

光伏电站并网接入中的电网稳定性分析与控制研究

杨成财

西藏开投吉昌光伏能源有限公司，西藏 昌都 854000

摘要：随着光伏发电技术的快速发展，光伏电站作为清洁能源的重要来源，逐渐在电网中得到广泛应用。然而，光伏电站的大规模并网接入也带来了电网稳定性方面的挑战。本文旨在深入分析光伏电站对电网稳定性的影响，并提出相应的分析与控制策略。首先，介绍了光伏电站的工作原理、组成部分，以及对电网影响的主要因素。其次，阐述了电网稳定性的概念，包括频率稳定性和电压稳定性等内容。针对光伏电站并网可能引起的问题，如短时功率波动、电压波动等，进行了详细的影响机制探讨。接着，探讨了用于分析电网稳定性的方法，包括功率流分析、频率响应分析和电压稳定性分析，以评估光伏电站接入后的影响。在光伏电站并网控制策略方面，论述了基于气象预测和实时监测的预测与响应策略，以及调节光伏电站输出功率、功率因数等来维持电网电压和频率稳定的方法。此外，还探讨了储能系统在光伏电站并网中的应用，如削峰填谷和频率调节等。通过本文的研究，有望为光伏电站的安全高效并网提供有益的参考和指导。

关键词：光伏电站；电网稳定性；功率流分析；频率响应分析；电压稳定性分析

Study on the stability analysis and control of the power grid in the grid-connected connection of the photovoltaic power station

Yang Chengcai

Xizang Kaitou Jichang Photovoltaic Energy Co., LTD, Tibet, Changdu 854000

Abstract : With the rapid development of photovoltaic power generation technology, photovoltaic power stations as an important source of clean energy have gradually been widely used in the power grid. However, the large-scale grid connection of photovoltaic power stations also brings challenges in grid stability. This paper aims to analyze the influence of photovoltaic power station on the stability of power grid and put forward the corresponding analysis and control strategies. First, the working principle and components of the photovoltaic power station and the main factors affecting the power grid are introduced. Secondly, the concept of grid stability, including frequency stability and voltage stability. Focusing on the possible problems caused by grid connection of photovoltaic power stations, such as short-term power fluctuation, voltage fluctuation, the influence mechanism is discussed in detail. Then, the methods used to analyze the stability of the power grid is discussed, including power flow analysis, frequency response analysis, and voltage stability analysis to evaluate the impact of photovoltaic power stations after access. In terms of grid-connected control strategy of photovoltaic power station, the prediction and response strategy based on meteorological prediction and real-time monitoring are discussed, as well as the methods of adjusting the output power and power factor of photovoltaic power station to maintain the stability of power grid voltage and frequency of photovoltaic power station. In addition, it discusses the application of energy storage system in grid connected photovoltaic power station, such as peak shifting and valley filling and frequency regulation. Through the research of this paper, it is expected to provide useful reference and guidance for the safe and efficient grid connection of photovoltaic power stations.

Key words : photovoltaic power station; power grid stability; power flow analysis; frequency response analysis; voltage stability analysis

一、引言

随着能源需求的增长和环境问题的凸显，清洁能源的开发和利用愈发受到重视。光伏发电作为一种可再生的绿色能源，具有不污染、不排放等优势，逐渐成为能源领域的热点之一。光伏电站作为光伏发电系统的核心组成部分，其并网接入电网，不仅可

以为电网提供绿色能源，还可以有效降低化石燃料的使用。然而，由于光伏电站的间断性和波动性，其接入可能对电网的稳定性产生影响，如电压波动、频率偏差等。因此，光伏电站并网接入中的电网稳定性问题亟待深入研究和解决。本文将重点分析光伏电站对电网稳定性的影响，探讨电网稳定性分析的方法，并提出相应的光伏电站并网控制策略，旨在为实现光伏电站的安全稳

定并网提供理论和方法支持。

二、光伏电站对电网稳定性的影响分析

(一) 光伏电站的特点

光伏电站作为一种重要的可再生能源发电系统，具有独特的工作原理和组成特点，其对电网的影响是电力系统研究中的关键问题之一。光伏电站的特点主要源自其能量转换机制以及输出的波动性。光伏电站通过光伏组件将太阳能转化为直流电能，再经过逆变器转换为交流电并注入电网中。光伏电站的能量转换过程是基于光效应的。当光照射到光伏组件上时，光子与材料中的半导体相互作用，产生电子-空穴对，从而生成电流。这一过程是通过半导体材料的光电特性实现的，因此光伏电站对光照的强度和角度十分敏感。这也导致了光伏电站输出功率随着天气、季节和时间的变化而波动。光伏电站的输出具有一定的不确定性。由于天气等自然因素的影响，光伏电站的发电功率会出现短时的剧烈波动。这种波动可能会对电网的稳定性产生影响，特别是在大规模光伏电站集中并网时。电网在处理这种短时功率波动时，需要有一定的调整能力来保持稳定运行。光伏电站的并网接入过程中还需要与电网的运行状态相匹配，包括电压、频率等参数。电压的不稳定可能影响光伏逆变器的工作，进而影响光伏电站的输出功率。频率的变化也可能导致光伏电站的频率响应，对电网频率稳定性产生影响。

(二) 电网稳定性的概念

电网稳定性是电力系统运行的核心要素之一，涉及频率、电压和功率等多个方面的平衡。频率稳定性是指电网的运行频率在合理范围内维持稳定，通常以50Hz或60Hz为标准。电压稳定性则是指电网的电压在允许范围内保持稳定，以确保供电质量。电网稳定性的维持对于供电可靠性和电力设备的正常运行至关重要。在光伏电站并网接入中，电网稳定性问题变得更加突出，因为光伏电站的输出与自然光照条件直接相关，具有一定的波动性和不确定性。光伏电站的短时功率波动可能引起电网频率的偏差，从而影响整个电力系统的稳定性。同时，光伏电站的并网也可能导致电网的电压波动，进而影响其他接入电力设备的正常运行。电网稳定性的维护需要在光伏电站并网接入过程中充分考虑。首先，要确保光伏电站的输出功率与电网负荷之间的平衡，避免因光伏电站突然变化的功率波动而导致电网频率偏差。其次，要通过合适的控制策略来调整光伏电站的输出功率，以适应电网的需求，维持电压的稳定。此外，电网运营者还需要密切监控电网的频率、电压等参数，及时发现并处理潜在的稳定性问题。

(三) 影响机制

光伏电站并网接入电网可能引发多种电网稳定性问题，其中短时功率波动和电压波动是主要的影响机制。光伏电站的短时功率波动主要源于气象条件的变化，如云量、太阳辐射等。这些变化导致光伏电站的输出功率在短时间内发生明显变化，进而影响电网的频率稳定性。电网频率是由供需平衡决定的，光伏电站突然的功率波动可能导致频率偏离标准值，影响电网的正常运行。另一方面，光伏电站并网还可能对电网的电压稳定性造成影响。光伏电站的并网

会导致电网节点电压发生变化，特别是在低负荷时，光伏电站注入电网的功率相对较大，可能引起电压升高。反之，在高负荷时，光伏电站功率较小，可能导致电压下降。这种电压的变化可能会影响其他接入设备的运行，甚至引发电压失稳问题。

三、电网稳定性分析方法

(一) 功率流分析

功率流分析是一种用于分析电力系统中功率传输和分配情况的方法，对于光伏电站并网接入的电网稳定性分析具有重要意义。该方法基于电力系统的潮流方程，通过计算各节点的功率平衡来评估电网中的功率分布和潮流情况。在光伏电站并网接入中，功率流分析可以帮助确定光伏电站注入电网的功率以及对电网其他节点的影响。在进行功率流分析时，需要考虑光伏电站的输出功率和其他发电单元的功率，同时还需考虑负荷的变化。由于光伏电站的输出具有波动性，因此在不同时段下需要对功率流进行多次分析，以捕捉光伏电站功率波动对电网稳定性的影响。通过分析光伏电站的功率注入情况，可以确定电网各节点的功率分布，判断是否存在潮流拥塞等问题。此外，功率流分析还可以用于评估潮流路径和传输损耗。光伏电站的并网可能导致电网中某些支路的负荷发生变化，从而影响潮流路径。通过功率流分析，可以预测潮流路径的变化，为电网调度和运营提供参考。此外，功率流分析还可以计算传输线路和变压器的损耗，帮助优化电网的运行。

(二) 频率响应分析

频率响应分析是用于研究电网频率稳定性的重要方法，在光伏电站并网接入中，它用于探讨光伏电站对电网频率的影响。电网频率是电力系统运行的核心参数之一，其稳定性直接关系到电力设备的正常运行和供电质量。光伏电站的短时功率波动可能引起电网频率的变化，频率响应分析旨在定量评估这种影响。在进行频率响应分析时，首先需要建立电力系统的频率稳定模型。该模型考虑了各个发电单元、负荷和传输线路的频率响应特性，以及光伏电站的并网情况。通过模拟光伏电站突发功率变化对电网频率的影响，可以预测电网频率的变化幅度和持续时间。此外，频率响应分析还可以评估光伏电站的频率响应特性。光伏电站具有一定的响应速度，即从发生功率变化到对电网频率产生影响的时间间隔。这种响应速度取决于光伏电站的控制策略和逆变器的性能。通过分析光伏电站的频率响应特性，可以预测其对电网频率稳定性的影响程度。频率响应分析在光伏电站并网接入中的应用不仅有助于评估光伏电站对电网频率稳定性的影响，还可以为制定相应的控制策略提供依据。通过合理调整光伏电站的控制参数，如功率限制、响应速度等，可以减轻其对电网频率的影响，实现光伏电站与电网的协同运行。

(三) 电压稳定性分析

电压稳定性是电力系统运行的关键指标之一，与供电质量和设备的正常运行密切相关。在光伏电站并网接入中，电压稳定性分析用于研究光伏电站对电网电压的影响。光伏电站的并网可能

导致电网节点电压发生变化，影响其他接入设备的运行。进行电压稳定性分析时，需要考虑光伏电站的功率注入情况以及电网节点的电压变化。光伏电站的注入功率可能引起电网节点电压升高或降低，特别是在低负荷时，光伏电站注入的功率相对较大时可能导致电压升高。在高负荷时，光伏电站功率较小，可能导致电压下降。电压稳定性分析通过模拟光伏电站的功率变化和电网电压变化，评估其对电网电压稳定性的影响程度。此外，电压稳定性分析还需要考虑电网的电压极限和保护措施。光伏电站并网接入时，其注入的功率可能会导致电网节点电压超出允许范围，从而触发电网的保护措施，如电压降低保护、过电压保护等。通过电压稳定性分析，可以预测光伏电站并网对电网电压稳定性的影响，从而优化保护措施，确保电网的稳定运行。

四、光伏电站并网控制策略

(一) 预测与响应

在光伏电站并网接入中，为了减轻光伏电站短时功率波动对电网的影响，预测与响应策略成为一种重要的控制方法。这种方法基于气象预测和实时监测数据，旨在提前预测光照条件的变化，并采取相应的措施来调整光伏电站的运行，以减少功率波动。预测与响应策略首先依赖于气象预测数据。光伏电站的输出功率与太阳辐射直接相关，因此通过获取准确的气象数据，可以预测光伏电站的发电功率变化。通过分析气象数据，可以预测未来一段时间内的天气情况，包括云量、太阳辐射等。这种预测可以帮助光伏电站预知可能的功率波动，为采取相应的响应措施提供时间窗口。其次，预测与响应策略需要实时监测光伏电站的运行状态。通过实时监测光伏电站的输出功率，可以及时发现功率波动情况，并判断是否需要采取控制措施。一旦发现光伏电站的功率波动，可以通过调整逆变器的输出功率、限制光伏电站的注入功率等方式来减轻对电网的影响。

(二) 电压与频率控制

为确保光伏电站的并网不对电网的电压和频率稳定性造成不利影响，电压与频率控制策略成为关键的控制手段。在光伏电站并网接入中，通过控制光伏电站的输出功率、功率因数等参数，可以维持电网的电压和频率在合理范围内。电压与频率控制的核心是调整光伏电站的输出功率。光伏电站的输出功率直接影响电网的电压和频率。通过控制光伏电站的逆变器，可以调整其输出功率，以适应电网的需求。在电网电压较低的情况下，可以降低光伏电站的注入功率，以防止电压过低。在电网频率偏低时，可以适当降低光伏电站的输出功率，减少对电网频率的影响。此外，功率因数的控制也是电压与频率控制的一部分。功率因数是衡量电流相位与电压相位之间关系的参数，其值对电网的电压稳定性和有功功率传输具有影响。通过控制光伏电站的功率因数，可以调整其有功功率和无功功率之间的比例，从而影响电网的电压稳定性。

(三) 储能系统的应用

储能系统作为一种关键技术，可以在光伏电站并网接入中发挥重要作用，特别是在应对功率波动和频率波动等方面。光伏电站的

输出具有不确定性和波动性，而储能系统可以通过存储多余的能量并在需要时释放，平衡电网供需之间的差异，从而维持电网的稳定运行。储能系统可以用来削峰填谷，即在电网负荷高峰时段将多余的光伏发电功率储存起来，然后在负荷低谷时释放，以平衡电网负荷变化。这可以减少电网频率和电压的波动，保持电网的稳定性。此外，储能系统还可以用来进行频率调节，通过控制释放的功率来调整电网的频率，维持电网频率在合理范围内。

五、结语

总体而言，光伏电站并网接入电网稳定性的分析与控制研究是一项复杂而关键的任务。在光伏电站的高效利用和电网稳定性之间取得平衡，需要深入分析光伏电站的特点以及其对电网稳定性的影响机制。通过功率流分析、频率响应分析和电压稳定性分析等方法，可以客观评估光伏电站的影响，并采取相应的控制策略来减轻其对电网的影响。预测与响应策略、电压与频率控制以及储能系统的应用等措施，为实现光伏电站与电网的协同运行提供了关键支持。在未来的研究和实践中，应继续深化对光伏电站并网接入的电网稳定性问题的认识，不断优化控制方法和策略，以保障电网的稳定运行，推动清洁能源的可持续发展。

参考文献：

- [1]周于清, 李大虎, 姚伟等. 受端近区光伏电站对LCC-HVDC系统稳定性影响分析 [J/OL]. 中国电力: 1-12[2023-08-09].
- [2]高国庆, 高源. 多旋翼清洗无人机在屋顶类分布式光伏电站的应用研究 [J]. 太阳能, 2023(07):74-79.
- [3]王闯, 丁帅, 贺睿. 太阳能光伏性能参数和大型并网太阳能光伏电站性能优化建议 [J]. 科技创新与应用, 2023, 13(21):23-27.
- [4]仰玉伟. 光伏电站EPC总承包在工程造价的研究 [J]. 商业观察, 2023, 9(19):57-60.
- [5]郑仕超, 翟梓良. 潮间带复杂环境下大型集中式光伏电站施工技术研究 [J]. 北方建筑, 2023, 8(03):12-15.
- [6]李森. 大型集中式光伏电站并网设计要点研究 [J]. 光源与照明, 2023(06):133-135.
- [7]刘芸, 宋善海, 李慧璇等. 基于高分卫星影像的复杂山区光伏电站信息提取 [J]. 中低纬山地气象, 2023, 47(03):88-92.
- [8]张朋飞. 基于监测系统的光伏电站智能运维中巡检装备的应用研究 [J]. 太阳能, 2023(06):77-81.
- [9]朱崩波, 白映波, 李宾等. 超高海拔地区光伏电站智慧化施工进度管理系统的研发与应用 [J]. 太阳能, 2023(06):24-30.
- [10]魏显文, 孙国亮, 侯卿等. “1+X”光伏电站运维实训课程实战化教学训练改革探索 [J]. 才智, 2023(20):189-192.
- [11]李王安顺, 郭浩刚, 李昌恩等. 光伏电站现场组件电性能标志和缺陷一体化检测车开发与研制 [J]. 青海科技, 2023, 30(03):50-55+134.
- [12]孙和通. 分布式光伏电站经济性指标优化分析 [J]. 邮电设计技术, 2023(06):73-79.
- [13]陈俊宇, 王建东, 蔡福禄. 某光伏电站全站跳闸原因分析及处理对策 [J]. 云南水力发电, 2023, 39(06):195-198.
- [14]罗剑锋, 徐涛, 刘华斌等. 光伏电站组件支架基础灌注桩施工技术和质量管控 [J]. 建筑技术开发, 2023, 50(06):148-150.
- [15]谭昊, 陈海涛, 钟毅等. 基于BIM的光伏电站施工运维一体化平台应用 [J]. 项目管理技术, 2023, 21(06):152-157.