

Research on Optimal Scheduling and Energy Management Strategy of Wind-PV-ES Complementary Micro-Grid

Jun Guo

CNOOC Energy Development Equipment Technology Co. Ltd., Tianjin
Email: 839691312@qq.com

Received: Feb. 18th, 2020; accepted: Mar. 4th, 2020; published: Mar. 11th, 2020

Abstract

With the increasing energy consumption in the world, the unitary structure of traditional power grid and the lack of flexibility in power generation bring great inconvenience to users. In order to solve the problems caused by the distributed power access to power grid, an optimal dispatching model is established in this paper based on the wind-PV-ES hybrid micro-grid system, and respectively for interconnection and island mode are analyzed. Then the energy management strategy with the lowest running cost as the goal is proposed for two kinds of operation mode, and dynamic learning factors and inertia weights are used to solve the optimization problem on the basic particle swarm algorithm. Finally, simulation analysis is performed for different load requirements, and the effectiveness of the optimal scheduling model and energy management strategy proposed in this paper is verified.

Keywords

Wind-PV-ES Complementary, Micro-Grid, Distributed Power, Energy Management, Particle Swarm Optimization Algorithm

风光储互补微电网的优化调度与能量管理策略研究

郭 骏

中海油能源发展装备技术有限公司, 天津
Email: 839691312@qq.com

收稿日期: 2020年2月18日; 录用日期: 2020年3月4日; 发布日期: 2020年3月11日

摘要

随着世界范围内的能源消耗与日俱增,传统电网结构单一和发电缺乏灵活性给用户端带来了很大的不便。为解决分布式电源接入大电网带来的问题,本文建立了基于风光储互补微电网系统的优化调度模型,分别对并网和孤岛模式进行了分析,提出风光储互补微电网在两种运行方式下以运行成本最低为目标的能量管理策略,并在基本粒子群算法上采用动态的学习因子和惯性权重对优化问题进行求解。最后针对不同负荷需求进行仿真分析,验证了本文提出的优化调度模型和能量管理策略的有效性。

关键词

风光储互补, 微电网, 分布式电源, 能量管理, 粒子群优化算法

Copyright © 2020 by author(s) 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

1. 引言

近年来,由于工业化进程的脚步不断加快,城市迅速扩张,世界各地的电力用户对电能的需求逐年剧增,对于电能质量的要求也与日俱增。太阳能、水能、风能等诸多新型可再生能源的开发与利用,已逐渐发展成为现代电气工程和技术中最具发展力的领域[1],然而,光电、风电的间歇性为其并入当地大电网带来了一些挑战。如何在可负担的投资成本范围内,最大限度地增加可再生能源的发电效率和降低对大电网的危害就成为了亟待解决的问题。

微电网的出现可以很好地缓和大电网与分布式电源之间的冲突,并且将大电网遭分布式电源破坏的可能性降到最低,建立包括可再生能源在内的微电网是必要的发展趋势。从世界各地现存的微电网项目来看,储能装置具有独特的能量双向流动的能力和特性,能够对其他分布式电源的出力以及负荷的变化做出实时响应,逐渐成为微电网中的关键技术[2]。目前对于储能的优化配置有指标最优、储能容量最小、系统成本最小三个大方向[3]。文献[4]提出了一种用于微电网最佳运行的模型,以最小化系统的总成本为优化目标,同时满足客户需求和系统安全性。文献[5]提出了一种基于粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)的高效算法,通过对 EOM 控制变量的优化调整,使微电网的总耗能和运行成本最小化。文献[6]在整合了贝叶斯网络理论与粒子群算法的双方优点后,给出了一种基于贝叶斯-粒子群算法的微电网优化运行的全新策略。文献[7]介绍了一种运用在独立风光柴蓄微电网系统中,利用强化后的 Pareto 进化算法算出各分布式单元容量最佳配置的能量管理策略。

本文在讨论微电网及分布式发电对社会进步和环境改善的作用的基础上,探究了微电网能量管理系统对微电网高效稳定运行的必要性,建立了适合风光储互补微电网系统的优化调度模型,并提出风光储互补微电网的能量管理策略。采用粒子群优化算法对优化模型进行求解,通过算例来验证本文提出的优化模型和能量管理策略的有效性和准确性。

2. 风光储互补微电网经济运行调度模型

微电网孤岛运行时,不与大电网进行交互,微电网内的分布式电源产生的总能量全部用于微电网内部自身负荷的运作。此模式下风光储互补微电网中风力发电与光伏发电具有不可调度性,同时微电网不

与大电网的电能相通，因此调度变量就只存在于蓄电池本身。并网运行时，微电网通过快速开关与外部大电网相连后微电网的电能可卖给大电网，大电网的电能也可以卖给微电网使用，这样就实现了微电网和大电网之间的交互。两种模式下都需要考虑发电机组的出力配合协调问题，不同的是并网运行模式下还要关注与大电网的交互问题。本文所提出的模型考虑了离网与并网两种模式，并在并网模式下采用分时电价的模型，使系统拥有最佳的收益，更灵活的调度方式。

2.1. 孤岛运行模式下的优化调度模型

2.1.1. 目标函数

本文以一天 24 小时运行成本最低为目标建立微电网的经济优化模型，孤岛模式下电能的交易停止，微电网与大电网隔离。优化目标如式(1)所示：

$$\begin{cases} \min M_{op} = \sum_{i=1}^{24} [C_{OM(pvi)} + C_{OM(wti)} + C_{OM(bati)}] + C_p \\ C_{OM(pvi)} = K_{OM} \times P_{pvi} \\ C_{OM(wti)} = K_{OM} \times P_{wti} \\ C_{OM(bati)} = K_{OM} \times P_{bati} \\ C_p = P_{vi} \times k \\ P_{vi} = P_{pvi} + P_{wti} + P_{bati} - P_{loadi} \end{cases} \quad (1)$$

式中， M_{op} 表示微电网在运行一天所产生的运行费用。 $C_{OM(pvi)}$ 表示在第 i 小时光伏发电设备产生的运行成本， $C_{OM(wti)}$ 表示在第 i 小时风力发电设备产生的运行成本， $C_{OM(bati)}$ 表示在第 i 小时蓄电池发电系统产生的运行成本， K_{OM} 为各分布式电源的运行维护系数，取值如表 1 所示。 C_p 表示出现功率缺额时的惩罚费用， P_{vi} 为负荷功率缺额， P_{pvi} 、 P_{wti} 、 P_{bati} 分别代表光伏、风能、蓄电池三种分布式电源在第 i 小时的输出功率， P_{loadi} 为第 i 时段的电负荷。 k 为惩罚系数，其取值与单位电价有关。

Table 1. Operation and maintenance coefficient of distributed power

表 1. 分布式电源运行维护系数

分布式发电类型	运行维护系数 K_{OM}
光伏发电系统	0.0096
风力发电系统	0.0296
蓄电池发电系统	0.0413

2.1.2. 约束条件

1) 分布式电源出力约束：

$$\begin{cases} P_{pv,\min} \leq P_{pv} \leq P_{pv,\max} \\ P_{wt,\min} \leq P_{wt} \leq P_{wt,\max} \\ P_{bat,\min} \leq P_{bat} \leq P_{bat,\max} \end{cases} \quad (2)$$

式中， P_{pv} 、 P_{wt} 、 P_{bat} 分别为光伏发电、风力发电、蓄电池的输出功率， $P_{pv,\min}$ 、 $P_{wt,\min}$ 、 $P_{bat,\min}$ 、 $P_{pv,\max}$ 、 $P_{wt,\max}$ 、 $P_{bat,\max}$ 分别为光伏发电、风力发电、蓄电池输出功率的上下限。

2) 功率平衡约束:

$$P_{pvi} + P_{wti} + P_{bati} = P_{loadi} \quad (3)$$

2.2. 并网运行模式下的优化调度模型

2.2.1. 目标函数

将并网和孤岛差距化的根本因素就是并网的时候会有电能的交易情况，并且交易的多少也是非线性变化的。以运行成本最小为优化目标，如式(4)所示。

$$\begin{cases} \min M_{op} = \sum_{t=1}^{24} [C_{OM(pvi)} + C_{OM(wti)} + C_{OM(bati)} + (M_{buyi} - M_{sell})] + C_p \\ M_{buyi} = d \times P_{buyi} \\ M_{sell} = h \times P_{sell} \\ P_{vi} = P_{pvi} + P_{wti} + P_{bati} + P_{gridi} - P_{loadi} \end{cases} \quad (4)$$

式中 M_{buyi} 表示的意思是第 i 时段从电网购电的成本， P_{buyi} 为第 i 时段购电电量， d 为电价，采用分时电价的模式[8]，如表 2 所示。 M_{sell} 表示第 i 时段的售电收益， P_{sell} 为第 i 时段售电量； h 为售电价格系数，本文取值为 1.42 元/kw·h； P_{gridi} 为第 i 时段与大电网交换的功率。

Table 2. Time-of-use electricity price list

表 2. 分时电价价目表

时段	电价(元)
峰时段(9~11、14~15、19~21)	1.099
平时段(7~8、12~13、16~18)	0.696
谷时段(1~6、22~24)	0.251

2.2.2. 约束条件

1) 分布式电源出力约束:

$$\begin{cases} P_{pv,\min} \leq P_{pv} \leq P_{pv,\max} \\ P_{wt,\min} \leq P_{wt} \leq P_{wt,\max} \\ P_{bat,\min} \leq P_{bat} \leq P_{bat,\max} \\ P_{grid,\min} \leq P_{grid} \leq P_{grid,\max} \end{cases} \quad (5)$$

式中， $P_{grid,\min}$ 、 $P_{grid,\max}$ 分别表示与大电网交互的最小、最大功率。

2) 功率平衡约束:

$$P_{pvi} + P_{wti} + P_{bati} + P_{gridi} = P_{loadi} \quad (6)$$

式中， P_{gridi} 为第 i 时段节点与大电网交换的功率值，购电时为正，售电时为负。

3. 风光储互补微电网能量调度策略

对微电网进行能量管理的核心问题是优化各发电单元之间的出力。由此，本文提出了基于蓄电池充放电状态的优化调度策略以满足微电网能量管理的要求。改变蓄电池的充放电状态可以让其释放的电能得到最充分的利用，同时保证系统的平滑运行。在微电网运行中，有离网和并网两种运行模式。

3.1. 离网运行方式

根据微电网能量管理系统中检测到的 PV 以及 WT 的发电数据，对蓄电池的出力适时调整。此模式

下的决策变量为蓄电池的充放电功率。风光联合出力与负荷的需求量存在以下三种情况：风光联合出力并不能达到负荷需求量；风光联合出力等于负荷需求量；风光联合出力大于负荷需求量。

当出现第一种情况，利用蓄电池放电，放电量根据电能缺额值确定。若蓄电池把所存储的电能全都释放完后，仍不能满足要求时，微电网内部的电力电子器件动作，将一些不重要的负荷切除，对微电网内的一级负荷以及重要的二级负荷优先供电。当处在第二种情况时，这是最理想的状态，蓄电池既不需要充电也不需要放电。当处在第三种状态，蓄电池储电，可供系统在第一种情况下使用。若蓄电池充满电后还有多余的电量则通过卸荷器将这部分能量释放入大地。

3.2. 并网运行方式

风光联合出力与负载侧需求的量值也有三种情况。当 $P_{pv+wt} - P_{load} > 0$ 时，让多余的电量给蓄电池充电或者直接卖给大电网。由于电价的不同，我们可以选择在电价高的时候优先给大电网送电以赚取更多的收益。当 $P_{pv+wt} - P_{load} = 0$ 时，既不给蓄电池充放电，也不与大电网进行能量交易。当 $P_{pv+wt} - P_{load} < 0$ 时，让蓄电池放电或向大电网购电。若此时电价较高，优先利用蓄电池放电来弥补缺额；反之优先购电，将蓄电池的电留到电价高的时候卖给大电网提高整个微电网运行的经济效益[9]。

3.3. PSO 在能量管理中的应用

将 PSO 运用于微电网的能量管理的步骤如下：

第一步：搜索空间识别。初始化 PSO 参数，如种群大小 N 、总迭代次数 Max_{DT} 、惯性权重因子 ω_{min} 、 ω_{max} 、学习因子 $C1$ 和 $C2$ 。 t 为当前迭代次数，初始化 $t = 0$ ；

第二步：初始化。生成 N 个随机粒子群。每个粒子的初始位置将随机地设定在控制变量的最大值和最小值之间。使用目标函数(1)和(4)对初始种群中的每个粒子进行评估。对于每个粒子群，都满足 $P_{besti(0)} = X_{i(0)}$ 。搜索目标函数的最优值，并将与最优值关联的粒子设置为全局最优值 $G_{besti(0)}$ 。设置惯性权重的初值为 $\omega_{(0)}$ ；

第三步：更新迭代次数 $t = t + 1$ 。利用式(7)更新惯性权重 $\omega_{(t)}$ ；惯性权重因子的最小值和最大值，通常取 0.4 和 0.9。

$$\omega = \frac{\omega_{max} - (\omega_{max} - \omega_{min}) \times t}{Max_{DT}} \quad (7)$$

第四步：利用式(8)更新粒子速度，第 i 个粒子速度为 $V_i(t)$ ；

$$v_i^k(t+1) = \omega(t)v_i^k(t) + C_1r_1(P_{besti}^k(t) - x_i^k(t)) + C_2r_2(G_{besti}^k(t) - x_i^k(t)) \quad (8)$$

第五步：利用式(9)更新粒子位置；

$$x_i^k(t+1) = x_i^k(t) + v_i^k(t+1) \quad (9)$$

第六步：更新个体最优值，根据其更新的位置评估每个粒子；

第七步：更新全局最优值，在 P_{besti} 中寻找最小值；

第八步：终止条件。满足终止条件则停止，不满足则返回第三步；

第九步：输出最佳解决方案。

4. 算例分析

风光互补单元输出功率曲线为(图 1)：

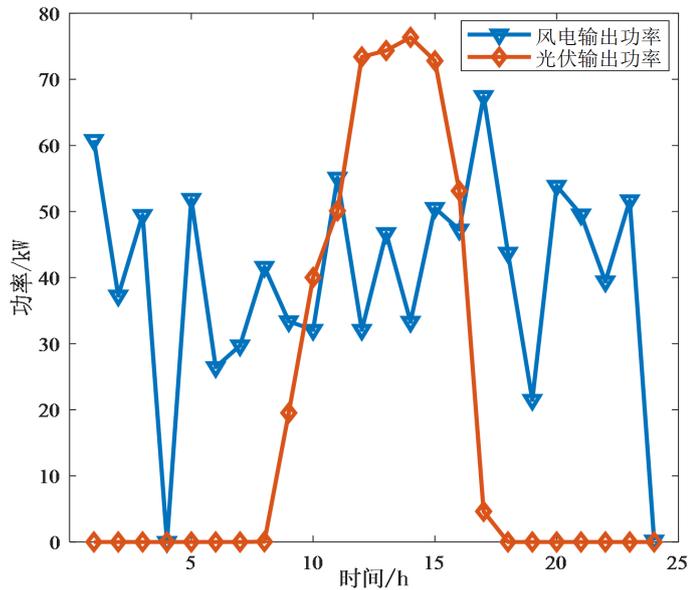


Figure 1. Wind and photovoltaic output power curves
图 1. 风力和光伏输出功率曲线

蓄电池充放电功率上限为 150 kW，下限为 100 kW；系统与电网交互的功率区间为 $[-250 \text{ kW}, 250 \text{ kW}]$ 。本文选取两类差异较大的负荷曲线进行仿真分析，以验证本文所提优化调度模型的有效性。负荷曲线如图 2。

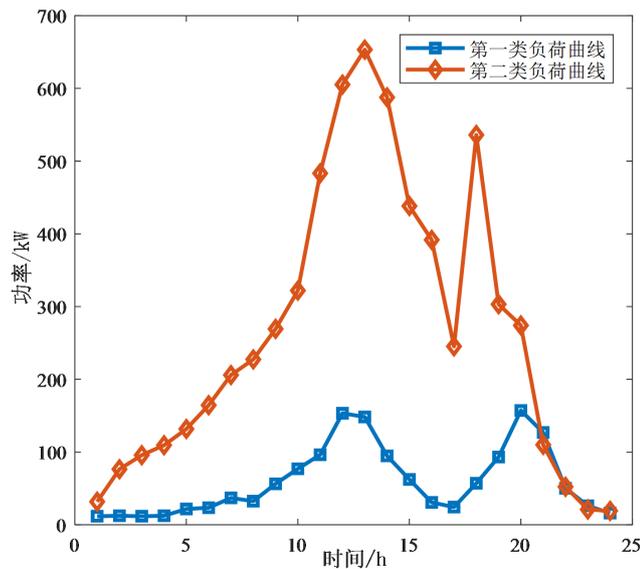


Figure 2. Two kinds of load curves
图 2. 两类负荷曲线

4.1. 离网运行模式

4.1.1. 第一类负荷

在孤岛粒子群算法中，选取最大迭代次数为 300 次，粒子个数为 600 个。优化调度结果显示一天的运行费用为 350 元。各设备出力如图 3、图 4 所示。

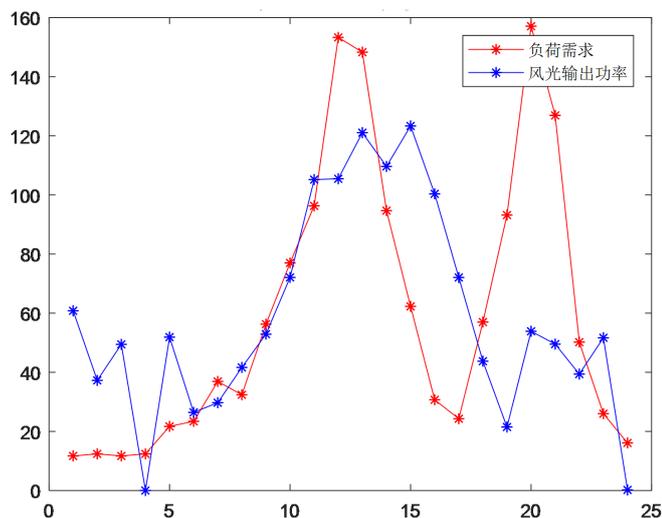


Figure 3. Comparison of wind-PV output power and load demand under the first kind of load in island mode
图 3. 离网模式第一类负荷下的风光出力与负荷需求比较

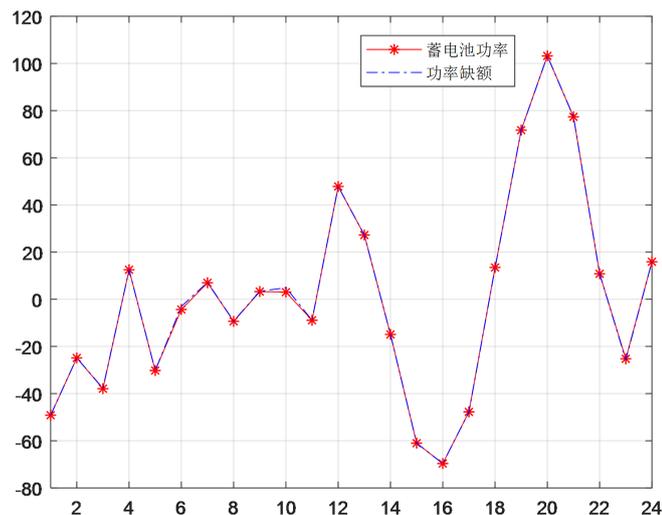


Figure 4. Battery output power in island operation mode
图 4. 离网运行模式下蓄电池输出功率

当风光联合出力与负荷的需求差别不大的时候，优化后的结果较为理想。通过选取两个典型时刻对优化的有效性进行说明。在风光出力比所需求的量小的时候，通过让蓄电池放电则足以满足负荷的需求量。在图 5 上可以明显看到，在傍晚的 19 点左右，迎来了这一天当中的电力需求高峰，风光联合出力已经不能达到用户侧的期望，相差值约为 103.2 kw。由于该微电网系统中选取的蓄电池的最大放电功率是 150 kw 完全能够补给这部分缺额，所以就算在负荷需求量很大的傍晚时分，也不需要切除负荷，从而维持了整个系统的供电可靠性。同样的，在下午的 16 点钟，此时的风光联合出力大于需要的电量，差值为 69.67 kw。由于蓄电池的充电上限功率达到了 100 kw，所以靠蓄电池自身就完全可以吸收掉这部分多出来的能量，也不至于还有多余的能量通过泄入大地的方式浪费掉。其余的时刻也有着与上述两时刻差不多的状况，总能通过蓄电池本身将电量放出或储存，从目标函数(1)中的定义就可看出，最后一项的缺额惩罚费用降到了最低，总运行费用约为 350 元/天，在保证供电可靠性的前提下，最大限度地提高风光互补微电网系统运行经济性。

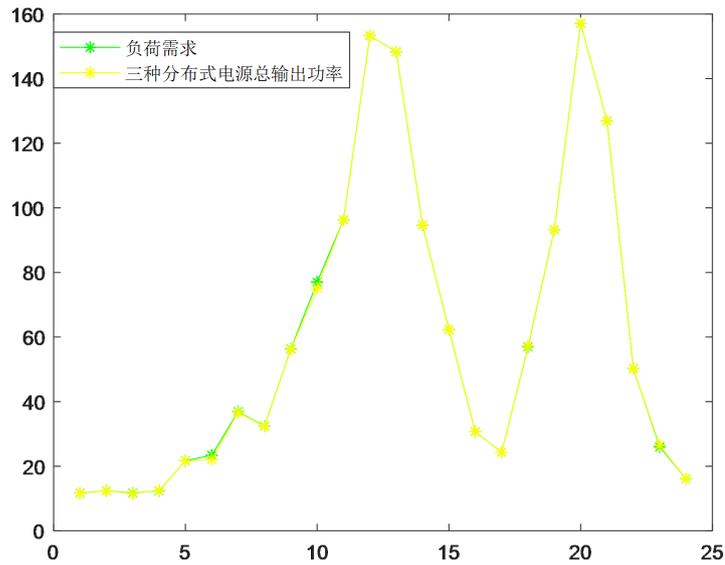


Figure 5. Load demand and total power supply under the first kind of load in island mode

图 5. 离网模式第一类负荷下的负荷需求与电能总供应

4.1.2. 第二类负荷

该系统一天的运行成本为 5.58×10^4 元。当负荷情况发生了如图 6 所示的巨大变化时，有可能是此地区招商引资吸引了很多的工厂来扎根和投资，也有可能是当地人民生活质量的提高开始使用各种高科技电器。总之，负荷的巨大变化会让它与风光联合出力的差距也越来越大，通过比较图 7 和图 8 可以清楚地看出来，优化的结果由于受到蓄电池容量的限制而不太理想，优化调度后的缺额值仍然较大。同样选取两个典型时刻对优化结果进行分析。在午间 12 点，差值竟然达到了 532.2 kw 之多。蓄电池的放电功率最大才 100 kw，远不足弥补缺额，此时又处于孤岛模式，只能采用切负荷的措施，但切负荷带来的惩罚费用相当昂贵，运行成本由 350 骤增至 5578 元。在此情况下，不仅没有保证用电的可靠性，还给整个电网带来了巨大的损失。

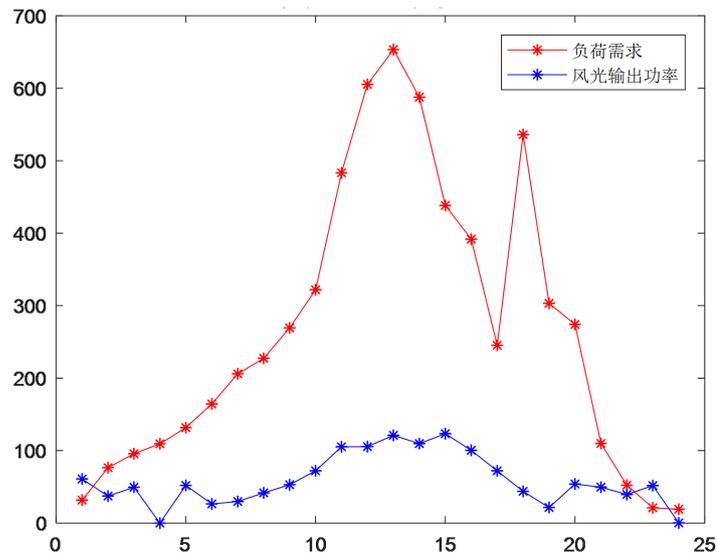


Figure 6. Comparison of wind-PV output power and load demand under the second kind of load in island mode

图 6. 离网模式第二类负荷下的风光出力与负荷需求比较

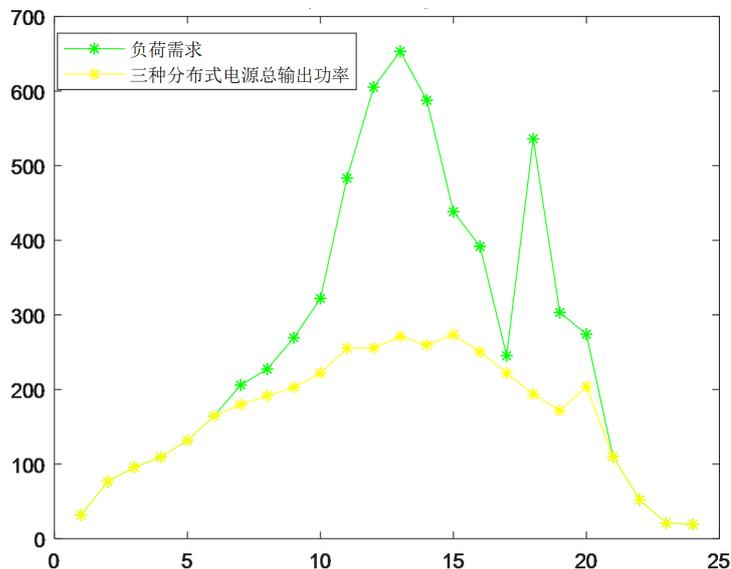


Figure 7. Load demand and total powersupply under the second kind of load in island mode
图 7. 离网模式第二类负荷下的负荷需求与电能总供应

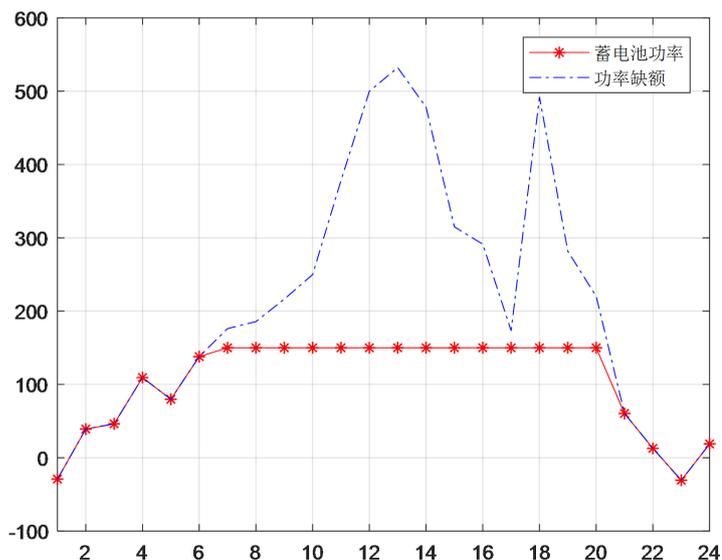


Figure 8. Comparison of battery output power and power vacancy under the second kind of load in island mode
图 8. 离网模式第二类负荷下的蓄电池输出功率与功率缺额比较

从上述分析与研究可以看出，当负荷与分布式电源输出功率接近时，微电网的稳定性较好，通过蓄电池与其余两种分布式发电单元的出力的协调配合，可以达到微电网自给自足的状态。当负荷需求与分布式电源的出力有很大的差距时，整个微电网的运行的稳定性和供电的可靠性会随之变差，仅仅依靠蓄电池的补给与存储还不能在不同负荷变化情况下保证系统的用电安全，也更不要说经济性的改善。所以，为了减少负荷变化带来的一系列影响，接下来将对并网运行方式的优化调度进行分析。

4.2. 并网运行模式

4.2.1. 第一类负荷

在并网运行模型中，优化的变量有两个，一个是蓄电池的充放电功率，还有一个就是与大电网交互

的功率。因此，粒子群算法的维度变为了 48 个，前 24 个未知量代表的是 24 小时内每个时刻与大电网的电能交互的量值，后 24 个未知量分配给了每个小时的蓄电池充放电功率大小。

优化运行结果：

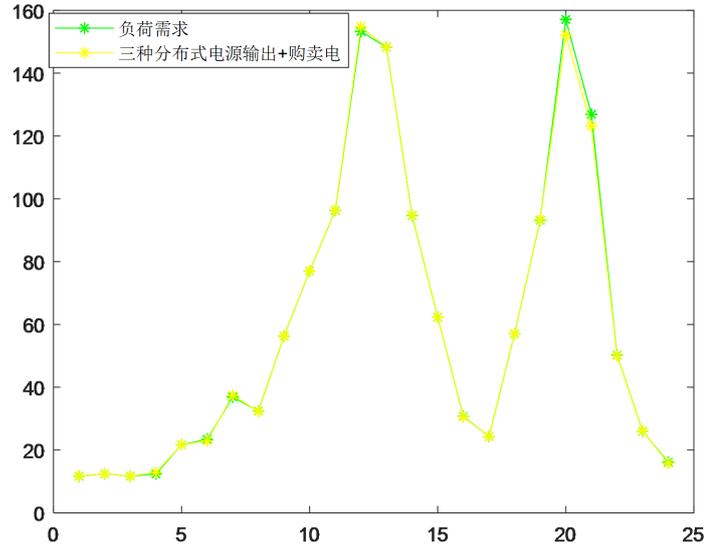


Figure 9. Load demand and total powersupply under the first kind of load in grid-connected mode
图 9. 并网模式第一类负荷下的负荷需求与电能总供应

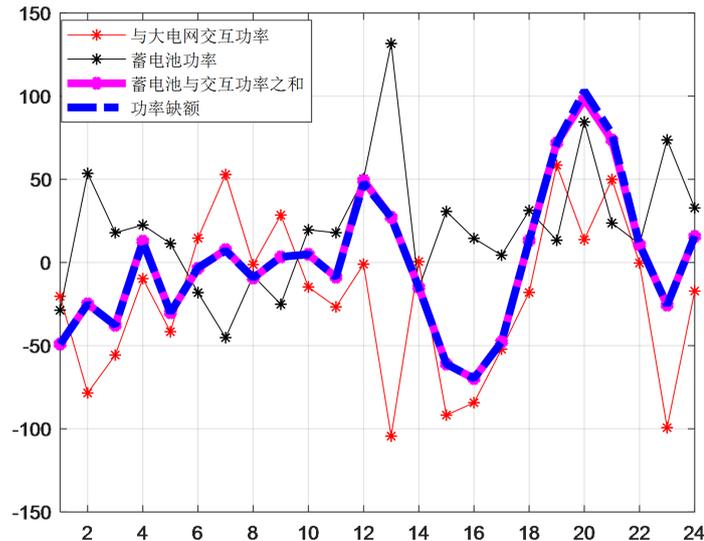


Figure 10. Battery output power and interaction energy under the first kind of load in grid-connected mode
图 10. 并网模式第一类负荷下的蓄电池输出功率与交互电量

改变电价即采用分时电价的方式时，优化的结果如图 9、图 10 所示。可以看到，在这个模式下仍然可以具有良好的供电可靠性，但是蓄电池充放电情况和与大电网交易的情况都发生了一定的改变，这个由于电价的变化而引起的改变。在 12 点时刻通过蓄电池放电在保证负荷用电的基础上，将更多的电量卖给了大电网，给大电网中的负荷缓解了用电高峰时的供电压力。在 6 至 8 时段的平价阶段购入更多电能，储存在蓄电池中以使用电高峰时使用。粒子群算法优化后的运行一天后收入约为 456 元，较不采用分时电价方式的模型拥有更佳的收益，更灵活的调度方式。

4.2.2. 第二类负荷

当出现图 6 所示的超大型负荷时,优化的结果如图 11 和图 12 所示。在电价低谷时,如 23 点、0 点、4 点进行购电存入蓄电池发电单元中。在 12 图中 11 点到 13 点以及 17 点时间段内,为了优先保证供电可靠性,蓄电池放电和购电都已经达到了上限值,但仍然不能满足负荷需求,此时段内产生了惩罚费用。尽管采用了分时电价的模式,最后一天下来的运行费用达到了 15,067 元。

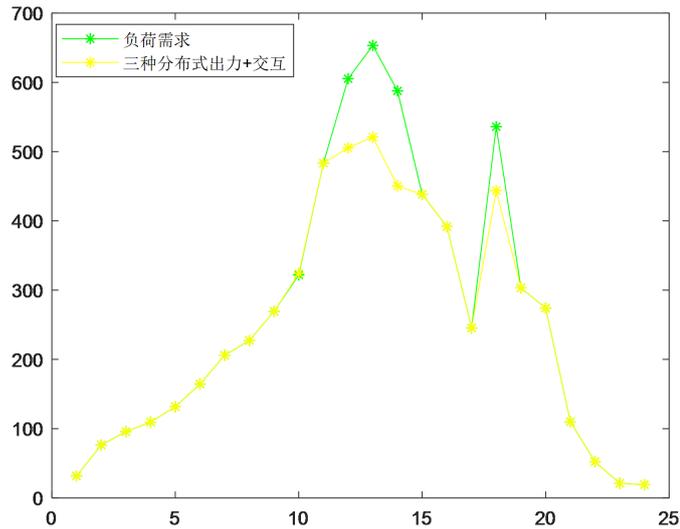


Figure 11. Load demand and total powersupply under thesecond kind of load in grid-connected mode
图 11. 并网模式第二类负荷下的负荷需求与电能总供应

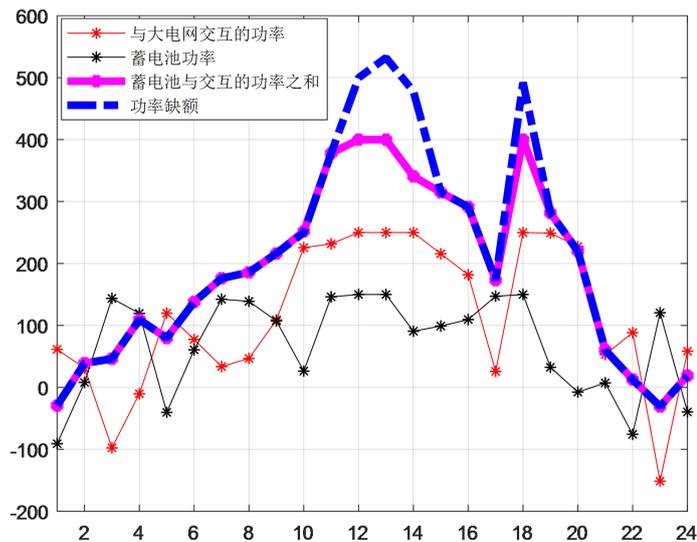


Figure 12. Battery output power and interaction energy under the second kind of load in grid-connected mode
图 12. 并网模式第二类负荷下的蓄电池输出功率与交互电量

5. 结论

本文从微电网的经济运行着手,分别在并网和孤岛两种运行模式下,建立了风光储互补微电网的优化调度模型,并提出了相应地能量管理策略。在此基础上,提出一种具有动态权重与动态学习因子的改进型粒子群算法,使其具有更好的自身学习能力与社会认知能力。实际算例表明,离网模式下,当负荷

与分布式电源输出功率接近时，微电网的稳定性较好，通过蓄电池与其余两种分布式发电单元的出力的协调配合，可以实现微电网的自给自足，并最大限度地提高系统运行经济性；并网模式中，采用分时电价方式的模型使系统拥有最佳的收益，更灵活的调度方式。

参考文献

- [1] 冬雷, 廖晓钟, 刘广忱, 等. 分布式风光互补发电系统及其多目标优化控制策略研究[J]. 仪器仪表学报, 2005, 8(26): 750-753.
- [2] 张琪. 风光储互补微电网的经济优化调度研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳工程学院, 2018.
- [3] 李建林. 储能系统关键技术及其在微网中的应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2016: 10-11.
- [4] Ren, H., Xiang, A., Teng, W., *et al.* (2012) Economic Optimization with Environmental Cost for a Microgrid. *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 1-6.
- [5] Radosavljević, J., Jevtić, M. and Klimenta, D. (2015) Energy and Operation Management of a Microgrid Using Particle Swarm Optimization. *Engineering Optimization*, 811-830. <https://doi.org/10.1080/0305215X.2015.1057135>
- [6] 康健. 基于贝叶斯 - 粒子群算法的微电网优化运行[J]. 电力系统保护与控制, 2018(12): 32-41.
- [7] Dufo-Lopez, R., Jose, L., Agustin, B., *et al.* (2011) Multi-Objective Optimization Minimizing Cost and Life Cycle Emissions of Stand-Alone PV-Wind-Diesel Systems with Batteries Storage. *Applied Energy*, **88**, 4033-4041. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.04.019>
- [8] 曹昉, 韩放, 杨以涵, 等. 实时电价的意义与实现[J]. 电网技术, 1995, 19(10): 56-59.
- [9] An, L.N., *et al.* (2015) Optimal Energy Management for an On-Grid Microgrid by Using Branch and Bound Method. 2015 *IEEE Power & Energy Society General Meeting*, Palermo, Italy, 12-15 June 2018, 1-5.