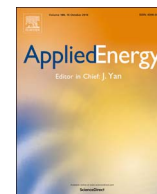




内容列表可在科学指导

应用能源

期刊主页: www.elsevier.com/locate/apenergy

并网孤岛多能源微网能量优化协调调度



李正茂, 徐彦*

南洋理工大学电气与电子工程学院, 50 Nanyang Avenue, 639798, Singapore

文章信息

关键词:
多能源微电网 联合供电热电厂
全系统最优协调调度混合整数线性规划

净运营成本

抽象的

本文针对并网模式和孤岛模式下的多能源微电网提出了全系统优化协调能量调度方法。所研究的微电网由多个能量载体组成, 涵盖可控发电机组(燃料电池、电锅炉、冷热电联产机组和电冷水机组)、不可控发电机组(风力涡轮机和光伏电池)和储能装置(电池储能、储热罐和储冰罐)。所提出的能源调度方法旨在最大限度地降低微电网净运营成本, 并提高日前能源市场中供电、供热和制冷的调度灵活性。对于并网微电网和孤岛微电网, 其调度模型被表述为混合整数线性规划问题, 商业求解器可以有效地求解。进行综合案例研究以评估所提出方法的有效性, 然后与 tr 进行比较

仿真结果

附加条件 电力和热/冷能源分开供电的调度方式。at所提出的方法可以实现更高的运行效率。策略

一、简介

多能源系统旨在整合电、热、冷等多种能源载体, 实现更高的能源利用率[1]。在实践中, 多种能源可以通过高效的热电联产或三联产机组同时产生, 例如冷热电联产(CCHP)电厂[2,3]。一旦部署在配电网中, CCHP 电站、储能和基于可再生能源的分布式发电(DG)单元(如太阳能和风能)可以形成多能源微电网[2–4]。因此, 一个关键的研究问题是优化调度多能源相关机组以获得最大运行效率。

在关于多能源整合的文献中, 大多数研究工作都集中在单个 CCHP 工厂层面的运行, 这通常分为两种策略, IE, 跟随功率负载(FPL)和跟随热负载(FHL)策略[5–10]。方等。

[5]研究FPL/FHL切换策略, 提升能耗、运营成本和CO₂综合性能2个

CCHP 电厂的排放量。同样, 为了尽量减少 CCHP 工厂产生的多余电力或热能, Smith 等人。[6]将 FPL 和 FHL 与遵循 FPL 或 FHL 策略的混合策略进行了比较。在[7]和[8], 针对不同的运行条件和相应的评估标准设计了 CCHP 工厂的运行策略。Kang 等人使用地源热泵。[9]

配置了 CCHP-有机朗肯循环系统, 并分析了其在节约成本、减少气体排放和提高系统效率方面的性能。在[10], 引入矩阵建模方法来优化 CCHP 电厂的输入和输出功率及其容量。尽管已经对单个 CCHP 工厂的运行进行了许多研究工作, 但它与其他 DG 协调以在系统级提供多种能源(例如, 微电网)没有得到系统的研究。

在微电网层面, 目前的研究工作大多只关注单能源微电网的运行[11–13], 不整合多种能量。此外, 冷热电厂与其他分布式电源协调提供多种能源的研究工作主要针对并网微电网[14,15]。马等。

[16]调查了 CCHP 工厂和光伏消费者的协调, 以最大限度地降低并网微电网的运营成本。在[17], 采用鲁棒优化方法来协调 CCHP 工厂与 DG 的不确定输出以处理间歇性。王等。[18]提出了一种集成的微电网多目标调度方法, 以最小化其净运营成本和气体排放。在[19], 提出了一种考虑可再生能源不确定性的具有电力和热力需求的微电网运行和设计优化方法。在我们最近的工作中

[20], 考虑电能机会收益的并网多能微电网动态调度方法

*通讯作者。

电子邮件地址: XUYAN@ntu.edu.sg (Y.徐)。<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.197>

2017 年 5 月 31 日收到; 2017 年 8 月 12 日以修订形式收到; 2017 年 8 月 24 日接受 2017 年 8 月 31 日在线发售

0306-2619/© 2017 Elsevier Ltd. 版权所有。保留所有权利。

命名法		钾 _{FC} 钾 _{ES} FC/ES的单位维护成本
集合和索引		C _{煤石, j} C _{标准, j} 机组启动/停机成本j
吨	一组调度时间, 从1运行到N 一组CG, 从1运行到N	P _{微P_{微小}} 微电网/卖力
j	行到N	C _{微C_{微小}} 并网微网供热供冷微网收益单位购电价/售电价
k	一组块, 从1到 N大	C _{微C_{微小}} 微电网的热/冷需求 微电网的电力需求
米	单位集合, 包括 WT、PV、MT、FC、EB、EC 和 ES, 运行 1 到 N	CH/CC 向客户供热/供冷的单价
变量和参数		P _{微P_{微小}} BSDBS充放电功率
吨	MT/FC 的效率	P _{微P_{微小}} IST 的吸收/释放能力
P _{微P_{微小}} / P _{微P_{微小}}	MT/FC 的功率输出	P _{微P_{微小}} / P _{微P_{微小}} HST 的吸收/释放能力
P _{微P_{微小}} / P _{微P_{微小}}	MT 的热/冷输出	P _{微P_{微小}} 微电网的热/冷需求 微电网的电力需求
η _H /η _C	热回收机组/吸收式制冷机的热回收率	P _{微P_{微小}} 单元的二进制状态j, $\dot{u}_{微P微小$ =1个为开, 0为关
警察 _H /警察 _C	热回收装置性能系数/ab- 吸附式制冷机	P _{微P_{微小}} 可控单元功率j
η _大	存储在ES中的MT能量	P _{微P_{微小}} 单元的最小/最大功率j
Z _{微P_{微小}}	的热损失率	R _{微P_{微小}} 单元的最大上升/下降速率j 微电网最大买/卖力
P _{微P_{微小}} / P _{微P_{微小}}	静电放电ES充放电功率	P _{微P_{微小}} 二二进制状态变量 $\gamma_{微P微小$ $Z=1/\gamma_{微P微小$ =1、微电网采购 追逐/出售权力
TES	ES的衰减率	P _{微P_{微小}} / P _{微P_{微小}} ES最大充放电功率
η _{ESC} / η _{静电放电}	ES的充放电率	Y _{微P_{微小}} 二二进制状态变量 γ_{ESC =1/ $\gamma_{静电放电}$ =1、ES正在充电/放电
P _{微P_{微小}} / P _{微P_{微小}}	EB/EC 的加热/冷却输出 EB/EC 的 电源输入	ξ _{分钟} / ξ _{最大} ES 容量的最小/最大充电状态 帽ES
警察EB/警察 _{微P_{微小}}	EB/EC 的热/冷却性能系数 并网/孤岛微电网的净运行成本	CTE/CIE/C _德 制热/制冷/电力过剩的单位成本 制热/制冷/电 力短缺的单位成本
FC/F _小		CTS/C _是 /C _{DS} 制热/制冷/电力不足 制热/制冷/ 电力过剩
C _{CP}	资金成本	C _{微P_{微小}} / C _{微P_{微小}} 孤岛微电网供热供冷收益
C _{CP, 米/n}	单位米的初始投资成本/寿命	Y _{微P_{微小}} / Y _{微P_{微小}} 加热/冷却/电力短缺的元指标, 1 意味着能源短缺
升	年利率	Y _{微P_{微小}} / Y _{微P_{微小}} 热/冷/电盈余的元指标, 1 表示块中有能量剩余斜率/线性函数的截距k 的 起点k第块
C _{微P_{微小}} / C _{微P_{微小}}	燃料/维护成本	P _k
C _{微P_{微小}} / C _{微P_{微小}}	电力交换/能量偏差成本 启动/关闭成本	P _{1个} / P _{N+1个} N 的最小/最大功率输出大号积木
C _{微P_{微小}} / C _{微P_{微小}}	并网供热/制冷的收入/是- 登陆微电网	Δt 单元调度间隔, 1 h 块的二进制状态 k
C _{微P_{微小}} / C _{微P_{微小}}	FC / MT 的燃料成本	Z _k 吨 MT 或 FC 的一般功率输出
CG/LNG	WT/PV天然气发电量单价/低热值	P _{微P_{微小}}
P _{微P_{微小}} / P _{微P_{微小}}	WT/PV 的单位维护成本	C _{微P_{微小}} / C _{微P_{微小}} 仅电力的 FC/MT 的单位发电成本 一代
钾 _{微P_{微小}} / 钾 _{微P_{微小}}	EC/EB/MT 的单位维护成本	C _{微P_{微小}} / C _{微P_{微小}} WMT夏季/冬季单位发电成本

研究了存储以提高系统运行效率。

文献中对并网微电网的运行做了大量工作, 但很少有研究工作考虑孤岛运行模式的多能源调度。此外, 现有的孤岛微电网调度相关工作仍主要集中在其单一能源调度, IE, 孤岛微电网的电力调度[11,12,21–23]. 在实践中, 孤岛微电网的多能源管理非常重要, 特别是对于一些偏远地区, 如新加坡的 Semakau 岛微电网[4]. 没有电网作为后备, 孤岛微电网的运行目标与并网微电网有很大不同。研究工作在[24]是为数不多的提出多目标优化方法以最小化燃料成本和气体排放的研究之一。

可以看出, 对于单个热电联产电厂的运行, 上述工作均采用FPL/FHL或两种策略的混合; 而在系统层面, CCHP 电站在并网微电网中通常在 FHL 策略下运行, 因为功率不平衡可以由电网补偿, 对于孤岛微电网, CCHP 电站的 FPL 策略是首选, 因为电力系统需要一个始终保持精确的功率平衡, 但短时间内热/冷能量的不平衡是可以接受的[14]. 然而, 在上述情况下

冷热电厂的策略、电力和热/冷输出高度耦合且相互依赖, 这使得微电网运行不够灵活, 冷热电厂在系统成本节约方面的潜力没有得到发挥。

此外, 鉴于调度问题的非线性性质, 解决方法大多是进化算法, 如

遗传的 算法 或者 粒子 一群 优化 [12,14,16–18,21,24]. 然而, 这些算法对计算要求很高, 尤其是当问题维度很高时。此外, 他们经常遇到解决方案不一致和难以严格收敛等问题。由于电力系统新的竞争环境需要更准确、更高效的工具来支持资源调度决策, 因此需要更高效的解决方案流程和质量[25].

本文研究了一个综合多能源微电网, 该微电网由 CCHP 电站、电池存储 (BS)、电冷水机组 (EC)、储热罐 (HST)、风力涡轮机 (WT)、光伏电池 (PV)、储热罐 (IST)、电锅炉 (EB) 和燃料电池 (FC)。为实现更高的调度灵活性和运行效率, 提出了并网和孤岛模式下微电网的全系统优化协调调度模型。在模型中, HST 和 IST 用于解耦不灵活的

CCHP 电厂的运营策略，然后 CCHP 电厂的电力和热/冷输出可以更灵活地参与日前能源市场。换算单位，IE，EB 和 EC 将能量传递给热/冷，可以进一步增强不同能量的协调。目标是在受系统运行限制的情况下，在两种模式下最小化微电网的净运行成本。此外，非线性调度模型被线性化为混合整数线性规划（MILP）模型，以提高求解效率和质量。最后，使用冬季和夏季的典型场景来充分测试所提出的调度方法的有效性。

本文的研究目的可以概括为：首先，通过协调不同分布式电源、储能装置以及需求响应，提高系统运行效率和调度灵活性；二是充分发挥定价机制作用，在系统层面加强多能互动。最后，通过详细实用的建模反映实际运行情况，通过线性化提高求解效率和质量。与已有的多能源微电网调度研究工作相比，本文的主要贡献可以概括为：

- 1. 提出了并网模式和孤岛模式的多能源微电网日前协调能源调度方法。该方法考虑了一整套用于现实多能源微电网运行的实用组件。
- 2. CCHP 电厂传统的不灵活运行策略（FPL/FHL）被解耦。没有耦合限制，CCHP 工厂可以更灵活地加入整个能源市场。然后在微电网层面进一步协调 CCHP 电厂与其他 DG 以及多种能源的运行。
- 3.非线性调度问题被线性化为MILP模型，可以被商业求解器有效地求解。与进化算法相比，可以保证在线应用的求解质量和速度。

本文的其余部分安排如下。系统描述和建模在章节中给出2个。在节3个，介绍了两种模式下多能源微电网的协调调度模型。案例研究在第节中介绍和分析4个。然后

本文以部分结论结束5个。

2. 多能源微电网建模

在这项研究中，多能源微电网由风力涡轮机、光伏电池、电池储能装置、CCHP 电厂、燃料电池、电锅炉、储热罐、电制冷机和储冰罐组成，如图所示在图。1。此外，在电网和微电网之间有一个开关：当开关接通时，微电网运行在并网模式；当开关接通时，微电网运行在并网模式。关闭时，微电网以孤岛模式运行 [21–23]。

组件建模主要关注它们的外部特性，IE，他们的开/关状态以及发电输出

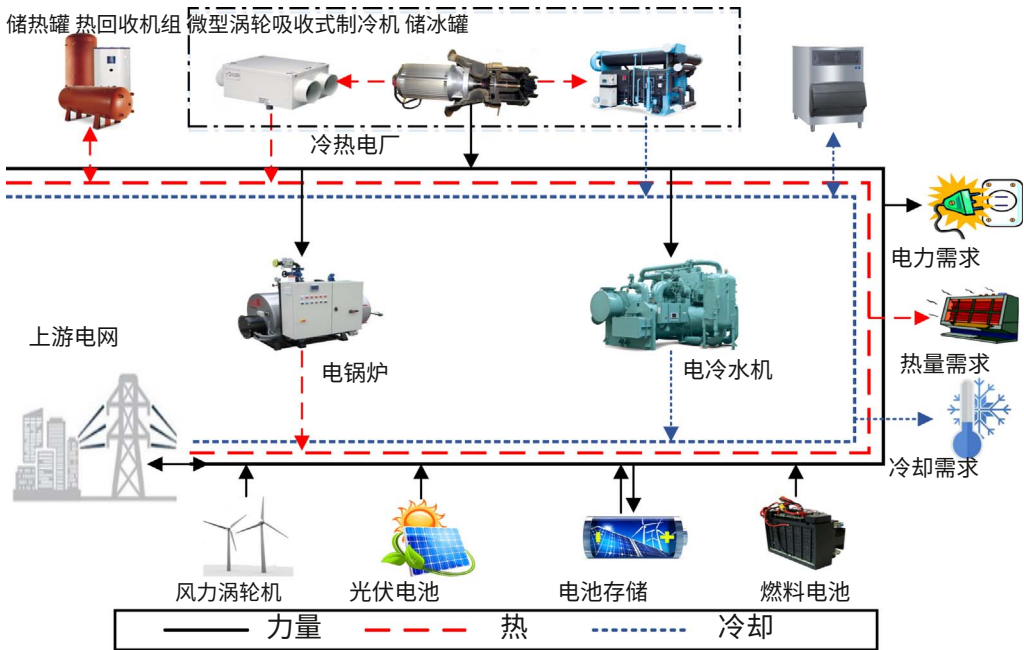
[15]。详细模型在以下小节中给出。应该指出的是，每个组件的内部特性既不是本文研究的能源调度问题的重点，也不是必需的。因此，它们不会反映在建模部分。此外，对于微型汽轮机（或热电联产电厂）而言，电锅炉、燃料电池和电冷水机组具有体积小、控制灵活、启停速度快等特点，因此可作为可控发电（CG）装置；而发电量不确定且波动较大的风力发电和光伏发电属于不可控发电机组。

2.1. 热电厂

通常，CCHP 工厂由三部分组成：微型涡轮机（MT）、吸收式制冷机和热回收装置。MT消耗天然气发电，同时余热可通过热回收装置/吸收式制冷机利用产生热能/冷能[5,19]。从而大大提高能源利用效率。本文采用Capstone的微型涡轮机C65[26]，具有较高的国际市场占有率，作为冷热电厂建模的参考。功率输出与电效率之间的关系可以建模为

$$\eta_{电,冷} = 2.767 \times 10^{-7} (P_{电,冷})^{3.00} + 7.337 \times 10^{-5} (P_{电,冷})^{2.00} + 6.385 \times 10^{-3} P_{电,冷} + 0.107$$
 (1)

在哪里吨是当前的调度时间； $P_{电,冷}$ 和 $P_{热,冷}$ 表示电



图。1。多能源微电网的结构。

MT 的效率和功率输出分别。
相应的热量和冷却输出为

$$\dot{Q}_{MT} = \eta_H \text{警察}_H P_{\text{米}} \quad \text{吨} \quad (1 - \eta_{\text{公吨}} - \eta_{\text{大号}}) / \eta_{\text{公吨}} \quad (2)$$

$$\dot{Q}_{\text{米}} = \eta_C \text{警察}_C P_{\text{公吨}} (1 - \eta_{\text{公吨}} - \eta_{\text{大号}}) / \eta_{\text{公吨}} \quad (3)$$

其中 η_H , η_C 和 警察_H , 警察_C 表示热回收率和系数
热回收装置和吸收式制冷机的性能; $\eta_{\text{大号}}$ 是热量
损失率; \dot{Q}_{MT} 和 $\dot{Q}_{\text{米}}$ 分别是热量和冷却输出。

热能和冷能都来自废热, 因此它们具有相似的特性。如果余热未回收,
MT 仅用于发电[12,27,28]。

2.2. 储能

储能 (ES) 可以将能源的产生与消耗脱钩, 并减少能源供需之间的不平
衡[29]。在本文中, 储能主要包括三种类型: 电储能、储热和储冷。

- (1) 电能存储: 目前, 包括超级电容器等功率型和电化学电池等能量型在内的
电能存储得到了深入研究。功率型储能多用于缓解可再生能源发电机组
出力波动对电力系统运行的影响, 而能量型储能主要用于能源管理领域
的调峰

[30]. 对于本文的日前能源调度方案, 电池存储, 应用了一种能量型存储
[20,31]。

- (2) 热/冷存储: 在 FHL/FPL 策略下, CCHP 电厂的功率或热/冷输出相互限
制, 这降低了 CCHP 电厂在整体多能源调度中的运行灵活性。为了解耦不
灵活的运行策略, 在微电网中部署了运行原理类似于电能存储的储热罐
和储冰罐。如今, HST 和 IST 已经在丹麦等欧洲国家得到广泛应用

[32], 在其他多能源供需地区也有很大的应用前景。

由于 IST/HST 和 BS 的模型相似, 在本研究中, 使用 ES 作为广义缩写来
证明它们之间的能量和功率之间的关系如下。实际上, ES 应该是 BS、HST
或 IST。

$$\dot{Q}_{ES} = (1 - T_{\text{小}}) \dot{Q}_{ES} + (P_{\text{ESC}} \eta_{\text{ESC}} + P_{\text{静放电}} / \eta_{\text{静放电}}) \Delta T_{\text{ES}} \quad (4)$$

其中 η_{ESC} 和 $\eta_{\text{静放电}}$ 是充电和放电效率; P_{ESC}
 $P_{\text{静放电}}$ 表示 ES 的充放电功率; T_{ES} 是衰减率;

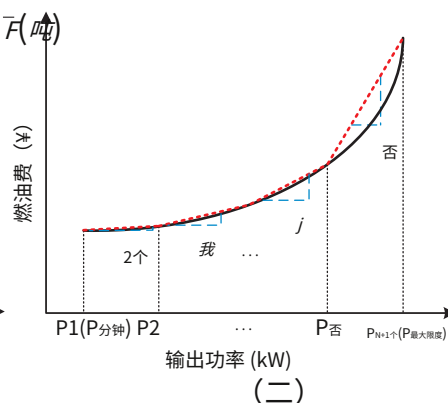
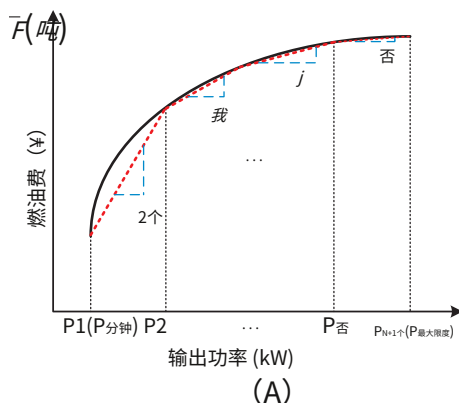


图2 . 非线性项的分段线性化。(A)
CCHP 电厂或 FC 的燃料成本, (b) CCHP 电厂的热量或冷却输出。

\dot{Q}_{ES} 表示时刻储能中的能量吨; Δt 是单位派遣
间隔。

2.3. 电锅炉和电冷水机

为了增强不同能源系统的相互作用, 电锅炉 (EB) 和电冷水机 (EC) 用于将
电能转换为热/冷。需要注意的是, 不同类型的 EB/EC 具有以下相似的运营
模式, 因此在本文中, EB/EC 不限于特定类型[17]。

$$\dot{Q}_{EB} = P_{EB} \text{警察}_{EB} \quad (5)$$

$$\dot{Q}_{EC} = P_{EC} \text{警察}_{EC} \quad (6)$$

在哪里 P_{EB} 和 P_{EC} 表示 EB 和 EC 的功率输入; 警察_{EB} , 警察_{EC}
和 \dot{Q}_{EB} , \dot{Q}_{EC} 是热和冷却性能系数和
EB 和 EC 的输出。

2.4. 燃料电池

燃料电池 (FC) 可以将存储在 O 中的能量转化为 \dot{Q}_{FC} 和 \dot{Q}_{FC} 通过电化学过程转
化为无污染的电能[33]。由于效率高, FC 的余热没有回收 [12,20,34]。在这
项研究中, 质子交换膜燃料电池 IFC PC-29, 以天然气为动力[35], 被选为参
考, 其电效率和功率输出之间的关系可以由下式给出

$$\eta_{FC} = -0.0023 P_{FC} + 0.674 \quad (7)$$

在哪里 η_{FC} 和 P_{FC} 表示电效率和功率输出
时间 t 的 FC。

注意 WT 和 PV 的发电模型广泛应用于电力系统调度问题, 可以参考参考
资料[36,37]具体细节。

3. 最优协调调度

针对不同的微电网运行模式, 本文分别提出了全系统协调调度模型。

3.1. 并网模式

在并网微电网中, 功率不平衡可以全部由电网补偿, IE, 不会出现电力过
剩或短缺。因此, 目标是最小化净运营成本 F_G [27]。

(1) 目标函数:

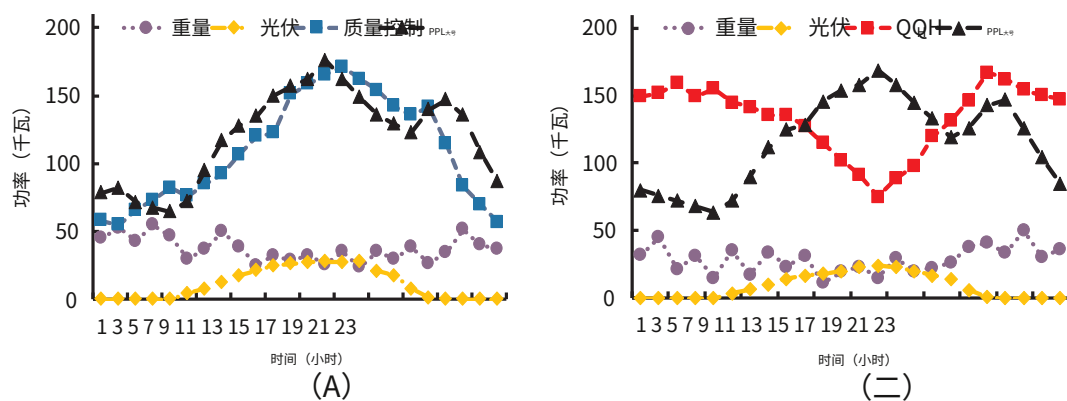


图 3。预测负载、PV 和 WT 功率输出。(a) 夏季, (b) 冬季。

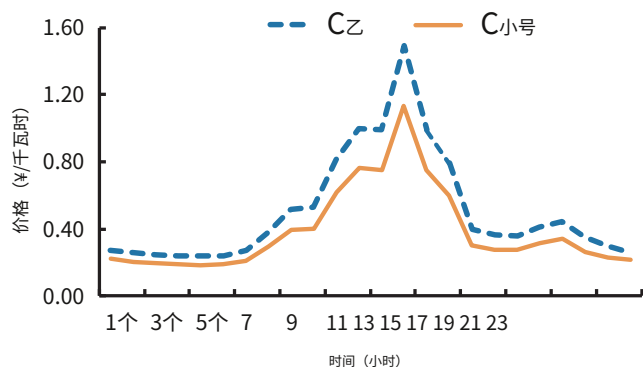


图 4。实时定价方案。

$$\text{最小值}_G = C_{CP} + \sum_{吨=1}^{\text{否}} (C_{吨} + C_{吨 \text{ 前任}} + C_{吨 \text{ 吨}} + C_{吨 \text{ 英石}} + C_{吨 \text{ 吨}} - C_{吨 \text{ 吨}}) \Delta \text{吨} \quad (8)$$

(a) 资本成本 C_{CP} [38]:

$$C_{CP} = \sum_{米=1}^努 C_{CP,米} \frac{升(1+升)^{纳米}}{[(1+升)^{米}-1]} \quad (9)$$

(b) 燃料成本 $C_{\text{吨}F}$

$$C_{\text{吨}} = C_{\text{吨}_{FFC}} + C_{\text{吨吨位}} = [C_G(P_{\text{吨公吨}}/\eta_{\text{公吨}} + P_{FC}/\eta_{FC})]/\text{大号}_{NG} \quad (10)$$

(c) 维修费用 $C_{\text{吨}}$ 欧姆

[illegible]

(d) 启动费用 $C_{\text{吨}}$ 英石和 $C_{\text{吨}}$ 标准停工成本:

$$C_{\text{英石}} = \sum_{j=1}^{NCG} \text{最大值}\{0, \ddot{u}_{\text{吨}j} \ddot{u}_{\text{吨}j} - \ddot{u}_{\text{吨}j}\} C_{\text{英石}j} \ddot{u} \quad (12)$$

$$C_{\text{融合}} = \sum_{j=1}^{NCG} \max\{0, \ddot{u}_{j-1} - \ddot{u}_{\text{融合}j}\} C_{\text{融合}j} \quad (13)$$

(e) 换电成本 $C_{\text{吨}}$ 前任

$$C_{\text{前存}}^{tt} = C_{\text{ZPZ-小号}}^{tt} - C_{\text{小号}}^{tt} \quad (14)$$

(f) 供热供冷收入 $C_{\text{供}}$

$$C_{\text{吨化合物}} = C_{\text{吨H}} + C_{\text{吨C}} = C_{\text{H}} / \overline{M} + C_{\text{C}} / \overline{M} \quad (15)$$

在哪里否是调度周期的总数; m 表示单位的索引, m 可以是WT、PV、MT、FC、EB、EC、ES; \bar{u}_i 是DG和ES的数量; $C_{CP, \text{米}}$ 和 米 表示初始投资成本和单元 m 的使用寿命; ρ 是年利率; C_g 和 大号_{NG} 表示天然气的单价和下位热值;

C_{EC} 是 EC 的单位维护成本，
 WT 、 PV 、 EB 、 MT 、 FC 、 ES 、 HST 和 IST ；否 电脑动画和 是数字和
 可控单位索引 (MT 、 FC 、 EB 和 EC)； C_{FC} 和 C_{EB} 表示
 MT 和 FC 分别的燃料成本； \bar{u}_j 表示二进制状态
 单元 j ， $\bar{u}_j = 1$ 表示单元打开，0 表示关闭； C_{ij} 是单位
 装置的启动和关闭成本； $P_{\text{购电}}$ 和 $P_{\text{售电}}$ 是采购和
 微电网售电； $C_{\text{购电}}$ 和 $C_{\text{售电}}$ 表示单位购电
 及售价； $C_{\text{热}}$ 和 $C_{\text{冷}}$ 表示热负荷和冷负荷； C_{H} 和
 C_{C} 是向客户供热供冷的单价； $C_{\text{热}}$ 和
 $C_{\text{冷}}$ 分别表示供热和制冷销售收入。

(2) 约束条件

操作限制包括以下内容[28,31]:

(a) 能量平衡:

$$P_{\text{重}} + P_{\text{吨光伏}} + P_{\text{公路}} + P_{\text{FC}} + P_{\text{BSD}} - P_{\text{平衡计分卡}} + P_{\text{乙}} - P_{\text{小号}} - P_{\text{吨大号}} + P_{\text{EB}} + P_{\text{欧共体}} \quad (16)$$

$$\frac{\text{吨}}{\text{吨}} \times \frac{\text{吨}}{\text{吨}} = \frac{\text{吨}}{\text{吨}} \quad (17)$$

$$P_{EB} + P_{HSTC} - P_{HSTD} = P_{HSTD} \quad (18)$$

(b) 可控单位:

表格1
P储能参数[5,7,8].

类型	η_c/η_T	TES	最大速度 ESC速度	最大速度 静电放电	ξ 分钟	ξ 最大速度	钾离子 ES/(¥/千瓦时)	Q_{ES}	帽 ES	CCP,ES/(¥/千瓦)	nes/年
学士	90%	0.001	37.5	37.5	0.2	0.8	0.0073	30	150	670	10
高铁	87%	0.01	45	45	0	0.9	0.0012	0	160	450	20
低铁技术部	85%	0.01	40	40	0	0.9	0.0014	0	120	450	20

表 2
PDG参数[38,43,44].

类型	CCP,米/(¥/千瓦)	n米/年	分钟	最大限度	\dot{u}_{ST} ,米	\ddot{u} 信息源, 米	向上	向下	钾离子
公吨	10000	25	15	65	1.94 ¥	1.82 ¥	10 千瓦/分钟	5千瓦/分钟	0.0990 ¥/千瓦时
FC	29000	20	0	40	2.21 ¥	2.05 ¥	2千瓦/分钟	2千瓦/分钟	0.0841 ¥/千瓦时
重量	11000	20	0	55	–	–	–	–	0.0145 ¥/千瓦时
光伏	2000	25	0	30	–	–	–	–	0.0133 ¥/千瓦时
EB	1000	15	0	50	1.23 ¥	1.14 ¥	3 千瓦/分钟	2千瓦/分钟	0.0089 ¥/千瓦时
欧共体	1000	15	0	41	1.32 ¥	1.15 ¥	4 千瓦/分钟	3 千瓦/分钟	0.0104 ¥/千瓦时

表3
v参数值[10,11,27].

参数	价值	参数	价值	参数	价值	参数	价值
警察H	1.2	C _{TS}	0.20元/千瓦时	C _{DS}	1.50 ¥/千瓦时	η _H /η _c	85%
警察c	2个	C _{TE}	0.15元/千瓦时	C _德	0.90 ¥/千瓦时	η _{大号}	15%
警察EB	0.85	C _E	0.12元/千瓦时	C _G	2.70 ¥/米 ³ 个	C _H	0.30元/千瓦时
警察欧共体	3.5	C _{IE}	0.10元/千瓦时	大号 _{NG}	9.78 千瓦时/立方米	C _c	0.20元/千瓦时

表 4
c三种情况下所有单位的组合。

不。	常用单位				夏天			冬天		
	光伏/风力发电	FC	学士	公吨	国标	欧共体	信息源技术部	国标	EB	高铁
情况1	√	√	√	√	√			√		
案例二	√	√	√	√	√			√		
案例三	√	√	√	√		√	√		√	√

功率输出限制: $\dot{u}_{吨} P_{分钟} \leq P_{吨} \leq \dot{u}_{吨} \text{最大限度}$ (19)

放大/下限: $R_{向下} \triangleleft \dot{u}_{吨} \leq P_{吨} - P_{吨-1} \leq R_{向上}$ (20)

(c) 电力交换:
兑换限额: $0 \leq P_{吨} \leq V_{吨} P_{吨} \text{最大限度}$, $0 \leq P_{吨} \leq P_{吨} \text{最大限度}$ (21)

极限: $V_{吨} + V_{吨} \leq 1$ (22)

(d) 储能:
充电功率限制: $0 \leq P_{吨} \leq V_{吨} P_{吨} \text{最大限度}$ (23)

充电功率限制: $0 \leq P_{吨} \leq V_{吨} P_{吨} \text{最大限度}$ (24)

能量极限: $\xi_{分钟} \leq \xi_{ES} \leq \xi_{ES} \text{最大限度}$ (25)

开始/结束能量限制: $Z_{ES} = Z_{ES} \triangleleft \text{吨}$ (26)

极限: $V_{吨} \leq V_{吨} \text{最大限度}$ (27)

在哪里P吨重量和P光伏是WT和PV的功率输出; P吨是大号是力量需要; P吨 电脑动画, 表示可控单元的功率j; P电脑动画, j和P最大限度是单元的最小和最大功率j; R向上 电脑动画, j和R电脑动画, j是单元的最大上升/下降速率j; V吨 乙和V吨 小号是二进制状态变量, 当V吨 Z=1、微电网从电网购买电力, 当V吨=1、微电网售电; V吨 ESC键和V吨静电放电是二进制状态变量和V吨 ESC键=1个指示 ES 正在充电, 并且V吨静电放电=1个正在放电; PESC键和P最大限度静电放电是最大充放电功率; ξ分钟 ES 和ES表示 ES 的最小和最大充电状态; 帽ES, ZES 0和乙否ES是 ES 的容量、起始能量和终止能量; P吨 平衡计分卡和P吨 HSTD和P吨表示BS的充放电功率; PHSTC, P吨吨 HSTD和P吨国际贸易标准委员会, P内标表示 HST 和 IST 的吸收和释放能力分别。

请注意, CG 是一个广义缩写, 包括 MT、EB、EC 和 FC。

3.2. 孤岛模式

在没有电网作为备份的情况下, 孤岛微电网内的能量产生和消耗应该是平衡的。在这个

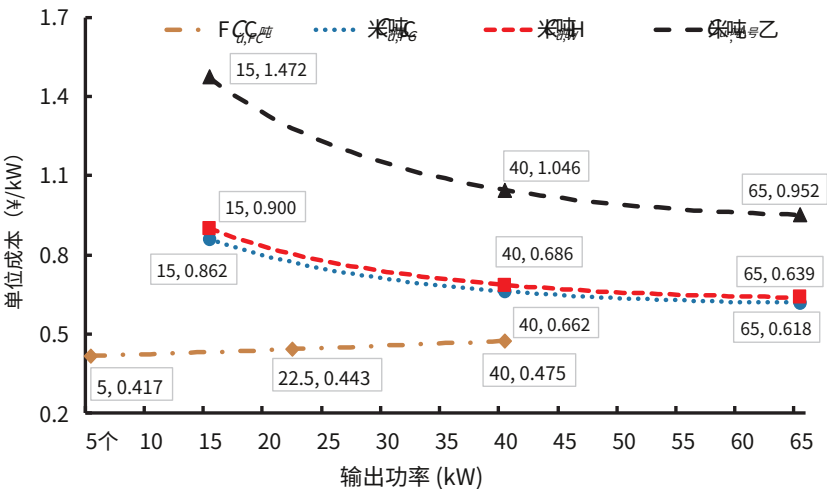


图 5. FC和MT在不同模式下的单位发电成本。

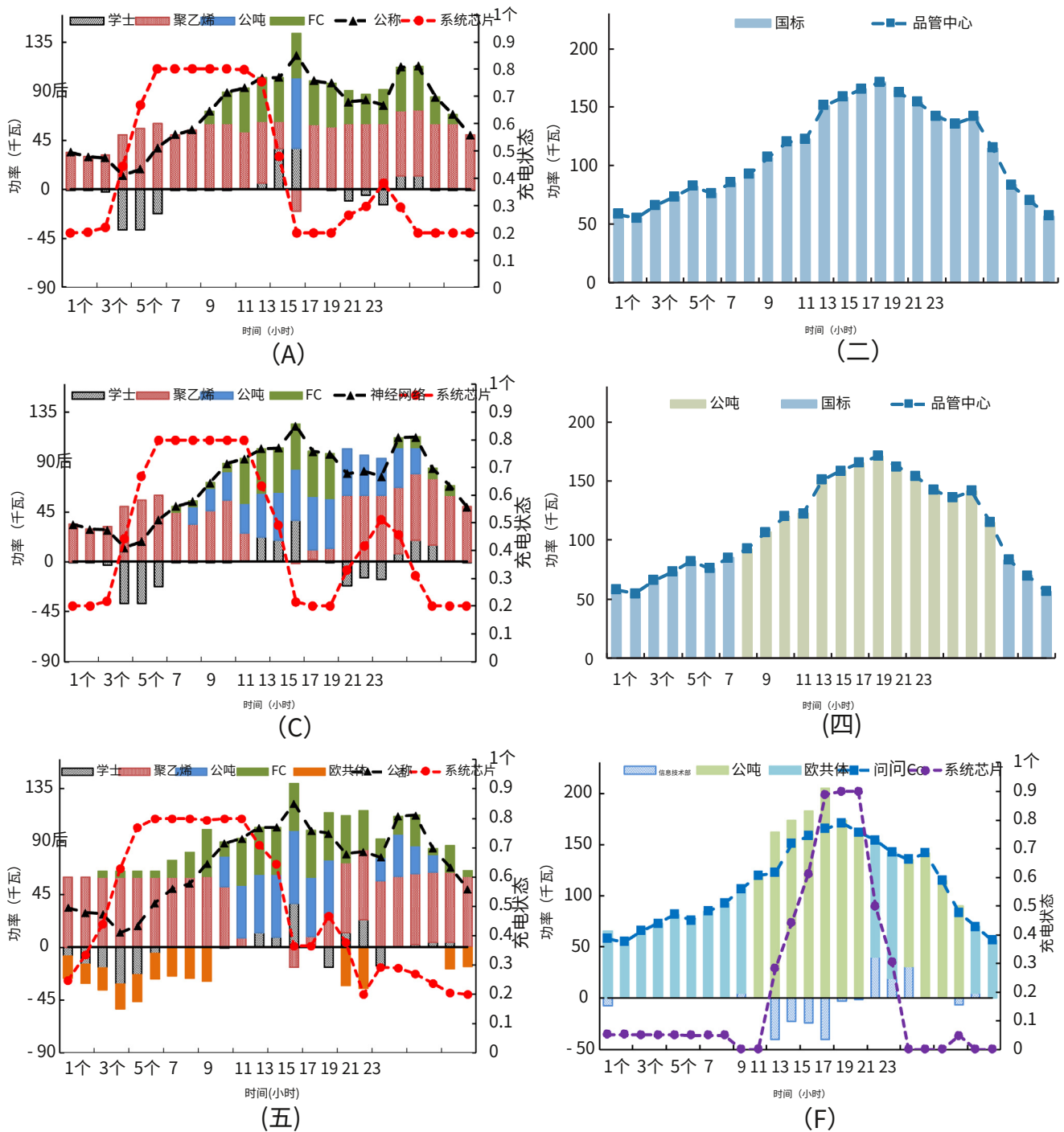


图 6. 并网微电网夏季3种情况的功率热平衡情况。案例 1 (a)、(b)、案例 2 (c)、(d)、案例 3 (e)、(f)。

条件下, 如果能源供应不足, 可能会调用需求响应, IE, 必要时可以切断部分负荷, 或放弃部分能量, 以能量偏差成本来平衡能量[11,39]. 因此, 与并网微电网相比, 净运行成本函数中应考虑能量偏差成本 (或需求响应成本) $F_{\text{小}}$ 。

(1) 目标函数:

$$\text{最小值}_{\text{小}} = C_{\text{CP}} + \sum_{t=1}^T (C_{\text{吨}} P_t + C_{\text{欧共体}} P_{\text{欧共体}} + C_{\text{英石}} P_{\text{英石}} + C_{\text{标准清}} P_{\text{标准清}} - C_{\text{SHC}} P_{\text{SHC}} + C_{\text{酸碱性}} \Delta \text{吨}) \quad (28)$$

(a) 能源偏差成本 $C_{\text{吨}}$ [11]:

$$C_{\text{酸碱性}} = C_{\text{TS}} |P_{\text{吨}}^{\text{酸碱性}} - P_{\text{吨}}^{\text{酸碱性}}| + C_{\text{TE}} |P_{\text{吨}}^{\text{酸碱性}} - P_{\text{吨}}^{\text{酸碱性}}| + C_{\text{IE}} |P_{\text{吨}}^{\text{酸碱性}} - P_{\text{吨}}^{\text{酸碱性}}| + C_{\text{DS}} P_{\text{DS}} + C_{\text{德}} P_{\text{德}} \quad (29)$$

(b) 为客户供热供冷收入 $C_{\text{吨}}$

$$C_{\text{吨}} = C_{\text{上海}} P_{\text{吨}} + C_{\text{SC}} (P_{\text{吨}} - P_{\text{吨}}^{\text{吨}}) + C_{\text{C}} (P_{\text{吨}} - P_{\text{吨}}^{\text{吨}}) \quad (30)$$

在哪里 C_{TE} , C_{IE} , $C_{\text{德}}$ 和 C_{TS} , $C_{\text{是}}$, C_{DS} 是供热、制冷和电力过剩和短缺; $C_{\text{吨}}$ SHC 和 $C_{\text{吨}}$ SHC 表示销售收入为孤岛微电网中的本地客户供热和制冷; $P_{\text{吨}}$, $P_{\text{吨}}$, $P_{\text{吨}}$ 和 $P_{\text{吨}}$ 表示热量、冷却和电力盈余和短缺; $C_{\text{吨}}$ $上海$ 和 $C_{\text{吨}}$ SC 表示供热和制冷销售收入分别。

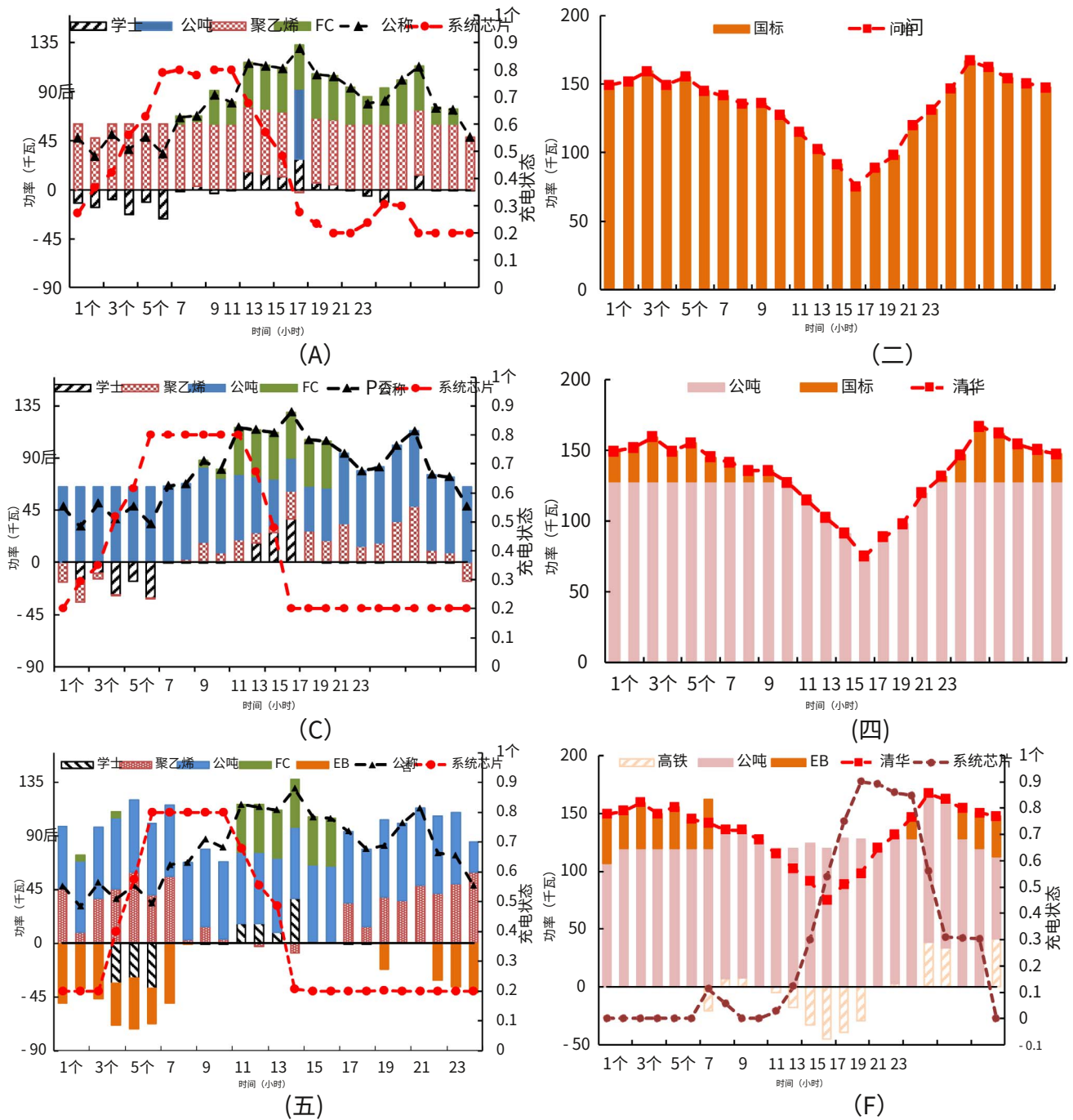


图 7. 并网微电网冬季3种情况的功率热平衡情况。案例 1 (a)、(b) 案例 2 (c)、(d) 案例 3 (e)、(f)。

具有相同符号的成本项目与并网模式具有相同的含义和数学表达式。

(2) 约束条件:

孤岛微电网的运行限制是:

(a) 能量平衡:

$$P_{\text{光伏}} + P_{\text{公吨}} + P_{\text{FC}} + P_{\text{EB}} + P_{\text{HSTC}} + P_{\text{HSTD}} = P_{\text{DS}} + P_{\text{Z}} + P_{\text{EB}} + P_{\text{欧共体}} \quad (31)$$

$$P_{\text{欧共体}} + P_{\text{移动通信中心}} - P_{\text{移动基站}} = P_{\text{内标}} - P_{\text{内标}} + P_{\text{内标}} \quad (32)$$

$$P_{\text{EB}} + P_{\text{HSTC}} - P_{\text{HSTD}} = P_{\text{HSTD}} - P_{\text{HSTD}} + P_{\text{HSTD}} \quad (33)$$

(b) 能量偏差:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{DS}} \leq P_{\text{DS}}^{\text{max}}, 0 \leq P_{\text{DS}} \leq P_{\text{DS}}^{\text{max}} \\ 0 \leq P_{\text{DS}} \leq P_{\text{DS}}^{\text{max}}, 0 \leq P_{\text{DS}} \leq P_{\text{DS}}^{\text{max}} \\ 0 \leq P_{\text{DS}} \leq P_{\text{DS}}^{\text{max}}, 0 \leq P_{\text{DS}} \leq P_{\text{DS}}^{\text{max}} \end{cases} \quad (34)$$

$$\text{状态限制: } P_{\text{DS}} + P_{\text{DS}} \leq 1, P_{\text{DS}} + P_{\text{DS}} \leq 1, P_{\text{DS}} + P_{\text{DS}} \leq 1 \quad (35)$$

在哪里 P_{DS} , P_{DS} 和 P_{DS} 是热量、冷却和功率的二元指标

等于 1 时不足; 具有相同的定义, P_{DS}

P_{DS} 表示热量、冷却和电力盈余的二进制指标。

其他约束与并网微电网一致。

表 5
并网微电网的运行成本（元）。

成本/收入 物品	夏天			冬天		
	情况1	案例二	案例三	情况1	案例二	案例三
资金成本	671.59	671.59	635.35	671.59	671.59	642.47
燃料成本	822.70	808.20	685.60	1342.00	1564.30	
维修费用	77.40	103.60	94.50	88.90	195.00	
启动/关闭- 降低成本	9.40	16.10	6.11	9.40	9.80	7.40
换电 成本	537.30	350.50	377.60	629.90	177.60	187.80
加热/冷却 收入	528.40	528.40	528.40	960.10	960.10	960.10
净营业成本	1590.19	1421.69	1271.05	1781.89	1658.19	1560.77

3.3. 模型线性化

通常，CCHP 设备和 FC 的线性恒定电效率用于简化整体操作问题，例如，参考资料[5,7–10] 和 [19,20]. 但是，代表它们的真实操作条件并不是那么准确。实际上，电效率是其功率输出受环境温度和海拔影响的非线性函数 [26,40]，因此具有这些效率的项目，IE，燃料成本函数（Eq.(10)), 热/冷输出函数 (Eqs.(2) 和 (3)) 和目标函数 (Eqs.(8) 和 (28)) 是非线性的。此外，很明显，启动/关闭成本函数（Eqs.(12) 和 (13)) 也是非线性的。因此，所提出的模型被视为混合整数非线性规划问题。

为减轻计算负担，提高求解质量，将上述非线性问题线性化为MILP问题。

(1) 燃料成本的线性化

CCHP 电厂和 FC 的燃料成本曲线可以绘制为中的实线图 2(a)，CCHP 设备的热/冷输出曲线可以绘制为实线图 2(二)。否大号虚线中的线性函数块用于通过在每个块中引入二元变量和连续变量来逼近原始非线性函数。

CCHP 电厂的燃料成本和热/冷输出的分段线性函数是

$$F(\dot{Q}_H) = \sum_{k=1}^{N_{\text{块}}} (\alpha_k P_k + \beta_k Z_{\text{块}k}) \quad (36)$$

$$k = [(F(P_{k+1}) - F(P_k)) / (P_{k+1} - P_k)] \quad (37)$$

$$\beta_k = F(P_k) - P_k \alpha_k \quad (38)$$

$$P_k Z_{\text{块}k} \leq R_{\text{块}k} Z_{\text{块}k} P_{k+1} \quad (39)$$

$$\sum_{k=1}^{N_{\text{块}}} Z_{\text{块}k} \leq 1 \quad (40)$$

在哪里 F 和 F 是原始的和近似的线性化函数； k 是块的索引； α_k 和 β_k 表示块中线性函数的斜率和截距； P_k 是起点 k 第块，其中 P_1 个和 P_{N+1} 个在图 2 表示最小和最大功率

产出； $Z_{\text{块}k}$ 是块的二进制状态 k 。

(2) 启动/关闭成本的线性化可以通过将 max 函数分成两个单独的部分来实现：

$$\begin{cases} C_{\text{启动}} \geq 0 \\ C_{\text{启动}} \geq \sum_{j=1}^{NCG} (\dot{U}_{\text{块}j} - \dot{U}_{\text{块}j-1}) C_{\text{启动}j} \end{cases} \quad (41)$$

$$\begin{cases} C_{\text{启动}} \geq 0 \\ C_{\text{启动}} \geq \sum_{j=1}^{NCG} (\dot{U}_{\text{块}j} - \dot{U}_{\text{块}j-1}) C_{\text{启动}j} \end{cases} \quad (42)$$

然后，在线性化之后，可以使用一些在解决 MILP 问题方面具有高性能的商业求解器，如 GUROBI 和 CPLEX。

4. 案例研究

4.1. 数据输入

在本节中，所提出的调度方法在多能源微电网测试系统中进行了测试。可以通过预测获得风力发电和光伏发电每小时的出力以及典型冬季和夏季的系统负荷 [15,41,42]. 供暖和制冷主要用于本研究的空间供暖和制冷。因此，假设夏季无热负荷，冬季无冷负荷 [18]. WT 和 PV 的功率输出以及系统负载曲线显示在图 3. 数据来自 [12,20,27] 然后根据实际考虑进行修改。

能源调度以 24 h 为周期进行，单位调度间隔为 1 h。实时电价方案如图 4 用于电力调度 [27]. 供应热能/冷能，采用固定定价方案 [19]. 储能和 DG 的参数列于表 1 和 2. 案例研究的其他参数显示在表 3. 此外，假设所有单元在操作前关闭 [11].

为了验证所提方法的优势，本文对两种基于传统微电网供能方式的案例进行了比较。

情况1：分别代。这里，热/冷负荷全部由热效率为 85% 的燃气锅炉 (GB) 和吸收式制冷机满足；电力负荷由 WT、PV、FC、MT、BS 和/或需求响应满足 [10,19]. 在这种情况下，废热不会被回收。因此 MT 仅用于发电。

案例二：典型的三代。对于供热/制冷，MT（或 CCHP 电厂）在并网微电网中以 FHL 策略运行，在孤岛微电网中以 FPL 策略运行，GB 作为补充 [15–19,24]. 然后是 MT 坐标的功率输出

具有 WT、PV、FC、ES 和/或需求响应以满足系统电力负载。

案例三：本文提出的全系统协调发电。

需要注意的是，在案例 2 和案例 3 中，MT 在夏季发电和制冷，而在冬季仅发电和供热。三种情况下单位的详细组合总结在表 4.

数学模型在通用代数建模系统 (GAMS) 平台上实现，然后可以使用 CPLEX 求解器，该求解器在通过单纯形法的原始变体或障碍内点法求解 MILP 问题方面具有高性能 [45]. 模拟在具有 16 G 内存的 Intel(R) Xeon(R) E5-1630 3.70 GHz 个人计算机上运行。

4.2. 评论

为了更好地说明并网仿真结果
微电网，发电单位 FC 成本 C_{FC}
计算为：
$$\dot{U}_{FC}$$

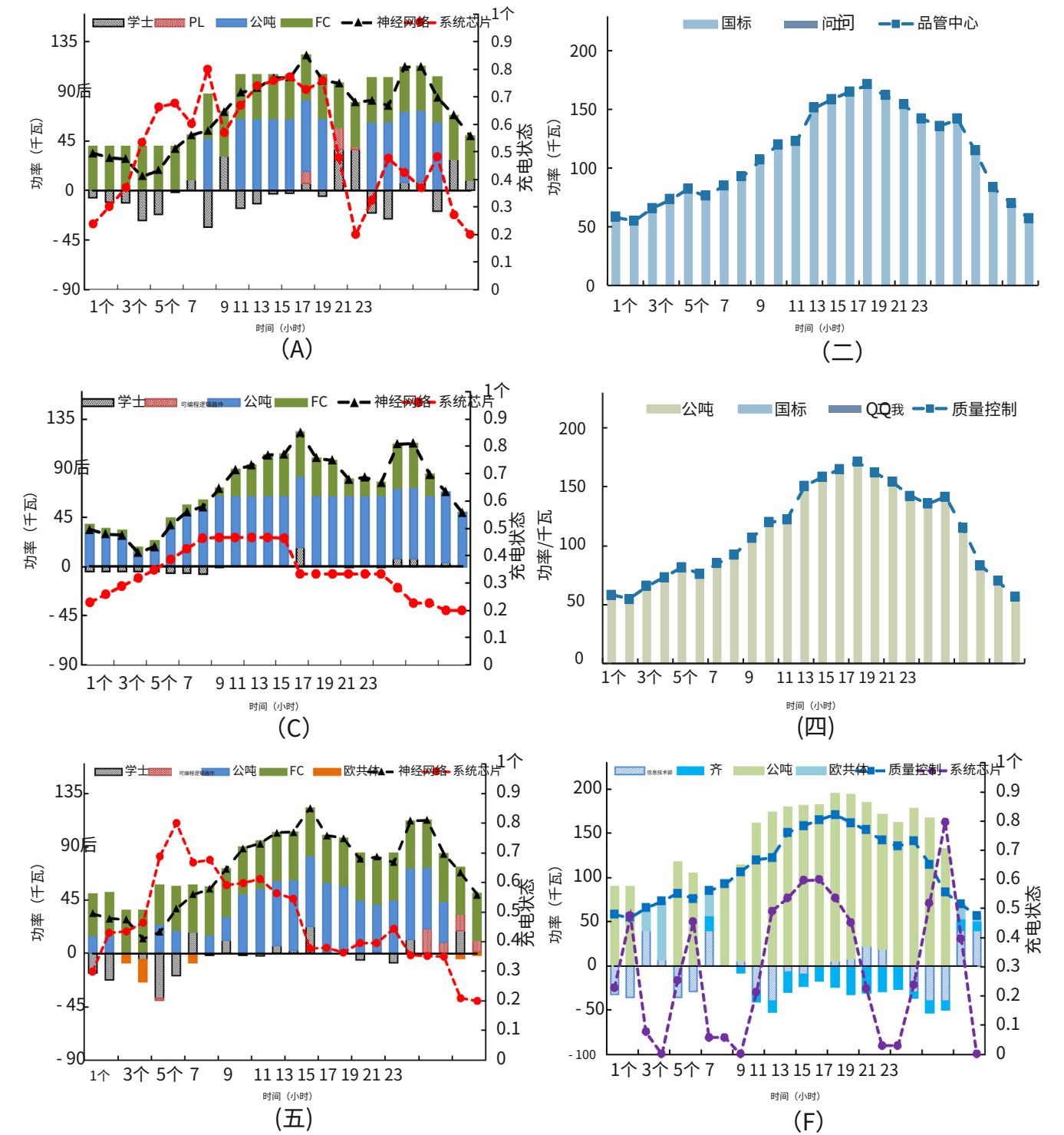


图 8. 孤岛微电网夏季3种情况的功率热平衡情况。案例 1 (a)、(b)、案例 2 (c)、(d)、案例 3 (e)、(f)。

$$C_{FC} = C_{FC} \cdot P_{FC} / P_{FC} \quad (43)$$

同样，MT在唯一发电模式下的单位成本，IE，情况1 C_{MT} 是：

$$C_{MT} = C_{MT} \cdot P_{MT} / P_{MT} \quad (44)$$

MT夏季运行的单位成本 C_{MT} 案例2和案例3如下：

$$C_{MT} = (C_{MT} \cdot P_{MT} / P_{MT}) / P_{MT} \quad (45)$$

$$C_{MT} = (C_{FC} \cdot P_{FC} / P_{FC}) / P_{FC} \quad (46)$$

图 5 根据等式给出了不同情况下 FC 和 MT 的单位成本曲线。(43)–(46)。

正如我们所看到的，由于非线性电效率，FC 的单位成本在增加，而 MT 在不同情况下的单位成本随着功率输出的增加而降低。由于吸收式制冷机的性能系数高于热回收机组，因此MT冬季运行的单位成本为

高于夏季，但为了回收余热，既

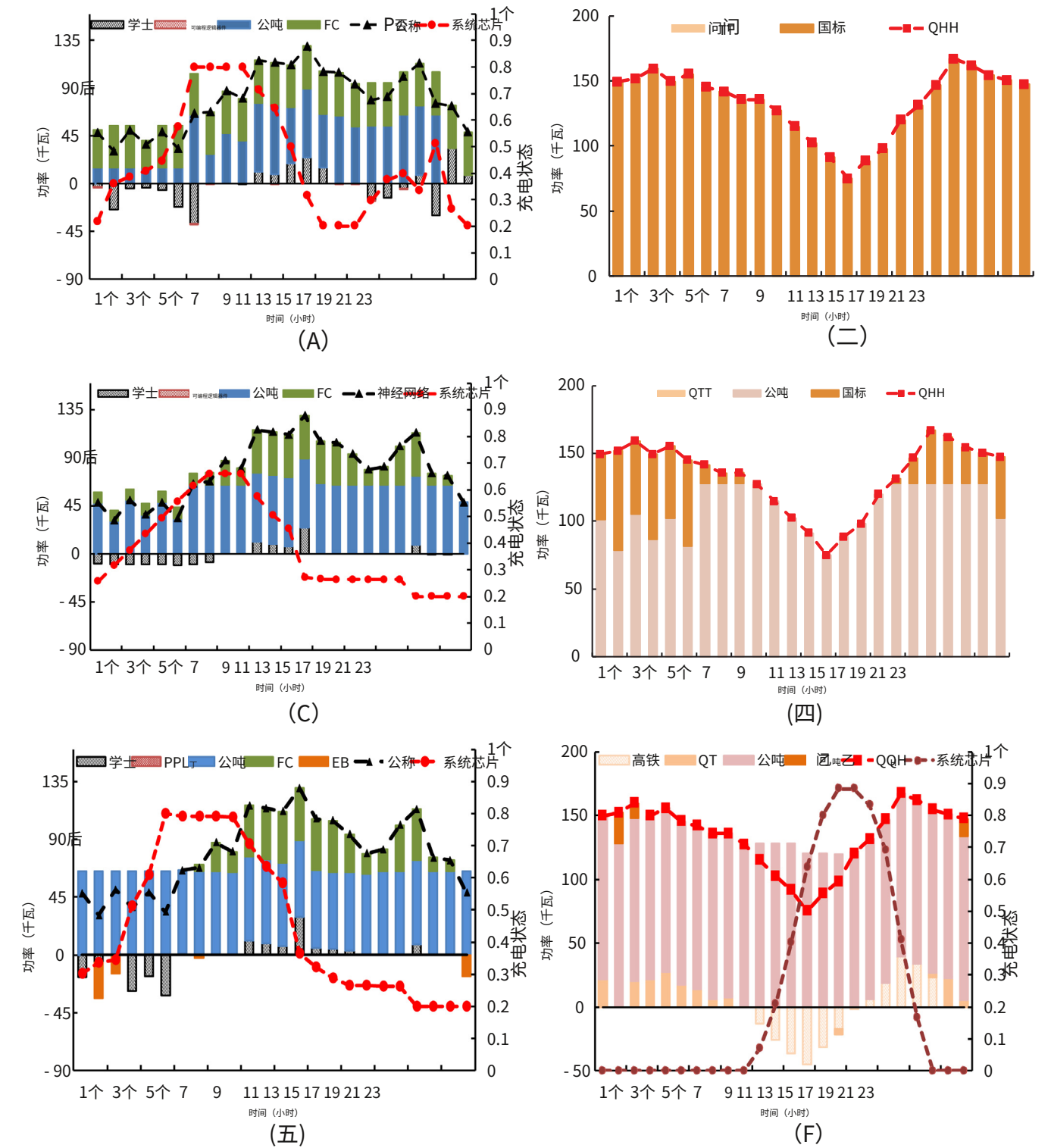


图 9。孤岛微电网冬季3种情况的功率热平衡情况。案例 1 (a)、(b)、案例 2 (c)、(d)、案例 3 (e)、(f)。

成本低于纯发电模式下的MT，IE，案例 1。此外，图 5 显示在 FC 的最大容量内，其单位成本始终低于案例 1-3 中的 MT。

4.3. 并网模式

无花果。6 个和 7 显示了所有三种情况下并网微电网的仿真结果。净运营成本列于表 5。在这些数字中， P_{net} 表示总功率负载减去总和

WT 和 PV 功率输出；PE 表示购买力减去销售力；BS 是放电功率减去充电功率。HST 和 IST 分别表示释放热量/冷却能量减去吸收能量。

它显示在**无花果**。6 个和 7 三个案例中的所有单元都是根据其单位成本和操作限制来安排的。由于 FC 的单位发电成本低于 MT (图 5)，缺电时 FC 优先输出；FC 和 MT 除了满足内部功率负载外，在工作时会输出额外的功率。

表 6
否等孤岛微电网的运营成本 (¥)。

成本/收入 物品	夏天			冬天		
	情况1	案例二	案例三	情况1	案例二	案例三
资金成本	671.59	671.59	635.35	671.59	671.59	642.47
燃料成本	1254.60	2494.60	1796.10	1671.50		
维修费用	208.40	197.80	165.90	231.30	218.40	206.70
启动/关闭- 降低成本	15.00	6.40	7.40	7.20	9.80	7.40
能量偏差 成本	50.30	9.00	126.40	0.10	41.10	34.00
加热/冷却 收入	528.40	528.40	520.10	960.10	960.10	910.70
净营业成本	2130.79	1838.79	1669.55	2444.69	1776.99	1651.37

单位成本低于售电价格，以获得更多的换电收益。此外，BS的充电或放电决策是根据实时定价来转移负载并降低净运营成本的。

在情况 1 中，热/冷负荷均由 GB (无花果。6个 (乐队 7(b))), 电力负荷由 FC、MT、BS 和电力交换所供电 (无花果。6个(a) 和7(a)) 基于他们各自的成本函数。仿真结果表明，加热/冷却和功率是在没有任何交互的情况下进行调度的。由于GB效率低，MT产生的热量全部浪费，净运行成本最高 (图 6(a) 和7(a)，第 14 期，表 5)。

在案例2中，在FHL策略下，MT优先供热/供冷，GB作为补充 (无花果。6个(d) 和7(d))。MT的固定功率输出与FC、BS和换能器配合以满足总功率负荷 (无花果。6个(c) 和7 (C))。由于余热得到充分利用，因此净运营成本低于案例1 (表 5)。然而，在 FHL 策略下，MT 的功率输出受到其冷却/热输出的高度限制。因此 MT 不能灵活地加入能源市场，成本仍然很高。

与此形成鲜明对比的是，工况3实现了全系统的电、热/冷优化协调调度。冷却调度，IE，EB/EC 输出优先于 MT 将功率转移到加热/冷却 (图 6(e) 和 (f)，第 1-9、17-18、23-24 期和图 7(e) 和 (f) 第 1-7、22-24 期)。当购电价格高于 MT 在夏季或冬季运行的单位成本时，HST/IST 存储多余的热量/冷却以解耦 MT 在情况 2 中的僵化策略，然后可以产生更多的电力来供应电力加载或出售给电网以获取收入 (图 6(e) 和 (f)，第 11-14 期和图 7(e) 和 (f)，第 12-17 期)。当购电价格落在上述两个价格区间之间时，热/冷能源参与电力调度，IE，HST/IST 释放热量/冷却能量以降低 MT 功率输出 (图 6(e) 和 (f)，第 17-19 期和图 7(e) 和 (f)，第 20-21、24 期)。此外，它显示在图 5随着 MT 功率输出的增加，其单位成本正在降低，因此，HST/IST 通过这种方式帮助 MT 充分利用这一优势，进一步降低净运营成本。因此，案例 3 的运营成本最低 (表 5)。

综上所述，本文提出的方法可以有效地实现并网微电网的全系统协调，降低其净运行成本。

在求解速度方面，所有的解都在 3.39 秒，最小求解器时间为 1.24 秒，这对于日前调度方案而言计算效率高且足够短。

4.4. 孤岛模式

微电网在孤岛模式下的仿真结果如图所示 无花果。8个和9. 净运营成本列于表 6. 相似地，P_T,

问吨和问我表示用各自的能源盈余减去电力、热力和制冷短缺。

它显示在 无花果。8个和9由于没有电网的电力支持，需求响应将以能源偏差成本被调用。如图所示表3单位功率偏差成本远高于分布式电源的单位成本，因此所有分布式电源和储能都被调度以降低功率偏差成本。

在情况 1 中，热/冷负荷均由 GB (无花果。8个 (乐队9(b))), 电力负载由 FC、MT 和 BS 供电 (无花果。8个(a) 和9 (A))。只有在所有机组输出最大功率 (图 8(a) 第 14、16-17 期，图 9(a) 第 1、7、16-20 期)。由于 GB 提供热量/冷却的成本更高，而 MT 产生的热量被浪费了 (无花果。8个(a) 和9(a), period 14), 运营成本最高 (表 6)。

情况2，在FPL策略下，MT优先供应电力负载，如果仍然存在供热/制冷不足，GB开始补充工作 (无花果。8个(d) 和9(d))。当出现功率不平衡时，FC 开始输出功率，必要时与 BS 协调需求响应，满足总功率负荷 (无花果。8个(d) 和9(d))。然而，在FPL策略下，MT的热/冷输出受其功率输出的限制，这阻碍了其在热/冷调度中的作用。此外，MT 的功率输出不是根据其运行成本产生的，而只是遵循不灵活的策略。因此，案例 2 的净运营成本仍然很高 (表 6)。

相比之下，案例 3 实现了孤岛微电网中电力、热/冷之间的全系统协调，IE，电力在EC/EB的支持下参与供热/制冷调度，MT在HST/IST的协助下协调发电和供热/制冷 (无花果。8个(e)、(f) 和9(e),(f))。因此，整体调度更加灵活高效。此外，需求响应还根据能量偏差成本参与到整体调度中，进一步提高了调度的灵活性。案例 3 的净运营成本仍然是并网案例中最低的 (表 6)。

此外，所有孤岛微电网案例的最大求解时间为 4.51 秒，这再次显示了高求解效率。

5. 结论

本文提出了一种适用于并网和孤岛模式的多能源微电网的综合全系统优化协调调度方法。在所提出的方法中，HST/IST 可以解耦 CCHP 电厂不灵活的运行策略，使其以更高的灵活性参与电力和热/冷调度。此外，EB/EC 可以显著增强电力和供热/制冷之间的调度交互。然后，基于本文提出的分离发电、三联发电和最优协调发电的综合案例研究充分证明了所提出的方法可以提高运行效率，IE，降低净运营成本，实现更高效、更灵活的系统运营。得出的结论是，全系统优化协调调度方法可为实际多能源供应网络的不同模式设计、规划和运行提供有益参考，在进一步降低系统净运营成本方面具有巨大潜力。

同样重要的是要注意，所提出的方法不限于特定的微电网或 DG 和储能设备的特定操作模式。类似的多能源需求的微电网，如船舶微电网或建筑微电网也可以应用 [2,46]。例如，新加坡实马高岛正在建设可在并网和孤岛模式之间切换的多能源微电网[4]。此外，所提出的方法也将利用现场数据在我们的船舶微电网项目中实施

[47].

致谢

本文中的工作得到新加坡教育部学术研究基金一级项目的支持。Yan Xu 的工作得到新加坡南洋理工大学南洋助理教授职位的支持。

参考

- [1] Mancarella P. MES (多能源系统)：概念和评估模型概述。能源 2014; 65:1–17.
- [2] Liu M, Shi Y, Fang F. 联合冷却、加热和电力系统：一项调查。可再生可持续能源修订版 2014; 35:1–22.
- [3] Cho H, Smith AD, Mago P. 联合冷却、加热和供电：性能改进和优化回顾。应用能源 2014; 136: 168–85.
- [4] 南大建立离岸可再生能源综合系统; 2016. <http://media.ntu.edu.sg/NewsReleases/Pages/newsdetail.aspx?news=830aa91eaa88-4c7b-8f95-00c171c17560&from=timeline&isappinstalled=0>.
- [5] Fang F, Wang QH, Shi Y. 一种基于两种运行模式的 CCHP 系统的新型优化运行策略。IEEE Trans Power Syst 2012;27(2):1032–41.
- [6] 史密斯广告, 马戈 PJ. 负载跟踪操作方法对热电联产系统效率的影响。应用能源 2014 年; 115:337–51.
- [7] Fumo N, Chamra LM. 基于一次能源消耗的冷热电联供系统分析 应用能源 2010;87(6):2023–30.
- [8] Fumo N, Mago PJ, Chamra LM. 联合冷却、加热和电力系统的排放运行策略。应用能源 2009;86(11):2344–50.
- [9] Kang L, Yang J, An Q. 等。三种能源管理模式下地热热泵 CCHP-ORC 系统互补配置及性能对比 Energy Convers Manage 2017; 135:244–55.
- [10] Liu M, Shi Y, Fang F. 使用矩阵建模方法的 CCHP 系统的最佳潮流和 PGU 容量。应用能源 2013; 102: 794–802.
- [11] Jiang Q, Xue M, Geng G. 并网和独立模式下微电网的能量管理。IEEE Trans Power Syst 2013;28(3):3380–9.
- [12] Kanchev H, Colas F, Lazarov V 等人。城市微电网运行的减排和经济优化, 包括调度的基于光伏的有源发电机。IEEE Trans Sustain Energy 2014;5(4):1397–405.
- [13] Meng L, Sanseverino ER, Luna A, 等人。微电网监控器和能源管理系统：文献综述。可再生可持续能源修订版 2016 年; 60:1263–73.
- [14] Moradi MH, Eskandari M, Hosseini SM. 优化规模的智能微电网中的运营策略优化。IEEE Trans 智能电网 2015; 6(3): 1087–95.
- [15] Gu W, Wu Z, Bo R, 等人。冷热电联供微电网的建模、规划和优化能源管理：综述。国际电力杂志 能源系统 2014; 54:26–37.
- [16] 马林, 刘南, 张杰, 等。并网微电网内 CHP 和 PV 产消者联合运营的能源管理：博弈论方法。IEEE Trans Ind Informat 2016;12(5):1930–42.
- [17] 王莉, 李强, 孙敏, 等。基于极大极小遗憾准则的多能量冷热电联产系统鲁棒优化调度 IET Gener Transm Distrib 2016;10(9):2194–201.
- [18] 王莉, 李强, 丁瑞, 等。不确定条件下微电网能源供需的综合调度：一种稳健的多目标优化方法。能源 2017; 130(1):1–14.
- [19] Yan B, Luh PB, Warner G 等人。可再生能源微电网的运行和设计优化。IEEE Trans Autom Sci Eng 2017;14(2):573–85.
- [20] ZM Li, Y. Xu, 考虑机会利润的并网多能源微电网动态调度。在：IEEE PES 大会| 会议与博览会, 2017. IEEE; 2017 [出版中]。
- [21] Marzband M, Ghadimi M, Sumper A 等人。使用多周期引力搜索算法的实时能量管理系统的实验验证, 适用于孤岛模式的微电网。应用能源 2014; 128: 164–74.
- [22] Belvedere B, Bianchi M, Borghetti A 等人。基于微控制器的电源管理系统, 用于具有混合电源的独立微电网。IEEE Trans Sustain Energy 2012;3(3):422–31.
- [23] Marzband M, Sumper A, Ruiz-Álvarez A 等人。日前市场中独立微电网实时能量管理系统的实验评估。应用能源 2013; 106: 365–76.
- [24] Basu AK, Bhattacharya A, Chowdhury S 等人。基于 CHP 的微电网中经济电力共享的计划调度。IEEE Trans Power Syst 2012;27(1):30–8.
- [25] 费雷拉 RS、博尔赫斯 CLT、佩雷拉 MVF. 配电系统交流最优潮流的灵活混合整数线性规划方法。IEEE 传输功率系统 2014;29(5):2447–59.
- [26] Rasul MG, Ault C, Sajjad M. 用于满足澳大利亚偏远地区电力需求的沼气混合燃料微型燃气轮机热电联产。能源程序 2015;75:1065–71.
- [27] 王 MQ, Gooi HB. 微电网中的旋转备用估计。IEEE Trans Power Syst 2011;26(3):1164–74.
- [28] Zhang C, Xu Y, Dong ZY, et al. 微电网中分布式发电和基于价格的需求响应的稳健协调。IEEE 跨智能电网 2017;3(99):1–12.
- [29] Aktas A, Erhan K, Ozdemir S 等人。智能电网应用中混合储能系统新型智能能量管理算法的实验研究。Electr Pow Syst Res 2017;144:185–96.
- [30] Luo X, Wang J, Dooner M, 等人。电能存储技术发展现状及在电力系统运行中的应用潜力概述。应用能源 2015; 137(6):511–36.
- [31] Zhang C, Xu Y, Dong ZY, et al. 通过两级协调储能和直接负载控制实现微电网的稳健运行。IEEE Trans Power Syst 2016;5(99):1–10.
- [32] 《绿色公司状况》; 2017. <https://stateofgreen.com/en/profiles/ramboll/solutions/heat-accumulator-for-chp-plants>.
- [33] Choudhury A, Chandra H, Arora A. 固体氧化物燃料电池技术在发电中的应用——综述。更新可持续能源修订版 2013; 20:430–42.
- [34] 赵 Z, Lee WC, Shin Y 等。家庭能源管理系统需求响应的最优功率调度方法 IEEE Trans 智能电网 2013; 4(3):1391–400.
- [35] Laudani A, Fulginei FR, Salvini A. 使用简化形式从实验 IV 曲线中提取光伏面板的二极管模型的高性能提取程序。太阳能 2014; 103: 316–26.
- [36] Ma T, Yang H, Lu L. 偏远岛屿独立混合太阳能-风-电池系统的可行性研究。应用能源 2014 年; 121:149–58.
- [37] Basaran K, Cetin NS, Borekci S. 并网和离网风能/光伏和电池混合系统的能源管理。IET Renew Power Gen 2016;11(5):642–9.
- [38] Chen SX, Gooi HB, Wang MQ. 微电网储能规模。IEEE Trans 智能电网 2012; 3(1): 142–51.
- [39] Wang Q, Zhang C, Ding Y, 等。审查用于整合分布式能源资源和需求响应的实时电力市场。应用能源 2015; 138: 695–706.
- [40] Gadalla M, Zafar S. 小型无人机氢燃料电池-光伏动力系统分析。国际氢能杂志 2016; 41(15):6422–32.
- [41] 张 R, 董 ZY, 徐 Y, 等。通过极限学习机的集成模型对澳大利亚国家电力市场的短期负荷预测。IET Gener Transm Dis 2013;7(4):391–7.
- [42] Tascikaraoglu A, Erdinc O, Uzunoglu M 等人。包含可再生能源转换单元的虚拟电厂的自适应负荷调度和预测策略。应用能源 2014; 119: 445–53.
- [43] 陈杰, 杨旭, 朱丽, 等。微电网经济运行与调度策略研究。在：电力工程和自动化会议 (PEAM), 2012 IEEE. IEEE; 2012.p. 1–6.
- [44] Lv Q, Jiang H, Chen T. 热电联产电锅炉炉内风电及其国民经济评价。汽车电力系统 2014; 38(1): 6–12. [用中文 (表达)].
- [45] Cplex G. 求解器手册。Gams/Cplex; 2014.
- [46] Jayasinghe SG, Meegahapola L, Fernando N 等人。船舶微电网回顾：系统架构、存储技术和电能质量方面。发明 2017;2(1):4.
- [47] NTU 与在新加坡成立的 Norwegian Energy Collaboratorium 签署战略合作伙伴关系; 2017. <http://erian.ntu.edu.sg/NE/Pages/News-Detail.aspx?news=29a16659-1f78-438b-822d-4f656e81ffde>.

李正茂 2013 年获得电子信息工程学士学位, 2016 年获得电气工程硕士学位, 均来自中国济南的山东大学。目前他正在攻读博士学位。新加坡南洋理工大学电气与电子工程学院博士。他的研究兴趣包括可再生能源、未来多能源系统、冷热电联供技术和优化技术。

严旭分别于 2008 年和 2011 年获得中国广州华南理工大学学士和硕士学位, 并获得博士学位。2013 年获得澳大利亚纽卡斯尔大学博士学位。现任新加坡南洋理工大学电气与电子工程学院南洋助理教授。他之前在澳大利亚悉尼大学电气与信息工程学院工作。他的研究兴趣包括电力系统稳定性和控制、微电网和多能源系统以及智能电网的数据分析。