

[光伏逆变器]

光伏电站中逆变器的最大功率点追踪技术研究

文/陈化

山东诚泰安全技术咨询有限公司

光伏电站中的逆变器是实现直流电向交流电转换的关键设备，其性能直接影响光伏系统的整体效率。最大功率点追踪（MPPT）技术是逆变器提高光伏电池能量利用率的核心方法，决定了系统在不同环境条件下的发电效率。通过研究动态参数自适应调整、多维信号同步控制、集成式功率优化调度及智能反馈闭环控制，深入探讨光伏逆变器中MPPT技术的集成设计与优化方法，并通过实验平台的搭建与性能验证，对MPPT技术的性能表现进行了系统评估，旨在提高光伏电站的整体能量转换效率。

光伏电站中的逆变器作为电力电子系统的核心设备，其最大功率点追踪（MPPT）技术直接影响光伏系统的能量转换效率。本文旨在深入探讨基于动态参数自适应调整与多维信号同步控制的MPPT技术集成设计，通过集成式功率优化调度和智能反馈闭环控制，实现逆变器的实时响应与高效能量捕获。研究将结合实验平台的搭建与性能验证，对MPPT性能进行系统评估，以期提升光伏电站的整体输出效率和电能质量。

光伏电站中逆变器的基本原理

光伏电站中的逆变器通过多电平拓扑结构和脉宽调制（PWM）技术，将光伏组件产生的直流电转换为与电网同步的高质量交流电，确保输出电能的谐波畸变最小^[1]。同时，逆变器采用最大功率点追踪（Maximum Power Point Tracking, MPPT）技术，实时优化系统的能量转换效率，实现电能输出的最大化。

首先，MPPT跟踪模块首先采集光伏组件的输出电压 V_{pv} ，利用内部算法计算出当前的输出功率，并确定是否需要调整工作电压。MPPT控制器

根据计算结果生成控制信号 V_m ，并将该信号输入到PWM生成器中。PWM生成器利用该信号调整BOOST斩波电路的占空比，以改变输入电压 V_{pv} ，使其达到最大功率点。

调整后的直流电压经过BOOST斩波电路升压为 U_{dc} 后，输入到MMC逆变器中，逆变器通过另一个PWM生成器控制其输出，使其在并网点的三相交流电流 i_{ga} 、 i_{gb} 、 i_{gc} 与电网电压 v_{gabc} 相位同步。为确保多电平逆变器在不同工作状态下的稳定性，子模块电容电压控制模块实时监控，并调整各个子模块电容的电压平衡，确保每个子模块在工作过程中维持在最优状态。锁相环（PLL）模块实时监测电网的相位角 θ_g ，确保逆变器输出的交流电能与电网保持同步，同时精确控制并网点的有功功率 P 和无功功率 Q 的传输。同时，低电压穿越控制模块监控电网电压情况，当检测到电网电压异常时，该模块会介入控制，确保逆变器在电网电压跌落时仍能维持并网运行，并在电网电压恢复正常后，快速恢复到正常的功率传输状态。光伏电站中逆变器的运行原理如图1所示。

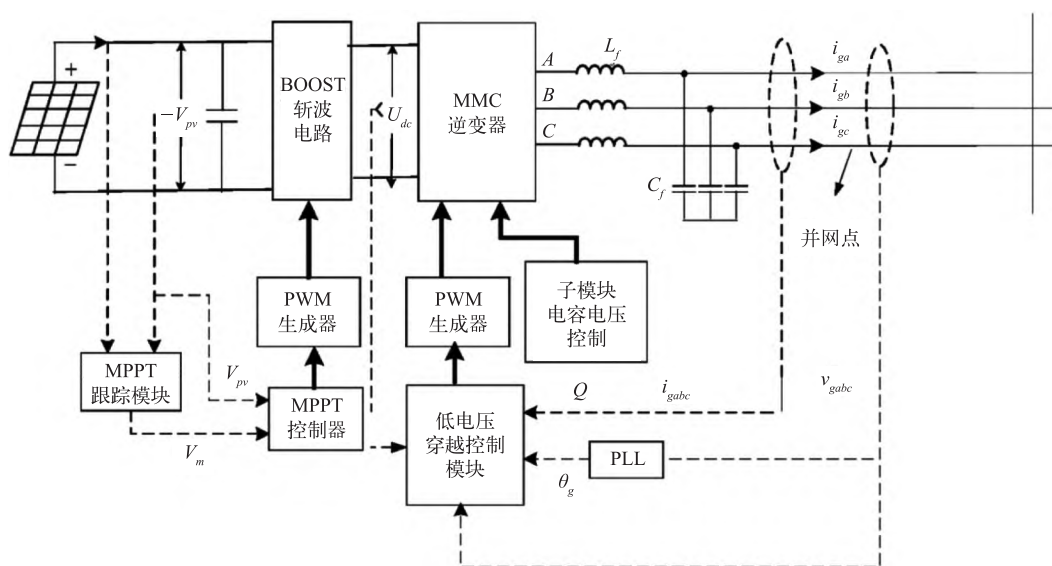


图1 光伏逆变器运行原理图

最大功率点追踪技术在光伏逆变器中的集成设计

1. 动态参数自适应调整

为确保光伏逆变器在复杂环境下高效运行，MPPT算法必须动态响应光照、温度和负载的实时变化，通过调整控制器的内部参数，使系统持续保持在最大功率点附近^[2]。首先，利用光伏电池输出电压 V_{pv} 与电流 I_{pv} 的实时采样数据，计算功率变化率

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = I_{pv} + V_{pv} \times \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \quad (1)$$

式中， P_{pv} 为光伏组件输出的电功率，其计算公式为

$$P_{pv} = V_{pv} \times I_{pv} \quad (2)$$

式（2）用于计算光伏组件的实时输出功率。通过计算功率相对于电压的导数，光伏逆变器的控制器能够判断系统是否运行在最大功率点附近。当 $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 0$ 时，系统达到最大功率点；当 $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} > 0$ ，表示功率还未达到最大，需要增大 V_{pv} 来提升输出功率；反之，则需要减小电压以避免功率下降。为确保光伏逆变器能够在光照和负载变化的情况下快速响应，采用电流调整系数 α 来修正电流控制器的参考值 I_{ref} ，具体计算公式为

$$I_{ref} = I_{pv} + \alpha \times \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \quad (3)$$

式中，电流调整系数 α 根据系统的动态响应特性和

瞬态状态进行调整，以确保逆变器能够及时调整输出功率，使其保持在最佳状态。

光伏逆变器采用电感电流的动态补偿算法进一步优化系统性能。基于当前电感电流 I_L 和参考电流 I_{ref} 的偏差，动态调整逆变器的PWM占空比 D 。占空比 D 的计算公式为

$$D = D_{prev} + k_p \times (I_{ref} - I_L) + k_i \times \int (I_{ref} - I_L) dt \quad (4)$$

式中， D_{prev} 为上一周期的占空比； k_p 和 k_i 分别为比例和积分增益。

式（4）通过引入积分项，能够消除系统稳态误差，提升逆变器对MPPT算法的响应速度与准确度。上述设计确保光伏逆变器在采用MPPT算法时，能够更快、更精确地响应环境变化，以提升整体系统的功率转换效率和稳定性。

2. 多维信号同步控制

在光伏逆变器的多维信号同步控制中，关键在于对电压、电流及光照强度等多维输入信号进行精准同步，以确保最大功率点追踪（MPPT）算法的高效运行。具体而言，光伏逆变器的核心任务是将光伏组件产生的直流电高效地转换为交流电，并利用MPPT技术最大化电能输出^[3]。为实现这一目标，需要确保逆变器输入的电压信号 $V(t)$ 与电流信号 $I(t)$ 在相位与幅值上的精确同步。利用交叉功率函数 $P(t)$ 对这些信号进行动态调整，其计算公式为

$$P(t) = V(t) \times I(t) \times \cos(\theta(t)) \quad (5)$$

式中, $V(t)$ 为瞬时电压; $I(t)$ 为瞬时电流; $\theta(t)$ 为电压与电流之间的瞬时相位差; $P(t)$ 为瞬时功率。

该公式(5)通过调节 $\cos(\theta(t))$ 的值,确保电压与电流信号的相位同步,以优化MPPT算法中的功率传输效率。其次,为适应光伏系统中不断变化的光照条件,需实现光照强度 $S(t)$ 与电压信号 $V(t)$ 之间的动态耦合。采用如下公式对多维信号间的耦合进行优化

$$V(t) = V_0 \times \left(1 + \beta \times \frac{dS(t)}{dt} \right) \quad (6)$$

式中, V_0 为初始电压值; β 为耦合系数; $S(t)$ 为瞬时光照强度; $\frac{dS(t)}{dt}$ 为光照强度的瞬时变化率。

式(6)用于动态调整逆变器的电压响应,以实时适应光照强度的变化,从而确保逆变器在不同环境条件下均能高效运行。

3. 集成功率优化调度

基于多维信号的同步结果,集成式功率优化调度模块能够动态调整逆变器的运行参数,使其始终工作在最优功率点^[4]。在此过程中,通过对逆变器输入侧电压 V_{in} 、电流 I_{in} 的实时监测,结合输出侧功率 P_{out} 的精确计算,可以建立动态功率平衡方程,以保证系统的稳定性。首先,依据功率平衡原理,输入功率与输出功率之间的关系可以表示为

$$P_{in} = V_{in} \times I_{in} = P_{out} + P_{loss} \quad (7)$$

式中, P_{in} 为输入功率; P_{loss} 为系统的损耗功率。

为提高系统效率,优化调度模块通过调节逆变器的开关频率 f_s 及占空比 D 来最小化 P_{loss} 。根据损耗功率的计算公式,逆变器的导通损耗与开关损耗分别可以表示为

$$P_{loss} = I_{in}^2 \times R_{on} + C_{oss} \times V_{in}^2 \times f_s \quad (8)$$

式中, R_{on} 为开关器件的导通电阻; C_{oss} 为开关器件的输出电容。

在此基础上,结合实际功率需求优化调度模块进一步计算逆变器的最佳工作频率 f_{opt} 和占空比 D_{opt} ,以确保输出功率最大化并降低损耗,最终优化公式为

$$f_{opt} = \sqrt{\frac{P_{out}}{C_{oss} \times V_{in}^2}}, \quad D_{opt} = \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (9)$$

式中, f_{opt} 为逆变器的最佳工作频率; D_{opt} 为逆变器的最佳占空比; V_{out} 为光伏逆变器的输出电压。

该优化调度算法能够通过实时调整逆变器的关键参数,最大限度地提高系统的转换效率,并确保逆变器在不同工况下始终处于最优工作状态,从而提升光伏系统的整体能量利用率。

4. 智能反馈闭环控制

智能反馈闭环控制在光伏逆变器的最大功率点追踪(MPPT)技术中,通过引入电压电流双闭环控制结构,实现对光伏阵列输出特性的动态跟踪与调整^[5]。在此结构中,首先利用电流内环控制电路对光伏阵列的输出电流进行实时检测,并以 I_{set} 作为参考,计算实际电流与参考电流的偏差,其计算公式为

$$\Delta I = I_{set} - I_{out} \quad (10)$$

将该偏差值输入至比例积分(PI)调节器,得出电压调节量 ΔV 。电压调节量经过逆变器的控制算法调制后,产生调节电压 V_{ctrl} ,进而影响光伏阵列的输出电压,使其逼近最佳工作点。调节电压 V_{ctrl} 的计算公式为

$$V_{ctrl} = V_{prev} + G_p \Delta I + G_i \int_0^t \Delta I dt \quad (11)$$

式中, V_{prev} 为前一时刻的输出电压; G_p 为比例系数; G_i 为积分系数; $\int_0^t \Delta I dt$ 为积分项,用于修正长期偏差。

该控制策略使得光伏阵列在负载变化或环境条件波动时,能迅速调整输出至最大功率点。电压外环控制进一步通过检测输出功率的变化量 ΔP ,根据功率-电压特性曲线的导数关系 $\frac{\Delta P}{\Delta V}$,推导出新的参考电流值 I_{new} ,以动态修正内环控制目标,使系统始终运行在最优功率输出点。 I_{new} 的计算公式为

$$I_{new} = I_{prev} + \gamma \frac{\Delta P}{\Delta V} \quad (12)$$

式中, γ 为反馈增益系数; I_{prev} 为前一时刻的参考电流。

该智能反馈闭环控制设计通过电压电流的双环结构及其联动调整机制,确保光伏系统在复杂多变的工况下,依然能够高效、稳定地追踪最大功率点。

实验设计与性能验证

1. 实验平台的搭建与配置

在实验平台的搭建中,逆变器系统的核心由BOOST升压电路、PWM生成器、MC逆变器以及滤波器构成。首先,BOOST升压电路负责将光伏

阵列产生的直流电压提升至逆变器所需的直流母线电压，并通过MPPT跟踪器实时调整升压比以确保光伏系统在最大功率点运行。PWM生成器通过高频脉宽调制信号控制BOOST升压电路和MC逆变器的开关状态，使直流电压在MC逆变器中转换为高质量的三相交流电。逆变器输出端的LC滤波器用于滤除高频谐波，保证并网电流的纯净度和稳定性。其次，PLL锁相环电路实时监测并校正电网电压的相位，确保逆变器输出与电网同步，实现稳定的并网操作。同时，实验平台集成低电压穿越控制与子模块电容电压控制模块。前者确保在电网故障或电压波动时逆变器的连续运行，后者则维持逆变器输出电压的平衡与稳定。在整个系统中，数据采集系统和LabVIEW软件用于实时监测和控制实验中的各项参数，并通过反馈闭环调节算法对系统进行动态优化，以确保实验平台能够准确评估逆变器及其MPPT技术的性能表现。

2. 实验步骤与测试方法

为验证最大功率点追踪技术在光伏逆变器中的集成设计效果，本实验采用单一变量法设置实验组和对照组进行对比实验。在实验中，实验组采用本文设计的MPPT算法，对照组采用传统的扰动观察法。

实验步骤如下：首先，将实验平台的光照强度固定，温度维持恒定，确保其他变量不变的情况下，通过逐步调整光伏阵列的负载以模拟实际运行中的动态负载变化。对照组使用传统的扰动观察法进行最大功率点的跟踪，实验组使用优化后的智能算法，在相同环境条件下实时记录两组的输出功率、功率追踪准确度、系统响应时间和能源转换效率。在实验过程中，利用数字示波器同步捕获各组数据，并对比分析实验组和对照组在不同负载条件下的性能差异，以验证优化后的MPPT算法在提高光伏逆变器效率和响应速度方面的优势。

3. 实验结果与讨论

实验结果见表1。

表1 实验结果

指标	实验组	对照组
输出功率/W	4 550.67	3 700.23
功率追踪准确度 (%)	98.76	79.14
系统响应时间/s	0.12	0.97
能源转换效率 (%)	97.82	70.87

由表1可知，本研究设计的最大功率点追踪技

术在光伏逆变器中的集成显著提升了系统的整体性能。实验组的输出功率达到4 550.67 W，较对照组的3 700.23 W提升了约22.9%，表明实验组在相同光照条件下能够更有效地将光伏阵列的能量转化为电网输送的电力。同时，实验组的功率追踪准确度为98.76%，远高于对照组的79.14%，显示出实验组在追踪最大功率点时具有更高的精确度，进而最大化了能量获取。在系统响应时间方面，实验组的响应时间仅为0.12 s，显著优于对照组的0.97 s。表明实验组能够更快速地响应环境变化，进而迅速调整逆变器的工作参数以保持系统在最大功率点附近运行。能源转换效率方面，实验组达到97.82%，而对照组仅为70.87%。进一步证明了实验组在能量利用上的显著优势，体现了实验组在不同环境条件下均能保持高效的能源转换能力。

结束语

综上所述，通过对光伏电站中逆变器的最大功率点追踪技术的研究，本文提出基于动态参数自适应调整、多维信号同步控制、集成式功率优化调度以及智能反馈闭环控制的集成设计方案。实验结果表明，该方案有效提高光伏逆变器的追踪准确度与响应速度，实现在复杂环境下的高效运行，进一步优化光伏电站的整体能量转换效率。EA

(收稿日期：2024-08-27)

参考文献

[1] 李艳魁. 光伏并网逆变器在光伏电站中的应用及维护[J]. 光源与照明, 2023, (1): 127-129.

[2] 王丽朝, 孟子尧, 陈诗明, 等. 基于GRU神经网络的光伏电站数据预处理方法[J]. 太阳能学报, 2022, 43(11): 78-84.

[3] 李桐, 韩学山. 时变追踪并网光伏电站最大输出功率的无功优化方法[J]. 电工技术学报, 2023, 38(11): 2921-2931.

[4] 甘雯, 石博隆, 姚瑛, 等. 分布式光伏电站监控装置的研究和设计[J]. 浙江电力, 2022, 41(6): 37-44.

[5] 陆炜, 田介花. 基于逆变器过载损失的双面组件光伏电站最优容配比分析[J]. 太阳能, 2021, (12): 58-63.