

DOI: 10.7667/PSPC171239

考虑新能源出力不确定性的微网社区双阶段调度策略

王思明¹, 牛玉刚¹, 方磊¹, 贾廷纲²

(1. 华东理工大学化工过程先进控制和优化技术教育部重点实验室, 上海 200237;

2. 上海电气自动化集团, 上海 200070)

摘要: 针对新能源出力存在不确定性的情况, 提出了一种基于多代理技术的微网社区双阶段能量调度策略, 分为日前调度和实时调度两个阶段。在日前调度阶段, 微网间调度代理(DispatchAgent)运用蒙特卡洛模拟技术生成场景, 通过引入微网之间能量互传模式, 计算对应的能量调度矩阵, 运用粒子群算法代理(PSOAgent)求解该场景下最优日前调度计划。在实时调度阶段, 微网*i*代理(MGiAgent)基于日前最优期望调度计划, 接收新能源*t*时刻出力数据并与预测期望值进行比较, 快速制定*t*时刻实时调度计划, 满足微网*i*的*t*时刻供需平衡且运行成本最小, 实现微网社区的经济运行。通过与传统多时间尺度方法的对比实验, 仿真结果表明所提出的方法在实时调度环节比传统方法具有更小的调度偏差, 并且可以有效减少微网社区的弃风弃光现象。

关键词: 微网社区; 不确定性; 合作环境; 蒙特卡洛模拟; 多代理; 实时调度

Dual stage scheduling strategy for microgrid community considering uncertainty of renewable energy

WANG Siming¹, NIU Yugang¹, FANG Lei¹, JIA Tinggang²

(1. Key Lab of Advanced Control and Optimization for Chemical Process, Ministry of Education, East China University of Science & Technology, Shanghai 200237, China; 2. Shanghai Electric Automation Group, Shanghai 200070, China)

Abstract: A double time scale scheduling strategy based on multi-agent technology is proposed for microgrid community system with renewable energy uncertainties, which includes day-ahead stage and real-time scheduling. In each particular scene of day-ahead stage, DispatchAgent uses the Monte Carlo simulation to generate scenario. By introducing the mutual energy transfer model between microgrids, the corresponding energy scheduling matrix is calculated. According to the economic operation of microgrid community, PSOAgent uses particle swarm algorithm to get the day-ahead scheduling under the scenario. In real-time scheduling, the output data of *t* moment of new energy are received by MG*i*Agent and compared with forecasted expected value, and it works out real time scheduling scheme of *t* moment quickly to meet the demand and supply balance of *t* moment of microgrid *i* and achieve cost optimum based on the expected day-ahead scheduling scheme, thereby realizing the economic operation of microgrid community. Compared with traditional time scale method, the proposed method has smaller scheduling bias than the traditional method in real-time scheduling, and can effectively reduce the abandon and exhaust phenomena in microgrid communities.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61673174) and the “111” Project (No. B17017).

Key words: microgrid community; uncertainty; cooperation environment; Monte Carlo simulation; multi-agent; real-time scheduling

0 引言

微电网作为新能源接入电网的有效解决方案受

到了广泛关注^[1]。它是一种整合分布式发电的集成系统, 由分布式电源、储能装置、负荷和能量管理系统等组成^[2]。现有微网调度策略主要分为三类: 1) 采用蒙特卡洛模拟技术^[3-4], 生成随机场景, 利用场景缩减挑选合适场景, 最后得到在不同的场景下的期望最优调度方案, 作为考虑不确定性的日前调

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(61673174); 高等学校学科创新引智计划资助(B17017)

度方案；2) 采用机会约束规划技术^[5]，将不确定性转变为置信水平，求解满足置信水平的最优调度方案，作为考虑不确定性的日前调度方案；3) 采用多时间尺度技术^[6-8]，在日前阶段基于预测数据制定调度方案，在实时环节基于实时数据将上级遗留的偏差对可控分布式电源进行功率调整。

需要指出的是，上述研究方法都考虑了新能源的不确定性，可以在一定程度上缓解新能源不确定性带来的影响，但前两种调度方案仍属于日前调度，虽然考虑了不同的场景或者随机概率，但无法满足实时功率平衡。而多时间尺度方法中的实时调度是基于日前调度方案，若日前调度计划未考虑不确定性，将会导致实时调度功率偏差过大，得到的实时调度计划将偏离日前最优计划，难以满足整体的经济性要求。

近年来，为了减少新能源不确定性对微网产生的影响，满足所处区域的整体运行目标(经济性、环境性等)，提高单微网的稳定性，一种新型的微网系统——微网社区系统开始得到应用。其思想是将微网连接到微网社区低压层(如图 1)，依靠微网社区的能源管理系统，整个微网社区可以监控电力消耗以及低压层每个微网的需求，管理微网社区层储能系统，并智能调节低压层的高峰用电需求。在紧急情况下，微网社区系统将启动微网社区层柴油机系统，控制、平衡能量需求。

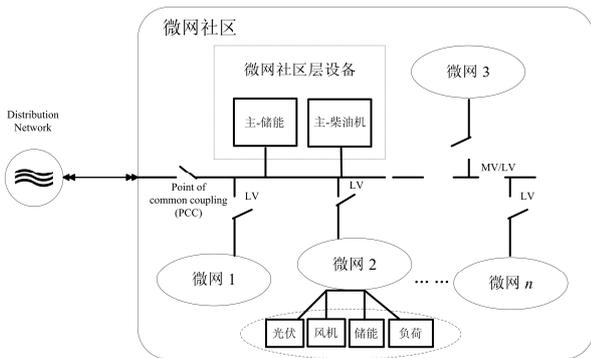


图 1 微网社区结构

Fig. 1 Structure of microgrid community

微网社区包括低压层的微电网和中压层的微网社区层设备，社区层设备主要包括储能装置和柴油机，可以保证微网社区的供需平衡，并协调微网达到微网社区的整体运行目标。微网社区环境类似于多微网环境，但两者仍然存在以下不同：

- 1) 微网社区拥有微网社区层设备以保证供需平衡，多微网环境仅依靠微网自身或者大电网。
- 2) 微网社区属于合作环境，低压层微电网和社

区层设备相互协调控制达到微网社区整体运行目标。多微网环境多处于非合作环境或者联盟环境。

3) 微网社区结构是时变的，低压层微网都可以选择接入微网社区或者孤岛运行。多微网环境下微网的个数是已知的。

关于微网社区的研究目前已取得一些有意义的进展^[9-12]。文献[9]提出了一个分层的优化方案，上层能量管理中心统一求解最小化日运行损耗。文献[10-12]则设计了微网社区的框架和结构。然而，以上工作均未考虑低压层微网之间可以传递能量，忽略了能量互传带来的潜在收益。实际上，由于低压层各微网中所安装的新能源设备种类、容量大小并不相同，不同微网之间可以相互补充。例如，某时刻某微网处于能量富余状态而其他微网处于能量缺额状态，则可以通过引入微网间能量互传模式，有效增加微网社区新能源的消耗率，减少弃风弃光现象，从而减少运行成本。

另一方面，多代理技术作为解决微网分布式建模的有效方案，受到了越来越多学者的关注^[13-15]。本文运用多代理技术将复杂功能 Agent 解耦为若干个细化功能的 Agent(代理)，每个细化功能 Agent 各司其职，通过 Agent 之间的通信完成信息交互，从而达到分布式计算并完成整体目标。

本文考虑微网社区系统中新能源不确定性和微网间能量互传的问题，提出了一种基于多代理技术的微网社区双阶段能量调度策略。在日前调度阶段采用蒙特卡洛模拟技术生成不同的场景，根据求得的微网间的互传能量，得到日前期望调度方案。在实时调度阶段，设计了实时调度策略，保证实时功率平衡。运用多代理技术将整体策略按功能分为三个不同的功能 Agent: DispatchAgent、PSOAgent 和 MgiAgent。通过 Agent 间信息交互，达到微网社区的整体经济运行目标。最后，仿真实验显示本文方案可以有效提高新能源消耗率，在实时调度阶段，比传统的多时间尺度方法中的实时调度环节具有更小的调度偏差。且采用分布式 Agent 建立微电网模型，在一定程度上可以缓解中央控制器的求解压力，降低问题求解维度，具有更快的求解速度。

1 微网社区模型

1.1 JADE 平台

本文采用 JADE(Java Agent Development Framework)软件平台进行多代理系统——Multi-Agent System (MAS)的设计。它是一个完全由 Java 语言编写的多 Agent 开发框架，它所提供的基本服务如图 2 所示。

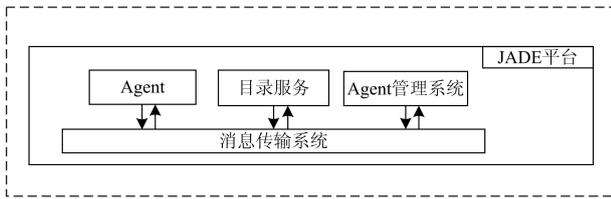


图2 JADE平台

Fig. 2 JADE platform

1.2 多代理系统结构

本文构建的多代理系统框架如图3所示。微网社区的每个实体单元通过对应的Agent进行控制,不同的实体单元具有不同的约束限制和决策机制。

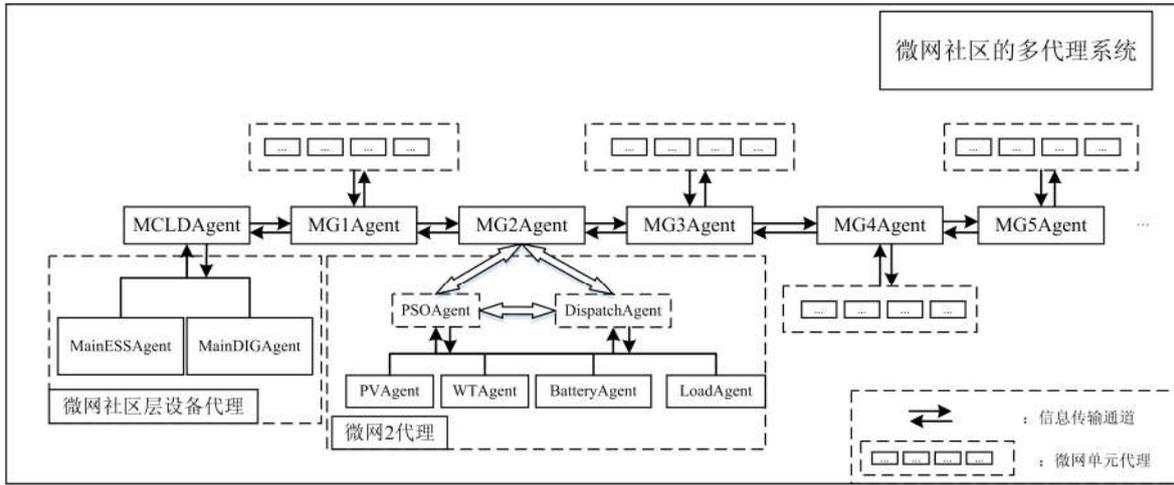


图3 微网社区的多代理系统

Fig. 3 Multi-agent system of microgrid community

本文构建的多代理系统中,微网社区日前调度周期 T 为一天,最小调度时间为1h,一天划分为24个调度时间段,假设每个时间段内发电侧的输出功率以及需求侧的需求功率保持不变。在日内实时调度阶段,获得该时刻新能源出力的实际值,并采用本文提出的实时调度算法进行求解。

1.3 新能源的不确定性

运用多代理技术将微网社区整体目标分为MCLDAgent和MGiAgent各自的成本目标最小,由于微网社区层不包含新能源设备,没有不确定性因素,所以本文主要考虑微网的不确定性。低压层每个独立的微网具有不同的新能源发电单元(如风机、光伏等),需要分别考虑其不确定性。

1) 韦伯分布

文献[16]指出大自然风速随机变化的概率密度函数满足韦伯分布,由于风机的出力和风速相关,因此,风机出力的概率密度函数为

主要分为微网社区层代理(MCLDAgent)和低压层微网代理(MGiAgent, $i=1,2,3,4,5,\dots$),分别负责优化本层的机组组合及运行计划基值,并与其他Agent进行通信。MCLDAgent优化MainESSAgent(主储能)和MainDIGAgent(主柴油机的出力),MgiAgent(微网代理)优化PVAgent(光伏)、WTAgent(风机)、BatteryAgent(储能装置)和LoadAgent(负荷)的出力。另外,每个低压层微网中还包含两个功能性代理,即PSOAgent(智能优化算法代理)和DispatchAgent(智能调度算法代理),分别用来计算微网成本最小问题和邻居微网能量互传问题。微网社区的整体目标为最小成本运行。

$$f_{P_{WT}}(P_{WT}) = \frac{K}{C} \cdot \left(\frac{P_{WT}}{C}\right)^{K-1} \cdot e^{-(P_{WT}/C)^K} \quad (1)$$

式中: $C>0$,是比例参数; $K>0$,是形状参数; P_{WT} 是风机随机变量。为求得 P_{WT} ,需要获得累积分布函数如式(2)。

$$F_{P_{WT}}(P_{WT}) = 1 - e^{-(P_{WT}/C)^K} \quad (2)$$

利用累积分布函数的逆函数计算随机变量 P_{WT} 为

$$P_{WT} = C \cdot (-\ln(r))^{1/K} \quad (3)$$

式中, r 是[0,1]上均匀分布的随机变量。有很多方法可以计算参数 C 和 K ,本文使用 P_{WT} 的均值 P_{WTm} 和其标准偏差 δ 来计算参数 C 和 K [17]。

$$\begin{cases} K = \left(\frac{\delta}{P_{WTm}}\right)^{-1.086} \\ C = \frac{P_{WTm}}{\Gamma(1+1/K)} \end{cases} \quad (4)$$

2) 正态分布

由于光伏设备的出力随着太阳照射幅度强弱而变化, 本文假设光伏出力满足正态分布, 其概率密度函数如式(5)。

$$f_{P_{pv}}(P_{pv}) = \frac{1}{\delta \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\delta^2}\right] \quad (5)$$

同理, 可以用累积分布函数的逆函数生成随机变量 P_{pv} , 即

$$\begin{cases} F_{P_{pv}}(P_{pv}) = \frac{1}{2} \cdot [1 + \operatorname{erf}\left(\frac{P_{pv} - \mu}{\sqrt{2}\delta}\right)] \\ P_{pv} = \mu + \sqrt{2} \cdot \delta \cdot \operatorname{erf}^{-1}(2r - 1) \end{cases} \quad (6)$$

式中: r 是 $[0, 1]$ 上均匀分布的随机变量; μ 是 P_{pv} 的均值; δ 是 P_{pv} 的标准偏差; erf 和 erf^{-1} 分别是该随机变量的误差函数和其逆函数。由于误差函数需计算不定积分, 不便于求解, 文献[18]将误差函数近似成三角函数和对数函数的乘积, 即

$$\begin{cases} z = \sqrt{-2\ln(r_1)} \cdot \sin(2\pi r_2) \\ P_{pv} = \mu + \delta \cdot z \end{cases} \quad (7)$$

式中, r_1 和 r_2 是 $[0, 1]$ 上均匀分布的随机变量。

基于以上分析, 本文生成不同场景下的新能源出力曲线, 由于本文不考虑负荷侧响应和负荷预测误差问题, 那么新能源和负荷需求就可以用“净负荷”一个变量来表示。

$$P_{\text{net}}^{i,S}(t) = P_{\text{pv}}^{i,S}(t) + P_{\text{WT}}^{i,S}(t) - P_{\text{load}}^i(t) \quad (8)$$

式中, $P_{\text{net}}^{i,S}(t) > 0$ 表示第 i 个微网在 t 时刻出现能量富余, 反之则处于能量缺额状态。

1.4 微网目标函数

低压层微网包含新能源设备、储能设备以及负荷需求。由于新能源发电端的环境效益很高, 在不考虑初始投资成本时, 发电成本可忽略不计, 故在实际调度过程中, 应优先使用新能源发电功率。当邻近微网出现功率缺额, 且自身微网新能源充足的情况下, 应向邻近微网输送电力, 保证新能源的消耗率, 但同时也产生了传输成本 C_{tran} 。为平滑新能源的波动性, 储能装置频繁地充放电也会带来运行成本 C_{ba} 。另外, 当微网出现能量缺额时, 可以从大电网进行购电, 从而产生购电成本 C_{buy} 。低压层微网的目标函数为

$$\min f_1 = \min \sum_{S=1}^{N_S} p_S \sum_{t=1}^T \left\{ C_{\text{ba}}(p_{\text{ba}}^{i,S}(t), t) + C_{\text{buy}}(p_{\text{buy}}^{i,S}(t), t) + C_{\text{tran}}(p_{ij}^S(t), t) \right\} \quad (9)$$

式中: N_S 是总的场景个数; p_S 为场景对应概率; $p_{\text{ba}}^{i,S}(t)$ 、 $p_{\text{buy}}^{i,S}(t)$ 分别是第 i 个微网在对应场景下的

储能充放电量和购买电量; $p_{ij}^S(t)$ 为第 i 个微网向第 j 个微网传递的能量。

微电网之间互传能量所产生的成本和微网之间的距离有关, 距离越远, 传输成本越大。本文假设微网是按照距离排序, 即微网 1 距离微网 5 最远, 构建如下的三维矩阵 $\mathbf{P}_{\text{dispatch}}^S(N_m \times N_m \times 24)$, N_m 是低压层的微网总个数。

$$\mathbf{P}_{\text{dispatch}}^S[N_m][N_m][24] = \begin{bmatrix} P_{11}^S(0) & \cdots & P_{1N_m}^S(0) \\ \vdots & & \vdots \\ P_{N_m 1}^S(0) & \cdots & P_{N_m N_m}^S(0) \end{bmatrix}, \dots, \begin{bmatrix} P_{11}^S(23) & \cdots & P_{1N_m}^S(23) \\ \vdots & & \vdots \\ P_{N_m 1}^S(23) & \cdots & P_{N_m N_m}^S(23) \end{bmatrix} \quad (10)$$

因此, 传输成本 C_{tran} 可以表示为

$$C_{\text{tran}}(p_{ij}^S(t), t) = \left\{ \sum_{i=1}^{N_m} \sum_{j=1}^{N_m} \alpha \cdot (i-j)^2 \cdot \sqrt{P_{ij}^S(t)^2} + \sum_{i=1}^{N_m} \beta \cdot P_{ii}^S(t) \right\} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^{N_m} P_{ij}^S(t) = P_{\text{net}}^{i,S}(t), \quad i=1, 2, \dots, N_m \\ P_{ij}^S(t) = P_{ji}^S(t) \end{cases} \quad (12)$$

式中, α 和 β 分别是传输成本系数, 不同的参数值会产生不同的传输方案。一般设 $\alpha < \beta$ 且 $4\alpha > \beta$, 这样可以防止出现远距离能量互传现象。

储能装置与其他分布式电源相协调, 共同维持微电网稳定运行。由于新能源出力的波动性, 储能装置可以作为缓冲装置平滑新能源波动。然而, 储能装置安装成本相对较高, 考虑将储能投资成本折合到储能使用寿命上, 即优化储能的使用寿命, 相当于减少了储能成本。研究发现, 储能充放电次数和充放电深度都会影响储能寿命, 因此, 将储能装置寿命与充放电功率相结合, 得到储能装置充放电成本为

$$C_{\text{ba}}(P_{\text{ba}}^{i,S}(t), t) = \beta_{\text{es}} \sum_{t=1}^{24} \begin{cases} n_c P_{\text{ba}}^{i,S}(t) & P_{\text{ba}}^{i,S} \geq 0 \\ -P_{\text{ba}}^{i,S}(t) & P_{\text{ba}}^{i,S} < 0 \\ n_d & \end{cases} \quad (13)$$

式中: $P_{\text{ba}}^{i,S}(t)$ 为对应场景下的储能调度功率, 大于零时为充电状态, 相当于负荷, 小于零时为放电状态, 相当于微源; n_c 和 n_d 分别是储能装置充放电效率; β_{es} 是储能装置充放电成本系数。储能装置为达到自身充放电速率和容量限制, $P_{\text{ba}}^{i,S}(t)$ 满足约束式(14)。

$$\left\{ \begin{array}{l} SOC^{i,S}(t) = SOC^{i,S}(t-1) + \frac{n_c P_{ba}^{i,S}(t)}{\alpha_{ba}} \quad P_{ba}^{i,S} \geq 0 \\ SOC^{i,S}(t) = SOC^{i,S}(t-1) + \frac{P_{ba}^{i,S}(t)}{\alpha_{ba} n_d} \quad P_{ba}^{i,S} < 0 \\ 0 \leq P_{ba}^{i,S}(t) \leq P_{ba}^{cmax} \\ -P_{ba}^{dmax} \leq P_{ba}^{i,S}(t) \leq 0 \\ SOC_{min} \leq SOC^{i,S}(t) \leq SOC_{max} \\ SOC(24) = SOC(0) \end{array} \right. \quad (14)$$

式中: $SOC^{i,S}(t)$ 是第 i 个微网某场景下 t 时刻的荷电状态; α_{ba} 是储能容量; P_{ba}^{cmax} 和 P_{ba}^{dmax} 分别是储能装置最大充放电功率; SOC_{max} 和 SOC_{min} 分别是储能装置最大最小荷电状态, 一般设为 0.8 和 0。由于储能装置在调度周期末荷电状态和场景 S 不相关, 统一标示为 $SOC(24)$, 并且与调度周期初始时刻荷电状态 ($SOC(0)$) 相等, 保证了调度周期之间的独立性。

当微电网中存在能量缺额时, 向电网购电是微电网保证自身功率平衡的关键决策。由于单微网剩余的功率一旦回馈到电网上, 会给电网带来很多谐波、脉冲电压和脉冲电流等, 增加运行控制难度。本文考虑电网采用分时电价策略, 且微电网只能从电网购电, 其购电成本为

$$C_{buy}(P_{buy}^{i,S}(t), t) = \sum_{i=1}^{24} C_b(t) P_{buy}^{i,S}(t) \quad (15)$$

式中, $C_b(t)$ 是 t 时刻的购电电价。谷时段为 10:00—15:00, 平时段为 01:00—09:00、23:00—00:00, 峰时段为 16:00—22:00。类似文献[19], 本文假设电网各时段的电价如表 1 所示。

表 1 电网分时电价

Table 1 Electricity price of power grid

时段	谷时段	平时段	峰时段
购电价格/(元/kW·h)	0.35	0.55	0.85

由于微电网与电网物理联络线的约束, 购电功率满足如下约束:

$$0 \leq P_{buy}^{i,S}(t) \leq P_{buy}^{max}(t) \quad (16)$$

另外, 微电网稳定运行需满足的系统功率平衡约束为

$$P_{dispatch}^S[i][t] + P_{buy}^{i,S}(t) = P_{ba}^{i,S}(t) \quad (17)$$

2 微网社区双阶段能量调度策略

由于低压层微网运行目标函数是非线性且非凸性^[20-21], 本文将用 PSO 算法对其进行求解。然而, 由于新能源的随机性和波动性, 直接按照预测值求

解, 会导致在实时环节预测值与实际值偏差过大, 难以进行实时调度。本文首先运用蒙特卡洛模拟法产生 500 组场景并求得其日前期期望调度计划, 并将信息传递给对应的 MGAgent 进行实时调度环节。整个双阶段能量调度流程如下:

1) 每个微网 i 在给定的场景 s 下获取含不确定性因素的变量 $P_{net}^{i,S}(t)$ 。

2) DispatchAgent 获取 $P_{net}^{i,S}(t)$, 求解 $\min C_{tran}$ 问题, 得到 $P_{dispatch}^S$ 矩阵。

3) PSOAgent 获取调度矩阵 $P_{dispatch}^S$ 信息, 调用 PSO 算法, 解决目标函数 $\min f_1$ 问题。

4) 循环步骤 1)、2)、3), 直到场景数目达到设定值 500。

5) 计算 500 个场景下的期望日前调度值作为实时调度策略的基准值。

6) 实时调度环节, MGAgent 获得该时刻的实际值以及日前调度基准值, 调用实时调度策略, 计算该时刻的实时调度方案。

在图 4 所示微网双阶段能量调度策略中, 三个重要的 Agent 分别是 DispatchAgent、PSOAgent、MGAgent, 每个 Agent 完成规定的任务, 从而完成整体目标。

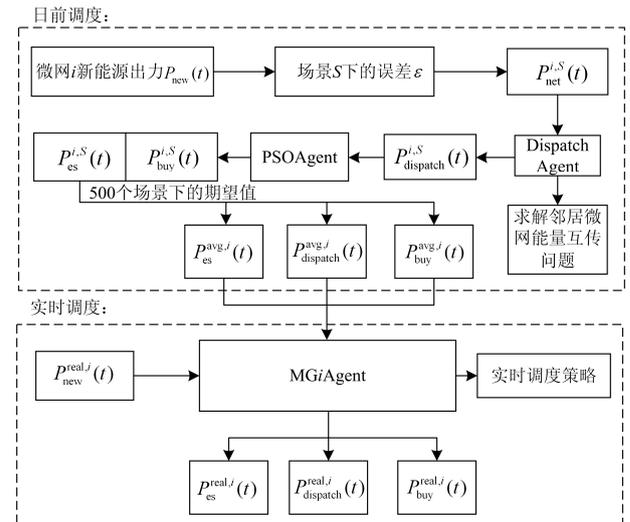


图 4 微网双阶段能量调度策略

Fig. 4 Multi time scale strategy of microgrid

由于日前调度阶段考虑了不确定性因素, 在实时调度环节, t 时刻获得的实际新能源发电值与调度曲线偏差较小, 因此我们只需按照基准值进行功率平衡, 即可保证实时调度曲线为日前最优曲线的附近较优解。 t 时刻的实时调度策略描述如下:

1) MGAgent 获取 t 时刻日前调度计划值

$P_{es}^{avg,i}(t)$ 、 $P_{dispatch}^{avg,i}(t)$ 和 $P_{buy}^{avg,i}(t)$ ，检验当前 SOC 水平是否满足该调度情况，若不能，则 $P_{buy}^{avg,i}(t)$ 增加相应量，以满足平衡。

2) MGAgent 获取 t 时刻新能源出力实际值

$P_{new}^{real,i}(t)$ ，并与日前调度采用的 $P_{new}^{avg,i}(t)$ (即 $\sum_{j=1}^{N_m} P_{ij}^{avg}(t)$) 相比较。

3) 若相等， t 时刻将按照日前设定最优曲线计划运行。

4) 若实际值大于日前调度值，即实际新能源在 t 时刻出现能量富余，此时应当减少日前计划中大

电网购买的电力，若还不能满足供需平衡，则考虑储能单元吸收多余的电力，若储能 SOC 超过设定值 0.8，则将多余的新能源丢弃。

5) 若实际值小于日前调度值，即实际新能源在 t 时刻出现能量缺额，此时应当首先考虑储能单元是否可以多放电，但不能超过储能单元 SOC 的最低设定值 0.2，若还不能满足供需平衡，则考虑从大电网购买不足电力，从而满足供需平衡。

实时调度环节涉及变量少，且无需和其他微网进行通信，微网本身获得新能源实际值即可快速计算出该时刻实时调度计划。图 5 为整个策略流程。

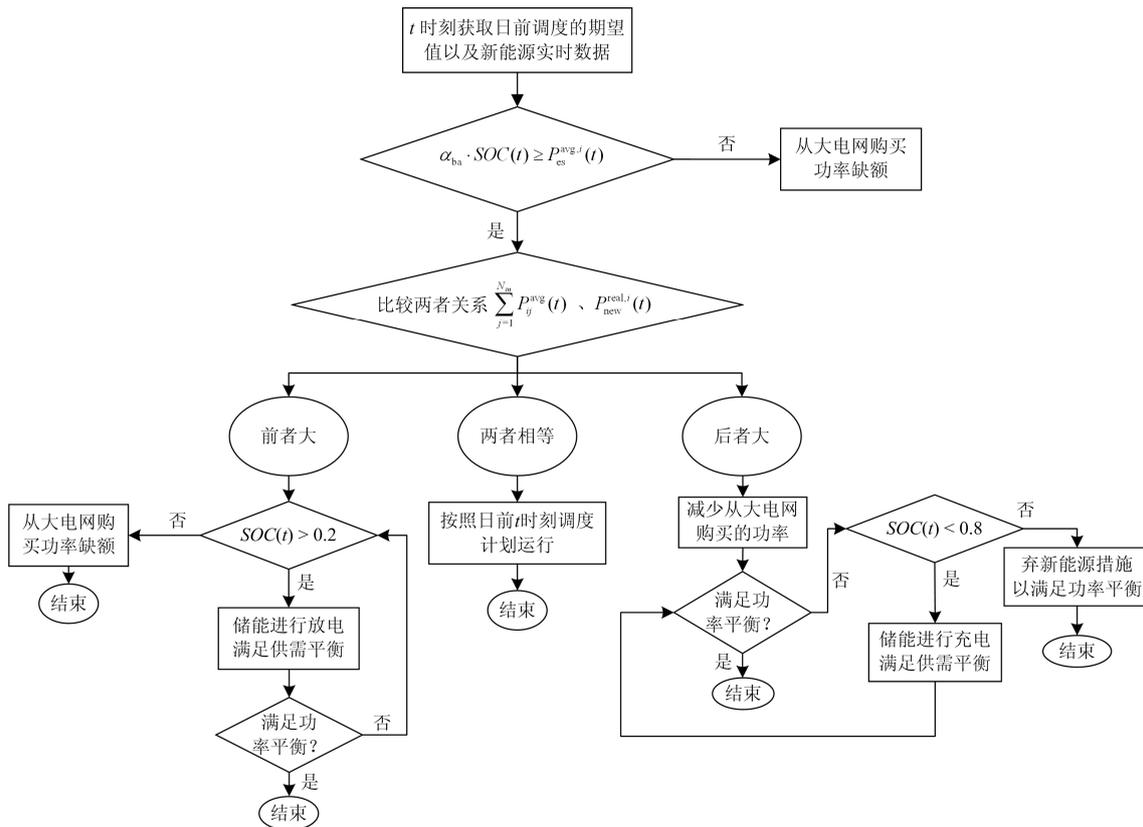


图 5 实时调度策略

Fig. 5 Real-time scheduling strategy

3 仿真结果及算例分析

本文仿真基于中国广西壮族自治区的贵港市实际微网社区系统。由于地处偏远地区，全部由大电网供电成本巨大，然而当地具有丰富的风能和太阳能，因此微网社区系统就可以很好地应用到当地环境，并为学校、医院和住房等设施提供电力^[9]。如图 6 所示，该微网社区系统包含 5 个微网，每个微网又包括风机装置、光伏装置、储能和需求负荷。储能充放电效率分别是 $\eta_c=0.927$ ， $\eta_d=0.971$ ，储能

充放电成本系数 $\beta_{es}=0.03$ ，装机容量 α_{ba} 为 10 kW，由于装机容量较小，为了充分利用储能效益，设定最大最小荷电状态分别是 $SOC_{max}=0.8$ ， $SOC_{min}=0.2$ ，初始时刻和最终时刻荷电状态 $SOC(24)=SOC(0)=0.5$ 。另外，用户负荷数据来源于文献^[22]，新能源输出功率来源于香港天文台气象数据^[23]。由于数据较小，本文将每 50 组总和作为单微网发电数据，每个微网发电曲线及负荷曲线如图 7 所示。可以看出，每个微网具有不同的新能源发电和负荷曲线。

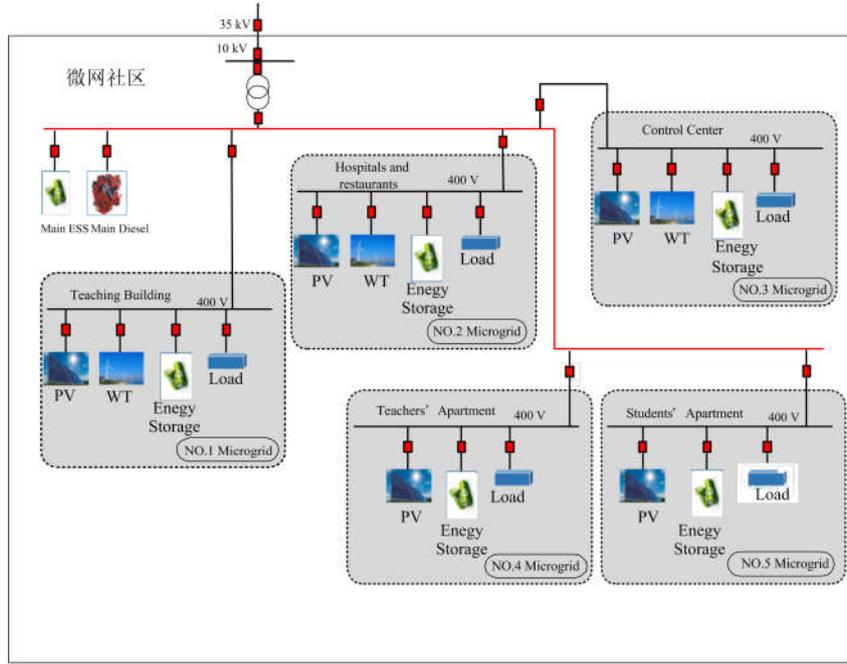


图 6 中国广西微网社区系统

Fig. 6 Microgrid community system in Guangxi, China

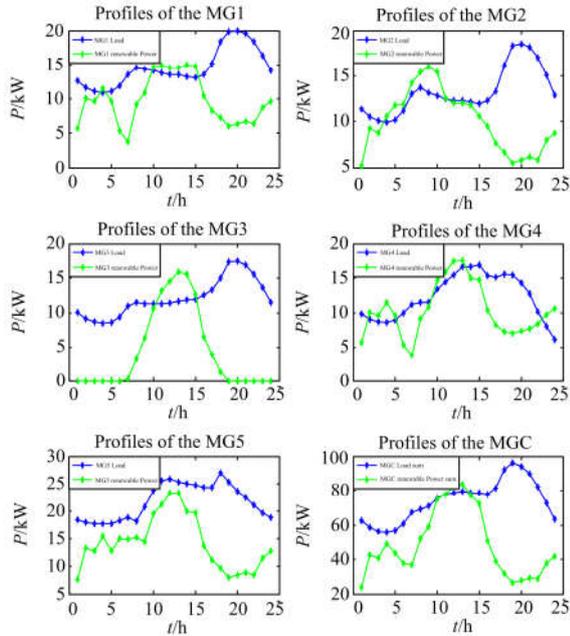


图 7 微网社区的新能源和负荷曲线

Fig. 7 Profiles of the generation and load of the microgrid community

按图 3 所示, 本文采用 JADE 平台建立微网社区多代理框架, 每个 Agent 都代理其对应实体, DispatchAgent 和 PSOAgent 作为软件代理分别负责计算邻居微网能量互传和成本最小问题。DispatchAgent

在处理邻居微网能量互传问题时需要和邻居微网进行通信, 本文截取部分通信信息如图 8 所示。

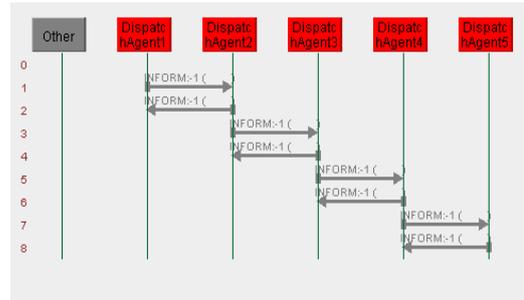


图 8 DispatchAgent 通信过程

Fig. 8 Communication process of DispatchAgent

DispatchAgent 通过通信获得邻居微网的净负荷信息, 并优化求解 $\min C_{\text{tran}}$ 问题, 得到 $\mathbf{P}_{\text{dispatch}}^S$ 矩阵。通过实验证明, 每个 DispatchAgent 计算所得的矩阵都相等, 保证了调度的一致性。完成了邻居微网能量互传问题, 接下来就是每个微网调用 PSOAgent 并行优化求解对应目标函数 $\min f_1$ 问题。

不失一般性, 本文选择单微网 3 进行分析讨论。图 9 为微网 PSOAgent 计算 $\min f_1$ 时粒子寻优曲线。其中, 粒子数设为 500, 迭代次数为 1 000 次。另外, 选择一种动态惯性权重系数: $\omega = \omega_{\max} - \omega_{\max} k/N$, 其中, 最大惯性权重系数 $\omega_{\max} = 1$, k 是当前迭代次数, N 是总的迭代次数。由于种群规模比较大, 粒

子一直迭代到 650 次时才趋于收敛。其中在迭代 300 次之前, 由于惯性权重比较大, 算法的收敛速度比较快, 随着惯性权重减少, 算法的收敛速度减慢, 粒子逐渐趋向全局最优值。

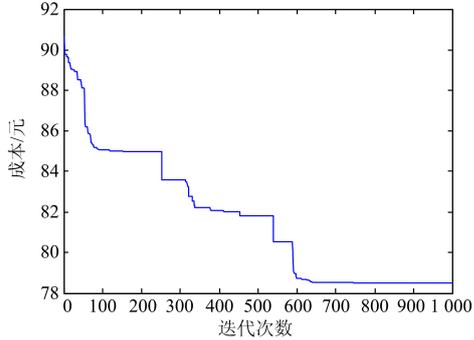


图 9 PSOAgent 寻优过程

Fig. 9 Optimization process of PSOAgent

图 10 是 500 个场景下的期望日前调度计划。从图中可以看出, 在正午时刻, 新能源发电充足的情况下, 仍选择从大电网购电, 这是因为此时处于低谷用电时段, 电价较低, 此时储备电能可以削减高价时段的需求负荷, 从而降低运行成本。最后时刻储能单元选择充电以满足和初始状态相同, 保证了调度周期的独立性。

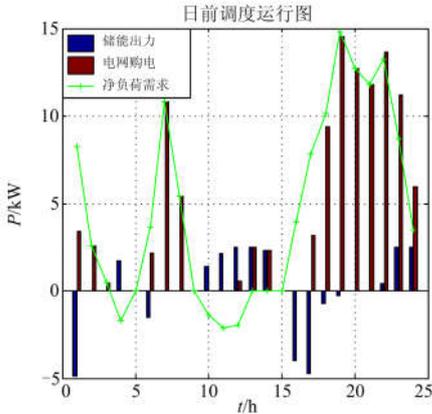


图 10 日前调度计划

Fig. 10 Day-ahead dispatch plan

本文实时调度仿真中, 将生成模拟场景的一组新能源数据作为实时数据, 用以验证本文方法, 图 11 为实时数据与日前预测值的柱形图。分析数据得知, 不含场景的预测值与实际值偏差的平方和为 19.93, 含场景预测值与实际值的偏差平方和为 12.99, 减少了 34.8%误差。所以与不含场景的预测值(蓝柱)相比, 含场景的日前预测值(绿柱)更接近于实际值。因此实时调度环节与日前调度计划的基准值之间的偏差也就越小, 实时调度的结果就越接近日前调度的最优曲线, 图 11 可以从侧面说明本文所提方法的有效性和优越性。

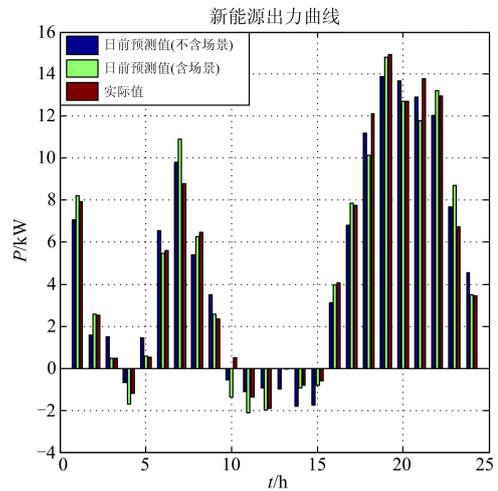


图 11 实时新能源数据与预测值对比柱形图

Fig. 11 Column diagram of real time data and predicted value

另外, 实时调度下机组运行计划与原始计划差异如图 12 所示。从图中可以看出, 实时调度计划严格按照日前调度计划的趋势, 保证实时所做调度计划在最优曲线的附近, 同时, 在不同调度时刻, 实时调度与日前调度之间的差异是由于不同时刻场景的预测准确度不同, 导致每时刻的差异值也不同, 准确度高的时刻差异值小, 准确度低的时刻差异值大, 这点可以从图 10 中绿柱和红柱相比较得出。其次, 通过整体实时调度成本来评价差异值的影响, 因为差异越大导致实时调度成本越高。

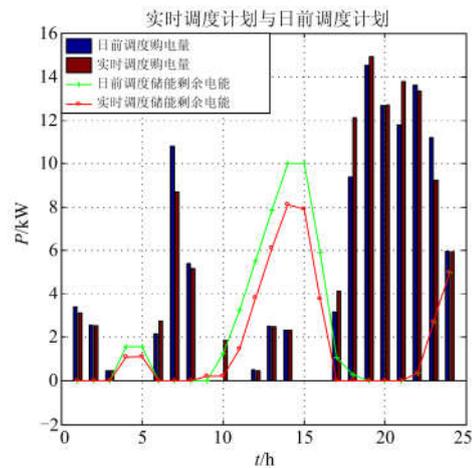


图 12 实时调度与日前调度的对比图

Fig. 12 Difference of real-time scheduling and day-ahead scheduling

本文进一步对所提方法与传统多时间尺度的调度方法做了仿真对比分析, 数据结果如表 2 所示。从表 2 中数据可以看出, 采用微网之间能量互传模式, 可以显著地降低弃风率, 增大新能源的消耗率。

另外, 虽然传统方法在日前调度成本较优, 但由于日前未考虑预测误差, 会导致实时调度环节与日前调度偏差过大, 反而增加实时调度成本, 这也说明在不考虑新能源不确定性因素下, 日前调度计划是不可信的。本文所提方法结合了场景模拟以及微网间能量互传两者的优势, 所以无论在提高新能源的消耗率上还是在减少实时调度成本上, 本文所提方法都有明显的优势。

表 2 传统方法与本文方法比较

Table 2 Comparison of different methods

所用方法	日前调度	实时调度
	经济成本/元 弃风率	经济成本/元 弃风率
传统方法	320.89 4.285 6%	430.68 4.436 5%
传统方法 (含多场景处理)	391.564 4.285 6%	410.59 4.436 5%
传统方法 (含微网能量互传模式)	320.89 0.886 42%	430.68 1.987 2%
本文方法	391.564 0.886 42%	410.59 1.987 2%

4 结论

本文提出了一种基于多代理技术的微网社区双阶段能量调度策略。实验结果表明, 本文提出的双阶段能量调度策略可以有效解决微网社区中新能源不确定性问题以及新能源弃风弃光现象。采用分布式 Agent 建立微电网模型, 在一定程度上可以缓解中央控制器的求解压力, 降低问题求解维度, 具有更快的求解速度。由于能量互传模式下不同的参数设置会得出不同的微网间能量调度矩阵, 探究参数的影响以及如何设置这个参数以满足不同的微网社区需求值得进一步深入研究。

参考文献

- [1] 许志荣, 杨苹, 赵卓立, 等. 中国多微网系统发展分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(17): 224-231.
YU Zhirong, YANG Ping, ZHAO Zhuoli, et al. Analysis on the development of multi-microgrid in China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(17): 224-231.
- [2] LOPES J A P, MADUREIRA A G. A view of microgrids[J]. Wiley Interdisciplinary Reviews Energy & Environment, 2013, 2(1): 86-103.
- [3] 别朝红, 李更丰, 谢海鹏. 计及负荷与储能装置协调优化的微网可靠性评估[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 64-73.
BIE Chaohong, LI Gengfeng, XIE Haipeng. Reliability evaluation of microgrid considering coordinative optimization of loads and storage device[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 64-73.
- [4] 曾鸣, 李娜, 马明娟, 等. 考虑不确定因素影响的独立微网综合性能评价模型[J]. 电网技术, 2013, 37(1): 1-8.
ZENG Ming, LI Na, MA Mingjuan, et al. Integrated performance evaluation model of independent microgrid considering the influence of uncertain factors[J]. Power System Technology, 2013, 37(1): 1-8.
- [5] 江岳春, 邢方方, 庞振国, 等. 基于机会约束规划的微网运行备用优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(14): 100-106.
JIANG Yuechun, XING Fangfang, PANG Zhenguo, et al. Optimization configuration of operating reserve in microgrid based on chance-constrained programming[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(14): 100-106.
- [6] 肖浩, 裴玮, 孔力. 基于模型预测控制的微电网多时间尺度协调优化调度[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(18): 7-14.
XIAO Hao, PEI Wei, KONG Li. Multi-time scale coordinated optimal dispatch of microgrid based on model predictive control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(18): 7-14.
- [7] 徐立中, 易永辉, 朱承治, 等. 考虑风电随机性的微网多时间尺度能量优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(23): 1-8.
XU Lizhong, YI Yonghui, ZHU Chengzhi, et al. Multi-time scale optimal energy dispatch of microgrid considering stochastic wind power[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(23): 1-8.
- [8] 窦晓波, 徐恣慧, 董建达, 等. 微电网改进多时间尺度能量管理模型[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(9): 48-55.
DOU Xiaobo, XU Minhui, DONG Jianda, et al. Multi-time scale based improved energy management model for microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(9): 48-55.
- [9] TIAN P T, XIAO X. A hierarchical energy management system based on hierarchical optimization for microgrid community economic operation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(5): 2230-2241.
- [10] HUSSAIN A, ARIF S M, ASLAM M, et al. Optimal siting and sizing of tri-generation equipment for developing an autonomous community microgrid considering uncertainties[J]. Sustainable Cities & Society, 2017, 32: 318-330.

- [11] WU L, LI J, EROL-KANTARCI M, et al. An integrated reconfigurable control and self-organizing communication framework for community resilience microgrids[J]. The Electricity Journal, 2017, 30(4): 27-34.
- [12] GUI E M, DIESENDORF M, MACGILL I. Distributed energy infrastructure paradigm: community microgrids in a new institutional economics context[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2017, 72: 1355-1365.
- [13] 丁明, 罗魁, 毕锐. 孤岛模式下基于多代理系统的微电网能量协调控制策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(5): 1-8.
DING Ming, LUO Kui, BI Rui. An energy coordination control strategy for islanded microgrid based on a multi-agent system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(5): 1-8.
- [14] 江润洲, 邱晓燕, 李丹. 基于多代理的多微网智能配电网动态博弈模型[J]. 电网技术, 2014, 38(12): 3321-3327.
JIANG Runzhou, QIU Xiaoyan, LI Dan. Multi-agent system based dynamic game model of smart distribution network containing multi-microgrid[J]. Power System Technology, 2014, 38(12): 3321-3327.
- [15] NUNNA H S V S K, DOOLLA S. Multi agent-based distributed-energy-resource management for intelligent micro-grids[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(4): 1678-1687.
- [16] RADOSAVLJEVIĆ J, JEVTIĆ M, KLIMENTA D. Energy and operation management of a microgrid using particle swarm optimization[J]. Engineering Optimization, 2016, 48(5): 811-830.
- [17] ATWA Y M, EL-SAADANY E F, SALAMA M M A, et al. Adequacy evaluation of distribution system including wind/solar DG during different modes of operation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(4): 1945-1952.
- [18] 刘宝碇. 随机规划与模糊规划[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998.
- [19] 祖其武, 牛玉刚, 陈蓓. 基于改进粒子群算法的微网多目标经济运行策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(14): 57-63.
ZU Qiwu, NIU Yugang, CHEN Bei. Study on multi-objective economic operating strategy of microgrid based on improved particle swarm optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(14): 57-63.
- [20] LI H, ESEYE A T, ZHANG J, et al. Optimal energy management for industrial microgrids with high-penetration renewables[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 122-135. DOI: 10.1186/s41601-017-0040-6.
- [21] 曾嵘, 彭春华, 王奎, 等. 基于鸟群算法的微电网多目标运行优化[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(13): 117-122.
ZENG Ceng, PENG Chunhua, WANG Kui, et al. Multi-objective operation optimization of micro grid based on bird swarm algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(13): 117-122.
- [22] <https://www.sce.com/wps/portal/home/regulatory/load-profiles/dynamic-load-profiles>.
- [23] WANG H, HUANG J. Joint investment and operation of microgrid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(2): 833-845.

收稿日期: 2017-08-15; 修回日期: 2017-11-15

作者简介:

王思明(1993—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为多代理技术、微网能量管理; E-mail: wangsiming1314@163.com

牛玉刚(1964—), 男, 博士, 教授, 研究方向为随机系统、无线传感网络、智能电网; E-mail: acniuyg@ecust.edu.cn

方磊(1991—), 男, 硕士研究生, 研究方向为微网能量管理。E-mail: fanglei0313@163.com

(编辑 魏小丽)