

双碳背景下分布式光伏运营模式分析

王 花¹, 范丽佳², 苏 斌², 范 苑², 叶辽羽², 李根胜³, 张 腾³

(1. 中建四局第五建筑工程有限公司, 广东 深圳 518052; 2. 中建四局工程技术研究院, 广州 510665;
3. 中建地产广州有限公司, 广州 510665)

摘要:近年来,全球能源消费结构加速向清洁低碳发展,我国为实现双碳目标大力推动可再生能源的开发利用,其中分布式光伏发电的迅速发展有效提高了清洁能源的使用比例,对实现国家低碳战略发挥重要作用。分析总结我国目前分布式光伏的三类运营模式,并结合实际案例对分布式光伏项目不同运营模式的经济效益进行定量分析。结果表明,在投资资金充足的前提下,自发自用余电上网的运营模式经济性是最好的,若资金欠缺则合同能源管理模式也是不错的选择。研究结果可为分布式光伏项目运营模式的选择提供参考。

关键词: 双碳; 分布式光伏; 运营模式; 经济效益

中图分类号: TK519 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2024)05-0187-05

作为世界上最大的二氧化碳生产国,中国近年来为走向低碳转型作出了重大努力。2020年,中国向世界作出宏伟承诺,努力实现“2030年前碳达峰,2060年前碳中和”,并提出“十四五”期间推进电力系统清洁低碳转型^[1]。2022年3月,国际可再生能源机构(IRENA)发布的《World Energy Transitions Outlook 2022: 1.5 °C Pathway》表明,全球升温控制在1.5 °C以内的情景下,2030年全球光伏发电累计装机容量将接近5 221 GW,2050年将超过14 036 GW;2030年全球光伏发电量占总发电量的比例约为19%,2050年约为29%^[2]。2023年前三季度,全国光伏新增装机12 894万kW,同比增长145%,其中集中式光伏6 180万kW,分布式光伏6 714万kW^[3]。

随着中国政府推动清洁能源的发展,集中式光伏发电(CPV)和分布式光伏发电(DPV)的光伏发电(PV)发展迅速^[4]。由于CPV的高土地成本,使其开发受到了限制。然而,DPV因其具有较高的投资回报率和较低的风险,而成为利用太阳能的主要方式,其主要应用包括建筑附属光伏(BAPV)、建筑综合光伏(BIPV)和厂址^[5]。分布式光伏发电作为

城市利用太阳能的重要途径,中国政府也出台了一系列政策,支持在法律、电价、并网标准、项目管理、资金支持等方面的分布式光伏的发展^[6-8]。然而,投资的经济效益和可持续性是关键,因此分布式光伏不同运营模式的盈利能力比选对项目的投资建设具有重要意义。

1 分布式光伏运营模式

1.1 EPC运营模式

在工程总承包(engineering procurement construction,EPC)运营模式下,分布式光伏项目由产权所有人进行投资、建设和运营,目前主要包括自发自用余电上网模式、全额上网模式及自发自用+储能模式^[9]。

1.1.1 自发自用余电上网模式

“自发自用,余电上网”是分布式光伏发电的一种消纳模式。即将分布式发电单元作为用户自备电源,所发电量用户优先自用,多余电量由电网企业收购,不足电量由电网企业提供。该种模式下,在屋顶分布式光伏发电系统并网点处和用户与上级电网之间的公共连接点处分别设置计量表计,前者用于计量分布式光伏发电的发电电量,后者用于

收稿日期: 2023-11-28

基金项目: 中国建筑第四工程局有限公司企业专项科研项目(CSCEC4B-2023-KTA-2)

作者简介: 王花(1992—),女,陕西榆林人,硕士,工程师,研究方向为建筑施工技术管理、新能源系统设计;范丽佳(1990—),女,黑龙江安达人,博士,工程师,研究方向为双碳技术与绿色建造;通信作者苏斌(1991—),男,湖北天门人,硕士,工程师,研究方向为建筑节能、绿色建筑与建筑碳排放;范苑(1993—),女,河南焦作人,硕士,助理工程师,研究方向为双碳技术与绿色建造;叶辽羽(1995—),男,广东广州人,硕士,助理工程师,研究方向为双碳技术与绿色建造;李根胜(1973—),男,安徽合肥人,高级工程师,研究方向为双碳技术与绿色建造;张腾(1985—),男,湖北钟祥人,硕士,工程师,研究方向为双碳技术与绿色建造。

计量用户的用电电量和分布式光伏发电反送上级电网电量,如图 1 所示。自发自用余电上网模式中,用户侧主要通过光伏发电补贴收益、节省自发自用电量的电费及反送电量上网电价结算 3 种方式获得收益。需要注意的是,余电上网对用户侧并网资质有严格的要求,目前无并网资质的用户可通过防逆流装置来实现自发自用余电不上网。

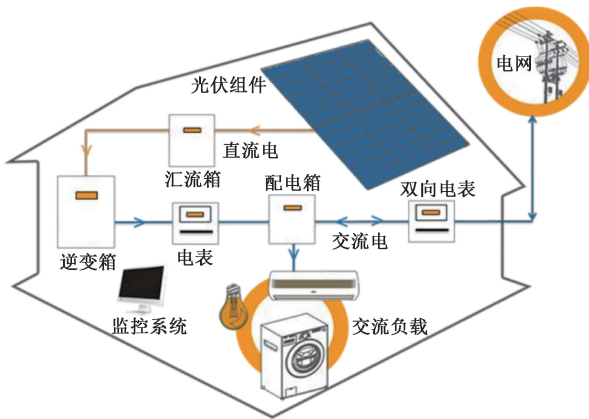


图 1 自发自用余电上网模式系统结构

1.1.2 全额上网模式

全额上网模式是以用户侧发电、电量全额上网且配电网系统平衡调节为特征的光伏消纳模式。光伏电站产生的电力直接接入当地电网,电网企业采用先进技术优化电网运行管理,保障电力用户安全用电,电费由电网企业结算,电力用户根据产品目录中的电价向电网企业支付电费。该模式与自发自用余电上网模式一样涉及并网,因此需要涉及并网备案、项目设计审查及并网调试和验收各个阶段流程办理及资料准备。所以分布式光伏供电主体的售电资格是前置条件也是必要条件。该运营模式投资方主要通过光伏发电补贴收益和全额上网电价结算两方面获得收益。

1.1.3 自发自用+储能模式

由于可再生能源的间歇性和不稳定的特性或者项目不具备并网条件,在实际应用中会出现难以满足电力负荷侧需求的情况,因此在用户侧配置储能电池储能,可以提高系统可调度性,维持电压与频率稳定,保证持续供电。自发自用+储能模式能够科学地实现对可再生能源的高效利用,合理规划与配置储能用能容量,从电与热两方面综合优化系统能量管理,匹配系统内发电单元与电热负荷的峰谷特性,从而可以显著提高新能源电力的消耗,实现削峰填谷,降低能源系统用能成本,同时确保电网系统的安全可靠运行。影响该运营模式的因素

主要包括峰谷价差、市场调频比以及储能投资成本,但目前储能建设成本居高不下是限制该模式快速发展的主要因素。该运营模式主要通过光伏发电补贴收益、光伏发电自用收益及储能峰谷价差节省电费获得收益。

1.2 合同能源管理运营模式

2009—2017 年,中国政府实施了“金太阳示范项目”,将合同能源管理模式引入分布式光伏项目。该模式解决了大多数电力用户没有足够资金投资光伏项目、没有相应的技术和管理能力等问题,避免了光伏开发企业作为主要电源的销售资质问题。合同能源管理模式是由第三方负责光伏发电系统投资、建设和运维的新型运营模式,光伏占用的屋面面积采用支付租金模式由第三方向产权所有者支付,光伏发电系统所发的电量可以全部销售给国家电网,也可以全部销售给用电企业,一般优先提供给合同方电力用户^[10]。在该运营模式下,第三方运营商按光伏总发电量来获得补贴收益和售电收益,用户主体则通过出租屋顶或地面资源的租金收益和第三方提供优惠电价获取收益。

1.3 碳排放权交易运营模式

2021 年 2 月 1 日,《碳排放权交易管理办法(试行)》^[11]和《碳排放权登记交易结算管理办法(试行)》正式在全国范围内试行,全国碳市场也同步上线。随着全国性碳交易市场的上线、控排行业范围的不断扩大以及碳排配额的不断收紧,更多企业将进入碳交易市场,碳排配额及国家核证自愿减排量(CCER)的价格也将持续上涨^[12]。2020 年,在我国率先实行碳交易试点的地区,CCER 价格约 30 元/t,2021 年的 CCER 价格已经达到 41 元/t,权威机构预测,2030 年这一数字将上升到 160 元/t 以上。碳排放权交易运营模式下每年可在正常的光伏收益外增加碳交易收入。并不是所有的可再生能源项目都可以认证 CCER,它需要经过相关部门的审批,更为先进的光伏应用形式和更优质的光伏系统无疑将更容易通过审批。

2 案例研究

2.1 项目概况

选取花都混凝土预制(precast concrete, PC)构件厂项目作为工业厂区分布式光伏研究案例,光伏拟安装在 PC 构件厂屋面,如图 2 所示,建筑屋面形式为金属屋面,PC 构件生产车间屋面面积约为 2.6 万 m²,厂内变压器容量 1 600 kV·A。项目位于广东省广州市花都区,北纬 23.35°,东经 113.15°,

海拔约 8 m。根据瑞士 Meteonorm 气象研究所的气象数据,年均太阳辐射量为 $1\,218\text{ (kW}\cdot\text{h)/m}^2$ 。根据《太阳能资源评估方法》(GB/T 37526—2019),该地区属于Ⅲ类地区即太阳能丰富带,适合建设光伏。根据调研车间近一年总用电量约 72 万 $\text{kW}\cdot\text{h}$,近一年月度用电高峰为 $91\,710\text{ kW}\cdot\text{h}$,用电均价为 $1.3\text{ 元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$,车间作息时间为 06:30—12:00、13:30—23:00。根据项目特点,综合考虑屋面障碍物、女儿墙、检修通道等因素确定屋面有效利用面积,进行屋面组件排布,最终确定装机容量。基于现行运营模式对本项目分布式光伏投资建设进行经济效益综合分析。



图 2 广州花都 PC 构件厂项目航拍图

2.2 运营模式分析

因本项目不涉及碳排放权交易,故仅对其余 4 种运营模式进行分析,其中涉及系统运行条件、组件参数及光伏效益、成本测算参数均一致,具体参数设置见表 1。其中光伏系统运行期间仿真模拟条件均为峰值日照 $1\,218\text{ h}$,系统效率设计理论值 80% ,光伏组件选用隆基主流组件 LR5-72HPH 550M,最大功率 550 W ,组件效率为 21.5% ,组件寿命为 25 年,组件衰减率按运行寿命周期内第一年 2.0% ,之后平均每年衰减 0.55% 进行测算。

2.2.1 自发自用余电上网模式

受限于园区变压器容量 $1\,600\text{ kV}\cdot\text{A}$,光伏电站采用自发自用余电上网时只能限制在 $1\,600\text{ kV}\cdot\text{A}$

表 1 分布式光伏效益、成本测算参数设置

参数	参数设定值	备注
光伏自用电价/ $[\text{元}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}]$	1.3	仅限于本项目
光伏上网电价/ $[\text{元}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}]$	0.453	广东区域
光伏发电补贴/ $[\text{元}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}]$	0.1	按实际发电量连续补贴 3 年,广东区域
光伏投资成本/ $(\text{元}\cdot\text{W}^{-1})$	3.5	单晶硅组件
光伏运维成本/ $(\text{元}\cdot\text{W}^{-1})$	0.05	
储能电池投资成本/ $[\text{元}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}]$	1\,500	磷酸铁锂电池
储能峰谷电价差/ $[\text{元}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}]$	0.79	

以内,根据电网要求装机容量不应超过变压器容量的 80% ,因此本项目自发自用余电上网模式的最大装机容量为 $1\,280\text{ kW}$ 。综合考虑屋面阴影、最大装机容量及组件参数进行光伏组件排布,实际装机容量为 $1\,279.3\text{ kW}$,组件数量共 $2\,326$ 块,如图 3 所示。通过测算,在自发自用余电上网模式下首年发电量约为 122.16 万 $\text{kW}\cdot\text{h}$,运行期平均年发电量为 114.42 万 $\text{kW}\cdot\text{h}$,25 年总发电量为 $2\,860.61$ 万 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 。依据该构件厂年度用电情况按照自用比例 63% 进行光伏收益和成本测算。

2.2.2 全额上网模式

拟定 1 个 10 kV 并网点并接厂区 10 kV 配电系统上,以“全额上网”的模式实现光伏发电。综合考虑屋面阴影及组件参数进行光伏组件排布,实际装机容量为 $1\,972.85\text{ kW}$,组件数量共 $3\,587$ 块,如图 4 所示。经光伏系统仿真测算该项目首年发电量约为 188.38 万 $\text{kW}\cdot\text{h}$,计划运行 25 年的平均年发电量约为 176.46 万 $\text{kW}\cdot\text{h}$,25 年总发电量为 $4\,411.44$ 万 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 。全额上网模式下按照 100% 上网比例进行光伏收益和成本测算。

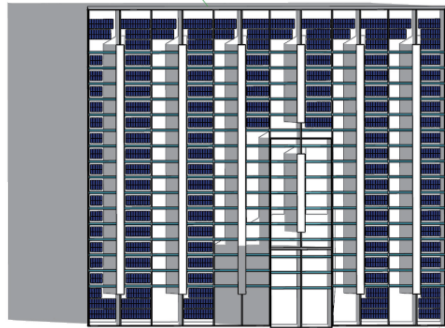


图 3 自发自用余电上网模式光伏组件排布图

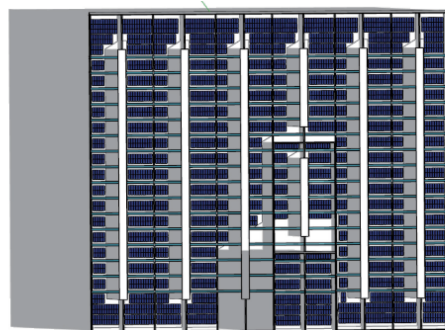


图 4 全额上网模式光伏组件排布图

2.2.3 自发自用+储能模式

综合考虑项目初始投资额及月度峰值用电情况,按照光伏月发电量占比月度峰值用电 60% 确定装机容量,经测算装机容量为 695.2 kW ,组件数量

1 264 块。储能电池容量配置按照备用 3 d、电池放电深度系数 0.8 进行测算,需要配置储能电池容量约为 5 000 kW·h。拟配置磷酸铁锂电池,其使用寿命约 8 年,全生命周期发电量 1 100 万 kW·h,为匹配光伏组件寿命运行期储能需要分 3 期投入。自发自用部分经测算首年发电量约为 66.38 万 kW·h,运行期平均年发电量约为 62.18 万 kW·h,25 年总发电量为 1 554.52 万 kW·h。自发自用部分按照自用比例 100% 进行测算,储能部分按照峰谷电价差额测算光伏的收益和成本。

2.2.4 合同能源管理模式

合同能源管理模式(即屋顶租赁模式)是由第三方能源公司投资,电站占用的 2.6 万 m² 屋面采用支付租金的方式由第三方支付,用户侧租金收益按照年租金 3 元/m² 进行测算,电价优惠收益根据年用电总量及用电单价综合测算 85 折进行该模式光伏收益和成本的测算。

这 4 种运营模式下收益和成本不尽相同,成本主要包括光伏初始投资、储能投资及运维成本,收益主要包括光伏补贴、光伏自用收益、光伏上网收益、储能峰谷价差收益、租金收益及电价优惠收益。各运营模式下的收益和成本见表 2。

EPC 运营模式下自发自用+储能模式的初期投资总额最大,运行期投资总额高达 2 580.32 万元,主要原因是现行市场储能电池价格居高不下且

表 2 4 种运营模式下的收益和成本

类别	参数	EPC 运营模式			合同能源管理模式
		自发自用余电上网模式	全额上网模式	自发自用+储能模式	
收益	光伏补贴总收益/万元	36.45	56.20	19.81	—
	年均光伏自用收益/万元	93.71	—	80.84	—
	年均光伏上网收益/万元	19.18	79.94	—	—
	储能首期峰谷价差收益/万元	—	—	869.00	—
	年均租金收益/万元	—	—	—	7.80
	年均电价优惠收益/万元	—	—	—	14.04
	年均收益/万元	114.35	82.19	185.91	21.84
	运行期投资总收益/万元	2 858.70	2 054.70	4 647.81	546.00
成本	光伏初始投资额/万元	447.76	690.50	243.32	—
	储能首期投资额/万元	—	—	750.00	—
	年度运维费用/万元	6.40	9.86	3.48	—
	初期投资总额/万元	454.16	700.36	996.80	—
	运行期投资总额/万元	607.76	937.00	2 580.32	—

寿命较短,需要分期投入高额成本,相应地该模式的年均收益也最大,主要是由于储能峰谷价差收益相对较高。其次是全额上网模式以及自发自用余电上网模式,两种模式的初期投资总额分别为 700.36 万、454.16 万元,两者投资差额的主要原因是全额上网模式可以最大限度利用屋面面积,而自发自用余电上网模式则会受到厂区变压器容量的限制进而影响到整个项目的装机容量。然而在收益方面,全额上网模式的年均收益却低于自发自用余电上网模式,主要原因是全额上网模式的上网比例高但上网电价低。而合同能源管理模式是唯一可实现零投资获取收益的模式,因此该模式对于资金欠缺的投资方是一种比较友好的运营模式。当然该模式也是年均收益最低的运营模式,年均收益低至 21.84 万元,远低于其余 3 种运营模式。

2.3 经济效益分析

由于本项目拟采用的 4 种不同运营模式所涉及的成本均不相同,所以需要进一步分析各模式的盈利能力来确定最优运营方案。4 种运营模式的盈利能力分析结果见表 3。根据计算结果,合同能源管理模式的投资净利润(NP)最低为 546 万元,自发自用余电上网模式的投资净利润最高为 2 250.94 万元。自发自用余电上网模式的年均收益率(APY)、总投资收益率(ROI)及内部收益率(IRR)分别为 25.18%、14.82%、27.06%,均远高于全额上网模式和自发自用+储能模式的相应指标值,其中自发自用+储能模式的峰谷价差收益是按理想状态即储能利用率 100% 测算,实际利用率会受到厂区夜间产能、天气情况等影响,因此实际值相较于测算值会偏低。此外,自发自用余电上网模式的静态投资回收期(Tc)最短,为 3.63 年,远低于全额上网模式和自发自用+储能模式,因合同能源管理模式不涉及投资成本,因此不参与 APY、ROI、IRR 及 Tc 的指标分析。综上所述,合同能源管理模式收益最低,自发自用+储能模式投资成本最高,全额上网模式受限于上网电价较低的价格同样收益一般。

表 3 4 种运营模式的盈利能力分析结果

参数	EPC 运营模式			合同能源管理模式
	自发自用余电上网模式	全额上网模式	自发自用+储能模式	
NP/万元	2 250.94	1 117.70	2 067.49	546.00
APY/%	25.18	11.74	18.65	—
ROI/%	14.82	4.77	3.17	—
IRR/%	27.06	10.35	14.93	—
Tc/年	3.63	8.61	9.20	—

因此在具备初始投资资金的前提下,以自发自用余电上网模式进行运营是最盈利的。

3 结论与展望

针对工业厂区的绿色能源转型,基于分布式光伏现行市场和政策分析总结了 EPC 运营、合同能源管理及碳排放权交易等三类分布式光伏运营模式。同时以工业厂区为例,根据项目特点设计了自发自用余电上网、全额上网、自发自用+储能及合同能源管理等 4 种运营场景,分别选择收益和成本的细化指标对各个运营模式进行测算分析。在此基础上,采用财务评价方法对相应的运营模式进行了经济效益分析。研究结果表明,在投资资金充足的前提下,自发自用余电上网的运营模式经济性是最好的,若资金欠缺则合同能源管理模式也是不错的选择。

基于研究结果,目前上网电价、峰谷电价的调控及储能成本的降低是提高分布式光伏经济性的关键。因此优化分布式光伏运营模式建议从以下 3 个方向展开:①推进能源储存技术创新,从而降低储能初始投资成本;②提出合理的峰谷电价政策,提高用户对负荷控制的参与度;③宏观调控上网电价,刺激用户及第三方开拓光伏市场。

参考文献

[1] 刘红卫,王雪丽,左德功,等. 双碳背景下电力系统低碳

转型性研究[J]. 电器工业, 2023(3): 40-44.

- [2] IRENA. World energy transitions outlook 2022: 1.5 °C pathway[EB/OL]. (2022-03-29)[2023-11-10]. <https://irena.org/publications/2022/Mar/World-Energy-Transitions-Outlook-2022>.
- [3] 国家能源局. 2023 年前三季度光伏发电建设运行情况[EB/OL]. (2023-11-03)[2023-11-10]. https://www.nea.gov.cn/2023-11/03/c_1310748819.htm.
- [4] 王文静,王斯成. 我国分布式光伏发电的现状与展望[J]. 中国科学院院刊, 2016, 31(2): 165-172.
- [5] LI H F, LIN H Y, TAN Q K, et al. Research on the policy route of China's distributed photovoltaic power generation, China[J]. Energy Reports, 2020, 6: 254-263.
- [6] 王青,江华,张天宇,等. 2022 年上半年中国光伏产业发展现状及面临的问题分析[J]. 太阳能, 2022(10): 5-12.
- [7] 刘琳,马超,黄书馨,等. 分布式光伏发电发展政策法律保障研究[J]. 中阿科技论坛, 2023(9): 153-157.
- [8] 孙乐平,郭小璇,潘晖,等. 考虑政策效力影响的分布式光伏装机容量预测[J]. 供用电, 2023, 40(7): 73-81.
- [9] 陈义. EPC 模式下分布式光伏发电的基建运营一体化安全管理研究[J]. 冶金管理, 2022(3): 124-126.
- [10] 管辉尧,景杰,白丹丹. 基于合同能源管理的分布式光伏发电项目效益浅析[J]. 能源与节能, 2020(12): 65-66.
- [11] 碳排放权交易管理办法(试行)正式发布[J]. 广西节能, 2021(1): 8-11.
- [12] 张文. 全国碳市场价格走势分析及应对建议[J]. 中国电力企业管理, 2023(22): 46-49.

Analysis on Distributed Photovoltaic Operation Mode under the Background of Carbon Peaking and Carbon Neutrality Goals

WANG Hua¹, FAN Lijia², SU Bin², FAN Yuan², YE Liaoyu², LI Gensheng³, ZHANG Teng³

(1. China State Construction Engineering 4th Bureau 5th Corp Limited, Shenzhen 518052, Guangdong, China;
2. Engineering Technology Research Institute of China Construction Fourth Division, Guangzhou 510665, China;
3. China Construction Property Guangzhou Co., Guangzhou 510665, China)

Abstract: In recent years, the global energy consumption structure has accelerated to a clean and low-carbon development, and China has vigorously promoted the development and utilization of renewable energy in order to achieve the goal of carbon peaking and carbon neutrality. The rapid development of distributed photovoltaic power generation has effectively increased the proportion of clean energy and played an important role in realizing the national low-carbon strategy. Three kinds of operation modes of distributed photovoltaic in China are analyzed and summarized, and the economic benefits of different operation modes of distributed photovoltaic projects are quantitatively analyzed with practical cases. The research results can provide reference for the selection of operation modes of distributed photovoltaic projects.

Keywords: carbon peaking and carbon neutrality; distributed photovoltaic; operation mode; economic benefits