

# 光伏并网逆变器控制策略研究

王 宏

特变电工西安电气科技有限公司 陕西 西安 710119

**摘 要：**光伏并网逆变器是光伏发电系统与电网的关键衔接部件，其性能影响系统效率、电能质量与并网稳定性。核心控制策略包括最大功率点跟踪、逆变并网及辅助控制，以提升发电效率、保障电能质量。弱电网环境下，面临锁相环和电流控制器性能恶化等挑战，阻抗重塑、自适应与鲁棒控制可有效应对。此外，构网型控制、多逆变器协同控制及人工智能的应用，为逆变器控制带来新方向，可提升系统抗干扰能力、运行效率与智能化水平。

**关键词：**光伏并网；逆变器；控制策略；研究

引言：在全球能源转型的大背景下，光伏发电作为清洁能源的重要支柱，其高效稳定运行至关重要。光伏并网逆变器作为光伏发电系统与公共电网的关键衔接点，承担着将不稳定直流电转换为高质量交流电并馈入电网的重任，其性能直接影响系统的能量转换效率、电能质量与并网稳定性。然而，复杂多变的电网环境，尤其是弱电网条件，给逆变器控制带来了诸多挑战。在此背景下，深入探究光伏并网逆变器的核心控制策略、应对弱电网挑战的方法，以及先进控制策略的发展趋势，对于提升光伏发电系统性能、保障电网安全稳定运行意义重大。

## 1 光伏并网逆变器概述

在当今能源转型的大背景下，光伏发电作为一种极具潜力的清洁能源利用方式，正日益受到广泛关注。而光伏并网逆变器，作为连接光伏阵列与公共电网的关键枢纽，在整个光伏发电系统中扮演着举足轻重的角色，堪称核心功率转换设备。（1）光伏阵列所捕获的太阳能，最初是以直流电的形式存在。然而，公共电网所需的却是交流电，这就要求有一种设备能够完成直流电到交流电的转换，光伏并网逆变器正是为满足这一需求而生。它的核心功能在于，将光伏组件产生的直流电，精准且高效地转换成与公共电网同频率、同相位的交流电，并顺利馈入电网。这一转换过程看似简单，实则对逆变器的性能有着极高的要求。（2）其性能的优劣，直接且深刻地影响着整个光伏发电系统的多个关键指标。在能量转换效率方面，高效的光伏并网逆变器能够最大程度地减少在转换过程中的能量损耗，使更多光伏组件捕获的太阳能得以转化为可用电能，从而提升系统的整体发电量。在输出电能质量上，优质的逆变器可以确保输出的交流电波形接近理想的正弦波，有效降低谐波含量，避免对电网造成污染，保障电网中其他用电设备的

正常运行。而在并网运行的稳定性方面，它能够根据电网的电压、频率等参数实时调整自身的输出，实现与电网的无缝对接，防止因并网不稳定导致的设备损坏或停电事故。（3）从系统构成来看，典型的光伏并网系统主要由多个关键部分组成。光伏阵列负责收集太阳能并将其转化为直流电；DC/DC变换器（在部分系统中为可选部件）用于对直流电的电压进行调节；DC/AC逆变器即光伏并网逆变器，是系统的核心转换单元；滤波电路则进一步净化输出的交流电，去除其中的谐波成分；控制系统则对整个系统进行实时监控和调节，确保各部分协同工作，实现高效、稳定的光伏发电并网<sup>[1]</sup>。

## 2 光伏并网逆变器核心控制策略

### 2.1 最大功率点跟踪控制

光伏电池的输出特性具有显著的非线性特征，其输出功率会随着光照强度和环境温度的变化而改变，并且在特定的光照和温度条件下，存在一个唯一的最大功率点（MPP）。为了充分利用太阳能，提高光伏发电系统的整体发电效率，最大功率点跟踪（MPPT）控制策略应运而生。（1）MPPT控制的核心目标在于，通过实时且精准地调整逆变器输入端的工作电压或电流，让光伏阵列始终稳定地工作在最大功率输出状态。如此一来，即便外界环境条件不断变化，光伏阵列也能将捕获的太阳能最大限度地转化为电能。（2）在实际应用中，存在多种常见的MPPT算法。扰动观察法通过周期性地给光伏阵列的电压或电流施加一个小扰动，观察功率的变化方向，进而确定下一步的调整方向；电导增量法则是根据光伏阵列的电导变化情况来调整工作点；此外，还有适用于部分遮挡等复杂工况的全局MPPT算法，它能够更全面地搜索最大功率点，避免陷入局部最优。这些MPPT算法各有特点，共同为提升光伏并网逆变器的性能和系统发电效率发挥着关键作用。

## 2.2 逆变并网控制策略

并网控制作为逆变器技术的关键所在,其核心目标在于精准把控逆变器输出电流,使其与电网电压保持同频同相,同时有效降低谐波含量,以此保障并网过程的稳定性和电能质量。(1)在电流控制策略方面,当前主流采用基于坐标变换的矢量控制方法。具体而言,借助锁相环技术精确获取电网电压的相位信息,随后将交流量转换为直流量,并运用PI调节器实现无静差跟踪。其中,常见的控制结构为电网电压定向的矢量控制,该结构能够将有功功率和无功功率进行解耦控制,使得对有功和无功的调节互不干扰,从而更灵活地满足电网对功率的需求。(2)锁相环技术是电流控制得以顺利实施的前提条件,其作用是快速且准确地检测电网电压的相位和频率。同步参考系锁相环凭借其原理清晰、实现简便等优势,得到了广泛应用。然而,在实际电网运行中,常出现电压不平衡或畸变的情况,这对锁相环的性能提出了更高要求。因此,针对电网电压不平衡或畸变条件下的改进型锁相环技术,成为了当前的研究重点,旨在进一步提升并网控制的准确性和可靠性<sup>[2]</sup>。

## 2.3 辅助控制与电能质量优化

为确保光伏并网逆变器严格满足并网标准,保障电网的安全稳定运行,引入科学有效的辅助控制策略至关重要。(1)在抑制谐波方面,可引入陷波器或重复控制。陷波器能针对特定频率的谐波进行精准抑制,通过设置合适的陷波频率,将该次谐波从输出电流中滤除,有效降低谐波对电网的污染。重复控制则基于对上一个周期误差的记忆,在本周期进行修正,对于周期性干扰引起的谐波有很好的抑制效果,能显著提高输出电流的波形质量。(2)直流侧电压的稳定控制同样不可或缺。维持直流侧电压稳定是确保功率平衡的关键,当光伏阵列输出功率或电网吸收功率发生变化时,通过调节逆变器的控制参数,使直流侧电压保持在合理范围内,避免因电压波动导致功率传输异常,保障系统的稳定运行。(3)根据电网的实际需求,逆变器还需具备多种电网支撑功能。无功功率补偿功能可根据电网的无功需求,动态调节逆变器输出的无功功率,提高电网的功率因数;低电压穿越功能则能在电网电压跌落时,保持逆变器的并网运行,为电网提供一定的无功支持,助力电网快速恢复稳定。

## 3 弱电网环境下逆变器控制挑战与对策

### 3.1 弱电网特性及其影响

弱电网通常是指短路容量相对较小、线路阻抗较大的电网。这种电网具有显著的特点,其电网电压幅值与

频率容易受到各种因素影响而发生波动。例如,当地用电负荷的突然增减、分布式电源的接入与退出等,都可能引发电网电压和频率的变化。在弱电网环境下,传统基于理想电网假设设计的锁相环和电流控制器会面临严峻挑战,其性能将显著恶化。锁相环作为获取电网电压相位和频率的关键部件,在弱电网中,由于电网电压存在波动和畸变,其难以准确、快速地锁定相位和频率,导致获取的信息不准确。而电流控制器依赖锁相环提供的准确信息来调节输出电流,锁相环性能的下降会使得电流控制器无法精准控制输出电流,进而可能导致系统失稳,引发振荡等一系列问题,严重影响逆变器的并网运行和电能质量,给整个电力系统的安全稳定带来潜在风险<sup>[3]</sup>。

### 3.2 阻抗重塑控制

在弱电网环境下,逆变器与电网间的交互作用变得复杂,稳定性问题日益凸显。为有效解决这一难题,阻抗重塑控制成为一种行之有效的关键方法。(1)该方法的核心思路是在逆变器的控制环路中巧妙引入虚拟阻抗。虚拟阻抗并非实际存在的物理阻抗,而是通过特定的控制算法在控制系统中模拟实现的。通过这种方式,能够主动且精准地改变逆变器输出阻抗的特性,涵盖其幅值与相位等关键参数。(2)经过合理设计的虚拟阻抗,可使逆变器的输出阻抗特性满足奈奎斯特稳定判据。奈奎斯特稳定判据作为判断系统稳定性的重要准则,能够确保系统在面对弱电网复杂的阻抗特性时,有效抑制逆变器与电网阻抗之间可能产生的交互振荡。这种交互振荡若得不到及时抑制,会严重影响系统的稳定运行,甚至导致系统崩溃。而阻抗重塑控制通过调整输出阻抗,从根源上削弱了引发振荡的因素,增强了逆变器在弱电网环境下的适应性和稳定性,保障了并网系统的可靠运行。

### 3.3 自适应与鲁棒控制

在弱电网环境下,电网特性复杂且多变,传统控制策略难以保证逆变器在宽运行范围内稳定可靠运行,而自适应与鲁棒控制策略展现出显著优势。(1)自适应控制策略的核心在于,利用先进的在线识别技术,实时获取电网阻抗等关键参数。控制器依据这些实时信息,自动且精准地调整自身参数。如此一来,无论电网阻抗如何变化,逆变器都能迅速适应,始终保持稳定的运行状态,有效避免了因电网参数波动导致的控制失效问题。(2)鲁棒控制则侧重于在设计阶段就充分考虑系统参数的不确定性。它通过严谨的数学分析和设计方法,构建出对参数变化不敏感的控制策略。即便电网出现波动,导

致系统参数偏离设计值,该控制器也能凭借其内在的鲁棒性,维持良好的控制性能,确保逆变器稳定并网,为弱电网环境下的电力稳定供应提供了坚实保障。

#### 4 先进控制策略与发展趋势

##### 4.1 构网型控制技术

在新能源大规模接入电网的背景下,传统“跟网型”逆变器已难以满足高比例新能源电网的稳定运行需求,而构网型控制技术应运而生。(1)与传统“跟网型”逆变器被动跟随电网电压和频率的特性不同,构网型逆变器展现出独特的主动构建能力。它通过精确且智能的控制策略,主动调节输出电压的幅值和频率,以此主动建立并维持电网的电压和频率稳定,呈现出典型的电压源特性。(2)这种特性赋予了构网型逆变器强大的功能优势,它能够像传统同步发电机一样,为电网提供可观的惯性和阻尼支撑。在高比例新能源电网中,当面临功率波动、故障冲击等复杂工况时,构网型逆变器可有效抑制电网频率和电压的剧烈变化,显著提升电网的抗干扰能力和稳定运行水平,为新能源的高效消纳和电网的安全可靠运行提供有力保障<sup>[4]</sup>。

##### 4.2 多逆变器协同控制

在大型光伏电站里,往往有成百上千台逆变器同时接入电网并运行。由于各逆变器在硬件参数、运行状态等方面存在差异,且电网对功率的精准分配和稳定控制有着严苛要求,单独对每台逆变器进行控制,难以实现电站整体的高效、稳定运行,因此多逆变器协同控制策略显得尤为关键。(1)下垂控制是常用的协同控制手段之一,它借鉴同步发电机的下垂特性,通过调节逆变器输出电压的频率和幅值,实现有功功率和无功功率的自动分配。这种控制方式无需复杂的通信线路,就能使各逆变器按自身容量合理分担功率,实现初步的协调运行。(2)主从控制则设定一台逆变器作为主机,负责整体调度与指令下发,其余逆变器作为从机,严格遵循主机指令运行。该方式能够实现更精确的功率控制,满足电站对有功/无功功率的精确调度需求,进而保障电站输出功率的稳定,提升整个光伏电站的运行效率和可靠性。

##### 4.3 人工智能在控制中的应用

在逆变器控制领域,人工智能算法的融入正引领其迈向智能化新阶段。机器学习、深度学习等先进算法,为逆变器控制带来了革新性的解决方案。(1)在MPPT(最大功率点跟踪)优化环节,传统方法难以快速适应复杂多变的光照、温度等环境因素。而人工智能算法可通过对大量历史数据和实时数据的学习分析,精准预测最大功率点位置,动态调整控制参数,使光伏系统始终高效运行在最大功率点附近,大幅提升发电效率。(2)在故障诊断方面,人工智能算法能快速处理海量运行数据,精准识别逆变器的潜在故障类型和位置,实现故障的早期预警与精准定位。(3)在模型预测控制参数整定中,它可根据系统实时状态自动优化参数,增强系统的动态性能和容错能力,有效应对各种复杂工况,成为逆变器智能化发展的必然方向。

##### 结束语

光伏并网逆变器作为光伏发电与电网衔接的关键枢纽,其控制策略的优化至关重要。从核心控制策略保障高效稳定运行,到应对弱电网挑战的创新方法,再到先进控制策略引领的智能化发展,每一步都推动着逆变器性能提升。未来,随着构网型、多逆变器协同及人工智能等先进技术的持续融合与创新,光伏并网逆变器将具备更强的适应性与智能化水平,不仅能更好地满足高比例新能源电网的需求,也将为全球能源转型和可持续发展提供坚实有力的支撑,开启绿色能源新时代。

##### 参考文献

- [1]张毅,陈柏林.光伏逆变器并网控制策略研究综述[J].电力系统自动化,2022(10):98-105.
- [2]刘立峰.大型并网光伏电站的运行维护管理研究[J].工程技术研究,2020,5(05):189-190.
- [3]陈建国,刘畅,朱同鑫.并网光伏电站的生产运行数据分析[J].太阳能,2020(01):47-54.
- [4]李俊峰,黄志斌.面向电能质量控制的光伏逆变器技术研究[J].电力电子技术,2023(4):47-52.