

可再生能源互补的微能源网运行优化研究

吴旺松^{1*}, 丁小益², 彭燧坤¹, 翁一武^{2#}

¹中国电建集团中南勘探设计研究院有限公司, 湖南 长沙

²上海交通大学机械与动力工程教育部重点实验室, 上海

收稿日期: 2022年3月29日; 录用日期: 2022年4月20日; 发布日期: 2022年4月29日

摘要

微能源网作为集能源互联、转化、耦合、存储等功能于一体的小型综合能源供应系统成为了研究热点。本文以可再生能源的最大消纳为目标, 对包含风能、太阳能、生物质气/天然气、储能等多种能源结构的区域型微能源网系统运行优化问题进行了研究。建立了包含风光渗透率(Ratio of Electricity Permeability, REP)和弃风弃光率(Abandoning Ratio, AR)在内的运行优化问题。充分考虑风光发电、储能、燃气轮机发电机组等运行特点, 建立了区域型微能源网目标函数模型, 通过分支界定法获得最优解。经过运行优化后微能源网系统的弃风弃光率均接近于0, 风光渗透率最高可达到35%左右。通过优化算例对上述模型进行计算分析, 可以为微能源网系统的运行规划提供参考。

关键词

微能源网系统, 风光燃储, 风光渗透率, 非线性规划, 运行优化

Research on Operation Optimization of Renewable Energy Complementary Micro Energy Network

Wangsong Wu^{1*}, Xiaoyi Ding², Yikun Peng¹, Yiwu Weng^{2#}

¹Central South Exploration Design & Research Institute Co., Ltd., Power China Construction Corporation, Changsha Hunan

²Key Laboratory for Power Machinery and Engineering of Ministry of Education, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai

Received: Mar. 29th, 2022; accepted: Apr. 20th, 2022; published: Apr. 29th, 2022

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 吴旺松, 丁小益, 彭燧坤, 翁一武. 可再生能源互补的微能源网运行优化研究[J]. 动力系统与控制, 2022, 11(2): 77-85. DOI: 10.12677/dsc.2022.112009

Abstract

As a small integrated energy supply system integrating energy interconnection, conversion, coupling and storage, microenergy network has become a research hotspot. In order to maximize the consumption of renewable energy, this paper studies the operation optimization of regional micro energy grid system including wind, solar, biomass gas/natural gas, energy storage and other energy structures. The optimization problems including wind and light abandoning ratio (AR) and Ratio of Electricity Permeability (REP) were established. The objective function model of regional micro energy network was established, and the optimal solution was obtained by branch definition method. After operation optimization, the wind and light abandoning rate of the micro energy network system is close to 0, and the maximum wind and light abandoning rate of the micro energy network system is about 35%. The optimization example is used to calculate and analyze the above model, which can provide reference for the operation planning of micro-energy network system.

Keywords

Micro-Energy Network System, Wind-Light-Burning-Storage, Wind-Light Permeability, Nonlinear Programming, Operation Optimization

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

区域型微能源网通常包括风能、太阳能、天然气、电能、热能等多种能源。微能源网集电、冷、热于一体、对异类能源施行梯级利用，打破了传统方式中能源供给相互独立的藩篱，是推动低碳减排、提升能源利用效率的有效途径。区域型微能源网是下一代智能的能源系统，其多种能源的源、网、荷深度融合、紧密互动，需使用系统化、集成化和精细化的方法来分析、设计、运行和管理整个能源系统的能量生产、传输、存储和使用，从而极大提高整个能源系统的可持续性、安全可靠并降低能源价格[1]。

我国可再生能源快速发展，风光装机量持续位居世界前列，但弃风弃光问题严重。2019年，我国风电弃风电量 169 亿千瓦时，仅湖南省弃风率高达 35% 以上，之前其 14 个市/县已被列入风电红色预警地区，湖北 7 地列入红色预警[2]。随着区域型微能源网的发展，大规模可再生能源接入到系统中，其波动性和随机性给能源系统的供需匹配带来了挑战。文献[3] [4]从可靠性角度分析了多能源耦合系统的运行特点，将系统网络模型分为电力网络与天然气网络，算例证明了对天然气管网进行约束对系统调度有重大影响；文献[5] [6]建立的微能源网结构综合考虑分布式能源、P2G 设备及储能设备。并且在输入与输出的转化方面，引入能源集线器概念，通过对能源集线器的建模来描述多能源之间的转换关系。文献[7] [8]对传统 CCHP 联供系统进行改造，在原基础上增加了低温余热发电设备，综合考虑系统运行经济性与环境效益，建立了以购买能源费用及污染物排放量最小为目标函数的多目标优化模型。文献[9]考虑风电出力不确定性，提出一种弱鲁棒优化的微能源网调度模型，增强了系统的经济效益与安全性。

针对 2030 年我国单位国内生产总值二氧化碳排放将比 2005 年下降 65% 以上，非化石能源占一次能源消费比重将达到 25% 左右[10]。随着大规模可再生能源设备的接入，其波动性和随机性给能源系统的供需匹配带来了挑战。只有提高可再生能源在能源系统中的渗透比例、减少不必要的弃风弃光、探索风

光燃储和冷/热/电/蒸汽在质量和能量流的平衡互动,才能真正意义上实现区域型微能源网低碳、清洁、可持续的效果。因此,开展考虑可再生能源最大消纳的系统运行优化是十分重要的。

本文以可再生能源的最大消纳为目标,对包含风能、太阳能、生物质气/天然气、储能等多种能源结构的区域型微能源网系统运行优化问题进行了研究。建立了包含风光渗透率(REP)和弃风弃光率(AR)在内的多目标优化问题。在下层模块中,充分考虑风光发电、储能、燃气轮机发电机组等运行特点,充分考虑风光发电、储能、燃气轮机发电机组等运行特点,建立了区域型微能源网目标函数模型,通过分支界定法获得最优解。通过优化算例对上述模型进行计算分析,可以为微能源网系统的运行规划提供参考。

2. 区域型微能源网的系统结构

微能源网是集分布式能源生产、传输、转换、储存和消费于一体,以智能电网为基础网络,与互联网信息技术广泛结合,实现分布式能源就地消纳的终端供能的智慧能源网络。微能源网的结构如下图所示。包括风能、太阳能、生物质气/天然气、电能、热能等多种能源。风光发电和燃气轮机机组共同为用户提供电能。燃气轮机排出高温尾气用于加热余热锅炉,得到的高温蒸汽可用于用户供暖和作为溴化锂吸收式制冷机的热源。同时,微能源网系统在供能富余时将能量保存在储能设备中,在供能不足时从主电网购买电能以填补用户负荷的空缺。从而达到系统内各部件能量流的转化与平衡,实现冷、热、电的供应和可再生能源的高度接入(图1)。

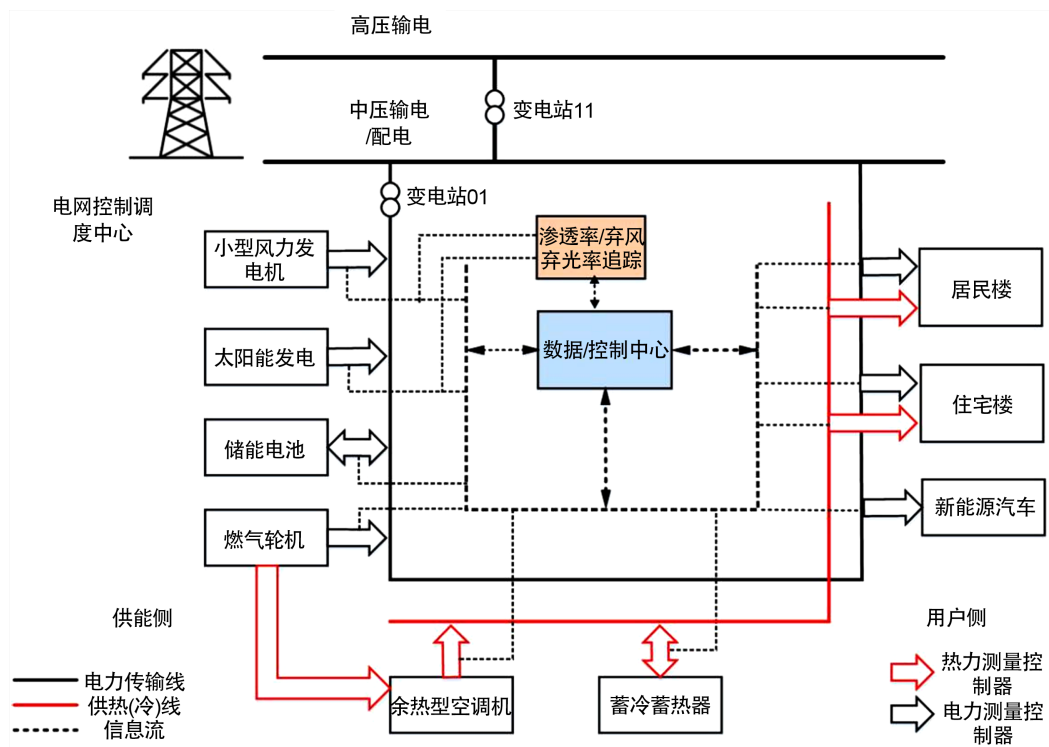


Figure 1. Schematic diagram of regional micro energy network system structure

图1. 区域型微能源网系统结构示意图

3. 微能源网系统优化配置目标函数模型

微能源网在系统构建过程中需要考虑其每个部件的出力特性和成本来选择配置容量大小,进而达到目标最优的结果。在搭建微能源网优化运行模型过程中,本文以可再生能源渗透率和弃风弃光率为优化

目标, 建立多目标优化问题。由于系统每个部件的特性受到各自约束条件限制, 因此整体模型的约束条件包括每个部件出力特性中的约束条件, 以及系统整体约束条件, 如功率平衡约束等。通过上述目标函数和约束条件, 可以建立优化模型, 对微能源网系统的运行策略进行分析。

根据可再生能源系统的评价指标, 确立了以风光渗透率(Renewable penetration level, REP)和弃风弃光率(Curtailment rate, CR)为优化目标。因此, 该多目标优化问题可写为以下形式:

$$\min \left(CR * a + \frac{1}{REP} * b \right) \quad (1)$$

$$REP = \frac{\sum_t W_{wind,used} + \sum_t W_{solar,used}}{\sum_t W_{wind,used} + W_{solar,used} + W_{GT} + W_{HRSG} + W_{Libr} + W_{grid}} \quad (2)$$

$$CR = \frac{\sum_t Wind_{wasted} + \sum_t Solar_{wasted}}{\sum_t Wind_{total} + \sum_t Solar_{total}} \quad (3)$$

式中 $W_{wind,used}$ 、 $W_{solar,used}$ 指用户负荷中来自风光发电的部分, W_{GT} 、 W_{HRSG} 、 W_{Libr} 和 W_{grid} 指用户负荷中来自燃气轮机、余热锅炉、溴冷机和主电网购电的部分。 $Wind_{wasted}$ 、 $Solar_{wasted}$ 为风电和光伏发电在时段 T 由于配置容量限制等原因被浪费的功率。 a 和 b 为权重系数, 本文中取 0.5。以上两个指标描述了风光资源在微能源网系统中不同层面的利用情况。风光渗透率侧重于用户端, 反映了可再生能源在用户能源消费结构中的占比; 弃风弃光率侧重于发电端, 反映了风光发电总量的能量流向。

4. 区域型微能源网系统优化运行约束条件

区域型微能源网系统优化运行的约束条件主要包括冷、热、电各能量平衡的等式约束以及各设备自身功率约束等不等式约束。本文区域型微能源网的配置容量是基于经济 - 环境综合评价的优化结果得到的, 能够满足本文多目标运行优化的要求。

4.1. 不等式约束

在优化中所考虑的不等式约束主要包括:

$$(N-1) \times E_0 \leq \sum_{j=1}^n E \leq N \times E_0 \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^n Q_{gas} \times \eta_{HRSG} \geq \sum_{j=1}^n H_{HRSG} \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^n H_{HRSG} + \sum_{j=1}^n H_{gas_boil} \geq \sum_{j=1}^n Q_{Libr} / COP \quad (6)$$

约束表示原动机运行容量不大于额定容量, 不小于 $(N-1)$ 倍的额定容量, 其中: E_0 表示额定容量, N 表示原动机所选台数;

储能充放电功率不能超过储能额定功率:

$$P_{in}, P_{out} < P_{cs,N} \quad (7)$$

储能电池容量约束, 各个时刻储能电池内的电量应当在电池电量约束的上下限之间:

$$S_{lower,limit} < S_t < S_N \quad (8)$$

4.2. 电功率平衡约束

$$P_{grid} + P_{GT} + P_{BA,D} + P_{PV} + P_{WT} = P_{EL} + P_{BA,C} \quad (9)$$

式中: P_{grid} 为从电网购电功率, kW; P_{GT} 是燃气轮机输出功率, kW; P_{BA_D} 表示储能装置放电功率, kW; P_{PV} 为光伏发电出力功率, kW; P_{WT} 为风力发电出力功率, kW; P_{EL} 电负荷, kW; P_{BA_C} 是储能装置充电功率, kW;

4.3. 热功率平衡约束

$$Q_{HR_heat}^{out} + Q_{EC_heat}^{out} + Q_{HSE_D} = Q_{HL} + Q_{HSE_C} \quad (10)$$

式中: $Q_{HR_heat}^{out}$ 为余热回收装置输出的热功率, kW; $Q_{EC_heat}^{out}$ 为电制热装置输出的热功率, kW; Q_{HSE_D} 蓄热装置输出热功率, kW; Q_{HL} 为系统热负荷, kW; Q_{HSE_C} 蓄热装置输出热功率, kW。

4.4. 冷功率平衡约束

$$Q_{AC_cool}^{out} + Q_{EC_cool}^{out} + Q_{ISE_D} = Q_{CL} + Q_{ISE_C} \quad (11)$$

式中: $Q_{AC_cool}^{out}$ 为吸收式制冷机输出的冷功率, kW; $Q_{EC_cool}^{out}$ 为电制冷机输出的冷功率, kW; Q_{ISE_C} 、 Q_{ISE_D} 为蓄冷装置蓄冷、制冷功率, kW; Q_{CL} 为系统冷负荷, kW。

5. 微能源网系统优化配置求解优化算法

本文采用分支定界算法(NLP-BB),其主要步骤为: 1) 节点选择: 搜索分支定界树, 选择某一节点求解非线性规划问题; 2) 剪枝: 若在某点处的目标函数大于当前上界, 这部分可行域显然不包含最优解, 则进行减枝; 3) 分支: 主要对整数约束变量进行检验, 若满足整数约束条件, 且目标函数值小于当前的最优值, 则更新上界, 并且剪掉目标函数值大于当前上界的分支, 迭代计算至最优解[11]。本文基于MATLAB 软件中的 optitoolbox 工具箱, 采用 BONMIN 算法求解, 其原理基于分支定界算法(图 2)。

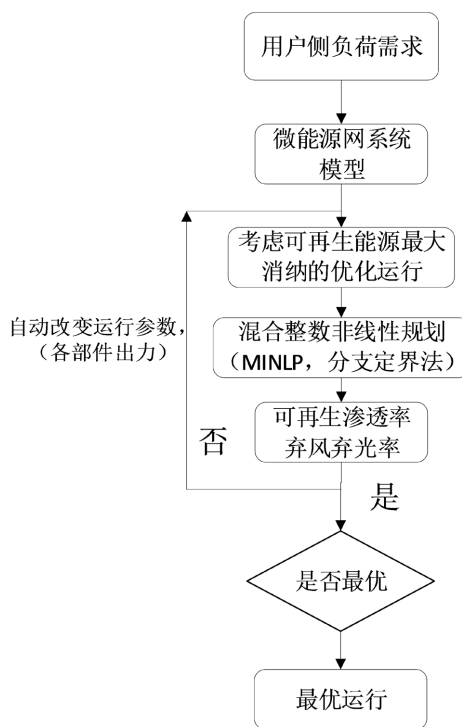


Figure 2. Schematic diagram of regional micro energy network operation optimization method
图 2. 区域型微能源网运行优化方法示意图

1) 在优化层中, 分支界定算法根据区域型微能源网的决策变量范围进行迭代求解, 并生成样本数量, 包括风电装机量、光伏装机功率、燃气轮机台数、余热锅炉容量、溴化锂制冷剂容量、电制冷容量、储能元件容量等。所述方法基于 Matlab 平台调用 optitoolbox 求解器, 可以满足各类非线性约束在数学模型中的引入, 从而实现运行优化算法,

2) 在运行层中: 对于优化算法考察的每一个样本组合, 微能源网运行模块都会依次进行计算, 运行模块的功能包括三个方面: 保持系统输出与用户冷、热、电的平衡与匹配; 监控各系统子部件是否在合理约束内运行; 追踪每个时间步长内风光发电、原动机、储能等设备的出力。通过计算, 运行层模块可以获得系统在运行时间内的风光渗透率和弃风弃光率, 优化算法将根据返回的数据进行下一步迭代, 直至找到最优解。

6. 微能源网运行优化算例分析

本典型算例基于混合整数非线性规划方法, 基于 BOMIN 分支求解法对微能源网系统运行优化进行求解。选取三组典型负荷测试综合能源系统优化结果: 三组典型负荷如下表 1 所示:

Table 1. Typical season loads in each season

表 1. 各季节典型负荷情况

	电负荷 kW	热负荷 kW	冷负荷 kW
过渡季	5900	2100	1500
夏季	7200	700	6150
冬季	6085	5950	390

算例中综合能源系统配置包括: 200 kW 燃气轮机 1 台, 1000 kW 燃气轮机 5 台; 5000 kW 余热锅炉 2 台; 4000 kW 吸收式溴冷机 2 台; 500 kW 电制冷设备 1 台; 由 5000 块单元板构成的 1600 kW 光伏发电系统 1 台(占地大小 100 m × 100 m); 500 kW 风力发电机 10 台; 1000 kW 储电设备 1 台; 1000 kW 储冷装置 1 台。同时微能源网可以从电网购买电能, 为了达到风光资源本地消纳的目的, 限制购电量不超过负荷的 10%。优化过程中, 决策变量为系统各部件功率输出, 优化变量为考虑风光渗透率和丢弃率的可再生能源消纳指标(表 2)。

Table 2. Configuration table of micro energy network

表 2. 微能源网配置表

部件	配置	容量/kW, kWh	台数
燃气轮机	GT1	100	0
	GT2	200	1
	GT3	500	0
	GT4	1000	5
余热锅炉	HRSG1	1000	0
	HRSG2	2000	0
	HRSG3	5000	2
溴化锂制冷	LAC1	1000	0
	LAC2	2000	0
	LAC3	4000	2

Continued

电制冷	EC1	500	1
	EC2	1000	0
光伏	PV	0.32	5000
风机	WT1	50	0
	WT2	100	0
	WT3	200	0
	WT4	500	10
电储能	STORE_ELE1	500	0
	STORE_ELE2	1000	1
冷储能	STORE_COLD1	500	0
	STORE_COLD2	1000	1

经过运行优化后各部件出力为：

1) 过渡季节运行：

电负荷：选择 4 台 1000 kW 燃机满负荷运行，输出功率 4000 kW，1 台 1000 kW 燃机输出功率为 480 kW；光伏发电量为 912 kW，风电发电量为 1200 kW；另从电网购电 303 kW。热负荷：选择 1 台 5000 kW 余热锅炉运行，输出功率为 3434 kW。冷负荷：选择 1 台 4000 kW 溴化锂制冷机运行，输出功率为 1500 kW。经过运行优化后的系统风光渗透率为 34.54%，弃风弃光率为 0%。

2) 夏季运行：

电负荷：选择 4 台 1000 kW 燃机满负荷运行，输出功率 4000 kW，1 台 1000 kW 燃机输出功率为 861 kW；光伏发电量为 1358 kW，风电发电量为 1200 kW；另从电网购电 543 kW。热负荷：选择 2 台 5000 kW 余热锅炉运行，1 台输出功率为 3000 kW，另一台输出功率为 2560 kW。冷负荷：选择 2 台 4000 kW 溴化锂制冷机运行，1 台满负荷输出功率为 4000 kW，另一台输出功率为 2150 kW。经运行优化后的系统风光渗透率为 33.04%，弃风弃光率为 0%。

3) 冬季运行：

电负荷：选择 5 台 1000 kW 燃机满负荷运行，输出功率 5000 kW，1 台 200 kW 燃机输出功率为 120 kW；光伏发电量为 800 kW，风电发电量为 500 kW；另从电网购电 535 kW。

热负荷：选择 2 台 5000 kW 余热锅炉运行，1 台满负荷输出功率为 5000 kW，另一台输出功率为 1228 kW。冷负荷：选择 1 台 4000 kW 溴化锂制冷机输出功率为 390 kW。经运行优化后的系统风光渗透率为 18.71%，弃风弃光率为 0%。

三种季节典型负荷下微能源网组件发电功率如图 3 所示。可以看到在三种情境下，燃气轮机发电都是微能源网的主要供电来源。光伏发电和风力发电量基本在统一水平，同时 11 月的光伏发电量明显低于 3 月，这是由于冬季光照强度减弱的缘故。储能设备仅提供了很小一部分电能，剩余的负荷主要依靠电网购电配平。

图 4 给出了三种季节典型负荷下微能源网余热锅炉和溴化锂制冷机。可以看到从 3 月到 11 月，溴化锂制冷机的功率先增加后减少，这是因为夏季制冷符合较高造成的。另一方面，余热锅炉的功率一直稳定在较高水平。这是因为余热锅炉不仅作为供暖设备，还需要微溴化锂制冷机提供热源，因此其功率一直在 3000 kW 以上，在夏季负荷下余热锅炉和制冷机的工作功率均为最大值。

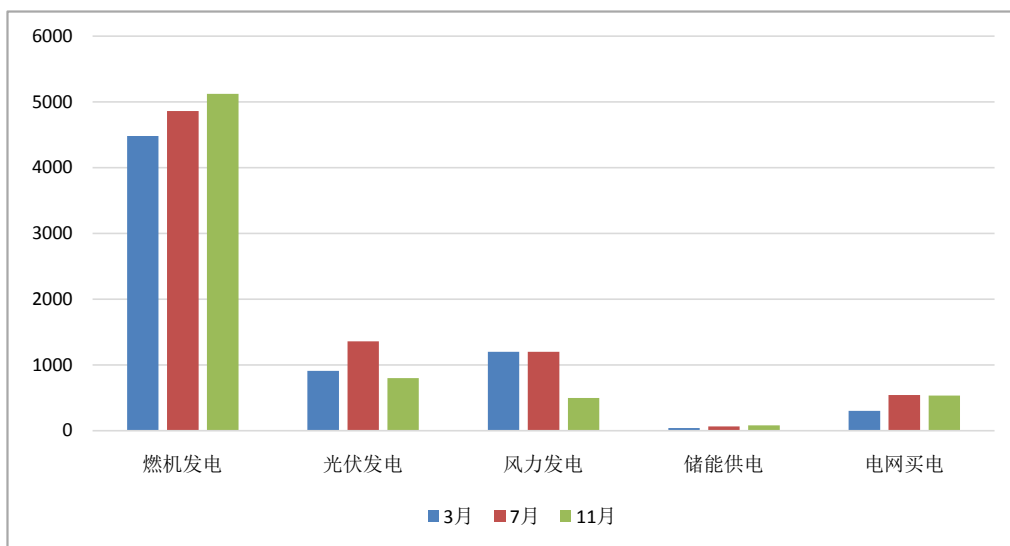


Figure 3. Electrical load distribution of micro energy network under three season loads (kW)

图 3. 三种季节负荷微能源网电负荷分配情况(kW)

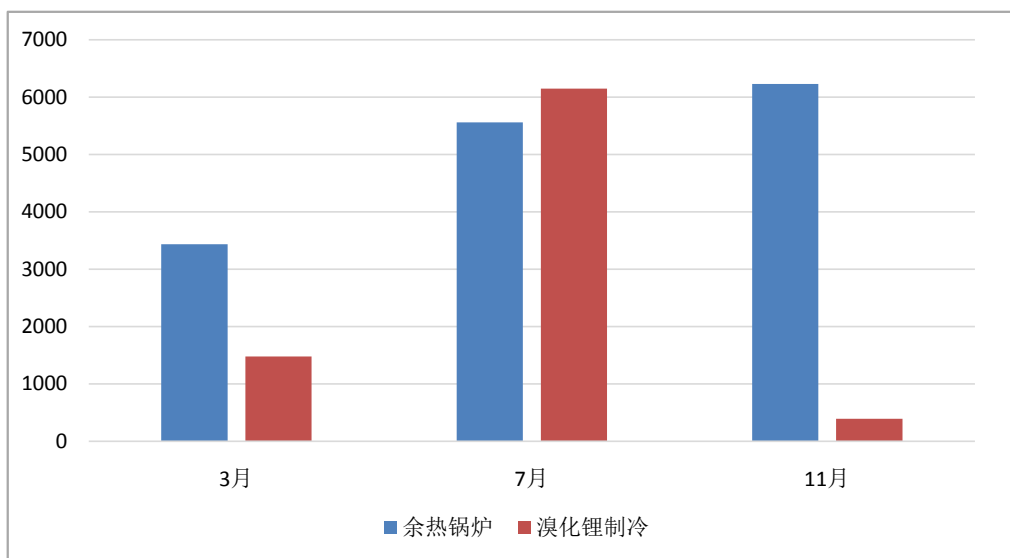


Figure 4. Power of waste heat boiler and lithium bromide refrigerator under three season loads (kW)

图 4. 三种季节负荷余热锅炉和溴化锂制冷机功率(kW)

Table 3. Power and utilization of wind/optical power generation under typical load in three seasons

表 3. 三种季节典型负荷下风/光发电功率和利用情况

运行情景	光伏发电量	风力发电量	风光渗透率	弃风弃光率
过渡季	912 kW	1200 kW	34.54%	0%
夏季	1358 kW	1200 kW	33.04%	0%
冬季	800 kW	500 kW	18.71%	0%

表 3 给出了三种负荷下风光发电量和利用情况。系统光伏装机量为 1500 kW，7 月份发电量达到最大值 1358 kW；风电装机量为 5000 kW，在 3 月和 7 月发电量达到最大值 1200 kW，相对而言光伏机组的

发电效率要高于风机。冬季负荷下的渗透率相比夏季负荷明显降低,这是由于冬季的光照和风速都较低,影响了可再生能源发电量。同时由表 3 可以看出,三种情景下风光渗透率最大值达到 34.54%,同时弃风弃光率均为 0。说明本文的优化方法下,微能源网系统可以在保证负荷平衡的同时达到可再生能源的最大消纳。

7. 结论

1) 本文建立了风光燃储微能源网系统的运行模型,构造了包含优化层和下层运行的双层优化逻辑,基于 `optitoolbox` 的分支界定法对非线性优化问题进行了求解。

2) 通过运行优化后微能源网系统的弃风弃光率均接近于 0%,风光渗透率最高可达到 35%左右。同时由于冷热电联供对高温烟气的需求,燃气轮机在三种情景下都作为主要功率输出设备,电网购电比例均不超过负荷的 10%。

3) 在本文的双层优化方法下,微能源网系统可以在保证负荷平衡的同时达到可再生能源的最大消纳。

参考文献

- [1] 刘俊峰, 陈剑龙, 王晓生, 曾君, 黄倩颖. 基于深度强化学习的微能源网能量管理与优化策略研究[J]. 电网技术, 2020, 44(10): 3794-3803.
- [2] 2019 年我国风电发电量首次突破 4000 亿千瓦时[EB/OL]. <https://news.bjx.com.cn/html/20210111/1128476.shtml>, 2021-01-11.
- [3] Ni, L., Feng, C., Wen, F., et al. (2016) Optimal Power Flow of Multiple Energy Carriers with Multiple Kinds of Energy Storage. 2016 *IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM)*, Boston, 17-21 July 2016, 1-5.
- [4] Guandalini, G., Campanari, S., Romano, M.C., et al. (2015) Power-to-Gas Plants and Gas Turbines for Improved Wind Energy Dispatchability: Energy and Economic Assessment. *Applied Energy*, **147**, 117-130. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.02.055>
- [5] 曾鸣, 刘英新, 周鹏程, 王雨晴, 侯孟希. 综合能源系统建模及效益评价体系综述与展望[J]. 电网技术, 2018, 42(6): 1697-1708.
- [6] 马腾飞, 吴俊勇, 郝亮亮, 李玉君, 闫华光, 李德智, 陈宋宋. 基于能源集线器的微能源网能量流建模及优化运行分析[J]. 电网技术, 2018, 42(1): 179-186.
- [7] 陈丽萍, 林晓明, 许苑, 李涛, 林琳, 黄春艳. 基于能源集线器的微能源网建模与多目标优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(6): 9-16.
- [8] 刘方泽, 牟龙华, 张涛, 朱彤. 微能源网多能源耦合枢纽的模型搭建与优化[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(14): 91-98.
- [9] 魏震波, 黄宇涵, 高红均, 税月. 含电转气和热电解耦热电联产机组的区域能源互联网联合经济调度[J]. 电网技术, 2018, 42(11): 3512-3520.
- [10] 习近平在气候雄心峰会上的讲话[EB/OL]. http://www.gov.cn/xinwen/2020-12/13/content_5569138.htm, 2020-12-13.
- [11] 刘明明, 崔春风, 童小娇, 戴彧虹. 混合整数非线性规划的算法软件及最新进展[J]. 中国科学(数学), 2016, 46(1): 1-20.