

生物质发电助力能源低碳转型的工艺与经济价值分析

吴宜蓁

中国华电科工集团有限公司, 北京 100071

[摘要] 生物质发电是重要的可再生能源利用形式, 在能源结构低碳化进程中起到重要作用。文章综述了直燃发电、气化发电以及耦合发电等主要工艺技术路径的工作原理及优缺点, 并对其中碳减排及环境协同效益进行了探讨研究发现, 生物质发电通过“碳中和”方式达到减排目的, 一个 30 兆瓦典型农林生物质直燃发电项目一年的碳排放量约为 10.5 万 t。从经济角度考虑, 生物质发电具有一定能源替代性和产业链带动作用, 但是其成本较高。对资源保障性、提高技术水平和市场政策等限制因素, 本文提出优化原料收储运体系、加强技术研发创新和产业转型升级、完善相关政策以及市场环境等措施。

[关键词] 生物质发电; 低碳转型; 工艺技术; 碳减排; 经济价值

DOI: 10.33142/hst.v9i1.18969

中图分类号: TM619

文献标识码: A

Analysis of the Process and Economic Value of Biomass Power Generation in Supporting Low Carbon Energy Transformation

WU Yizhen

China Huadian Engineering Co., Ltd., Beijing, 100071, China

Abstract: Biomass power generation is an important form of renewable energy utilization, playing a crucial role in the low-carbon process of energy structure. The article summarizes the working principles and advantages and disadvantages of the main process technology paths such as direct combustion power generation, gasification power generation, and coupled power generation, and explores the carbon reduction and environmental synergy benefits among them. It is found that biomass power generation achieves emission reduction through a "carbon neutral" approach, and a typical 30 MW agricultural and forestry biomass direct combustion power generation project has a carbon emissions of about 105,000 tons per year. From an economic perspective, biomass power generation has certain energy substitution and industrial chain driving effects, but its cost is relatively high. This article proposes measures such as optimizing the raw material collection, storage, and transportation system, strengthening technological research and development innovation, industrial transformation and upgrading, improving relevant policies, and market environment to address the constraints of resource security issues, technological advancement, and market policies.

Keywords: biomass power generation; low carbon transformation; process technology; carbon reduction; economic value

引言

在全球应对气候变化背景下, 能源系统低碳转型已经成为普遍认知, 在我国提出“双碳”目标之后, 可再生能源发展迅速。而生物质能是唯一一种既可以制备成固体、液体也可以制备成气体燃料的可再生能源, 在整个能源体系中有非常重要的地位。到 2024 年底, 全国生物质发电装机达到 4599 万千瓦, 生物质供热量约为 4.89 亿吉焦, 用于工业供热、民用供暖等多个方面。生物质发电为人们的生活提供了清洁能源的同时也把农村地区的垃圾、秸秆等变废为宝, 对于推动乡村振兴、保护环境都起到重要作用。而产业的发展也存在很多问题, 需要从工艺技术、低

碳效益、经济效益等方面进行研究, 以促进产业的高质量发展。

1 生物质发电的工艺技术路线

生物质发电工艺主要包括直燃发电、气化发电、燃煤耦合生物质发电等。直燃发电应用最广, 即把农作物秸秆、林业废弃物等生物质燃料经过简单预处理之后送入专门设计的锅炉内燃烧, 产生的蒸汽推动汽轮发电。该工艺的优点是技术比较成熟可靠, 但是对原料水分及热值有一定要求, 容易造成锅炉受热面上积灰腐蚀, 为了更高效的运行同时减少污染物排放, 人们不断开发新的方法, 即生物质富氧燃烧技术就是用富含氧气燃料代替常规燃料生物

质或者生物质与煤混合燃料甚至纯生物质,然后用高纯度氧气和循环烟气作为辅助燃料进行燃烧,使得最终烟气中的二氧化碳浓度过高。

气化发电也是一条重要的途径,利用热化学方式把生物质变成可燃气体,经过净化后可以给燃气轮机或者内燃机供电。主要难点就是气化炉的选择以及操作条件的控制,在采用循环流化床正压气化之后,可以灵活稳定的在30%~120%之间改变气化炉的负荷,从而解决由于生物质原料组成变化大的问题对气化炉带来的影响。其优点是发电效率高并且易于控制污染物,但是系统复杂并且投资大。近年来由于绿色甲醇的需求越来越大,因此气化的重要性也日益突出。

燃煤耦合生物质发电技术是通过掺烧实现煤电低碳化改造,耦合方式分直接耦合、间接耦合和并联耦合。直接耦合改造投资少但是影响煤灰利用;间接耦合是通过独立气化或者燃烧系统进入炉膛,灵活性好。华电襄阳电厂燃煤耦合生物质气化发电项目,是燃煤火电机组生物质与煤的间接混燃项目,2018年6月被国家能源局、生态环境部遴选为国家燃煤耦合农林生物质发电示范项目,主设备年利用小时数为5500h,年可发绿电约5900万kWh,消耗农林废弃物约5.14万t,相当于节约1.8万t标准煤,减排二氧化碳约为5万t,减排燃煤所产生的二氧化硫约218t。

2 生物质发电的低碳效益

2.1 碳减排机理

生物质发电碳减排根源在于“碳中和”。生物质燃料由植物光合作用吸收空气中的二氧化碳而来,燃烧后又向大气中释放同样的量,构成一个闭环。相对于传统的化石能源而言,减少了地壳中的碳含量,因此具有较大的减碳效果^[1]。但是全过程仍然会有少量的碳排放,主要是指生产燃料所消耗的化石燃料。也有学者利用生命周期分析的方法进行测算,在碳中和的情况下,由于中国的电力体系快速去碳化,农林生物质发电的碳减排量会迅速减少,在2050年左右甚至会降到零,行业的碳资产也会大幅缩水。这提示减排效益具有动态特征,需结合电力系统脱碳进程科学评估。

进一步地,生物质能与碳捕集与封存技术结合可以实现负碳排放,也就是从大气中去除CO₂。而生物质能碳捕集与封存技术是一种负碳技术,它是将生物质燃烧和现有的碳捕集利用与封存技术结合起来,以便于大规模、快速、持续地降低CO₂排放量,在短期内是很有利的,但是由于成本较高、技术复杂等原因所面临的困难。

2.2 环境协同效益

除了减少碳排放,生物质发电还有许多其他的环保协同效应。比如可以解决农作物残余物和林业废弃物的资源化问题,减轻农田中秸秆露天焚烧造成的空气污染问题。每到夏秋收打谷的时候,一些地方由于大量焚烧秸秆而造成严重的PM_{2.5}污染,对当地空气质量以及人们的身体健康造成极大的危害,而生物质发电厂可以大量接纳这些秸秆,从根本上解决这些秸秆被随意丢弃或者焚烧的问题。

其次有利于提升城乡居住环境质量。畜禽粪便、有机生活垃圾等如果处理不好,会造成水体富营养化和土壤污染。而采用厌氧发酵发电等方式,这些有机废物得到无害化处理以及资源化利用,沼渣沼液还可以用作肥料施入农田中。对于污染物排放控制,生物质耦合发电可以大大减少二氧化碳排放量,并降低二氧化硫以及因燃烧产生的热力学氮氧化物排放量。这是由于生物质含硫量较低以及两者混合燃烧所带来的协同作用所致。但是要十分注意的是,颗粒物的排放问题不能忽视,必须安装高效除尘设备等。

3 生物质发电的经济价值分析

3.1 能源替代效益

生物质发电能源替代效益主要表现在两个方面:一是对化石能源替代;二是减少能源进口。每利用1t农林废弃物发电,可以替代0.4~0.5t标准煤,如果以2024年全国生物质发电量约为1500亿kWh来计算,全年替代标煤约4500万t,减排二氧化碳超过一亿吨。华电襄阳电厂生物质低碳化改造项目(一期)就是很好的例子,该项目运行充分利用当地丰富的生物质资源,以稻壳和秸秆为主要燃料,有效解决了当地的农林废弃物问题,也对当地环境起到正向作用,同时可有效解决电力企业的新能源指标配额问题。从能源安全角度考虑,发展生物质发电有利于改善我国能源结构、降低对外石油天然气依存度。而中国生物质资源丰富,每年可产生的生物质能有上亿吨,充分利用本国生物质资源对于保证我国能源安全具有重要意义。

3.2 产业链带动作用

生物质发电对产业影响主要表现在农村经济以及就业上。原料收集、收储运需要大量劳动力,项目形成了以生物质燃料收购、破碎、加工、运输为一体的生物质燃料收储运体系,每年给当地农民支付燃料款约6000万元,带动当地2000多户农民从事农林废弃物回收利用工作,“公司+农户”。成型燃料方面,2024年中国生物质成型燃料产量达到2200万t,比2015年提高175%,占全世界27%,位居世界第一。成型燃料的发展促进了相关装备制造、交通运输业、供热行业等相关产业共同发展。

3.3 政策支持与市场机制

产业发展需要政策引导和支持以及市场竞争的作用。政策方面,国家制定了稳定的上网电价并给予补贴,2024年平均补贴 0.35 元/kW h,极大改善了项目的盈利能力。2025 年政府工作报告中也提出了要“加快构建未来产业发展投入增长机制,发展生物制造、量子科技、具身智能、6G 等未来产业”,其中的生物制造是生物质能源的重要表现形式之一,受到重点关注。市场方面,全国碳市场的建立和完善以及自愿减排交易市场的成熟也为生物质发电企业带来了新的盈利方式。企业可以通过参与核证自愿减排量的交易从而获得相应的收益。但是光靠碳资产是解决不了经济性问题,而设计出一个至少可以抵消 20%燃料费用的农村环境治理绩效补偿机制也会对农林生物质发电企业的盈利有所帮助。近年来我国首个绿色燃料电商交易平台“众新燃”上线,预示着绿色燃料行业已经从无序竞争走向规范化、平台化、高质量发展时代。

3.4 成本与收益概述

生物质发电成本构成主要包括原料成本、投资折旧以及运行维护三部分。其中原料成本一般占 50%~70%,是决定经济性的主要因素。而秸秆等原料分布广泛、集中度低、季节性强,收集储存运输的工作量大而且容易造成浪费,因此实际到厂成本往往高于预期^[2]。其次在投资折旧上每千瓦的投资约为 8000~10000 元人民币,高于火电厂,相应的折旧费用也就更高。最后在运行维护上除了人工、备件、耗材外,由于生物质含有较高的碱金属元素,容易造成锅炉内壁被腐蚀附着大量灰尘从而加大维护频率和增加维护成本。

在收益上,主要有售电收入、电价补贴以及供热收入,此外一些项目还可以通过碳交易或者灰渣利用获得一定的额外收益,在整个行业内,由于原料价格波动大、补贴不到位、上网小时数少等原因,大多数项目处于微利甚至亏损状态。20 年来,我国生物质能主要以发电为主,现在需要转变思路,发展绿色甲醇等高附加值产品。这说明单纯靠发电是很难盈利的,必须要走多联产、高附加值的发展道路。

4 发展挑战与对策

4.1 资源供应稳定性

资源供应稳定性是最主要的问题。生物质原料是分散、季节性和不稳定的,收集距离过远会导致运输费用高,在存储过程中容易发霉自燃造成损失。有观点认为,生物质原料供应不足是关键,国内外许多生物质电厂不能正常运营的原因之一就是原料供应问题。此外,以中国国情的“小

农经济”导致的生物质原料价格差异大、波动大也是需要重点关注的问题。因此需要尽快建设政府为主导、农业合作社统筹管理的市场化运营原料供应系统,在粮食大省设立收储运中心,利用“公司+农业合作社”的方式进行原料集中采购以降低分散采购成本和风险。此外,建议地方政府能够积极发挥对生物质秸秆收集、储存工作的指导工作,出台相关工作的指导意见,使生物质原料市场价格保持相对稳定,从而保证生物质能源相关企业的正常运转。建立价格稳定机制和风险预警体系,也是保障供应稳定的重要举措。

4.2 技术效率提升

技术效率也是影响竞争力的又一个重要方面。目前生物质发电热效率一般不足 40%,而国外先进水平已经可以达到 50%以上。造成低效的原因主要是由于原料质量不稳定,锅炉参数较低,汽轮机容量较小等原因。而在气化方面,当前的重点工作是开展各种气化技术路线的大规模工业试验并侧重于绿色液体燃料项目的示范,加快相关技术的进步以及产业链的发展,奠定未来大规模应用的基础^[3]。提高效率要从多个角度入手:开发高效的燃烧装置来提高锅炉的效率;改进热力系统的参数设计,发展高温高压甚至超高压机组;推动热电联供以实现能源的有效梯级利用;探索多种技术结合模式,例如生物质气化与燃气蒸汽联合循环、与太阳能、风能结合等。同时,以创新技术为核心,实现从实验室小试到中试再到产业园区技术落地转化过程,在合成气组成精确控制、高效分离、耐硫催化剂研究等方面下功夫。

4.3 政策与市场瓶颈

政策及市场问题也制约行业发展。政策方面:电价补贴不到位影响企业资金链;部分地区对于项目认识不够,导致项目推进困难,甚至出现“邻避效应”以及规划限制等问题;掺烧监管比较困难,一些掺烧行为破坏行业声誉。市场方面:生物质电力不能享有与其他可再生能源相同上网权,在风电、光伏发电被放弃的同时,生物质也被放弃;绿证环境价值没有得到充分认可,消费者缺乏购买动力;碳市场与电力市场之间的联动机制还需要进一步健全。

突破困境需要综合施策。一是完善法律法规,加快制定生物质能相关法律,明确中长期发展计划,防止政策变化造成企业资金链断裂。二是加大财政金融支持力度,在中央预算内投资基础上,推广绿色债券等方式进行融资用于开发和技术升级。三是创新市场机制,将符合条件的企业纳入全国碳排放权交易市场,利用国家核证自愿减排量获得额外收入。四是加强市场监管,严格要求掺烧比例,

保证市场公平竞争以及行业良好形象。

4.4 可持续发展路径

面向未来,产业要找到一条可持续发展的道路。从产业定位来看,生物质能不应仅仅是发电,而应该成为支撑多个行业实现碳中和的一个整体方案。推进应用方式上由单一发电到电热气燃料多联产应用,从能源供应到材料化工的应用^[4]。绿色甲醇、可持续航空燃料、微生物蛋白等高附加值的产品代表着未来方向,未来生物质能产业会往高附加值发展,尤其是绿色甲醇,全球可再生甲醇项目总的设计能力达到 4130 万 t,中国占全球生物甲醇项目的 70%。

从产业生态看,应形成原料-装备-产品协同发展的格局。以产业链协同为抓手,搭建全国性的生物质原料及项目信息平台,发展设备制造加项目运营的企业,降低全产业链成本超 30%,并加快制定相关标准,推进国际认证与国内标准对接,提高整个行业标准化、国际化程度。从空间上看,根据乡村发展以及零碳园区建设需要,在不同地区实施不同的方案,如在主产粮区开展农林生物质发电,在主产畜牧业区开展沼气发电,在工业集中区发展生物质热电联产等。

5 结束语

生物质发电在能源低碳转型中起到重要作用。从直燃、气化、耦合发电等不同工艺技术路线来看,每一种技术都

有其应用场合及其各自的优缺点,在实际选择时需要结合当地资源情况来决定。低碳效果主要表现在减排以及生态环境保护上,碳中性和负碳技术对于我国实现碳达峰、碳中和目标有着重要意义。经济效益上,生物质发电可替代传统化石能源,促进乡村振兴,同时也有一定的社会效益。但是由于成本较高、收益较低、产业上下游市场开发不足等问题限制了其发展。未来应从技术研发、政策制定和完善市场运行机制等方面进行努力。通过优化原料供应、提高技术装备水平、拓宽高值化应用领域、市场开发及应用途径提高行业竞争力及可持续发展性。

[参考文献]

- [1]牟文玉,李慧,熊强.中国生物质能产业发展形势及存在问题和建议[J].化工进展,2026,26(2):1-14.
- [2]宿宇,刘玉洁,张建红,等.建立分类分级的生物质能碳足迹核算框架研究[J].中国工程咨询,2026(1):57-66.
- [3]陈辉,方亚雄,王睿.燃煤锅炉掺烧生物质技术现状及发展趋势[J].能源工程,2025,45(6):29-37.
- [4]骆仲泐,王霄焕,李浦,等.生物质与煤直接耦合燃烧技术的应用与研究进展[J].能源工程,2025,45(6):3-17.

作者简介:吴宜蓁(1996.4—),女,沈阳工业大学,本科,测控技术与仪器专业,中国华电科工集团有限公司,国家能源生物燃气高效制备及综合利用技术研发(实验)中心检验员,6年,助理工程师。