

DOI:10.12158/j.2096-3203.2021.01.004

含储能的冷热电联供分布式综合能源微网优化运行

耿健^{1,2}, 杨冬梅^{1,2}, 高正平³, 陈永华^{1,2}, 刘刚^{1,2}, 陈卉^{1,2}

(1. 南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司, 江苏 南京 211106; 2. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 211106; 3. 国网江苏省电力有限公司经济技术研究院, 江苏 南京 210008)

摘要: 分布式综合能源微网(DIEM)具有冷/热/电/气多能耦合的典型特征, 如何进行包含冷热电联供(CCHP)和多种储能设备的运行优化, 一直是现阶段研究工作的重点和难点之一。文中建立了储能设备和CCHP系统模型, 基于电/冷/热和烟气余热, 利用平衡等式约束、储能设备充放电约束以及系统各个设备上下限约束, 并通过配置权重系数, 以一个运行周期内运维总成本和CO₂总排放量为综合运行优化目标。构建了某大学城典型场景, 以储能设备为例, 配置储冷设备的容量分别为0 MW, 2 MW, 4 MW, 分析了储能容量对DIEM运行优化的影响。配置合适的储能设备容量, 一个周期内的综合运行优化目标越低, 越能兼顾经济性和碳排放要求。

关键词: 分布式综合能源微网(DIEM); 储能设备; 容量配置; 运行优化; 综合目标

中图分类号: TM73

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2021)01-0025-08

0 引言

能源是推动社会发展和进步的重要动力之一^[1], 随着能源消费总量的日益增长, 环境问题日益严重, 同时也带来能源紧缺和供需不平衡的问题^[2]。如何以现阶段能源利用模式为基础提高能源综合利用效率, 已成为能源领域当今研究的热点和难点之一^[3]。为应对这一挑战, 光伏、风力发电以及燃气轮机等分布式发电(distributed generation, DG)技术^[4]兴起, 这也是各国政府和学者应对能源与环境危机的主要举措之一。以燃气轮机发电机和吸收式制冷/热余热利用设备为代表的冷热电联供(combined cooling heating and power, CCHP)系统^[5]、生物质能利用的热电联产系统(combined heat and power, CHP), 已较为成熟地应用于分布式综合能源微网(distributed integrated energy microgrid, DIEM)中。DIEM能够协同和优化电、热、冷、水、气等各种能源的分配、转化、传输、存储、使用等环节^[6], 提高综合能源利用效率, 改善异质能源的多能互补和梯级利用^[7-8]。

现阶段, 对DIEM的有关研究在概念定义、运行控制、经济性分析与可靠性评估等方面已取得一定成果。文献[9-12]针对典型DIEM, 分别建立DIEM的经济性调度模型和基于储能的多目标协同优化运行模型; 文献[13]从经济、可靠、能耗、环保4

个方面的影响因素进行分析, 建立DIEM的指标评价模型。然而, 针对储能装置容量对含CCHP的DIEM的运行优化影响还有待进一步研究。文献[14]研究了储电/热/冷和混合储能在CCHP机组等设备多能互补协同运行情况下的经济性和可行性; 文献[15]针对DIEM中电/热储能容量配置优化不足的现状, 提出包含电/热储能系统额定容量和功率的配置方法; 文献[16]通过电力市场价格指导DIEM储能设备的运行策略, 以达到经济性最优的目的; 文献[17]提出储电、储热相结合的复合储能技术, 建立CCHP系统拓扑架构、系统模型、多目标函数及约束条件。以上研究虽然在储能对DIEM的运行优化上有所应用, 但是缺少储能容量大小对其影响的分析。

文中以含CCHP的DIEM为研究对象, 首先对DIEM多能耦合特点和储能设备充放电通用模型进行分析; 接着建立CCHP系统的发电及余热利用模型; 然后分别确立综合运行优化目标、电/冷/热和排烟余热平衡条件和设备运行上下限不等式约束; 最后以某大学城场景为具体分析对象, 配置不同储冷容量, 验证储能容量配置对含CCHP的DIEM综合运行优化的影响。

1 DIEM特点及储能模型简介

1.1 DIEM特点

和传统的能源利用方式相比, 多种能源形式强耦合是DIEM的显著特点。

DIEM一般由电/热/冷/气等多种不同能源种类构成, 且异质能源系统之间耦合关系严重。图1

收稿日期: 2020-08-09; 修回日期: 2020-09-16

基金项目: 国家电网有限公司总部科技项目“能源综合服务站为枢纽的电网信息物理系统规划评估及运行策略关键技术”(5700-202018196A-0-0-00)

为 DIEM 多能源系统耦合示意。可以看出, CCHP、燃料电池、气体压缩机、热泵、吸收式制冷机、电制冷机、电制氢、储冷/热/电等能源形式转化和存储设备, 将电/热/冷/气各个能源系统高度关联耦合起来^[18]。多种能源系统间建立模型表达形式不尽相同, 性能特点差别大, 采用的运行控制方法也不同。由于电/热/冷/气多种能源系统间的转化和利用, DIEM 比传统能源系统结构、组成和关系更为复杂。由于组成主体众多, 强耦合性在 DIEM 中体现更加明显。传统单一类型能源系统的建模、运行优化方法不能直接采用。因此, 在 DIEM 运行优化方面, 要加深储能容量对其影响的研究, 使整个能源微网能效最高, 并最大化就地消纳光伏、风电等绿色可再生能源。

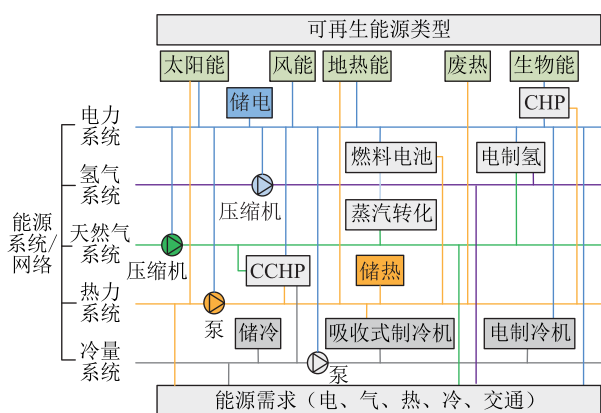


图1 DIEM 多能源系统耦合示意

Fig.1 Schematic diagram of DIEM multi-energy system coupling

1.2 储能设备通用模型

储能设备连接到 DIEM 后, 充能时, 可认为是电/热/冷负荷; 放能时, 可认为是分布式电/热/冷源^[19-20]。建立储能设备通用充放能模型, 如下所示:

$$E_{st,i}(t) = E_{st,i,0} + \sum_{t \in \Phi_{in}} P_{st,i}(t) \eta_{in,i} \Delta t + \sum_{t \in \Phi_{out}} \frac{-P_{st,i}(t)}{\eta_{out,i}} \Delta t \quad (1)$$

式中: Φ_{in} , Φ_{out} 分别为储能设备充、放能时间集合; i 为储能设备类型, 1, 2, 3 分别表示储电、热、冷设备; $E_{st,i}(t)$, $E_{st,i,0}$ 分别为储能设备 t 时段、初始时段储能能量; $P_{st,i}(t)$ 为 t 时段储能设备充/放能功率; $\eta_{in,i}$ 为储能设备充能效率; $\eta_{out,i}$ 为储能设备放能效率; Δt 为相邻时段的时间间隔。

2 CCHP 系统模型

CCHP 系统将天然气燃烧后产生的高品位热能

转换成电能, 同时将做过功的低品位热能用于供热、制冷、干燥或作为生活热水等用途, 实现了能源的梯级利用, 提高了综合利用效率。这种既产电又产热和制冷的先进能源利用方式, 具有显著的经济与环境效益。根据余热回收方式不同, CCHP 系统可分为蒸汽型与烟气型联产系统两大类。文中主要研究烟气型回收方式, 主要由燃气轮机、余热吸收式制冷机、余热锅炉三部分组成。

2.1 燃气轮机模型

燃气轮机主要分为小型燃气轮机和微型燃气轮机。与传统发电设备相比, 小型燃气轮机和微型燃气轮机具有使用寿命长、燃料多元化、运行可靠性高、污染物排放量少和机组控制灵活等优点, 适用于中心城市和远郊农村。其发电效率和制热效率都与设备的部分负载率有关, 下面给出燃气轮机的部分负载下的模型^[21-22]。

$$\eta_{CT,E} = (aP_{lr}^3 + bP_{lr}^2 + cP_{lr} + d) \eta_{CT,nomE} \quad (2)$$

式中: $\eta_{CT,E}$ 为燃气轮机发电效率; P_{lr} 为燃气轮机部分负荷率; $\eta_{CT,nomE}$ 为燃气轮机额定发电效率; 燃气 a, b, c, d 为轮机发电效率系数, 分别取 0.826 4, -2.334, 2.329, 0.179 7。

$$H_{PR} = \eta_{CT,nomH} / \eta_{CT,E} \quad (3)$$

式中: H_{PR} 为燃气轮机热电比; $\eta_{CT,nomH}$ 为燃气轮机额定制热效率。

$$P_{ex} = P_{CT} H_{PR} \eta_r \quad (4)$$

式中: η_r 为联产系统余热回收效率; P_{CT} 为燃气轮机输出功率; P_{ex} 为燃气轮机回收的余热功率。

$$F_{CT} = \frac{P_{CT}}{\eta_{CT,E} H_{NG}} \quad (5)$$

式中: F_{CT} 为燃气轮机天然气消耗量; H_{NG} 为天然气低位热值。

2.2 余热锅炉模型

余热锅炉是将排烟余热热量转化为所需要的热能, 模型表示如下:

$$Q_e = Q_h \eta_{heat} \quad (6)$$

式中: Q_e 为余热锅炉输出的热量; Q_h 为输入余热锅炉的热量; η_{heat} 为余热锅炉制热效率。

$$P_{ex_heat} = \alpha_1 \eta_{heat} P_{ex} \quad (7)$$

式中: α_1 为排烟进入余热锅炉的比例; P_{ex_heat} 为余热锅炉制热功率。

2.3 余热吸收式制冷机模型

在联供系统中, 余热吸收式制冷机是不可或缺的, 是提高能源综合利用效率的重要设备, 也是改善系统运行的主要设备。余热吸收式制冷机组驱动能源为热能, 工质为溴化锂或气水溶液, 利用溶

液吸收和蒸发制冷剂蒸气等特性,通过各种循环流程进行机组制冷循环。余热吸收式制冷机将输入的热量转为冷量输出,模型表示如下:

$$Q_{AR} = C_{AC} Q_{AR,H} \quad (8)$$

式中: Q_{AR} 为余热吸收式制冷机输出的冷量; $Q_{AR,H}$ 为输入余热吸收式制冷机的热量; C_{AC} 为制冷转换性能系数。

$$P_{ex,cool} = \alpha_2 C_{AC} P_{ex} \quad (9)$$

式中: $P_{ex,cool}$ 为余热吸收式制冷机制冷功率; α_2 为排烟进入余热吸收式制冷机的比例。

3 含 CCHP 和储能的优化运行模型

文中构建了考虑 CCHP 和储能设备的目标协调优化模型,其主要作用是实现 DIEM 综合目标最优。计及光伏、风力可再生能源主要采用蒙特卡洛 (Monte Carlo) 抽样方法来进行模拟,并服从贝塔 (Beta) 分布和威布尔 (Weibull) 分布^[23]。此外,文中构建系统和大电网并网连接,当 DIEM 电力供应不足时,会向大电网购电。同时,对于天然气的处理,在此仅当作 CCHP 的燃料使用,不涉及天然气其他功用的负荷。

3.1 运行优化目标

DIEM 在一个调度运行周期 T 内的综合运行优化目标 F_{total} 由运维总费用 C_{total} 和 CO_2 总排放当量 P_{total} 两部分构成^[24]。

$$F_{total} = \omega_1 C_{total} + \omega_2 P_{total} \quad (10)$$

$$\omega_1 + \omega_2 = 1 \quad (11)$$

式中: ω_1 , ω_2 分别为运维总费用、 CO_2 总排放当量权重系数。

C_{total} 主要由从大电网购买电量的电费、消耗天然气费、新增设备日平均购置费用和维护费用四部分构成,具体如下:

$$C_{total} = \sum_{t=1}^T [p_{grid}(t) G_{grid}(t) + p_{gas}(t) G_{gas}(t)] + p_{pur} + p_{main} \quad (12)$$

式中: $p_{grid}(t)$, $p_{gas}(t)$ 分别为 t 时段电、气价; $G_{grid}(t)$, $G_{gas}(t)$ 分别为 t 时段购电、气量; p_{pur} , p_{main} 分别为新增设备日平均购置费用和维护费用。

$$p_{pur} = \sum_{i=1}^I (p_{i,fixed} + C_i p_{i,unit}) / (365 N_{i,des}) \quad (13)$$

式中: $p_{i,fixed}$ 为新增设备 i 的固定投资费用; C_i 为新增设备 i 的容量; $p_{i,unit}$ 为新增设备 i 的单位容量投资费用; $N_{i,des}$ 为新增设备 i 的设计使用年限。

$$p_{main} = \sum_{i=1}^I C_i p_{i,m} \quad (14)$$

式中: $p_{i,m}$ 为新增设备 i 的单位容量日均维护费用。

P_{total} 主要由 DIEM 消耗天然气、外购电力和可再生资源发电的 CO_2 排放当量等几部分构成。

$$P_{total} = \sum_{t=1}^T [c_{grid} G_{grid}(t) + c_{gas} G_{gas}(t) + c_{PV} G_{PV}(t) + c_{WT} G_{WT}(t)] \quad (15)$$

式中: c_{grid} , c_{gas} 分别为每消耗 $1 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 电网外购电力、 1 m^3 天然气的 CO_2 排放当量; c_{PV} , c_{WT} 分别为光伏、风机每生产 $1 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 电力的 CO_2 排放当量; $G_{PV}(t)$, $G_{WT}(t)$ 分别为 t 时段光伏、风机上网电量。

3.2 系统平衡条件约束

DIEM 主要由电、热、冷 3 个能量平衡和烟气余热能量利用平衡条件约束组成,其系统组成如图 2 所示。

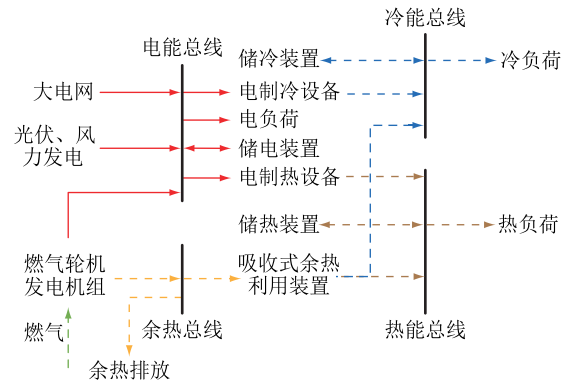


图2 DIEM 系统组成结构

Fig.2 Composition of DIEM system

(1) 电平衡条件约束。

$$P_{DG}(t) + P_{st,1}(t) + P_{grid}(t) = P_{load}(t) + P_{EE}(t) \quad (16)$$

式中: $P_{DG}(t)$ 为 t 时段所有分布式电源的出力功率; $P_{st,1}(t)$ 为 t 时段储电装置的出力功率,大于 0 表示储电装置放电,小于 0 表示储电装置充电; $P_{grid}(t)$ 为 t 时段系统向大电网购电的功率; $P_{load}(t)$ 为 t 时段系统的电负荷需求; $P_{EE}(t)$ 为电能转换装置耗电功率。

$$P_{DG}(t) = P_{PV}(t) + P_{WT}(t) + P_{GE}(t) \quad (17)$$

式中: $P_{PV}(t)$, $P_{WT}(t)$, $P_{GE}(t)$ 分别为 t 时段光伏发电、风力发电和燃气轮机发电机组的发电功率。

$$P_{EE}(t) = P_{EC}(t) + P_{EH}(t) \quad (18)$$

式中: $P_{EC}(t)$, $P_{EH}(t)$ 分别为 t 时段电制冷、热机耗电功率。

(2) 热平衡条件约束。

$$P_{EH,1}(t) + P_{st,2}(t) + P_{ex,heat}(t) = P_{heat}(t) \quad (19)$$

式中: $P_{EH,1}(t)$ 为 t 时段电制热机输出制热功率; $P_{ex,heat}(t)$ 为 t 时段余热锅炉制热功率; $P_{st,2}(t)$ 为 t 时段储热装置的出力功率,大于 0 表示储热装置放热,小于 0 表示储热装置充热; $P_{heat}(t)$ 为 t 时段系

统的热负荷需求。

$$P_{EH,1}(t) = \alpha_{heat} P_{EH}(t) \quad (20)$$

式中: α_{heat} 为电制热机的制热系数。

(3) 冷平衡条件约束。

$$P_{EC,1}(t) + P_{st,3}(t) + P_{ex_cool}(t) = P_{cool}(t) \quad (21)$$

式中: $P_{EC,1}(t)$ 为 t 时段电制冷机输出制冷功率; $P_{ex_cool}(t)$ 为 t 时段余热吸收式制冷机制冷功率; $P_{st,3}(t)$ 为 t 时段储冷装置的出力功率, 大于 0 表示储冷装置放冷, 小于 0 表示储冷装置充冷; $P_{cool}(t)$ 为 t 时段系统的冷负荷需求。

$$P_{EC,1}(t) = \alpha_{cool} P_{EC}(t) \quad (22)$$

式中: α_{cool} 为电制冷机的制冷系数。

(4) 储能设备充/放能平衡条件约束。在一个调度周期内 T (通常为 1 d), 若储能设备起始工作的时间为 t_0 , 则应有:

$$E_{st,i}(t_0) = E_{st,i}\left(t_0 + \frac{T}{\Delta t}\right) = E_{st,i,0} \quad (23)$$

(5) 排烟平衡条件约束。

$$\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 1 \quad (24)$$

式中: α_3 为排烟未被利用的比例。

3.3 设备运行条件约束

$$P_{grid,MIN} \leq P_{grid}(t) \leq P_{grid,MAX} \quad (25)$$

式中: $P_{grid,MIN}$, $P_{grid,MAX}$ 分别为微网与大电网之间按照合同允许传输的最小和最大功率。

$$P_{GE,MIN} \leq P_{GE}(t) \leq P_{GE,MAX} \quad (26)$$

式中: $P_{GE,MIN}$, $P_{GE,MAX}$ 分别为燃气轮机的最小、最大发电功率。

$$\begin{cases} E_{st,i,MIN} \leq E_{st,i}(t) \leq E_{st,i,MAX} \\ P_{st,i,MIN} \leq P_{st,i}(t) \leq P_{st,i,MAX} \\ S_{st,i,MIN} \leq S_{st,i}(t) \leq S_{st,i,MAX} \end{cases} \quad (27)$$

式中: $E_{st,i,MIN}$, $E_{st,i,MAX}$ 分别为储能设备充/放能时的最小、最大运行容量。 $P_{st,i,MIN}$, $P_{st,i,MAX}$ 分别为储能设备充/放能时的最小、最大运行功率; $S_{st,i}(t)$ 为储能设备当前储能状态, 即剩余储能量; $S_{st,i,MIN}$, $S_{st,i,MAX}$ 分别为储能设备充/放能时的最小、最大运行荷电状态 (state of charge, SOC)。

$$\begin{cases} P_{EH,MIN} \leq P_{EH}(t) \leq P_{EH,MAX} \\ P_{EH,1,MIN} \leq P_{EH,1}(t) \leq P_{EH,1,MAX} \end{cases} \quad (28)$$

式中: $P_{EH,MIN}$, $P_{EH,MAX}$ 分别为电制热机的最小、最大耗电功率。 $P_{EH,1,MIN}$, $P_{EH,1,MAX}$ 分别为电制热机的最小、最大输出制热功率。

$$\begin{cases} P_{EC,MIN} \leq P_{EC}(t) \leq P_{EC,MAX} \\ P_{EC,1,MIN} \leq P_{EC,1}(t) \leq P_{EC,1,MAX} \end{cases} \quad (29)$$

式中: $P_{EC,MIN}$, $P_{EC,MAX}$ 分别为电制冷机的最小、最大耗电功率; $P_{EC,1,MIN}$, $P_{EC,1,MAX}$ 分别为电制冷机的最

小、最大输出制冷功率。

$$P_{ex_heat,MIN} \leq P_{ex_heat}(t) \leq P_{ex_heat,MAX} \quad (30)$$

式中: $P_{ex_heat,MIN}$, $P_{ex_heat,MAX}$ 分别为余热锅炉的最小、最大制热功率。

$$P_{ex_cool,MIN} \leq P_{ex_cool}(t) \leq P_{ex_cool,MAX} \quad (31)$$

式中: $P_{ex_cool,MIN}$, $P_{ex_cool,MAX}$ 分别为余热吸收式制冷机的最小、最大制冷功率。

3.4 求解方法

含 CCHP 和储能设备的 DIEM 运行优化求解问题, 属于典型的多约束多变量的动态规划求解问题。文中采用商业化的 Cplex 软件进行问题求解, 具有求解速度快、求解精度高等优点, 已在部分多能系统优化调度软件开发中应用。

4 算例分析

4.1 基础数据

文中选取国内某大学城为研究对象^[25], 主要的基本参数如表 1 所示。其中, 余热吸收式制冷机和余热锅炉利用排烟的比例为 4:1, 排烟全部来自燃气轮机; 储冷设备漏能率为 0.15%/h, 最大充/放能功率均为 0.3 MW, SOC 运行区间为 [5%, 95%], 初始 SOC 为 50%。分时天然气价格取 2.4 元/m³, 且低位热值为 36 MJ/m³, 分时电价如图 3 所示。文中仅进行一天 24 h 的典型日各个设备日前出力情况分析, 并以 1 h 划分为调度子时段, 夏季典型日冷热电负荷、可再生能源出力曲线分别如图 4、图 5 所示, 组成拓扑示意如图 6 所示。

表 1 设备基本性能参数

Table 1 Basic performance parameters of equipment

设备名称	台数	最大出力/MW	最小出力/MW	其他参数
光伏发电机组	2	0.4	0	
风力发电机组	2	0.2	0	
燃气轮机	1	4	0.8	热电比 1.85, 发电效率 30%
余热吸收式制冷机	1	4	0	制冷性能系数 1.5
电制冷机	1	3	0	制冷性能系数 3.25
余热锅炉	1	1	0	制热效率 85%
电制热机	1	1.5	0	制热效率 96%

4.2 案例分析

为验证多能耦合系统下储能容量大小对含 CCHP 的 DIEM 运行优化的影响, 选取储冷设备容量为单一变化量进行比较。运维总费用、CO₂ 总排放当量权重系数分别为 30% 和 70%, 每消耗 1 kW·h 电网外购电力、1 m³ 天然气的 CO₂ 排放当量分别为

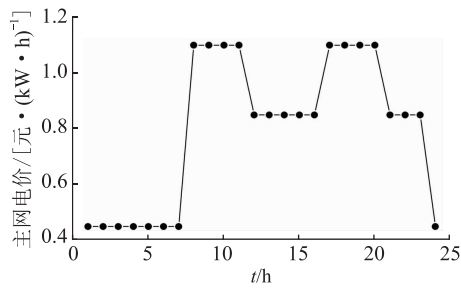


图3 主网购电分时电价曲线

Fig.3 Time sharing price of main network power purchase

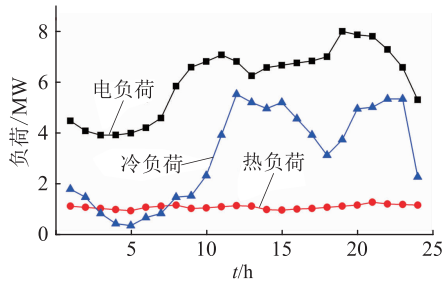


图4 典型调度日负荷情况曲线

Fig.4 Typical daily dispatching load

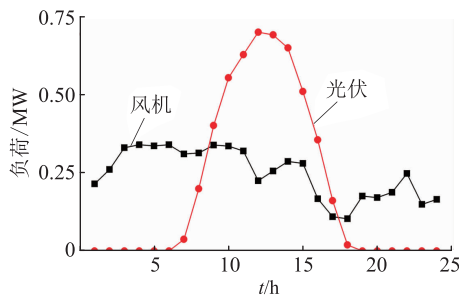


图5 典型调度日可再生能源出力曲线

Fig.5 Typical dispatch daily renewable energy output

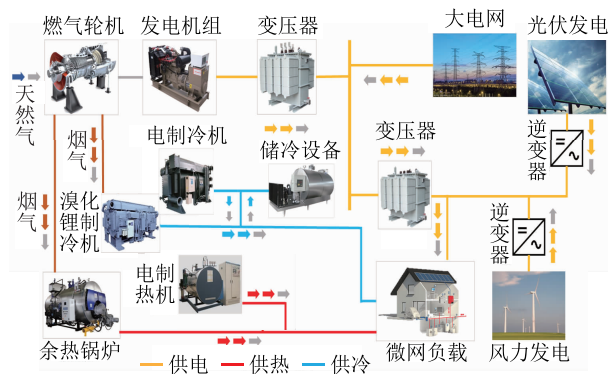


图6 场景组成拓扑

Fig.6 Topology of scene composition

0.997 kg/(kW·h) 和 1.76 kg/m³, 光伏、风机每生产 1 kW·h 电力的 CO₂ 排放当量分别为 0.032 kg/(kW·h) 和 0.009 kg/(kW·h)^[24]; 储冷设备设计使用年限为 10 a, 其固定投资费用为 239 700 元, 单位容量投资

费用为 945 元/(kW·h), 单位容量日均维护费用 0.25 元/(kW·h)。比较以下 3 种情景的优化结果。情景一: 无储冷设备; 情景二: 配置储冷设备的容量为 2 MW·h; 情景三: 配置储冷设备的容量为 4 MW·h。各个设备的运行优化的出力结果如图 7—图 10 所示。

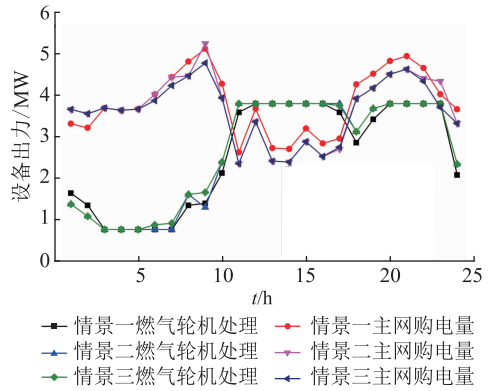


图7 不同情景下发电设备出力情况

Fig.7 Power generation output under different cases

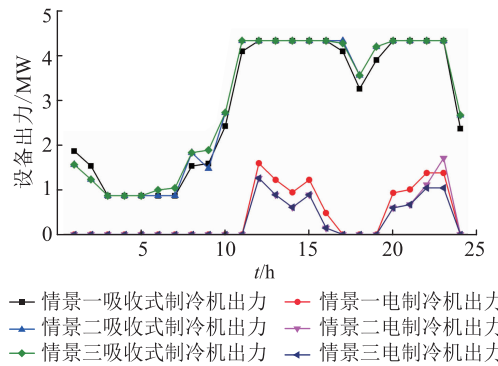


图8 不同情景下制冷设备出力情况

Fig.8 Refrigeration output under different cases

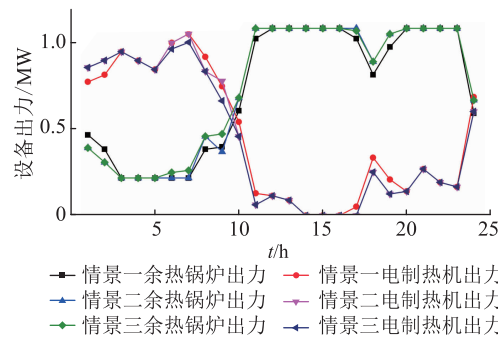


图9 不同情景下制热设备出力情况

Fig.9 Heating equipment output under different cases

图 7 显示配置储冷设备容量越大, 在 01:00—03:00 凌晨谷电时, 从主网的购电量越多, 燃气轮机出力也越小, 并且在谷电价时, 燃气轮机的出力普遍较低。图 8 显示在冷负荷需求较大时, 12:00—16:00 电制冷机的出力会随着储冷容量的增大而降

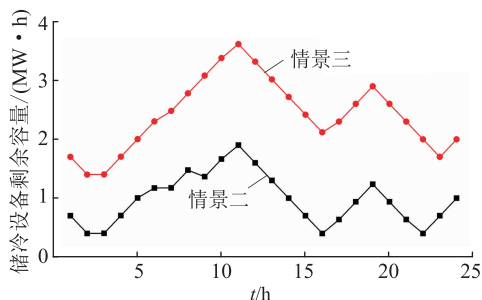


图 10 不同情景下储能设备状态情况

Fig.10 Status of energy storages under different cases

低,从主网购得的峰电会减少。而在 01:00—11:00,吸收式制冷机输出冷负荷较多,就能满足冷负荷需求,电制冷机不工作。图 9 显示电制热机在 01:00—12:00 都工作,用以补充 CCHP 机组在低功率下的产热。图 10 显示储冷设备普遍在 03:00—07:00 夜晚谷电时进行充能,在 08:00—11:00 冷负荷需求处于上升阶段,但是 CCHP 系统出力也处于上升阶段,储冷设备将未利用的冷能进行存储,并在 12:00—16:00 进行放能;虽然储冷设备容量越大,放的冷能更多,但是并未与容量大小成正比。

表 2 为不同情景下一个周期在综合考虑运维总成本和 CO₂排放当量时的综合运行优化目标情况。针对文中情景,配置储冷设备容量为 0 MW·h, 2 MW·h, 4 MW·h 的运维总成本分别为 125 153.77 元, 123 185.12 元, 123 963.95 元, CO₂排放当量分别为 210 370 kg, 208 263 kg, 208 198 kg。配置容量为 2 MW·h 的时候,虽然 CO₂排放当量比配置容量为 4 MW·h 时多一些,但是经济性和综合运行优化目标会更好,配置储冷设备优于未配置。储冷设备容量为 2 MW·h 时,运维总成本和综合运行优化目标最低,没有造成储冷设备容量过度配置,更好地实现了本场景兼顾经济性和碳排放运行优化的目的。

表 2 不同情景的一个周期综合优化目标情况

Table 2 One cycle comprehensive optimization objective under different cases

情景	综合运行优化目标	购电费/元	购气费/元	日均新增设备购置维护费/元	CO ₂ 总排放当量/kg
一	184 800.35	78 514.96	46 638.81	0	21 0370
二	182 740.18	74 619.83	47 481.81	1 083.48	20 8263
三	182 928.41	73 937.52	47 925.14	2 101.29	20 8198

5 结论

建立区域 DIEM 系统是实现多能互补利用、提升可再生能源渗透消纳率和提高能源综合利用效率的重要手段。结合文中研究,主要得到如下结论:

(1) 文中充分考虑到电/热/冷和烟气余热利用平衡约束、燃气轮机等各个设备不等式约束,构建了由运维总成本和 CO₂排放当量组成的综合运行优化多目标模型。

(2) 算例分析结果表明,配置储冷设备容量为 2 MW·h 时一个周期运维总成本比为 4 MW·h 时少 778.83 元, CO₂排放当量多 65 kg,但综合运行优化目标为 3 种情景中最高的,验证了文中所述模型和方法的有效性和合理性。

(3) 选择合适的储能设备容量,可使一个周期内的运维总成本和综合运行优化目标相对较低,从而更好地满足 DIEM 系统兼顾经济性和碳排放运行优化的需求,具有一定的实际工程指导意义。

文中对分布式能源设备出力模型和运行方式进行了简化和线性化处理,未计及部分设备的变工况特性和启停特性。另外,对各类储能设备更加精准化建模,以及储能设备对 DIEM 系统时间和空间上转移特性对运行优化的影响,是今后的研究重点。

参考文献:

[1] WANG Dan, LIU Liu, JIA Hongjie, et al. Review of key problems related to integrated energy distribution systems [J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2018, 4(2): 130-145.

[2] 鲁宗相,李海波,乔颖. 含高比例可再生能源电力系统灵活性规划及挑战[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(13): 147-158. LU Zongxiang, LI Haibo, QIAO Ying. Power system flexibility planning and challenges considering high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(13): 147-158.

[3] 康重庆,姚良忠. 高比例可再生能源电力系统的关键科学问题与理论研究框架[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 2-11. KANG Chongqing, YAO Liangzhong. Key scientific issues and theoretical research framework for power systems with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 2-11.

[4] 殷爽睿,艾芊,曾顺奇,等. 能源互联网多能分布式优化研究挑战与展望[J]. 电网技术, 2018, 42(5): 1359-1370. YIN Shuangrui, AI Qian, ZENG Shunqi, et al. Challenges and prospects of multi-energy distributed optimization for energy internet[J]. Power System Technology, 2018, 42(5): 1359-1370.

[5] ZHANG Junli, GE Bin, XU Hongsheng. An equivalent marginal cost-pricing model for the district heating market [J]. Energy Policy, 2013, 63: 1224-1232.

[6] 曾鸣,杨雍琦,刘敦楠,等. 能源互联网“源-网-荷-储”协调优化运营模式及关键技术[J]. 电网技术, 2016, 38(1): 124-134. ZENG Ming, YANG Yongqi, LIU Dunnan, et al. "Generation-grid-load-storage" coordinative optimal operation mode of energy internet and key technologies[J]. Power System Technology,

- 2016,386(1):124-134.
- [7] GUPTA R A, GUPTA N K. A robust optimization based approach for microgrid operation in deregulated environment [J]. *Energy Conversion & Management*, 2015, 93: 121-131.
- [8] 冯威, 鲁虹佑, CHRIS Marnay, 等. 美国分布式综合能源微网系统发展[J]. *中国电力*, 2019, 52(6): 45-51.
FENG Wei, LU Hongyou, CHRIS Marnay, et al. Development of distributed energy microgrid system in U.S. [J]. *Electric Power*, 2019, 52(6): 45-51.
- [9] 肖浩, 裴玮, 孔力, 等. 综合能源微网运行优化调度方法研究[J]. *电工电能新技术*, 2016, 35(12): 1-11.
XIAO Hao, PEI Wei, KONG Li, et al. Research on optimal operation method of integrated energy microgrid system [J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2016, 35(12): 1-11.
- [10] 徐海华, 王旭东, 朱星阳, 等. 用户侧综合能源系统中能源储能优化配置模型研究[J]. *电力需求侧管理*, 2020, 22(2): 13-20.
XU Haihua, WANG Xudong, ZHU Xingyang, et al. Research on the optimal configuration of energy storage in user side integrated energy system [J]. *Power Demand Side Management*, 2020, 22(2): 13-20.
- [11] 薛少华, 李宁, 周星明, 等. 考虑综合需求响应的综合能源系统优化运行[J]. *电力需求侧管理*, 2020, 22(5): 7-12.
XUE Shaohua, LI Ning, ZHOU Xingming, et al. Optimal operation of integrated energy system considering integrated demand response [J]. *Power Demand Side Management*, 2020, 22(5): 7-12.
- [12] 曾鸣, 韩旭, 李源非, 等. 基于 Tent 映射混沌优化 NSGA-II 算法的综合能源系统多目标协同优化运行[J]. *电力自动化设备*, 2017, 37(6): 220-228.
ZENG Ming, HAN Xu, LI Yuanfei, et al. Multi-objective cooperative optimization based on Tent mapping chaos optimization NSGA-II algorithm for integrated energy system [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2017, 37(6): 220-228.
- [13] 张世翔, 吕帅康. 面向园区微电网的综合能源系统评价方法[J]. *电网技术*, 2018, 42(8): 32-39.
ZHANG Shixiang, LYU Shuaikang. Evaluation method of park-level integrated energy system for micro-grid [J]. *Power System Technology*, 2018, 42(8): 32-39.
- [14] 熊文, 刘育权, 苏万煌, 等. 考虑多能互补的区域综合能源系统多种储能优化配置[J]. *电力自动化设备*, 2019, 39(1): 124-132.
XIONG Wen, LIU Yuquan, SU Wanhuang, et al. Optimal configuration of multi-energy storage in regional integrated energy system considering multi-energy complementation [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2019, 39(1): 124-132.
- [15] 赵冬梅, 夏轩, 陶然. 含电转气的热电联产微网/热综合储能优化配置[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(17): 46-54.
ZHAO Dongmei, XIA Xuan, TAO Ran. Optimal configuration of electric/thermal integrated energy storage for combined heat and power microgrid with power to gas [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(17): 46-54.
- [16] 马恒瑞, 王波, 高文忠, 等. 区域综合能源系统中储能设备参与辅助服务的运行优化[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(8): 47-59, 95.
MA Hengrui, WANG Bo, GAO Wenzhong, et al. Operation optimization of energy storage equipment participating in auxiliary service in regional integrated energy system [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(8): 47-59, 95.
- [17] 赵永杰, 林仕立, 涂小琳, 等. 含复合储能的冷热电联供系统多目标运行优化研究[J]. *新能源进展*, 2019(4): 325-332.
ZHAO Yongjie, LIN Shili, TU Xiaolin, et al. Study on multi-objective optimization of microgrid with hybrid energy storage system [J]. *Advances in New and Renewable Energy*, 2019(4): 325-332.
- [18] 王守相, 张齐, 王瀚, 等. 高可再生能源渗透率下的区域多微网系统优化规划方法[J]. *电力自动化设备*, 2018, 38(12): 33-38, 52.
WANG Shouxiang, ZHANG Qi, WANG Han, et al. Optimal planning method for regional multi-microgrid system with high renewable energy penetration [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2018, 38(12): 33-38, 52.
- [19] 任佳依, 顾伟, 王勇, 等. 基于模型预测控制的主动配电网多时间尺度有功无功协调调度[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(5): 1397-1407.
REN Jiayi, GU Wei, WANG Yong, et al. Multi-time scale active and reactive power coordinated optimal dispatch in active distribution network based on model predictive control [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(5): 1397-1407.
- [20] 吴霜, 季聪, 孙国强. 含分布式储能的配电网多目标运行优化策略研究[J]. *电力工程技术*, 2018, 37(2): 20-26.
WU Shuang, JI Cong, SUN Guoqiang. Multiple objection operation strategy optimization research of distribution network including distributed energy storage [J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2018, 37(2): 20-26.
- [21] 卢欣. 综合能源服务技术与商业模式[M]. 北京: 中国电力出版社, 2018: 101-106.
LU Xin. *Integrated energy service technology and business model* [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2018: 101-106.
- [22] 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, 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.
- [23] 吴晨曦, 文福拴, 李梅. 计及储能系统充放电策略的风光混合发电系统容量优化[J]. *华北电力大学学报(自然科学版)*, 2014, 41(4): 22-29.
WU Chenxi, WEN Fushuan, LI Mei. Determining the optimal

wind turbine and photovoltaic installed capacities in a hybrid generation system[J]. Journal of North China Electric Power University(Natural Science Edition),2014,41(4):22-29.

[24] 蒋超凡,艾欣. 计及多能耦合机组不确定性的综合能源系统运行优化模型研究[J]. 电网技术,2019,43(8):2843-2852.

JIANG Chaofan,AI Xin. Integrated energy system operation optimization model considering uncertainty of multi-energy coupling units[J]. Power System Technology,2019,43(8):2843-2852.

[25] ZHANG Xiaochen,YANG Dongmei,DU Wei, et al. Research on operation optimization method of regional integrated energy system[C]//2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia(ISGT Asia). IEEE,2019.

[26] 生产一度电要排放多少二氧化碳? [EB/OL].(2013-01-

08) [2020-08-22]. <http://www.sxlantian.com/news/422/.html>.

How much carbon dioxide does it take to produce electricity per kilowatt hour? [EB/OL]. (2013-01-08) [2020-08-22]. <http://www.sxlantian.com/news/422/.html>.

作者简介:



耿健

耿健(1991),男,硕士,工程师,从事综合能源规划与优化相关工作(E-mail:gengjian1@sgepri.sgcc.com.cn);

杨冬梅(1983),女,硕士,高级工程师,从事电力系统自动化相关工作;

高正平(1976),男,博士,教授级高级工程师,从事电力系统相关工作。

Optimal operation of distributed integrated energy microgrid with CCHP considering energy storage

GENG Jian^{1,2}, YANG Dongmei^{1,2}, GAO Zhengping³, CHEN Yonghua^{1,2}, LIU Gang^{1,2}, CHEN Hui^{1,2}

(1. NARI Group (State Grid Electric Power Research Institute) Co.,Ltd.,Nanjing 211106,China;

2. NARI Technology Co.,Ltd.,Nanjing 211106,China;3. State Grid Jiangsu Electric

Power Co.,Ltd. Economic Research Institute,Nanjing 210008,China)

Abstract: Distributed integrated energy microgrid has the typical characteristics of cold / heat / electricity / gas multi energy coupling. How to optimize the operation of the combined cooling, heat and power supply and a variety of energy storage equipment has been one of the key and difficult research work at this stage. In this paper, the model of energy storage equipment and combined cooling heating and power(CCHP) system are established, which are based on the constraints of balance equation of electricity/cooling/heating and flue gas waste heat utilization, charge and discharge of energy storage equipment, upper and lower limits of each equipment in the system, the comprehensive operation optimization objective is operation economy and total CO₂ emission in one operation cycle by configuring weight coefficient. A typical scenario of a university town is constructed, taking the cold storage equipment as an example, the capacity of energy storage equipment are 0 MW, 2 MW, 4 MW, and the influence of energy storage capacity on the operation optimization of distributed energy microgrid is analyzed. With the appropriate capacity of energy storage equipment, the lower the comprehensive operation optimization goal in a cycle, the better the requirements of economy and environmental protection can be considered.

Keywords: distributed integrated energy microgrid(DIEM); energy storage equipment; capacity configuration; operational optimization; comprehensive objective

(编辑 钱悦)