{G4}(t) \leq CGP, \quad P_{G4}(t) > 0 \quad (15)$$

$P_{G4}(t)$ 为 t 时段的交互功率, CSP 、 CGP 微电网与大电网的售电、购电量最大值, 正值对微电网而言相当于源, 负值对微电网而言相当于负荷。并网时令 $CGP = 60$ kW, $CSP = -60$ kW。

⑤ 可控负荷的约束:

$$P_{G5}(t) \leq PKL(t) \quad (16)$$

$P_{G5}(t)$ 为 t 时段的实际控制功率(kW), $PKL(t)$ 为 t 时段的可控制功率最大值。

2.3.2. 等式约束

$$\sum_{i=1}^4 u_{Gi}(t) P_{Gi}(t) = P_L(t) + u_{G5}(t) P_{G5}(t) + A \quad (17)$$

$$SOC(t) + P_{G2}(t) \times \Delta t = SOC(t+1) \quad (18)$$

$u_{Gi}(t)$ 、 $P_{Gi}(t)$ 是 t 时刻系统的第 i 个单元的开停机状态和出力, $u_{G5}(t)$ 、 $P_{G5}(t)$ 是可控负荷的开停机状态和出力, $u_{G5}(t) = 1$ 表示增加负荷, $u_{G5}(t) = -1$ 表示削减负荷。 A 是系统的允许不平衡量(kW)。

2.3.3. 部分解约束

$$P_{last} = \sum_{i=1}^4 u_{Gi}(t) P_{\max, Gi} - P_L(t) - A \quad (19)$$

在粒子初始化过程中, 将可控负荷的控制量设置为 P_{last} :

$$\text{if } P_{last} < -P_{G5}(t), \text{ then } P_{last} = -P_{G5}(t)$$

$$\text{if } P_{last} > P_{G5}(t), \text{ then } P_{last} = P_{G5}(t)$$

式中 $P_{G5}(t)$ 、 $-P_{G5}(t)$ 为可控负荷的上下限。

与最优潮流[9]-[11]优化机组有功、无功出力不同的是, 经济调度只涉及有功功率平衡; 文献[7]中指出如果优化的机组组合 U 满足约束而各机组的出力优化结果 P 与运行中实际最优值偏差 > 5 MW (系统总负荷为 500~600 MW), 都将视为没有求出最优解, 依据本文研究的微电网规模(负荷最小值 38 kW), 设定为 $A = 0.3$ kW。

3. 调度策略

3.1. 基于电池 SOC 的优先次序法

依据电池 SOC 的优先次序法调度流程如图 1 所示。

导入功率顺序：光伏、电池放电、柴油机增加出力、大电网、控制负荷；

导出功率顺序：电池充电、柴油机减小出力、大电网、控制负荷，为最大化利用可再生清洁能源，优先顺序法把光伏功率控制在最大出力状态且不可调度。

基于电池荷电状态的优先次序法可在较大程度上提高电池寿命。

不要使用空格、制表符设置段落缩进，不要通过连续的回车符(换行符)调整段间距。

注意：本文中将电池实际的荷电状态 0.4~0.9 已归一化为 0~1。

3.2. 双重粒子群优化算法

以微电网系统机组运行经济性为目标的双重粒子群算法的流程如图 2 所示。

双重粒子群优化算法中外层二进制粒子群算法的维数为 D ，优化机组的开停机状态 U ，内层连续粒子群算法的维数即为外层二进制 PSO 确定的开机状态 1 的机组数 QUN ，显然 $QUN < D$ ，并且各时段内层连续 PSO 的维数是变化的，优化外层 PSO 确定开机状态的机组的连续出力 P ；由这两个 PSO 组合为双重嵌套 PSO 算法。

机组运行费用、启停费用以及罚函数(等式约束)组成二进制 PSO 的适应度函数：

$$fitness = \sum_{i=1}^D \{A_{Gi} [P_{Gi}(t)] + QT_i(t)\} + \gamma \times \max \left(0, \sum_{i=1}^{D-1} P_{Gi}(t) - P_L(t) - P_{GS}(t) \right) \quad (20)$$

A_{Gi} 为机组的运行费用，包括燃料费用和管理费用(详见 2.2 节)， γ 为不平衡功率的惩罚因子， $QT_i(t)$ 为第 i 各机组 t 时段的启停费用。其中粒子群优化算法具体流程参见文献[12] [13]。

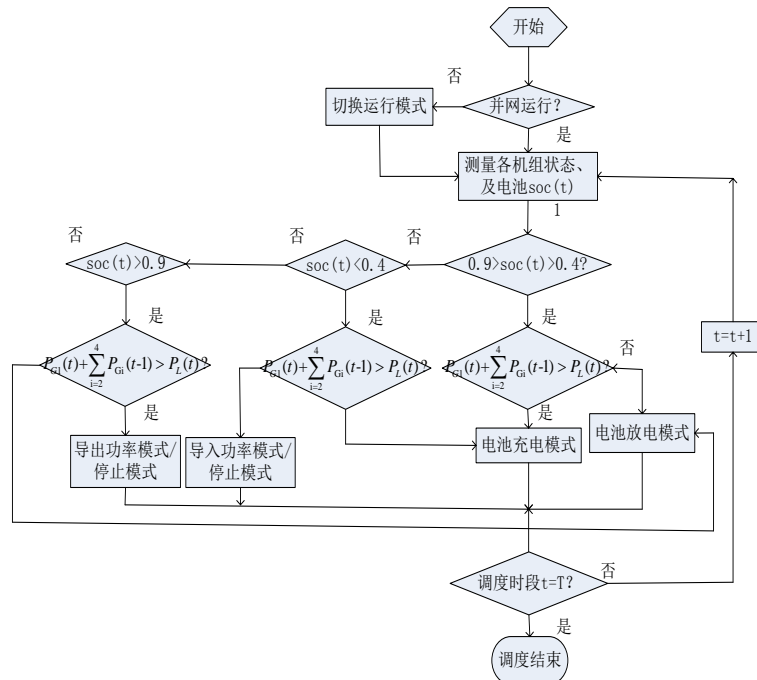


Figure 1. Scheduling strategy's flow chart based on PMBC

图 1. 基于电池 SOC 的优先次序法调度策略

4. 算例分析

4.1. 调度系统

本文研究的对象包含光伏、储能系统、柴油发电机、大电网、可控制负荷、敏感负载，微电网结构图如图3所示。

下面给出本文计算过程中所需各单元的功率预测值及相关信息[14] (见表1)。

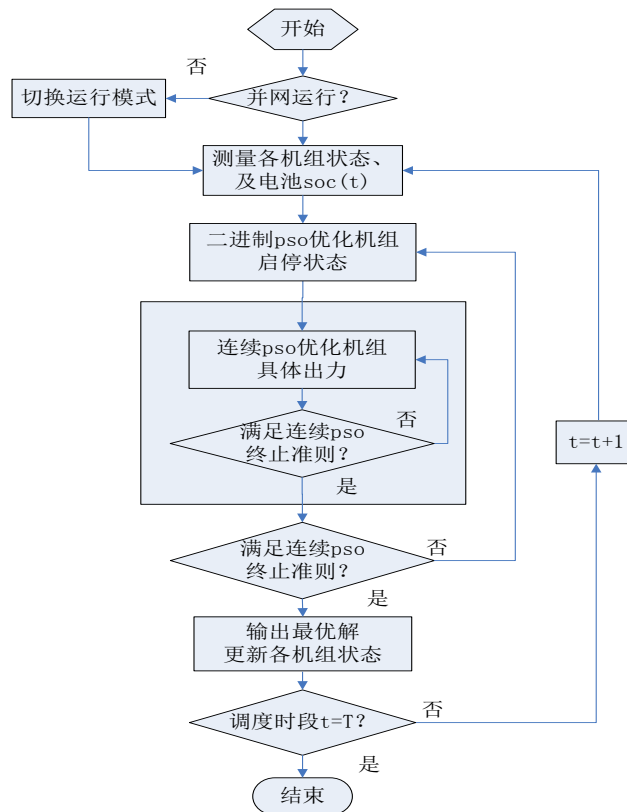


Figure 2. Scheduling strategy's flow chart based on DPSO
图2. 双重粒子群优化算法调度流程图

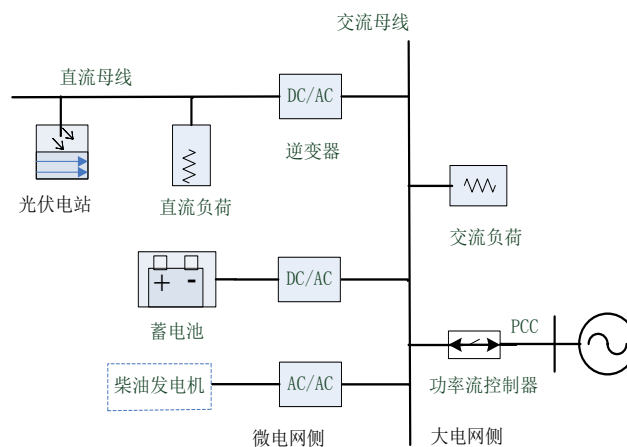


Figure 3. The micro grid structure
图3. 微电网结构图

图 4 为某本文调度日的配电网电价变化图。

图 5、图 6 分别为该调度日的光伏、负荷功率预测值。

4.2. 优先次序法调度结果及分析¹

如图 7 为基于电池 SOC 的优先次序法的机组效果，调度总费用 697.3634 元，图 8 为其对应的电池荷电状态变化图。

从 2 时段开始调度，各调度段的运行模式如表 2 所示。

Table 1. Relevant data of DER subsystem

表 1. 各单元的相关参数

单元	管理系数(元/kW·h)	燃料系数(元/kW·h)	启停费用(元/次)
1	0.0096	0	0
2	1	0	0
3	0.088	0.49	2
4	0	与电价相关	0
5	0.68	0	0

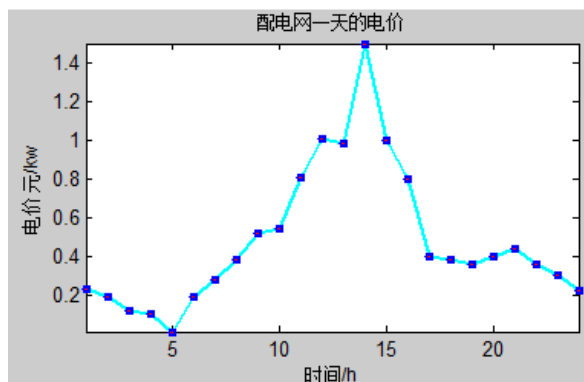


Figure 4. Pricing of the main grid

图 4. 配电网的电价图

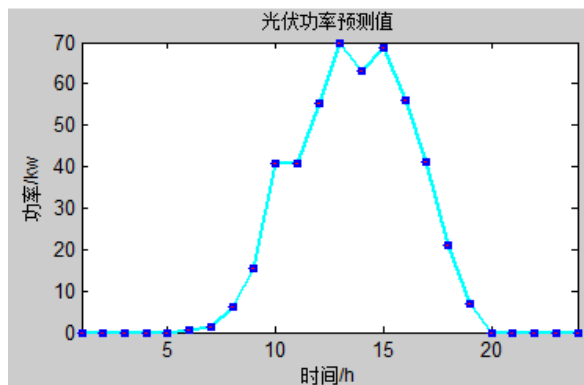


Figure 5. Predictive value of PV

图 5. 光伏发电预测值

¹ 图 7、图 9 机组组合效果图中，将所有“电源”为正值，所有“负荷”为负值，同一时间曲线上下值之和为 0，即有功功率平衡。

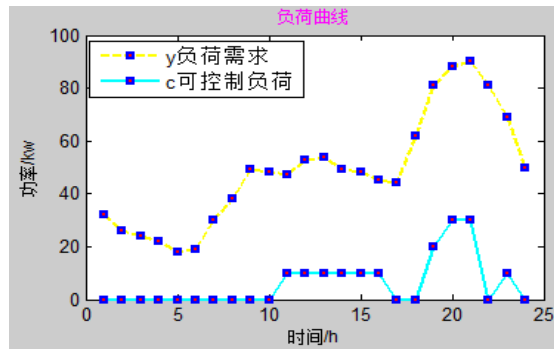


Figure 6. Load demand

图 6. 负荷需求

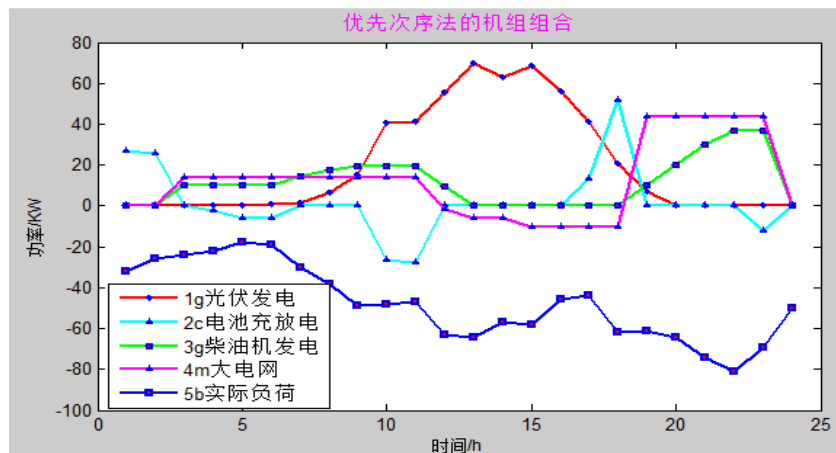


Figure 7. The unit commitment based on PMBC

图 7. 基于电池 SOC 的优先次序法的机组组合

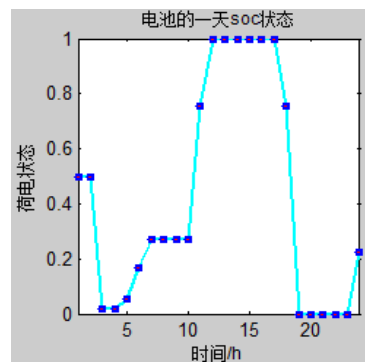


Figure 8. The SOC of battery's state of PMBC

图 8. 优先次序法电池荷电状态

各单元出力状态具体分析如下：

- ① 光伏功率一直保持最大功率出力；
- ② 电池的初始 SOC 为 0.5，在 2 点放电，SOC 下降，3 点不充不放，SOC 不变，4~6 点作为负荷充电，SOC 上升，7~9 点放电，不充不放，SOC 不变，10、11 点充电，SOC 上升，之后 SOC 不变，17、18 点放电，SOC 下降，之后 SOC 又不不变，23 点充电，SOC 上升。

③ 柴油机在 3 时段按爬坡功率及当前差额功率的约束下启动，4~6 点保持 3 时段出力，7~9 点都按当前差额功率的增加出力，10、11 点保持 9 时段的出力，12、13 按爬坡功率及当前差额功率的约束减少出力，14~18 停机，19~22 按爬坡功率及当前差额功率的约束增加出力，之后保持。

④ 微电网在 3~11 点向大电网购电，12~18 向大电网售电，19~24 向大电网购电。

⑤ 12~16 点增加可控负荷，实际负荷比原负荷增加；19、20、21 点减少可控负荷，实际负荷比原负荷需求降低；并且实际控制的负荷，都在允许可控制负荷范围内，满足约束。

4.3. 双重粒子群优化算法调度结果及分析

如图 9 为双重粒子群算法的机组效果，调度总费用 470.4222 元，图 10 为该策略对应的电池荷电状

Table 2. Battery's scheduling model of priority method in each period

表 2. 各时段优先次序法的电池调度模式

运行模式	SOC(t) > 0.9 放电	0.4 > SOC(t) 充电	SOC(t) ≤ 0.9 && 0.4 ≤ SOC(t)		导入功率	导出功率
			放电	充电		
时间	17	4~6、10、13	2、18	11	3、7~9、19~22	12~16

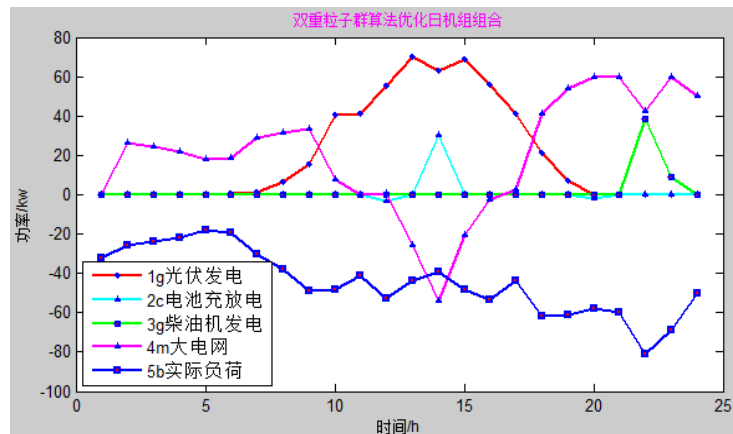


Figure 9. The unit commitment based on DPSO

图 9. 双重粒子群算法优化的机组组合

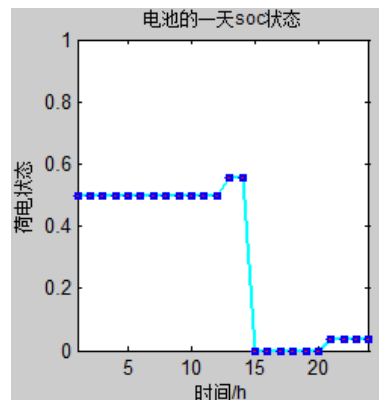


Figure 10. The SOC of battery's state of DPSO

图 10. 双重粒子群优化电池 SOC

态变化图。

由于光伏发电相对廉价，因此以费用最小的优化结果也一直保持最大功率出力；电池充放电成本很多时段较配电网高，故电池只在功率平衡出现危急时(如 14 点)，配电网提供最大功率仍不满足平衡，电池才充放电，或者提供少量电量(12、20 点)；由表 1 和配电网电价图 4 可知，当柴油发电机处于停机时，其开始提供功率的费用单价为启动费用 2 加上燃料费用 0.49，比配电网一天的电价都贵，所以在配电网能满足功率需求时一般不启动柴油发电机；当光伏功率满足敏感负荷需求并且配电网电价高于切去可控负荷的赔偿费用时(如 10~16 点)，系统在向大电网售电的同时切掉部分可控负荷增大售电量，从而提高经济效益；当光伏功率不足并且需要向大电网购电时也会执行切负荷(20 点附近)，从而减小功率需求达到微电网保持稳定运行的目标。各单元的具体状态如下分析：

① 光伏功率一直保持最大功率出力；

② 电池的初始 SOC 为 0.5，1~11 点均不充不放，12 点 7 充电，SOC 上升，13 点不充不放，SOC 保持，14 点放电，SOC 下降，15~19 点不充不放，SOC 不变，20 点作为负荷充电，SOC 上升，之后 SOC 不变。

③ 柴油机在 23、24 时段按爬坡功率及当前差额功率的约束下启动和爬坡。

④ 微电网在 2~10 点向大电网购电，11 点无功功率交换，13~16 向大电网售电，17~24 向大电网购电。

⑤ 12~16 点增加可控负荷，实际负荷比原负荷增加；19、20、21 点减少可控负荷，实际负荷比原负荷需求降低；并且实际控制的负荷，都在允许可控制负荷范围内，满足约束。

5. 结论

本文运用两种方法研究了机组组合问题，优先顺序法以避免电池过充过放为根本目的，按调度当前和预测的各机组状态根据特定指标(本文机组的优先顺序见 3.2 节)依次投、切，特点是计算速度快，各机组出力均匀性比较，但常常找不到经济性最优解；而双重粒子群算法由于是以系统运行费用最小的经济性为目标进行机组组合的优化，并且本文通过将双重粒子群算法的内、外层均设置最优解终止准则从而克服了粒子群算法本身易陷入局部最优的缺陷，优化结果的经济性较好。从两种调度方法的总费用比较，后者有较大优势，但是程序运行时间上比前者逊色很多，总之，这两种方法均可求出微电网并网时有效的机组组合，验证了本文所提两种调度策略的正确性。

基金项目

中小企业发展专项资金(对欧合作部分)。项目名称：建筑和工业能效管理核心技术及关键设备研究。项目序号：SQ2013ZOC500004。

参考文献 (References)

- [1] 刘继春 (2010) 电力调度优化理论及其应用. 中国电力出版社, 北京.
- [2] Zamora, R. (2014) Energy management and control algorithms for integration of energy storage within microgrid. 2014 IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Istanbul, 1-4 June 2014, 1805-1810.
- [3] Hasan, K.N., Haque, M.E., Negnevitsky, M. and Muttaqi, K.M. (2008) Control of energy storage interface with a bidirectional converter for photovoltaic systems. 2008 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC'08), Australasian, December 2008, 138-144.
- [4] 娄素华, 等 (2005) 电力系统机组启停优化问题的改进 DPSO 算法. 中国电机工程学报, 8, 30-35.
- [5] 胡家声 (2004) 一种适合于电力系统机组组合问题的混合粒子群优化算法. 中国电机工程学报, 4, 24-30.
- [6] 蔡超豪, 蔡元宇 (1997) 优化组合的遗传算法. 电网技术, 1, 44-51.
- [7] 余廷芳, 林中达 (2009) 部分解约束算法在机组负荷优化组合中的应用. 中国电机工程学报, 2, 107-112.

- [8] 李整, 谭文, 秦金磊 (2012) 一种用于机组组合问题的改进双重粒子群算法. *中国电机工程学报*, **25**, 189-195.
- [9] Park, J.-B., Lee, K.-S., Shin, J.-R. and Lee, K.Y. (2005) A particle swarm optimization for economic dispatch with nonsmooth cost functions. *IEEE Transactions on Power Systems*, **1**, 34-42.
- [10] Dommel, H.W. and Tinney, W.F. (1968) Optimal power flow solution. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, **87**, 1866-1876.
- [11] 罗朝春, 等 (2005) 电力市场日前交易计划的分布式协同算法. *电力系统自动化*, **11**, 88-96.
- [12] 陈眩姿, 赵向阳 (2013) 配电网规划中分布式电源的选址定容研究. *智能电网*, **3**, 153-158.
- [13] 史俊 (2008) 基于粒子群算法的电网日调度问题研究. 硕士论文, 西安理工大学, 西安.
- [14] 赵向阳, 段江曼 (2012) 微电网系统的调度策略及经济运行优化研究. *智能电网*, **2**, 99-107.