

[分布式光伏]

电力台区侧分布式光伏用能平衡协同控制

文/孟元 樊华 何义赞 郝井勋 钱立鹏
安徽南瑞中天电力电子有限公司

在开展分布式光伏用能控制时，为达到平衡协同效果，降低过冲峰值，缩短电网恢复稳定的时间，研究提出新的电力台区侧分布式光伏用能平衡协同控制方法。首先，明确电力台区侧分布式光伏阵列能量，并进行谐波处理；然后，划分底层、中层和高层，实现光伏用能平衡协同分层控制。最后，通过实验发现，应用新的控制策略后，过冲峰值显著降低，且恢复稳定运行的时间更短，更能够满足用能平衡协同目标。

分布式光伏发电以其清洁无污染、可持续再生的特质，在电力系统中具有举足轻重的地位，发挥着日益关键的作用。特别是在电力台区侧，分布式光伏的接入显著减轻电力供需的紧张状况，提升能源的有效利用率，在促进绿色低碳发展、助力实现可持续发展目标方面起到积极的推动作用。

目前，对于电力台区侧分布式光伏的控制和管理，已有多种方法和技术得到应用。文献[1]基于COOT优化算法和改进型重复PI控制的三相LCL型光伏并网系统是应用最为广泛的方法之一。这种策略通过实时调整光伏系统的工作点，确保其在不同光照和温度条件下都能输出最大功率。然而，这种单一追求最大功率输出的控制方法，往往忽视了台区侧电力网络的用能平衡问题，容易导致光伏出力与负荷需求之间的不匹配，进而引发电压波动、功率因数异常等一系列问题。此外，文献[2]基于动态调节下垂曲线的光伏逆变器两阶段协调控制策略仅聚焦于单一的光伏发电系统，缺乏对整个台区侧分布式光伏系统的统筹协调和优化。在实际运行过程中，各个分布式光伏系统之间的运行策略往往是相互独立的，缺乏有效的信息交互和协同控制机制。

降低了系统的整体运行效率，增加了系统运行的不确定性和风险。

本文旨在探索一种新型的电力台区侧分布式光伏用能平衡协同控制策略。该策略通过优化控制算法和引入先进的通信技术，实现台区侧分布式光伏系统的智能感知、协同优化和自适应调节。通过提高系统的用能平衡能力和运行效率，为电力台区侧的可持续发展提供有力的技术支撑。

电力台区侧分布式光伏阵列能量输出与谐波处理

电力台区侧分布式光伏阵列的能量输出受到多种因素的影响，包括光照强度、环境温度和光伏组件的性能等。为提高能量输出效率，需要采取一系列优化措施^[3]。具体而言，在光伏组件的选择上，采用高效单晶硅组件相较于传统多晶硅组件，其能量转换效率可以提高约5%~10%。假设一个电力台区侧分布式光伏阵列由1 000块光伏组件组成，若全部采用高效单晶硅组件替换传统多晶硅组件，整个阵列的能量转换效率将显著提升，进而增加发电量。在光伏阵列的布局 and 安装角度方面，经过优化后，可以减少阴影遮挡和光能损失。合理的组件间

距和角度调整可以使整个光伏阵列的接收能力提高约10%~15%。以一个1 MW的光伏电站为例,优化布局后,其年发电量有望增加约100~150 MW·h。采用智能控制算法进行最大功率点跟踪(MPPT)也是提高光伏阵列能量转换效率的有效手段。^[4]通过实时调整光伏系统的工作点,确保其在不同光照和温度条件下都能输出最大功率。实际应用中,MPPT技术的应用可以使光伏系统的能量转换效率提升约3%~5%。假设一个光伏阵列的原始发电量为1 000 kW·h/天,采用MPPT技术后,其发电量可提升至约1 030~1 050 kW·h/天。

在光伏阵列产生能量输出到直流母线之前,还需要利用DC-DC Boost变换器进行升压,图1为光伏发电Boost升压电路结构图。

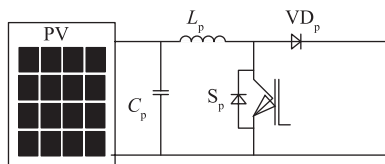


图1 光伏发电Boost升压电路结构图

Boost升压电路的核心组成部分涵盖二极管(VD_p)、开关管(S_p)、电容(C_p)和电感(L_p)。通过精确调控开关管的占空比,电路能够有效调整输出电压的大小,并在此过程中显著减少谐波的产生,进而提升整体电路的稳定性和效率。

电路中电感和电容的临界值可以通过下述公式计算确定

$$D = \frac{U_o - U_i}{U_o} \quad (1)$$

$$L_{\min} = \frac{D(1-D)^2 T_s U_o}{2I_o} \quad (2)$$

$$C_{\min} = \frac{DT_s I_o}{0.01U_o} \quad (3)$$

式中, D 为占空比; U_o 为Boost升压电路输入电压; U_i 为输出电压; $L_{\min}$ 为电路中的电流临界值; T_s 为采样周期; I_o 为输入电流; $C_{\min}$ 为电路中的电感临界值。

在Boost升压电路中,绝缘栅双极型晶体管(IGBT)开关的占空比扮演着至关重要的角色。这一占空比并非随意设定,而是根据最大功率点追踪(MPPT)算法得出的结果来确定。MPPT算法能够实时分析光伏阵列的输出特性,找到最佳的功率输

出点,并据此计算出IGBT开关所需的占空比。通过这种方式,Boost升压电路不仅能够实现电压的灵活调整,还能确保在任何光照条件下都能达到最优的发电效率,配合脉冲宽度调制控制,可以有效抑制谐波的产生。

光伏用能平衡协同分层控制

光伏用能平衡协同分层控制旨在实现光伏系统在不同运行条件下的能量平衡和高效利用。该控制策略通过分层控制的方式,将光伏系统划分为多个控制层级,每个层级负责不同的控制任务,以实现整体的协同优化。在光伏用能平衡协同分层控制中,关键的控制参数包括光伏组件的输出电压和电流、逆变器的输出功率和效率、储能系统的充放电状态等。这些参数通过传感器和测量设备进行实时监测和采集,然后传输到控制器进行分析和处理。

底层控制主要负责光伏组件的最大功率点跟踪(MPPT)和逆变器的稳定运行。最大功率点跟踪(MPPT)算法中的电压和电流关系为

$$P_{\max} = V_{\text{mp}} \times I_{\text{mp}} \quad (4)$$

式中, $P_{\max}$ 为最大功率; V_{mp} 为最大功率点对应的电压; I_{mp} 为最大功率点对应的电流。

中层控制关注光伏系统的能量管理和优化,包括储能系统的充放电控制和负荷需求的匹配。储能系统充放电控制中的能量平衡方程为

$$E_{\text{storage}}(t+1) = E_{\text{storage}}(t) + P_{\text{charge}}(t) \times \Delta t - P_{\text{discharge}}(t) \times \Delta t \quad (5)$$

式中, $E_{\text{storage}}(t)$ 为 t 时刻储能系统的能量状态; $E_{\text{storage}}(t+1)$ 为 $t+1$ 时刻储能系统的能量状态; $P_{\text{charge}}(t)$ 为 t 时刻的充电功率; Δt 为时间间隔; $P_{\text{discharge}}(t)$ 为 t 时刻的放电功率。

高层控制则负责整个光伏系统的能量平衡和协同优化,通过优化算法和决策机制,实现系统整体的最优运行。光伏系统能量平衡方程为

$$P_{\text{pv}}(t) + P_{\text{grid}}(t) + P_{\text{storage}}(t) = P_{\text{load}}(t) \quad (6)$$

式中, $P_{\text{pv}}(t)$ 为光伏系统的发电量; $P_{\text{grid}}(t)$ 为与电网交换的功率; $P_{\text{storage}}(t)$ 为储能系统的充放电功率; $P_{\text{load}}(t)$ 为负荷需求。

依据上述过程,实现对光伏系统的高效控制和优化,实现能量的平衡和可持续利用。

实例应用分析

通过上述论述，提出一种全新的电力台区侧分布式光伏用能平衡协同控制策略，为验证该控制策略的有效性，采用MATLAB R2022a进行模拟仿真分析。

实验首先搭建了一个电力台区侧分布式光伏混合储能电网，参数设置见表1。

表1 电力台区侧分布式光伏混合储能电网参数设置

参数设置	数据
蓄电池额定电压/V	325
额定容量/ (A·h)	200
超级电容器额定电压/V	400
额定容量/F	110
光伏阵列的开路电压/V	330
短路电流/A	48

利用上述提出的方法对该电力台区侧分布式光伏混合储能电网进行用能平衡协同控制，为体现本文控制方法的优越性，选择将文献[1]中改进型重复PI控制和文献[2] 基于动态调节下垂曲线的控制作为对照条件，对比三种控制策略下的用能效果。分别设置三个光照强度变化条件，并分别在1 s、2 s和3 s时刻进行，记录在三种控制方法应用下用能过冲峰值和恢复稳定的时间，得到的结果见表2。

表2 三种控制方法控制效果对比

控制方法	变化时间/s	过冲峰值/V	稳定时间/s
本文控制方法	1	5.23	0.235
	2	4.25	0.201
	3	5.21	0.254
文献[1]控制方法	1	15.26	0.425
	2	21.24	0.532
	3	15.61	0.425
文献[2]控制方法	1	12.25	0.525
	2	25.26	0.425
	3	23.52	0.532

从表1实验数据中可以清晰地观察到，在采用本文提出的控制方法后，电网在三个关键的变化时间点上的过冲峰值均被有效地控制在6.00 V以下。这一数值远低于现有的控制方法所能达到的效果，显示了本文方法在抑制过冲现象方面的显著优势。同时，值得注意的是，在本文控制方法的应用下，系统从过冲状态恢复到稳定状态所需的时间也大幅缩短，仅需0.300 s以内。这种快速地恢复能力对于确保电力系统的稳定运行至关重要。

相比之下，文献[1]和文献[2]中描述的两种控制方法，在相同的实验条件下，其过冲峰值在15.00~24.00 V的较大范围内波动。意味着这些方法在抑制过冲方面表现不佳，可能给电力系统的稳定运行带来潜在风险。此外，两种方法在恢复稳定的时间上也表现得不够理想，均超过了0.400 s。较长的恢复时间意味着系统在遭受扰动后需要更长的时间才能恢复到正常状态，无疑增加了系统运行的不确定性。

综上所述，通过对比不同控制方法下的实验数据，可以得出结论：本文提出的控制方法在抑制过冲和快速恢复稳定方面表现出色，能够实现更加理想的用能平衡效果。这一优势有助于提升电力系统的运行效率，有助于降低系统运行的风险，为电力台区侧的分布式光伏应用提供了有力的技术支持。

结束语

本文深入研究了电力台区侧分布式光伏用能平衡协同控制的关键技术与方法，弥补传统控制方法在提高能源利用效率和优化电力网络用能平衡方面的不足，为未来智能电网和可再生能源的融合发展提供有益的参考。通过本文的研究，成功构建一套适应于电力台区侧分布式光伏系统的协同控制策略，并通过实验验证其有效性和优越性。这一策略的实施，能够提升台区侧电力系统的稳定性和可靠性，促进可再生能源的消纳和高效利用，推动能源结构的绿色转型。EA

(收稿日期：2024-10-11)

参考文献

[1] 杨春辉，屈莉莉，廖慧，等．基于COOT优化算法和改进型重复PI控制的三相LCL型光伏并网系统[J]．佛山科学技术学院学报(自然科学版)，2024，42 (1)： 33-45．

[2] 王键，钱瞳，唐文虎，等．基于动态调节下垂曲线的光伏逆变器两阶段协调控制策略[J]．广东电力，2024，37 (2)： 33-46．

[3] 金爱云，孟令坤，白玛南木加，等．西藏自治区超高海拔牧区光伏支架桩基础的施工质量控制研究[J]．太阳能，2024，(2)： 17-28．