

一种基于势博弈的微电网分布式运行优化算法

曾君¹, 王侨侨¹, 刘俊峰², 林炜¹, 郭华芳³

(1. 华南理工大学电力学院, 广东省广州市 510640; 2. 华南理工大学自动化学院, 广东省广州市 510640;
3. 中国科学院广州能源研究所集成技术中心, 广东省广州市 510650)

An Operation Optimization Algorithm of Microgrid Based on Potential Game

ZENG Jun¹, WANG Qiaoqiao¹, LIU Junfeng², LIN Wei¹, GUO Huafang³

(1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, Guangdong Province, China; 2. School of Automation Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, Guangdong Province, China;
3. Chinese Academy of Sciences Integrated Technology Research Center, Guangzhou 510650, Guangdong Province, China)

ABSTRACT: Microgrid is considered to be an effective way to utilize renewable energy. The autonomy, intelligence and green requirements of microgrid individuals are increasingly significant under the trend of the development of energy interconnection. However, it is difficult for the traditional centralized energy optimization methods to meet the development trend. This paper optimized the microgrid with potential game and the carbon emission factor from the perspective of economics. Potential game is a special form of non-cooperative game, whose finite improvement property (FIP) guarantees the existence of pure strategy Nash equilibrium. By constructing the payoff function with node economy and greenness (carbon emission) taken into account, the distributed method was adopted to solve the optimization problem. The simulation results show that, the individual autonomy and intelligence of microgrid are fully improved, and carbon emissions are under effective control. It verifies the feasibility and effectiveness of potential game applied to the operation optimization of microgrid.

KEY WORDS: microgrid; potential game; carbon emissions factor; distributed energy optimization

摘要: 微电网是可再生能源利用的有效途径。随着能源互联网技术的发展,微电网呈现出强的分散性、智能性和绿色性,微电网运行优化对其个体的自主性和理性能力提出更高要求,传统的集中式优化已难以满足这一发展的趋势。该文引入博弈理论和势博弈概念,综合考虑经济性和碳排放,以典型的风光柴蓄孤岛微电网为例,提出一种基于势博弈的运行优化模型,并证明该模型纳什均衡的存在。通过构造兼顾微

源节点经济性和绿色性(碳排放)的收益函数,将约束条件转化成策略空间,进一步提出与势博弈模型相适应的分布式优化方法,通过局中人相互通信完成迭代求解。仿真结果表明,微电网个体的自主性和智能性得到充分提高,碳排放得到有效控制,验证势博弈理论应用于微电网运行优化的可行性和有效性。

关键词: 微电网; 势博弈; 碳排放因子; 分布式运行优化

0 引言

能源危机和环境问题日益严峻,新能源的就地开发和分布式利用已成为各国政府节能减排、发展绿色能源的重要途径。微电网是分布式电源与大电网之间的最好桥梁。相比于大电网,微电网“多种能源输入(风、光、天然气等)、多种产品输出(电、热、冷)、多种转换单元(光/电、热/电、风/电、DC/AC)、多种运行状态(并网/孤立)”^[1]的特点,以及可再生能源的随机性和间歇性,要求其具备高效的能量管理系统(energy management system, EMS)^[2-3]。运行优化是保障微电网安全、高效、经济运行的基础,尤其通过发电和用电优化实现效益最大化,是微电网运行优化的关键^[4]。

运行优化是高效能量管理的核心问题。微电网的优化问题是一个多目标协同优化的问题,涉及经济、技术和环境等多方面因素。目前具有代表性的研究成果主要分为如下几个方向: 1) 采用传统优化算法: 如文献[5]采用混合整数规划对含电动汽车换电站的微电网孤岛运行进行优化。2) 基于传统集中式智能优化算法: 如文献[6]讨论采用铅酸蓄电池作为储能系统的独立微电网经济运行优化问题,采用改进型非劣排序遗传算法(non-dominated

基金项目: 国家自然科学基金项目(61573155); 广东省自然科学基金(2016A030313508); 广东省科技计划项目(2016A010102007)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (61573115); Guangdong Natural Science Foundation (2016A03031358); Guangdong Science and Technology Planning Project (2016A010102007).

sorting genetic algorithms-II, NSGA-II)探讨成本和蓄电池优化使用的多目标优化问题;文献[7]以经济性和负荷满意度为目标,采用 NSGA-II 优化算法获得 Pareto 最优边界。3) 从博弈论的角度优化微电网运行:如文献[8]引入非合作完全信息动态博弈理论,构建能源侧与负荷侧的互动关系,优化微电网出力;文献[9]提出采用非合作博弈研究多微电网交易模式的一般模型及分析方法;文献[10]在电力市场交易环境下研究微电网市场竞标调度策略,实现利益分配最大化。

从这些研究来看:1) 传统的优化算法对模型的依赖性很大,建模受到了限制;2) 集中式的智能算法很难体现个体对自主性的诉求;3) 相对于前两种方法,博弈论的引入在一定程度上提高微电网个体的自主性和智能性,但引入博弈论大部分都面临一个共同问题——需要证明博弈均衡解的存在性,这大大限制了博弈论在微电网中的应用。鉴于此,本文引入势博弈进行微电网运行优化分布式求解。势博弈,作为非合作博弈的一种特殊形式,具有良好的有限递增属性,保证了纯策略均衡解的存在,而无需繁琐求证均衡解的存在性。而且,更为重要的是,势博弈不仅可以采用集中式求解,更适合分布式优化。考虑微电网个体未来在能源互联网发展新形势下将具有的个体自利性、智能性,将势博弈引入微电网优化运行问题的分布式求解,将是一条有效途径。

势博弈的优良属性使得其在很多领域都有成功的应用,如图形着色问题^[11]、数独问题^[12],尤其在通信领域的应用^[13-14]最为广泛和成功。在微电网运行优化上,文献[15-16]初步提出使用势博弈研究微电网优化的思想,但未得到真正意义上的建模与应用。本文基于势博弈理论,以风光柴蓄微电网为研究对象,从经济角度对风光电源及蓄电池建模,并考虑环境效益,借鉴碳排放权思想,引入碳排放因子至柴油机组经济运行模型,最终建立并证明微电网的势博弈经济运行模型。

本文的特色是,从经济性角度为异构的微电网个体建立收益模型;将复杂的个体约束条件转化为局中人的策略空间,从博弈角度将个体统一起来进而建立势博弈模型;采用分布式的方式进行优化求解,充分体现了个体的自主性和智能性。最后,以一个典型孤岛微电网算例,验证本文提出的基于势博弈的微电网经济运行模型的可行性和正确性。分

散控制的思想被越来越多地应用到微电网中,多代理系统(multi-agent system, MAS)理论是一种典型的方法,其核心理念是每个可控元件实现自治控制^[4]。本文采用的势博弈优化方法非常契合于 MAS 理论的分布式特性。因此,本文的工作将进一步与课题组前期基于 MAS 所做的工作^[17-18]相结合,以期从架构和算法全面实现微电网运行的分布式优化和能量管理。

1 基于势博弈的微电网建模

1.1 微电网结构

本文以实验室分布式发电系统为基础,通过一定扩展建立了风、光、柴、蓄微电网,结构如图 1 所示。主要分为由个体光伏阵列、风力发电机、柴油机组、蓄电池以及负荷组成的底层设备单元和功率控制器,以及顶层能量管理系统。整个微电网通过一个公共连接点(point of common coupling, PCC)与大电网连接,实现并网/孤岛平滑切换。能量管理系统主要功能包含人机交互、预测模块、系统分析、运行优化和调度控制,是微电网的核心,对整个系统运行进行协调和控制。以此为基础,本文主要研究微电网孤岛状态下的自治运行优化。

1.2 博弈论及势博弈

博弈论是研究智能的理性决策者之间冲突与合作问题的理论^[19]。博弈根据能否达成具有约束力的协议,分为合作博弈和非合作博弈。

非合作博弈主要研究在利益相互影响的局势中如何决策使自身收益最大,在更多的场合被讨论和应用。纳什均衡是非合作博弈中的一个重要概念,然而并不是每一个博弈都存在纳什均衡,因此必须证明博弈均衡的存在性,有时证明过程是复杂甚至是困难的。若博弈模型本身收敛于纳什均衡,则将大大简化博弈模型的建立。

势博弈就是这种类型的博弈,作为非合作博弈的一种特殊形式,具有有限改进特性(finite improvement properties, FIP),由 Monderer 和 Shapely 于 1996 年首次提出^[20]。

1.2.1 势博弈的定义

势博弈分为序数势博弈、加权势博弈和完全势博弈,前者包含后者。完全势博弈使用最多,本文将按完全势博弈建模。

定义^[20]:对于博弈 $\Gamma = \langle N, \{Y_i\}_{i \in N}, \{U_i\}_{i \in N} \rangle$,若存在函数 $P: Y \rightarrow R$,对于 $\forall i \in N, \forall y^{-i} \in Y^{-i}, \forall x, z \in Y^i$,满足:

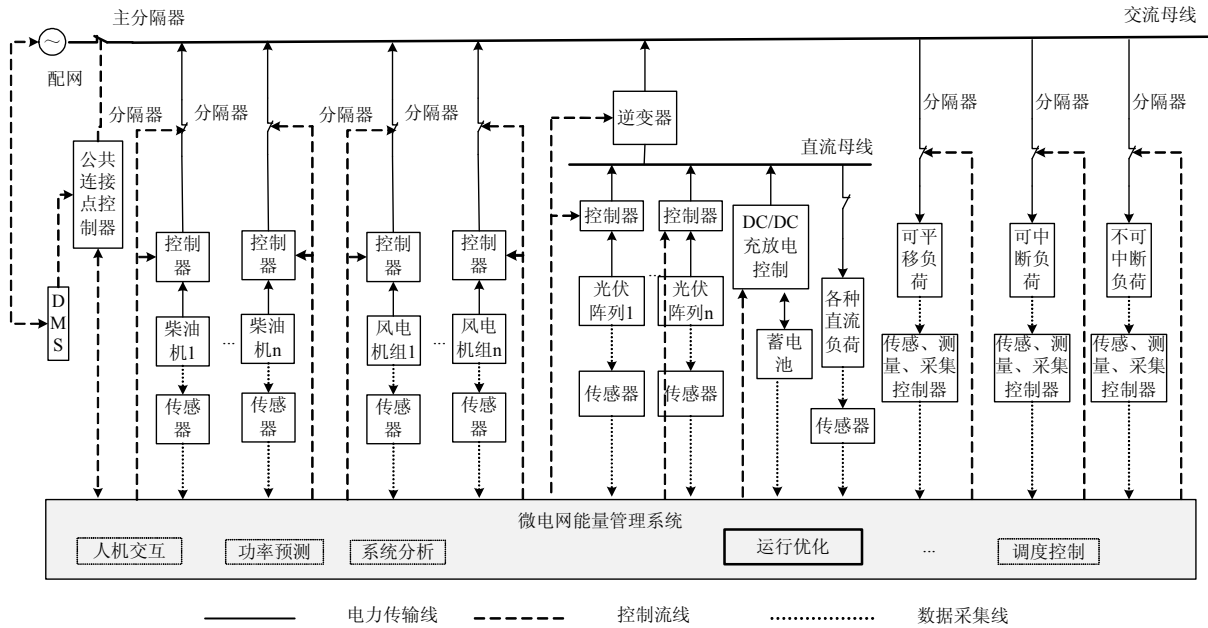


图 1 微电网结构图

Fig. 1 Architecture of microgrid

$$u_i(x, y^{-i}) - u_i(z, y^{-i}) = P(x, y^{-i}) - P(z, y^{-i}) \quad (1)$$

称博弈 Γ 为完全势博弈， N 为局中人， Y_i 为局中人的策略空间， U_i 为局中人的收益函数。

其中，用 y^i 表示第 i 个局中人的策略，用 y^{-i} 表示除第 i 个局中人外其余局中人的策略组合，所有局中人的策略 $y(y \in Y)$ 可以表示为 $y=(y^i, y^{-i})$ 。

1.2.2 势博弈的属性

属性 1: 博弈 $\Gamma = \langle N, \{Y_i\}_{i \in N}, \{U_i\}_{i \in N} \rangle$ 的势函数为 $P: Y \rightarrow R$ ，则博弈 $\Gamma = \langle N, \{Y_i\}_{i \in N}, \{U_i\}_{i \in N} \rangle$ 的纳什均衡与博弈 $\Gamma = \langle N, \{Y_i\}_{i \in N}, \{P_i = P\}_{i \in N} \rangle$ 的纳什均衡一致。

属性 2: 每个有限序数势博弈都有纯策略的均衡解。

属性 3: 每个有限序数势博弈都具有有限改进特性。

势博弈的这 3 条属性^[20]保证了基于势博弈建立的博弈模型必然存在纳什均衡，因而只需证明所建模型为势博弈，不必再证明模型的收敛性。

1.3 基于微电网个体的博弈建模

本文将从博弈的三要素对微电网进行映射建模，三要素为局中人、收益函数、策略空间。具体说明如下：

1) 局中人。

为了充分体现微电网中微电源自主性，将各微电源映射成局中人，局中人包括光伏、风机、柴油机和蓄电池，各局中人能够自主决策，在相互博弈过程中最大化自身效益，同时促进系统效益最优。

2) 收益函数。

本文从经济角度协调各微电源出力，因此局中人的收益函数 U_i 选择各自对应的经济运行模型 F_i 。

$$\begin{cases} U_i = F_i, i \in N \\ F_i \in \{F_{pv}, F_{wt}, F_{dc}, F_{ba}\}, i \in N \end{cases} \quad (2)$$

3) 策略空间。

满足各微电源约束条件的出力范围作为各微电源的策略空间，于是该势博弈的策略组合即为光伏、风机、柴油机和蓄电池的出力组合。

$$\begin{cases} Y_i = \{P_i : P_{i-min} \leq P_i \leq P_{i-max}\} \\ P_i \in \{P_{pv}, P_{wt}, P_{dc}, P_{ba}\}, i \in N \end{cases} \quad (3)$$

需要说明的是，依据势博弈的属性 2 和 3，需要将策略空间线性分割(离散间隔根据精度要求确定，如 1kW/step)完成离散化，使其成为有限的策略空间，确保博弈为有限博弈。

此外，特别需要说明，微电网中的个体从结构、功能、性能到所扮演的角色各不相同，他们是异构的，不能建立统一形式的收益函数，需要为每个个体单独建立收益函数并确立策略空间。

1.3.1 风机局中人

1) 收益函数。

风机的收益函数主要分为两部分，售电收益和运行维护成本，如式(4)所示。

$$F_{wt} = C_{ep} P_{wt} \Delta t - k_{wt} P_{wt} \Delta t \quad (4)$$

式中： F_{wt} 为风机收益； C_{ep} 表示电价； P_{wt} 为风机输出功率； k_{wt} 表示风机的维护成本系数。

2) 功率输出预测。

风力发电机的功率预测为确定风机的出力上

限, 模型如式(5)。

$$P_{WT} = \begin{cases} 0, & v \leq v_{ci} \text{ or } v > v_{co} \\ \frac{P_r(v^3 - v_{ci}^3)}{v_r^3 - v_{ci}^3}, & v_{ci} < v \leq v_r \\ P_r, & v_r < v \leq v_{co} \end{cases} \quad (5)$$

式中: P_{WT} 为风机预测输出功率; v_{ci} 为切入风速; v_{co} 为切出风速; v_r 为额定风速; P_r 为额定输出功率。

3) 策略空间。

$$Y_{wt} = \{P_{wt} : 0 \leq P_{wt} \leq P_{wt-max}\} \quad (6)$$

式中的 P_{wt-max} 等于式(5)中的风机预测输出功率。

1.3.2 光伏局中人

1) 收益函数。

光伏的收益函数与风机类似, 如式(7)所示。

$$F_{pv} = C_{ep} P_{pv} \Delta t - k_{pv} P_{pv} \Delta t \quad (7)$$

式中: F_{pv} 表示光伏的收益; P_{pv} 表示光伏的输出功率; k_{pv} 表示光伏的运行维护成本系数。

2) 功率输出预测。

光伏功率特性如式(8)所示。

$$P_{PV} = P_{STC} G_{AC} [1 + k_s (T_c - T_r)] / G_{STC} \quad (8)$$

式中: P_{PV} 为预测输出功率; P_{STC} 为标准测试条件下(光照 G_{STC} , 温度 25°C)下的最大测试功率; G_{STC} 为标准测试条件的光照, $1\text{kW}/\text{m}^2$; k_s 为功率温度系数, $0.47\%/^\circ\text{C}$; T_c 为光伏阵列的工作温度; T_r 为参考温度, 25°C 。

3) 策略空间。

$$Y_{pv} = \{P_{pv} : 0 \leq P_{pv} \leq P_{pv-max}\} \quad (9)$$

式中的 P_{pv-max} 等于式(8)中的光伏预测输出功率。

1.3.3 蓄电池局中人

1) 收益函数。

蓄电池收益函数表示如式(10)所示。

$$F_{ba} = C_{ep} P_{ba} \Delta t - k_{ba} |P_{ba}| \Delta t \quad (10)$$

式中: F_{ba} 为蓄电池的收益; P_{ba} 为蓄电池的充放电功率, $P_{ba} > 0$ 表示放电, $P_{ba} < 0$ 表示充电; k_{ba} 为蓄电池的运行维护成本系数。

2) 充放电模型。

铅酸蓄电池的充放电功率 P_c 和 P_d 与荷电状态的关系如式(11)~(12)所示。

$$\text{SOC}(t) = \text{SOC}(t-1)(1-\sigma) + \frac{P_c \Delta t \eta_c}{E_r} \quad (11)$$

$$\text{SOC}(t) = \text{SOC}(t-1)(1-\sigma) - \frac{P_d \Delta t}{E_r \eta_d} \quad (12)$$

式中: $\text{SOC}(t)$ 为第 t 个时段结束时蓄电池的荷电状态; P_c 、 P_d 和 η_c 、 η_d 分别为蓄电池的充、放电功率和效率; E_r 为蓄电池的额定容量; σ 为蓄电池自放电率。

3) 策略空间。

蓄电池充放电功率限制, 取单位时间内蓄电池充放电不超过其额定容量的 20%, 即

$$\begin{cases} P_c \cdot 1h \leq 20\% E_r / \eta_c \\ P_d \cdot 1h \leq 20\% E_r \eta_d \end{cases} \quad (13)$$

为确保在微电网孤岛运行时, 蓄电池有充足的余量进行实时调度或提供紧急功率支撑, 设定蓄电池的最小荷电量为 SOC_{min} 。为防止蓄电池过度充电, 设定蓄电池的最大荷电量为 SOC_{max} , 即

$$\text{SOC}_{min} \leq \text{SOC} \leq \text{SOC}_{max} \quad (14)$$

蓄电池允许的充放电功率随荷电状态不断变化, 即

$$\begin{cases} P_c = \min(P_{c-max}, (\text{SOC}_{max} - \text{SOC}) E_r / \eta_c) \\ P_d = \min(P_{d-max}, (\text{SOC} - \text{SOC}_{min}) E_r \eta_d) \end{cases} \quad (15)$$

式中: P_{c-max} 和 P_{d-max} 分别为充电和放电最大允许功率, 均为正值。

$$Y_{ba} = \{P_{ba} : -P_c \leq P_{ba} \leq P_d\} \quad (16)$$

1.3.4 柴油机局中人

1) 收益函数。

柴油机的收益函数表示为

$$F_{de} = (C_{ep} P_{de} - C_{oil} D_{iesel} - k_{de} P_{de} - f_{co2}) \Delta t - C_{on-off} \quad (17)$$

式中: F_{de} 表示柴油机的收益; P_{de} 为柴油机的输出功率; C_{oil} 为燃油价格; D_{iesel} 为柴油机的单位耗油量; k_{de} 为柴油机的维护成本系数; f_{co2} 为单位时间内的碳交易成本; C_{on-off} 表示启停成本。

2) 耗量特性。

在微电网中, 柴油发电机具有输出稳定和响应速度快的特点, 一般作为系统的旋转备用, 以提高系统的稳定性。柴油机的燃油特性一般可以表示为输出功率的二次函数(C_1 、 C_2 和 C_3 为系数), 如式(18)所示。

$$D_{iesel} = C_1 P_{de}^2 + C_2 P_{de} + C_3 \quad (18)$$

考虑柴油机组的二氧化碳排放, 在保证系统稳定的前提下, 引入碳排放交易机制, 从经济的角度约束柴油机组的出力, 以提升微电网的环境效益。

具体分析如下: 每台柴油机组分配一个碳排放配额(quota), 机组超出排放配额的部分需要从碳交

易市场购买碳排放权，并将这部分支出作为柴油机组的运行成本纳入其经济运行模型当中。根据机组的碳排放系数 k_{co_2} ，将碳排放配额 Q 转换成单位时间内的功率限额 $P_{\text{co}_2} = Q / k_{\text{co}_2}$ ，同样以功率限额表示的碳交易价格为 C_{co_2} ，碳交易成本表示如式(19)。

$$f_{\text{co}_2} = \begin{cases} 0, & P \leq P_{\text{co}_2} \\ C_{\text{co}_2}(P - P_{\text{co}_2}), & P > P_{\text{co}_2} \end{cases} \quad (19)$$

3) 策略空间。

柴油机的输出功率要满足其机械出力要求，即

$$P_{\text{de-min}} \leq P_{\text{de}} \leq P_{\text{de-max}} \quad (20)$$

机组爬坡功率约束，即

$$\begin{cases} P_{\text{de},t} - P_{\text{de},t-1} \leq \Delta t R_{\text{up}} \\ P_{\text{de},t-1} - P_{\text{de},t} \leq \Delta t R_{\text{down}} \end{cases} \quad (21)$$

式中 R_{up} 、 R_{down} 分别表示机组的上升率限制和下降率限制。

最短开停机时间约束^[21]，即

$$\begin{cases} s_{\text{start}}^t + \sum_{i=1}^{d_t} s_{\text{down}}^{t+i} \leq 1 \\ s_{\text{down}}^t + \sum_{i=1}^{d_s} s_{\text{start}}^{t+i} \leq 1 \end{cases} \quad (22)$$

式中： s_{start}^t 、 s_{down}^t 为二进制变量，且满足 $s_{\text{start}}^t + s_{\text{down}}^t = 1$ ，分别表示运行状态和停机状态； d_t 和 d_s 分别表示最小运行时间和最小停机时间。

$$Y_{\text{de}} = \{P_{\text{de}} : \text{式}(20)(21)(22)\} \quad (23)$$

1.4 微电网势博弈模型及分析

微电网中个体的异构性使得无论是收益函数还是策略空间都没有统一的表现形式。确定收益函数进而找到势函数是势博弈建模的关键问题。为了使各微电源在博弈过程中达到自身效益最大化同时又能优化系统的效益，考虑构造势函数为各局中人效益之和，即

$$G(y) = \sum_i^N U_i = \sum_i^N F_i \quad (24)$$

由式(24)建立的微电网博弈模型是一个完全势博弈。

根据势博弈的定义，证明过程如下：

$$G(y) = G(y^i, y^{-i}) = F_i + \sum_{j,j \neq i}^N F_j \quad (25)$$

$$\Delta G = G(y^i, y^{-i}) - G(y^{i'}, y^{-i'}) = (F_i + \sum_{j,j \neq i}^N F_j) - (F_{i'} + \sum_{j,j \neq i'}^N F_j) = F_i - F_{i'} \quad (26)$$

$$\Delta U = U(y^i, y^{-i}) - U(y^{i'}, y^{-i'}) = F_i - F_{i'} \quad (27)$$

$$\Delta G = \Delta U \quad (28)$$

由式(28)，基于微电网经济运行模型建立的博弈模型满足完全势博弈的定义，具备势博弈的所有属性。将策略空间离散化后，该势博弈是一个有限势博弈，因此具有有限改进特性，由属性 2 可知，该势博弈必定存在一个纯策略的纳什均衡解。

2 基于势博弈的分布式优化算法分析

势博弈的属性 1 保证了不管是从势函数的层面求解还是从局中人的效用函数角度优化，都能获得相同的纳什均衡解。本文研究微电网的分布式优化，选择从局中人的效用函数角度优化，是势博弈与分布式相契合的一种方式，在势博弈框架下既能最大化局中人收益又能使系统最优。

本文势博弈优化主要分为以下几个部分：

- 1) 策略空间的确定；
- 2) 策略评估与决策规则；
- 3) 策略更新；
- 4) 功率平衡。

2.1 策略空间的确定

每个局中人要求满足的约束条件各不相同，为了适应博弈的需要，必须将约束条件转化成局中人的策略空间，简化博弈的模型。

光伏阵列和风力发电机要按照功率预测模型对环境参数进行计算，确定对应的最大允许输出功率。光伏和风机的策略就是在最大允许输出功率范围内的离散数据点。

蓄电池要更新荷电状态，并考虑安全运行确定下一时段允许的充放电功率，将其离散化作为蓄电池局中人的策略空间。

柴油机要在基本的机械出力允许范围内考虑启停和爬坡约束确定离散化的策略空间。

2.2 策略评估与决策规则

假定每个局中人都是个体理性的，即每一个局中人参与博弈的目的是使自身的效益最大化。因此，将局中人的收益函数作为策略评估的目标函数是最直接的方式。采用 argmax 决策规则，即选择使收益函数取得最大值的策略作为下一步的策略。局中人在离散的策略空间中，通过遍历的方式确定最优策略。

2.3 策略更新

在局中人确定最优策略之后，按确定的优先顺序进行策略更新。光伏阵列和风机运行维护成本低，加之光能和风能作为清洁能源绿色环

保, 因此优先更新; 蓄电池在微电网中起平衡功率和削峰填谷的作用, 设置其策略更新顺序为最后。因此, 策略更新的顺序依次为光伏阵列、风机、柴油机和蓄电池。根据更新顺序为局中人分配优先级, 更新次序越靠前则优先级越高, 局中人通过相互通信可以保证按序更新策略。

2.4 功率平衡

不同于势博弈的其他应用, 微电网的势博弈模型必须满足实时功率平衡约束, 即使微电网中存在储能装置, 但在某一具体时刻也只能充当电源或者负荷(蓄电池具有双重属性, 充电时相当于负荷, 放电时等同于电源)。本文忽略微电网中的网损, 认为发电功率与负荷相等, 如式(29)。

$$\sum_k P_k - \sum_j L_j = 0 \quad (29)$$

本文采用罚函数的方法考虑功率平衡约束, 设定功率缺额来表征约束满足的程度。功率缺额为所有电源发电减去所有负荷用电。通过功率缺额构造罚函数项(如式(30)), 添加到局中人的收益函数和势函数上, 如式(31)–(32), 使每个局中人将功率平衡作为其决策时必须考虑的因素。

$$F_{\text{pun}}(y^i, y^{-i}) = (\sum_k P_k - \sum_j L_j)^2 \quad (30)$$

$$U(y^i, y^{-i}) = F_i - \alpha F_{\text{pun}}(y^i, y^{-i}) \quad (31)$$

$$G(y^i, y^{-i}) = \sum_j F_j - \alpha F_{\text{pun}}(y^i, y^{-i}) \quad (32)$$

由式(33), 考虑功率平衡后的博弈模型仍然是一个完全势博弈。 α 是罚因子, 在博弈过程中使 α 不断增大, 最终罚函数项将趋近于0, 所得到的纳什均衡解满足功率平衡。

$$\Delta U = \Delta G = (F_i - F_i') - \alpha [F_{\text{pun}}(y^i, y^{-i}) - F_{\text{pun}}(y^i', y^{-i})] \quad (33)$$

2.5 分布式优化过程

局中人分布式结构如图2所示, 具体过程如下:

步骤1: 输入未来24h的环境参数(温度、光照强度和风速)和负荷预测数据。

步骤2: 局中人确定策略空间; 由光伏局中人开启博弈过程。

步骤3: 局中人按更新次序通过广播的方式向其他局中人询问出力情况, 据此确定功率缺额; 根据 argmax 原则确定最优出力并更新策略。

步骤4: 各局中人判断解的变化量和功率缺额是否满足给定精度, 共同决定博弈的下一阶段。满足则转到步骤5; 不满足则增大罚因子返回步骤3。

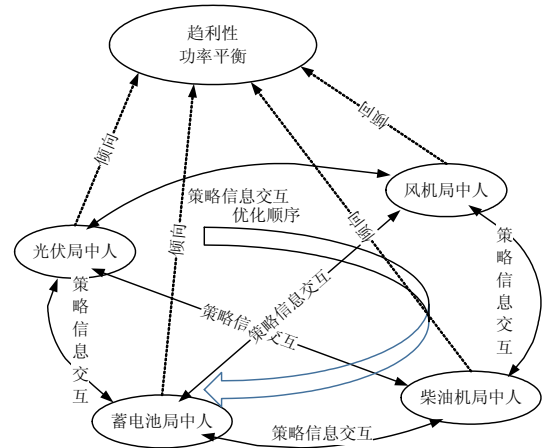


图2 局中人的分布式结构

Fig. 2 Distributed architecture of players

步骤5: 结束博弈, 各局中人根据博弈结果调整出力; 转入下一时段, 返回步骤2。

可见, 以上基于局中人收益的势博弈优化过程是一个分布式优化过程, 并且非常契合于MAS理论, 对其优势进一步分析如下:

1) 能够作用于环境。基于微电网个体建立的局中人, 能够通过调整自己的策略改变博弈的进程, 通过改变出力影响微电网的运行。

2) 能够相互通信。局中人通过广播的方式获取其他局中人的决策情况, 来确定自己的策略且掌握系统的功率缺额情况, 并经局中人的协作减小甚至消除功率缺额。

3) 拥有一定的自主权。局中人通过博弈自行决定优化策略, 即本地决策, 不需要中央控制器为其分配出力。具有明确的行为和倾向。每个局中人都具有趋利性, 即追逐自身收益最大化, 同时在势博弈框架下还有最优化系统收益的共同目标。

3 算例

3.1 基本数据

本文以一个由4组光伏、6台风机、3台柴油机和1组蓄电池组成的孤岛微电网为研究对象, 主要针对微电网运行优化中的日前规划, 局中人的策略空间离散间隔为1个单位(1 kW)。各设备维护费用见表1。24h的环境参数包括温度、光照强度和风速的具体数据见图3。光伏阵列和风机的参数设置分别见表2、3。蓄电池设定的容量为80kW·h, 具体见表4。柴油机参数具体数据见表5。

根据表1中的环境参数数据, 结合光伏阵列和风机的功率预测模型, 计算得出光伏和风机24h内的预测最大输出功率。图4为未来24h风/光预测最大输出功率及未来24h负荷预测数据。

表 1 不同设备的维护成本系数

Tab. 1 Coefficient of maintenance cost of different equipment

设备类型	维护成本/(元/kW)	设备类型	维护成本/(元/kW)
柴油发电机	0.0946	光伏阵列	0.0096
风力发电机	0.0296	蓄电池组	0.1832

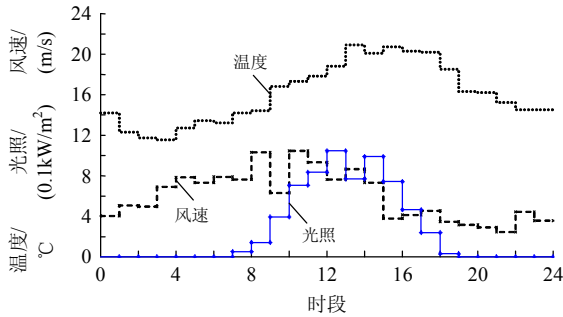


图 3 24h 环境参数预测数据

Fig. 3 Data of the forecast 24h

表 2 光伏阵列参数

Tab. 2 Photovoltaic array parameters

光伏阵列	额定功率/kW
1 号	30.0
2 号	20.0
3 号	15.0
4 号	15.0
总计	80.0

表 3 风机参数

Tab. 3 Wind turbine parameters

风力发电机	1 号	2 号	3 号	4 号	5 号	6 号
切入风速 $v_{ci}/(m/s)$	3	3	3	3	3	3
额定风速 $v_r/(m/s)$	11.0	11.0	10.0	10.0	10.0	9.5
切出风速 $v_{co}/(m/s)$	20	20	25	25	25	25
额定功率/kW	30.0	30.0	20.0	15.0	15.0	10.0

表 4 蓄电池参数

Tab. 4 Battery parameters

参数	数值
容量/(kW-h)	80
充放电效率/%	85
初始蓄电量/(kW-h)	40
SOC_{min}	0.4

表 5 柴油机组参数

Tab. 5 Diesel engine parameters

参数	1 号	2 号	3 号
最大机械出力/kW	60	80	100
最小机械出力/kW	5	5	4
碳排放系数/(g/kW-h)	260	300	240
碳排放配额/(kg/h)	10.8	12.0	13.5
碳排放的功率限额/kW	41.5	40	56
启停成本/元	1.3	1.8	1.1
碳交易成本/元	0.2	0.2	0.2

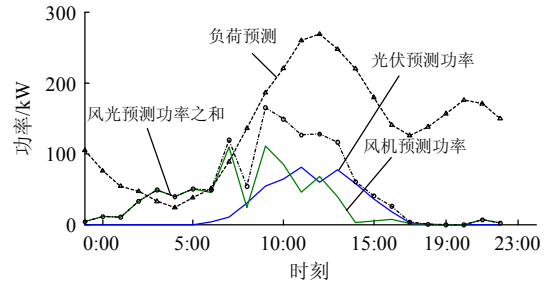


图 4 光伏、风机功率预测与日负荷预测曲线

Fig. 4 PV, WT & load output power forecasting

3.2 博弈结果分析

仿真基于 windows8.1 操作系统(Intel Core i5, RAM 4GB, 64 位, 主频 2.5GHz)和 MATLAB2014a 软件, 使用软件自带的运行计时功能得到运行的平均时间为 2.4s, 考虑到实际的通信过程所耗费的时间, 博弈时间至多为分钟级, 完全可以满足日前规划对于优化速度的要求。

先从图 4 分析源荷预测的基本情况。从图 4 中可以看出负荷预测存在峰谷之分, 峰值出现在 10:00~16:00 之间, 而可再生能源的预测出力峰值也出现在这个时段, 在一定程度上契合了负荷的需求, 但仍需蓄电池和柴油机组要提供相应的功率支撑; 在 0:00~7:00 时段, 负荷需求处于低谷, 风机预测出力比较充足, 此时适合给蓄电池充电, 提高风能的利用率; 在 17: 00~23:00 时段, 负荷出现一个晚高峰, 此时段内已无光照, 光伏阵列输出为零, 同时风力不足, 为满足负荷需求, 应当由柴油机组充当主力发电, 蓄电池协助保证功率平衡。

通过实验仿真, 光伏、风机、柴油机和蓄电池的势博弈优化结果分别见图 5—8。

从图 5、6 可以看出, 光伏和风机的博弈输出与最大预测输出重合(除弃风点), 充分体现了光伏和风机出力的优先权; 图 7 表明蓄电池谷荷充电峰荷放电的特征; 图 8 显示, 柴油机组在夜间风光不足时均衡出力满足负荷需求。由此可见, 博弈结果达到了运行优化的要求, 并且契合该孤岛微电网的

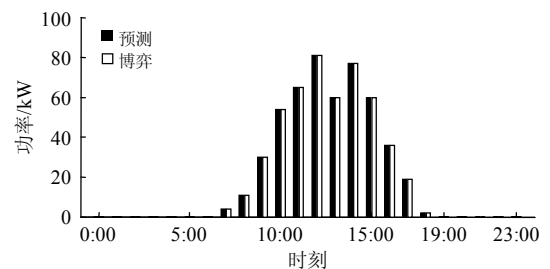


图 5 光伏博弈优化输出功率与最大输出功率对比

Fig. 5 Comparison of optimal output power and maximal output power of PV

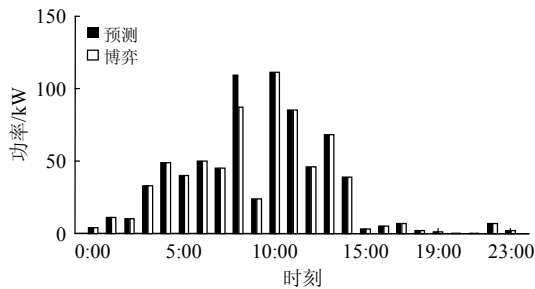


图6 风机博弈优化输出功率与最大输出功率对比

Fig. 6 Comparison of optimal output power and maximal output power of WT

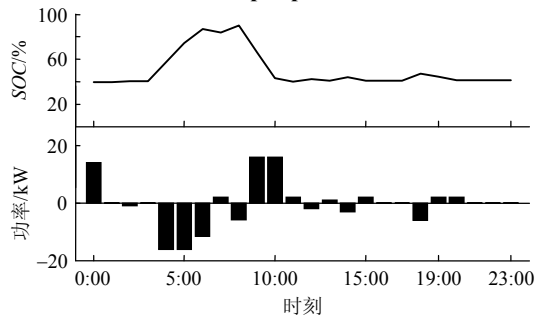


图7 蓄电池SOC及24h充放电功率(负:充电,正:放电)

Fig. 7 Battery charge state and 24h charge and discharge power (negative value for charging, positive value for discharge)

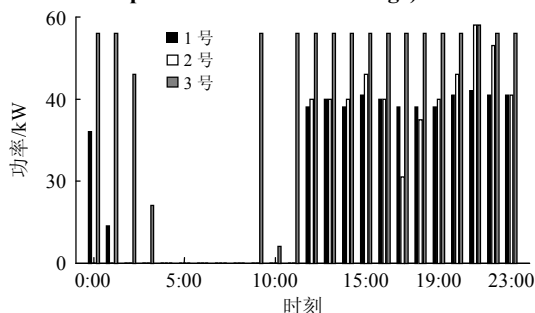


图8 柴油机博弈输出功率

Fig. 8 Output power of diesel engine through game

实际运行情况。

进一步分析各个微源的输出情况如下:

图5表明,光伏的博弈输出与最大预测输出重合,即光伏获得最大功率输出。究其原因:光伏一般固定安装,不易于输出功率调整,且运行维护成本很低;加之光能的清洁可再生性,其保持在最大功率输出符合微电网经济运行需求和实际需要。博弈结果与之相契合。

图6表明,除弃风点,风机的博弈输出与最大预测输出重合,风机获得最大功率输出。在图6中8:00~9:00时段,风光出力相较于负荷过剩,风机出现弃风现象。图7中蓄电池在此时段之前充电致使其荷电状态接近饱和,虽然蓄电池也在充电,但充电功率受限而无法消纳多余的风电。由于光伏最大

功率输出,风机必须调整出力,出现弃风现象。博弈结果表明,风光出力相较于负荷不足时,风机完全出力,最大化风能利用率;而过剩时,先提供蓄电池充电再进行相应的功率调整。

图7是蓄电池的荷电状态和充放电曲线,从图7可以看出,蓄电池在负荷低谷时充电消纳过剩的风电,而在负荷高峰时放电,符合蓄电池的经济运行。整个荷电状态曲线维持在0.4(SOC_{min})以上,符合最小荷电状态的设定,有效防止了过度放电对蓄电池的伤害,同时确保蓄电池有足够余量应对紧急情况。蓄电池的充放电功率限定在最大允许充放电功率范围内,且能看出剩余电量对蓄电池充放电的影响,如谷荷充电时,随着荷电量的上升,允许的充电功率随之减小,有效防止蓄电池过冲。博弈结果与之契合。

柴油机组博弈结果如图8所示,具有以下3个主要特征:

1) 柴油发电机组是微电网中的重要备用电源。在风光出力严重不足时,柴油机快速启动支撑负荷需求。如图7中0:00~4:00时段,无光照且风速很小,柴油机出力满足低谷负荷需求;11:00~23:00时段,光伏和风机全部出力仍然难以满足过大的负荷需求,柴油机出力提供功率支撑。

2) 柴油机组具有优先级别,符合经济性。在9:00~10:00时段由于风速突然减小致使风光出力不足,3号柴油机迅速填补功率缺额以及在低谷负荷时独自启动,1号柴油机在低谷负荷次于3号机组启动,2号柴油机则在峰荷时次于其他两台柴油机启动,说明3台机组的优先级依次是3号、1号、2号,这与3台柴油机的碳排放性能和启停成本高低一致。

3) 碳排放因子影响机组出力。3台柴油机的碳排放功率配额分别为41.5kW、40kW和56kW,博弈结果显示3台柴油机输出功率控制在其功率配额附近,没有出现单台机组获得接近满额的输出而其他机组只有很小的输出这种极端情况。由此说明,碳排放因子的引入有效地限制了柴油机组的碳排放,提升了微电网的环境效益。

以上结果及分析充分说明了势博弈在微电网运行优化中的可行性和有效性。

4 结论

1) 为异构的微电网个体建立收益模型。从经济角度按微电网个体的不同特点建立了收益模型。

其中，引入碳排放因子考虑柴油机的非绿色性。将风、光、柴、蓄等设备映射成局中人，通过局中人的收益函数构造势函数，并证明了势博弈模型。

2) 将约束条件转化成策略空间。微电网异构的个体具有形式各异的约束条件，本文通过约束条件转化，为局中人建立统一形式的策略空间。

3) 采用分布式方式对势博弈模型进行优化求解。其完美的分布式特性，将是基于 MAS 的微电网能量管理系统建立的关键点和基础。

4) 通过典型的孤岛微电网算例进行了仿真验证。实验结果表明：由风、光、柴、蓄组成的局中人具有充分的自主性和独立决策能力；同时，光伏和风机的优先顺序及绿色性保证了其优先权，促进了可再生能源的利用率最高；柴油机组的快速响应特性，确保了对负荷的可靠供电；蓄电池储能促进了过剩风能和光能的消纳，并维持着博弈过程中的功率平衡。实验结果证明了本文所提出方法的可行性和有效性。

参考文献

- [1] 王成山, 武震, 李鹏. 微电网关键技术研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 1-12.
Wang Chengshan, Wu Zhen, Li Peng. Research on key technologies of microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 1-12(in Chinese).
- [2] 曾君, 刘俊峰, 吴丽群, 等. 可再生能源分布式发电能量管理的复杂性研究[J]. 控制理论与应用, 2012, 29(2): 257-264.
Zeng Jun, Liu Junfeng, Wu Liqun, et al. Complex characteristics of energy management system for distributed renewable energy generation[J]. Control Theory & Applications, 2012, 29(2): 257-264(in Chinese).
- [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(in Chinese).
- [4] 尼科斯·哈兹阿伊里乌. 微电网——架构与控制[M]. 陶顺, 陈萌, 杨洋译. 北京: 机械工业出版社, 2015: 47-50.
Hatziaargyriou N. Microgrids: architectures and control [M]. Tao Shun, Chen Meng, Yang Yang, trans. Beijing: China Machine Press, 2015: 47-50(in Chinese).
- [5] 曹一家, 苗轶群, 江全元. 含电动汽车换电站的微电网孤岛运行优化[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(5): 1-6.
Cao Yijia, Miao Yiqun, Jiang Quanyuan. Optimal operation of islanded microgrid with battery swap stations [J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(5): 1-6(in Chinese).
- [6] 陈健, 王成山, 赵波, 等. 考虑储能系统特性的独立微电网系统经济运行优化[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(20): 25-31.
Chen Jian, Wang Chengshan, Zhao Bo, et al. Economic operation optimization of a stand-alone microgrid system considering characteristics of energy storage system [J]. Automation of Electric Power System, 2012, 36(20): 25-31(in Chinese).
- [7] 曾君, 徐冬冬, 刘俊峰, 等. 考虑负荷满意度的微电网运行多目标优化方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(12): 3325-3333.
Zeng Jun, Xu Dongdong, Liu Junfeng, et al. Multi-objective optimal operation of microgrid considering dynamic loads[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(12): 3325-3333(in Chinese).
- [8] 李晨迪, 陈渊睿, 曾君, 等. 基于非合作博弈的微电网能量管理系统优化算法[J]. 电网技术, 2016, 40(2): 387-395.
Li Chendi, Chen Yuanrui, Zeng Jun, et al. Research on optimization algorithm of microgrid energy management system based on non-cooperative game theory[J]. Power System Technology, 2016, 40(2): 387-395(in Chinese).
- [9] 赵敏, 沈沉, 刘锋, 等. 基于博弈论的多微电网系统交易模式研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(4): 848-857.
Zhao Min, Shen Chen, Liu Feng, et al. A game-theoretic approach to analyzing power trading possibilities in multi-microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(4): 848-857(in Chinese).
- [10] 窦春霞, 贾星蓓, 李恒. 基于多智能体的微电网中分布式发电的市场博弈竞标发电[J]. 电网技术, 2016, 40(2): 579-586.
Dou Chunxia, Jia Xingbei, Li Heng. Multi-agent-system-based market bidding strategy for distributed generation in microgrid[J]. Power System Technology, 2016, 40(2): 579-586(in Chinese).
- [11] 杨光, 蔚承建, 王开, 等. 图形着色问题的分布式势博弈算法[J]. 计算机工程, 2012, 38(23): 181-184, 189.
Yang Guang, Wei Chengjian, Wang Kai, et al. Distributed potential game method for graph coloring problem [J]. Computer Engineering, 2012, 38(23): 181-184, 189(in Chinese).

- [12] 商文喜, 蔚承建, 王开, 等. 数独问题的一个分布式物理博弈求解[J]. 计算机应用与软件, 2014, 31(12): 113-115.
Shang Wenxi, Wei Chengjian, Wang Kai, et al. A distributed solution of physical game to sudoku problem [J]. Computer Applications and Software, 2014, 31(12): 113-115(in Chinese).
- [13] 马文敏. 未来移动通信系统资源分配与调度策略研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2013.
Ma Wenmin. Research on resource allocation and scheduling strategies in future mobile communication systems[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2013(in Chinese).
- [14] 李小龙, 冯东磊, 彭鹏程. 一种基于势博弈的无线传感器网络拓扑控制算法[J]. 物理学报, 2016, 65(2): 028401.
Li Xiaolong, Feng Donglei, Peng Pengcheng. A potential game based topology control algorithm for wireless sensor networks[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(2): 028401(in Chinese).
- [15] 张建良. 基于非合作博弈的分布式优化模型及算法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
Zhang Jianliang. Research on models and algorithms for distributed optimization based on the non-cooperative games[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014(in Chinese).
- [16] 喻磊. 基于多代理理论的微电网分布式优化控制方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
Yu Lei. Study on distributed optimization control approach for microgrid based on multi-agent theory [D]. Chongqing: Chongqing University, 2014(in Chinese).
- [17] Zeng Jun, Liu Junfeng, Wu Jie, et al. A multi-agent solution to energy management in hybrid renewable energy generation system[J]. Renewable Energy, 2011, 36(5): 1352-1363.
- [18] Chen Chuanchuan, Zeng Jun, Ja P. Multi-agent system applied to energy management system for renewable energy micro-grid[C]//Proceedings of 2013 the 5th International Conference on Power Electronics Systems and Application. Hong Kong, China: IEEE, 2013: 1-6.
- [19] Myerson R B. Game theory: analysis of conflict [M]. Cambridge, MA, USA: Harvard University Press, 1991.
- [20] Monderer D, Shapley L S. Potential games[J]. Games and Economic Behavior, 1996, 14(1): 124-143.
- [21] 郭思琪, 袁越, 张新松, 等. 多时间尺度协调控制的独立微网能量管理策略[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 122-129.
Guo Siqi, Yuan Yue, Zhang Xinsong, et al. Energy management strategy of isolated microgrid based on multi-time scale coordinated control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 122-129(in Chinese).



曾君

收稿日期: 2016-10-20。

作者简介:

曾君(1979), 女, 工学博士, 副教授, 主要从事微电网能量管理和新能源发电系统中控制及电力电子技术等方面的研究工作, junzeng@scut.edu.cn;

王侨侨(1992), 男, 硕士研究生, 研究方向为微电网优化调度及能量管理;

刘俊峰(1978), 男, 工学博士, 副教授, 主要从事新能源发电系统、电动汽车和储能系统中电力电子技术的研究工作, 本文通信作者, aujliu@scut.edu.cn。

(编辑 邱丽萍)

An Operation Optimization Algorithm of Microgrid Based on Potential Game

ZENG Jun¹, WANG Qiaoqiao¹, LIU Junfeng², LIN Wei¹, GUO Huafang³

(1.South China University of Technology; 2. South China University of Technology; 3.Chinese Academy of Sciences Integrated Technology Research Center)

KEY WORDS: microgrid; potential game; carbon emissions factor; distributed energy optimization

Microgrid is considered to be an effective way to utilize renewable energy, and a "building block" of the smart grid. The management, intelligence and green requirements of microgrid individuals are increasingly significant under the trend of the development of energy interconnection. However, the traditional centralized energy optimization methods can hardly meet the development trend. In order to solve this problem, a distributed optimization method based on potential game is proposed, focusing on the microgrid consisting of photovoltaic cells (PV), wind turbines (WT), diesel engines (DE) and batteries (BA). The optimization model is established according to the three elements of games, i.e. players, payoff functions and strategy sets.

1) Players.

PVs, WTs, DEs and BAs are viewed as the players of the potential game.

2) Payoff Functions.

Each player has a payoff function related to its own strategies, which is used to measure the quality of its strategies.

$$\begin{cases} U_i = F_i, i \in N \\ F_i \in \{F_{pv}, F_{wt}, F_{de}, F_{ba}\}_{i \in N} \end{cases} \quad (1)$$

3) Strategy Sets.

The strategy of a player is the output power subject to some constraints determined by the microgrid.

$$Y_i = \{P_i : P_{i-min} \leq P_i \leq P_{i-max}\} \quad (2)$$

The distributed architecture of players is shown as Fig. 1.

A potential game is a special form of non-cooperative game, whose finite improvement property

(FIP) guarantees the existence of pure strategy Nash equilibrium. It can be verified that the proposed model is a potential game.

$$\begin{cases} \Delta G = G(y^i, y^{-i}) - G(y^{i'}, y^{-i}) = (F_i + \sum_{j, j \neq i}^N F_j) - (F_{i'} + \sum_{j, j \neq i}^N F_j) = F_i - F_{i'} \\ \Delta U = U(y^i, y^{-i}) - U(y^{i'}, y^{-i}) = F_i - F_{i'} \\ \Delta G = \Delta U \end{cases} \quad (3)$$

That each player selects their optimal strategy by means of exchanging messages without a central controller leading to a Nash equilibrium.

The payoff function is constructed, taking into account node economy and greenness (carbon emission); and the distributed method is adopted to solve the optimization problem. The simulation results show that, the individual management and intelligence of microgrid are fully improved, and carbon emissions are under effective control, which verifies the feasibility and effectiveness of the potential game applied to the operation optimization of microgrid.

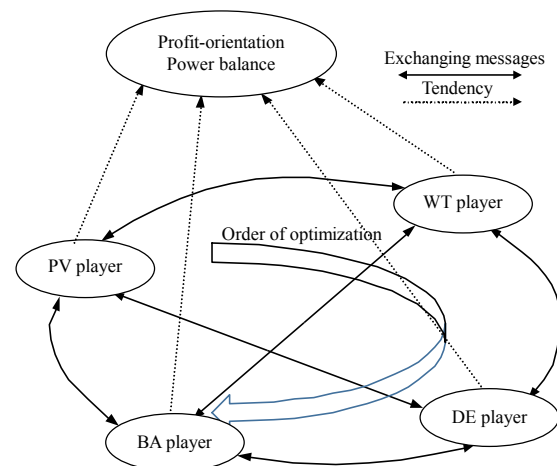


Fig. 1 Distributed architecture of players