

风电机组对电力系统电压稳定性的影响及控制

李 靖

内蒙古龙源蒙东新能源有限公司 内蒙古赤峰 024000

摘 要：风电机组对电力系统电压稳定性产生重要影响，尤其受到有功功率波动、无功功率调节及低电压穿越能力等因素的制约。通过优化无功补偿技术、改进控制策略和协调控制，能够有效提升电压稳定性，确保电网安全运行。

关键词：风电机组；电力系统；电压稳定性；影响；控制

一、风电机组的类型及其特性

1. 不同类型风电机组概述

风电机组按照其工作原理和构造可以分为多种类型，其中定速风电机组、双馈感应风电机组和永磁直驱风电机组是常见的几种类型^[1]。

(1) 定速风电机组 (Synchronous Wind Turbine Generator, SWTG)

定速风电机组通常具有固定的转速，这意味着风速变化时，风机转速保持不变。该类型的机组采用传统的同步发电机，其特点是结构简单且成本较低。然而，由于其转速不随风速变化而调整，因此在风速变化较大时，其效率相对较低。适用于风速相对稳定的区域，但随着风电市场的需求变化，定速风电机组逐渐被更先进的变速风电机组所取代。

(2) 双馈感应风电机组 (DFIG)

双馈感应风电机组是一种较为常见的变速风电机组，它通过采用双馈感应发电机和变频器相结合的方式，使机组能够在一定范围内调节转速，以适应风速的变化。其结构特点在于发电机的定子直接与电网连接，而转子通过变频器与电网的频率和电压进行匹配。双馈风电机组的优势在于较高的风能转换效率，尤其是在风速波动较大的地区，能够显著提高发电量。

(3) 永磁直驱风电机组

该类型的风电机组采用的是永磁同步发电机并通过直接驱动发电机来实现能量转换，无需传统的齿轮箱或变速器。其主要特点是结构简单、可靠性高、维护成本低。由于永磁材料的使用，机组能够在较宽的风速范围内高效运行，尤其适合风速变化较大的地区。由于其无齿轮箱设计，减少了机械磨损，延长了设备的使用寿命。

2. 不同类型风电机组的电压特性

(1) 定速风电机组

定速风电机组的电压调节能力通常较为有限。由于其转速固定，因此在风速变化时无法有效调整机组的运行参数，这就导致其在较大风速波动下无法提供稳定的电压和无功功率^[2]。此类机组多依赖于外部电网的调节来保证电压稳定。然而，在一些小规模风电场或者风速变化较小的地区，定速风电机组仍能较好地满足电网对电压的需求。

(2) 双馈感应风电机组

双馈感应风电机组的无功功率调节特性较强，其通过变频器控制转子的电流，可以较为灵活地调节无功功率输出。因此，双馈感应机组能够在风速波动的情况下维持电网电压的稳定。在电网需求较高的情况下，双馈风电机组能够有效提供无功功率，支撑电压水平的稳定。例如，在一些风电大省如内蒙古、甘肃等地，双馈感应风电机组因其良好的电压调节能力被广泛应用，能够为当地电网的稳定运行提供有力支持。

(3) 永磁直驱风电机组

永磁直驱风电机组由于其直接驱动发电机的设计，使得其电压调节性能具有一定的优势。在风速变化较大的情况下，机组可以直接调整发电机的电压输出，减少了传统变速系统的能量损耗^[2]。此外，永磁直驱机组由于其没有齿轮箱，运行更加稳定，电压波动较小。然而，由于该类型机组在低风速条件下的发电效率可能较低，因此在一些风速不稳定或风速较低的地区，永磁直驱风电机组的电压控制特性可能未必能比双馈风电机组更具优势。

二、风电机组影响电压稳定性的分析方法

1. 潮流计算分析方法

潮流计算是分析风电机组接入电力系统对电压稳定性影响的重要工具。其基本原理是通过求解电力系统中各节点的电压幅值和相角，进而判断系统在稳态下的电压分布。潮流计算能够揭示风电机组接入前后电网电压

的变化，帮助评估风电接入对系统电压稳定性的潜在影响。通过建立风电机组的数学模型，潮流计算可以预测不同负荷和风速条件下的电压波动情况^[3]。

不同类型风电机组在潮流计算中的模型构建存在差异。定速风电机组通常采用同步发电机模型，其电压控制能力较为有限，因此模型多以电网负荷变化对电压的影响为主。双馈感应风电机组的模型较为复杂，需考虑变频器的动态调节作用，因此其潮流计算通常需要结合无功功率调节特性来进行建模。永磁直驱风电机组则由于其直接驱动发电机的特性，模型中需要加入无变速系统对电压稳定性的影响，以确保风机在不同运行条件下的电压输出准确性。

2. 动态仿真分析方法

动态仿真分析方法主要通过仿真工具如PSCAD/EMTDC等对风电机组接入电力系统后的动态行为进行建模与分析。PSCAD/EMTDC可以模拟电力系统的瞬态响应，研究风电机组对电压稳定性的影响。在电力系统遭遇短路、频繁负荷波动或风速剧烈变化等干扰时，动态仿真能够实时反映风电机组对电压稳定性的贡献或潜在风险。

在建立包含风电机组的动态仿真模型时，先要做的便是根据风电机组类型选择合适的模型。具体而言，对于双馈感应风电机组，需要建模转子电流调节和定子电压反馈机制，确保无功功率输出的灵活调节。而永磁直驱机组的模型则需重点关注发电机的电压调节特性及其对电网的影响。此外，动态仿真还需考虑到风速变化、机组故障及电网系统中的电气暂态响应，以便全面评估风电机组在不同工况下对电压稳定性的影响。在实际案例中，像德国、丹麦等风能利用较为广泛的国家，已通过动态仿真对风电机组接入后的电网电压稳定性进行了多次模拟验证，为风电并网运行提供了宝贵经验。

三、风电机组对电力系统电压稳定性的影响

1. 有功功率和无功功率的波动性影响

风电机组的有功功率波动性主要源于风速的间歇性和不确定性。具体而言，风速的波动导致风电机组的输出功率时刻变化，从而对电网的电压稳定性产生影响^[4]。具体来说，风电机组在风速波动较大时，可能出现输出功率急剧上升或下降的现象，这种突发性的功率变化会使电力系统中的电压发生波动。尤其是在电网中风电比例较高的情况下，风速的不稳定性会加剧电压波动，导致电压调节难度增大。在一些风电比例较高的地区，如德国和西班牙，风电的波动性已成为电网运行中的一大挑战，电网必须通过灵活的调度和储能技术来应对这种

波动性带来的影响。

此外，无功功率输出的变化对电力系统电压稳定性具有直接影响。风电机组的无功功率调节能力通常受限于其发电机类型和控制策略。定速风电机组的无功功率调节能力较弱，而双馈感应风电机组能够通过变频器动态调节无功功率输出，从而对电压波动进行一定程度的补偿。无论是哪种类型的风电机组，无功功率的急剧变化都可能导致电网电压的剧烈波动，进而影响系统的稳定性。在风电集中的区域，风电机组的无功功率波动与电网的电压调节能力之间的协调尤为重要。

2. 线路阻抗和潮流分布的改变

风电场接入电网后，会改变电网的线路阻抗，从而影响电压稳定性。风电机组通常集中在风能资源丰富的地区，这些地区往往距离主电网较远。由于输电线路的阻抗较大，风电机组接入后会增加线路的总阻抗，导致电能传输效率降低，并可能引起电压衰减，尤其是在长距离输电的情况下。在一些风电集中的地方，如内蒙古的风电场，电力的远距离传输常常伴随着电压的下降，造成电网电压不稳定。

与此同时，风电机组的接入还会改变电网的潮流分布。简单地说，随着风电机组的接入，电力流向和功率分布发生变化，原本负荷较轻的线路可能因风电输出的波动而承担更大的电力负荷。潮流的变化会导致电网节点的电压发生波动，这种波动尤其在电网负荷高峰时段或风速极端波动时更加明显，可能加剧电网电压的波动性。例如，在某些风电大省，风电输出与电力需求的不匹配，造成电网中部分区域的电压过低或过高，给电网的调节带来了巨大压力。

3. 低电压穿越能力的影响

低电压穿越能力（LVVRT）指的是风电机组在电网发生短路或其他故障时，能够在电压降至一定阈值下仍继续运行并提供稳定的电力输出的能力。低电压穿越能力对电力系统的电压稳定性至关重要。在电网发生故障时，若风电机组不能迅速恢复电压，可能会导致风电机组大量脱网，进一步加剧电网的电压波动，甚至引发电压崩溃。风电机组的低电压穿越能力不足，往往是引发电压崩溃的一个重要因素。

例如，在某些风电集中接入的地区，如英国和美国的的部分风电场，曾因风电机组低电压穿越能力不足，在电网发生大规模故障时，出现了风电机组大规模脱网的现象，这加剧了电网的故障扩展，导致了局部地区的电压崩溃。为此，风电机组的低电压穿越能力成为提升电

力系统抗干扰能力和电压稳定性的重要技术要求。

四、风电机组对电压稳定性的控制策略

1. 无功补偿技术

静止无功补偿器 (SVC) 是一种广泛应用于风电场的无功功率补偿装置, 通常由静止变容器、换流器、控制系统等组成。其主要作用是通过调节电网中的无功功率, 改善电压稳定性。SVC 通过对电网电压的实时监测, 利用控制系统动态调整无功功率的输出, 从而控制电压水平。由于其响应速度较快, SVC 能够在风速波动较大的情况下对电压进行即时调节, 从而避免电压大幅波动对电力系统的影响。风电场在接入电网时, 往往由于风速变化引起功率波动, 这时候 SVC 能够有效地补偿无功功率不足, 保持电网电压的稳定性^[5]。

与 SVC 相比, 静止同步补偿器 (STATCOM) 在电压控制方面具有更强的优势。STATCOM 采用的是基于电力电子技术的同步补偿方式, 可以提供更精确、更快速的无功功率调节。其主要特点是能在极低电压条件下依然保持较强的电压支撑能力。在一些风电较为集中的地区, 如丹麦和荷兰, STATCOM 已被广泛应用于提升电网的电压稳定性, 尤其在风电场远离主电网的情况下, STATCOM 能够有效避免由于长距离输电造成的电压衰减问题。通过与风电机组的协调控制, STATCOM 在保持电压稳定性方面表现出了明显的性能优势。

2. 风电机组自身控制策略调整

为了增强风电机组的电压控制能力, 尤其是双馈感应风电机组, 近年来各类改进控制算法得到了广泛应用。传统的双馈感应风电机组通常采用基于功率控制的矢量控制策略, 通过调节转子电流来实现无功功率的调节。通过优化矢量控制算法, 风电机组可以在不同风速和负荷条件下实现更为精细的电压调节。例如, 采用多模型控制技术或基于预测的自适应控制策略, 能够显著提升双馈风电机组对电网电压的调节能力。在风电较为集中的地区, 如中国内蒙古地区, 改进后的双馈感应机组能够更好地应对电网的电压波动, 减少风速波动带来的影响。

对于永磁直驱风电机组, 其控制策略的优化也同样至关重要。永磁直驱风电机组由于其没有齿轮箱, 运行较为平稳, 但其无功功率调节能力仍然较为依赖控制策略的改进。通过对电机控制系统进行参数调整, 优化风电机组的励磁控制策略, 能够提高无功功率调节的灵活性, 进而增强电压稳定性。此外, 采用基于最大功率点跟踪 (MPPT) 算法的无功功率调节策略, 能够进一步优化机组对电网的电压支撑能力, 在风速大幅波动时依然

保持较为稳定的电网电压。

3. 协调控制策略

风电机组与无功补偿装置之间的协调控制是提升电压稳定性的重要途径。在风电场接入电网时, 风电机组的无功功率调节往往难以完全满足电网电压调节的需求, 因此, 结合无功补偿装置进行协调控制显得尤为重要。无功补偿装置 (如 SVC 和 STATCOM) 与风电机组之间的协调控制不仅能够加强风电机组的电压控制能力, 还能够实现电网中无功功率的实时调节, 确保电网电压维持在稳定范围内。为了实现这一协调控制, 通常需要采用现代电力电子技术和智能控制系统, 通过数据共享和实时反馈调节, 实现风电机组与无功补偿装置的协同工作。

多个风电场之间的协调控制对于区域电压稳定性同样具有积极影响。在风电较为集中的地区, 如西班牙和德国, 多个风电场之间的协调控制可以减少单个风电场对电网电压的冲击, 避免由于某一风电场输出波动过大而导致电网电压的不稳定。通过区域调度中心对多个风电场进行协调控制, 可以在不同风电场之间调节有功和无功功率的分配, 实现区域电网电压的平衡与稳定。此外, 区域协调控制还能够有效应对风速不均匀带来的影响, 提高风电场的集成度和运行效率。

结语

综上所述, 风电机组对电力系统电压稳定性具有显著影响, 尤其在风电比例较高的地区。通过优化无功补偿技术、改进风电机组控制策略以及实现协调控制, 可以有效提升电压稳定性。随着技术进步, 未来风电机组将更好地与电网协同, 促进电力系统的可靠运行和可持续发展。

参考文献

- [1] 胡峰. 双馈风电机组故障分析及对电力系统暂态稳定性影响研究[J]. 科技创新导报. 2020 (11): 21-22.
- [2] 王杰, 彭志炜, 田宇. 风电机组故障穿越对系统暂态稳定的影响[J]. 电测与仪表. 2021 (05): 112-118.
- [3] 林跃. 风电并网对电力系统电压稳定性影响的探析[J]. 科技风. 2022 (01): 160-162.
- [4] 刘蕾, 王卓群, 马平. 对风电并网系统静态电压稳定性的分析及优化[J]. 电气自动化. 2020 (02): 67-69.
- [5] 卢一菲, 陈冲, 金成日等. 直驱永磁风电机组高电压穿越协调控制策略[J]. 电力系统保护与控制. 2020 (15): 50-60.