

住宅建筑光伏一体化（BIPV）系统的能效分析与优化设计

张海林

山东省交通工程监理咨询有限公司 山东 济宁 250000

摘要：本文聚焦于住宅建筑光伏一体化（BIPV）系统，深入探讨其能效分析方法与优化设计策略。通过对BIPV系统工作原理及影响能效因素的研究，构建能效分析模型，并结合实际案例进行验证。在此基础上，提出涵盖组件选型、布局设计、电气系统优化等方面的优化设计方案，旨在提高BIPV系统的能效，推动其在住宅建筑中的广泛应用，实现建筑节能与可再生能源利用的有机结合。

关键词：住宅建筑；光伏一体化（BIPV）；能效分析；优化设计

引言

随着全球能源危机和环境问题的日益严峻，可再生能源的开发与利用成为各国关注的焦点。太阳能作为一种丰富、清洁、可再生的能源，具有巨大的开发潜力。住宅建筑作为能源消耗的重要领域，将光伏发电系统与建筑有机结合的建筑光伏一体化（BIPV）技术应运而生。BIPV系统不仅能够为住宅提供清洁电力，减少对传统能源的依赖，还能与建筑外观相融合，提升建筑的美观性和功能性。

1 BIPV 系统工作原理及影响能效因素分析

1.1 BIPV系统工作原理

BIPV系统作为将太阳能利用与建筑功能完美融合的创新技术，其构成复杂且各部分协同工作以实现高效发电。该系统主要由光伏组件、逆变器、控制器以及储能装置（此为可选配置）等核心部分组成。光伏组件堪称BIPV系统的“心脏”，是整个系统的能量源头。它基于半导体材料的光生伏特效应，当太阳光照射到光伏组件表面时，光子会激发半导体中的电子，使其产生定向移动，从而将太阳能直接转化为直流电。不同类型的光伏组件，如单晶硅、多晶硅和非晶硅等，在转换效率、成本和稳定性等方面存在差异，这也会间接影响整个BIPV系统的性能。逆变器在系统中扮演着“转换大师”的角色。由于住宅内的电器设备大多使用交流电，而光伏组件产生的是直流电，因此逆变器的作用至关重要。它能够将光伏组件输出的直流电高效、稳定地转换为与电网同频率、同相位的交流电，以满足住宅内各类电器的正常使用需求。同时，先进的逆变器还具备最大功率点跟踪（MPPT）功能，能够实时监测光伏组件的工作状态，确保其在不同的环境条件下都能输出最大功率。控制器则是BIPV系统的“智能管家”，负责全面调节和控制系统的运行。它就像一个精准的指挥官，根据光照强度、

温度等环境因素以及储能装置的状态，精确地调节光伏组件的工作模式，确保其始终处于最佳发电状态^[1]。在储能装置方面，控制器会对其进行科学的充放电管理，避免过充或过放对电池造成损害，延长电池的使用寿命，同时提高系统的供电可靠性。储能装置作为BIPV系统的可选部分，却能在特定场景下发挥关键作用。在光照充足、光伏组件发电量大于住宅用电需求时，储能装置可以将多余的电能储存起来，就像一个巨大的“能量仓库”。而当夜间或光照不足、光伏组件发电量无法满足住宅用电需求时，储能装置则会释放储存的电能，为住宅持续供电，从而有效解决了太阳能发电的间歇性问题，提高了系统的能源自给率和供电稳定性。

1.2 影响BIPV系统能效的因素

1.2.1 光伏组件性能

光伏组件的性能是决定BIPV系统能效的核心因素之一。其中，转换效率是衡量光伏组件性能的关键指标。转换效率越高，意味着在相同的光照条件下，单位面积的光伏组件能够产生更多的电能。例如，一块转换效率为20%的光伏组件，相比转换效率为15%的组件，在相同面积和光照条件下，其发电量会高出约33%。因此，提高光伏组件的转换效率是提升BIPV系统能效的重要途径。除了转换效率，光伏组件的衰减率也不容忽视。随着时间的推移，光伏组件在长期暴露于自然环境中，会受到紫外线、温度变化、湿度等因素的影响，其性能会逐渐下降。衰减率过高会导致系统发电量大幅减少，从而影响系统的长期能效。一般来说，优质的光伏组件在25年的使用周期内，年衰减率应控制在一定范围内，以确保系统的长期稳定运行和较高的发电效率。

1.2.2 建筑朝向与倾斜角度

住宅建筑的朝向和光伏组件的倾斜角度对太阳辐射的接收量有着直接影响。在我国大部分地区，由于太阳

高度角和日照时数的分布特点,朝南的建筑能够获得更多的太阳辐射。因此,BIPV系统通常优先选择朝南安装,这样可以最大程度地利用太阳能资源。同时,合适的倾斜角度也是提高发电效率的关键。合适的倾斜角度可以使光伏组件在一天中大部分时间都能垂直接收太阳辐射,从而增加太阳辐射的接收量。不同的地理位置和季节,最佳倾斜角度会有所不同。一般来说,可以通过专业的计算方法或建筑模拟软件,根据当地的地理纬度和气候条件,确定光伏组件的最佳倾斜角度,以实现全年发电量的最大化。

1.2.3 遮阳与阴影

建筑物周围的遮挡物,如高大的树木、相邻的建筑物等,会在光伏组件上形成阴影。阴影的存在会导致部分光伏电池无法正常接收太阳辐射,从而降低整个组件的输出功率。即使只有一小部分电池被遮挡,也可能由于“热斑效应”对整个组件的性能产生严重影响。热斑效应会使被遮挡的电池温度升高,加速其老化,甚至可能损坏整个组件。此外,光伏组件自身的相互遮挡也会产生类似的影响。在安装光伏组件时,如果间距设置不合理,或者组件排列方式不当,就会导致组件之间相互遮挡,降低系统的整体发电效率。因此,在设计和安装BIPV系统时,需要充分考虑遮阳和阴影问题,合理规划建筑布局 and 光伏组件的安装位置,尽量避免遮挡物的影响^[2]。

1.2.4 环境温度

光伏组件的性能对环境温度非常敏感。一般来说,随着温度的升高,光伏组件的转换效率会下降。这是因为温度升高会导致半导体材料的载流子浓度增加,从而增加了电子-空穴对的复合几率,减少了有效载流子的数量,最终导致输出功率降低。在高温环境下,BIPV系统的发电量会受到一定程度的抑制。例如,在夏季高温时段,光伏组件的温度可能会升高到60℃以上,此时其转换效率可能会比标准测试条件(25℃)下降低10%-20%。因此,为了减少环境温度对光伏组件性能的影响,需要采取有效的散热措施,如优化组件的散热设计、增加通风设备等,以降低组件的工作温度,提高系统的发电效率。

1.2.5 电气系统损耗

BIPV系统中的逆变器、电缆等电气设备在电能传输和转换过程中不可避免地会产生一定的损耗。这些损耗会降低系统的实际发电效率,从而影响系统的整体能效。逆变器在将直流电转换为交流电的过程中,会存在一定的转换损耗。转换损耗的大小取决于逆变器的效率,高效逆变器的转换损耗通常较低,能够将更多的

直流电转换为交流电。电缆在传输电能时,由于存在电阻,会产生线路损耗。线路损耗的大小与电缆的截面积、长度和电流大小有关。合理选择电缆的截面积和长度,降低线路电阻,可以有效减少线路损耗。因此,为了减少电气系统损耗,需要合理选择电气设备的参数,优化电气系统设计。例如,选择高效、可靠的逆变器和低电阻的电缆,采用智能控制系统实时监测和调节系统的运行状态,确保系统在最佳工况下运行,从而提高系统的实际发电效率。

2 BIPV 系统能效分析模型构建

2.1 能效指标确定

为了准确评估BIPV系统的能效,需要确定一系列合理的能效指标。常用的能效指标包括系统发电量、系统效率、性能比等。系统发电量是指BIPV系统在一定时间内产生的电能总量,是衡量系统发电能力的重要指标。系统效率是指系统输出电能与输入太阳能之比,反映了系统将太阳能转化为电能的总体效率。性能比是指系统实际发电量与理论发电量之比,考虑了环境因素和系统损耗对发电量的影响,能够更全面地评估系统的性能。

2.2 能效分析模型建立

基于上述能效指标,结合影响BIPV系统能效的因素,建立能效分析模型。该模型可以考虑建筑朝向、倾斜角度、遮阳情况、环境温度等因素对太阳辐射接收量的影响,以及光伏组件性能、电气系统损耗等因素对系统发电效率和发电量的影响。通过输入相关参数,模型可以计算出BIPV系统在不同条件下的发电量、系统效率和性能比等能效指标,为系统的能效评估和优化设计提供依据。

2.3 模型验证

为了验证能效分析模型的准确性和可靠性,选取实际运行的BIPV系统进行案例分析。收集系统的实际运行数据,包括发电量、环境参数等,并将其输入到能效分析模型中,计算得到模型的预测结果。将预测结果与实际运行数据进行对比分析,评估模型的误差范围。如果误差在合理范围内,则说明模型具有较高的准确性和可靠性,可以用于BIPV系统的能效分析和优化设计。

3 BIPV 系统优化设计策略

3.1 光伏组件选型优化

光伏组件的选型是BIPV系统设计的关键环节,直接关系到系统的发电效率和成本效益。根据住宅建筑的地理位置、气候条件和用电需求等因素,选择合适的光伏组件类型和规格至关重要。在选择光伏组件时,首先要保证组件具有较高的转换效率。如前文所述,转换效率

越高,单位面积的组件能够产生的电能就越多,从而提高系统的发电能力。同时,要综合考虑组件的成本、衰减率和可靠性等因素。虽然高效组件的初始成本可能较高,但如果其衰减率低、使用寿命长,从长期来看,可能具有更高的性价比。此外,还可以关注新型高效光伏组件的发展和应用。例如,异质结电池组件具有高转换效率、低温度系数和低衰减率等优点,能够在不同环境条件下保持较高的发电性能。钙钛矿电池组件作为一种新兴的光伏技术,具有制备工艺简单、成本低、转换效率潜力大等特点,虽然目前仍处于研发和示范阶段,但未来有望在BIPV领域得到广泛应用。通过采用新型高效光伏组件,可以有效提高BIPV系统的发电效率,降低系统的度电成本。

3.2 建筑布局与光伏组件安装优化

合理规划住宅建筑的布局和优化光伏组件的安装位置与倾斜角度,是提高BIPV系统能效的重要措施。通过建筑模拟软件,如EnergyPlus、TRNSYS等,可以对不同建筑布局和光伏组件安装方案进行模拟分析。在模拟过程中,输入当地的地理纬度、气候数据、建筑朝向、倾斜角度等参数,计算不同方案下光伏组件接收的太阳辐射量和系统的发电量。通过对比分析不同方案的结果,选择最佳的建筑布局和光伏组件安装方案,使光伏组件在一天中能够接收更多的太阳辐射,提高发电效率。同时,要尽量避免建筑物周围的遮挡物对光伏组件的影响。在设计阶段,应充分考虑周边环境,合理规划建筑与树木、其他建筑物的间距,确保光伏组件在大部分时间内不受遮挡。在安装光伏组件时,要合理设置组件之间的间距,避免组件自身相互遮挡,保证每个组件都能充分接收太阳辐射。

3.3 电气系统优化

优化BIPV系统的电气系统设计,减少电气损耗,是提高系统能效的重要环节。首先,要选择高效、可靠的逆变器和电缆等电气设备。高效逆变器具有较高的转换效率,能够将更多的直流电转换为交流电,减少转换损耗^[3]。在选择逆变器时,要关注其额定功率、转换效率、最大功率点跟踪(MPPT)精度等参数,确保其能够满足系统的需求。对于电缆,要根据系统的电流大小和传输距离,合理确定电缆的截面积和长度。选择合适截面积的电缆可以降低线路电阻,减少线路损耗。同时,要选择质量可靠、电阻率低的电缆材料,进一步提高电缆的传输效率。采用智能控制系统也是优化电气系统的重要手段。智能控制系统可以实时监测和调节光伏组件的

工作状态,根据光照强度、温度等环境因素的变化,自动调整组件的工作模式,确保系统始终在最佳工况下运行。此外,智能控制系统还可以实现对储能装置的智能充放电管理,提高能源利用率和系统的供电可靠性。

3.4 热管理与通风设计优化

针对环境温度对光伏组件性能的影响,采取有效的热管理和通风设计措施至关重要。可以在光伏组件背面设置散热装置,如散热片、散热风扇等。散热片可以增加组件的散热面积,加快热量的散发;散热风扇则可以通过强制对流的方式,加速空气流动,带走组件产生的热量,降低组件的工作温度。同时,优化建筑的通风设计也是降低光伏组件温度的有效方法。通过合理设计建筑的通风口、通风通道等,促进空气在建筑内部的流通,带走光伏组件产生的热量。例如,可以在建筑的山墙设置通风口,利用自然风力形成空气对流,提高通风效果。此外,还可以采用一些新型的散热技术,如热管技术、液冷技术等。热管技术利用热管的快速传热特性,将光伏组件产生的热量迅速传递到散热端进行散热;液冷技术则是通过循环冷却液来吸收组件的热量,实现高效散热。这些新型散热技术虽然成本相对较高,但在一些对发电效率要求较高的BIPV系统中具有广阔的应用前景。通过有效的热管理和通风设计,可以降低光伏组件的工作温度,提高组件的转换效率,从而提升BIPV系统的整体能效。

结束语

未来,随着光伏技术的不断发展和成本的进一步降低,BIPV系统在住宅建筑中的应用前景将更加广阔。为了进一步推动BIPV技术的发展,还需要在以下几个方面进行深入研究:一是加强对新型光伏组件的研究和应用,提高光伏组件的转换效率和可靠性;二是深入研究BIPV系统与建筑的集成设计方法,实现光伏系统与建筑的完美融合;三是完善BIPV系统的标准和规范,加强质量监管,确保系统的安全性和稳定性。通过不断的技术创新和优化设计,BIPV系统将在住宅建筑节能和可再生能源利用方面发挥更大的作用。

参考文献

- [1]谭志昆.光伏建筑一体化光伏系统设计探讨[J].建筑电气,2022,41(10):31-36.
- [2]房建军.光伏建筑一体化融合理念和光伏系统设计要点[J].科技和产业,2021,21(05):251-254.
- [3]麦燕妹.浅谈绿色建筑中光伏建筑一体化系统(BIPV)设计及应用[J].中国住宅设施,2019(03):92-95.