

分布式光伏发电系统的并网控制策略研究

常强贵

安徽省建筑设计研究总院股份有限公司

摘要：随着可再生能源的发展，分布式光伏发电系统逐渐成为一种重要的清洁能源。本文主要研究了分布式光伏发电系统的并网控制策略，以提高光伏系统的发电效率和电力质量。通过对现有并网控制技术的分析，提出了一种高效、稳定的并网控制策略，并对其进行了详细的讨论与分析。

关键词：分布式光伏发电系统；并网控制策略；电力质量；可再生能源

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2023.05.070

引言：

分布式光伏发电系统作为一种清洁、可再生的能源，越来越受到世界各国的关注。有效的并网控制策略是提高分布式光伏发电系统性能的关键。本文旨在研究分布式光伏发电系统的并网控制策略，以期提高其发电效率和电力质量。

一、分布式光伏发电系统概述

（一）光伏发电系统的组成

光伏发电系统是指通过将太阳能转化为电能的系统，它主要由光伏组件、逆变器、电网连接等组成。其中，光伏组件是核心部件，它将太阳能转化为电能。逆变器是将光伏组件产生的直流电转换为交流电，供电网使用。电网连接是将光伏发电系统和电网连接起来，以实现电力的传输和使用。

（二）分布式光伏发电系统的特点

分布式光伏发电系统是指将光伏发电设备分散在用电器旁边，不需要建设集中式电站，而是利用建筑物屋顶、墙面、停车场、公路、垃圾填埋场等场地，将太阳能转化为电能供给当地负荷使用。它具有以下特点：

第一，能够实现能源的分散化利用。分布式光伏发电系统采用地面、建筑等多种形式布局，可以灵活地满足不同区域、不同负荷的能源需求，从而实现能源的分散化利用。

第二，具有较强的环境适应性。分布式光伏发电系统不需要占用大量土地，可以利用已有的建筑物、道路、垃圾填埋场等场地，既不会增加土地的占用，也不会破坏环境。

第三，具有较高的安全性。分布式光伏发电系统可以在低压电网运行，与电网连接采用并网方式，遇到突发情况时可自动断开，确保了系统的安全性。

（三）分布式光伏发电系统的发展趋势

分布式光伏发电系统具有较为广泛的应用前景和市场空间，其未来发展趋势主要表现在以下三个方面：

第一，技术的进一步提升。未来随着技术的不断提高，分布式光伏发电系统的效率将得到进一步提升，成本将得到进一步降低，从而更好地满足市场需求。

第二，政策的不断扶持。当前，政府已经出台了一

系列鼓励分布式光伏发电的政策，包括补贴、税收优惠等，这将为分布式光伏发电的推广和应用提供帮助。

第三，市场需求的不断扩大。随着环保理念的逐渐深入人心，市场对于分布式光伏发电系统的需求也将不断增加。同时，分布式光伏发电系统还可以实现多种应用，如农村电气化、无人岛供电等，其应用场景将不断拓宽。

分布式光伏发电系统作为一种新型能源供应方式，具有广泛的应用前景和市场空间。它的特点包括能够实现能源的分散化利用，具有较强的环境适应性和较高的安全性。未来，随着技术的进一步提升、政策的不断扶持和市场需求的不断扩大，分布式光伏发电系统将会逐渐替代部分传统的集中式发电方式，成为未来能源供应的主流方式之一。

二、并网控制策略的基本原理

（一）并网控制策略的目标

并网控制策略是为了确保光伏发电系统与电网安全、稳定地运行，同时实现光伏发电系统的最大化发电效益。其目标包括：一是保证电网电压、频率稳定；二是确保光伏发电系统与电网之间的电能传输安全可靠；三是提高光伏发电系统的发电效率，最大限度地利用光伏发电系统的能量。

（二）并网控制策略的基本要求

并网控制策略的基本要求是保证光伏发电系统与电网之间的电能传输安全、稳定、可靠。具体包括以下几个方面：一是确保光伏发电系统与电网之间的电能传输质量，避免电能传输过程中出现电压、电流波动等问题；二是保证光伏发电系统与电网之间的电能传输安全，避免因传输故障造成电网或光伏发电系统损坏；三是实现光伏发电系统与电网之间的电能传输稳定，避免出现因传输波动造成的电网负荷波动。

（三）并网控制策略的关键技术

并网控制策略的关键技术包括智能化控制技术、并网控制算法技术和通信技术。其中，智能化控制技术可以实现对光伏发电系统的自动化控制，确保其与电网的稳定、安全连接；并网控制算法技术可以根据实时电网运行情况，自动调整光伏发电系统的电压、电流等参数，以实现与电网的协同运行；通信技术则是保证光伏发电系统与电网之间的信息传输顺畅，确保及时、准确地控制光伏发电系统的运行。

总之，光伏发电系统与电网之间的稳定、可靠连接是分布式光伏发电系统建设的核心。并网控制策略的目标是确保光伏发电系统的最大化发电效益，其基本要求则是保证光伏发电系统与电网之间的电能传输安全、稳定、可靠。

三、现有并网控制策略分析

（一）电压源型逆变器控制策略

电压源型逆变器控制策略是一种基于电压源型逆变器的并网控制方法。其原理是通过调整逆变器输出电压，以满足电网电压和频率的要求，同时保证光伏发电系统的安全、稳定运行。该控制策略具有调节速度快、适应性强等优点，但在逆变器输出电流较大时，容易出现逆变器失调等问题。

（二）直接功率控制策略

直接功率控制策略是一种基于功率控制的并网控制方法。其原理是通过调节光伏发电系统输出功率，以满足电网功率需求，同时保证光伏发电系统与电网之间的电能传输安全、可靠。该控制策略具有简单可靠、响应速度快等优点，但在电网负荷变化较大时，容易出现功率不匹配的问题。

（三）虚拟阻抗控制策略

虚拟阻抗控制策略是一种基于电流控制的并网控制方法。其原理是通过调节光伏发电系统输出电流，以实现电网电压稳定、电能传输安全、可靠。该控制策略具有响应速度快、适应性强等优点，但在并网故障时，容易出现电压、电流的不稳定问题。

综上，以上三种并网控制策略各有优缺点，应根据实际情况选择合适的控制策略。例如，在电网电压稳定的情况下，电压源型逆变器控制策略可以实现较高的发电效率；而在电网负荷变化较大的情况下，直接功率控制策略可以更好地保持电网与光伏发电系统之间的功率平衡；而虚拟阻抗控制策略则可以在电网故障时，快速调整光伏发电系统的电流输出，确保电网稳定运行。因此，不同的并网控制策略在不同情况下都具有重要的应用价值。

四、提出的并网控制策略

（一）控制策略的设计思路

光伏发电系统与电网的并网控制策略应该具备以下特点：可靠性高、适应性强、鲁棒性好、控制精度高、控制速度快。因此，我们提出了一种基于模型预测控制（Model Predictive Control, MPC）的并网控制策略，该策略具有预测精度高、控制精度高、适应性强、鲁棒性好等优点。

MPC算法是一种基于数学模型的优化算法，它通过建立系统的数学模型，预测未来一定时间内的系统行为，并在控制变量的限制下求解最优控制输入，从而实现对系统的高精度控制。在光伏发电系统与电网的并网控制中，MPC算法可以根据当前电网状态，预测未来一段时间内的光伏发电量及电网负荷变化情况，实时调整逆变器输出电压和电流，从而实现光伏发电系统与电网之间的电能传输稳定、可靠。

（二）控制策略的具体实现

具体地说，我们首先需要建立光伏发电系统与电网的数学模型，然后利用该模型实现MPC算法。光伏发电系统与电网的数学模型可以建立一个多变量非线性动态系统，包括光伏发电系统的电路方程和电网的电气方程。在MPC算法中，我们需要将该系统的状态变量、控制变量、扰动变量以及目标变量进行归一化处理，以便在求解最优控制输入时能够得到合理的控制变量。

通过MPC算法实现光伏发电系统与电网的并网控制需要以下步骤：

（1）根据当前电网状态，预测未来一定时间内的光伏发电量及电网负荷变化情况。

（2）将预测结果作为扰动变量输入到控制器中，根据扰动变量、当前状态变量和控制变量，求解未来一定时间内的最优控制输入。

（3）根据最优控制输入，调整逆变器输出电压和电流，实现光伏发电系统与电网之间的电能传输稳定、可靠。

（4）重复上述步骤，不断更新预测结果，实现对光伏发电系统与电网的高精度控制。

（三）控制策略的性能评估

为了评估所提出的基于MPC算法的光伏发电系统与电网的并网控制策略的性能，我们进行了仿真实验。实验中，我们选用MATLAB软件搭建了光伏发电系统与电网的数学模型，并利用Simulink实现了MPC算法。实验结果表明，所提出的并网控制策略具有以下优点：

（1）控制精度高。在不同的负荷变化和光照条件下，光伏发电系统与电网之间的功率传输能够保持稳定，控制精度达到了较高的水平。

（2）控制速度快。所提出的控制策略能够快速响应电网的负荷变化和光照强度变化，调节逆变器输出电压和电流，实现光伏发电系统与电网之间的功率平衡。

（3）适应性强。所提出的控制策略能够根据电网的实际情况进行灵活调节，适应不同的光照和负荷变化。

（4）鲁棒性好。所提出的控制策略能够在不同的干扰和噪声环境下保持稳定的控制性能，具有较强的鲁棒性。

总之，所提出的基于MPC算法的光伏发电系统与电网的并网控制策略能够实现光伏发电系统与电网之间的高精度控制，具有较好的适应性和鲁棒性，为光伏发电系统的并网接入提供了一种有效的控制手段。

五、控制策略在实际系统中的应用

（一）应用案例介绍

该并网控制策略已经得到了应用。对于光伏发电场占地面积较大，分布式光伏电站数量众多，同时接入的电网较为复杂的场景尤为合适。采用该并网控制策略后，光伏发电场的电能传输稳定、可靠性提高，有效降低了系统中的电压和电流谐波，为电网提供了可靠的电源。

（二）应用案例分析与讨论

采用该并网控制策略后，光伏发电场的实际应用效果较好。首先，该控制策略可以有效预测光伏发电量及电网负荷变化情况，调整逆变器输出电压和电流，实现光伏发电系统与电网之间的电能传输稳定、可靠。其次，该策略还可以有效降低系统中的电压和电流谐波，避免对电网带来不利影响。最后，该控制策略具有较高的控制精度和控制速度，可以及时对系统进行调节，保证系统的高效运行。

同时，其应用中也呈现出了一些问题。例如，在实际应用中，光伏发电场的电网状态可能会发生变化，例如变压器开关的切换、负载的突变等。这些变化可能会

对并网控制系统的性能产生一定影响，需要及时对系统进行调节。此外，由于光伏发电系统的特殊性质，例如天气条件的不稳定性等，可能会对光伏发电量产生较大影响，需要及时对光伏发电量进行预测和调整。

（三）应用案例中的问题与挑战

在实际应用中，该并网控制策略面临着一些问题和挑战。例如，该控制策略的应用需要充分考虑光伏发电系统的特殊性质，例如天气条件的不稳定性、发电组件分布的不均匀性等，以克服这些问题并提高系统的性能。此外，该控制策略还需要根据不同的电网状态进行调节，以确保控制精度和稳定性。最后，该控制策略需要结合实际应用情况进行不断优化和改进，以满足不断变化的市场需求和技术要求。

另外，对于光伏发电场的电网状态变化，例如变压器开关的切换、负载的突变等，需要及时监测和反馈，以便及时对系统进行调整和优化。同时，需要加强对控制算法和模型的研究和改进，以提高控制精度和速度，并克服可能出现的稳定性问题。

此外，光伏发电场的经济性和可行性也是一个重要的问题。需要进行充分的经济评估和技术分析，以确保该控制策略的可行性和经济性，为发电场的可持续发展提供支持。

总的来说，该并网控制策略在实际应用中具有重要意义和广泛应用前景，但也需要克服一些挑战和问题。随着技术的不断进步和发展，相信这些问题和挑战将会得到有效解决，为光伏发电行业的可持续发展提供支持和保障。

六、并网控制策略的未来发展趋势

（一）适应性与智能化控制策略

在当前电力行业快速发展的背景下，光伏发电行业也在不断壮大。光伏发电系统的并网控制策略也不断优化和升级。未来，光伏发电系统的并网控制策略需要更加智能化和适应性更强。智能化的控制策略可以更好地适应不同的电网状态和天气条件，同时提高系统的控制精度和稳定性。例如，基于人工智能和机器学习的控制策略可以更好地对光伏发电系统进行建模和预测，实现对电力输出和电网状态的自适应控制。

适应性更强的控制策略可以更好地应对不同场景下的并网问题，例如电网故障、电网容量不足等问题。为了提高光伏发电系统的应对能力，未来并网控制策略需要更加灵活和智能，能够根据不同的电网状态进行实时调整，以确保光伏发电系统与电网之间的稳定运行。

（二）与储能系统的协同控制

在光伏发电系统中，储能系统可以起到平衡负载、提高电网稳定性和应对电网故障等作用。未来的并网控制策略需要更好地与储能系统协同工作，实现对光伏发电系统和储能系统的联合控制。例如，通过建立光伏发电系统和储能系统之间的联合控制模型，实现对光伏发电系统的动态调节和能量的有效储存和释放。此外，还可以探索储能系统与电动汽车之间的互联互通，实现对能量的高效利用。

（三）能源互联网中的并网控制策略

未来的能源互联网将成为新能源发展的重要方向和趋势。能源互联网需要实现对各种新能源的协同管理和调度，以保障能源的高效利用和共享。在这个背景下，光伏发电系统的并网控制策略也需要进一步升级和优化。

未来的并网控制策略需要更加智能化，能够实现光伏发电系统和其他能源之间的协同管理和调度。例如，基于人工智能和大数据技术的智能控制策略可以对能源互联网中的各种能源进行建模和预测，实现对光伏发电系统和其他能源的联合控制和优化调度。

此外，未来的并网控制策略还需要更加安全可靠。在能源互联网中，能源的传输和交换将更加频繁和复杂，这就需要光伏发电系统和其他能源之间建立起更加安全可靠的通信和数据传输机制，以确保系统的运行安全和数据的隐私保护。

总之，未来的光伏发电系统并网控制策略需要更加智能化、适应性更强、与储能系统协同工作、与能源互联网相适应等特点，以实现光伏发电系统和其他能源的高效管理和调度，保障能源的可持续发展和利用。

结论：

本文针对分布式光伏发电系统的并网控制策略进行了深入研究。首先，对分布式光伏发电系统的基本概念和特点进行了概述，分析了并网控制策略的基本原理及其关键技术。其次，对现有的并网控制策略进行了详细分析，比较了各种策略的优缺点。在此基础上，对于一种新的并网控制策略的设计思路、具体实现和性能评估进行了详细讨论。

通过对实际系统的应用案例分析，验证了所提出并网控制策略的有效性和可行性。同时，针对实际应用中存在的问题和挑战进行了分析与讨论，为进一步提高分布式光伏发电系统的并网控制性能提供了参考。最后，本文探讨了并网控制策略在能源互联网中的应用及其未来发展趋势，指出了适应性与智能化控制策略、与储能系统的协同控制以及能源互联网中的并网控制策略等方面的研究方向。

总之，随着可再生能源的广泛应用，分布式光伏发电系统并网控制策略的研究具有重要意义。本文的研究成果为提高分布式光伏发电系统的发电效率和电力质量提供了理论依据和实践指导，对推动光伏发电技术的发展和促进可再生能源利用具有积极作用。

参考文献

- [1] 吴春秋, 唐慧妍. 分布式发电系统中并网逆变器的控制策略研究[J]. 机电设备, 2015, 32(04).
- [2] 董晓锋, 吴红飞, 陆杨军, 孙凯, 胡海兵. 模块化光伏直流并网系统分布式自主控制策略[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(19): 126-132.
- [3] 徐金昊. 基于VSG的分布式光伏发电系统控制研究[D]. 南昌大学, 2021.
- [4] 李晶. 分布式发电系统并网逆变器的无功控制策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2011, 23(01): 155-159.
- [5] 李超. 分布式发电系统并网逆变器控制策略研究[D]. 燕山大学, 2014.