

分布式光伏发电系统中的并网控制技术分析

左焱 苗连清

上海宝冶集团有限公司, 上海 201900

[摘要] 分布式光伏发电具备清洁、高效且能够就近利用等诸多特点, 已然成为可再生能源领域当中极为重要的一部分。本篇文章着重围绕分布式光伏系统的并网控制技术来展开相应的分析工作, 较为详尽地阐述了逆变器控制原理、最大功率点追踪(MPPT)、电压电流功率控制以及并网保护与电能质量管理等一系列核心技术, 并且还深入探讨了电流型、电压型、双闭环控制策略、虚拟同步发电机(VSG)以及微网协调控制在实际应用当中的具体实践情况。还对智能控制、多能互补、储能协同以及人工智能优化在未来的发展过程当中所具有的应用前景进行了展望。通过相关研究可以发现, 较为完善的并网控制策略能够有效提升系统的发电效率、电能质量以及电网适应能力, 进而为实现高比例光伏接入以及智能微网建设给予相应的技术支持。

[关键词] 分布式; 光伏并网; 发电系统; 智能控制

DOI: 10.33142/aem.v7i7.17387

中图分类号: TM615

文献标识码: A

Analysis of Grid Control Technology in Distributed Photovoltaic Power Generation System

ZUO Yan, MIAO Lianqing

Shanghai Baoye Group Co., Ltd., Shanghai, 201900, China

Abstract: Distributed photovoltaic power generation has many characteristics such as cleanliness, efficiency, and nearby utilization, and has become an extremely important part of the renewable energy field. This article focuses on the analysis of grid control technology for distributed photovoltaic systems, elaborating in detail on a series of core technologies such as inverter control principles, maximum power point tracking (MPPT), voltage and current power control, grid protection, and power quality management. It also explores in depth the specific practical applications of current type, voltage type, dual closed-loop control strategies, virtual synchronous generators (VSG), and microgrid coordinated control. We also looked forward to the application prospects of intelligent control, multi energy complementarity, energy storage collaboration, and artificial intelligence optimization in the future development process. Through relevant research, it can be found that a relatively complete grid control strategy can effectively improve the system's power generation efficiency, power quality, and grid adaptability, which providing corresponding technical support for achieving high proportion photovoltaic access and intelligent microgrid construction.

Keywords: distributed; photovoltaic grid connection; power generation system; intelligent control

引言

随着能源结构不断转型以及可再生能源需求持续增长, 光伏发电凭借自身清洁、高效以及分布式等特性, 获得了广泛的关注。分布式光伏系统借助于在用户侧或者配电网附近去建设光伏组件, 进而达成就地发电以及消纳的目的, 如此一来便能够减轻电网所承受的压力, 并且还能降低能耗。不过, 它的输出功率很容易受到光照以及温度波动的影响, 这就对并网稳定性以及电能质量提出了较高的要求。高效的并网控制技术对于保障系统的安全、优化发电效率以及实现高比例接入而言, 是极为关键的。本文着重围绕分布式光伏并网控制技术展开, 对其核心控制原理、策略应用以及发展趋势加以分析, 希望能为系统的设计与运行优化给予理论以及技术方面的有力支持, 同时推动智能微网以及多能协同的应用发展进程。

1 分布式光伏发电系统概述

所谓的分布式光伏发电就是充分利用该地区的太阳

能资源来减少和代替对化石能源的使用消费, 主要是在用户场地附近建设可以与配电系统平衡调节的光伏发电设施。分布式光伏发电必须要遵循因地制宜、清洁高效、就近利用的原则来提升光伏发电并网运行的可靠性与安全性。光伏发电是一种新型的并且具有广阔发展前景的能源综合利用方式, 它的广泛应用节省了能源成本, 避免了能源浪费。分布式光伏系统一般是由光伏组件、逆变器以及并网控制装置等诸多部分构成的, 各个部分要协同开展工作, 如此才能确保能够稳定地进行供电。该系统的并网特性跟电能质量有着直接的关联, 同时也与系统运行的安全性紧密相关, 所以其在系统设计以及运行方面都属于极为重要的考量因素。

2 并网控制技术基础

2.1 并网逆变器控制原理

在分布式光伏发电这一系统当中, 逆变器属于极为关键的核心组件, 它肩负着把光伏所产生的直流电能转变成

符合电网规定标准的交流电能这样一项十分重要的任务。并网逆变器在实际运作过程中,一方面要完成电能的转换工作,另一方面还得达成与电网的同步控制目标,进而切实保障电压、频率以及相位能够维持在稳定的状况。其控制所依据的原理往往是电压型或者电流型的相关策略,借助闭环反馈的机制来对输出的功率以及电流波形展开实时的调节操作,以此确保系统即便面临负载出现波动又或者是环境产生变化的情况,依旧可以保持稳定的运行状态。逆变器内部所配备的控制器一般会集成数字信号处理器或者微处理器,具备对光伏组件所输出的电压、电流还有温度实施实时监测的能力,并且依照预先设定好的算法来开展功率调节方面的相关工作。与此逆变器还必须要满足电网并网方面的标准,像是 IEEE 1547 或者相关的国家标准,针对短路、过压、低电压穿越以及谐波抑制等情况给予可靠的保障措施,最终确保分布式光伏发电系统拥有良好的安全性以及优质的电能质量。

2.2 最大功率点追踪 (MPPT) 技术

最大功率点追踪 (MPPT) 技术在光伏发电系统里属于提高能量利用率的关键核心技术,它的作用是在不一样的光照状况以及温度环境之下,让光伏组件能够处于最大功率输出的那种工作状态。MPPT 算法会实时对光伏组件的输出电压还有电流加以监测,并且去计算瞬时功率,进而动态地对工作点做出调整,以此达成能量的最优化转换。常用的 MPPT 算法有扰动观察法、增量电导法以及恒压法等等,每一种算法在跟踪速度、稳定性以及效率方面都有着各自的特点。扰动观察法是凭借微小地调整电压或者电流并且观察功率的变化情况来寻找最大功率点的,这种方法虽然算法较为简单,但是当处在光照快速变化的条件下时就有可能会出现跟踪误差的情况;增量电导法则会通过测量功率随着电压的导数变化情况来确定最佳的工作点,其响应的速度是比较快的,并且稳定性也比较高;恒压法是通过把光伏组件的输出电压固定在额定比例点的方式来进行操作的,虽说这种方式简单且容易实现,然而在动态的条件之下其效率就会比较低一些。MPPT 技术的有效实现对于整个分布式光伏系统的发电效率以及经济性有着直接的影响,它还是光伏并网控制技术当中极为重要的基础所在。

2.3 电压、电流及功率控制策略

在光伏并网系统里面,电压、电流还有功率控制策略的设计,跟系统运行的稳定性以及电能质量是紧密关联的。电压控制主要是为了维持并网点电压处于规定的范围之内,是通过去调节逆变器输出的电压或者功率因数,进而达成电压支撑以及无功功率管理的目的;电流控制是用来对逆变器输出电流加以约束的,防止出现过流以及短路等状况,与此同时还能对动态响应能力予以优化,保证系统在负载发生快速变化的时候可以安全且稳定地运行起来。功率控制策略是综合着去考量有功功率以及无功功率的

输出情况,以此来实现系统和电网之间的功率平衡,并且还能够助力分布式光伏的主动调节以及电能质量的改善工作。这些控制策略往往是借助闭环控制、前馈补偿以及实时监测相结合的方式去达成的,而且还要依靠高精度传感器以及高速数字控制器所提供的支持,这样才能在环境条件存在变动、负荷发生变化以及电网出现波动的情况下,让系统保持住稳定性并且实现高效运行的状态。

2.4 并网保护与电能质量要求

并网保护技术在分布式光伏发电系统安全运行方面起着极为关键的作用,其主要目的在于能够及时察觉到异常运行的状态并且予以隔离,进而避免给电网以及相关设备带来损害。该技术所包含的主要保护举措涵盖了过流保护、过压保护、欠压保护、过频与欠频保护以及防孤岛保护等诸多方面,当故障出现的时候,这些保护措施可快速地将逆变器输出切断,达成安全隔离的效果。除此之外,光伏并网系统的电能质量同样是设计以及控制环节里的重要衡量指标,具体涉及电压的波动情况、谐波状况、电压闪变以及无功功率管理等方面。随着分布式光伏接入电网的比例不断增多,电能质量问题变得愈发凸显出来,这就要求逆变器以及控制系统要具备动态调节的能力,借助实时监测以及智能控制的相关手段来降低谐波,提升电压的稳定性,以此确保系统的安全性以及电网能够可靠地运行。从整体上来看,并网保护以及电能质量管理构成了分布式光伏系统技术体系里的基础环节,对于后续的控制策略以及应用有着直接的支撑作用。

3 分布式光伏并网控制策略与应用

3.1 电流型、电压型及双闭环控制策略

在分布式光伏发电系统当中,电流型、电压型还有双闭环控制策略属于实现并网稳定性以及电能质量优化的关键办法。电流型控制策略借助实时调节逆变器所输出的电流这一方式,达成系统和电网的快速同步,而且还能有效对电流波动以及谐波干扰加以抑制,提升系统的动态响应能力,特别适合电网电压变化较为频繁的那种场景。电压型控制策略着重于维持并网点电压处于稳定状态,凭借调节逆变器输出电压或者控制功率因数的操作,实现对电网电压的有力支撑,在负荷出现波动或者电网遭受扰动的时候,能够保障光伏系统的安全运行。双闭环控制策略把电流闭环以及电压闭环各自的优势都结合起来,形成了外环电压控制和内环电流控制相互协同的机制,如此一来,既能确保系统电压稳定,又能对电流响应予以优化,可以在不同的运行条件之下实现高效且稳定的并网运行。这三种控制策略的具体选择以及优化往往需要综合考量系统规模、光伏组件特性以及电网接入条件等情况,通过仿真以及实验验证的方式去达成最佳的控制效果。

3.2 虚拟同步发电机 (VSG) 与微网协调控制

随着分布式光伏接入比例不断上升,传统光伏系统因

缺少旋转惯量,常致使电网频率出现波动且电压不够稳定。虚拟同步发电机(VSG)技术可模拟同步发电机的惯性特性以及阻尼特性,让光伏逆变器拥有“惯性响应”,进而强化系统频率调节的能力以及短路支撑的能力。VSG能凭借电压与功率反馈达成主动调节,使得光伏系统在电网受到扰动时呈现出类似常规发电机的动态特性,大幅改善微网以及弱电网的稳定性。微网协调控制是在多源分布式能源系统当中,借助集中或者分布式控制的方式,实现光伏、储能、负载以及其他可再生能源的协同运行。协调控制策略不但能够优化功率分配,提高能源利用效率,而且还能在孤岛运行或者电网发生故障时,通过智能切换与调度维持供电的连续性,为微网的稳定运行给予可靠保障。VSG与微网协调控制技术相结合,是现代分布式光伏系统提升并网性能以及电网适应性的关键途径。

4 并网控制技术发展趋势与展望

4.1 智能控制与数字化控制技术

随着分布式光伏发电系统规模不断变大,接入比例也在提高,传统的控制办法慢慢没办法满足系统对于实时响应、精确调节以及多节点协同等方面的需求了。智能控制在其中起到了关键作用,它引入像自适应控制、模糊控制还有预测控制这类先进的算法,让逆变器可以依据环境的变化、负荷的波动以及电网的状态来自动去优化自身的运行策略,进而达成最大程度的发电效率以及稳定性^[1]。数字化控制技术就凭借高速数字信号处理器、工业控制总线以及物联网技术,针对光伏组件、逆变器还有储能设备展开全面且细致的监测,并且能够进行远程调控,以此实现由数据所驱动的运行优化效果。借助数字化以及智能化控制手段,系统一方面能够实时对大规模的数据加以处理,另一方面能够提高控制的精度,而且还能实现设备故障的预测、能耗的优化以及电网协同调度等功能,大幅度提升了分布式光伏并网系统的运行效率以及可靠性,给高比例接入电网的情况提供了相应的技术保障。

4.2 多能互补与储能系统协同控制

多能互补与储能系统的协同控制,乃是提升分布式光伏发电系统稳定性以及可调度性的一条极为关键的技术路径。在实际的运行过程当中,光伏发电呈现出受天气状况以及光照条件所影响的波动特性。此时,储能系统便可以在发电出现不足或者负荷处于高峰时段的时候,给予能量方面的补充,进而达成功率率的平滑处理以及对电压的有力支撑^[2]。与此把风能、燃料电池等其他种类的可再生能源纳入进来,实施协同控制操作,如此一来便能够在多能互补这样一种有利条件下,对能源配置予以优化,进一步提升整个系统的利用率以及安全性。协同控制所涉及策略,一般包含有功率的优化调度、充放电策略的管理、储能容量的优化,还有多源能量的预测等相关内容。借助于

实时的监控手段以及算法的调节方式,促使系统能够在复杂的电网条件之下,实现动态的稳定运行状态。这样的技术,不但能够对电网波动起到一定的缓解作用,还能提高分布式光伏系统对于各种情况的适应能力,并且还给建设智能微网以及高比例可再生能源电网给出了可供遵循的可行方案。

4.3 基于人工智能的优化控制方法

人工智能技术在分布式光伏并网控制方面的应用变得越来越普遍,已然成为提升系统智能化程度的关键手段。借助机器学习、深度学习还有强化学习等算法,控制系统可针对光伏发电输出状况、环境变化情况以及电网实际状态展开建模与预测工作,进而达成最优运行策略的动态调节效果^[3]。人工智能控制办法不但能够对最大功率点跟踪、逆变器输出以及功率分配加以优化,而且还能应用于故障检测与诊断环节、能效评估方面以及长期运行优化事宜当中。凭借数据驱动的智能控制方式,分布式光伏系统于复杂且动态的运行环境里能够实现自适应调节,如此一来便提高了发电效率、增强了稳定性并且提升了电能质量。与此人工智能方法的引入还给多系统协同调控、微网优化调度以及储能策略智能化赋予了技术方面的有力支撑,使得光伏发电系统的灵活性以及可靠性都得到了明显的增强。

5 结语

分布式光伏发电属于清洁能源当中的重要组成部分,其并网控制技术对于保障系统能够高效且安全地运行而言是极为关键的。本文从系统概述、控制基础、控制策略以及发展趋势这四个方面来剖析核心技术,这些核心技术涵盖了逆变器控制、MPPT(最大功率点跟踪)、电压电流功率调节、保护与电能质量管理等方面,同时也涉及到电流型控制、双闭环控制以及虚拟同步发电机微网协调的应用情况。展望未来的发展趋势,智能化控制、多能互补、储能协同以及人工智能优化将会成为技术发展的重点所在,以此来为提升系统的稳定性、电能的质量以及电网的适应性给予有力的支撑,进而推动分布式光伏在能源转型的过程当中能够发挥出更大的作用,最终实现清洁、高效并且可持续的能源供应目标。

[参考文献]

- [1]叶犇,沈宇辉.分布式光伏发电系统中的并网控制技术分析[J].集成电路应用,2025,42(5):346-347.
 - [2]陈淑媛.分布式光伏并网发电系统的控制技术分析[J].电子技术,2024,53(11):352-353.
 - [3]高标.分布式光伏并网发电系统控制技术分析[J].电气技术与经济,2023(6):138-140.
- 作者简介:左焱,毕业院校:马鞍山职业技术学院-机电一体化(全日制),哈尔滨工业大学-工程管理(继续教育),当前就职单位:上海宝冶集团有限公司,职务:事业部助理,职称:电气工程师。