Vol.37 No.6 Jun. 2017

275

# 含可再生能源的微网冷-热-电多能流 协同优化与案例分析

甘霖1,陈瑜玮2,刘育权1,熊 文1,汤 磊3,潘昭光2,郭庆来2

(1. 广州供电局有限公司,广东 广州 510620;2. 清华大学 电机系 电力系统及发电设备控制和

仿真国家重点实验室,北京 100084;3. 北京清大高科系统控制有限公司,北京 102208)

摘要:能源互联网概念被提出且得到了飞速发展,含可再生能源和高能源利用率的冷热电联供系统的微网 也受到极大的关注。建立了一个含有可再生能源以及冷、热、电多种能源形式的微网优化运行模型,以整体 运营成本最小为目标函数,考虑不同能量形式之间的转化效率以及多种类型发电与储能的约束条件,实现多 能流综合利用与协同优化,满足最终用户的多类型负荷需求。面向某实际园区,在算例中对实际案例进行分 析。算例结果表明所建立的模型能有效优化冷热电能源分配,降低微网成本,利用多种能源形式的相互协同 可明显提高可再生能源的消纳。

关键词:微网:多能流:协同优划:冷热电联供:可再生能源

中图分类号: TM 761 文献标识码: A

# 0 引言

目前,传统化石能源的短缺问题越来越严重<sup>[1-2]</sup>, 环境污染问题也成为人们关注的重点之一<sup>[3]</sup>。同时 随着网络概念的不断深化,其逐渐和能源的概念相 互融合,产生了"以电力系统为核心","以分布式可 再生能源为主要一次能源","与其他系统紧密耦合" 的能源互联网概念<sup>[4]</sup>。

能源互联网要求更加高效、可持续地利用能源[5]. 其重要特征之一就是打破传统能源供给相互孤立的 藩篱,实现多种能源形式的协同优化,而含冷热电联 供(CCHP)与分布式可再生能源的微网是一种典型 的能源互联网实现形式。CCHP 是一种建立在能量 梯级利用思想基础上的系统,同时整合了冷、热、电 3种能源形式,主要通过以天然气为主的燃料发电, 同时利用余热进行供热及供冷,其能源综合利用率能 够达到80%6。微网则一般以可再生能源、储能设 备及小型燃气轮机作为分布式电源向用户供电??。 但由于可再生能源具有时间、空间分布上的随机性, 与负荷有时间上的不匹配性,微网并不能最大限度利 用可再生能源。当 CCHP 作为一种分布式电源加入 微网中后,微网不仅仅局限于电能的供给,而将成为 一个冷热电多能流综合协调运行的整体,协调好冷 热电多能流的优化运行,能有效降低系统总运行成 本,同时多能流的转化也能提高可再生能源的消纳。

收稿日期:2017-03-02;修回日期:2017-05-17

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFB0901300);国家自然科学基金资助项目(51537006)

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.06.036

目前已有许多关于微网及 CCHP 的研究。文献 [8]提出了一种基于微网的 CCHP 系统建模方式,对 系统各个电气设备独立建模,并对系统进行了日前动 态经济调度优化:对于一般含 CCHP 的微网模型,文 献[9]提出一种优化方法,能对系统的配置和运行进 行优化:考虑到可再生能源随机性的问题,文献[10] 研究了热电联合型微网在可再生能源随机波动影响 下的经济优化:文献[11]研究了含可再生能源的热 电联合微网的优化问题。文献[12]在上述研究的基 础上主要考虑了风电出力波动性对热电联合微网建 模和优化的影响。此外,还有不少文献对含 CCHP 及 可再生能源的微网进行了研究[13-18],分别对其在减少 排污、降低运行费用、运行优化等方面进行了探讨。 其中,文献「13]建立了冷热电多能流微网的调度和 规划模型,并通过算例说明了模型的有效性;文献 [14]研究了冷热电多能流微网的多目标优化问题; 文献[15]研究了 CCHP 系统和光伏的联合调度问题; 文献[16]研究了热电联产机组在提升风电消纳方面 的作用;文献[18]研究了冷热电多能系统的规划问 题。文献[19]在融合需求侧虚拟储能的基础上,研 究了冷热电楼宇微网的优化调度问题。文献[20]研 究了分布式 CCHP 系统的优化调度问题,并对适用性 进行了分析。

上述关于含有可再生能源多能流微网的研究主 要着眼于含 CCHP 或热电联供(CHP)的微网模型建 立、微网的规划建设和可再生能源波动性的处理,以 及加入冷热能流后对可再生能源利用率的影响和冷 热电不同类型储能的加入对整体微网的优化效果。 但是以上研究中,算例分析大多基于假设的测试系 统,很少有面向实际案例的研究。

Project supported by the National Key R&D Program of China(2016YFB0901300) and the National Natural Science Foundation of China(51537006)

针对这几个方面,本文主要基于含风电和光伏等 可再生能源的微网系统,考虑供冷、供热及供电等多 种能源需求,建立了含可再生能源的多能流微网优化 模型;同时考虑到冷热电的相互耦合关系和多种储 能形式,研究了在多能流协同优化下优化模型对微网 整体运行成本的优化作用,以及冷热能流加入后对可 再生能源消纳量的影响;通过算例分析和对比证明了 优化模型的有效性。

## 1 含可再生能源 CCHP 微网模型

一般微网的组成主要包括各种分布式电源、储 能设备、用电设备等。而加入热与冷 2 种能流后,微 网整合了冷、热、电多种能量形式,在提供电能的同 时也能够供热及供冷,同时配备了储电、储冷、储热 等多种储能形式。含可再生能源 CCHP 微网的结构 一般如图 1 所示。



图 1 含可再生能源 CCHP 微网结构图 Fig.1 Structure of microgrid with CCHP system, including renewable energy resources

该微网主要由可再生能源、各种储能装置、用户 负荷、CCHP系统组成。为了增加系统的灵活性,加 入了电热转换及电冷转换设备,可将电能转换为热 和冷。其中 CCHP 能够同时为微网提供冷热电。一 种简化的 CCHP 模型如图 2 所示。



#### 图 2 CCHP 模型示意图

Fig.2 Schematic diagram of CCHP model

由图 2 可见, CCHP 通过燃烧燃气, 用燃气内燃 机发电来提供电力。而燃烧产生的余热进入余热锅

炉,这部分余热不仅可以通过制冷单元制冷来提供 冷负荷所需,还可以通过回热器回收热量来供热,这 两方面所占的能量比例能够通过实际需求进行调 配。余热锅炉的存在使得供热或供冷不足时,运行 人员可以通过向余热锅炉中补燃天然气来提供额外 的热量用于供热或制冷。同时可再生能源和上级电 网也为电负荷供电,通过电冷、电热转换设备可将 多余的电能转换为冷和热,这也是冷热电多能流微网 消纳电能的途径之一。

# 2 含可再生能源微网冷热电协同优化模型

与常规的微网不同,含可再生能源的 CCHP 微网 由于具有冷、热、电多种能流,其优化研究更为复杂 和困难。优化协调好 3 种能量的调度和转化是实现 微网整体经济性和提高能源利用率的基本条件。下 面对含可再生能源的 CCHP 微网协同优化模型进行 阐述。

#### 2.1 可再生能源及冷热电负荷模型

模型中的可再生能源主要为风电及光伏。为了 充分利用可再生能源,假设风电和光伏均工作在最大 功率点跟踪模式下,可以用一条可再生能源的预测曲 线来表示一天内的出力。为了使得优化调度策略更 为灵活,模型允许优化策略决定风电以及光伏的投入 或切除,引入 0-1 变量 k<sub>j</sub>(i)来控制可再生能源是否 投入。可再生能源机组投入运行后成本很低,在本模 型中不忽略其运行和维护成本。本文中用发电成本 参数 C<sub>1</sub>、运行维护成本 C<sub>2</sub> 及停机维护成本 C<sub>3</sub>来描述 可再生能源机组 j 的成本 C<sub>i</sub>(i),可以表述如下:

 $C_{j}(i) = (C_{1}P_{j}(i) + C_{2})k_{j}(i) + C_{3}(1 - k_{j}(i))P_{j\max}$ (1)

 $P_j(i)$ 为可再生能源机组j的出力,满足功率约束:

$$P_{j\min} \leq P_i(i) \leq P_{j\max}$$

(2)

其中, P<sub>jmax</sub>、P<sub>jmin</sub>分别为可再生能源机组 j 出力的上、 下限。

在本模型中,冷热电负荷均视为可以通过历史数 据进行预测的值,通过预测曲线给出。

#### 2.2 CCHP 模型

对于图 2 所示 CCHP 模型,其机组 *l* 的电输出功 率约束及爬坡约束如下:

$$P_{l\min} \leqslant P_l(i) \leqslant P_{l\max} \tag{3}$$

$$-R_{\mathrm{D}l} \leqslant P_l(i+1) - P_l(i) \leqslant R_{\mathrm{U}l} \tag{4}$$

其中, $P_{lmax}$ 、 $P_{lmin}$ 分别为 CCHP 机组 l 电输出功率上、 下限; $R_{Dl}$ 、 $R_{Ul}$ 分别为电输出功率的向下、向上爬坡 速率。

在本文中考虑 CCHP 机组 l 的输出电功率  $P_l(i)$  与输入的燃气量  $F_l(i)$ 满足线性关系:

$$a_{\rm f}P_l(i) + b_{\rm f} = F_l(i) \tag{5}$$

其中,a<sub>f</sub>、b<sub>f</sub>分别为线性关系的一次项和常数项系数。

$$\eta_{\mathrm{FH}} F_{l}(i) + \eta_{\mathrm{b}} F_{l-\mathrm{b}}(i) \geq H_{l}(i) / \eta_{\mathrm{hex}} + L_{l}(i) / \eta_{\mathrm{COP}} \qquad (6)$$
$$0 \leq \eta_{\mathrm{FH}} F_{l}(i) + \eta_{\mathrm{b}} F_{l-\mathrm{b}}(i) \leq H_{l_{\mathrm{max}}} \qquad (7)$$

其中, $\eta_{\rm FH}$ 为 CCHP 中内燃机余热回收系数; $\eta_b$ 为锅 炉补燃热效率; $\eta_{\rm bex}$ 为换热器效率; $\eta_{\rm COP}$ 为制冷机制 冷系数; $H_{l_{\rm max}}$ 为 CCHP 机组 l 中余热锅炉最大运行 功率; $F_l(i)$ 为i时段 CCHP 机组 l 中ດ燃机消耗的天 然气流量; $F_{l-b}(i)$ 为i时段 CCHP 机组 l 中余热锅炉 补偿消耗天然气流量; $H_l(i)$ 为 CCHP 机组 l 中余热 锅炉回热器的热输出功率; $L_l(i)$ 为 CCHP 机组 l 中制 冷设备的制冷输出功率。 $F_l(i)$ 和  $F_{l-b}(i)$ 通过热量来 计量。

### 2.3 储能设备模型

模型中使用电储能、热储能及冷储能3种不同类 型的储能设备来保证调度策略的灵活性。

电储能主要由蓄电池组成,考虑其充放电的最大 功率、容量约束以及充放电效率和互补约束,其运行 约束如下:

$$0 \leq P_{\rm dis}(i), P_{\rm char}(i) \leq P_{\rm max} \tag{8}$$

$$\operatorname{SOC}(i) = \operatorname{SOC}(i-1) + \eta_{\rm c} P_{\rm char}(i) - P_{\rm dis}(i) / \eta_{\rm d} \qquad (9)$$

$$\operatorname{SOC}_{\min} \leq \operatorname{SOC}(i) \leq \operatorname{SOC}_{\max}$$
 (10)

$$P_{\rm dis}(i)P_{\rm char}(i)=0 \tag{(1)}$$

其中, $P_{char}(i)$ 和 $P_{dis}(i)$ 分别为电储能的充、放电功率,  $P_{max}$ 为其最大值;SOC(i)为i时段电储能的容量; $\eta_c$ 和  $\eta_d$ 分别为电储能的充电和放电效率;SOC<sub>min</sub>和SOC<sub>max</sub> 分别为电储能的容量最小值和最大值。式(11)为电 储能的互补约束,限制了在同一时刻储能只能进行充 电或放电。电储能的耗散很小,模型中不予考虑。

热储能与冷储能的模型相似,均有以下特征:随时间消散;储放时存在损耗。以热储能为例,其一般 模型可以归纳如下:

$$0 \leq H_{\mathrm{TI}}(i), H_{\mathrm{TO}}(i) \leq H_{\mathrm{TI},\mathrm{TO},\mathrm{max}}$$
(12)

$$H_{\rm T}(i) = \eta_{\rm T} H_{\rm T}(i-1) + \eta_{\rm TI} H_{\rm TI}(i) - H_{\rm TO}(i) / \eta_{\rm TO}$$
(13)

$$0 \leq H_{\mathrm{T}}(i) \leq H_{\mathrm{T,max}} \tag{14}$$

$$H_{\rm TI}(i)H_{\rm T0}(i)=0$$
 (15)

其中, $H_{TI}(i)$ 和 $H_{TO}(i)$ 分别为储热装置的充、放热 功率, $H_{TI,TO,max}$ 为其最大值; $H_{T}(i)$ 为*i*时段储热装置 储热水平; $\eta_{TI}$ 和 $\eta_{TO}$ 分别为储热装置的充热和放热 效率; $1-\eta_{T}$ 为储热装置经过单位时间后的损耗率;  $H_{T,max}$ 为储热装置的储热容量。储能设备的运行成 本表述如下:

$$C_{\text{storage}}(i) = C_{\text{EES}}(P_{\text{char}}(i) + P_{\text{dis}}(i)) + C_{\text{TES}}(H_{\text{TI}}(i) + H_{\text{TO}}(i)) + C_{\text{CFS}}(L_{\text{TI}}(i) + L_{\text{TO}}(i))$$
(16)

其中, $C_{\text{EES}}$ 、 $C_{\text{TES}}$ 和 $C_{\text{CES}}$ 分别为电、热、冷储能的循环损耗成本; $L_{\text{TI}}(i)$ 和 $L_{\text{TO}}(i)$ 分别为冷储能的充、放冷功率。

#### 2.4 能量转换设备模型

模型中的能量转换设备发挥了不可替代的作

用,可将多余的电能转换为热或冷。

电热、电冷转换设备运行约束如下:

$$H_{\rm EH}(i) = \eta_{\rm EH} P_{\rm EH}(i) \tag{17}$$

$$0 \leq P_{\rm EH}(i) \leq P_{\rm EH,max} \tag{18}$$

$$L_{\rm EC}(i) = \eta_{\rm EC} P_{\rm EC}(i) \tag{19}$$

$$0 \leq P_{\rm EC}(i) \leq P_{\rm EC,max} \tag{20}$$

其中,下标 EH 和 EC 分别表示电热和电冷转换;η<sub>EH</sub> 和 η<sub>EC</sub> 分别为电热和电冷转换效率。运行成本用转换 功率设备损耗成本折算得到,如下所示:

$$C_{\text{convert}}(i) = C_{\text{EH}} P_{\text{EH}}(i) + C_{\text{EC}} P_{\text{EC}}(i)$$
(21)

#### 2.5 目标函数及能量平衡约束

本文中含可再生能源的冷热电协调优化模型的 目标函数是使得系统在 24 h 内的总运行成本最低, 包括可再生能源机组 j 成本  $C_j(i)$ 、与上级电网的交 易成本  $C_{trade}(i)$ 、转换设备成本  $C_{convert}(i)$ 、储能成本  $C_{storage}(i)$ 以及燃气费用和 CCHP 的运行维护成本。目 标函数可以表述如下:

$$C(i) = \sum_{j=1}^{m} C_{j}(i) + C_{\text{trade}}(i) + C_{\text{storage}}(i) + C_{\text{convert}}(i) + C_{\text{gas}} \sum_{l=1}^{n_{\text{conv}}} (F_{l}(i) + F_{l-b}(i)) + \sum_{l=1}^{n_{\text{conv}}} C_{\text{CCHP},l}$$
(22)

$$F = \sum_{i=1}^{\infty} C(i) \tag{23}$$

其中, *C*<sub>ass</sub> 为单位燃气的价格; *C*<sub>CCHP.1</sub> 为 CCHP 机组 *l* 的维护成本; *n*<sub>CCHP</sub> 为 CCHP 机组数量。

虽然本文建立的是一个单目标优化模型,但是优 化目标式(23)也综合考虑了微网运行成本和可再生 能源消纳率。求解运营成本最小和可再生能源消纳 量最大的双目标优化的帕累托前沿等价于:将2个 目标函数线性加权求和作为新的目标函数,对于不同 的权重求解单目标优化。本文在建模时考虑了可再 生能源的单位发电成本 C<sub>1</sub>,如果 C<sub>1</sub>取负值,那么所 求结果即帕累托前沿上的一点。变化 C<sub>1</sub>,分别求解 单目标优化式(23)即可得到帕累托前沿。不同的可 再生能源成本体现了微网运行方在运营成本最小和 可再生能源消纳量最大之间的权衡。

系统满足电平衡、热平衡以及冷平衡约束条件:

$$\sum_{j=1}^{m} P_{j}(i) + \sum_{l=1}^{n_{com}} P_{l}(i) + P_{buy}(i) + P_{dis}(i) = E_{load}(i) + P_{sell}(i) + P_{char}(i) + P_{EH}(i) + P_{EC}(i)$$
(24)

$$\prod_{l=1}^{M_{\rm DF}} H_l(i) + H_{\rm EH}(i) + H_{\rm TO}(i) \ge H_{\rm load}(i) + H_{\rm TI}(i)$$
 (25)

$$\sum_{l=1}^{n_{\text{COP}}} L_l(i) + L_{\text{EC}}(i) + L_{\text{TO}}(i) \ge L_{\text{load}}(i) + L_{\text{TI}}(i)$$
(26)

其中, $P_{\text{buy}}(i)$ 、 $P_{\text{sell}}(i)$ 分别为园区向上级电网的购电和 售电功率; $E_{\text{load}}(i)$ 、 $H_{\text{load}}(i)$ 、 $L_{\text{load}}(i)$ 分别为园区总的电、 热和冷负荷。

满足于上级电网能量交换约束:

 $P_{\text{grid,min}} \leqslant P_{\text{buy}}(i), P_{\text{sell}}(i) \leqslant P_{\text{grid,max}}$  (27) 其产生的成本为:

$$C_{\text{trade}}(i) = C_{\text{buy}} P_{\text{buy}}(i) - C_{\text{sell}} P_{\text{sell}}(i)$$
(28)

其中, C<sub>bay</sub>和 C<sub>sell</sub>分别为园区向上级电网购电和售电的单位价格。

在储能模型中存在互补约束式(11)和式(15), 该模型为二次约束,直接求解一般较为困难。应用 big-M 方法,引入整数变量,互补约束式(11)和式 (15)可以变为如下形式:

$$0 \leq P_{\rm dis}(i) \leq z_P(i)M \tag{29}$$

$$0 \leq P_{\text{char}}(i) \leq (1 - z_P(i))M \tag{30}$$

$$) \leq H_{\mathrm{TI}}(i) \leq z_{H}(i)M \tag{31}$$

$$0 \leq H_{\text{TO}}(i) \leq (1 - z_H(i))M \tag{32}$$

其中,*z<sub>P</sub>(i)、z<sub>H</sub>(i)*为整数变量;*M*为一个足够大的数。 结合约束式(8)和式(12),式(29)和式(30)中的*M* 可取为*P<sub>max</sub>*,式(31)和式(32)中的*M*可取为*H*<sub>TLTO,max</sub>。

本文所建的优化模型是一个混合整数线性规划 (MILP)问题,可以通过 CPLEX 等工具求解。

#### 3 算例验证

为了验证本文构建的含可再生能源的 CCHP 微 网优化模型在协调多能流、降低成本和提高可再生 能源消纳量方面的有效性,设计算例对其进行验证分 析,并设计冷热电独立优化的微网用于对照。对照 组冷热电独立优化,热能直接通过锅炉提供;电能通 过可再生能源和大电网提供;冷能通过电冷转换设备 提供;提供等容量的储能设备用于优化调度。

本文所采用的电热冷负荷数据为某园区项目的 实际数据,而光伏和风电数据由该园区所在地区的 光照和风速及项目数据估算得到。采用的设备容量 以及设备类型均为某实际园区项目的规划设计。从 上级电网购电的费用采用发改委发布的工商业用电 峰谷电价;而向上级电网的售电价格采用上网电价。

由于篇幅所限,本文主要给出夏季情况下的具体 优化结果。图 3 和图 4 分别给出了夏季的可再生能 源出力情况和负荷情况。可再生能源包括 2 个光伏 机组(PV<sub>1</sub>,PV<sub>2</sub>)和 3 个风电机组(W<sub>1</sub>,W<sub>2</sub>,W<sub>3</sub>),其中 有 2 个风电机组出力相同。由图 3 可见夏季可再生 能源主要以光伏发电为主,且光伏和风电存在一定的 时间互补。由图 4 可以发现,夏季电冷负荷占负荷的 主要部分,同时 3 种形式的负荷均存在明显的峰值。

图 5 为夏季热系统优化结果,图 6 为 CCHP 冷热 功率的分配情况,图 7、图 8 分别为电、冷系统的优 化结果。从图 5 可以看出,在夏季热负荷较低而冷 负荷较高的情况下,热负荷主要靠 CCHP 的余热通过 回热器来提供,CCHP 的热出力很好地跟随了热负 荷的波动。此时由于 CCHP 的热出力在每个时刻都 足够,电热转换以及储热设备都没有投入运行。

由图 7 看出,由于夏季可再生能源出力充足,相 对于电负荷而言仍存在一定的剩余电能,而夏季冷负 荷较为严重,因此很大一部分电能通过电冷转换设备 提供给供冷系统,同时由于可再生能源和电负荷的波 动,电储能也投入运行用于调度电能时间上的分布, 图中储能在负荷较低及可再生能源出力较高的时段 进行充电,而在 13:00 及 21:00 等高负荷处放电来满 足用电需求。

对于冷系统,图 8显示在夏季冷负荷较高的情况下,系统的供冷主要由 CCHP 和电冷转换设备提



图 3 夏季可再生能源出力情况



图 6 夏季 CCHP 冷热功率分配 Fig.6 Dispatch of cooling and heating powers in summer



Fig.7 Optimized electric system of summer



图 8 夏季冷系统优化结果

Fig.8 Optimized cooling system of summer

供,两者在时间上存在互补的关系。同时冷储能设备在一定程度上调整了冷负荷的时间分配,与电储能设备类似,冷储能在负荷较低的情况下储冷,而在12:00—14:00冷负荷较高的情况下释放储存的冷。此外,在10:00之前由于电负荷较低而可再生能源出力剩余,供冷主要通过电冷转换得到,此时 CCHP的整体出力较低,以充分利用可再生能源;而在10:00—15:00,电负荷处于高峰,电冷转换功率几乎降为0,供冷主要通过 CCHP 制冷得到。从图6也可以发现,此时段中 CCHP 的冷出力比例上升。可以发现, CCHP 的整体出力同电、冷、热负荷紧密相关,能量转换设备则将三者紧密结合在一起。

将优化模型得到的结果与对照的冷热电独立微 网进行对比,结果如表1所示。

可以发现在该优化模型下,冷、热、电3种能流 紧密联系在一起,根据不同的负荷情况,调整 CCHP 冷热功率的分配情况,合理调配供冷供热的能量来 源。同时由于 CCHP 的高效能源利用率、多种形式 储能装置和能量转换设备的使用,系统整体的运行 成本明显下降,尤其在夏季更为明显。

夏季典型日的成本组成如表2所示。

表 1 CCHP 与独立优化结果对比							
Table 1 Comparison between CCHP optimization							
and individual optimization							

季节	优化方式	系统总运行成本/元	优化效果/%	
夏季	热与冷电独立	121.7817(热)+ 346.5358(电冷)= 468.3175	20.9600	
	冷热电联供	370.1631		
冬季	热与冷电独立	266.5056(热)+ 225.0718(电冷)= 491.5774	9.2817	
	冷热电联供	445.9509		

#### 表 2 夏季典型日成本组成(联供模式)

Table 2 Costs of typical summer									
day(CCHP mode)									
能量 来源	向电网 购电成本	向电网 售电成本	风电 成本	光伏 成本	CCHP 成本	储能 成本	成本		
电	0	0	33.52	24.24		2.45	60.21		
热						1.7	1.7		
冷						0.9	0.9		
燃气					307.35		307.35		
总计	0	0	33.52	24.24	307.35	5.05	370.16		

可见,微网运营商在夏季的成本主要是 CCHP 机 组燃气成本。

此外,由于加入了热和冷2种能流,电能能够通 过转换设备转化为热和冷,对于可再生能源有了更多 的消纳途径。图9以冬季为例对冷热电独立微网和 联供微网在可再生能源消纳量上进行了对比。



图 9 可再生能源消纳量对比

Fig.9 Comparison of renewable energy accommodation

可以看到,冷热电独立微网中,由于电负荷和可 再生能源的出力在时间上的不匹配以及储能设备和 传统发电设备运行的限制,同时考虑设备的运行费 用,可再生能源并不能完全消纳,存在一定的弃风弃 光现象;而在冷热电联合协同的优化微网中,由于存 在电冷转换以及电热转换设备,原本无法消纳的可 再生能源均能够转化为热与冷进行供给。图9中阴 影部分即为多消纳的可再生能源,可见在可再生能源 出力多余的时段,协同优化能尽可能利用这部分能 源,实现了可再生能源消纳量的增加。

具体而言,冷热电独立微网消纳的可再生能源 量为 259.6000 kW·h,而 CCHP 微网消纳 345.8500 kW·h,可见多能流协同优化可以多消纳可再生能源 86.2500 kW·h。

在本算例中,CCHP系统主要是一种能源补充, 主要作为热电设备的补充使用,很大一部分多能负荷 需求要靠其他设备或者大电网来满足。算例中还讨 论了可再生能源的消纳量。储能容量较小时,可能 会出现可再生能源削减。此时增加储能容量,也会 提高可再生能源消纳率。但是储能的建设成本较 高,所以容量也不能无限制地增加。如何合理地配 置储能容量属于规划问题,本文讨论的是实际多能 流微网的优化调度问题,所以不对储能容量配置做过 多讨论。

# 4 结论

本文主要基于含风电和光伏等可再生能源的微 网系统,考虑供冷、供热及供电等多种能源需求,对 含可再生能源的多能流微网协同优化技术进行了研 究。构建了含可再生能源的多能流微网优化模型, 考虑到冷热电的相互耦合关系和多种储能形式,研 究其在多能流协同优化下的优化作用。本文基于实 际案例设计算例,算例参数取自某实际园区。通过 算例对比分析,证明了本文研究的多能流微网协同 优化模型能在特定的冷热电负荷条件下,合理调度多 种能流的分配,根据负荷的变化调整相应设备的运 行,对比冷热电独立的网络,能够有效降低整体微网 的运行成本,同时通过各种能量转换设备和各种类 型的储能设备,使得多能流加入后消纳了更多的可再 生能源,提高了能源的利用效率。

本文的研究还存在一定的局限,后续工作可以 围绕可再生能源不确定性、负荷多样性以及各种储能 设备的最优配置等方面展开。

#### 参考文献:

[1] 许红星. 我国能源利用现状与对策[J]. 中外能源,2010,15(1): 3-14.

XU Hongxing. Energy utilization in China and countermeasures [J]. Sino-Global Energy, 2010, 15(1): 3-14.

- [2] 中华人民共和国国务院新闻办公室.中国的能源政策(2012)[N].人民日报,2012-10-25(014).
- [3] STOCKER T F,QIN D,PLATTNER G K,et al. Climate change 2013:the physical science basis:Working Group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge,UK:Cambridge University Press, 2014.
- [4] 董朝阳,赵俊华,文福拴,等.从智能电网到能源互联网:基本概 念与研究框架[J].电力系统自动化,2014,38(15):1-11.

DONG Zhaoyang,ZHAO Junhua,WEN Fushuan, et al. From smart grid to energy internet; basic concept and research framework[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38 (15); 1-11.

- [5] 于慎航,孙莹,牛晓娜,等. 基于分布式可再生能源发电的能源互联网系统[J]. 电力自动化设备,2010,30(5):104-108.
  YU Shenhang,SUN Ying,NIU Xiaona, et al. Energy Internet system based on distributed renewable energy generation[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(5):104-108.
- [6] 胡小坚,张雪梅,蔡路茵. 冷热电三联供系统(CCHP)的优化研究进展[J]. 能源研究和管理,2010(2):13-16.
  HU Xiaojian,ZHANG Xuemei,CAI Luyin. Recent research progress of optimization for Combined Cooling Heating and Power systems(CCHP)[J]. Energy Research and Management, 2010(2):13-16.
- [7] 鲁宗相,王彩霞,闵勇,等. 微电网研究综述[J]. 电力系统自动 化,2007,31(19):100-107.
  LU Zongxiang,WANG Caixia,MIN Yong,et al. Overview on microgrid research [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007,31(19):100-107.
- [8] 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.
- [9] REN Hongbo, GAO Weijun. A MILP model for integrated plan and evaluation of distributed energy systems[J]. Applied Energy, 2010,87(3):1001-1014.
- [10] 王锐,顾伟,吴志. 含可再生能源的热电联供型微网经济运行优 化[J]. 电力系统自动化,2011,35(8):22-27.
  WANG Rui,GU Wei,WU Zhi. Economic and optimal operation of a combined heat and power microgrid with renewable energy resources [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011,35(8):22-27.
- [11] WU F,GUO Q,SUN H,et al. Research on the optimization of combined heat and power microgrids with renewable energy[C]// Power and Energy Engineering Conference (APPEEC),2014
   IEEE PES Asia-Pacific. [S.l.]:IEEE,2014:1-5.
- [12] 徐立中,杨光亚,许昭,等. 考虑风电随机性的微电网热电联合 调度[J]. 电力系统自动化,2011,35(9):53-60.
  XU Lizhong,YANG Guangya,XU Zhao,et al. Combined scheduling of electricity and heat in a microgrid with volatile wind power[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35 (9):53-60.
- [13] GUO L,LIU W,CAI J,et al. A two-stage optimal planning and design method for combined cooling, heat and power microgrid system [J]. Energy Conversion & Management, 2013, 74 (10): 433-445.
- [14] ZHANG X,SHARMA R,HE Y. Optimal energy management of a rural microgrid system using multi-objective optimization[C]// 2012 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT). Washington, DC, USA:[s.n.], 2012:1-8.
- [15] WONGVISANUPONG K,HOONCHAREON N. Optimal scheduling of hybrid CCHP and PV operation for shopping complex load [C]//Electrical Engineering/Electronics,Computer,Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON),2013 10th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer,Telecommunications and Information Technology. Krabi, Thailand:[s.n.],2013:1-6.
- [16] 陈建华,吴文传,张伯明,等. 消纳大规模风电的热电联产机组 滚动调度策略[J]. 电力系统自动化,2012,36(24):21-27.

280

281

CHEN Jianhua, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. A rolling generation dispat ch strategy for co-generation units accommodating large scale wind power intergration [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(24): 21-27.

- [17] 钟史明. 发展天然气分布式能源冷热电三联供节能计算的探讨 [J]. 区域供热,2013(6):13-18.
- [18] 李琼. 冷热电三联供能源系统优化分析[J]. 深圳土木与建筑, 2012,4(10):30-34.
- [19] 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):581-590.

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):581-590. [20] 胡荣,马杰,李振坤,等. 分布式冷热电联供系统优化配置与适 用性分析[J]. 电网技术,2017,41(2):418-425.

HU Rong, MA Jie, LI Zhenkun, et al. Optimal allocation and applicability analysis of distributed combined cooling-heatingpower system[J]. Power System Technology, 2017, 41(2): 418-425.

作者简介:



甘 霖(1964—),男,四川大竹人,硕士, 主要研究方向为电力企业管理、智能电网及 综合能源服务。

# Coordinative optimization of multiple energy flows for microgrid with renewable energy resources and case study

GAN Lin<sup>1</sup>, CHEN Yuwei<sup>2</sup>, LIU Yuquan<sup>1</sup>, XIONG Wen<sup>1</sup>, TANG Lei<sup>3</sup>, PAN Zhaoguang<sup>2</sup>, GUO Qinglai<sup>2</sup>

(1. Guangzhou Power Supply Co. Ltd., Guangzhou 510620, China; 2. Department of Electrical Engineering,

Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. Beijing Qingda Gaoke System Control Company, Beijing 102208, China)

**Abstract**: Along with the appearance and rapid development of energy internet, the microgrid with CCHP (Combined Cooling, Heating and Power) system becomes more noticed, which contains multiple renewable energy resources and has high energy utilization rate. An optimal operation model of microgrid with CCHP system is established, which takes the minimum total operational cost as its objective, considers the conversion efficiency among different energy forms and the constraints of different types of power generation and energy storage, and realizes the comprehensive utilization and cooperative optimization of multiple energy flows to satisfy users' demands for different load types. The actual cases of a real district are analyzed and results show that, the established model effectively optimizes the dispatch of heating, cooling and electric energy sources, reduces the operational costs of microgrid and enhances the accommodation of renewable energy resources by the coordination among different energy forms.

Key words: microgrids; multiple energy flows; coordinative optimization; CCHP; renewable energy resources