

基于低碳目标的综合能源系统优化运行研究

文 / 潘宏钊 宜兴市宜能实业有限公司

摘要：随着“双碳”目标的提出，为达到2035年碳中和与碳达峰的共同目标，综合能源系统的高效应用及其低碳性的运行更成为社会各界关注的热点话题。考虑到综合能源系统能够实现不同类型能源的高度耦合，从而达到多能流协同运作以及资源高效循环利用的目标，因此，进一步探究低碳视角下综合能源系统的优化运行方法更显得意义重大。本篇文章主要是分析了电气热综合能源系统的模型构成，并且就综合能源系统在低碳目标下的优化运行对策进行了探究，希望能够为更好地推动综合能源系统的高效运行提供参考意见。

关键词：“双碳”目标；综合能源；系统运行

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.12.124

引言

在人类社会持续前行与发展的背景下，化石燃料的枯竭问题已成为全球共同面对的问题，构建低碳和清洁的多重能源体系，显然成为未来能源发展的主要话题。综合能源系统在这样的背景下应运而生。电气热综合能源系统将目前可利用的能源有效地融合在一起，从而形成了一种特殊的形态，而如何保障电气热综合能源体系的稳定运作，则是系统管理者面临的新挑战。目前，“双碳”政策已成为国家能源领域中发展的必然方向，通过电转器技术或碳捕集技术等，都可以推行能源系统更加低碳和绿色地运行，其中，电气热综合能源体系的优化运行对策，就是行业在发展过程中所关注的要点。

一、电气热综合能源系统的模型构建

电气热综合能源系统的大致结构（如图1）是在这

个大型的综合系统中，包含了电力模块、天然气模块以及热力模块三大子系统。其中，电力子模块下的负荷量不仅包含常规综合能源系统中的一些普通用电用户，同时还与电制冷、电锅炉之间相互打通，为实现电转气提供了新的可能性，也进一步增强了电力系统以及天然气系统二者之间的融合应用程度。电力系统与天然气系统之间，可通过微型的燃气轮机或P2G实现耦合，而热力系统则通过电制冷以及电锅炉等方式向热用户提供新的热能^[1]。除此之外，该系统还结合了碳捕集系统，有效捕捉综合电网中发电厂、微型燃气轮机以及大气环境中的二氧化碳，向P2G系统提供二氧化碳，并且将二氧化碳最终转化成甲烷气体，再输送回天然气子系统中。

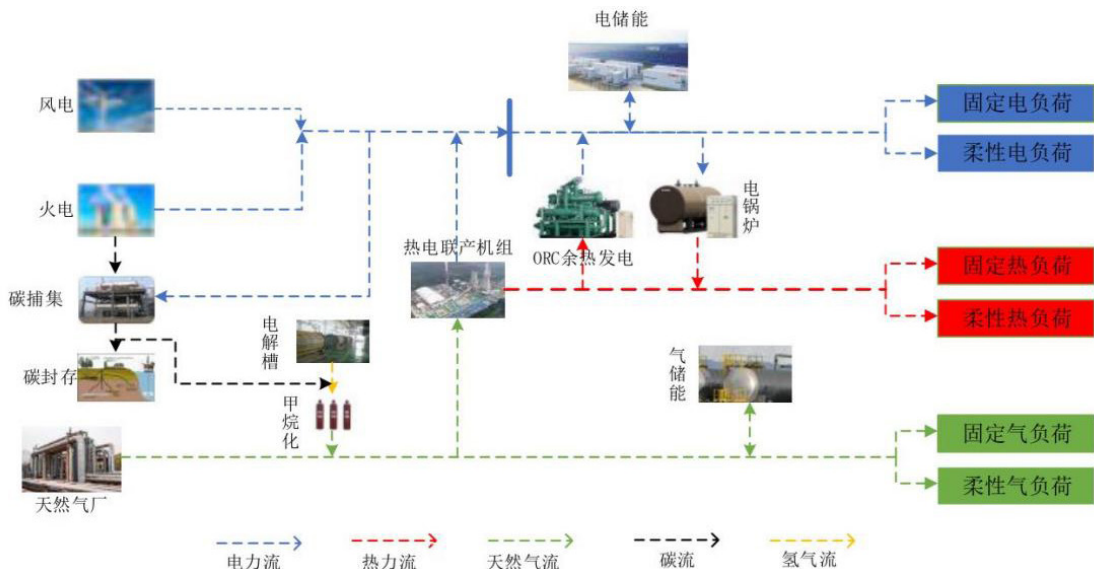


图1 综合能源系统结构

二、电热器综合能源系统的优化运行算法

（一）目标函数

电热气综合能源系统运行过程中产生的成本主要包括购电费用、购气费用、会被运行产生的成本费用、风光电发电成本、碳交易产生的费用等等，为实现综合能源系统的优化运行，尽可能将成本控制在可控的范围内，预设目标函数为运行成本 $F(t)$ ，并将目标函数控制在最小范围内。得出以下公式：

$$F(t) = F_e(t) + F_{gas}(t) + F_{oc}(t) + F_{pm}(t) + F_{co2}(t)$$

其中， $F_e(t)$ 表示购电成本， $F_{gas}(t)$ 代表购气成本， $F_{oc}(t)$ 代表系统设备在运行过程中产生的成本费用， $F_{pm}(t)$ 代表风光发电的惩罚成本费用， $F_{co2}(t)$ 代表碳交易过程中产生的成本费用。

三、基于低碳目标下综合能源系统优化运行的算例仿真

本次案例中，选择了夏季用电的高峰阶段，了解电气

热综合能源系统在夏季用电高峰阶段的分时电价以及分时气价，价格类目（如表1）所示。而电气热综合能源系统以及储能设备在运行过程中的具体参数则分别见于（表2、表3）。燃气轮机在发电过程中与综合电网系统购电时火电厂的实际碳排放系数（如表4）所示。在本次实践案例中，将碳交易的单价设置为每千克0.2元，允许的碳排放系数为每单位0.798千克。为实现综合系统运行成本最低的目标，可选择现代内点法进行优化运行的仿真分析。

类别	单价	时段
峰值电价/(元/kW·h)	0.886	08:00-11:00;18:00-20:00
平值电价/(元/kW·h)	0.559	12:00-17:00;21:00-23:00
谷值电价/(元/kW·h)	0.233	24:00-08:00
天然气价格/(元/m ³)	3.45	

表1 分时电价及天然气价格

设备参数	取值	设备参数	取值	设备参数	取值
η_m /%	32	Y_{minee}	0.1	Y_{mineb}	0.1
η /%	8	Q_{cNe}	200	$Q_{d,h}$	150
Y_{minM}	0.3	Y_{minae}	0.1	c_m	4
P_{max} /kW	200	C_{cpc}	1.69	μ	0.105
η_{eh} /%	94	Q_{acNe}	200	μ_o	0.336
Q_{hexh}	180	η_{heh} /%	90		

表2 系统设备参数

设备参数	取值	设备参数	取值
$P_{es,max}$ /kW	20	SO_{Cmin}	0.2
$P_{es,dmax}$ /kW	20	SO_{Cmax}	0.9
$E_c^{s\circ}$	20	C	100

表3 储能设备参数

a_1	b_1	C_1	a_2	b_2	C_2
0.0034	-0.38	36	0.001	-0.04	1

表4 碳排放系数

结合（如图2）所示的电力综合能源优化运行调度。结果可以看出，在仿真模型中，新能源发电均没有被算入，系统运行时不会产生弃风以及弃光惩罚。在电价为低谷电价的时间段，该综合系统中还需要向电力网络购电^[2]。通过图表可以看出，在9点至11点阶段，为电价的峰值阶段，可以通过融入新能源补充发电，让新能源发电与燃气轮机发电协同供应，既能满足高负荷运转的需求，又能达到低碳目标，也不需要额外再向电网购电。但在每天晚上的7点到8点钟，此时，电价为峰值电价阶段，仍然需要向电网额外购电来补充负荷需求。在每天中午的12点至下午4点的阶段，电价为平值电价阶段，新能源发电的比例将会逐渐降低。结合图三不难看出，在这一阶段通过电转气的运行可以吸收一部分的新能源发电量，并且在碳捕捉系统的协同配合下，也可以通过捕捉大量的二氧化碳有效地降低碳排放，从而增加碳交易中的收入费用^[3]。

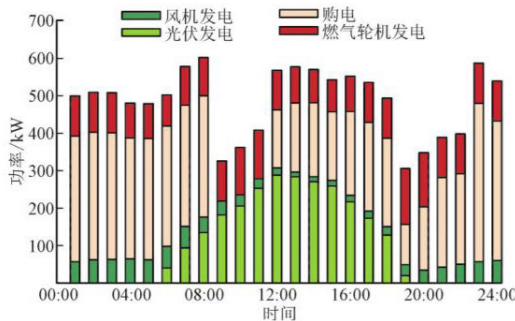


图2 电源出力优化运行结果

根据（图3）展示的电负荷优化运行结果可以看出，在电价的峰谷值时间段内，P2G联合碳捕集系统在运转过程中的成本要明显低于采购天然气的费用，并且碳捕集系统还可以额外地从大气环境中捕获二氧化碳，但由于受到的电转器最大输出功率的局限，可能需要消耗二氧化碳将其转化输出为氧气，还能额外提供一部分天然气，以此来降低综合运行模式下所产生的成本费用。因此，将电锅炉作为补充备用供热。在每天的9点到11点，电价处于峰值阶段，为了避免能源综合系统在运行过程中产生的风光电惩罚成本，可以通过P2G联合碳捕捉体系将剩余的新能源电转化为天然气，这样就能够有效降低运行过程中产生的风光电惩罚费用。在每晚的7点钟至8点钟，电价处在峰值阶段，因此，选择采用电锅炉供电的方式协调供热。

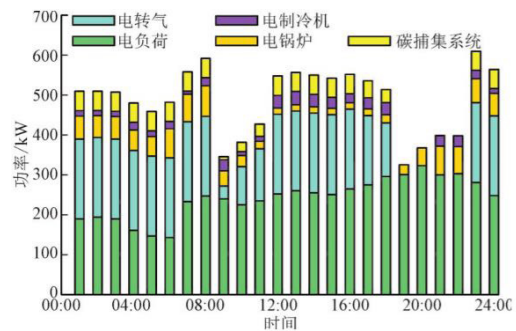


图3 电负荷优化运行成果

根据（图4）所示的低碳型蓄电池充放电的运行优化成果可以看出，蓄电池平均在一个调度周期内的充电量与放电基本相等。最大的充放电产生的电功率达到20千瓦，并且蓄电池的充放电处于错峰状态，不会同时充放电。在每天的凌晨5点到早上8点，电价处于峰谷电价，此时，蓄电池就需要开始充电。而在早上的9点到中午的11点之间，电价则处于峰值电价，蓄电池需要最大功率放电，在每天中午的12点到下午2点之间，新能源发电的占比相对较大，此时蓄电池就可以协调新能源与燃气轮机共同发电，并且在此时实现自我充电。这一阶段的电价处于平值电价，但两点之后峰值电价马上就会到来，为更好地应对峰值电价的用电高峰问题，此时，正好利用空隙将蓄电池充满，确保其在峰值电价时间段内能够充分放电，从而减少向电网购电产生的成本费用。

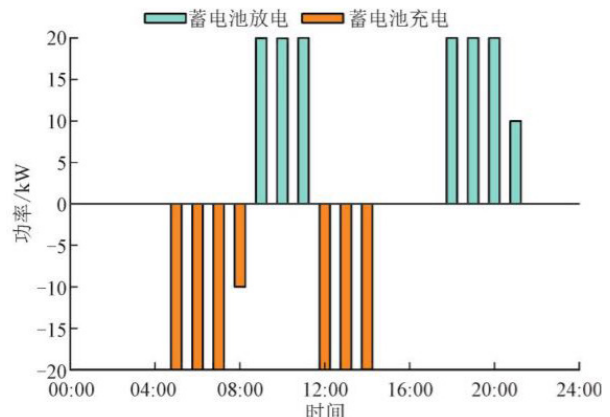


图4 蓄电池重放电优化运行成果

根据（图 5）所示的天然气负荷优化运行成果可以看出，当电价在谷值期间，P2G 系统的运行成本明显要低于像电网购气的成本费用，并且，P2G 在运行的过程中还会消耗掉前期收集的二氧化碳，在降低二氧化碳排放量的同时，也实现了这种能源的高效利用，还帮助运行系统降低了碳交易产生的成本费用。因此，此时可以通过电转气的方式，满足天然气的负荷需求。在每天早上的 9 点到 11 点电价峰值阶段，新能源的发电能够达到顶峰，新能源发电可能还存在剩余电量，剩余部分可以转化为天然气。而在每天中午的 12 点到下午的 6 点期间，这一阶段的电价属于平值阶段。而在每晚的 9 点到 10 点阶段，电价重新回归于平值阶段，仅结合夜间风力发电无法满足用电负荷需求，也没有多余的电量实现电转气^[4]。

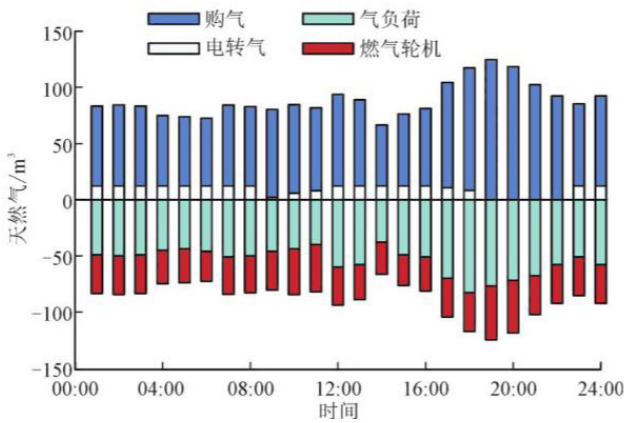


图 5 天然气资源优化运行成果

根据（图 6）所示的热负荷优化运行成效可以看出，该区域的早晚阶段对于热负荷的需求量超高，并且各个时间点的热负荷值与电锅炉和热交换输出的功率变化相匹配。因此，在电价的峰谷阶段中，应额外考虑碳交易过程中产生的成本，尤其是在燃气轮机运行时，碳排放量较低的情况下，就可以由燃气轮机产生的余热实现交换，与电锅炉协同供应热能。而在峰值电价期间，这一阶段的购电成本较高，因此，热负荷就可以由汽轮机所产生的余热发生交换进行供应，但考虑到交换输出的热功率上限受到了阻碍，无法满足全部的供热需求，因此，还需要额外增加电锅炉供热保持平衡。

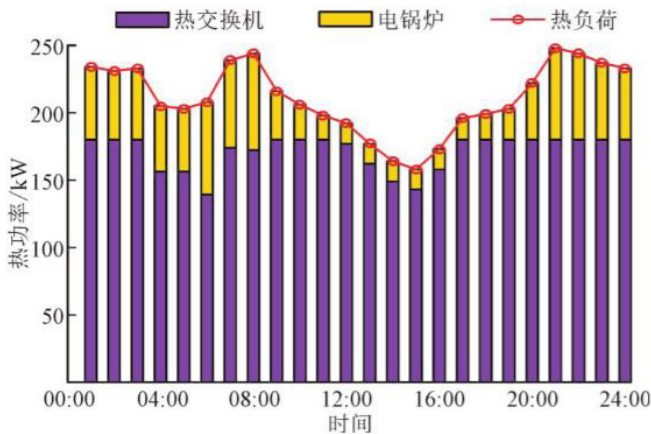


图 6 热能优化运行成果

根据（图 7）所示的碳交易优化运行成果可以看出。在一天的 24 小时之中，通过优化调度综合能源系统能够获得碳交易收益。尤其是在每天的 9 点到 11 点之间，此时属于用电的峰值阶段，需要额外地向电网购电。P2G 系统的运行成本过高，为避免增加整个综合能源系统的运行成本，在这一阶段碳捕捉系统并不工作。这一阶段的主要发力来源于燃气轮机，尽量通过燃气轮机发电，减少购电比例，让电网发电机组所产生的二氧化碳量低于标准的分配额度，从而不产生额外的碳交易成本。在每天中午的 12 点到下午的 6 点阶段，此时为电价的平值阶段，新能源发电的占比相对较大，此时产生的二氧化碳并不会达到二氧化碳的分配排放额度，因此，也可以获得部分的碳交易收入。

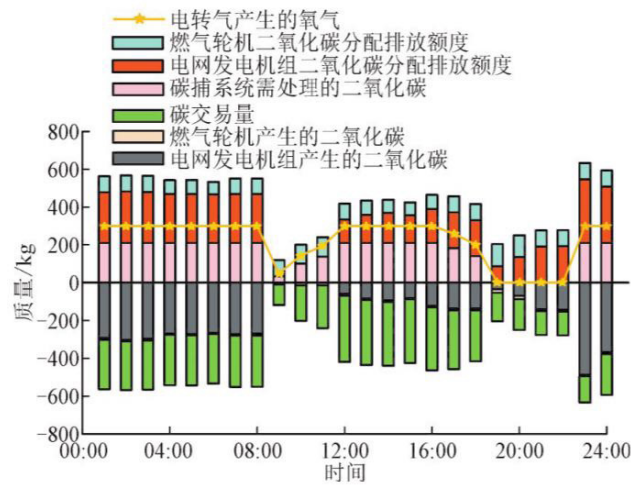


图 7 碳交易优化运行成果

结语

综上所述，本篇文章通过构建算法案例，分析了电转器和碳捕捉设备的电气热综合能源系统优化运行的方式，并得出以下两个结论。第一，通过对综合能源系统的优化运行可有效实现碳排放量的灵活调节与控制，从而为企业争取更多的减排和碳交易收入。第二，系统的运行成本可能会影响到低碳运行调节的成效，P2G 系统可有效调节新能源发电成本但对碳交易成本并不会产生直接影响。多种系统的综合运用能够让燃气轮机的能源利用效率大幅提升，从而灵活地调配电气热综合能源系统在运行过程中的成本费用，让碳交易成本和能源应用成本都有所下降。

参考文献

[1] 邢作霞, 赵子逸, 孙浩, 张鹏飞, 付启桐. 基于电制氢多级利用的综合能源系统低碳经济运行优化研究 [J]. 综合智慧能源, 2025, 1-12.
 [2] 韩逸飞, 徐婧, 谢典, 冯征. 考虑碳捕集的风光火储综合能源系统多目标运行优化 [J]. 热力发电, 2024, 53(08): 30-37.
 [3] 朱驿. 考虑源荷不确定性的区域综合能源系统低碳优化运行研究 [D]. 兰州理工大学, 2024.
 [4] 韦翌帆. 考虑源-荷不确定性和低碳目标的含氢综合能源系统优化 [D]. 河北科技大学, 2024.