

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190917

考虑交互功率控制和双边竞价交易的多微电网双层优化调度

何黎君^{1,2}, 程杉^{1,2}, 陈梓铭^{1,2}

(1. 新能源微电网湖北省协同创新中心(三峡大学), 湖北 宜昌 443002;
2. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 多微电网的协调优化与控制是保证多微电网系统高可靠运行的有效途径。提出一种考虑交互功率控制和双边竞价交易策略的多微电网双层优化调度模型。上层以微电网与配电网交互功率和交互功率波动最小化为目标。下层以多微电网系统的综合成本最低为目标, 并采取双边竞价交易策略协调多个微电网之间的公平交易和功率分配。通过实际算例验证了该优化模型能够降低多微电网系统与配电网交互功率和交互功率的波动, 所设计的交易策略能降低多微电网系统综合成本。

关键词: 多微电网; 日前优化调度; 双边竞价; 双层优化

A scheduling model of a multi-microgrid system based on bi-layer optimization with consideration of PCC power control and bilateral bidding

HE Lijun^{1,2}, CHENG Shan^{1,2}, CHEN Ziming^{1,2}

(1. Hubei Provincial Collaborative Innovation Center for New Energy Microgrid (China Three Gorges University), Yichang 443002, China; 2. College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: Coordinated optimization and control is an effective way to ensure highly reliable operation of the multi-microgrid system. A scheduling model of a multi-microgrid system based on bi-layer optimization with consideration of Point of Common Coupling (PCC) power control and bilateral bidding is proposed. The upper layer aims at minimizing the PCC power and its fluctuation. The lower is to reduce total cost of the multi-microgrid system. In order to coordinate fair dealing and power allocation between the microgrids, a bilateral bidding strategy is adopted. The simulation results demonstrate that the optimization model can reduce the amount and the fluctuation of the PCC power, and the designed bilateral bidding strategy enables reduction of the overall cost of the multi-microgrid system.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51607105).

Key words: multi-microgrid; day-ahead optimization scheduling; bilateral bidding; bi-layer optimization

0 引言

微电网是可再生能源的有效消纳和管理方式, 能够协同调度各分布式电源、储能系统以及负荷达到提高能量利用效率、减少污染气体排放的目的^[1-2]。大量微电网接入配电网时, 难以确保多个微电网与配电网的安全稳定和协调互动, 而将地理位置上临近的微电网互联构成多微电网系统, 可以有效提高系统运行的可靠性和经济性^[3]。配电网因含有多微

电网而变成一个复杂网络, 多微电网系统的高可靠运行也有赖于多微电网的协调优化与控制, 传统的调度模式已经不再适用, 这对多微电网系统的调度提出了挑战^[4]。

多微电网系统通过互联线路连接各微电网, 各微电网之间的能量协调可通过控制联络线的功率来实现。为此, 文献[5]针对多微电网系统联络线功率控制, 提出了串联和并联结构的多微电网系统分层协调控制策略; 而文献[6]则以远离主电网的邻近海岛多微电网为对象, 以运行成本及损失最小化为目标, 提出了各微电网联络线功率控制的优化

模型。由于多个微电网系统接入将对配电网运行的稳定性、经济性等方面产生影响, 文献[7]考虑网损和负荷波动方差构建多目标优化函数, 建立双层优化模型并分别采用粒子群优化算法和随机优化方法对上下两层进行优化求解; 文献[8]则针对含冷热电联供系统的区域多微网, 建立了考虑经济性和综合能效两个目标的多目标优化调度模型。然而前者未考虑各微电网之间的电能交互, 后者未考虑到多微电网与配电网交互功率控制问题。上述文献从联络线功率控制、考虑网损等运行稳定性角度或运行成本等经济性角度解决了多微电网系统优化控制问题, 但均未同时考虑微电网之间电能交互、微电网与配电网之间交互功率控制。由于区域内各个微电网的分布式能源配置、负荷需求等不同, 微电网之间可能存在电能交互。有必要通过微电网间的能量协调控制与优化调度, 并对系统与配电网间的交互功率进行控制, 以提高区域多微电网系统运行的可靠性与经济性、提高能源利用率, 减少系统对配电网运行稳定性的影响。

目前, 我国正有序向社会资本开放电力市场, 微电网系统以独立利益主体的身份参与电力交易, 含多微电网系统的配电网成为一个多利益主体的复杂网络, 微电网间电能交易的概念被逐渐引入到多微电网系统当中^[4]。文献[9]首先建立了基于价格差异与时间贯序权重的多微电网智能配电网两阶段快速决策模型, 并在此基础上构建了基于最大投标风险承受比例电量和最小用电成本的电价投标决策模型; 文献[4]提出了开放市场环境下的多微电网系统双层调度方法, 下层以各微电网自身收益最大化为目标, 上层通过配电网调度机构对下层优化问题可能引发的交易冲突进行协调; 而文献[10]则采用合作博弈理论解决多微电网之间竞价、收益分配的问题, 提出身份二重性的判断方法; 由于并网型光伏微电网直接与配电网交易是最常见的市场交易模式, 文献[11]则提出一种基于合作博弈论的市场交易模型, 就微电网之间形成联盟的动力、收益分配、结算机制进行了研究。上述工作解决了微电网间电能交易规则与秩序的问题, 但所涉及的交易机制步骤繁琐, 且未考虑缺电微电网需求量优先级。

多微电网通过互联构成多微电网系统, 其目的就是要通过各微电网的自治管理实现发电资源的协调互补, 通过各微电网间的协调互济提高系统能源内能源利用效率。为了降低系统运行成本, 减少系统对配电网运行稳定性的影响, 有必要对系统与配电网间的交互功率进行控制。另一方面, 多微电网系统与配电网能量交互时分时段电价是一定的, 而

微电网之间交易, 出于利益考虑, 会采用恶性竞价提高收益, 因此需要建立一种机制确保公平交易和资源有效分配^[12-13]。本文提出考虑多微电网系统与配电网交互功率控制和微电网之间双边竞价交易策略的多微电网系统双层优化调度模型, 上层以最小化多微电网系统与配电网交互功率和交互功率波动为目标, 下层以最小化多微电网系统综合成本为目标, 并采用双边竞价交易策略协调多微电网之间的公平交易和功率分配。

1 多微电网系统双层优化调度框架

本文所研究的多微电网系统是指区域内多个微电网互联^[14], 接入同一个中低压配电系统, 并经由卖方、买方聚合商代理, 统一进入电力调度中心进行调度, 接受同一个配电网调度机构调控。该系统中各微电网包含风电(WT)、光伏(PV)、微型燃气轮机(MT)、蓄电池(BT)以及负荷(Load)。

假设存在必要的通信基础设施协助完成调度过程, 调度框架如图 1 所示。各微电网中央控制器向调度中心上报风光负荷预测数据, 调度中心根据上层优化目标确定公共连接点(PCC)交互功率和 MT、BT 出力并发布给各微电网和配电网; 下层多微电网系统首先对 MT、BT 出力进行优化, 然后根据 PCC 交互功率判断缺/多电微电网, 缺电微电网在买方聚合商注册为买家, 上报缺电量, 多电微电网在卖方聚合商注册为卖家, 上报多余电量, 买卖双方聚合商基于双边竞价交易策略达成交易。最后将优化后的交易结果、PCC 交互功率和出力计划提交到调度中心, 调度中心检验数据, 均满足约束条件后对微电网和配电网发布最终调度指令, 否则重新优化直至满足条件。

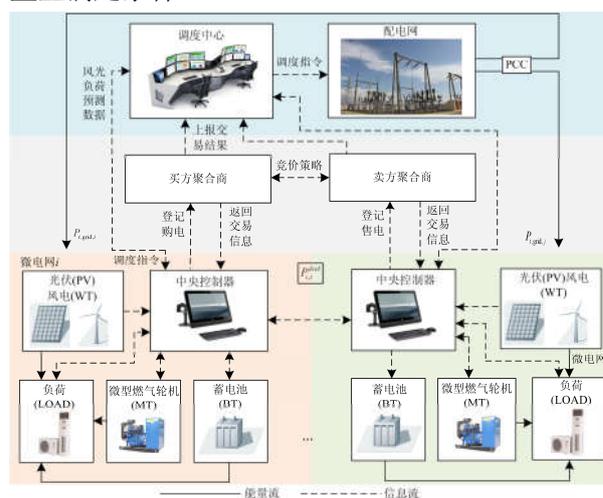


图 1 多微电网系统调度框架

Fig. 1 Scheduling framework of multi-microgrid system

2 上层优化模型

2.1 目标函数

为了减少多微电网系统接入对配电网运行稳定性的影响,从如下两个角度考虑^[15]:其一,最小化 PCC 交互功率,减少可再生能源并网对配电网造成的冲击;其二,最小化 PCC 交互功率波动。

多微电网系统与配电网的交互功率及其波动数学表达式分别如式(1)、式(2)所示。

$$f_1 = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n |P_{i,t}^L - P_{i,t}^{WT} - P_{i,t}^{MT} - P_{i,t}^{BT} - P_{i,t}^{PV}| \quad (1)$$

式中: $P_{i,t}^L$ 为 t 时段微电网 i 的总负荷; $P_{i,t}^{PV}$ 、 $P_{i,t}^{WT}$ 、 $P_{i,t}^{MT}$ 、 $P_{i,t}^{BT}$ 分别为 PV、WT、MT、BT 在 t 时间段的出力。

$$f_2 = \sqrt{\sum_{t=2}^T \sum_{i=1}^n (P_{i,t} - P_{i,t-1})^2} \quad (2)$$

式中, $P_{i,t}$ 为微电网 i 在 t 时段的 PCC 交互功率。

考虑到两个目标函数单位一致,故使用线性加权法将多目标优化问题转换为单目标优化问题^[16]。其数学表达式为

$$\min F = \omega_1 f_1 + \omega_2 f_2 \quad (3)$$

式中, ω_1 和 ω_2 为目标权重系数。

2.2 约束条件

1) 功率平衡约束

$$P_{i,t}^L = P_{i,t}^{PV} + P_{i,t}^{WT} + P_{i,t}^{BT} + P_{i,t}^{MT} + P_{i,t}^G \quad (4)$$

$$P_{i,t}^G = P_{i,t}^{PV} + P_{i,t}^{WT} + P_{i,t}^{BT} + P_{i,t}^{MT} \quad (5)$$

式中, $P_{i,t}^G$ 表示 t 时段微电网 i 的微源出力之和。

2) PCC 交互功率约束

$$P_{i,t}^{\min} \leq P_{i,t} \leq P_{i,t}^{\max} \quad (6)$$

3) MT 出力约束

$$P_{i,t,\min}^{MT} \leq P_{i,t}^{MT} \leq P_{i,t,\max}^{MT} \quad (7)$$

4) MT 爬坡速率约束^[17]

$$R_{MT,d} \Delta t \leq P_{i,t+1}^{MT} - P_{i,t}^{MT} \leq R_{MT,u} \Delta t \quad (8)$$

式中, $R_{MT,u}$ 、 $R_{MT,d}$ 分别表示 MT 的出力上升和下降的速率,单位 kW/h。

5) BT 容量约束

$$E_{i,t}^{\min} \leq E_{i,t} \leq E_{i,t}^{\max} \quad (9)$$

$$E_{i,t+1} = E_{i,t} + P_{i,t}^{BT} \Delta t \quad (10)$$

6) BT 最大充放电功率约束

$$P_{i,t}^{BT,d,\max} \leq P_{i,t}^{BT} \leq P_{i,t}^{BT,c,\max} \quad (11)$$

式中, $P_{i,t}^{BT,d,\max}$ 和 $P_{i,t}^{BT,c,\max}$ 分别表示 BT 最大放电功率和最大充电功率。

3 下层优化模型

以最小化多微电网系统综合成本为目标,综合成本包括运行维护成本、MT 发电成本、环境成本和微电网交易成本。

3.1 运行维护成本

微电网 i 的运行维护成本可表示为

$$W_{i,om} = \sum_{t=1}^T (k_{om}^{PV} P_{i,t}^{PV} + k_{om}^{WT} P_{i,t}^{WT} + k_{om}^{MT} P_{i,t}^{MT} + k_{om}^{BT} P_{i,t}^{BT}) \quad (12)$$

式中, k_{om}^{PV} 、 k_{om}^{WT} 、 k_{om}^{MT} 、 k_{om}^{BT} 分别为 PV、WT、MT、BT 的运行维护成本系数。

3.2 MT 的发电成本

其数学表达式为^[17]

$$W_{i,gen} = \sum_{t=1}^T \frac{C_{hl} P_{i,t}^{MT}}{L \eta_{i,MT}} \quad (13)$$

式中: C_{hl} 是天然气价格,取 0.76 元/m³; L 是低热值,取 9.7 kW·h/m³; $\eta_{i,MT}$ 表示发电总效率。

3.3 环境成本

多微电网系统中污染物的主要来源为 MT 和配电网,其环境成本计算式为

$$W_{i,env} = \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^m (C_k \delta_k P_{i,t}^{MT} + C_k \delta_k P_{t,grid,i}) \quad (14)$$

式中: C_k 是治理第 k 种污染物所需要的单位成本; δ_k 表示发电单元第 k 种污染物排放系数; $P_{t,grid,i}$ 表示下层优化后微电网 i 与配电网的交互功率。

3.4 交易成本

微电网与配电网和其他微电网之间的交易成本计算如下^[19-20]。

$$W_{i,d} = \sum_{t=1}^T (C_g^s P_{t,grid,i} + C_g^b P_{t,grid,i} + C_{i,t}^d P_{i,t}^{deal}) \quad (15)$$

式中: C_g^s 是微电网 i 向配电网购电的价格; C_g^b 是微电网 i 向配电网售电的价格; $C_{i,t}^d$ 是微电网 i 向其他微电网售电/购电的价格; $P_{i,t}^{deal}$ 是微电网 i 在 t 时段内与其他微电网交易的电量。

3.5 目标函数

最小化多微电网系统的综合成本,即

$$\min W_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N (W_{i,om} + W_{i,gen} + W_{i,env} + W_{i,d}) \quad (16)$$

3.6 约束条件

1) 功率平衡约束

$$P_{i,t} = P_{t,grid,i} + P_{i,t}^{deal} \quad (17)$$

2) 下层优化交互功率约束

$$P_{i,t}^{\min} \leq P_{t,grid,i} \leq P_{i,t}^{\max} \quad (18)$$

式中, $P_{i,t}^{\max}$ 、 $P_{i,t}^{\min}$ 是上层优化中微电网 i 的 PCC 交互功率上/下限。

3) 微电网交易量约束

$$(P_{i,t}^{\text{deal}})^{\min} \leq P_{i,t}^{\text{deal}} \leq (P_{i,t}^{\text{deal}})^{\max} \quad (19)$$

4 微电网双边竞价交易策略

在多微电网交易的过程中, 为了防止各微电网采用恶性竞价的方式来提高自己的收益, 干扰电能的公平交易和分配, 需要规范合理的交易策略来实现资源分配的有效性^[12]。双边竞价是解决网格资源分配的有效途径, 它的灵活性和有效性保证了资源的高效分配。

4.1 报价计算

首先由式(20)判断微电网是否缺电。

$$P_{i,t} = P_{i,t}^L - P_{i,t}^G \quad (20)$$

式中: 若 $P_{i,t} > 0$ 则微电网 i 缺电, 向买方聚合商登记报价信息; 反之则多电, 向卖方聚合商登记。

上报的期望售电/购电价格以促进风光消纳为原则, 充分考虑新能源补贴、天然气价格和储能成本等因素, 并且报价不能超过电网售电价格, 不低于电网购电价格^[21]。计算报价如下。

$$c_{\text{buy}} = \frac{\beta_i (P_{i,t}^{\text{PV}} + P_{i,t}^{\text{WT}})}{\sum_i (P_{i,t}^{\text{PV}} + P_{i,t}^{\text{WT}})} - \varepsilon + \frac{\delta_i P_{i,t}^{\text{MT}}}{\sum_i P_{i,t}^{\text{MT}}} + \frac{\varphi_i P_{i,t}^{\text{BT}}}{\sum_i P_{i,t}^{\text{BT}}} \quad (21)$$

$$c_{\text{sell}} = \frac{\beta_j (P_{j,t}^{\text{PV}} + P_{j,t}^{\text{WT}})}{\sum_j (P_{j,t}^{\text{PV}} + P_{j,t}^{\text{WT}})} - \varepsilon + \frac{\delta_j P_{j,t}^{\text{MT}}}{\sum_j P_{j,t}^{\text{MT}}} + \frac{\varphi_j P_{j,t}^{\text{BT}}}{\sum_j P_{j,t}^{\text{BT}}} \quad (22)$$

式中: i/j 表示缺/多电微电网编号; f/x 表示缺/多电微电网的数量; β 、 δ 、 φ 为价格系数; ε 为补贴价格。

4.2 交易匹配流程

本文设计如图 2 所示的微电网双边竞价交易匹配流程。

1) 在 t 时段里, 缺电微电网将购电量 $P_{i,t}$ 和期望购电价格上报给买方聚合商; 多电微电网将售电量 $P_{j,t}$ 和期望售电价格上报给卖方聚合商。买方聚合商根据报价信息按从大到小顺序将缺电微电网排序, 卖方聚合商根据报价信息按从低到高顺序将多电微电网排序。

2) 买卖双方聚合商根据微电网的报价信息和需求量优先级按照“高低匹配”的交易规则^[22]进行匹配。如果微电网购电量或者售电量刚好匹配完成, 那么买/卖方聚合商将交易结果返回给微电网, 双方微电网按照市场出清价格, 即双方竞价价格的均值(如式(23))完成交易并退出; 如果仍有缺电微电网需求没有满足, 那么该微电网在交易时段内可以重新

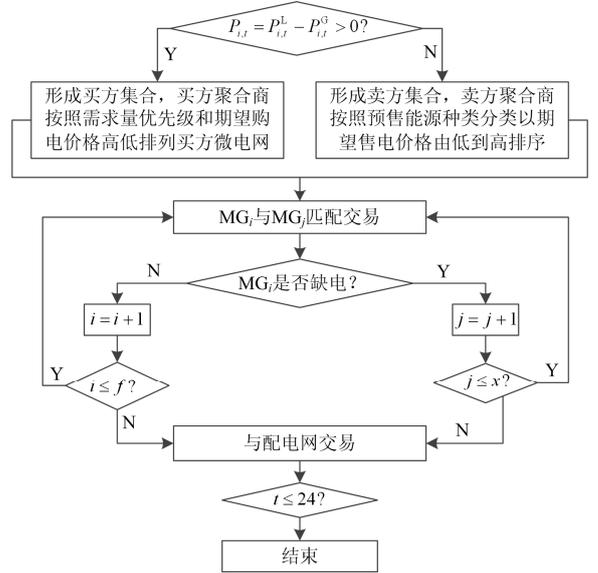


图 2 微电网交易流程图

Fig. 2 Microgrid transaction flow chart

提交电量和报价, 继续参与下一轮双边交易。

$$C_{i,t}^d = \frac{c_{\text{sell}} + c_{\text{buy}}}{2} \quad (23)$$

3) 若所有卖方交易后仍不能满足买方需求, 则买方聚合商需向配电网购电并分配给缺电微电网; 若交易后卖方仍有多余电量, 则向配电网售电。

5 算例仿真及分析

本文选取一个含有 3 个微电网的配电网进行仿真, 每个微电网中含有 PV、WT、MT、BT, 各参数如表 1 所示^[23], 光伏运行维护成本系数如表 2 所示; 污染物排放相关系数如表 3 所示; 光伏和风电预测曲线如图 3 所示^[23]; 每个微电网的日负荷如图 4 所示, 向配电网售电/购电电价采取分时电价, 如表 4 所示。同一时段不允许微电网同时进行买卖, 采用粒子群优化算法^[24]解决该优化问题, $\omega_1 = \omega_2 = 0.5$ 。

表 1 各微电网分布式电源参数

微电网 i	WT 容量/kW	PV 容量/kW	$P_{i,t}^{\text{BTmax}} /$ kW	$E_{i,t}^{\text{max}} /$ kW·h	$P_{i,t}^{\text{MT}} /$ kW
$i=1$	65	80	40	125	70
$i=2$	55	80	25	115	70
$i=3$	50	70	20	105	70

表 2 各分布式电源运行维护成本系数值

运行维护 成本系数	$K_{\text{OM}}^{\text{PV}}$	$K_{\text{OM}}^{\text{WT}}$	$K_{\text{OM}}^{\text{MT}}$	$K_{\text{OM}}^{\text{BT}}$
	0.109 5	0.136 8	0.088	0.016

表 3 分布式发电污染物排放系数

污染物类型		CO ₂	SO ₂	NO _x
污染物排放	MT	724	0.003 6	0.2
系数/(g/kW)	电网	889	1.8	1.6

表 4 配电网分时电价

时段	0—8、23—24	9—11、17—19	12—16、20—22
电价	0.17	0.49	0.83

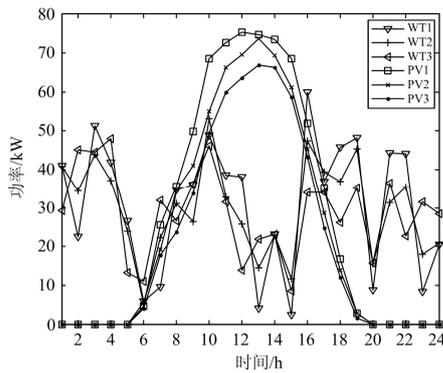


图 3 PV、WT 预测曲线

Fig. 3 PV, WT forecast curves

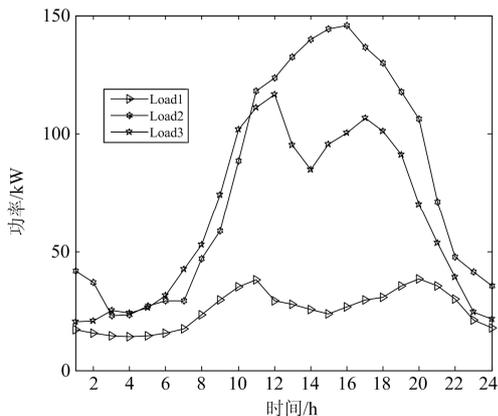


图 4 日负荷曲线

Fig. 4 Daily load curves

本文设置三种策略进行对比分析。策略一：各微电网仅与配电网有能量交互；策略二：本文所提交易策略，但不进行双层优化；策略三：本文所提交易策略，并进行双层优化。图 5 所示为三种策略下多微电网系统与配电网的交互功率曲线。其中，交互功率为正，表明系统从配电网购电，反之则售电。

根据图 5，对比可见策略三的削峰填谷效果明显优于策略一和二，表明本文方法可有效降低多微电网系统与配电网的交互功率及其波动，减少多微电网并网对配电网运行的影响。但和一、二比，10

和 14 时段内策略三的交互功率反而大，前者是因为该时段电网售电价低，多购买电量以备峰时段负荷需求，后者是由于下层优化模型的目标函数是一天内总成本最低，为达到更优的结果需要在该时段增加与配电网交互功率。其次，和一相比，策略二中谷时段与配电网交互功率有所增加，是因为该时段多微电网系统有多余电量可卖给配电网以获得利润，12、16、20、21 时段与配电网的交互功率均降低，实则是微电网之间的交易来满足 MG2、3 能源供需不平衡，改变了调度计划，而 4 时段和 18 时段交互功率反而比较大，是由于下层优化模型的目标函数是一天内总成本最低，为达到更优的结果需要在该时段增加与配电网交互功率。对比可见策略二能够促进微电网之间的能量互济，降低微电网与配电网的交互功率，并且有错峰交互的作用，从而有效减少微电网与配电网的交互。下面通过微电网之间的交易情况进一步分析产生这一现象的原因。

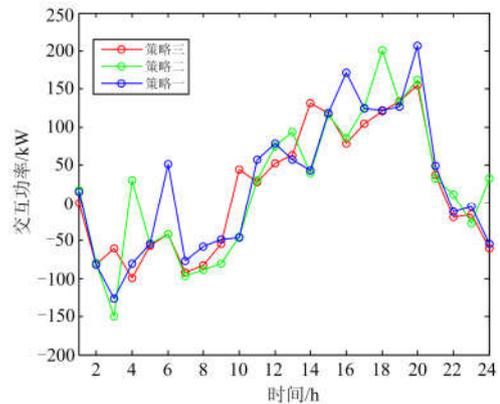


图 5 三种策略的微电网与配电网的交互功率

Fig. 5 Three strategies of the interaction power between the microgrids and the distribution network

图 6 所示为采用策略三时各微电网之间功率交互情况及交易电价。可见，首先，微电网 2 缺电量较多，大多时段为购电方，这与图 4 中负荷曲线基本一致，尤其是 10—20 点，其负荷远大于 1 和 3，在这期间一直为购电方。其次，1—2、23—24 时段微电网 1 向 2、3 售电，这是由于该时段 2 和 3 的 WT、PV 不足以给负荷提供足够的电能，所以选择从售电价低于分时电价的微电网 1 购电，结合图 5，由于谷时段配电网售电价低，2、3 也从配电网购电来供给负荷需求。然后，5 时段微电网 3 向微电网 1、2 供电；6、10—17 时段 2 缺电，卖方微电网 1 和 3 通过竞价分别向 2 卖电，且与余电较多的 1 进行更多的交易。再者，19—20 峰时段，新能源和微电网间能量互济不足以满足负荷需求，微电网 2、3 需要

额外从配电网购电。最后, 21—22 时段微电网 2 内 WT 发电充足, 向缺电微电网 1、3 交易电能获得利润。结合图 4 负荷曲线和图 5 与配电网交互功率曲线以及表 2 分时电价对照, 所得微电网间的能量交互结果是合理的。也可以看出, 所提交易策略能够促进新能源消纳和微电网间能量互济, 从而避免与配电网产生过多的交互功率, 同时可见, 卖方更倾向于与能够购买较多电量的买方达成交易。下面就三种策略中多微电网系统总成本差异进行分析。

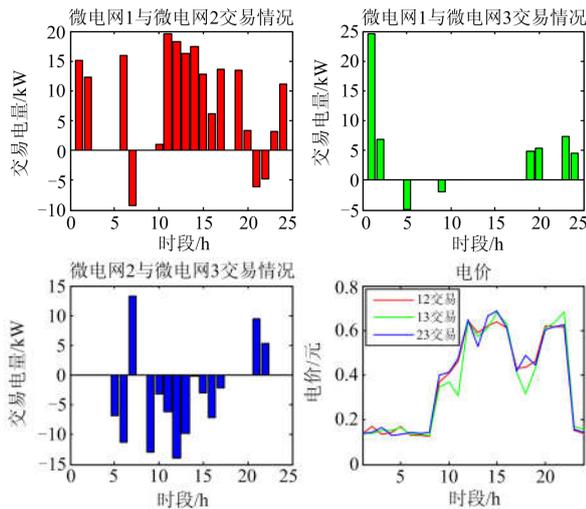


图 6 微电网之间的交易情况

Fig. 6 Trading between microgrids

图 7、图 8 为多微电网系统的总成本与收益, 其中图中的正值表示成本, 负值表示利润。由图 7 可见, 首先, 与一相比, 策略二、三中微电网在谷时段的利润均有增加, 这是由于微电网之间可以交易且微电网负荷需求低。然后, 在 9—20 时段, 微电网 1 为了减少与配电网交互将多余电量卖给其他微电网以获得更多利润, 微电网 2、3 的成本也有明显降低, 这与图 6 所示的微电网之间交易情况是对应的, 充分表明微电网之间进行竞价交易能够实现资源分配的有效性, 促进微电网之间能量互济, 减轻微电网 2、3 向配电网花更多价钱购电的压力, 同时也给微电网 1 带来更多的利润, 是双赢的。进一步结合图 8、表 5 分析可知, 策略二、三与策略一相比

表 5 微电网总成本

Table 5 Microgrid total cost

总成本	策略一	策略二	策略三
MG1	-236 263	-224 559	-224 909
MG2	314 227	300 909	299 960
MG3	185 742	164 048	164 011
总计	263 706	240 398	239 062

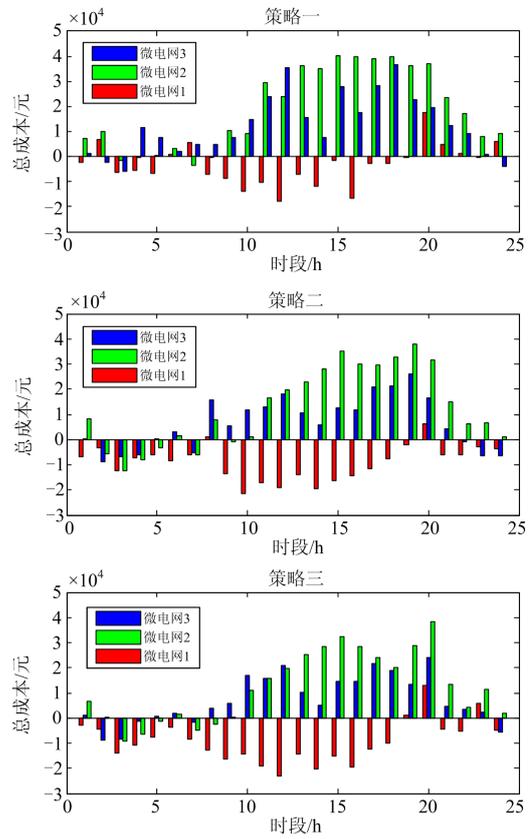


图 7 三种策略每个微电网分时段总成本

Fig. 7 Total cost per time period of each microgrid

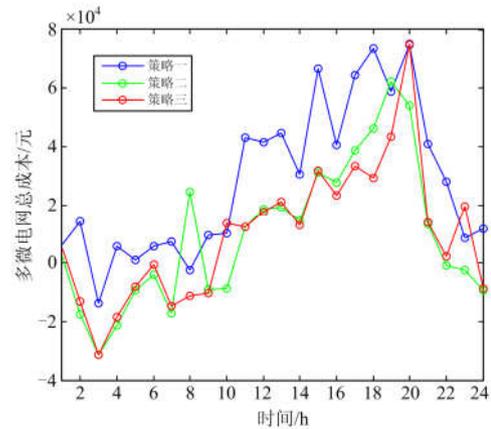


图 8 多微电网系统每时段的总成本曲线

Fig. 8 Total cost of multi-microgrid system per period

多微电网系统总成本确实显著降低。总之, 该竞价策略能促使多微电网系统内合理分配电能, 保证各微电网可以获得超越各自独立运行的运营收益。

6 结论

针对多微电网优化调度时如何减少系统对配电网运行稳定性影响和发电资源如何协调互补的问

题,提出了一种考虑交互功率控制和双边竞价交易的多微电网优化调度模型。上层以最小化多微电网系统与配电网交互功率及其波动为目标,下层以最小化多微电网系统综合成本为目标,并采用双边竞价交易策略,协调多微电网之间的公平交易和功率分配。本文提出的优化方案在有效降低多微电网系统与配电网的交互功率及其波动的同时,可以降低多微电网综合成本,达到了减少多微电网并网对配电网运行的影响和多微电网系统发电资源合理分配的目标。

后续工作将考虑使用熵权法将多目标优化问题转换为单目标优化问题,并考虑不同利益主体的微电网博弈交易方法。

参考文献

- [1] LI Y, YANG Z, LI G, et al. Optimal scheduling of isolated microgrid with an electric vehicle battery swapping station in multi-stakeholder scenarios: a bi-level programming approach via real-time pricing[J]. *Applied Energy*, 2018, 232: 54-68.
- [2] 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.
- [3] 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): 1718-1727.
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): 1718-1727.
- [4] 魏伟,孙恒楠,罗凤章,等.基于开放市场环境的多微电网系统优化调度方法[J].*电力系统及其自动化学报*, 2016, 28(7): 19-25.
WEI Wei, SUN Hengnan, LUO Fengzhang, et al. Multi-microgrid system optimal scheduling method based on open market[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2016, 28(7): 19-25.
- [5] 周念成,金明,王强钢,等.串联和并联结构的多微电网系统分层协调控制策略[J].*电力系统自动化*, 2013, 37(12): 13-18, 74.
ZHOU Niancheng, JIN Ming, WANG Qianggang, et al. Hierarchical coordination control strategy for multi-microgrid system with series and parallel structure[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2013, 37(12): 13-18, 74.
- [6] 周永智,吴浩,李怡宁,等.基于MCS-PSO算法的邻近海岛多微网动态调度[J].*电力系统自动化*, 2014, 38(9): 204-210.
ZHOU Yongzhi, WU Hao, LI Yining, et al. Dynamic dispatch of multi-microgrid for neighboring islands based on MCS-PSO algorithm[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2014, 38(9): 204-210.
- [7] 沈鑫,曹敏,周年荣,等.多微网配电系统协调优化调度和经济运行研究[J].*电子测量与仪器学报*, 2016, 30(4): 568-576.
SHEN Xin, CAO Min, ZHOU Nianrong, et al. Research on coordinated optimal scheduling and economic operation of multi-microgrid distribution system[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2016, 30(4): 568-576.
- [8] 王守相,吴志佳,袁霜晨,等.区域多微网系统的多目标优化调度方法[J].*电力系统及其自动化学报*, 2017, 29(5): 14-20.
WANG Shouxiang, WU Zhijia, YUAN Shuangchen, et al. Method of multi-objective optimal dispatching for regional multi-microgrid system[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2017, 29(5): 14-20.
- [9] 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 based multi-micro network intelligent distribution network dynamic game model[J]. *Power System Technology*, 2014, 38(12): 3321-3327.
- [10] 白佩琳,雷霞,何建平.多微电网系统的竞价机制设计[J].*现代电力*, 2017, 34(6): 22-27.
BAI Peilin, LEI Xia, HE Jianping. Design of bidding mechanism for multiple microgrids[J]. *Modern Electric Power*, 2017, 34(6): 22-27.
- [11] 刘念,赵璟,王杰,等.基于合作博弈论的光伏微电网群交易模型[J].*电工技术学报*, 2018, 33(8): 1903-1910.
LIU Nian, ZHAO Jing, WANG Jie, et al. A trading model of PV microgrid cluster based on cooperative game theory[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2018, 33(8): 1903-1910.
- [12] 白杨,李昂,夏清.新形势下电力市场营销模式与新型电价体系[J].*电力系统保护与控制*, 2016, 44(5): 10-16.
BAI Yang, LI Ang, XIA Qing. Electricity business marketing modes in the new environment and new electricity pricing systems[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(5): 10-16.

- [13] 伍雨柔, 程杉, 魏荣宗. 基于双向拍卖的多微电网协调优化调度[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(3): 96-101.
WU Yurou, CHENG Shan, WEI Rongzong. Coordinated optimization scheduling of multi-microgrid based on double auction[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2019, 31(3): 96-101.
- [14] 杨苹, 许志荣, 袁昊哲, 等. 考虑峰谷电价的串联结构光储型多微网经济运行[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(1): 8-14.
YANG Ping, XU Zhirong, YUAN Haozhe, et al. Electricity business marketing modes in the new environment and new electricity pricing systems[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2018, 30(1): 8-14.
- [15] 杨晓东, 陈宇, 张有兵, 等. 考虑交互功率与可再生能源功率波动的微电网调度优化模型[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(23): 30-38.
YANG Xiaodong, CHEN Yu, ZHANG Youbing, et al. Scheduling optimization model for microgrid considering interactive power and renewable energy output fluctuation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(23): 30-38.
- [16] 米师农, 张建成, 郭伟. 一种市场环境下的电网友好型多微网优化调度方法[J]. 电力建设, 2018, 39(6): 117-124.
MI Shinong, ZHANG Jiancheng, GUO Wei. Grid-friendly optimal scheduling method for multi-microgrid system in electricity marketing environment[J]. Electric Power Construction, 2018, 39(6): 117-124.
- [17] 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.
- [18] NIKMEHR N, NAJAFI RAVADANEGH S. Optimal power dispatch of multi-microgrids at future smart distribution grids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(4): 1648-1657.
- [19] LU T, AI Q, WANG Z. Interactive game vector: a stochastic operation-based pricing mechanism for smart energy systems with coupled-microgrids[J]. Applied Energy, 2018, 212: 1462-1475.
- [20] 王守相, 吴志佳, 庄剑. 考虑微电网功率交互和微源出力协调的冷热电联供型区域多微网优化调度模型[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(24): 7185-7194, 7432.
WANG Shouxiang, WU Zhijia, ZHUANG Jian. Optimal Dispatching model of cchp type regional multi-microgrids considering interactive power exchange among microgrids and output coordination among micro-sources[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(24): 7185-7194, 7432.
- [21] 芮涛, 李国丽, 王群京, 等. 配电侧多微电网日前电能交易纳什议价方法[J]. 电网技术, 2019, 43(7): 2576-2585.
RUI Tao, LI Guoli, WANG Qunjing, et al. Nash bargaining method for multi-microgrid energy trading in distribution network[J]. Power System Technology, 2019, 43(7): 2576-2585.
- [22] 邹小燕, 张新华. 基于社会福利最大化的电力市场双边竞价机制设计[J]. 系统工程理论与实践, 2009, 29(1): 44-54.
ZOU Xiaoyan, ZHANG Xinhua. Double electricity auction mechanism design based on maximizing market welfare[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2009, 29(1): 44-54.
- [23] 江润洲, 邱晓燕, 李丹, 等. 含储能系统的多微网智能配电系统经济运行[J]. 电网技术, 2013, 37(12): 3596-3602.
JIANG Runzhou, QIU Xiaoyan, LI Dan, et al. Economic operation of smart distribution network containing multi microgrids and energy storage system[J]. Power System Technology, 2013, 37(12): 3596-3602.
- [24] 程杉, 吴思源, 孙伟斌. 考虑电压稳定性和充电服务质量的电动汽车充电站规划[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(7): 12-21.
CHENG Shan, WU Siyuan, SUN Weibin. Optimal planning of charging stations for electric vehicles considering voltage stability of distribution system and the quality of service[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(7): 12-21.

收稿日期: 2019-07-30; 修回日期: 2019-08-20

作者简介:

何黎君(1995—), 女, 硕士研究生, 研究方向为多微网能量优化管理; E-mail: 354660949@qq.com

程杉(1981—), 男, 通信作者, 工学博士, 副教授, 研究方向为新能源微电网运行优化与控制、电动汽车充换电设施与可再生能源集成、智能计算及其在电力系统中的应用等; E-mail: hpucquyzu@ctgu.edu.cn

陈梓铭(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为多微网能量优化管理。E-mail: 779592333@qq.com

(编辑 葛艳娜)