

计及供热区域热惯性的多微网调度策略

朱晓荣, 谢婉莹

(新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 河北省保定市 071003)

Multi-Microgrids Dispatching Strategy Considering Thermal Inertia in Heating Area

ZHU Xiaorong, XIE Wanying

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System With Renewable Energy Sources, (North China Electric Power University), Baoding 071003, Hebei Province, China)

摘要: 冷热电联供 (combined cooling heating and power, CCHP) 型微网可实现能量的梯级利用, 提高能源利用率。建筑物的热惯性以及微网间的功率交互会对多微网系统的经济调度产生重要影响。针对含冷热电联供系统的多微网, 首先建立了考虑供热区域热惯性及微网间功率交互的多微网经济调度模型。该模型以多微网系统经济性最优为目标, 考虑了微网间的功率交互, 并增加了散热器散热量作为控制变量, 将传统热负荷平衡约束转化为室内温度满足人体舒适度要求。之后通过算例分析比较了不同运行方式下, 微网中微源的运行情况和多微网系统的经济性。结果表明, 综合考虑供热区域热惯性以及相邻微网间功率交互会改变微网中各微源的出力, 提高多微网系统的经济性。

关键词: 冷热电联供 (CCHP); 多微网; 热惯性; 功率交互; 经济调度

Abstract: The cascade utilization of energy can be achieved by combined cooling heating and power (CCHP) type of microgrids, meanwhile the energy utilization efficiency can be improved. Both heat inertia of the building and power interaction among microgrids may have a significant impact on economic dispatching of multi-microgrid system. In allusion to the multi-microgrid containing CCHP systems, an economic dispatching model, in which the heat inertia of heating area and the power interaction among microgrids was taken into account, was built. Considering power interaction among microgrids, in this model the optimum economy of multi-microgrid system was taken as the objective, and the heat dissipation quantity of the heat radiator was added as a control variable, besides the constraint of traditional thermal load balance was translated into the indoor temperature to satisfy the human comfort requirement. And then, both running conditions of the micro-source in microgrids and the economy of the microgrid system under different operating modes were compared by the analysis

on calculation examples. Simulation results show that overall considering the heat inertia of heating area and the power interaction of adjacent microgrids the output of microsources can be changed so that the economy of multi-microgrids system can be improved.

Keywords: combined cooling heating and power(CCHP); multi-microgrids; thermal inertia; power interaction; economic dispatch

DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2019.1125

0 引言

随着越来越多的微网接入配电网, 地理上相邻的多个微网互联可以形成多微网系统^[1]。通过微网间功率的协调优化, 多微网系统会产生不同于单一微网的运行特征, 进而提高多微网运行的经济性^[1-2]。冷热电联供 (combined cooling heating and power, CCHP) 系统在目前能源短缺、环境恶化等问题日益严重的情况下, 因为能够实现能量的梯级利用, 提高能源利用率, 已经成为当前电力能源行业的研究热点^[3-4]。CCHP 型微网能将 CCHP 系统与微网结合起来, 满足用户的各类负荷需求^[5]。同时, 采暖建筑物具有热惯性, 停止供热后, 在一定时间内仍然能保持一定的温度^[6-7], 这会对微网中微源的出力产生一定的影响。因此, 在多微网系统的研究中, 考虑建筑物热惯性及微网间功率交互有重要意义。

在单个 CCHP 型微网的研究方面, 文献^[8]在考虑风电不确定性的基础上, 构建双层鲁棒模型, 得到了微网最优日前调度方案。对于多微网

系统^[9-10]，文献^[9]在考虑微网与配网存在功率交互的基础上，研究微网间功率交互对多微网系统的影响。但以上研究均未考虑建筑物的热惯性。目前，对建筑物热惯性的研究主要集中在考虑热电联供系统工作在“以热定电”模式下，“三北地区”的风电消纳问题^[11-13]，也有部分研究以用户温度舒适度为研究基础，并考虑供热系统的热惯性^[14-15]。因此，在考虑微网间存在功率交互的基础上，研究考虑建筑物热惯性对微源出力的影响有重要意义。

针对以上问题，本文建立考虑供热区域热惯性及微网间功率交互的 CCHP 型多微网系统的经济优化调度模型。首先给出 CCHP 型微网中各设备及供热区域热惯性的数学模型；其次搭建 CCHP 型多微网系统的经济优化调度模型；最后，算例仿真验证了所提模型的有效性。

1 CCHP 型微网设备模型

CCHP 型微网中包括冷、热、电、气 4 种形式的能源，微网间存在功率交互的 CCHP 型多微网系统的能量流动如图 1 所示。

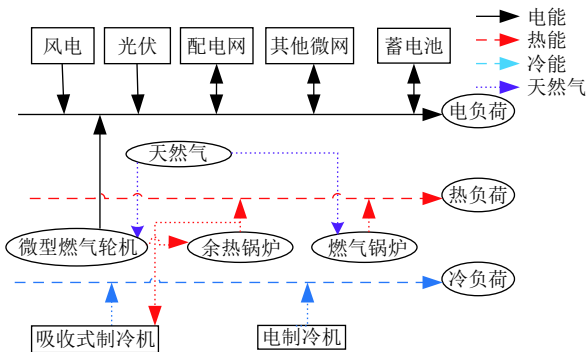


图 1 CCHP 型多微网系统的能量流动示意图

Fig. 1 Sketch map of energy flow in CCHP type of multi-microgrid system

1.1 CCHP 系统各设备模型

CCHP 系统中，微型燃气轮机 (micro-turbine, MT) 通过天然气产生电能，产生的余热由余热锅炉 (waste heat boilers, WHB) 收集起来，一部分供给热负荷，另一部分通过吸收式制冷机 (absorption chiller, AC) 供给冷负荷。不足的热负荷需求由燃气锅炉 (gas boiler, GB) 供给，不足的冷负荷需求由电制冷机 (electric machine, EC) 供给。风机 (wind turbine, WT)、光伏电池 (photovoltaic, PV) 出力具有随机性、波动性等特点^[16]。蓄电池 (battery,

BT) 既可以在电价高时提供电能，又能在电价低时消耗电能，进而提高微网运行的稳定性与经济性^[17]。

1.1.1 MT 模型

MT 产生的热功率以及燃气消耗量如下：

$$\begin{cases} Q_{MT}(t) = P_e(t)[1 - \eta_e(t) - \eta_l] / \eta_e(t) \\ V_{MT} = P_e(t)\Delta t / [\eta_e(t)L_{NG}] \end{cases} \quad (1)$$

式中： $Q_{MT}(t)$ 为 t 时刻 MT 产生余热量； $P_e(t)$ 为 t 时刻 MT 输出的电功率； $\eta_e(t)$ 、 η_l 分别为 t 时刻 MT 发电效率、热损失系数； Δt 为设备运行时间； V_{MT} 为 MT 消耗的天然气量； L_{NG} 为天然气低位热值，取值为 9.78 (MW·h)/m³。

当不考虑外界环境变化的影响时，MT 发电效率为

$$\eta_e(t) = a \left[\frac{P_e(t)}{200} \right]^3 - b \left[\frac{P_e(t)}{200} \right]^2 + c \left[\frac{P_e(t)}{200} \right] + d \quad (2)$$

式中 a 、 b 、 c 、 d 为常数。

1.1.2 WHB 模型

WHB 的输出热量与输入热量及 WHB 效率有关，即

$$Q_{WH}(t) = Q_{WH,in}(t) \cdot \eta_{WH} \quad (3)$$

式中： $Q_{WH}(t)$ 为 WHB 在 t 时段内的输出热量； $Q_{WH,in}(t)$ 为输入热量； η_{WH} 为 WHB 的效率。

1.1.3 GB 模型

GB 消耗天然气量与输出热量的数学特性为

$$V_{GB} = \frac{Q_{GB}(t)\Delta t}{\eta_{GB}L_{NG}} \quad (4)$$

式中： V_{GB} 为 GB 消耗天然气量； $Q_{GB}(t)$ 为 GB 的输出热量； η_{GB} 为 GB 的热效率。

1.1.4 AC 模型

AC 通过消耗 WHB 运行收集的余热将热量转换为制冷量。其工作特性为

$$C_q = Q_c \cdot C_{OPq} \quad (5)$$

式中： C_q 、 Q_c 分别为 AC 制冷量、制冷所需热量； C_{OPq} 为 AC 制冷系数。

1.1.5 EC 模型

EC 能够将电量转换为制冷量。其工作特性为

$$C_e = E_c \cdot C_{OPe} \quad (6)$$

式中： C_e 、 E_c 分别为 EC 制冷量、制冷消耗电量； C_{OPe} 为 EC 制冷系数。

1.2 BT模型

BT的数学模型为

$$\begin{aligned} E_{ES}(t+1) &= E_{ES}(t)(1-\sigma_{ES})+ \\ &P_{ES,c}(t)\eta_{ES,c}\Delta T - P_{ES,d}(t)\Delta T/\eta_{ES,d} \end{aligned} \quad (7)$$

式中： $E_{ES}(t+1)$ 、 $E_{ES}(t)$ 分别为 $t+1$ 、 t 时刻的BT的储能量； $\eta_{ES,c}$ 、 $\eta_{ES,d}$ 分别为BT的充电、放电效率； $P_{ES,c}(t)$ 、 $P_{ES,d}(t)$ 分别为 t 时刻BT的充电、放电功率； σ_{ES} 为BT每小时的自放电比例； ΔT 为调度时间间隔，即充放电用时。

2 供热区域热惯性模型

与电负荷必须时刻保持绝对平衡不同，由于采暖建筑物具有热惯性，热能量变化缓慢，在停止提供热能后的一定时间内，仍然能够保持较为适宜的温度^[14]。在CCHP型微网中，可以将供热区域的热惯性参与进微网的经济运行中，从而提高微网运行的经济性。

本文采用文献^[11]提出的描述供热区域热惯性的模型。描述供热区域热惯性的差分方程为

$$\begin{cases} k_3 T_t^{\text{in}} - T_{t-1}^{\text{in}} = k_1 Q_{R,t} + k_2 T_t^{\text{out}} \\ k_1 = \frac{\Delta T}{C' \cdot S} \\ k_2 = \frac{\mu' \cdot \Delta T}{C'} \\ k_3 = 1 + k_2 \end{cases} \quad (8)$$

式中： $Q_{R,t}$ 为供热区域的总散热量，即为热负荷； C' 为单位供热面积下的热容； S 为供热面积； T_t^{in} 为 t 时刻室内温度； T_t^{out} 为 t 时刻室外温度； μ' 为单位供热面积单位温差下室内热量损失； k_1 、 k_2 、 k_3 为相应系数。

基于上述模型，在考虑供热区域热惯性时，将微网供热区域散热量作为控制变量加入到各个微网的调度中，在保证室内温度维持在人体所需舒适温度的条件下，灵活的调整热负荷。

3 CCHP型多微网优化调度模型

3.1 目标函数

本文提出的优化调度模型以多微网系统的经济性最优作为目标函数，不考虑网损和各个微网间的利益博弈，研究的多微网系统的经济优化模型以24h为一个运行周期，以运行周期内总的运行成本最小为目标函数，考虑燃料成本、设备运

行管理成本、微网与配网的购售电成本、微网间的购售电成本，即

$$F = \sum_{i=1}^N F_{i,NG} + F_{i,OM} + F_{i,Grid} + F_{i,MG} \quad (9)$$

式中： F 为运行周期内多微网系统总的运行成本； $F_{i,NG}$ 为第 i 个微网的燃料成本； $F_{i,OM}$ 为第 i 个微网各设备的运行管理成本； $F_{i,Grid}$ 为第 i 个微网向的电网(售)电成本； $F_{i,MG}$ 为 i 个微网与其他相邻微网间的购(售)电成本。

3.1.1 燃料成本

CCHP型微网的燃料成本包括MT的燃料成本和GB的燃料成本，即

$$\begin{cases} F_{i,NG} = F_{i,MT} + F_{i,GB} \\ F_{i,MT} = V_{i,MT} J_{NG} \\ F_{i,GB} = V_{i,GB} J_{NG} \end{cases} \quad (10)$$

式中： $F_{i,MT}$ 为MT的燃料成本； $F_{i,GB}$ 为GB的燃料成本； J_{NG} 为天然气价格。

3.1.2 设备运行管理成本

CCHP型微网的设备运行管理成本包括MT、WHB、GB、AC、EC、BT、WT和PV的运行管理成本，即

$$F_{i,OM}(t) = \sum_{k=1}^m K_{OM,k} P_k(t) \quad (11)$$

式中： $K_{OM,k}$ 为设备 k 的运行管理系数； $P_k(t)$ 为 t 时刻设备 k 的输出功率。

3.1.3 购(售)电成本

1) CCHP型微网向的电网(售)电成本为

$$F_{i,Grid}(t) = J_{Grid}(t) P_{i,Grid}(t) \quad (12)$$

式中： $J_{Grid}(t)$ 为 t 时刻微网向电网的购(售)电电价； $P_{i,Grid}(t)$ 为 t 时刻微网向电网的购(售)电功率。

2) CCHP型微网间的购(售)电成本为

$$F_{i,MG}(t) = J_{MG}(t) \sum P_{ij}(t) \quad (13)$$

式中： $J_{MG}(t)$ 为 t 时刻微网向其他相邻微网的的购(售)电电价； $P_{ij}(t)$ 为 t 时刻微网 i 与微网 j 的交互功率。

3.2 约束条件

3.2.1 等式约束

1) 电、热、冷功率平衡约束：

$$\begin{cases} P_{i,PV}(t) + P_{i,WT}(t) + P_{i,e}(t) + P_{i,Grid}(t) + P_{i,ES,d}(t) + \\ \sum P_{ij}(t) = P_{i,ES,c}(t) + E_{i,c}(t) + P_{i,load}(t) \\ Q_{i,MT}(t) + Q_{i,GB}(t) = Q_{i,c}(t) + Q_{i,heat}(t) \\ C_{i,q}(t) + C_{i,e}(t) = C_{i,cool}(t) \end{cases} \quad (14)$$

式中： $P_{i,PV}(t)$ 、 $P_{i,WT}(t)$ 分别为第 i 个微网 t 时刻风机、光伏出力； $P_{i,load}(t)$ 、 $Q_{i,heat}(t)$ 、 $C_{i,cool}(t)$ 分别为 t 时刻电、热、冷负荷。

2) 供热区域散热量与温度约束：

$$k_3 T_t^{in} - T_{t-1}^{in} = k_1 Q_{R,t} + k_2 T_t^{out} \quad (15)$$

3) 蓄电池运行等式约束：

$$\begin{cases} E_{ES}(T) = E_{ES}(0) \\ P_{ES,c}(t) P_{ES,d}(t) = 0 \end{cases} \quad (16)$$

式中： $E_{ES}(T)$ 、 $E_{ES}(0)$ 分别为调度周期末时刻、初始时刻的蓄电池蓄电量。

3.2.2 不等式约束

1) 各微源 (PV、WT、MT) 及其他设备 (GB、AC、EC) 等的出力约束为

$$P_{k,min} \leq P_k \leq P_{k,max} \quad (17)$$

式中 $P_{k,min}$ 、 $P_{k,max}$ 分别为第 k 个微源的最小和最大出力。

2) 微网与电网之间的传输功率约束为

$$P_{Grid}^{min} \leq |P_{Grid}(t)| \leq P_{Grid}^{max} \quad (18)$$

式中 P_{Grid}^{min} 、 P_{Grid}^{max} 分别为微网和电网传输功率的上下限。

3) 微网与微网之间的传输功率约束：

$$P_{ij,MG}^{min} \leq |P_{ij,MG}(t)| \leq P_{ij,MG}^{max} \quad (19)$$

式中 $P_{ij,MG}^{max}$ 、 $P_{ij,MG}^{min}$ 分别为第 i 个微网和第 j 个微网间传输功率上下限。

4) 蓄电池运行约束。蓄电池充电、放电功率属于耦合变量，蓄电池的充电、放电不能同时进行，因此要保证二者至少有一个值为 0。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{ES,c}(t) \leq C_{ES} \gamma_{ES,c} \\ 0 \leq P_{ES,d}(t) \leq C_{ES} \gamma_{ES,d} \\ E_{ES,min} \leq E_{ES}(t) \leq E_{ES,max} \end{cases} \quad (20)$$

式中： $\gamma_{ES,c}$ 、 $\gamma_{ES,d}$ 分别为蓄电池最大充电倍率、最大放电倍率； C_{ES} 为蓄电池容量； $E_{ES,min}$ 、 $E_{ES,max}$ 分别为蓄电池的最小、最大蓄电量。

5) 室内温度约束。室内温度应保持在人体适宜的温度以内。

$$T_{in}^{min} \leq T_{in} \leq T_{in}^{max} \quad (21)$$

式中 T_{in}^{max} 、 T_{in}^{min} 分别为供热区域温度上下限。

针对以上非线性模型，本文将其转化为混合整数线性模型后，在 MATLAB 中调用求解混合整数线性规划问题的 Cplex 软件进行求解。

4 算例分析

4.1 基本数据与多微网系统结构

CCHP 型多微网系统的结构如图 2 所示。其中，MG1、MG2、MG3 均为 CCHP 型微网，同属于一个配电网区域，MG1、MG2 之间，MG2、MG3 之间均通过联络线进行连接，可以进行电功率的交互。各主要设备的参数设置见表 1。

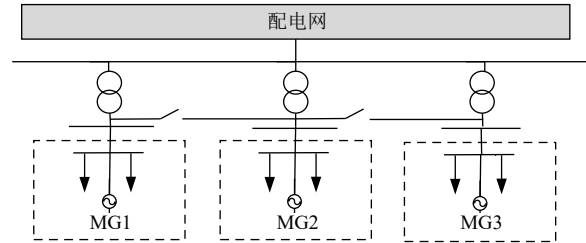


图 2 CCHP 型多微网系统结构图

Fig. 2 Structure diagram CCHP type of multi-microgrid system

表 1 微网主要设备参数

Table 1 Main device parameters of the microgrid

参数	数值
MT的热损失系数	0.03
WHB的效率	0.8
GB的热效率	0.89
AC的制冷系数	1.35
EC的制冷系数	3
BT最大容量/(kW·h)	100
BT最小容量/(kW·h)	20
BT充、放电效率	0.97、0.98
BT自放电比例	0.01
天然气价格/(元·m ⁻³)	2

采用分时电价，且为防止倒卖情况出现，微网售电给相邻微网和配网的电价相同，并且小于微网从配网购电电价，等于微网从相邻微网购电电价。具体数据如表 2 所示。

本文主要研究供热区域热惯性对 CCHP 型多微网系统经济性的影响，因此，以冬季典型日为

表2 CCHP型多微网系统交易电价
Table 2 Transaction price of CCHP type of multi-microgrid system

时段	微网向电网购电/ (元·(kW·h) ⁻¹)	微网向电网和 其他微网售电/ (元·(kW·h) ⁻¹)
峰 08:00:00~11:00:00 18:00:00~23:00:00	0.85	0.64
平 07:00:00~08:00:00 11:00:00~18:00:00	0.53	0.35
谷 23:00:00~07:00:00	0.16	0.12

例,分析考虑供热区域热惯性时CCHP型多微网系统内各设备出力情况。

4.2 算例结果分析

4.2.1 不考虑供热区域热惯性及微网间功率交互

在不考虑建筑物储热特性及微网间功率交互的情况下,图3为多微网系统各微网电功率平衡及各微源出力情况。图4为各微网的热功率平衡及微源出力情况。对于微网与电网交互功率,假设微网向电网购电时功率为正,向电网售电时功率为负。

MG1中WT和PV出力小于电负荷需求,为少电微电网,需要MT工作或者向电网购电。在00:00:00~06:00:00时段,电负荷较低,同时电价较低,此时主要向电网购电以满足电负荷需求。因为MT既能提供电功率,产生的余热又能供给WHB从而提供热功率,因此MT也会提供少量的电功率。但是热负荷主要由GB提供。在10:00:00~15:00:00时段,电负荷较高,同时电价较高,因此MT提供的电功率增加,MG1缺少的电功率主要由MT提供。由于MT电功率增加,提供的余热也增加,因此热功率主要由WHB提供,不足的热负荷由GB提供。

MG2为多电微电网,当有电量富余时,会向电网售电以寻求更好的经济性。在00:00:00~06:00:00时段,电负荷较低,WT出力较高,向电网售电功率较少,热功率主要由GB提供,BT充电,储存一定的能量。在10:00:00~15:00:00时段,电负荷较高,同时电价较高,因此MT工作提供的电功率和余热都较高,因此热功率主要由WHB提供,不足的热负荷由GB提供,MG2向电网售电功率较大。

MG3与MG1情形相似。但是在00:00:00~

06:00:00时段,热负荷需求比其他2个微网高,因此MT提供的电功率和余热较其他2个微网高,多余的电能售电给电网。

4.2.2 考虑供热区域热惯性及微网间功率交互

在计及供热区域储热,并考虑微网间功率交互的情形下,各微网电功率平衡及各微源出力情况如图5所示。假设微网向电网购电时交互功率为正,向电网售电时为负;微网向相邻微网购电

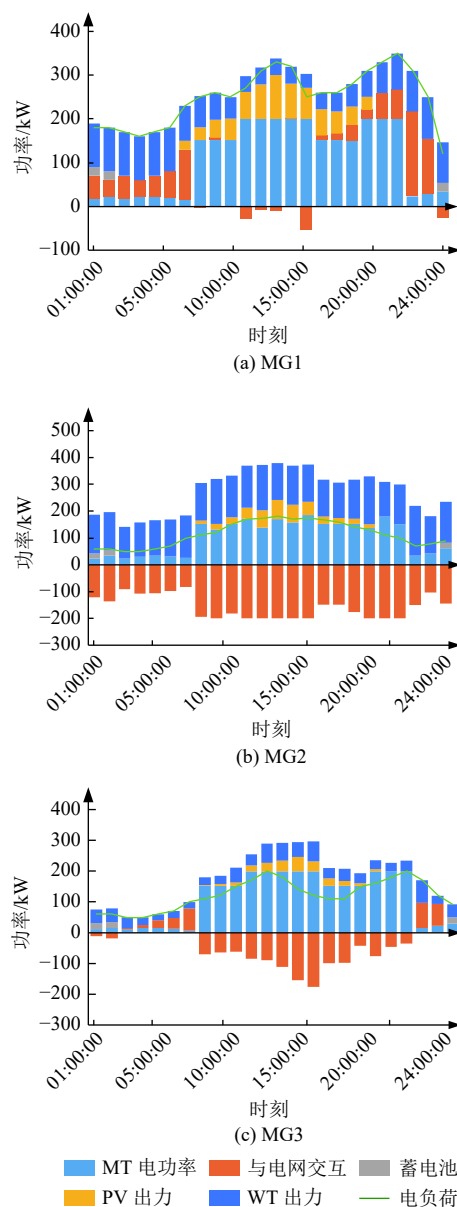


图3 不考虑建筑物储热特性及微网间功率交互时各微网电功率平衡及各微源出力

Fig. 3 The electric power balance and the output of microsources of all microgrids without considering heat storage characteristics of buildings and power interaction among microgrids

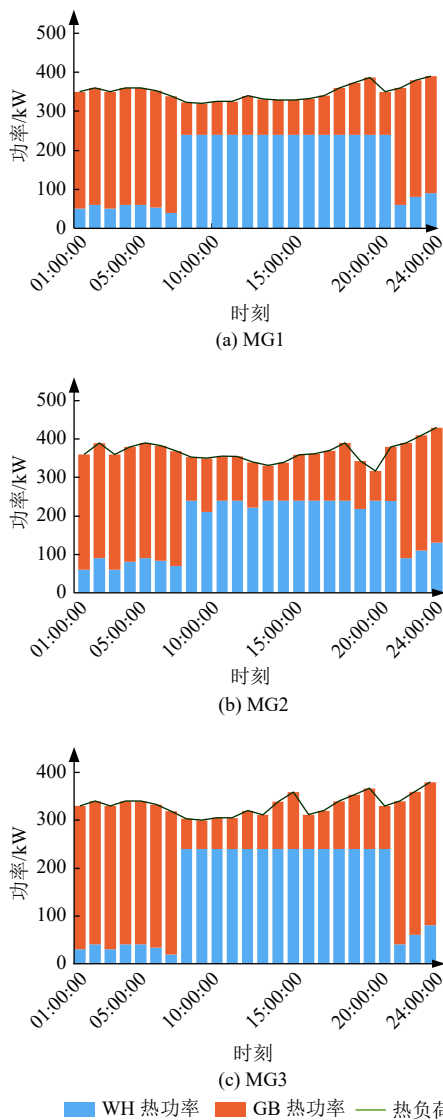


图 4 不考虑建筑物储热特性及微网间功率交互时各微网的热功率平衡及微源出力情况

Fig. 4 The thermal power balance and the output of microsources of all microgrids without considering heat storage characteristics of buildings and power interaction among microgrids

时交互功率为正，售电为负。

MG1 为少电微电网，需要 MT、BT 工作或者向配网和相邻微网购电。在 00:00:00~06:00:00 时段，电负荷较低，同时电价较低，但是由于 MG2 为多电微电网，为了多微网系统整体的利益，MG1 缺少的电功率主要由 MG2 提供，MT 工作提供少量电功率。在 10:00:00~15:00:00 时段，电负荷较高，同时电价较高，MG1 缺少的电功率主要由 MT 和相邻微网提供，多余的电功率售电给微网。

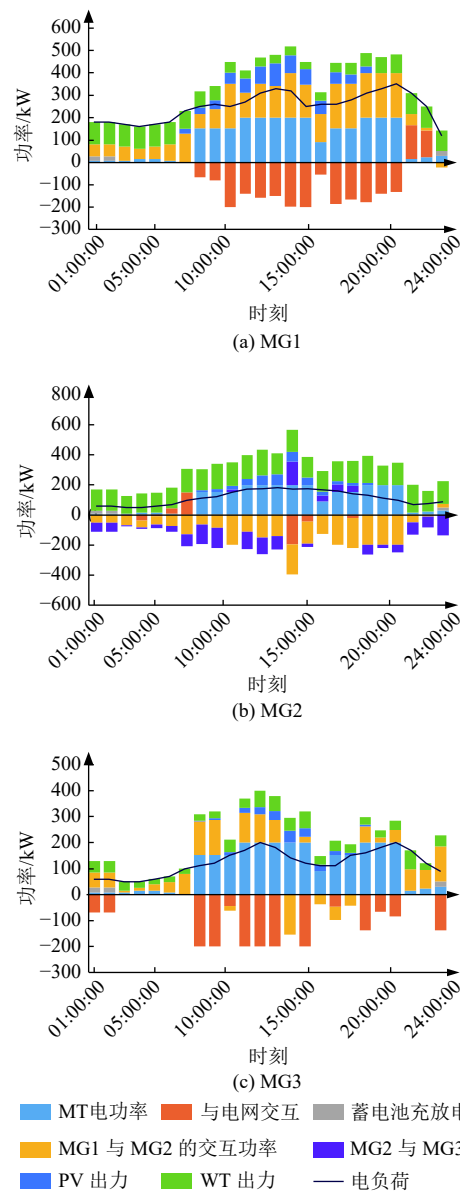


图 5 考虑供热区域热惯性及微网间功率交互时各微网电功率平衡及各微源出力

Fig. 5 The electric power balance of all microgrids and the output of all microsources with the heat storage characteristics of buildings and power interaction among microgrids considered

MG2 为多电微电网，为了多微网系统整体的经济性，MG2 多余的电功率优先提供给相邻的少电微电网，剩余的提供给配网。在 00:00:00~06:00:00 时段，MG2 多余的电功率主要提供给相邻微网，由于热负荷需求较高，MT 工作提供少量电功率，产生的余热供给 WHB 从而提供热功率。BT 充电，储存一定的能量。在 10:00:00~15:00:00 时段，电负荷较高，电价较高，MT 工

作提供的电功率和热功率较高,此时MG2与配网几乎不存在电力交易,多余的电量售电给相邻微网。因为MG1缺电量大于MG3,因此MG2多余电量主要供给MG1。

对于MG3,WT和PV等可再生能源出力小于电负荷需求,与MG1情形相似,不再赘述。

图6为考虑供热区域热惯性时各微网供热区域散热量及各微源出力情况。在多微网的调度中,增加了供热区域散热量作为控制变量,可灵活的调整热负荷,进而提高多微网系统的经济性。

在00:00:00~05:00:00时段,室外温度较低,

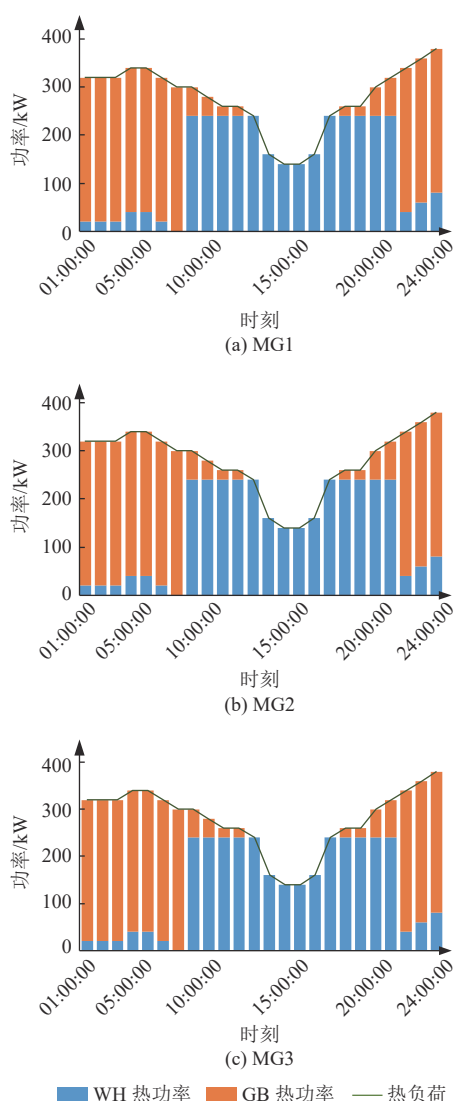


图6 考虑供热区域热惯性及微网间功率交互时各微网供热区域散热量以及各微源出力

Fig. 6 The heat dissipation quantity of heating areas in all microgrids and the output of all microsources with the heat storage characteristics of buildings and power interaction among microgrids considered

为保证室内温度满足人体舒适度的要求,供热区域散热量较高,所需热负荷主要由GB提供。MT工作提供一定的电功率,产生的余热提供给WHB,但此时产生的电功率较少,提供给WHB的余热也较少。在05:00:00~15:00:00时段,室外温度逐渐升高,由于供热区域热惯性的影响,减少一定程度的供热并不会使室内温度立即改变,还可以维持人体所需温度,因此供热区域散热量有所下降,并在15:00:00时达到最低。在15:00:00~24:00:00时段,室外温度降低,供热区域散热量升高,所需热负荷主要由GB提供。优化后室内温度始终维持在18℃以上,能够满足人体所需。

4.3 结果分析

由以上2种运行方式下多微网系统内微源出力情况可知,在考虑供热区域热惯性及微网间功率交互的情况下,各微网中微源出力情况有所不同,对多微网经济性也有一定的影响。表3列出了是否考虑供热区域热惯性及微网间功率交互时多微网系统的运行成本。

表3 2种不同运行方式下CCHP型多微网系统运行成本
Table 3 Operating cost of CCHP type of multi-microgrid system under two different running modes

运行方式	运行成本/元
不考虑供热区域热惯性及微网间功率交互	7581.60
考虑供热区域热惯性及微网间功率交互	6134.76

由表3可知,在计及供热区域热惯性及微网间功率交互的模型下,多微网系统的运行成本有所减少,验证了所提模型的经济性。

5 结论

1) 在对多微网系统进行经济调度时,在考虑多微网系统内的各微网间存在功率交互的情况下,微网内各微源运行方式有较大不同。为了提高多微网系统的经济性,多电微电网优先向相邻少电微电网售电,减少了与电网进行功率交互时产生的成本。

2) 在考虑供热区域热惯性的情况下,微网内热负荷平衡与不考虑供热区域热惯性有较大不同。在本文模型下,增加了微网内供热区域散热量作为控制变量,将传统的热负荷平衡变为了保证室内温度在人体所接受的范围内,进而提高了

多微网系统的经济性。

本文所考虑的经济调度模型, 没有考虑微网中 WT 和 PV 等可再生能源的随机性, 而是将其作为固定值。同时, 电负荷需求预测也不是完全确定的, 具有一定的随机性, 而冷、热负荷需求更是具有一定的随机性和模糊性, 这些不确定性都对多微网系统的经济调度有一定的影响, 需要进一步研究。

参考文献

- [1] 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]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 29(5): 14-20 (in Chinese).
- [2] CHEN Chen, WANG Jianhui, QIU Feng, *et al.* Resilient distribution system by microgrids formation after natural disasters [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(2): 958-966.
- [3] 靳小龙, 穆云飞, 贾宏杰, 等. 融合需求侧虚拟储能系统的冷热电联供楼宇微网优化调度方法 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 581-591.
JIN Xiaolong, MU Yunfei, JIA Hongjie, *et al.* Optimal scheduling method for a combined cooling, heating and power building microgrid considering virtual storage system at demand side [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 581-591 (in Chinese).
- [4] WANG Jiangjiang, ZHANG Chunfa, JING Youyin. Multi-criteria analysis of combined cooling, heating and power systems in different climate zones in China [J]. Applied Energy, 2010, 87(4): 1247-1259.
- [5] 王成山, 洪博文, 郭力, 等. 冷热电联供微网优化调度通用建模方法 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(31): 26-33.
WANG Chengshan, HONG Bowen, GUO Li, *et al.* A general modeling method for optimal dispatch of combined cooling, heating and power microgrid [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(31): 26-33 (in Chinese).
- [6] 王羽. 基于热力系统储热控制的大规模风电消纳研究 [J]. 电力工程技术, 2018, 37(6): 139-144, 155.
WANG Yu. Large scale wind power consumption based on heat storage control of thermal system [J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(6): 139-144, 155 (in Chinese).
- [7] LI Z, WU W, SHAHIDEHPOUR M, *et al.* Combined heat and power dispatch considering pipeline energy storage of district heating network [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(1): 12-22.
- [8] 朱嘉远, 刘洋, 许立雄, 等. 考虑风电消纳的热电联供型微网日前鲁棒经济调度 [J]. 电力系统自动化, 2019, 43(4): 40-51.
ZHU Jiayuan, LIU Yang, XU Lixiong, *et al.* Robust day-ahead economic dispatch of microgrid with combined heat and power system considering windpower accommodation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(4): 40-51 (in Chinese).
- [9] 王守相, 吴志佳, 庄剑. 考虑微网间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.
WANG Shouxiang, WU Zhijia, ZHUANG Jian, *et al.* 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 (in Chinese).
- [10] 吴福保, 刘晓峰, 孙谊娟, 等. 基于冷热电联供的多园区博弈优化策略 [J]. 电力系统自动化, 2018, 42(13): 68-75.
WU Fubao, LIU Xiaofeng, SUN Yiqian, *et al.* Game optimization strategy for multiple parks based on combined cooling heating and power [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(13): 68-75 (in Chinese).
- [11] 仪忠凯, 李志民. 计及热网储热和供热区域热惯性的热电联合调度策略 [J]. 电网技术, 2018, 42(5): 1378-1384.
YI Zhongkai, LI Zhimin. Combined heat and power dispatching strategy considering heat storage characteristics of heating network and thermal inertia in heating area [J]. Power System Technology, 2018, 42(5): 1378-1384 (in Chinese).
- [12] 李平, 王海霞, 王漪, 等. 利用建筑物与热网热动态特性提高热电联产机组调峰能力 [J]. 电力系统自动化, 2017, 41(15): 26-33.
LI Ping, WANG Haixia, WANG Yi, *et al.* Improve-

- ment of peak load regulation capacity of combined heat and power units considering dynamic thermal performance of buildings and district heating pipelines network [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(15): 26–33 (in Chinese).
- [13] 毕庆生, 李邓超, 朱侃, 等. 基于供热系统热惯性供热机组短时深度参与电网调峰及风电消纳研究 [J]. *热能动力工程*, 2018, 33(9): 72–78.
BI Qingsheng, LI Dengchao, ZHU Kan, *et al.* In-depth grid power peak regulation with heating unit in wind power consumption based on thermal inertia characteristics [J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2018, 33(9): 72–78 (in Chinese).
- [14] 邹云阳, 杨莉, 冯丽, 等. 考虑热负荷二维可控性的微网热电协调调度 [J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(6): 13–19.
ZOU Yunyang, YANG Li, FENG Li, *et al.* Coordinated heat and power dispatch of microgrid considering two-dimensional controllability of heat loads [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(6): 13–19 (in Chinese).
- [15] 张华一, 文福拴, 张璨, 等. 计及舒适度的家庭能源中心运行优化模型 [J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(20): 32–39.
ZHANG Huayi, WEN Fushuan, ZHANG Can, *et al.* Operation optimization model of home energy hubs considering comfort level of customers [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(20): 32–39 (in Chinese).
- [16] 裴玮, 邓卫, 沈子奇, 等. 可再生能源与热电联供混合微网能量协调优化 [J]. *电力系统自动化*, 2014, 38(16): 9–15.
PEI Wei, DENG Wei, SHEN Ziqi, *et al.* Energy coordination and optimization of hybrid microgrid based on renewable energy and CHP supply [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2014, 38(16): 9–15 (in Chinese).
- [17] 徐青山, 李淋, 蔡霖, 等. 考虑电能交互的冷热电多微网系统日前优化经济调度 [J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(21): 36–46.
XU Qingshan, LI Lin, CAI Jilin, *et al.* Day-ahead optimized economic dispatch of CCHP Multi-microgrid system considering power interaction among microgrids [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(21): 36–46 (in Chinese).

收稿日期: 2019-12-18

作者简介:

朱晓荣 (1972), 女, 博士, 副教授, 研究方向为新能源发电与并网技术, 电力系统分析、运行与控制, E-mail: xiaorongzhu@ncepu.edu.cn;

谢婉莹 (1995), 女, 硕士研究生, 研究方向为新能源发电, E-mail: xwy18ncepu@163.com。