

基于多能互补的光伏建筑一体化微电网负荷节能控制方法

Energy Saving Control Method for Integrated Microgrid Load of Photovoltaic Buildings based on Multi Energy Complementarity

王磊¹, 王珂²

(1. 西安市安居建设管理集团有限公司, 西安 710000; 2. 陕西航空产业技术研究中心有限责任公司, 西安 710100)

摘要: 针对光伏建筑一体化微电网中传统节能控制方法精度低的问题, 提出一种基于多能互补的动态负荷节能控制方法。通过负荷数据分类与双重修正, 对负荷样本原始数据进行预处理。根据光伏建筑一体化多能互补的空间耦合关系, 结合事件触发机制与分解协调法, 构建多能互补区域解耦模型, 对多能控制的区域进行解耦, 并设计多级调度负荷控制策略, 通过主动频率响应对微电网负荷参数进行协调, 结合光伏建筑一体化中多个层级的运行结构, 调节电网供需平衡, 实现负荷节能控制。结果表明: 所提方法在不同典型负荷场景(早高峰、午间低谷、晚高峰、夜间低谷等)应用下, 控制后的负荷与实际负荷的误差均值均在 2.1 MW 以下, 有效减少了控制后的负荷与实际负荷的偏差, 具有更好的节能控制精度和稳定性。

关键词: 多能互补; 光伏建筑; 一体化微电网; 微电网负荷; 事件触发机制; 节能控制

中图分类号: TM715

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2025) 04-0165-05

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.04.030

WANG Lei¹, WANG Ke²

(1. Xi'an Anju Construction Management Group Co., Ltd., Xi'an 710000, China;

2. Shaanxi Aviation Industry Technology Research Center Co., Ltd., Xi'an 710100, China)

Abstract: A dynamic load energy-saving control method based on multi energy complementarity is proposed to address the problem of low accuracy in traditional energy-saving control methods in photovoltaic building integrated microgrids. Preprocess the original load sample data through load data classification and double correction. Based on the spatial coupling relationship of photovoltaic building integration and multi energy complementarity, combined with event triggering mechanism and decomposition coordination method, a decoupling model of multi energy complementary regions is constructed to decouple the multi energy controlled regions, and a multi-level scheduling load control strategy is designed. The load parameters of the microgrid are coordinated through active frequency response, and the supply and demand balance of the power grid is adjusted by combining the operation structure of multiple levels in photovoltaic building integration. Realize load energy-saving control. The results show that the proposed method has an average error of less than 2.1 MW between the controlled load and the actual load in different typical load scenarios (morning peak, noon trough, evening peak, night trough, etc.), effectively reducing the deviation between the controlled load and the actual load, and has better energy-saving control accuracy and stability.

Key words: multi energy complementary; photovoltaic building; integrated microgrid; micro grid load; event triggering mechanism; energy saving control

研究与应用

0 引言

微电网主要利用可再生资源进行发电。在微电网的发电过程中,若存在较高的负荷,则会产生较大的控制误差,对后续发电有一定的影响。对微电网负荷进行控制,提高平均负荷的控制精度,有利于制定配电网发电方案^[1]。一体化光伏系统成本较高,所以对光伏建筑一体化微电网的负荷,进行节能控制一直是研究的重要课题^[2]。

目前许多学者对微电网的负荷节能控制进行了研究,如史军等^[3]提出基于智能负载,对微电网进行精准切负荷控制。马勇^[4]提出微电网含负荷功率的自动分配控制方法,对交流频率和电压进行归一化处理,输出有功功率,从而达到对微电网的负荷节能控制。郭鑫^[5]提出的新能源光伏技术在建筑节能中的应用,通过对建筑节能中新能源光伏技术的研究,降低传统电网电能消耗。顾炜^[6]提出光伏新能源技术的建筑电气节能控制系统,通过源-网-荷-储的协同优化,最大限度地提高光伏能源利用率,削减建筑运行成本。熊文斌等^[7]对智能建筑中的分布式光伏发电与微电网控制系统进行了分析。段晓芳等^[8]对新疆太阳能光伏建筑一体化关键技术进行了研究,设计了适应新疆气候条件的光伏组件选型与优化技术。李双营^[9]提出光伏微网储能系统用电峰谷差自适应控制技术,以电峰谷差自适应控制为约束条件,结合二轮迭代的方式实现光伏微网储能系统用电峰谷差自适应控制。谢志刚等^[10]通过非支配排序遗传(NSGA-Ⅱ)算法求解模型,对源网荷态势的光伏微电网需求侧响应调度方法进行了研究。刘雪原等^[11]采用积分调节算法对孤岛模式实现光伏发电系统输出功率在容量范围内自动跟踪微电网负荷所需额定功率,从而满足微电网孤岛运行模式下功率平衡的要求。马倩倩等^[12]提出改进LM-BP神经网络与粒子群优化算法结合的方案,构建空调冷负荷预测模型,获取不同负荷率下微电网的最优节能运行参数。葛卫梁等^[13]通过采集并处理微电网负荷数据,分析短期输出负荷特性以预判负荷走势,进而基于BP神经网络构建负荷控制模型,实现节能控制。陆春光等^[14]构建了兼顾碳排放目标的燃煤机组负荷节能模糊控制模型,利用高斯过程

回归提取煤耗特征,结合预测结果构建以煤耗和碳排放最小化为目标的负荷经济调度函数,确定负荷节能控制的最优参数。许娜等^[15]基于负荷预测,结合供热系统运行原理,针对不同项目特性设计自适应调整方案,提出节能调控策略。

现有研究存在多能源协同效率低与动态响应滞后的问题,本文提出考虑多能互补的光伏建筑一体化微电网负荷节能控制方法。通过空间耦合关系进行光伏/储能/负荷的动态分区协调;根据光伏建筑中电能-热能耦合特性,建立“数据处理-区域解耦-频率跟踪”的全链条控制框架,解决现有研究在单一能源调度中效率不足与响应滞后的问题,为建筑节能与电网互动提供了新思路。

1 考虑多能互补的光伏建筑一体化微电网负荷节能控制方法

1.1 光伏微电网数据处理

负荷数据种类较多,因此根据微电网的运行情况,对负荷样本数据进行处理,先对原始数据集进行分类,公式为:

$$Z = X(C + V) \frac{1}{B} \quad (1)$$

式中: C 为样本的一致性参数; X 为原始数据; B 为历史负荷; V 为映射数据。在此基础上,对数据进行归一化处理,处理后的数据表示为:

$$N = \sqrt{M} \sum (Z + AS) \quad (2)$$

式中: M 为数据的平均值; A 为数据阈值参数; Z 为量化数据; S 为历史控制耗时。按照处理后的数据,使用平均值纠正法,对数据进行纠正。对数据进行一次修正,公式为:

$$a = \frac{brH}{\sqrt{N}} \quad (3)$$

式中: H 为纠正阈值; r 为变化范围参数; b 为数据周期参数。在此基础上,为了提高数据的可靠性,对数据进行二次修正,公式为:

$$c = n + m + ka \quad (4)$$

式中: n 为数据标准参数; m 为负荷参数; k 为激活函数。更正二次修正的参数,对负荷的影响参数进行判断,根据其影响参数,对负荷影响因素进行划分,并对噪声进行降噪处理,公式为:

$$U = I(c + fm) \quad (5)$$

式中： f 为量化函数； I 为负荷控制耗时； m 为激活函数。从而得到最终处理过后的参数，表示为：

$$\partial = \partial_i / \sum U_i g U \quad (6)$$

式中： g 为输出信号参数； U 为参数节点； ∂_i 为参数权重。根据处理数据，对微电网负荷进行控制。

1.2 多能互补协调微电网负荷

采用处理后的光伏微电网数据，协调微电网负荷。使用分区解耦，按照光伏建筑一体化结构和事件机制，将微电网负荷划分为若干个子区域。

按照控制结构，根据光伏建筑一体化空间耦合关系，在事件触发机制的控制架构下，采用分解协调法，将多能控制的区域进行分区解耦，制定区域多级调度负荷控制，以均匀切负荷为原则，确定各配网子区域内的切负荷量，切负荷量公式为：

$$m = \beta + sB \quad (7)$$

式中： B 为传输时刻； β 为负荷裕度； s 为切负传输延时。采用事件触发机制，设置事件触发控制器，并计算定义测量误差，公式为：

$$y = \frac{(m - q)K}{lj} \quad (8)$$

式中： q 为触发时刻； K 为时间间隔； l 为触发参数； j 为采样周期。得到事件触发函数，表示为：

$$W = (Y + \gamma)(F + L) \quad (9)$$

式中： Y 为触发参数； F 为触发周期； L 为状态数据。按照事件触发参数对配电网状态信息进行定义，对不同的事件设置不同的触发。对不同的区域进行多层次协调，结合多个层级的运行结构，得到协调后的多能互补微电网负荷参数。

1.3 光伏建筑一体化微电网负荷节能控制

在协调后的多能互补微电网负荷基础上，对光伏建筑一体化微电网负荷节能进行控制，控制流程如图1所示。

按照主动频率响应控制图（图2）对电网供需平衡进行调节。按照主动控制模型和二阶锥松弛结构，设置目标函数为线性结构，建立约束条件，并将线性问题进行转化。通过松弛后的结构，对电力电子柔性负荷的运行功率进行控制，进而得到光伏建筑一体化微电网负荷节能的控制结果。

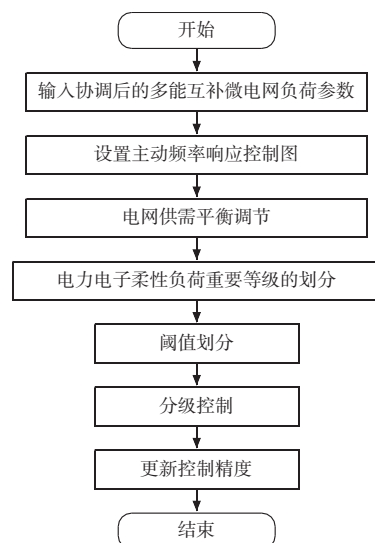


图1 控制流程
Fig. 1 Control process

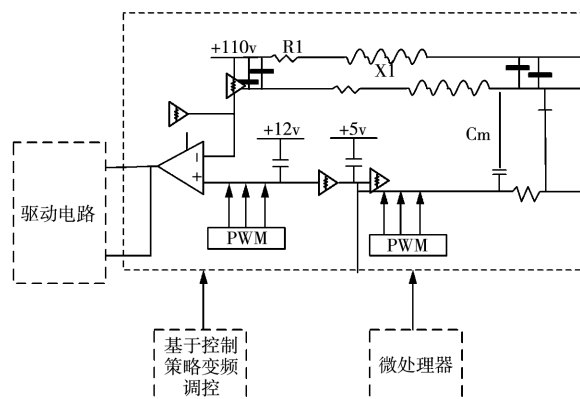


图2 主动频率响应控制图
Fig. 2 Active frequency response control diagram

2 试验与分析

2.1 试验模型

选择某地区综合用电负荷较高的微电网作为试验对象，在 Simulink 环境下，搭建仿真模型，如图3所示。模型中主要包括分布式电源、储能系统。其中光伏组串电缆，型号为 PV1-F-(1×4)，光伏组串过电流保护器为 DC 1 000V，16 A，光伏方阵为 20 串 04 并，微电网主要的仿真参数见表1。

2.2 试验场景

设置两种场景进行验证，见表2。对模型的输入、输出参数，进行归一化处理，对变量采用三角形隶属度函数，在此基础上，使用模糊控制方法对其进行试验。

研究与应用

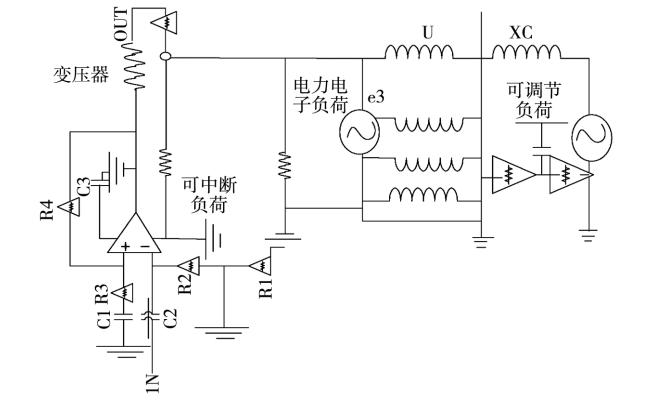


图 3 微电网结构图
Fig. 3 Microgrid structure

表 1 仿真控制参数

Table 1 Simulation control parameters

名称	参数名称	数值
DG1	额定有功功率/W	4 000
储能场景 1	有功功率/W	3 000
储能场景 2	有功功率/W	2 500
二级负荷	有功功率/W	1 258
	二级主动响应频率值/Hz	51.66
三级负荷	有功功率/W	2 156
	三级主动响应频率值/Hz	49.6
功率负荷 1	有功功率/W	1 963
功率负荷 2	有功功率/W	2 680

表 2 场景参数

Table 2 Scenario parameters

名称	场景 1	场景 2
负荷额定运行功率/W	8 000	7 500
储能系统容量/W	2 000	5 000
控制调节方式	额定功率运行控制	主动控制参与供需平衡调节

2.3 结果与分析

使用本文设计与文献 [3] 方法、文献 [4] 方法进行对比, 得到对微电网的负荷节能控制效果, 如图 4 所示。

本文设计的光伏建筑一体化微电网负荷节能控制方法, 控制后输出的负荷与实际负荷误差较小, 更接近于实际负荷, 说明其控制的精度较高。并且在响应时间为 0~5 s 时, 已经能较好地跟随实际负荷的变化趋势, 说明本文方法能够快速地对微电网的负荷进行节能控制, 及时调整负荷输出, 以适应实际负荷的动态变化。

对场景 1 和场景 2 的负荷节能控制效果进行统计, 为覆盖早高峰、午间低谷、晚高峰、夜间低谷

4 个典型阶段, 共设置 11 个场景时段, 统计结果见表 3。

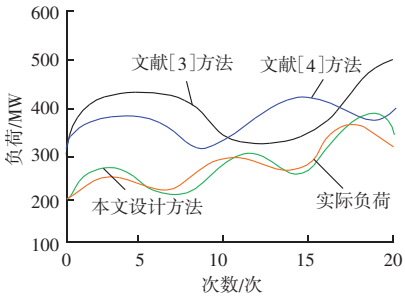


图 4 负荷节能控制效果
Fig. 4 Energy saving control effect of load

表 3 负荷节能控制效果

Table 3 Energy saving control effect of load

场景时段	实际负荷/MW		控制后负荷/MW					
			本文设计方法		文献 [3] 方法		文献 [4] 方法	
	场景 1	场景 2	场景 1	场景 2	场景 1	场景 2	场景 1	场景 2
时段 1	351	358	353	355	473	476	710	714
时段 2	224	264	229	261	307	350	461	525
时段 3	215	253	215	255	288	342	432	513
时段 4	212	249	219	243	294	326	440	489
时段 5	212	249	216	248	290	333	434	499
时段 6	158	185	159	188	213	252	320	378
时段 7	153	180	158	185	212	248	318	372
时段 8	149	175	141	171	189	229	284	344
时段 9	149	175	148	176	198	236	298	354
时段 10	323	380	325	382	436	512	654	768
时段 11	328	385	325	388	436	520	654	780
控制误差均值	-	-	2.1	1.8	8.7	8.8	16.5	14.1

不论是场景 1 和场景 2, 本文方法在负荷控制误差均值均在 2.1 MW 以下, 远小于文献 [3] 和文献 [4] 方法, 说明本文方法能够在不同典型负荷场景 (早高峰、午间低谷、晚高峰、夜间低谷等) 下有效减小控制后的负荷与实际负荷的偏差, 实现更精准的负荷节能控制, 具有更好的节能控制精度和稳定性。

3 结束语

通过研究考虑多能互补的光伏建筑一体化微电网负荷节能控制方法, 验证了该技术在提升控制精度和节能效率方面的显著效果, 得到结论如下:

- (1) 本文提出数据双重修正模型, 抑制噪声干扰。
- (2) 构建事件触发-多能解耦协同架构, 通过动态分区协调, 能够在 0~5 s 内, 对微电网的负荷进行节能控制, 提升了负荷突变时段响应速度。

(3) 设计主动频率响应机制, 结合二阶锥松弛优化, 成功将负荷控制的平均误差降至 2.1 MW (场景 1) 和 1.8 MW (场景 2), 实现微电网负荷节能的精准调节。

综上所述, 该方法通过多能协同优化与动态分级控制, 显著提升了负荷控制精度和能源利用效率, 为建筑微电网智能化节能提供了新技术路径。

参 考 文 献

- [1] 王朝亮, 肖涛, 陈宋宋, 等. 基于直流微电网协调控制的电动汽车充电成本优化 [J]. 电气传动, 2024, 54 (11): 66-75.
- [2] 毛荀, 占勇, 刘敏, 等. 基于先导节点选取下优化下垂控制的孤岛运行微电网负荷功率分配方法 [J]. 电源学报, 2023, 21 (1): 126-132.
- [3] 史军, 王加澍, 熊峰, 等. 基于智能负载的微电网精准切负荷控制策略 [J]. 电力工程技术, 2020, 39 (2): 103-109.
- [4] 马勇. 直流微电网含负荷功率自动分配控制方法 [J]. 电工技术, 2022 (24): 159-161.
- [5] 郭鑫. 新能源光伏技术在建筑节能中的应用 [J]. 中文科技期刊数据库 (全文版) 工程技术, 2024 (5): 0074-0077.
- [6] 顾炜. 基于光伏新能源技术的建筑电气节能控制系统研究 [J]. 电气技术与经济, 2025 (2): 80-82.
- [7] 熊文斌, 吴炜, 董大群, 等. 智能建筑中的分布式光伏发电与微电网控制系统分析 [J]. 集成电路应用, 2024, 41 (6): 384-385.
- [8] 段晓芳, 钟晚秋, 谢敏杰. 新疆太阳能光伏建筑一体化关键技术研究 [J]. 城市建筑, 2025, 22 (4): 5-7.
- [9] 李双营. 光伏微网储能系统用电峰谷差自适应控制技术 [J]. 现代电子技术, 2024, 47 (24): 105-108.
- [10] 谢志刚, 陈丽娜, 朱波, 等. 基于源网荷态势的光伏微电网需求侧响应调度方法 [J]. 武汉理工大学学报 (信息与管理工程版), 2024, 46 (1): 164-169.
- [11] 刘雪原, 陈玉敏, 魏阳, 等. 基于积分调节算法的光伏电池负荷功率跟踪控制 [J]. 电气自动化, 2024, 46 (3): 4-7.
- [12] 马倩倩, 崔红社, 孙锐, 等. 基于 PSO-LM-BP 算法的空调系统节能预测控制研究 [J]. 低温与超导, 2022, 50 (4): 65-70.
- [13] 葛卫梁, 黄磊, 冯建云. 微电网站设备短期输出负荷主动控制技术 [J]. 自动化应用, 2022 (8): 108-110.
- [14] 陆春光, 刘炜, 姚力, 等. 考虑碳排放目标的燃煤机组负荷量节能控制模型 [J]. 粘接, 2024, 51 (12): 131-134.
- [15] 许娜, 朱龙虎. 基于负荷预测结果的换热站节能控制方法与案例分析 [J]. 建设科技, 2024 (18): 65-67.
- [16] 刘可, 徐小东, 王伟. 以节能为导向的住区形态布局及自动寻优方法研究 [J]. 工业建筑, 2021, 51 (8): 1-10, 27.
- [17] 覃飞龙. 概念设计与结构措施在建筑结构中的应用 [J]. 佛山陶瓷, 2023, 33 (9): 139-141.
- [18] 王韬, 张清, 傅绍辉. 基于太阳辐射的建筑屋面形态绿色设计方法 [J]. 建筑节能 (中英文), 2021, 49 (4): 18-24.
- [19] 刘士龙, 句德民, 张花蕊, 等. 寒冷地区居住建筑执行 75% 节能标准增量成本分析研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2015, (6): 43-44, 48.
- [20] 王茜, 石谦飞, 史树一. 基于节能导向的寒冷地区医院建筑形态多目标寻优技术研究 [J]. 西安建筑科技大学学报 (自然科学版), 2024, 56 (4): 604-612.
- [21] 李诚博. 住宅建筑节能设计的不足与改进措施 [J]. 四川水泥, 2023 (3): 76-78.
- [22] 董超, 田治国. 浅谈玻璃材料在建筑设计中的应用研究—以玻璃金字塔为例 [J]. 西部皮革, 2021, 43 (4): 9-10.
- [23] 徐浩, 胡锦亮, 曾小华, 等. 不同类型的玻璃幕墙能耗影响分析研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38 (5): 130-134.
- [24] PUNDIENĖ I, PRANCKEVIČIENĖ J, BUMANIS G, et al. Experimental investigation of novel bio-composite with integrated phase change materials (PCM) for enhanced energy saving in buildings [J]. Industrial Crops & Products, 2025, 43 (3): 205-212.
- [25] LIU Z, GE H, SONG T, et al. Research on building energy-saving based on GA-BP coupled improved multi-objective whale optimization algorithm [J]. Energy & Buildings, 2025, 47 (2): 1-14.
- [26] ALPAR S, BERGER J, MAZUROSKI W, et al. Shape optimization of the energy efficiency of building retrofitted facade [J]. Solar Energy, 2024, 45 (4): 1180-1205.
- [27] 宋娇. “双碳”目标下北京市某既有建筑节能减碳潜力分析 [J]. 节能, 2023, 42 (6): 67-69.
- [28] 赵丹. 复杂性视阈下的大跨度建筑参数化形态生成策略研究 [D]. 西安: 西安大学, 2021.
- [29] 程昌斌. 高层复杂建筑供配电节能设计要点探讨 [A] 2017 年 8 月建筑科技与管理学术交流会论文集 [C]. 《建筑科技与管理》组委会, 北京恒盛博雅国际文化交流中心, 2017: 2.
- [30] 胥小龙, 孙鹏, 时雪燕. 碳达峰碳中和目标愿景下建筑节能低碳发展路径构思 [J]. 建筑, 2022 (10): 36-38.
- [31] 张勇, 梁晓珂, 袁丽娟. 面向节能的建筑设计多目标优化方法 [J]. 华中科技大学学报 (自然科学版), 2021, 49 (7): 107-112.