

1-4-2019

Optimal Operation of Grid-connected Microgrid Based on ABC Algorithm

Qiuli Cui

Department of Mechanical and Electrical Engineering, Suzhou Institute of Industrial Technology, Suzhou 215104, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Optimal Operation of Grid-connected Microgrid Based on ABC Algorithm

Abstract

Abstract: An optimal scheduling model of grid-connected microgrid composed of wind power generators, photovoltaic cells, fuel cells and batteries is established. The economy and environmental protection elements are considered in this model. To maximize the role of peak shaving and valley filling in microgrid system, based on the time-of-use price mechanism, *the heuristic rules combined with peak shaving and valley filling is used to design a grid-connected energy scheduling strategy*. By monitoring the net load state and the price time interval, and adjusting the particular state of the micro source of power, the system optimal energy scheduling state is obtained. The ABC algorithm is applied to solve the established optimization scheduling model of grid-connected microgrid. *The bee colony search frequency is improved by control parameter for linear adjustment of iteration times*. The simulation results prove that the model and scheduling strategy of grid-connected microgrid is feasible and effective.

Keywords

lithium-ion battery, SOC, model adaptive, PI regulator, OCV, Ah

Recommended Citation

Cui Qiuli. Optimal Operation of Grid-connected Microgrid Based on ABC Algorithm[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(4): 1551-1559.

基于人工蜂群算法的微网并网优化运行

崔秋丽

(苏州工业职业技术学院机电工程系, 苏州 215104)

摘要: 针对含有风力发电机、光伏电池、燃料电池和蓄电池的微网系统, 综合考虑经济性与环保性, 建立微网并网运行下的优化调度模型。为最大化发挥微网系统“削峰填谷”的作用, 基于分时电价机制设计一种结合削峰填谷启发式规则的并网能量调度策略, 通过监测净负荷状态和电价时段以及对特定状态下各微源的功率调整等, 得到系统最优能量调度状态。针对所建立的微网并网优化调度模型, 提出将人工蜂群算法运用到该调度问题中, 以迭代次数线性调整的控制参数改进蜂群搜索频率。仿真结果验证了微网并网优化调度模型、策略和算法的可行性和有效性。

关键词: 微网; 并网; 优化运行; 人工蜂群算法

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 04-1551-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201804042

Optimal Operation of Grid-connected Microgrid Based on ABC Algorithm

Cui Qiuli

(Department of mechanical and electrical engineering, Suzhou Institute of Industrial Technology, Suzhou 215104, China)

Abstract: An optimal scheduling model of grid-connected microgrid composed of wind power generators, photovoltaic cells, fuel cells and batteries is established. The economy and environmental protection elements are considered in this model. To maximize the role of peak shaving and valley filling in microgrid system, based on the time-of-use price mechanism, *the heuristic rules combined with peak shaving and valley filling is used to design a grid-connected energy scheduling strategy*. By monitoring the net load state and the price time interval, and adjusting the particular state of the micro source of power, the system optimal energy scheduling state is obtained. The ABC algorithm is applied to solve the established optimization scheduling model of grid-connected microgrid. *The bee colony search frequency is improved by control parameter for linear adjustment of iteration times*. The simulation results prove that the model and scheduling strategy of grid-connected microgrid is feasible and effective.

Keywords: lithium-ion battery; SOC; model adaptive; PI regulator; OCV; Ah

引言

微网集成了多种能源输入、多种产品输出、多种能源转换单元, 微网内能量的不确定性和时变性



收稿日期: 2016-04-25

修回日期: 2016-8-11;

作者简介: 崔秋丽(1978-), 女, 山西临汾, 本科,

讲师, 研究方向为新能源发电控制技术。

更强, 需要全面利用各种控制和调节手段, 实现对微网内能量管理与经济调度, 提高微网整体运行效率^[1]。微网系统的优化运行可以更好地提高电力系统运行的灵活性、可控性和经济性, 能更好地满足电力用户对电能质量和供电可靠性的更高要求目前^[2-3]。但是, 由于受风速、光照等变化的影响, 可再生能源发电系统的功率输出具有随机性、间歇性, 并且随着可再生能源比重的增大, 这种不确定

性给微网的优化调度带来了极大的困难,使微网的经济运行优化变成一个多变量、多约束的非线性组合优化问题^[1]。

针对微网运行优化调度模型方面的研究:文献[4]在考虑分时计价的前提下,提出了含多种微源的微网经济调度模型,并给出典型的微网日前调度计划。文献[5-6]基于量化评估的智能电网环保及经济性,提出了智能电网多目标优化运行的调度策略。但是,上述能量调度研究主要基于确定性的系统模型,基于可再生能源预测出力等于实际出力进行经济调度这一前提,而实际由于分布式电源出力的随机性,微网并未按日前调度计划曲线与主网进行能量交换^[7]。文献[8]基于模糊理论,提出了包含风能和太阳能发电系统的模糊决策调度,将预测值表示成模糊数,利用隶属度函数研究调度方案,但没有对含多种可再生能源的微网经济运行加以分析。

针对优化调度模型求解方面的研究:应用较为广泛的主要有遗传算法和粒子群算法两大类。文献[9]提出了遗传算法种群初始化的多种方法,但该种群初始化方法主要针对单目标遗传算法,并未涉及多目标进化算法;文献[10]采取在蓄电池充放电功率的调度中加入惩罚函数的方式,以达到引导系统削峰填谷的作用。文献[11]采用粒子群优化算法求解了微网的经济运行问题。在采用上述智能算法求解微网优化模型时,若考虑可再生能源发电出力及负荷功率的随机性,则由负荷、可再生能源发电出力等预测值描述的等式约束实际上是难以满足的求解该问题。

微网的优化运行主要可分为孤网和并网运行两种方式。孤网运行方式控制复杂,运行成本较高,现有的微网系统大多采用并网运行方式。在并网运行模式中,系统经过 PCC 点与外部电网连接,并允许联络线功率交换,蓄电池作为“能量中转站”可以起到平衡系统瞬时功率波动的作用^[12-13]。分时电价机制将全天 24 h 划分为多个阶梯电价时段,

各时段采用不同电价反映电力生产成本,引导用户负荷需求和科学用电^[9]。

综上所述,本文针对含有风力发电机、光伏电池、燃料电池和蓄电池的多微源微网系统,综合考虑分时电价、净负荷状态、各微源出力特性,建立微网优化调度模型,制定了引导微网对大电网削峰填谷的启发式规则,提前对各微源和联络线交互制定分层次的调度策略。对于所建立的微网优化调度模型,提出将人工蜂群算法运用于非实时微网优化调度模型中,并对蜂群搜索频率作出改进,以提高效率。

1 并网能量调度策略

精确微网能量优化调度根据不同时间尺度提出了分为日前调度策略和实时调度策略,本文采用日前调度策略研究非实时微网的能量优化调度。

首先,定义净负荷 P_{net} 为同一时刻下,微网系统内的负荷需求功率 P_{load} 与可再生能源的输出功率和之间的差值。

$$P_{net} = P_{load} - P_{wt} - P_{pv} - P_{other} \quad (1)$$

式中: P_{wt} 、 P_{pv} 、 P_{other} 分别表示风机、光伏及其他可再生能源的输出功率。

基于“峰-平-谷”分时电价机制,本文设计了一种结合削峰填谷启发式规则的并网能量调度策略,其具体流程如图 1 所示。图中, $P_c(t)$ 、 $P_d(t)$ ($P_c(t) \leq 0$, $P_d(t) \geq 0$) 为考虑 KiBaM 模型^[9-10]动态充放电约束过程与优化算法相结合下产生的 t 时刻蓄电池充电功率值和放电功率值, $P_{grid}(t)$ 表示微网与电网交互的功率值,“+”为微网从大电网购电,“-”为微网向大电网售电,该值与燃料电池功率、联络线功率等为动态调度量,通过调度流程中的开停机调整、蓄电池充放电功率调整、功率平衡调整等,最终确定各单元功率调度指令 P_{bat} 、 FC 、 P_{grid} 及切负荷、弃风、弃光调度指令等。 FC_{max} 表示燃料电池功率允许最大功率值。 P_{bmax} 、 P_{smax} 分别表示联络线购电和售电功率约束。

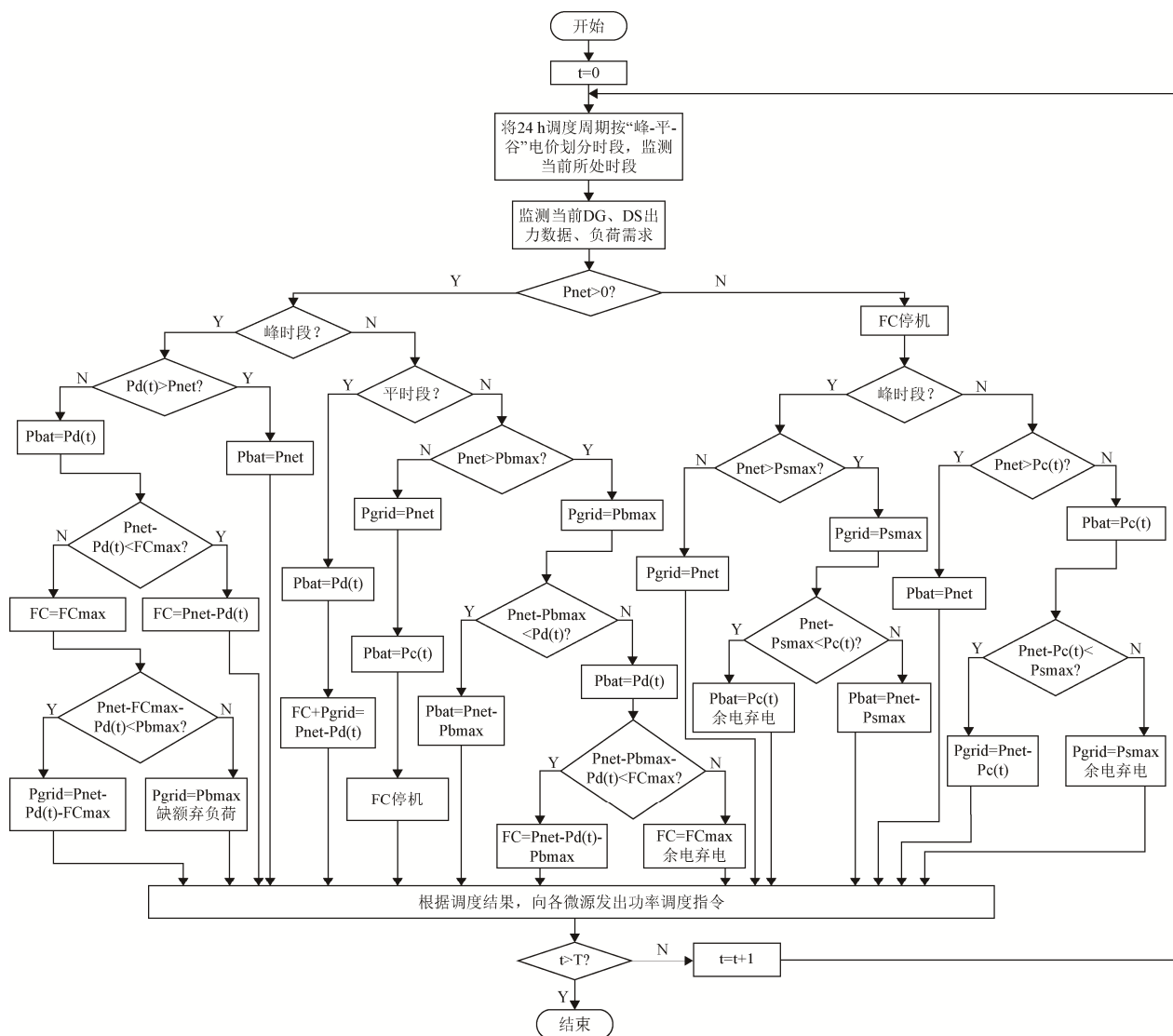


图 1 结合削峰填谷启发式规则的并网能量调度策略流程图

Fig.1 Flow chart of grid-connected energy scheduling strategy combined with heuristic algorithm of peak load-shifting valley

该调度策略首先监测系统的净负荷状态, 根据净负荷状态划定各单元调度优先级。当净负荷为正时, 优先调度蓄电池出力; 当净负荷为负时, 优先调度燃料电池停机。然后, 按峰、平、谷电价时段的划分, 监测当前步长所处电价时段, 根据不同的电价时段对各单元采取不同的调度规则, 其简要规则如下: 1) 风、光出力充足(足够满足当前负荷需求), 峰时段优先向外部电网卖电。在风、光功率盈余超过联络线功率约束时, 调度蓄电池充电, 仍有盈余则弃电, 若风、光功率盈余在联络线功率约束范围内时, 余电全部上网; 2) 风、光出力充足,

平、谷时段优先向蓄电池充电, 盈余电量反馈给外部电网; 3) 风、光出力不足, 峰时段优先调度蓄电池和燃料电池放电, 尽可能避免购电; 4) 风、光出力不足, 谷时段尽量从外部电网的购电, 仍有缺额则由内部微源平衡, 并允许给蓄电池充电; 5) 风、光出力不足, 平时段结合实时蓄电池调度情况和电价情况分配功率。

2 微网优化运行调度模型

以微网系统总运行最低成本作为日前调度的目标, 考虑功率平衡约束, 设备出力上下限约束以

及电网功率联络线功率等约束。本文中日前调度时间间隔为 1 h。

2.1 综合目标函数

微网日前调度的目标是使系统总成本费用最低。并网运行模式下的目标函数^[11]，包括能耗成本、运行维护成本、电力市场交易成本、环境污染成本、负荷损失成本。建立的目标函数如式(2)所示：

$$\min F(x) = C_{fc} + k_{om-i} \sum_{t=1}^T P_i(t) + C_{grid} + C_{en} + \gamma \sum_{t=1}^T P_{loadloss}(t) \quad (2)$$

式(2)中 K_{om-i} 为第 i 个微源的运行维护系数； γ 为切除单位负荷所赔偿的经济成本系数，本文取值为 2.5，单位为元/kW·h； C_{fc} 为燃料电池能耗成本，定义如下：

$$C_{fc} = (C_{nl} / L) \sum_{i=1}^{n-fc} [\sum_{t=1}^T (P_{fc-i}(t) / \eta_{fc-i}(t))] \quad (3)$$

式中： C_{nl} 为天然气价格，本文取 2.5 元/m³， L 为天然气低热热值，取定为 9.7 kW·h/m³， $P_{fc-i}(t)$ 为第 i 个燃料电池在 t 时刻的输出功率， $\eta_{fc-i}(t)$ 为 t 时刻的第 i 个燃料电池运行效率， $n-fc$ 为燃料电池总个数。

式(2)中， C_{grid} 为电力市场交易成本，定义如下：

$$C_{grid} = \begin{cases} \sum_{t=1}^T h_b(t) P_{grid}(t), & P_{grid}(t) > 0 \\ \sum_{t=1}^T h_s(t) P_{grid}(t), & P_{grid}(t) \leq 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中： $h_b(t)$ 、 $h_s(t)$ 分别是 t 时段购电和售电交易价格，单位元/kW·h。

式(2)中， C_{en} 为某微源在调度周期内的环境污染成本，定义如下：

$$C_{en} = \sum_{t=1}^T [\sum_{i=1}^n Q_{ij} P_i(t) \sum_{j=1}^m V_j] \quad (5)$$

式中： Q_{ij} 为第 i 个微源单位电量下对第 j 种污染物的排放量，kg/kW·h， V_j 为第 j 种污染物单位量所需支付的惩罚治理费用，元/kg， m 为总的污染物种类数。

式(2)中， $P_{loadloss}(t)$ 为第 t 个调度周期的切负荷量，单位 kW。

2.2 运行约束条件

微网日前调度模型需要考虑功率平衡约束，设备出力上下限约束以及电网功率联络线功率等约束。

(1) 功率平衡约束

$$P_{load}(t) - P_{loadloss}(t) = P_{grid}(t) + \sum_{i=1}^{n-fc} P_{fc-i}(t) + \sum_{i=1}^{n-bat} P_{bat-i}(t) + (P_{pv}(t) - P_{pvloss}(t)) + (P_{wt}(t) - P_{wtloss}(t)) \quad (6)$$

式(6)中， $P_{pvloss}(t)$ 、 $P_{wtloss}(t)$ 分别表示弃光、弃风的功率值。

(2) 燃料电池输出功率约束

$$P_{fc}^{\min} \leq P_{fc-i}(t) \leq P_{fc}^{\max} \quad (7)$$

式中， P_{fc}^{\min} 、 P_{fc}^{\max} 分别为燃料电池的有功功率输出的下限和上限。

(3) 蓄电池充放电功率约束

$$\begin{aligned} & \text{蓄电池充放电时不能超过电池允许的极限值。} \\ & \text{充电功率约束：} P_{batmin} \leq P_{bat-i}(t) \leq 0 \quad (8) \\ & \text{放电功率约束：} 0 \leq P_{bat-i}(t) \leq P_{batmax} \quad (9) \end{aligned}$$

式中： P_{batmin} 、 P_{batmax} 分别表示充电限值和放电限值，具体各步长充放电限值由 KiBaM 模型动态约束。

(4) 电网传输联络线功率约束

微网并网需要与国家电网签订电力传输协议，微网与大电网交互的联络线功率不能超出协议中的限值。

$$P_{bmin} \leq P_{grid}(t) \leq P_{bmax} \quad (P_{grid}(t) \geq 0) \quad (10)$$

$$P_{smin} \leq P_{grid}(t) \leq P_{smax} \quad (P_{grid}(t) < 0) \quad (11)$$

3 基于 ABC 算法的微网优化运行调度模型求解

微网能量优化调度根据不同时间尺度提出了分为日前调度策略和实时调度策略，本文采用日前调度策略研究非实时微网的能量优化调度。考虑微

网中的可再生能源具有间歇性和波动性的特点,长时间尺度的功率预测偏差较大,因此采用类似常规电网的调度计划不能实现微网并网的优化运行;考虑微网的多目标属性,传统的单目标调度方法难以适应复杂的微网运行环境。而人工蜂群算法(Artificial Bee Colony, ABC)是一种较为新颖的群智能随机优化算法,由土耳其的 Karabog 教授于 2005 年首次提出,该算法基于蜂群觅食机理,将邻域搜索与随机搜索相结合,具有鲁棒性好、参数少、全局寻优能力强等诸多优势,对于多种复杂优化问题都有良好的解决效果^[12-13]。因此,本文提出将 ABC 算法引入到对非实时微网优化调度模型的求解问题中,并对常规算法中存在的。

3.1 ABC 算法原理及其改进

ABC 算法受蜂群采蜜过程的启发,将寻找蜜源的过程转化为寻优的过程,蜜蜂之间进行分工合作,其角色被划分为以下三种:采蜜蜂、侦查蜂和跟随蜂。其行为模式分为以下两种:为蜜源招募蜜蜂和放弃某个蜜源。

ABC 算法初始化时,随机生成 SN 个可行解并计算适应度值,将适应度值按优劣排序,选择前 50% 作为采蜜蜂,后 50% 为跟随蜂,随机产生可行解的公式为:

$$x_{ij} = x_{j\min} + \text{rand}(0,1)(x_{j\max} - x_{j\min}) \quad (12)$$

式中, $j \in \{1, 2, \dots, D\}$ 为 D 维解向量的某个分量。

搜索开始后,采蜜蜂在该蜜源邻域附近随机搜索新的蜜源,评价该适应度值与旧值的关系,选择最优解作为当前解,其随机搜索式表示如下:

$$v_{ij} = x_{ij} + \phi(x_{ij} - x_{kj}) \quad (13)$$

式中: $k \in \{1, 2, \dots, SN\}$, $j \in \{1, 2, \dots, d\}$, $k \neq i$ 。 ϕ 为约束产生在 $[-1, 1]$ 内的为搜索因子,它决定 x_{ij} 邻域内新解的形成。

在标准 ABC 算法中,每当产生一个新解 v_i 时,只有父代解 x_i 中的一维向量会发生改变,这大大降低了算法的收敛速度。文献[14]中通过引入一个控制参数 MR 动态调整算法的随机搜索频率,改善

算法的收敛速度。针对解 x_i 中的各维向量 x_{ij} ,通过在 0 到 1 范围内产生的均匀随机数 R_{ij} ,动态调整其随机搜索式。如果该随机数小于 MR,则对应维数的分量采用下式调整:

$$v_{ij} = \begin{cases} x_{ij} + \phi(x_{ij} - x_{kj}), & \text{if } R_{ij} < MR, \\ x_{ij}, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (14)$$

本文以迭代次数对 MR 进行线性调整,改进蜂群搜索频率,这种调整策略有利于增强算法迭代早期的探索能力,同时改进迭代后期的开发和寻优能力。

$$MR(t) = \frac{0.5t}{MCN} + 0.4 \quad t = (1, 2, 3, \dots, MCN) \quad (15)$$

式中: MCN 表示最大迭代次数, t 表示当前迭代次数。

采蜜蜂在对邻域进行搜索后分享蜜源信息,采蜜蜂的适应度越大,一个跟随蜂选择该蜜源的概率越大。跟随蜂比较在 $[0, 1]$ 区间随机产生的值与 P_i 的大小,若 P_i 大则根据式(14)在邻域内产生一个新的位置,选择该值与 $F(\theta_i)$ 中的最优值进行记忆。转移概率值表示为:

$$P_i = \frac{F(\theta_i)}{\sum_{i=1}^s F(\theta_i)} \quad (16)$$

式中, $F(\theta_i)$ 为第 i 个解的适应度,如下式所示,其中 f_i 为目标函数值。

$$F(\theta_i) = \begin{cases} \frac{1}{1 + f_i} & f_i \geq 0 \\ 1 + \text{abs}(f_i) & f_i < 0 \end{cases} \quad (17)$$

当连续经历重复搜索限制次数的循环后,仍然得不到该解更优的改良解时,说明该蜜源陷入局部最优,应当放弃该解,假设该弃值为 x_j ,则由式(12)随机产生一个新的蜜源。同时,对应该蜜源的采蜜蜂转换为侦查蜂,依次循环。

3.2 基于 ABC 算法的微网优化运行调度过程

将改进后的 ABC 算法引入到微网能量优化调度,微网能量优化调度问题与蜂群行为对应关系如表 1 所示。

表1 蜂群行为与微网能量优化调度问题的对应关系
Tab. 1 Corresponding relationship between bee colony behavior and micro grid energy optimization scheduling problem

蜂群行为	微网能量优化调度问题
蜜源	各单元 24 h 功率调度值
蜜源适应度	综合运行成本
寻找及觅食速度	求解调度问题的速度
最优适应度	综合成本最优时各单元功率调度值

基于表1所示的对应关系,采用改进的ABC算法对微网系统各分布式单元及联络线功率值进行优化调度,具体实现过程如下:

Step1: 微网优化运行调度算法初始化。ABC算法参数初始化:设置最大迭代次数MCN,重复搜索限制次数,蜂群规模SN。微网数据的准备:输入风力发电机、光伏电池经过仿真数学模型预测的日前输出功率数据以及负荷需求的日前预测数据。

Step2: 利用蜜源产生原理获取功率调度值计算初始目标函数。据式(6)-(11)表示的约束条件,对蓄电池功率、燃料电池功率及联络线功率进行范围限制,按照式(12)在寻优范围内随机产生蜜源位置,蜜源的每一维代表了某时刻微源的功率值。根据式(2)表示的并网运行综合费用目标函数,计算各初始解的目标函数值,代入式(17)得到对应的适应度值(对应ABC算法的可行解质量)。

Step3: 根据蜜源搜索机理获取新的功率调度值。根据式(14)得到新蜜源,即产生各单元新的功率值,即得到对应ABC算法新的可行解。调整各功率值使其满足式(6)-(11)的约束条件,并计算新蜜源的适应度值(对应ABC算法的新可行解质量);若新蜜源适应度值优于原蜜源,则更新蜜源位置,采用新产生的各单元功率值。否则,不予更新。

Step4: 根据转移概率确定微网综合最优运行成本。根据式(16)计算出转移概率(对应ABC算法的可行优化速度),跟随蜂根据概率值的大小选择蜜源,同时依据贪婪原则与原蜜源比较,择优选择两者中适应度值较好者,即采用综合运行成本较低者。

Step5: 根据蜜源更新情况确定如何更新功率调度值。若连续次重复搜索限制次数达到限定值,某蜜源未获得更新,则放弃该蜜源,派出侦查蜂按式(12)产生新蜜源,即得到新的各单元功率值。

Step6: 保存使得微网运行成本最优的功率调度值。保存迄今所获得的最优蜜源,该蜜源就是使并网综合运行费用最优的各单元功率值,同时可以得出该调度功率状态下最小值所代表的系统最优综合运行费用。

Step7: 判断是否获得最优功率调度值。判断当前迭代次数是否达到MCN,若未达到MCN则跳转到(3),若已经达到MCN,则得到ABC算法的最优解,即输出最优蜜源所表示的各单元最优功率调度数值。

4 仿真分析

4.1 仿真参数及可供调度的微源功率设定

本文采用的微网系统由风力发电机(WT)、光伏电池(PV)、燃料电池(FC)和蓄电池(BAT)组成,FC单体40 kW IFC PC-29型号燃料电池,个数为5,其单体最大功率约束为40 kW;BAT单体采用Hoppecke公司制造的10 OPzS 1000型号的蓄电池,个数为100,其单体最大放电功率为1.002 kW,最大充电功率为-0.436 kW,并采用KiBaM模型动态约束各时间步长充放电功率,其装机成本定为1000元/kW·h。联络线购电及售电功率约束最大值为800 kW,最小值为0。微网系统配置及各单元运行维护系数如表2所示。环境污染物包括CO₂、SO₂、NO_x,其污染物处理价格系数分别为0.21、14.842、62.964元/kg,对于FC的排放系数分别为489、0.0027、0.014 kg/MW·h。本文的调度周期为24 h,以1 h为调度仿真步长。采用“峰—平—谷”分时电价的机制,各时段的购售电电价见表3。风力发电机、光伏电池输出功率及估算的负荷数据见图2。设置算法的最大迭代次数MCN为600,重复搜索限制次数为100,蜂群规模SN为20。

表 2 系统配置情况及运行维护系数

Tab. 2 System configuration and operation maintenance factor

系统配置	装机功率	运行维护系数/(元/kW·h)
风力发电机	330 kW	0.009 6
光伏电池	1 000 kW	0.029 6
燃料电池	40 kW×5	0.045 0
蓄电池	2 kW×100	0.029 3

表 3 “峰—平—谷”分时电价

Tab. 3 Time-sharing price of "peak - Flat - Valley"

时段	时间段	购电价/(元/kW·h)	售电价/(元/kW·h)
峰时段	11:00—13:00; 19:00—22:00	0.83	0.65
平时段	7:00—10:00; 14:00—18:00	0.49	0.38
谷时段	1:00—6:00; 23:00—24:00	0.17	0.13

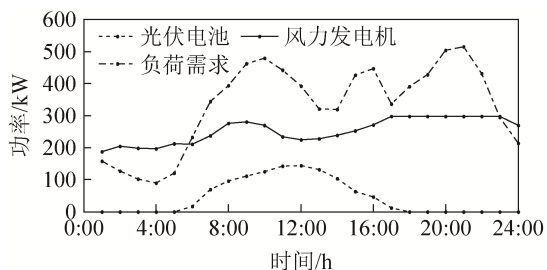


图 2 风力发电机、光伏电池输出功率及负荷需求预测数据
Fig.2 Forecast data of output power and load demand of wind turbine and photovoltaic cells

4.2 优化调度运行结果分析

按照净负荷定义得出的全调度周期内的净负荷功率见图 3。在 MATLAB 中采用改进 ABC 算法编写程序，得到的调度结果如图 4~5。图 4 表示蓄电池 SOC 变化，图 5 表示各单元功率调度情况。

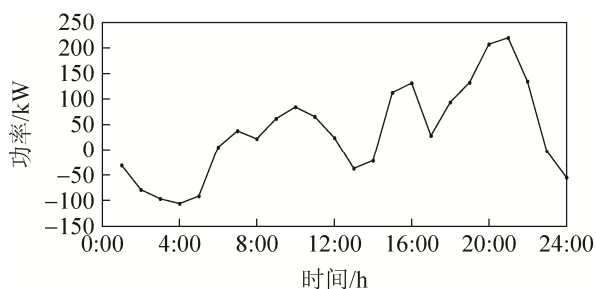


图 3 净负荷功率
Fig.3 Net load power

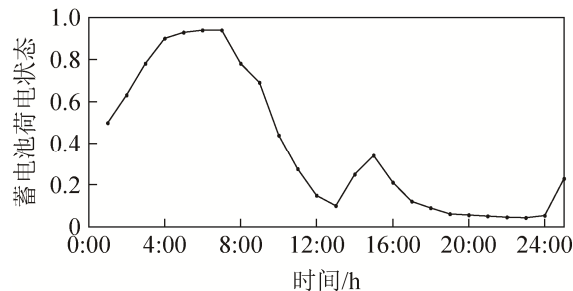


图 4 蓄电池 SOC 变化
Fig.4 Battery SOC changes.

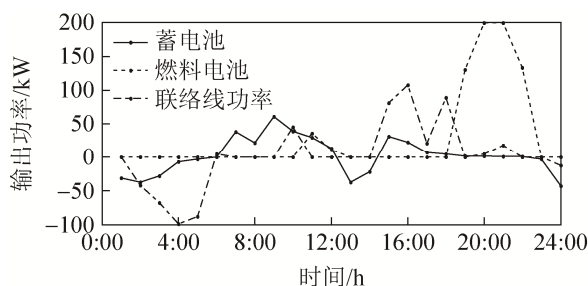


图 5 蓄电池、燃料电池和大电网友联功率调度情况
Fig.5 Power scheduling of battery, fuel cell and large power grid connection line

根据所设计的削峰填谷启发式规则的并网能量调度策略流程，对功率调度过程作出具体分析：1:00-5:00 时处于谷时段，净负荷为负，优先向蓄电池充电，其中充电功率在 1:00 以净负荷值充电，之后充电功率值随着 SOC 的增高而趋低，余电卖电给大电网获利。6:00 时处于谷时段，净负荷为正，此时电价较低，全部购电满足负荷需求。7:00-10:00 时段处于平时段，蓄电池优先放电，SOC 不断降低，10:00 时由于当前步长蓄电池调度放电功率不能满足负荷需求，负荷缺额由购电满足。11:00-12:00 处于峰时段，由于蓄电池 SOC 较低，允许的放电功率较小，无法满足负荷需求，开启 FC，电网交互功率为 0。13:00-14:00 内净负荷为负，优先向蓄电池充电，FC 停机。15:00-18:00 处于平时段且净负荷为正，尽管蓄电池 SOC 较低，但仍以低电量低持续放电，缺额由购电满足。19:00-22:00 进入峰时段，电价升高，FC 以较高功率值放电，蓄电池低 SOC 下放电，其中 20:00-21:00 间，FC 满发，蓄电池由于过度放电导致 SOC 较低，两者调度功率无法满足负荷需求，出现峰时购电情

况。23:00-24:00 谷时段, 净负荷为负, 蓄电池优先充电, 且以最大充电功率充电。在该具体调度策略下, 系统在负荷高峰时段, 蓄电池和燃料电池尽可能的放电, 并尽量避免了峰时购电缓解外网压力, 有效的起到了削峰的作用; 在负荷低谷时段以外部电网电量单向流入微网系统内部为主, 有效起到了填谷的作用。

采用本文所提出的优化模型与求解算法, 系统综合运行费用在从 831.3 元下降到 687.2 元, 如图 6 所示, 节约了约 17.3%左右的成本, 证明了该算法的有效性。与文献[17-18]相比, 将本文的算例数据代入文献[17-18]中, 得到的综合运行成本与采用本文模型及算法所得的综合运行成本数据数值对比如表 4 所示。表 4 结果表明, 本文提出的解决方案在降低综合运行成本方面具有一定的先进性。

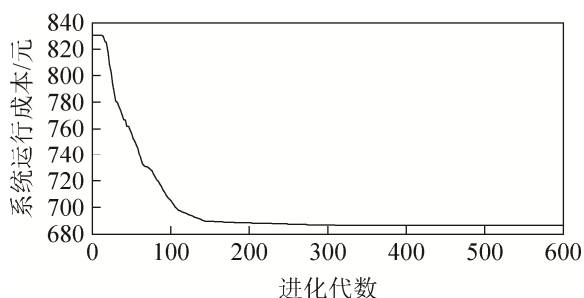


图 6 综合运行成本收敛曲线

Fig.6 Integrated operating cost convergence curve

表 4 综合运行成本对比分析

Tab. 4 Comparative Analysis of Comprehensive Operating Costs

方法	微网综合运行成本元/kWh
文献[17]	803.6
文献[18]	698.4
本文	687.2

5 结论

本文针对含有风力发电机、光伏电池、燃料电池和蓄电池的多微源微网系统, 提出一种结合削峰填谷启发式规则的并网能量调度策略; 基于能耗成本、运行维护成本、电力市场交易成本、环境污染成本、负荷损失成本建立了并网优化调度模型, 提

出将人工蜂群算法运用到非实时微网优化调度模型求解中, 并对算法的蜂群搜索频率作出改进。论文将所提出的宏观层面的优化调度策略与微观层面的基于 ABC 算法的优化调度算法相结合, 为微网并网运行综合成本最优提供了一个新的解决思路, 仿真结果验证了该方法的可行性和有效性。

参考文献:

- [1] 王成山, 王守相. 智能微网在分布式能源接入中的作用与挑战[J]. 中国科学院院刊, 2016, 31(2): 232-240.
Wang Chengshan, Wang Shouxiang. The Role and Challenge of Smart Mircogrid in the Integration of Distributed Energy Resources[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2016, 31(2): 232-240.
- [2] 杨新法, 苏剑, 吕志鹏, 等. 微电网技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 57-70.
Yang Xinfu, Su Jian, LÜ Zhipeng, et al. Overview on Micro-grid Technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 57-70.
- [3] 吴雄, 王秀丽, 刘世民, 等. 微电网能量管理系统研究综述[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(10): 7-14.
Wu Xiong, Wang Xiuli, Liu Shimin, et al. Summary of research on microgrid energy management system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(10): 7-14.
- [4] 王新刚, 艾芊, 徐伟华, 等. 含分布式发电的微电网能量管理多目标优化[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(20): 79-83.
Wang Xingang, Ai Qian, Xu Weihua, et al. Multi-objective optimal energy management of microgrid with distributed generation [J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(20): 79-83.
- [5] 邱威, 张建华, 刘念. 考虑环境因素和电压稳定性的多目标最优潮流[J]. 电工技术学报, 2012, 27(2): 190-197.
Qiu Wei, Zhuang Jianhua, Liu Nian. Multi-Objective Optimal Power Flow Considering Environmental Factor and Voltage Stability [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(2): 190-197.
- [6] 喻洁, 黄学良, 夏安邦. 基于分区协调优化的环境经济调度策略[J]. 电工技术学报, 2010, 25(1): 129-136.
Yu Jie, Huang Xueliang, Xia Anbang. Environmental Economic Dispatch Based on Sub-Area Coordinated Optimization [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(1): 129-136.
- [7] 柳丹, 李强, 袁晓冬. 考虑随机性的微网能量优化调度

- 模型[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(11): 112-117.
- Liu Dan, Li Qiang, Yuan Xiaodong. Economic and optimal dispatching of power microgrid with renewable energy resources based on stochastic optimization [J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(11): 112-117.
- [8] Ruey-Hsun L, Liao Jian-hao. A fuzzy optimization approach for generation scheduling with wind and solar energy systems[J]. IEEE Trans on Power Systems (S0885-8950), 2007, 22(4): 1665-1674.
- [9] 王兆宇, 艾芊. 基于 QPSO 与 BPSO 算法的动态微电网多目标优化自愈[J]. 电网技术, 2012, 36(10): 23-29. Wang Zhaoyu, Ai Qian. Multi-Objective Optimal Self-Healing of Dynamic Microgrid Based on Quantum-Based PSO and Binary PSO [J]. Power System Technology, 2012, 36(10): 23-29.
- [10] 石庆均. 微网容量优化配置与能量优化管理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012. Shi Qingjun. Research on optimal configuration of micro network capacity and energy optimization management [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [11] 刘小平, 丁明, 张颖媛, 等. 微网系统的动态经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(31): 77-84. Liu Xiaoping, Ding Ming, Zhang Yingyuan, et al. Dynamic Economic Dispatch for Microgrids [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(31): 77-84.
- [12] Yuan Zhang, Mo-Yuen Chow. Microgrid cooperative distributed energy scheduling (CoDES) considering battery degradation cost[C]. 2016 IEEE 25th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), 2016: 720-725.
- [13] 毛晓明, 陈深, 吴杰康, 等. 分时电价机制下含蓄电池微网的优化调度[J]. 电网技术, 2015, 39(5): 1192-1197. Mao Xiaoming, Chen Shen, Wu Jiekang, et al. Optimal Dispatching of Microgrid Containing Battery Under Time-of-Use Price Mechanism[J]. Power System Technology, 2015, 39(5): 1192-1197.
- [14] 陈阿慧, 李艳娟, 郭继峰. 人工蜂群算法综述[J]. 智能计算机与应用, 2014, 4(6): 20-24. Chen A' hui, Li Yanjuan, Guo Jifeng. A Comprehensive Survey on Artificial Bee Colony Algorithm [J]. Intelligent Computer and Applications, 2014, 4(6): 20-24.
- [15] Garg H. Solving structural engineering design optimization problems using artificial bee colony algorithm[J]. Journal of Industrial and Management Optimization(S1547-5816), 2014, 10(3): 777-794.
- [16] Akay B, Karaboga D. A modified artificial bee colony algorithm for real-parameter optimization[J]. Information Sciences(S0020-0255), 2012, 19(2): 120-142.
- [17] 刘方, 姬晓杰, 杨秀. 基于改进遗传算法的微网多目标优化调度[J]. 陕西电力, 2015, 43(3): 21-24. Liu Fang, Ji Xiaojie, Yang Xiu. Microgrid Multi-objective Optimizing Dispatch Based on Improved Genetic Algorithm[J]. Shaanxi Electric Power, 2015, 43(3): 21-24.
- [18] 邵靖珂, 汪泓, 谭阳红, 等. 计及需求侧响应的微网经济优化调度[J]. 电力系统及其自动化学报. 2016, 28(10): 31-36. Shao Jingke, Wang Feng, Tan Yanghong, et al. Optimal Economic Dispatch Microgrid Considering Demand Side Response[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2016, 28(10): 31-36.