

建筑光伏一体化（BIPV）与空调系统联供的匹配特性研究

文 / 李林衡 云南省设计院集团有限公司

摘要：建筑光伏一体化（BIPV）与空调系统联供作为绿色建筑技术的创新应用，旨在提高能源利用效率。BIPV 系统将光伏组件集成至建筑中，利用太阳能发电，而空调系统作为建筑能耗的重要组成部分，其负荷特性与 BIPV 的发电特性密切相关。本文探讨了两者的匹配特性，分析了光伏发电的波动性、空调负荷的季节性变化及其协同策略。研究表明，智能控制与储能技术能够优化二者的能量供需匹配，提高系统的运行效率和稳定性。

关键词：建筑光伏一体化；空调系统；能量匹配；光伏发电

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.18.121

引言

随着建筑节能和环保要求的提升，建筑光伏一体化（BIPV）技术得到了广泛应用。BIPV 系统通过集成光伏组件提供电能，而空调系统则是建筑中能耗的主要部分。本文分析了 BIPV 与空调系统的能量匹配特性，并提出通过储能和智能控制优化两者协同运行，以提高能源利用率并降低碳排放。

一、BIPV 系统特性分析

（一）BIPV 系统的输出功率波动特性

长期尺度上，季节性变化导致系统全年发电量分布不均，夏季发电高峰与建筑空调负荷高峰具有一定的同步性，但在冬季或阴雨连绵季节，发电能力与用能需求之间存在较大差异。此外，BIPV 系统在极端气候条件下，如连续阴雨或沙尘天气中，输出功率可能长期低于设计值，影响其对空调系统的稳定供能能力。因此，BIPV 系统需要配合一定容量的储能装置或采用智能控制策略，以缓解发电波动对负荷供给的影响，提升系统的整体运行可靠性。

（二）影响 BIPV 发电效率的主要因素

影响 BIPV 系统发电效率的因素较为复杂，主要包括组件材料特性、安装方式、环境因素及系统运行管理等。材料方面，光伏组件的转换效率受电池片类型（如单晶硅、多晶硅、薄膜）影响较大，不同材料对光照、温度的响应特性存在差异。安装方面，组件的倾角、方位角、遮挡情况直接决定了接受太阳辐射的有效程度。环境因素中，灰尘污染、积雪、建筑物遮挡、城市热岛效应等都会显著降低光伏组件的实际发电性能。此外，逆变器效率、线路损耗、系统老化等电气因素也会影响整体能量输出。

有效的运行维护管理，如定期清洁光伏表面、及时排查设备故障，是保障 BIPV 系统长期高效运行的重要保障。为了实现与建筑空调负荷的高效联供，需要综合考虑上述各因素，优化设计与运行策略，确保发电输出与空调能耗需求的良好匹配。

二、空调系统负荷特性分析

（一）空调系统负荷变化规律（季节性、日变化）

空调系统负荷具有显著的季节性变化和日变化特征。在季节尺度上，夏季外界气温升高，建筑内部冷负荷大幅增加，空调能耗通常达到全年峰值。根据统计，典型城市夏季（如北京）室外日最高气温可达 35℃ 以上，空调负荷约占建筑总能耗的 40%-60%。在白天，随着日照增强，室内外温差扩大，空调制冷需求持续增长，通常在 14:00 至 18:00 达到高峰。

冬季，尤其在寒冷地区，空调系统切换至制热模式，负荷水平受建筑保温性能和室外温度影响显著。如东北地区，冬季室外均温常在 -10℃ 以下，建筑制热负荷显著提升。但南方地区冬季空调负荷相对较低，部分区域采用其他采暖能源，如燃气或集中供暖，空调系统负荷减少。

春秋季节气候温和，空调负荷大幅下降，部分时间段可以通过自然通风代替机械制冷或制热。在日变化层面，空调负荷与外界温度呈同步变化趋势：白天随着温度升高，负荷上升，晚间随温度降低，负荷下降。特别是办公建筑和商业综合体，其日间负荷变化与 BIPV 系统（日光伏发电系统）发电曲线高度吻合，有助于提高能量自发自用比例。相比之下，住宅建筑夜间空调使用频繁，与光伏发电存在一定错位。

表 1 空调系统负荷日变化特征与 BIPV 发电匹配性

建筑类型	空调负荷高峰时间	BIPV 发电峰值时间	匹配程度
办公建筑	10:00-18:00	10:00-16:00	高
商业综合体	11:00-21:00	10:00-16:00	中
住宅建筑	19:00-24:00	10:00-16:00	低
医院 / 机场等大型公共建筑	全天	10:00-16:00	中

(二) 建筑物类型对空调负荷特性的影响

不同类型建筑物的功能用途和使用规律，决定了空调系统负荷的差异性。具体而言：

住宅建筑：负荷分布与住户作息密切相关，夜晚空调使用频繁，负荷高峰通常出现在 19:00-23:00。单位面积冷负荷一般为 50 - 80 W/m²，但波动较大。

办公建筑：空调负荷集中在工作时段(8:00-18:00)，

负荷曲线与外部气象条件及光照强度高度相关。单位面积冷负荷通常为 80 - 120 W/m²。

商业综合体：空调负荷持续至傍晚甚至晚间（如商场、影院），单位面积冷负荷可达到 100 - 150 W/m²。

大型公共建筑（医院、机场、展览馆等）：全年全天高负荷运行，单位面积冷负荷可达 150 - 200W/m²，对供能连续性要求极高。

表 2 不同建筑类型空调负荷特性

建筑类型	单位面积冷负荷 (W/m ²)	负荷变化特性	供能稳定性要求
住宅建筑	50-80	夜间高峰，波动大	中
办公建筑	80-120	白天高峰，稳定性好	中
商业综合体	100-150	日间晚间均有负荷	高
医院、机场等公共建筑	150-200	全天高负荷运行	极高

(三) 空调系统对电能质量和供能稳定性的要求

为保障空调系统的连续稳定运行，通常需要引入多能源耦合方式，例如将 BIPV 系统与电网、电池储能或其他可控能源系统组合使用，通过智能能量管理系统协调调度，不仅能够平滑光伏发电波动，还能在发电不足时及时切换补充能源，确保空调负荷得到持续满足。合理的电能质量控制与稳定供能策略，是 BIPV 与空调系统联供实现高效运行的基础保障。

(四) 新型空调系统（如变频空调）对光伏供能的适应性

随着空调技术升级，变频空调在 BIPV 系统供能环境下展现出更强的适应性：

1. 动态功率调节，通过改变压缩机转速，实现冷量连续调节，与光伏发电功率变化匹配度高。
2. 降低启动峰值电流，启动电流降低 30%-50%，减少对供能系统瞬时冲击。
3. 宽电压工作范围，部分变频空调可在 180V - 260V 电压区间内稳定运行，适应光伏输出波动。
4. 智能化控制，支持远程管理、能耗预测与负荷优化调度，提升自发自用率，降低电网依赖。

实际测试数据显示，与传统定频空调相比，采用变频空调与 BIPV 系统联供可使光伏自用率提高 15%-30%，同时整体系统能耗降低 10%-20%。

表 3 变频空调与定频空调性能比较

项目	定频空调	变频空调
启动电流	大，瞬时高峰	小，启动平稳
功率调节能力	无，开关式	连续可调
电压适应范围	±5%	±20%
与光伏输出匹配性	差	优秀
节能潜力	低	高（节能 10%-20%）

三、BIPV 与空调系统联供的匹配机制

(一) 能量供需同步性分析

尽管在夏季午后，光伏发电与空调负荷同步性较好，但全年范围内不同季节、不同天气条件下同步性存在显著波动。阴雨天、冬季日照弱或建筑使用模式变化时，供需不同步问题显现，影响系统整体能效。通过对供能

与需求的动态匹配分析，能够明确系统在各时间段的盈余与缺口特征，为优化 BIPV 与空调系统协同运行策略提供依据。

(二) 季节性与日变化匹配特性

冬季 BIPV 发电量下降明显，而空调负荷以供热为主，尤其在中高纬度地区，供热负荷高峰出现在早晚，往往与光伏发电时段错开，匹配性较差。春秋季节气候适宜，空调使用频率低，尽管 BIPV 发电能力仍存在，但建筑冷暖负荷需求下降，导致能源输出存在富余现象。

在日变化尺度上，BIPV 发电量呈现典型的单峰曲线，从日出逐步上升，中午至下午达到峰值，随后逐渐下降。而空调负荷在高温天气中也呈现相似变化，峰值出现在午后至傍晚，略有滞后。通过合理调节空调系统运行时间，例如适当提前制冷、负荷削峰填谷，可以进一步提高 BIPV 电力的即时利用率。

(三) 负荷调控与光伏发电预测技术

为了提升 BIPV 与空调系统的协同效率，负荷调控与发电预测技术的应用成为关键手段。负荷调控通过智能化空调控制系统，实现冷负荷根据供电能力动态调整。例如，当光伏发电量充足时，空调系统可以提升运行功率，增加制冷量，实现建筑物“超前冷负荷储备”，在日照减弱时适当减少空调运行强度，平滑负荷曲线。

光伏发电预测技术基于气象数据、实时监测和历史统计模型，能够较准确地预测短期内 BIPV 系统发电量变化。通过结合发电预测与负荷需求预测，能源管理系统可以提前制定运行计划，优化空调系统启停和功率调节策略，减少临时性负荷变化带来的能源浪费，提高供需匹配度。

在建筑综合能源管理平台中，引入机器学习、大数据分析等先进方法，可以进一步提升预测精度与响应速度，实现更加细粒度的负荷调控。例如，针对局部阴影遮挡、快速天气变化等复杂场景，能够实时修正预测结果，保障空调系统运行的连续性与稳定性，同时最大化光伏电力的本地消纳率。

(四) 储能与能量管理系统的辅助作用

储能系统在 BIPV 与空调系统联供中扮演着关键的调节角色。由于光伏发电具有间歇性和波动性，即便在供

需大致同步的情况下，短时不匹配现象依然存在。通过配置适量的储能设备，如锂电池、热能储存系统，可以有效缓冲发电与负荷之间的时间差，平滑系统运行波动。

电化学储能系统能够在光照充足时段储存多余电能，在发电不足时段释放，为空调系统供电，保证建筑内部环境的持续舒适性。热能储存方式，如冷水蓄能、冰蓄冷等，也是一种有效的调节手段，通过在低负荷时段制冷储能，在高负荷时段释放冷量，减轻对即时供电的依赖，提升整体能源利用效率。

智能能量管理系统（EMS）是实现储能与负荷调控协同优化的核心平台。EMS能够实时监测光伏发电量、储能状态、空调负荷及电价变化，动态制定最优能量调度策略。通过综合考虑光伏发电预测结果、负荷预测、储能容量等因素，EMS能够实现需求响应管理，削峰填谷，降低建筑能源系统运行成本，同时延长储能设备使用寿命。

四、典型应用案例分析

（一）住宅建筑中的 BIPV- 空调联供实例

近年来，中国在绿色住宅建设中积极推广 BIPV 与空调联供技术。位于江苏省无锡市的碳中和示范小区项目，在住宅楼屋顶集成了分布式 BIPV 系统，总装机容量约为 500kW。项目采用分户式空调系统，并结合小型储能单元，实现光伏发电优先供空调系统使用。实际运行数据显示，夏季晴朗天气下，单户 BIPV 系统能覆盖空调能耗的 45% 左右，部分余电储存以备夜间使用，有效缓解了小区整体用电高峰压力。

项目在设计阶段充分考虑了光伏组件朝向与倾角优化，提升了发电效率。居民反馈表明，结合光伏发电的空调使用显著降低了用电费用，同时提升了建筑能效水平，展现了 BIPV- 空调联供在新型绿色住宅中的良好应用前景。

（二）商业建筑中的应用分析

在商业建筑领域，深圳市卓越集团打造的某大型商业综合体项目应用了 BIPV 与空调系统联供方案。建筑物外立面与屋顶部署了约 2MW 的 BIPV 系统，发电直接接入中央空调主机与照明系统。通过智能能量管理系统，实时调节光伏发电量与空调负荷的匹配关系，确保发电优先供自用，减少能量浪费。

该项目在运营过程中，夏季晴好天气条件下，光伏系统可承担空调系统 25% 以上的负荷。综合能效提升明显，建筑整体碳排放水平降低了 20% 以上。通过引入储能设施，夜间用能得以平滑过渡，进一步增强了建筑能源系统的韧性与稳定性。

（三）大型公共建筑（机场、体育馆等）应用探讨

据统计，大兴机场 BIPV 系统年发电量约 800 万千瓦时，能够满足航站楼空调系统 5%-8% 的能耗需求。项目采用柔性光伏组件与钢结构一体化设计，兼顾了美观、

安全与发电性能。夏季空调负荷高峰期间，光伏发电有效缓解了电网供电压力，提高了机场整体能源利用效率与绿色运营水平。

另一个典型项目是成都凤凰山体育公园，其场馆建筑通过屋面 BIPV 系统与空调冷热联供系统结合，实现了部分能源自给。项目引入冰蓄冷系统，在光伏发电充足时段进行储冷，为晚间赛事期间供冷提供保障，大幅提升了能源利用率，减少了传统能源消耗。

（四）实际应用中存在的问题与优化建议

经济性问题依然突出。当前 BIPV 组件成本及系统集成费用较高，回收周期偏长，制约了在普通住宅与中小型商业建筑中的广泛应用。缺乏成熟的智能能源管理系统，也导致部分项目无法实现发电与空调负荷的精准匹配，能源利用率不高。

针对这些问题，需要在技术与管理两方面同步推进优化。光伏组件技术应进一步向高效率、柔性化方向发展，提升单位面积发电量。建筑设计阶段应统筹考虑 BIPV 系统与空调系统负荷协同，最大化能源自用比例。同时，加强智能能量管理系统应用，提升光伏发电预测与负荷响应能力，优化储能系统配置，增强整体系统的运行灵活性和稳定性。

在政策层面，应加大对 BIPV- 空调联供项目的支持力度，制定明确的激励机制和标准化指导，降低初期投资风险，推动更多新建与改造建筑中采用该技术，助力建筑领域实现节能减碳目标。

结语

综上所述，BIPV 与空调系统联供在能量同步性、资源利用率与碳排放控制方面具有显著优势。夏季负荷与光伏出力高度契合，是实施联供的关键窗口期。通过引入负荷调控、储能设备及能量管理系统，可缓解供需波动、提升稳定性与经济性。未来应加强系统集成优化、技术创新与政策支持，推动 BIPV 在多类型建筑中的规模化应用，实现建筑能耗结构的绿色转型。

参考文献

- [1] 蒋洋, 蒋序来, 张晴楠, 等. 从 BIPV (光伏建筑一体化) 到 BIPVES (光伏储能建筑一体化) [J]. 南方能源建设, 2024, 11 (4): 156-163.
- [2] 高利. 光伏建筑一体化技术的应用及展望 [J]. 门窗, 2023 (20): 229-231.
- [3] 张扬, 屈志浩, 曾文明, 等. 太阳能光伏建筑一体化系统设计分析 [J]. 中国建筑装饰装修, 2023 (18): 57-59.
- [4] 梁永利, 单建勇, 王亮亮. 光伏建筑一体化电气系统设计 [J]. 电力设备管理, 2023 (2): 168-170.
- [5] 曹文瑞, 李日强, 张然, 等. 光伏建筑一体化系统设计探究 [J]. 中国科技成果, 2024, 25 (9): 32-34.