

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181171

价格引导下多微网系统协调自治优化运行策略

何浩¹, 雷霞¹, 黄涛², 何锦宇¹

(1. 西华大学电气与电子信息学院, 四川 成都 610039; 2. 都灵理工大学能源系, 意大利 都灵 10129)

摘要: 根据“分散自治, 集中协调”的思想, 提出一种多微网系统分层协调优化策略。该策略中, 上层引入中间代理作为协调者, 根据各微网上传的余/缺量信息制定多微网系统内的能量交易价格并向各微网反馈。各微网作为下层自治单元, 接收内部交易价格以运行成本最小为目标优化自身微源出力以及与外部电网的交换功率。各微网与中间代理进行多次量价互动寻找多微网系统协调运行的均衡状态。考虑上层定价模型为非优化问题将可能出现无最优均衡解的情况, 首先求取该协调优化的相对最优均衡解集, 然后按照一定的评价准则来选择解。将所提的协调优化模型在含3个微网的多微网系统中进行仿真分析, 结果表明了所提模型的合理性及有效性。

关键词: 多微网系统; 分散自治; 集中协调; 中间代理; 价格引导

Coordinated and autonomous optimal operation strategy of multi-microgrid system under the guidance of price

HE Hao¹, LEI Xia¹, HUANG Tao², HE Jinyu¹

(1. School of Electric Engineering and Electronic Information, Xihua University, Chengdu 610039, China;

2. Department of Energy, Politecnico di Torino, Torino 10129, Italy)

Abstract: Based on decentralized autonomy and centralized coordination, a hierarchical coordinated optimization strategy for multi-microgrid (MMG) system is proposed in this paper. In the strategy, a middle agent (MA) is introduced as a coordinator in the upper level. The internal trading price is formulated by MA based on the power surplus and shortage information uploaded by microgrids (MGs) and fed back to MGs immediately. Each MG, seen as an autonomous unit in the lower level, receives the internal trading price and minimizes cost by optimizing its micro-sources' generation and exchange power with external grid. Moreover, the equilibrium of MMG's coordinated operation is acquired by multiple interactions between MGs and MA. Considering that there may be no optimal equilibrium because the pricing model is a non-optimization problem, a relative optimal equilibrium solution set is firstly formed and then the appropriate solution is selected within a certain evaluation criteria in the set. Finally, the proposed model is simulated in a MMG system with three MGs, as well as the rationality and effectiveness are verified in the results.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51677020 and No. 51877181), Soft Science Research Project of Chengdu (No. 2017-RK00-00054-ZF), Major Cultivation Project of Sichuan Education Department (No. 18CZ0018), and the Innovation Fund of Postgraduate of Xihua University (No. ycyj2018074).

Key words: multi-microgrid system; decentralized autonomy; centralized coordination; middle agent; guidance of price

0 引言

微网作为“源-网-荷-储”一体化运营的综合管控单元^[1], 既可有效进行局部区域内分布式资源的

自消纳, 也可在并网时与电网进行互动, 具有运行方式灵活以及可靠性高等特点, 得到了广泛关注与大力发展^[2-3]。随着微网的大量形成, 在地域上相邻的微网可互联形成多微网(Multi-microgrid, MMG)系统, 通过微网间的协调互补可增强彼此运行的可靠性与稳定性、提高分布式资源的就地消纳能力、降低运行成本以及提升大电网的安全稳定运行性能, 其广阔的应用前景吸引了大量的学者进行相关研究^[4-7]。

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51677020, 51877181); 成都市软科学研究项目资助(2017-RK00-00054-ZF); 四川省教育厅重大培育项目资助(18CZ0018); 西华大学研究生创新基金项目资助(ycyj2018074)

目前,在多微网系统协调优化运行方面,已有大量采用集中式方法的研究^[8-11],其研究结果均表明该方法可以有效提升 MMG 系统的整体运行性能,在多个微网属于同一主体、各微网运行目标一致、利益统一的情况下具有较强的实用性。但随着深化电力体制改革的推进,微网的投资运营主体将呈现多元化的特点,MMG 中的各微网经济利益独立、各微网之间的交互运行存在非合作特性的情况将会大量出现,集中式方法已难以适用,将微网考虑成不同利益主体进行自主建模与并行求解的分散式方法逐渐兴起。文献[12-13]在多微网层建立集中式模型,采用对偶原理进行解耦,各微网根据解耦量并行自治优化;文献[14]采用交替方向乘子法实现了离网型多微网系统集中式模型与微网自治模型的交替求解。上述两种方法有效解决了集中式方法中存在的隐私泄露、通信要求高等问题,实现了各微网的并行自治优化,但其中各微网的优化运行仍需服从整体利益,没有体现微网作为独立利益主体的特征。

针对微网作为独立利益主体的情况,一部分研究者提出了将微网自治优化后的“余量”进行共享的分散协调方法:文献[15]基于目标级联分析法,将微网与配网考虑成不同的利益主体,对二者的交互功率进行解耦协调,实现了含多微网配网系统的经济调度;文献[16]发现了微网独立优化下闲置的可调节功率,并引入多代理技术实现微网的自治以及 MMG 内的协调优化。但文献[15-16]将微网与外部电网的交易价格视为定值,仅对不同利益主体的交互功率进行协调,既忽视了各主体的参与意愿,同时也没有考虑到“价格”与“电量”的相互影响,不同利益体间的柔性互动难以实现。文献[17]将多电微网群与缺电微网群用不同的代理聚合,代理间通信并制定双方的电量交易价格,再由市场按贡献度将多余的电量在缺电微电网中分配。但该文一方面仅考虑了多余电量少于需求电量的情况,另一方面双方的交易价格仅由售电方决定,公平性欠佳。文献[18]建立了购售双方微网的效益函数,运用博弈论对双方的竞价与电量分配进行了分析,但其效益函数仅与微网在市场交易中所获得的收益有关,而忽略了效益与微网本身运行状态之间的交互影响。此外,在文献[17-18]中,各微网均需要进行复杂的分析与博弈,实际操作困难。文献[19]提出一种在混合市场中对能量进行直接最优定价的方法,但没有关注购售双方的自治管理。文献[20]通过上层代理对下层代理的价格激励,实现了主动配电网中含多元主体情况下的能量协调,表明了价格对利

益主体的激励作用,但该文中仍考虑各主体只能与上级电网互动,而未考虑同级主体间的交流。

基于以上考虑,本文将微网视作独立的利益主体,采用各微网分散自治、集中协调的思想建立多微网系统协调自治的日前优化调度模型。考虑电力作为一种商品,其价格与供需关系存在相互影响、相互制约的辩证关系。首先,从各微网自治角度出发,建立微网优化调度的混合整数规划模型;其次,考虑各微网作为独立利益体的特征,引入集中协调者根据各微网自治优化后的余/缺量所形成的供需关系,以公平为原则建立可提升各微网运行效益的 MMG 内部价格机制;然后,通过价格反馈引导各微网的自治优化从而调节 MMG 中的供需关系,并使两层之间进行多次量价互动,寻找多微网系统协同运行的利益均衡状态;最后,针对算例,将所提的协调优化模型在 Matlab 中使用 YALMIP 工具箱建模,并调用 CPLEX 进行仿真计算,对所提策略的合理性及有效性进行验证。

1 多微网系统能量协调共享模式

1.1 多微网系统结构

MMG 系统结构如图 1 所示。微网中包含风机(Wind turbine, WT)、光伏(Photovoltaic, PV)等清洁能源发电机组,燃料电池(Fuel Cell, FC)、微型燃气轮机(Micro-Turbine, MT)等燃气发电机组,蓄电池(Battery, BT)以及各种类型的电力负荷。相邻区域内的多个微网通过母线进行微网之间的互联互通,MMG 系统则通过相应的联络线路与大电网相连。微网能量管理系统(Microgrid Energy management system, MG-EMS)对微网内部能量进行优化管理;MMG 能量管理系统(MMG-EMS)则负责管理微网之间的能量流动及与大电网的能量交换。其中, $k=1,2,\dots,K$ 为微网编号, K 为微网数量。

1.2 多微网系统协调共享思路及流程

在图 1 所示结构下,微网既可以电网公司制定的电价 c_t^{buy} 和 c_t^{sell} 向电网公司购、售电量,也可在 MMG 系统内部购、售电量,相应的购售电价设为内部价格 ρ_t^{buy} 与 ρ_t^{sell} , $t=1,2,\dots,T$ 为调度时间间隔, T 为最大时段数。为了形成 MMG 内的能量互济,以内部电价为纽带实现微网间的互动,内部电价应处于电网公司制定的电价之间,即 $\rho_t^{\text{buy}}、\rho_t^{\text{sell}} \in [c_t^{\text{sell}}, c_t^{\text{buy}}]$,此时,购售双方微网为提升其运行效益,将均希望参与内部交易。公平合理地制定有效的内部价格机制激励微网主动参与合作,并实现能量的优化管理是本文研究的主要问题。

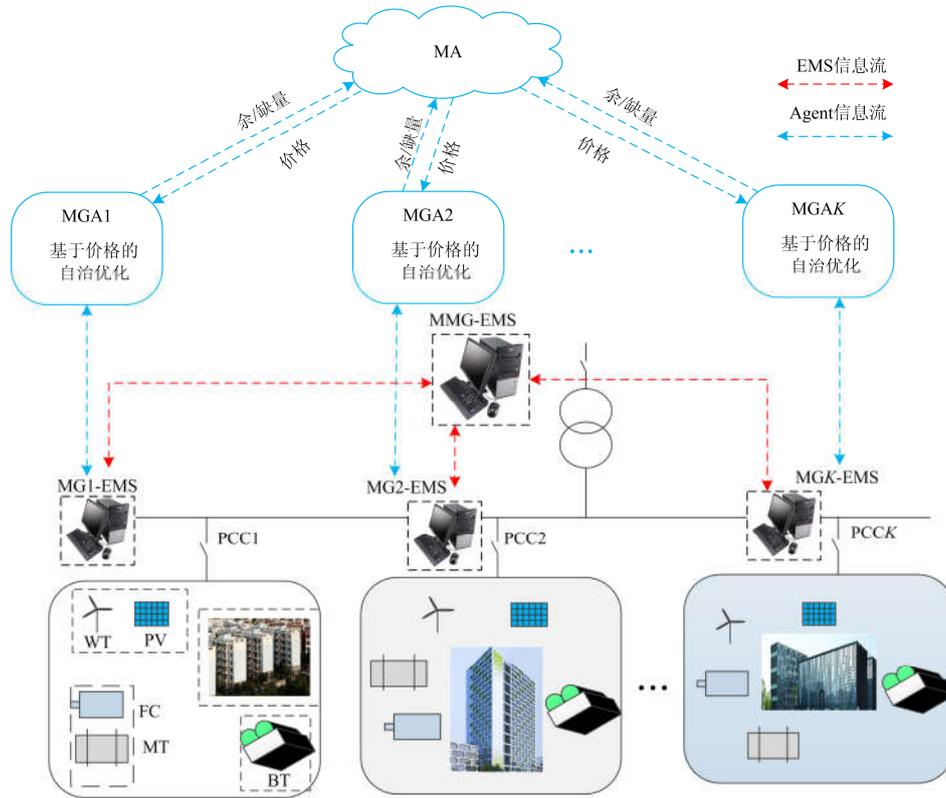


图1 MMG系统结构

Fig. 1 Structure of MMG system

结合多代理技术形成MMG系统能量协调共享模式,如图1中蓝色部分所示:各微网均设置自治代理(MG Agent, MGA),可从各MG-EMS获取新能源发电预测、负荷预测以及可控微源数据,并根据电价信息制定微网优化调度计划,然后向中间代理(Middle Agent, MA)传递余/缺量信息;MA作为协调者,接收各MGA的余/缺量信息按照供需关系制定MMG内部能量交易价格,并向各MGA反馈,同时,由于各MGA传递的余/缺量通常处于不平衡状态,MA也作为MMG代理向电网公司购/售电;各MGA与MA进行多次量价互动直到均衡解集产生,MGA将最终调度计划下发到各MG-EMS执行。其中,MA虽不持有能量,但各购售方均与MA进行交易。总体流程如图2所示。

图2中, $n=1,2,\dots,N$ 为MGA根据内部价格调整调度计划的调整次数, N 为最大允许调整次数。在第 n 次循环时,各MGA接收内部价格后将根据自己的优化目标调整调度计划,然后将调整后的余/缺量传递给MA制定第 n 次的内部价格以引导下一轮的自治优化。其中,当 $n=1$ 时,各微网以电网公司制定的电价进行初始自治优化,并在MA中进行第一次定价交易。

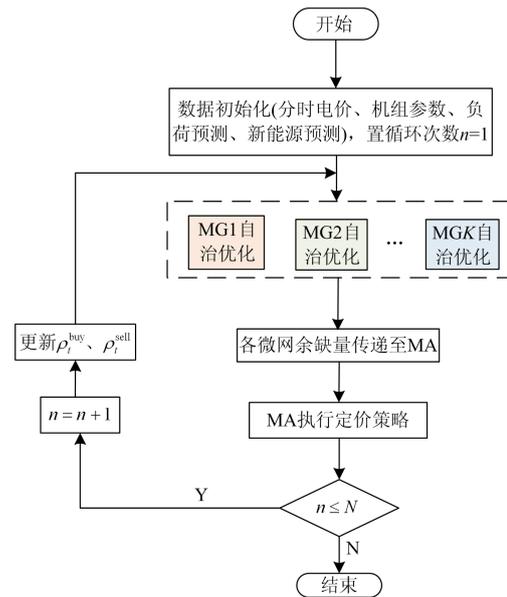


图2 MMG系统协调共享流程

Fig. 2 Coordinated sharing process of MMG system

2 多微网系统分层协调优化模型

本文建立分层优化模型进行日前协调优化调度,下层各微网以经济性为目标并行自治优化,上

层 MA 通过定价来引导微网的自治优化, 从而对 MMG 内的资源进行有效协调。考虑区域内多个微网在地域上临近, 模型中忽略网损的影响, 主要考虑功率平衡、出力及交互功率限制等约束条件。

2.1 微网自治优化调度模型

以 1 小时为优化时段, 将一天作为调度周期划分为 24 个时段, 将蓄电池充放电功率和微网购售功率均视为正数, 引入 0-1 状态变量表示其运行状态, 建立微网优化调度的混合整数线性规划模型。

2.1.1 目标函数

微网根据 MA 制定的价格对自身的资源进行优化配置, 当电量不足时向外部购电, 当电量富余时向外部售电。各微网以运行成本最小为目标, 目标函数如式(1)所示。

$$\min f_k = C_k^g + C_k^{ex} + C_k^{bat} \quad (1)$$

式中: f_k 为微网 k 的运行成本; C_k^g 为微网 k 中机组的发电成本; C_k^{ex} 为微网 k 与外网交互的成本; C_k^{bat} 为微网 k 中蓄电池参与运行的成本。

1) 机组发电成本

由于风光发电为可再生清洁能源发电, 基本无运行成本, 因此只考虑微网中燃气机组的燃料成本, 如式(2)~式(4)所示^[21]。

$$C_k^{MT} = \sum_{t=1}^T c_k^{gas} \frac{P_{k,t}^{MT}}{\eta_{MT} \times L_{HVNG}} \quad (2)$$

$$C_k^{FC} = \sum_{t=1}^T c_k^{gas} \frac{P_{k,t}^{FC}}{\eta_{FC} \times L_{HVNG}} \quad (3)$$

$$C_k^g = C_k^{MT} + C_k^{FC} \quad (4)$$

式中: c_k^{gas} 为微网 k 购买天然气的价格; $P_{k,t}^{MT}$ 、 $P_{k,t}^{FC}$ 分别为 MT、FC 在时段 t 的发电功率; η_{MT} 、 η_{FC} 为燃气机组的发电效率; L_{HVNG} 为天然气低热值; C_k^{MT} 为 MT 的发电成本; C_k^{FC} 为 FC 的发电成本。

2) 微网与外部电网交互成本如式(5)所示。

$$C_k^{ex} = \sum_{t=1}^T (\rho_t^{buy} P_{k,t}^{buy} - \rho_t^{sell} P_{k,t}^{sell}) \quad (5)$$

式中, $P_{k,t}^{buy}$ 、 $P_{k,t}^{sell}$ 分别为微网 k 在时段 t 的购、售电功率。

3) 蓄电池运行成本

蓄电池可在微网能量充足时充电、不足时放电, 其参与微网运行成本如式(6)所示^[15]。

$$C_k^{bat} = \sum_{t=1}^T (c_{dis} P_{k,t}^{dis} - c_{ch} P_{k,t}^{ch}) \quad (6)$$

式中: $P_{k,t}^{ch}$ 和 $P_{k,t}^{dis}$ 分别为蓄电池在时段 t 的充、放电功率; c_{ch} 、 c_{dis} 分别为相应的运行管理成本。

2.1.2 约束条件

1) 各微网功率平衡约束

$$P_{k,t}^{PV} + P_{k,t}^{WT} + P_{k,t}^{FC} + P_{k,t}^{MT} + P_{k,t}^{buy} - P_{k,t}^{sell} + P_{k,t}^{dis} - P_{k,t}^{ch} = P_{k,t}^{load} \quad (7)$$

式中: $P_{k,t}^{PV}$ 、 $P_{k,t}^{WT}$ 分别表示微网 k 中光伏、风机在时段 t 的日前预测出力值; $P_{k,t}^{load}$ 为微网 k 在时段 t 的日前负荷预测值。

2) 可控机组出力约束

$$P_{k,t}^{FC,min} \leq P_{k,t}^{FC} \leq P_{k,t}^{FC,max} \quad (8)$$

$$P_{k,t}^{MT,min} \leq P_{k,t}^{MT} \leq P_{k,t}^{MT,max} \quad (9)$$

式中: $P_{k,t}^{FC,min}$ 、 $P_{k,t}^{FC,max}$ 分别为微网 k 中 FC 有功出力的上下限值; $P_{k,t}^{MT,min}$ 、 $P_{k,t}^{MT,max}$ 分别为微网 k 中 MT 有功出力的上下限值。

3) 购售电相关约束

$$0 \leq P_{k,t}^{buy} \leq k_t^{buy} P_k^{ex,max} \quad (10)$$

$$0 \leq P_{k,t}^{sell} \leq k_t^{sell} P_k^{ex,max} \quad (11)$$

$$k_t^{buy} + k_t^{sell} \leq 1 \quad (12)$$

$$k_t^{buy}, k_t^{sell} \in \{0,1\} \quad (13)$$

式中: $P_k^{ex,max}$ 为微网 k 与外网交换功率上限; k_t^{buy} 和 k_t^{sell} 表示微网购售电状态, 当 k_t^{buy} 为 1 时表示购电, 为 0 时表示不购电; k_t^{sell} 为 1 时表示售电, 为 0 时表示不售电, k_t^{buy} 与 k_t^{sell} 不同时为 1。

4) 蓄电池充放电功率约束

$$0 \leq P_{k,t}^{dis} \leq k_t^{dis} P_k^{dis,max} \quad (14)$$

$$0 \leq P_{k,t}^{ch} \leq k_t^{ch} P_k^{ch,max} \quad (15)$$

$$k_t^{dis} + k_t^{ch} \leq 1 \quad (16)$$

$$k_t^{dis}, k_t^{ch} \in \{0,1\} \quad (17)$$

式中: $P_k^{dis,max}$ 和 $P_k^{ch,max}$ 分别表示微网中蓄电池放、充电功率上限; k_t^{ch} 和 k_t^{dis} 表示蓄电池充放电状态, 二者不同时为 1。

5) 蓄电池运行约束

蓄电池在各时刻的电池电量需满足一定界限, 过充或过放均会对电池产生较大的损害, 不利于电池经济运行。此外, 蓄电池在各时刻的电池电量与各时段充放电功率相关联, 忽略充放电效率的影响, 相关约束为

$$E_{k,min} \leq E_{k,t} \leq E_{k,max} \quad (18)$$

$$E_{k,t} = E_{k,t-1} + P_{k,t}^{ch} \Delta t - P_{k,t}^{dis} \Delta t \quad (19)$$

式中: $E_{k,min}$ 、 $E_{k,max}$ 分别为保证蓄电池安全运行所允许的电池电量上下限; $E_{k,t}$ 为时刻 t 的电池电量,

其与上一个时刻的电池电量以及本时段的充放电功率相关; Δt 为调度间隔时长, 本文为 1 h。

为保持周期性调度, 蓄电池系统在每日的始末电池电量需保持一致。

$$E_{k,0} = E_{k,24} \quad (20)$$

2.2 MA 定价模型

如前文所述, 合理的价格机制可实现微网之间的柔性互动, 使多余的分式能源通过临近微网间的共享进行有效的就地消纳, 从而降低向大电网的渗透率, 可提高大电网的安全稳定运行性能。本节从供需角度出发, 分析交易价格随供需变动的变化趋势, 制定 MMG 中内部价格机制。

在 MMG 中, 各微网自治优化后总的功率余/缺量即为 MMG 系统内部的供/需功率。

$$SP_t^{\text{sup}} = \sum_{k=1}^K P_{k,t}^{\text{sell}} \quad (21)$$

$$SP_t^{\text{de}} = \sum_{k=1}^K P_{k,t}^{\text{buy}} \quad (22)$$

式中, SP_t^{sup} 、 SP_t^{de} 分别 MMG 中时段 t 的功率供应量与需求量。

根据供需关系, 存在以下几种情形:

情形 1): 当 $SP_t^{\text{de}} = SP_t^{\text{sup}} = 0$ 时, MMG 内无可交易电量, 内部价格即为电网公司制定的电价。

$$\begin{cases} \rho_t^{\text{buy}} = c_t^{\text{buy}} \\ \rho_t^{\text{sell}} = c_t^{\text{sell}} \end{cases} \quad (23)$$

情形 2): 当 $SP_t^{\text{de}} = SP_t^{\text{sup}} \neq 0$ 时, 由于本文暂不考虑 MA 从价格差中获利, 为体现公平性, 内部价格应按中间价制定, 如式(24)所示。

$$\rho_t^{\text{buy}} = \rho_t^{\text{sell}} = (c_t^{\text{buy}} + c_t^{\text{sell}})/2 \quad (24)$$

情形 3): 当 $SP_t^{\text{sup}} < SP_t^{\text{de}}$ 时, 时段 t 的能量供需比为

$$R_t = \frac{SP_t^{\text{sup}}}{SP_t^{\text{de}}} \quad (25)$$

显然 $0 \leq R_t < 1$, 此时由于需求方向供应方购电后, 不足的部分仍需要向电网公司购买, 故应先制定 ρ_t^{sell} , ρ_t^{buy} 为向供给方及电网公司购电的平均价格。文献[22]表明, 交易价格与供需比成反向变化关系, 可用式(26)表示^[23]。

$$\rho_t^{\text{sell}} = \frac{1}{aR_t + b}, a > 0 \quad (26)$$

考虑价格在端点处连续, 则有

$$\rho_t^{\text{sell}} = \begin{cases} \frac{1}{a+b} = \frac{c_t^{\text{buy}} + c_t^{\text{sell}}}{2} & R_t = 1 \\ \frac{1}{b} = c_t^{\text{buy}} & R_t = 0 \end{cases} \quad (27)$$

式中: 当 $R_t = 1$ 时, 即供需相等, 售电价格如式(24)所示; 当 $R_t = 0$ 时, 表明无内部供应量, 需求电量只能由 MA 向电网公司以 c_t^{buy} 购买, 再向需求方售电, 故此时 $\rho_t^{\text{sell}} = 1/b = c_t^{\text{buy}}$ 。将式(27)求解可得 a 与 b 的值, 代入式(26)可得 MMG 内售电价格为

$$\rho_t^{\text{sell}} = \frac{c_t^{\text{buy}} (c_t^{\text{buy}} + c_t^{\text{sell}})}{c_t^{\text{buy}} (1 + R_t) + c_t^{\text{sell}} (1 - R_t)} \quad (28)$$

此时, 购电方一部分需求量以 ρ_t^{sell} 在内部购买, 一部分将由 MA 向电网公司以 c_t^{buy} 购买, 即有经济平衡关系:

$$SP_t^{\text{de}} \cdot \rho_t^{\text{buy}} = SP_t^{\text{sup}} \cdot \rho_t^{\text{sell}} + (SP_t^{\text{de}} - SP_t^{\text{sup}}) c_t^{\text{buy}} \quad (29)$$

整理可得此时 MMG 内购电价格为

$$\rho_t^{\text{buy}} = \rho_t^{\text{sell}} R_t + c_t^{\text{buy}} (1 - R_t) \quad (30)$$

情形 4): 当 $SP_t^{\text{sup}} > SP_t^{\text{de}}$ 时, $R_t > 1$, 此时满足需求方后多余的电量将向电网公司出售, 故应先制定 ρ_t^{buy} , ρ_t^{sell} 为向需求方及电网公司售电的平均价格。为方便推导, 首先做如下定义:

$$X_t \triangleq \frac{SP_t^{\text{de}}}{SP_t^{\text{sup}}} \quad (31)$$

由于交易价格与 R_t 成反向变化关系, 故与 X_t 成同向变化关系, 可用式(32)表示。

$$\rho_t^{\text{buy}} = \frac{1}{cX_t + d}, c < 0 \quad (32)$$

考虑价格在端点处连续, 则有

$$\rho_t^{\text{buy}} = \begin{cases} \frac{1}{c+d} = \frac{c_t^{\text{buy}} + c_t^{\text{sell}}}{2} & X_t = 1 \\ \frac{1}{d} = c_t^{\text{sell}} & X_t = 0 \end{cases} \quad (33)$$

式中, 当 $X_t = 0$ 时, 表明无内部需求量, 售电量只能向电网公司出售, 为激励购电方购电, 则制定此时 $\rho_t^{\text{buy}} = 1/d = c_t^{\text{sell}}$ 。同理, 可求得此时内部价格如式(34)和式(35)所示。

$$\rho_t^{\text{buy}} = \frac{c_t^{\text{sell}} (c_t^{\text{buy}} + c_t^{\text{sell}})}{c_t^{\text{sell}} (1 + X_t) + c_t^{\text{buy}} (1 - X_t)} \quad (34)$$

$$\rho_t^{\text{sell}} = \rho_t^{\text{buy}} X_t + (1 - X_t) c_t^{\text{sell}} \quad (35)$$

根据以上定价方法, 可获得内部价格随供需比变化关系, 如图 3 所示。

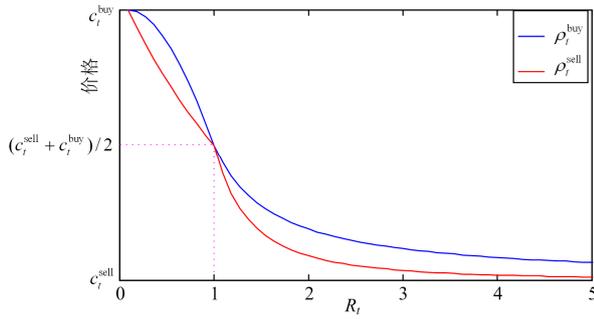


图3 内部价格与供需比关系

Fig. 3 Relationship between the internal price and supply and demand ratio

可见，内部电价始终处于电网公司电价之间，在供小于需时，内部价格较高，可激励售电方增加发电量多售电；在供大于需时，内部价格较低，可引导需求方减少自身高成本发电，而购买其他微网多余的清洁、经济的能源，满足吸引各微网参与协调的条件。

2.3 分层协调模型及其求解方法

本文所提分层协调优化模型可总结为如下形式：

上层：式(23)、式(24)、式(28)、式(30)、式(34)、式(35)；

下层： $\min f_k(\mathbf{X}_k), k=1, 2, \dots, K;$

s.t. 式(7)一式(20)

其中， \mathbf{X}_k 为微网 k 中待优化变量组成的向量。如前文所述，该模型采用上下层进行量价交互反馈的方式进行求解，第 n 次内部价格由第 n 次传递的余/缺量决定，并将该价格反馈以引导下一次循环中各微网的自治优化。由于上层模型为非优化问题，当各微网局部利益存在冲突时，则可能出现无最优均衡解的情况，其原理类似于多目标规划与交叉规划^[24-25]，可寻找多微网系统协调互动的相对稳定状态并求取其相对最优均衡解集，然后按照一定评价准则选择解。基于此，下层各微网自治优化在 Matlab R2014a 中使用 YALMIP 工具箱建模并调用 CPLEX 进行优化求解，上层在 Matlab 中进行编码，两层之间进行交互传递直至处于相对稳定状态，其流程如图 2 所示。

3 算例分析

3.1 参数设置

为验证所提模型的有效性，在含三个微网的多微网系统中设定参数进行仿真分析。各微网均设置有 WT、PV、BT、MT 及 FC 各一台。MG1 设置为居民型微网，MG2 为商业型微网，MG3 为工业型

微网，设定 WT 及 PV 均以最大功率跟踪模式运行，各微网 WT、PV 预测发电量及负荷预测曲线均在文献[11]的基础上进行适当的修改。适当修改后的各微网参数配置情况如表 1 所示^[9]，假设电网公司制定的电价为分时电价，其如表 2 所示^[26]。MG1 天然气价格为 2.28 元/m³，MG2 与 MG3 均为 3.25 元/m³；MT 发电效率为 30%，FC 发电效率为 40%，燃气低热值为 9.7 kW·h/m³^[27]；蓄电池充放电管理成本^[28]分别为 0.4、0.6 元/(kW·h)。表 1 中各功率值均为功率上限，功率下限设定为 0，蓄电池容量下限设定为总容量的 0.25 倍，蓄电池调度的初始容量设为 0.5 倍最大容量。

表 1 微网参数

Table 1 Parameters of MGs

微网	MT 功率/kW	FC 功率/kW	储能功率/kW	储能容量/(kW·h)	交换功率/kW
MG1	95	100	80	280	200
MG2	65	130	70	320	200
MG3	100	100	130	500	300

表 2 分时电价

Table 2 Time of Use

时段	区间划分	购电电价/(元/(kW·h))	售电电价/(元/(kW·h))
峰	6:00—11:00, 19:00—23:00	1.21	1.02
平	11:00—19:00	0.69	0.50
谷	23:00—6:00	0.43	0.27

为探讨所提模型对 MMG 系统优化调度的影响，对不同运行方案进行对比分析：

方案 A：各微网按照分时电价独立优化，只与电网公司进行交易，而不进行 MMG 内协调共享；

方案 B：以文献[23]所提定价方法进行协调优化，设定最大循环次数为 50 次；

方案 C：以本文所提定价方法进行协调优化，设定最大循环次数为 50 次。

3.2 仿真结果及分析

3.2.1 运行成本及公平性分析

方案 B 与 C 各微网成本在独立优化基础上随循环次数的改变如图 4 所示，为负表示微网运行成本在独立优化的基础上减少，循环次数为 0 表示各微网独立优化。

由图 4 可见，方案 B 与 C 中，各 MGA 与 MA 进行 5 次左右的量价互动后即处于相对稳定状态。此时，相比于方案 A，方案 B 与 C 中各微网运行成本在 MA 的协调下均降低，表明两种方式均提升了各微网的运行效益，体现了价格激励的有效性。在该稳定状态下，相对最优均衡解集中包含两个解，

本文选取其中 MMG 运行成本较低的情况。这是由于在稳定状态下, 每个微网的优化结果变化不会太大, 处于定价方式下每个微网都可以接受的公平状态, MMG 运行成本较低的情况则体现出 MMG 系统整体处于较优的运行状态。将各方案下各微网及 MMG 运行成本示于表 3。

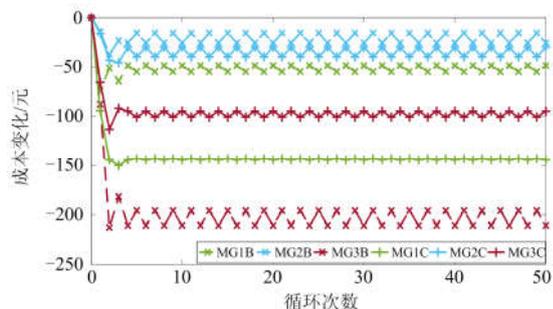


图 4 各微网成本变化
Fig. 4 Cost varieties of MGs

表 3 成本比较
Table 3 Costs comparison

方案	MMG	MG1	MG2	MG3
A	3 923.79	-797.11	445.78	4 275.12
B	3 638.97	-845.73	420.31	4 064.38
C	3 640.18	-940.21	405.89	4 174.49

由表 3 可见, 方案 B 与 C 下 MMG 运行成本基本相同, 表明两种定价方式对 MMG 整体的优化效果基本接近。各 MG 参与内部交易提升的运行效益如表 4 所示。

表 4 提升的效益
Table 4 Increased benefits

方案	MG1	MG2	MG3
B	48.62	25.47	210.74
C	143.1	39.9	100.63

根据表 4, 采用文献[19]所提的公平性计算方法对两种定价方式的公平性进行分析, 如式(36)所示。

$$FI = \frac{1}{K} \cdot \frac{\sum_{k=1}^K G(k)^2}{\sum_{k=1}^K (G(k))^2} \quad (36)$$

式中: FI 表示公平性指数, 值越接近 1 表示越公平; $G(k)$ 表示微网 k 参与内部交易提升的运行效益。

根据式(36)求得方案 B 的 $FI = 0.57$, 方案 C 的 $FI = 0.833$ 。可见, 相比于方案 B, 方案 C 的公平性大大提高, 这表明方案 C 进一步公平地分配了参

与协调优化的各微网获得的收益, 有利于提升 MMG 中各微网的协同意愿。后文将对方案 C 的协调优化结果进行进一步分析。

方案 C 最终制定的内部价格如图 5 所示。可见, 内部价格始终处于电网公司制定的分时电价之间。在分时电价低谷及平时段时内部电价较高, 可提升微网售电量; 在高峰时内部价格较低, 有利于微网购电。验证了本文所提定价方式的合理性及有效性。

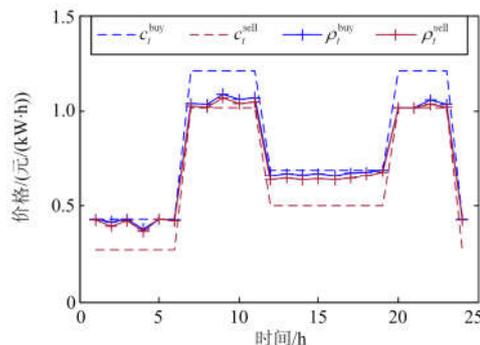
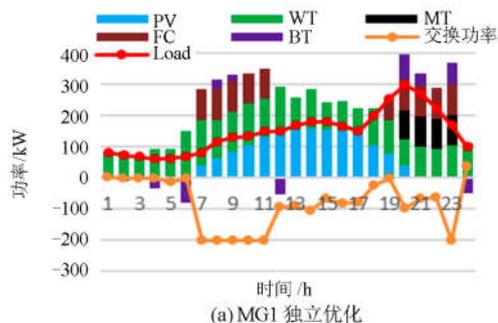


图 5 内部价格
Fig. 5 Internal price

3.2.2 协调前后微源出力及购售电变化分析

各微网独立优化结果如图 6 所示。其中, 交换功率为正表示微网购电, 为负表示售电, BT 功率为正表示放电, 为负表示充电。MG1 作为居民型微网, 其负荷较小且燃气机组发电成本较低, 在大多数时段处于售电状态; MG2 在电价高峰时段处于售电状态, 在平时段处于购电状态; MG3 作为工业型微网, 负荷量较大, 因此长时期处于购电状态, 在时段 7—12 处于负荷高峰时, 其发电成本较高的 MT 也处于发电状态。图 7 示出了方案 C 的协调结果。相比图 6, 通过协调优化后, 各微网在时段 1—6 以及时段 20—24 的微源状态变化较小; 在时段 7—11, MG3 购电量增加, 且其 MT 机组不再发电; 在时段 12—16, MG2 购电量增加以向蓄电池充电; 在时段 12—19, MG1 的 FC 发电量增加且售电量增加。



(a) MG1 独立优化

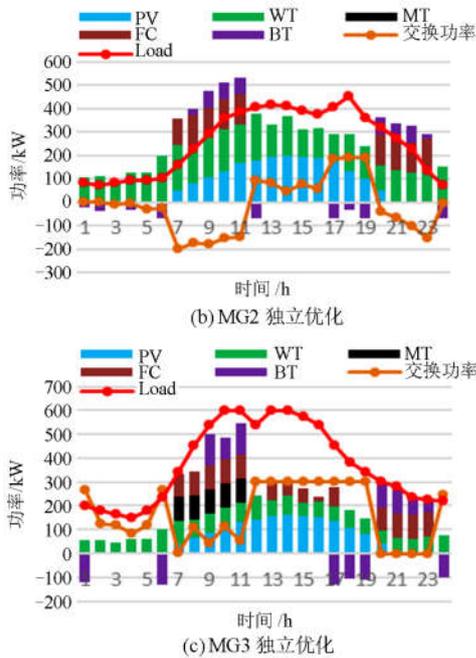


图 6 各微网独立优化结果

Fig. 6 Independent optimization results of MGs

结合图 5 对以上状态变化进行分析。在时段 1—6, 各微网负荷较小且分时电价处于低谷期, 主要通过可再生能源以及向电网公司购电的方式进行供电, 功率余缺量较小, 因此在协调前后状态基本无变化; 在时段 7—11, 由于 MG1 与 MG2 有较大的功率余量, 故内部交易价格接近于分时售电电价, 从而 MG3 以较低价格在 MMG 中购买电量需求并减少其发电成本较高的 MT 的发电量; 在时段 12—19, MG2 与 MG3 的总功率需求大于 MG1 的功率供给, 故内部价格接近于分时购电电价, 而 MG1 的 FC 发电成本处于内部售电电价与分时售电电价之间, 因此其作为闲置资源将增发功率以获得额外收益来降低自身运行成本, MG2 与 MG3 也可以较低的价格购买功率缺额; 在时段 20—24, MG1 与 MG2 虽有部分功率余量, 但 MG3 处于负荷低谷期, 此时主要由自身微源供电, 基本无功率需求量, 故此时协调后各 MG 变化较小。可见, MA 根据供需关系制定的内部价格有效地吸引了各微网参与内部交易, 形成了微网之间的时空互补, 清洁、经济的分布式资源得到了充分的就地消纳。

3.2.3 MMG 与大电网交互功率

协调前后 MMG 与大电网交互功率如图 8 所示。相比于协调前, 协调后 MMG 与大电网的交互功率有较大幅度的下降, 多余分布式资源进行充分的就地消纳后向大电网的渗透率降低, 有利于大电网的安全稳定运行。

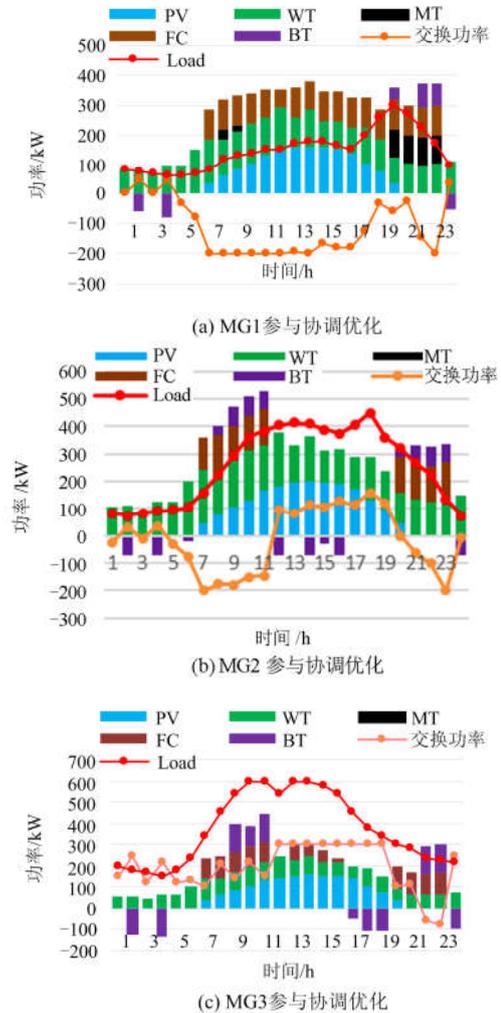


图 7 各微网协调优化结果

Fig. 7 Coordinated optimization results of MGs

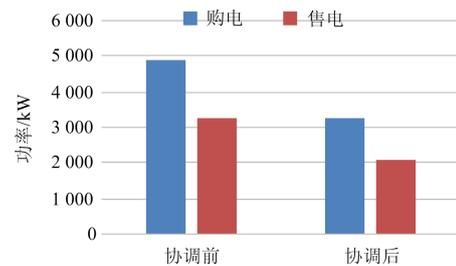


图 8 MMG 与大电网交互功率

Fig. 8 Exchange power between MMG and power grid

4 结论

本文提出一种通过制定能量交流价格来引导微网参与协作的 MMG 系统分层协调优化调度模型, 实现了 MMG 系统的能量优化管理。

1) 针对微网作为独立利益主体趋利的特征, 提出通过制定内部价格使微网运行效益提升从而吸引

微网参与协作的方式。该方式以价格为激励手段,引导各微网主动参与协调,实现了不同利益体间的柔性互动,提升了MMG中清洁、经济分布式资源的就地消纳能力,在一定程度上降低了分布式能源向大电网的渗透率,有利于大电网的安全稳定运行。

2) 针对各微网在协作中存在局部利益不统一的情况,采用寻找多微网系统协调互动稳定状态的方式来求取其相对最优均衡解集,再按总运行成本最小来选择解,算例结果表明,该方式能够在保证相对公平的基础上实现整体效益的最大化,可在保留争议的基础上达成协作。

3) 各微网传递余/缺量、按供需定价的方式,实现了各微网的分散自治,其操作简单易行,适用于参与者众多的情形,同时也可保护各微网隐私,具有较强的实用价值。

本文仍存在所讨论的微网结构较为简单且未考虑各种不确定性条件等缺点,丰富微网能源结构、考虑不确定性的影响将是下一步研究的重点。此外,结合市场运营机制制定更为公平合理的价格机制也将在后续的研究中作深入探讨。

参考文献

- [1] 刘敦楠,徐尔丰,许小峰. 面向园区微网的“源-网-荷-储”一体化运营模式[J]. 电网技术, 2018, 42(3): 681-689.
LIU Dunnan, XU Erfeng, XU Xiaofeng. “Source-network-load-storage” integrated operation model for microgrid in park[J]. Power System Technology, 2018, 42(3): 681-689.
- [2] OLIVARES D E, MEHRIZI-SANI A, ETEMADI A H, et al. Trends in microgrid control[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(4): 1905-1919.
- [3] 马艺玮, 杨苹, 王月武, 等. 微电网典型特征及关键技术[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(8): 168-175.
MA Yiwei, YANG Ping, WANG Yuewu, et al. Typical characteristics and key technologies of microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(8): 168-175.
- [4] 支娜, 肖曦, 田培根, 等. 微电网群控制技术研究现状与展望[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(4): 107-115.
ZHI Na, XIAO Xi, TIAN Peigen, et al. Research and prospect of multi-microgrid control strategies[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(4): 107-115.
- [5] 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.
XU 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.
- [6] 赵敏, 陈颖, 沈沉, 等. 微电网群特征分析及示范工程设计[J]. 电网技术, 2015, 39(6): 1469-1476.
ZHAO Min, CHEN Ying, SHEN Chen, et al. Characteristic analysis of multi-microgrids and a pilot project design[J]. Power System Technology, 2015, 39(6): 1469-1476.
- [7] 茆美琴, 丁勇, 王杨洋, 等. 微网——未来能源互联网系统中的“有机细胞”[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(19): 1-11.
MAO Meiqin, DING Yong, WANG Yangyang, et al. Microgrid—an “organic cell” for future energy interconnection system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(19): 1-11.
- [8] 陈其森, 汪湘晋, 池伟, 等. 多微电网互联系统能量管理方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(11): 83-91.
CHEN Qisen, WANG Xiangjin, CHI Wei, et al. Research on energy management method of multi-microgrids[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(11): 83-91.
- [9] 吕天光, 艾芊, 孙树敏, 等. 含多微网的主动配电系统综合优化运行行为分析与建模[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 122-132.
LÜ Tianguang, AI Qian, SUN Shumin, et al. Behavioural analysis and optimal operation of active distribution system with multi-microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 122-132.
- [10] NIKMEHR N, RAVADANEGH S N. Optimal power dispatch of multi-microgrids at future smart distribution grids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(4): 1648-1657.
- [11] 陈奕斌, 林基明, 刘迪迪. 微电网小区间的能量协作调度策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(22): 55-62.
CHEN Yibin, LIN Jiming, LIU Didi. Research on energy cooperation scheduling strategy in residential micro-grids[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(22): 55-62.
- [12] LIU N, WANG J, WANG L. Distributed energy management for interconnected operation of combined heat and power-based microgrids with demand response[J]. Journal of Modern Power Systems & Clean Energy, 2017, 5(3): 1-11.
- [13] WANG D, GUAN X, WU J, et al. Integrated energy exchange scheduling for multi-microgrid system with electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,

- 2016, 7(4): 1762-1774.
- [14] 王皓, 艾芊, 吴俊宏, 等. 基于交替方向乘子法的微电网群双层分布式调度方法[J]. 电网技术, 2018, 42(6): 1718-1725.
WANG Hao, AI Qian, WU Junhong, et al. Bi-level distributed optimization for microgrid clusters based on alternating direction method of multipliers[J]. Power System Technology, 2018, 42(6): 1718-1725.
- [15] 谢敏, 吉祥, 柯少佳, 等. 基于目标级联分析法的多微电网主动配电系统自治优化经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(17): 4911-4921.
XIE Min, JI Xiang, KE Shaojia, et al. Autonomous optimized economic dispatch of active distribution power system with multi-microgrids based on analytical target cascading theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(17): 4911-4921.
- [16] BUI V H, HUSSAIN A, KIM H M. A multiagent-based hierarchical energy management strategy for multi-microgrids considering adjustable power and demand response[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(2): 1323-1333.
- [17] JADHAV A M, PATNE N R, GUERRERO J M. A novel approach to neighborhood fair energy trading in a distribution network of multiple microgrid clusters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(2): 1520-1531.
- [18] LEE J, GUO J, CHOI J K, et al. Distributed energy trading in microgrids: a game-theoretic model and its equilibrium analysis[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(6): 3524-3533.
- [19] WU Y, TAN X, QIAN L, et al. Optimal pricing and energy scheduling for hybrid energy trading market in future smart grid[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 11(6): 1585-1596.
- [20] 徐熙林, 宋依群, 姚良忠, 等. 基于多层电价响应机制的主动配电网源-网-荷协调方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(5): 9-17.
XU Xilin, SONG Yiqun, YAO Liangzhong, et al. Source-Grid-Load coordination method for active distribution network based on multi-level electricity price response mechanism[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(5): 9-17.
- [21] 刘春阳, 王秀丽, 刘世民, 等. 计及蓄电池使用寿命的微电网经济调度模型[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(10): 29-36.
LIU Chunyang, WANG Xiuli, LIU Shimin, et al. Economic dispatch model considering battery lifetime for microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(10): 29-36.
- [22] GANS L J, KING S, STONECASH R, et al. Principles of economics[M]. Cengage Learning, 2011.
- [23] LIU N, YU X, WANG C, et al. Energy-sharing model with price-based demand response for microgrids of peer-to-peer prosumers[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5): 3569-3583.
- [24] 刘家壮, 李荣生, 孟志青. 交叉数学规划问题[J]. 经济数学, 1998(增刊 1): 11-16.
LIU Jiazhuang, LI Rongsheng, MENG Zhiqing. Interactive mathematics programming problems[J]. Mathematics in Economics, 1998(S1): 11-16.
- [25] 王刚. 多层规划与交叉规划的性质与算法[D]. 曲阜: 曲阜师范大学, 2003.
WANG Gang. The properties and algorithm of multilevel decision system and interaction system[D]. Qufu: Qufu Normal University, 2003.
- [26] 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.
- [27] 李乐. 微网的经济运行研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2011.
LI Le. Study of economic operation in microgrid[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2011.
- [28] 王守相, 王栋, 韩亮. 考虑不确定性的微网日前经济优化调度区间线性规划方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(24): 5-11.
WANG Shouxiang, WANG Dong, HAN Liang. Interval linear programming method for day-ahead optimal economic dispatching of microgrid considering uncertainty[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(24): 5-11.

收稿日期: 2018-09-12; 修回日期: 2018-11-13

作者简介:

何浩(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为微网及多微网优化调度; E-mail: 397840411@qq.com

雷霞(1973—), 女, 通信作者, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为电力市场、调度自动化、综合能源系统等。E-mail: 274757067@qq.com

(编辑 周金梅)