

电气工程中分布式发电系统的并网技术研究

陆新

广西兆泰送变电工程集团有限公司, 广西 柳州 545000

摘要： 本文针对分布式发电系统及其并网技术进行了深入研究。本研究起始阶段，综合阐述了分布式发电系统的基本概念、分类、优势与局限性以及关键技术，为后续深入探讨打下了坚实的理论基础。继而，本文详尽地阐述了分布式发电系统的并网技术，涵盖了技术概览、工作原理、关键参数解析以及控制策略，为可再生能源的电网接入提供了理论依据。最终，本研究对分布式发电系统并网运行的稳定性进行了深入分析，考察了影响系统稳定性的因素、分析手段、改善措施以及其与并网技术的相互作用，为电力系统稳定性的维护提供了宝贵的参考依据。本文的研究成果对于推动分布式发电系统在我国电力系统中的应用和发展具有重要意义。

关键词： 分布式发电系统；并网技术；稳定性分析；保护技术；控制策略

Research on Grid-Connected Technology of Distributed Generation Systems in Electrical Engineering

Lu Xin

Guangxi Zhaotai Transmission and Distribution Engineering Group Co., Ltd. Liuzhou, Guangxi 545000

Abstract： This paper conducts an in-depth study on distributed generation systems and their grid-connected technologies. In the initial stage of the research, the basic concepts, classifications, advantages, limitations, and key technologies of distributed generation systems are comprehensively elaborated, laying a solid theoretical foundation for further exploration. Subsequently, this paper detailedly expounds on the grid-connected technology of distributed generation systems, covering technology overview, working principles, key parameter analysis, and control strategies, providing a theoretical basis for the grid integration of renewable energy. Finally, this study conducts an in-depth analysis of the stability of distributed generation systems during grid-connected operation, examining the factors that affect system stability, analysis methods, improvement measures, and their interaction with grid-connected technologies, providing valuable reference for maintaining the stability of power systems. The research results of this paper are of great significance for promoting the application and development of distributed generation systems in China's power system.

Keywords： distributed generation systems; grid-connected technology; stability analysis; protection technology; control strategies

引言

随着全球能源需求的不断增长和环境问题的日益严重，分布式发电系统作为一种清洁、高效的能源利用方式，受到了广泛关注。分布式发电系统是指分布在用户端的中小型电源，主要包括太阳能、风能、燃料电池等可再生能源和微型燃气轮机等传统电源。并网技术作为分布式发电系统的重要组成部分，使其能够顺利接入电网，实现能量的有效利用。本文针对电气工程中分布式发电系统的并网技术进行研究，探讨并网技术原理、运行稳定性及保护措施，以期为我国分布式发电系统的发展提供理论支持。

一、分布式发电系统概述

随着能源需求的多样化以及对环境保护的日益重视，分布式发电系统作为一种新型的电力供应模式，逐渐成为电力行业的重要组成部分。本章节旨在为读者提供一个关于分布式发电系统的全面了解，包括其定义、分类、优缺点以及关键技术。

(一) 分布式发电系统的定义与分类

分布式发电区别于常规发电系统中所使用的依赖互联网网络所进行远距离电能传输的集中发电模式，在分布式发电新模式下，电能可以以模块化的方式进行负荷分布与输送，且输送通路内的单位功率数值表现可以实现由数十兆瓦到数十千瓦范围内的跨度，无疑是一种更适用于现代电力发展稳定性与快节奏要求的

发电形式，兼具环保效益与经济成效^[1]。这种系统不同于传统的集中式发电，它更加灵活、高效，能够满足不断变化的电力需求，提高能源利用效率，降低能源损耗。分布式发电系统的分类涵盖了多种能源形式和技术路线，包括可再生能源发电和不可再生能源发电，以及光伏、风力、燃料电池、微型燃气轮机等多种发电技术。

（二）分布式发电系统的优缺点

在深入分析分布式发电系统的优势与局限之际，显而易见，该系统的优势颇为突出。分布式发电系统具备高度灵活性和可靠性，能够敏捷地对电力需求变动做出反应，从而显著提升电网的稳定性和抗干扰能力^[2]。同时，该系统能够实现能源的本地化利用，大幅降低长距离电力传输的损耗，有效提升能源利用的整体效率。再次，它有助于减少温室气体排放，促进绿色低碳发展，符合全球能源转型和环境保护的要求。然而，分布式发电系统也存在一些缺点，如初期投资成本较高、对电网运行和管理带来一定挑战、发电效率受天气和环境因素影响等。

（三）分布式发电系统的关键技术

分布式发电系统的关键技术包括多种类型，如光伏发电技术、风力发电技术、燃料电池技术、微型燃气轮机技术以及储能技术等。这些技术的研究和突破，对于推动分布式发电系统的发展具有重要意义。光伏发电技术依赖于太阳能电池板的效率提升和成本的降低；风力发电技术则需要不断提高风力发电机的性能和可靠性；燃料电池技术关键在于提高燃料电池的寿命和降低成本；微型燃气轮机技术追求更高的热效率和更低的排放；储能技术则致力于提高储能密度、降低成本和延长使用寿命^[3]。这些关键技术的创新和发展，将为分布式发电系统在未来的广泛应用奠定坚实基础。

二、分布式发电系统并网技术

分布式发电系统的并网技术是实现其与电网无缝连接的核心，对于提高能源利用效率和电力系统稳定性具有重要意义。以下内容将深入探讨分布式发电系统的并网技术，包括其概述、原理、主要参数分析以及控制策略，以期为分布式发电系统的广泛应用提供技术支撑。

（一）并网技术概述

并网技术构成了分布式发电系统的核心要素，其涉及的概述、工作原理、关键参数解析以及控制策略构成了对该技术深入理解和有效应用的基础。该技术详尽地描述了分布式发电系统与电网接口的复杂操作流程及具体技术方法，确保了可再生能源发电装置能够以高效率 and 稳定性向电网注入电能，从而保障了电网运行的安全性和可靠性^[4]。此外，并网技术的设计和应用，不仅促进了能源的高效利用，还强化了电网结构的灵活性和抗扰动能力，为构建可持续发展的现代能源体系提供了坚实的技术支撑。

（二）并网技术原理

并网技术的理论基础跨越了电力电子学、自动控制学以及通信技术等多个专业领域。其核心在于利用电力电子转换器件，尤

其是逆变器，实现分布式发电系统所生产的直流电或交流电向与电网同频同相的交流电的转换。这一过程涵盖了电压幅值、频率、相位角以及电流波形等关键参数的精确控制，旨在确保并网电能的品质满足电网的严格规范^[5]。此外，并网技术的运作原理还包括对电网状态的连续实时监测，这样，当电网的运行参数发生任何变动时，分布式发电系统都能即时响应，调整其电力输出，从而维持与电网的同步运行状态。这种技术的应用，不仅要求高度的技术集成和创新，而且对于提升电网的动态稳定性和电能质量具有重要意义。

（三）并网技术主要参数分析

在深入探讨并网技术的主要参数时，一系列关键指标成为评价标准，包括电压稳定性、频率一致性、相位同步性、功率因数以及谐波含量等核心要素。电压和频率的稳定性构成了并网操作的基本前提，任何对标准参数的偏差都有可能对电网的稳定性和安全性造成不利影响。相位的精确同步是实现电能高效传输的关键，它确保了电能从生成端到消费端的顺畅流动。功率因数则直接体现了电能利用的效率，其高低直接关系到能源的浪费与否^[6]。此外，谐波含量作为评估并网电能质量的重要参数，其水平的高低直接关系到电网的清洁程度，谐波含量过高不仅会导致电网污染，还可能对电网中的其他用电设备造成功能性干扰或损害，从而影响整个电力系统的正常运行。因此，对这些参数的精确控制和优化是确保并网技术高效、安全运作的关键所在。

（四）并网技术控制策略

并网技术控制策略的研究和应用，是实现分布式发电系统高效、稳定并网的关键。这些策略包括电网同步控制、最大功率点跟踪（MPPT）、孤岛检测、故障穿越以及电网支持服务等。电网同步控制策略确保了分布式发电系统在并网时的电压、频率和相位与电网保持一致；MPPT策略则最大化了可再生能源的利用效率，提高了发电量；孤岛检测策略是为了防止电网断电时，分布式发电系统继续供电而造成安全隐患；故障穿越策略使得分布式发电系统在电网发生故障时能够保持稳定运行，减少对电网的冲击；电网支持服务则是在电网需要时，分布式发电系统能够提供必要的辅助服务，如电压和频率支持。

三、分布式发电系统并网运行稳定性分析

分布式发电系统的并网运行稳定性是保障电网安全、可靠运行的关键因素。本章将深入探讨影响系统稳定性的各种因素，分析稳定性评价的方法，提出提升系统稳定性的措施，并探讨稳定性与并网技术之间的内在联系。

（一）系统稳定性影响因素

系统稳定性是电力系统运行的首要考量，其重要性体现在保障电网的安全性、可靠性和运行效率上^[7]。在分布式发电系统中，稳定性受制于一系列复杂且多元的因素，这些因素遍及电力系统的各个层面和环节。具体而言，在发电侧，分布式电源的输出特性、控制策略及其对系统故障的响应能力是影响稳定性的关键要素。这些电源的动态行为和调节能力直接决定了系统在面对

负荷变动或电网扰动时的稳定程度。

在负载侧，负荷的波动性、非线性负载的特性以及负荷率的变化对系统稳定性构成了显著影响。负荷的不稳定性和非线性特征可能导致电网电压和频率的波动，进而影响电力系统的正常运行。此外，输电线路的电气参数、电网的拓扑结构、保护装置的性能同样在系统稳定性中扮演着重要角色。这些技术参数和配置的优化对于维持电力系统的稳定运行至关重要。

除此之外，外部环境因素也不容忽视，包括温度、湿度、自然灾害等，它们可能对发电设备、输电线路和电网基础设施造成影响，从而间接影响系统的稳定性^[9]。综合来看，确保分布式发电系统稳定性需要一个全方位、多层次的分析和控制策略，以应对这些错综复杂的因素，确保电力系统的持续、稳定和高效运行。

（二）稳定性分析方法

稳定性分析方法为深入探究和准确评估电力系统的稳定性提供了坚实的理论基础和技术支持。这些方法涵盖了不同的技术路线，旨在全面揭示系统在不同工况下的稳定性能。其中，三种主要的分析手段包括时域仿真法、频域分析法和 小信号分析法。

时域仿真法通过精确模拟电力系统在时间域内的动态行为，为研究者提供了一种直观且全面的视角来观察系统的稳定性变化。这种方法能够详细捕捉系统在遭受各种扰动时的瞬时响应和长期趋势，从而有效地识别可能导致系统失稳的关键因素。

频域分析法则侧重于对电力系统的频率特性进行深入分析。通过运用伯德图、奈奎斯特图等经典工具，该方法能够定量评估系统在特定频率范围内的稳定度，揭示系统对于不同频率扰动的敏感程度，进而为系统设计和优化提供重要参考^[9]。

小信号分析法则通过将电力系统模型线性化，专注于研究系统在微小扰动下的动态响应。这种方法能够精确地确定系统的稳定边界，即系统保持稳定的最大扰动范围，为系统稳定性的分析和控制提供关键的理论依据。

（三）稳定性提升措施

为了显著增强电力系统的稳定性，实施了一系列综合性的措施。在技术层面上，通过精细化调整系统参数、提升关键设备的

性能指标以及增强控制策略的鲁棒性，实现了系统稳定性的提升。具体而言，采纳高性能电力电子器件和尖端的控制算法，能够确保系统对各类扰动做出迅速而有效地响应，从而保障系统的平稳运行^[10]。在管理层面上，加强电网的实时监控、实施有效的负荷管理策略以及制定详尽的应急预案，均为提高系统稳定性提供了坚实的支撑。此外，通过改善电网的物理结构，包括增设输电线路、优化网络布局以及采用灵活交流输电技术等手段，进一步增强了电力系统的稳定性和抗干扰能力。这些措施的综合运用，不仅提高了电力系统的运行效率，还确保了供电的连续性和可靠性，为构建更加坚强、智能的电力网络奠定了基础。

（四）稳定性与并网技术的关系

稳定性与并网技术的关系密切，并网技术的优劣直接影响到系统的稳定性。一方面，并网技术需要确保分布式发电系统在并网时不会对电网造成冲击，这要求并网设备具有很好的同步能力和故障穿越能力。另一方面，并网技术应根据电网状态调整分布式发电系统的输出，以支持电网的稳定运行。例如，在电网负荷高峰期，分布式发电系统可以提供额外的电力支持；在电网故障时，通过适当的控制策略，分布式发电系统可以帮助电网恢复正常运行。因此，并网技术的发展和应用的提升是提升分布式发电系统稳定性，进而保障整个电网稳定性的关键。

四、结束语

本研究揭示，分布式发电系统的并网技术是实现可再生能源高效转换的核心，对于增强电力系统的运行稳定性及确保电力供应的安全可靠具有深远影响。然而，分布式发电系统并网技术仍面临诸多挑战，如稳定性、保护技术及控制策略等方面。未来，我国应继续加大对分布式发电系统并网技术的研究力度，推动政策制定和完善，以促进分布式发电系统在电力系统中的广泛应用，为我国能源结构优化和可持续发展贡献力量。总之，本文的研究成果为分布式发电系统并网技术的发展提供了理论支持，具有一定的参考价值。

参考文献

- [1] 匡超, 陈悦. 分布式发电与配电网保护协调性研究 [J]. 现代工业经济和信息化, 2023, 13(03): 241-242+245. DOI: 10.16525/j.cnki.14-1362/n.2023.03.090.
- [2] 陈思宇, 张兴, 巫宇航, 等. 基于 CCIs/VSGs 混合的分布式发电系统研究 [J]. 电力电子技术, 2023, 57(02): 73-76.
- [3] 韩志华, 刘秦. 分布式光伏发电系统电气设计分析 [J]. 光源与照明, 2023, (01): 133-135.
- [4] 李卓言, 段丽平, 李少华, 等. 基于 AspenPlus 的兆瓦级燃料电池分布式发电系统建模及仿真分析 [J]. 南方能源建设, 2022, 9(04): 78-86. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.04.010.
- [5] 葛晓东. 分布式发电对配电网继电保护的影响分析 [J]. 集成电路应用, 2022, 39(12): 246-247. DOI: 10.19339/j.issn.1674-2583.2022.12.112.
- [6] 许戴林. 分布式发电对配电网继电保护自动化系统的影响 [J]. 集成电路应用, 2022, 39(10): 222-223. DOI: 10.19339/j.issn.1674-2583.2022.10.100.
- [7] 李安乐, 易志刚, 彭星. 基于模型预测控制的厨余垃圾处理厂分布式发电系统优化调度 [J]. 湖南电力, 2022, 42(04): 75-80.
- [8] 董顺超. 分布式发电系统中多元混合储能优化配置研究 [D]. 哈尔滨工业大学, 2022. DOI: 10.27061/d.cnki.ghgdu.2022.004083.
- [9] 陈家浩. 基于区块链的分布式发电微网系统数据安全存储机制研究 [D]. 福建工程学院, 2022. DOI: 10.27865/d.cnki.gfgxy.2022.000072.
- [10] 张珍奇, 王文革. 分布式光伏发电系统在微电网中的应用 [J]. 光源与照明, 2022, (05): 113-115.