

低碳背景下光伏新能源发电最大功率点跟踪控制方法

叶 锴

杭州华电半山发电有限公司 浙江 杭州 310000

摘要：在低碳发展背景下，光伏新能源发电作为清洁能源的重要形式，其发电效率提升至关重要。最大功率点跟踪（MPPT）控制技术是提高光伏系统发电效率的关键。本文阐述了光伏发电系统组成、工作原理及光伏电池输出特性，分析了最大功率点跟踪原理。同时，对经典MPPT控制方法进行分析，指出其局限性。最后，提出低碳背景下光伏MPPT控制的优化方向，包括技术、应用场景适配以及政策与产业支持方面的建议，以促进光伏发电在低碳能源体系中的高效应用。

关键词：低碳；光伏新能源发电；最大功率点跟踪；控制方法

引言：在全球低碳转型与能源结构升级的双重驱动下，光伏新能源发电成为清洁能源体系的核心支柱。最大功率点跟踪（MPPT）技术是提升光伏系统发电效率的关键环节，直接影响其经济性与实用性。针对传统MPPT算法在复杂光照、温度扰动下存在跟踪精度低、响应速度慢等问题，本文聚焦低碳背景下光伏电站的运行需求，深入研究MPPT控制方法的优化路径，为光伏系统高效稳定运行提供理论支撑与技术参考。

1 光伏发电系统与最大功率点理论

1.1 光伏发电系统组成与工作原理

光伏发电系统由光伏组件、控制器、逆变器、蓄电池（离网系统）及负载组成。其核心为光伏组件，由单晶硅、多晶硅或非晶硅电池片通过串联/并联构成，利用半导体P-N结的光生伏特效应将太阳能转化为直流电。以单晶硅组件为例，其光电转换效率可达18%—24%，寿命超过25年。直流电经控制器（过充/过放保护）后，通过逆变器转换为交流电，实现并网或离网供电。离网系统中，蓄电池储存多余电能，保障夜间或阴雨天供电；并网系统则直接将电能输入公共电网，形成“自发自用、余电上网”模式。系统工作原理可概括为：光能→P-N结电子跃迁→光生电流→直流电转换→逆变/储能→负载或电网供电。

1.2 光伏电池的输出特性

光伏电池输出特性呈非线性，受光照强度、环境温度及负载影响显著。在标准测试条件（STC，光照 $1000\text{W}/\text{m}^2$ 、温度 25°C ）下，其输出功率-电压（P-V）曲线呈单峰特性，最大功率点（MPP）位于曲线顶点。当光照强度变化时，曲线整体平移：光照增强，开路电压（ V_{oc} ）小幅上升，短路电流（ I_{sc} ）显著增加；温度升高时， V_{oc} 下降（每升高 1°C ， V_{oc} 降低约0.3%—0.5%）， I_{sc}

略有上升，但MPP电压（ V_m ）降低，导致功率损失。例如，单晶硅组件在 40°C 时，输出功率较 25°C 下降约10%。另外，部分遮挡会导致多峰P-V曲线，传统算法易陷入局部最优，需采用全局搜索策略^[1]。

1.3 最大功率点跟踪原理

MPPT技术通过动态调整光伏阵列工作电压/电流，使其始终运行在MPP附近，提升发电效率5%—20%。其原理基于最大功率传输定理：当负载阻抗等于电源内阻时，功率传输效率最高。在光伏系统中，MPPT控制器通过DC/DC变换器调节等效阻抗，实现负载与电池内阻的动态匹配。例如，当光照增强时，电池内阻降低，MPPT控制器减小输出电压，使工作点向MPP移动；反之则增大电压。动态响应速度与稳态精度是MPPT性能的核心指标，需兼顾快速跟踪（ $<0.5\text{s}$ ）与低振荡（ $<\pm 1\%$ ）。

2 经典最大功率点跟踪控制方法分析

2.1 恒电压法（CVT）

恒电压法是一种较为简单的MPPT控制方法。其基本原理是基于在相同环境温度下，光伏电池的最大功率点电压 V_m 与开路电压 V_{oc} 之间存在一个近似固定的比例关系，通常取 $V_m \approx 0.76V_{oc}$ 。在实际应用中，通过将光伏阵列的输出电压稳定在这个预设的恒定电压值附近，从而实现近似最大功率点跟踪；该方法的优点在于实现简单，硬件成本低，不需要复杂的计算和传感器，适用于对成本敏感且环境温度变化较小的应用场景。例如，在一些小型的离网光伏照明系统中，CVT法可以满足基本的供电需求。然而，CVT法存在明显的局限性。它没有考虑光照强度变化对最大功率点电压的影响，当光照强度发生较大变化时，按照固定的电压值工作会导致偏离最大功率点，造成功率损失。同时，环境温度的变化也会影响光伏电池的输出特性，而CVT法无法根据温度变

化进行自适应调整,导致跟踪精度较低。

2.2 扰动观察法 (P&O)

扰动观察法是目前应用最为广泛的MPPT控制方法之一。其工作原理是通过改变光伏阵列的输出电压或电流施加一个小的扰动(如增加或减少一个固定的电压值 ΔV),然后观察输出功率的变化情况。如果功率增加,则说明扰动方向正确,继续沿该方向进行扰动;如果功率减小,则说明扰动方向错误,需要反向进行扰动。通过不断地重复这个过程,使光伏阵列的工作点逐渐逼近最大功率点;扰动观察法的优点是算法简单,易于实现,不需要知道光伏电池的具体参数,对硬件的要求相对较低。在大多数光照条件下,都能够有效地跟踪到最大功率点。但是,该方法也存在一些问题。由于采用固定步长的扰动,在接近最大功率点时,会出现振荡现象,导致功率损失^[2]。而且,当光照强度发生快速变化时,扰动观察法可能会误判扰动方向,使得工作点偏离最大功率点,跟踪稳定性变差。例如,在多云天气下,光照强度频繁变化,扰动观察法的跟踪效果会受到较大影响。

2.3 电导增量法 (INC)

电导增量法是基于光伏电池的P-V曲线特性提出的MPPT控制方法。在最大功率点处,光伏电池的电导增量(dI/dV)等于负电导($-I/V$),即 $dI/dV+I/V=0$ 。电导增量法通过实时测量光伏电池的输出电压和电流,计算电导增量和负电导的值,并根据它们之间的关系来调整光伏阵列的工作点。当 $dI/dV+I/V>0$ 时,说明工作点在最大功率点的左侧,需要增加输出电压;当 $dI/dV+I/V<0$ 时,说明工作点在最大功率点的右侧,需要减小输出电压;当 $dI/dV+I/V=0$ 时,说明工作点达到了最大功率点;电导增量法的优点是跟踪精度高,在稳态情况下能够准确地跟踪到最大功率点,振荡较小。而且,该方法对光照强度的变化具有较好的适应性,能够在光照强度快速变化时保持较好的跟踪性能。然而,电导增量法的算法相对复杂,需要实时进行微分计算,对传感器的精度和计算速度要求较高,硬件成本也相对较高。另外,在部分遮挡等复杂情况下,光伏电池的P-V曲线可能出现多峰现象,电导增量法可能会陷入局部最优,无法找到全局最大功率点。

2.4 经典方法对比与总结

恒电压法实现简单、成本低,但跟踪精度差,适用于对成本敏感且环境变化小的场景;扰动观察法算法简单、易于实现,但存在振荡和误判问题,在光照变化频繁时性能下降;电导增量法跟踪精度高、适应性好,但

算法复杂、硬件成本高,在多峰情况下可能陷入局部最优。综合来看,经典MPPT控制方法各有优缺点,在实际应用中需要根据具体的应用场景和需求进行选择。同时,为了进一步提高MPPT的性能,需要对其进行改进和优化。

3 改进的最大功率点跟踪控制方法研究

3.1 基于变步长策略的改进方法

针对扰动观察法固定步长导致的振荡和跟踪速度矛盾问题,研究人员提出了基于变步长策略的改进方法。变步长策略的核心思想是根据光伏阵列的工作状态动态调整扰动步长。当工作点远离最大功率点时,采用较大的步长进行扰动,以加快跟踪速度;当工作点接近最大功率点时,采用较小的步长进行扰动,以减少振荡,提高稳态精度。一种常见的变步长实现方式是根据功率变化量来调整步长。例如,定义步长 ΔV 与功率变化量 ΔP 成正比,即 $\Delta V=k \cdot \Delta P$ (k 为比例系数)。当 ΔP 较大时,说明工作点离最大功率点较远,此时 ΔV 也较大,能够快速逼近最大功率点;当 ΔP 较小时,说明工作点接近最大功率点,此时 ΔV 也较小,可以减少振荡。通过合理地选择比例系数 k ,可以在跟踪速度和稳态精度之间取得良好的平衡^[3]。仿真和实验结果表明,基于变步长策略的改进扰动观察法能够显著提高MPPT的性能。在光照强度快速变化的情况下,该方法能够快速跟踪到最大功率点,同时将振荡幅度控制在较小的范围内,有效提高了光伏系统的发电效率。

3.2 智能算法在MPPT中的应用

随着人工智能技术的发展,智能算法如模糊控制、神经网络、粒子群优化等在MPPT控制中得到了广泛的应用。模糊控制是一种基于模糊逻辑的控制方法,它不需要精确的数学模型,能够处理不确定性和非线性问题。在MPPT控制中,模糊控制器可以根据光伏阵列的输出电压、电流和功率等输入变量,通过模糊规则库进行推理和决策,输出合适的控制信号来调整光伏阵列的工作点。模糊控制具有鲁棒性强、适应性好的优点,能够在复杂的环境条件下实现较好的MPPT性能。例如,在部分遮挡或光照强度快速变化的情况下,模糊控制能够根据实际情况动态调整控制策略,避免陷入局部最优;神经网络是一种模拟人脑神经元结构的计算模型,具有强大的非线性映射能力和自学习能力。在MPPT控制中,可以通过训练神经网络来建立光伏阵列的输出特性模型,然后根据实时测量的输入变量(如光照强度、温度等)预测最大功率点对应的电压或电流,从而实现MPPT控制。神经网络方法能够准确地拟合光伏阵列的非线性特性,

提高跟踪精度。但是,神经网络需要大量的训练数据进行训练,且训练过程可能比较复杂;粒子群优化算法是一种基于群体智能的优化算法,它通过模拟鸟群或鱼群的群体行为来寻找最优解。在MPPT控制中,将光伏阵列的工作点看作粒子,通过粒子之间的信息共享和协作,不断搜索最大功率点。粒子群优化算法具有全局搜索能力强、收敛速度快的优点,能够在复杂的多峰P-V曲线中找到全局最大功率点。然而,粒子群优化算法的性能受到参数设置的影响较大,需要合理地选择粒子数量、惯性权重等参数。

3.3 混合控制方法研究

为了充分发挥不同MPPT控制方法的优势,研究人员提出了混合控制方法。混合控制方法将两种或多种MPPT控制方法相结合,根据不同的工作条件和需求选择合适的控制策略。例如,将恒电压法和扰动观察法相结合的混合控制方法。在系统启动初期,采用恒电压法快速将光伏阵列的工作电压调整到接近最大功率点电压的范围,然后切换到扰动观察法进行精确的跟踪。这种方法既利用了恒电压法的快速启动优势,又发挥了扰动观察法的精确跟踪能力,提高了MPPT的整体性能。另一种混合控制方法是将电导增量法和模糊控制相结合,在正常光照条件下,采用电导增量法进行精确的MPPT控制;当检测到光照强度发生快速变化或出现部分遮挡等复杂情况时,切换到模糊控制,利用模糊控制的鲁棒性和适应性来保证系统的稳定运行。通过这种混合控制方式,可以在不同的工作条件下实现高效、稳定的MPPT控制。

4 低碳背景下光伏 MPPT 控制的优化方向与建议

4.1 技术优化方向

在技术层面,应继续加强MPPT算法的研究和创新。一方面,进一步优化变步长策略,提高其对不同环境条件的适应性,实现更加精准的步长调整。另一方面,深入探索智能算法在MPPT中的应用,结合多种智能算法的优点,开发出更加高效、鲁棒的混合智能MPPT控制方法。同时,加强硬件技术的研发,提高传感器的精度和可靠性,降低硬件成本,为MPPT技术的广泛应用提供支持。

4.2 应用场景适配建议

不同的应用场景对MPPT控制的要求有所不同。对

于户用光伏系统,由于成本限制和空间有限,应选择简单、可靠且成本较低的MPPT控制方法,如改进的扰动观察法。对于大型地面光伏电站,需要考虑光照强度变化、部分遮挡等复杂因素,应采用具有全局搜索能力和高适应性的混合控制方法,如电导增量法与粒子群优化算法的混合控制。对于分布式光伏系统,要注重与电网的协调控制,采用具有快速响应和良好抗干扰能力的MPPT控制方法,以确保系统的稳定运行^[4]。

4.3 政策与产业支持建议

政府应出台相关政策,鼓励和支持光伏MPPT技术的研发和应用。加大对光伏MPPT科研项目的资金投入,建立产学研合作机制,促进科研成果的转化和应用。同时,制定光伏MPPT产品的标准和规范,加强市场监管,提高产品质量。在产业层面,光伏企业应加强技术创新,提高产品的性能和可靠性,降低生产成本。加强与上下游企业的合作,形成完整的光伏产业链,推动光伏MPPT技术的产业化发展。

结束语

在低碳背景下,光伏新能源发电对于实现能源转型和可持续发展具有重要意义。最大功率点跟踪控制技术是提高光伏系统发电效率的关键。通过对经典MPPT控制方法的分析和改进方法的研究,我们看到了MPPT技术在性能提升方面的巨大潜力。未来,应从技术优化、应用场景适配以及政策与产业支持等方面入手,不断推动光伏MPPT技术的发展和應用,为低碳能源体系的建设做出更大的贡献。

参考文献

- [1] 闫轲. 低碳背景下光伏新能源发电最大功率点跟踪控制方法[J]. 能源与节能, 2025(8): 1-3, 8.
- [2] 王有新. 基于智能控制算法的光伏发电系统最大功率点跟踪技术分析[J]. 集成电路应用, 2025, 42(01): 266-267.
- [3] 孔繁麟. 光伏发电系统中的最大功率点追踪算法性能比较与改进分析[J]. 电子技术, 2024, 53(12): 144-145.
- [4] 王鑫, 赵阳, 刘彦祺, 等. 光伏发电系统最大功率点跟踪功率预测改进策略研究[J]. 技术与市场, 2024, 31(10): 16-22+29.