

小型风力发电机最大功率跟踪控制研究

王琳琳

鞍山技师学院, 辽宁 鞍山 114000

DOI: 10.61369/SDME.2025300002

摘 要 : 风能作为一种清洁可再生能源, 在全球能源转型加速推进的时代下, 是能源领域的研究热点之一。体积小、安装便捷、成本较低的小型风力发电机作为人口居住分散、风力资源丰富的偏远地区电力供应的首选之一, 目前仍然会受到风能的随机性和不稳定性等影响, 导致输出功率波动较大, 能源利用效率并不理想。基于此, 本文将浅析小型风力发电机 MPPT 控制核心原理, 以及改进型最大功率跟踪控制策略的理论构建, 并展望小型风力发电机 MPPT 控制的发展趋势, 以期对相关研究与工程应用提供理论参考。

关 键 词 : 小型风力发电机; 最大功率; 跟踪控制

Research on Maximum Power Point Tracking Control of Small-Scale Wind Turbines

Wang Linlin

Anshan Technician College, Anshan, Liaoning 114000

Abstract : As a clean and renewable energy source, wind energy has become one of the research hotspots in the energy field amid the accelerated global energy transition. Small-scale wind turbines, characterized by their compact size, easy installation and low cost, are one of the preferred choices for power supply in remote areas with scattered populations and abundant wind resources. However, they are still affected by the randomness and instability of wind energy, resulting in large fluctuations in output power and unsatisfactory energy utilization efficiency. Based on this, this paper briefly analyzes the core principle of MPPT (Maximum Power Point Tracking) control for small-scale wind turbines and the theoretical construction of improved maximum power point tracking control strategies, and looks forward to the development trend of MPPT control for small-scale wind turbines, aiming to provide theoretical reference for relevant research and engineering applications.

Keywords : small-scale wind turbines; maximum power; tracking control

国际能源署 (IEA) 报告显示, 风能在全球能源结构中的占比逐年攀升, 已成为实现碳减排目标和能源可持续发展的关键力量。因此, 开展小型风力发电机最大功率跟踪控制研究具有重要的理论价值与工程意义。高效的 MPPT 控制技术能够显著提升风能捕获效率, 使小型风力发电机在相同风能资源条件下输出更多电能, 提高能源的利用率, 助力能源结构优化升级。已有相关研究表明, 采用先进 MPPT 控制策略的风力发电机, 其发电效率可比传统控制方式提高 10%-20%。

一、小型风力发电机 MPPT 控制核心原理

(一) 风电系统基础理论分析

小型风力发电机的系统主要由风力机、发电机、控制器和储能装置等构成。风力机是其中最为核心的部件, 是小型风力发电机捕获自然界中的风能并对其进行能量转化的关键所在。其性能对发电机输出功率有直接影响。发电机则将风力机转化输出的机械能转化为电能, 为储能装置和设备用电提供支持。控制器则能够根据风速、负载和电池状态等, 动态调整风力机和发电机的运行参数, 提升系统的运行效率与稳定性。而储能装置可以储存多

余的电能, 以保障在风速较低或用电需求较高的时候提供能量^[1]。通过上述部件的相互协作, 一个小型风力发电机便能有序进行发电作业。

风力发电机机械功率 P_m 公式为:

$$P_m = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \rho \pi R^2 V^3$$

其中, $C_p(\lambda, \beta)$ 为风能利用系数, 大小由叶尖速比 λ 及桨距角 β 决定, ρ 为空气密度, R 为扇叶长度, V 为风速。由该公式可知, 风力发电机机械功率受风速影响, 随着风速的提高叶片将受到更大的空气动力, 即风力发电机机械功率随风速增加而上

升,但当风速过高时,会流失部分能量,导致功率下降,可见持续风速持续增加也无法保证风能利用效率的增加^[2]。如图1。

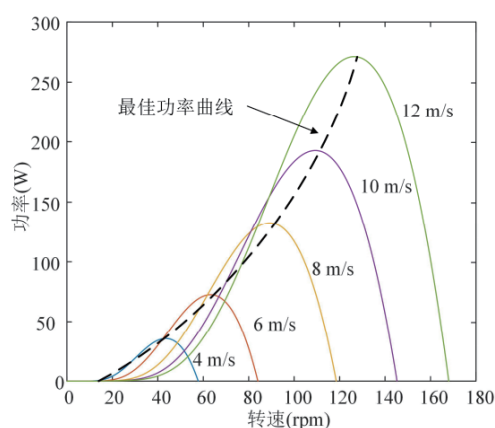


图1 功率与风速、转速的关系

（二）常规 MPPT 控制器方案设计

最佳叶尖速比法、功率信号反馈法、爬山搜索法和占空比扰动法等为 MPPT 控制主要方法。最佳叶尖速比法不仅模型简单、概念明确,还是一种速度快、使用价值较高且容易实现的控制方法,但使用过程中需要测量风速、转速,适应能力较低。而占空比扰动法虽然由于固定步长搜索速度慢,最大功率点会产生振荡,但具有精度高、适用范围广,响应速度快等优势^[3]。因此,结合这两种方法,在前期跟踪时期,基于最佳叶尖速比法将风机转速设置为参考转速,接近最大功率点时利用占空比扰动法持续跟踪最大功率点,进而跟踪到最大功率点,解决最佳叶尖速比法适应性低与占空比扰动法固定步长搜索速度慢,最大功率点会产生振荡的问题。需要注意的是,为了进一步降低风速测量困难和精度较低的难题,应探索能够提高风速准确度的合理方法,代替风速传感器。

二、改进型最大功率跟踪控制策略的理论构建

（一）改进策略的设计思路与理论基础

传统 MPPT 控制策略存在以下几方面问题:小型风电机具有非线性及暂态特性,因此线性控制策略难以适应;基于给定参数的控制无法兼顾不同工况条件下的需求。PID 控制是一种典型的反馈控制算法,具有高精度、稳定性好的特点,而且具有完备的理论支撑。但预设参数 PID 控制不能很好地适应系统动态变化,易出现超调、振荡及滞后现象;模糊控制作为一种智能控制技术,在不知道详细系统模型的情况下模拟人的思维过程,将实践经验转化为模糊规则以处理非线性及不确定性问题。但单独使用模糊控制,其静态精度不高,也没有实现具体调节的功能^[4]。因此,一种模糊自适应 PID 改进 MPPT 控制策略应运而生,在模糊控制的基础上融合 PID 控制,根据系统实际情况利用模糊逻辑规则实时调整 PID 参数,使控制器具有自适应风扰变化及系统参数影响的能力,并实现快速响应、稳态精度与鲁棒性的综合提高。改进策略的核心理论基础包括:第一,基于 PID 控制的闭环误差调节

理论,即用比例环节快速响应误差及时调整,通过积分项消除稳态误差,使用微分项预估变化趋势,实现精准控制;第二,以模糊控制的不确定性处理理论,通过模糊化、模糊推理、清晰化过程,依据定性经验得到定量的参数修正指令;第三,依靠自适应控制理论,使控制器参数能够随系统状态变化进行在线整定以适应复杂的非线性和时变特性^[5]。

（二）模糊自适应 PID 控制器的理论构建

模糊自适应 PID 控制器的设计原理是“误差检测-模糊推理-参数修正-PID 调节”,主要包括三种功能:一是误差处理子系统对实际控制的实际输出进行测量并计算出误差以及误差变化率作为模糊控制系统的输入;二是模糊控制子系统根据模糊法则得到 PID 调节参数变化量;其中 PID 控制环节是依据给定参数及修正量产生控制信号;三是反馈环节对输出功率进行实时采集,用来更新误差值,并形成闭环迭代^[6]。

（三）改进 MPPT 控制器方案设计

以模糊自适应 PID 控制策略为核心,通过硬件与软件的协同设计实现对小型风力发电机的高效功率跟踪。以 STM32 系列单片机为控制核心,配置高精度风速传感器、转数计数器以及电流及电压传感器等硬件模块实现对小型风力发电系统的数据、状态进行实时采集。软件层面首先基于数据预处理模块对风速、转速及功率信号进行噪声滤波后,将功率偏差以及偏差变化率作为输入给模糊控制模块,根据事先设定的模糊规则表来在线调节 PID 控制器的比例系数、积分系数以及微分时间;PID 调节模块则根据修正后的参数输出 PWM 控制信号,驱动直流斩波器调节发电机的负载电阻,从而改变发电机的输出功率。此外,系统还具备故障检测及保护功能,在出现超压、超流以及转速过高等情况时切断主回路并发出报警信号,保证设备安全运行。通过搭建仿真平台验证改进后的控制算法在不同风况下的效果,试验结果表明:其跟踪效率较传统技术提升不低于 12%,响应时间已缩短至 0.5s 以内,在阵风突变工况下仍能实现稳定运行^[7]。

三、小型风力发电机 MPPT 控制的发展趋势展望

（一）人工智能赋能算法轻量化

随着人工智能技术应用的日益成熟,其与小型风力发电机 MPPT 控制的融合也更加深入,尤其是算法模型的轻量化设计,与小型风力发电机低成本的硬件平台需求十分契合。深度神经网络等智能化算法虽然性能优异,但计算复杂度也较高,应用于小型风力发电机时,往往难以在细节控制上进行高效运行。当前,相关理论研究逐渐聚焦如何算法压缩与模型简化,旨在通过量化训练、剪枝优化等技术,在保证小型风力发电机控制性能的同时,降低算法的计算量和储存需求^[8]。与此同时,将边缘计算技术与 MPPT 控制相结合,还能够实现本地决策与云端协同,使多机组数据共享训练通用模型,进一步提升算法的自适应能力。而随着基于强化学习的自适应控制理论不断发展,小型风力发电机 MPPT 控制还将能主动学习不同场景的运行规律,进而无需人工干预即可对控制参数进行自行调整,以更好地适配复杂的风速环

境与设备状态。

（二）构建多能源协同下的 MPPT 控制理论体系

随着微电网及综合能源系统的发展，小型风力发电机往往配合光伏、储能、柴油发电机等协同运行，单个机组的 MPPT 控制需融入系统整体调度方案之中，形成多源协调的 MPPT 控制理论体系已是应然的发展趋势。今后的研究也将突破单机控制约束，实现从系统层面优化风能捕获方法。比如，基于能源互补特性，对 MPPT 控制目标进行动态调整，如光照充足时段可适当降低小型风力发电机功率跟踪精度，以利于系统功率平衡。又或是建立多台机组协调控制架构，采用分布式协调计算算法，对风电、光伏、储能的联合 MPPT 进行优化，提升整个系统的利用效率^[9]。此外，还可以引入数字孪生技术，构建各类能源系统数字孪生模型，用以验证不同 MPPT 控制理论体系及策略运行性能的作用效果，实现最优部署。

（三）基于鲁棒控制理论促进工程化优化

小型风电机运行环境大多较为复杂，且受到湍流、电网波动等参数变化、外部扰动影响较大，在这种情况下，小型风力发电机 MPPT 控制将相对困难。因此，在相关研究中探索鲁棒控制理论的应用应侧重工程化、实用化方向。主要的研究方向可以集中在以下几个方面：一是自适应鲁棒控制策略，通过在线检测到系统的参数变化，并能自适应地更新控制器保证系统在存在参数不确定性、负载扰动下仍具有良好的跟踪效果；二是寻找鲁棒性指标及经济代价间的折中解，在满足系统稳定性的前提下，简化控制器结构来降低执行器成本。三是将多种抗扰方法结合在一起，结合滑模控制、自抗扰控制（ADRC）等先进理论、技术形成复合抗扰控制，以达到对内部变参数以及外部环境干扰的有效克服。此外，区间分析引导下的鲁棒控制理论将在实际中得到更大应

用，由于其具有确定性的不确定界，从而可以设计保守性更低的控制策略，以达到提升实际运行中的控制性能的目的。

（四）数字孪生保障 MPPT 全生命周期

一方面，在设计阶段可以使用虚拟仿真模型验证不同 MPPT 算法的性能，进而优化控制参数及算法设计。另一方面，在运行阶段实时采集真实运行数据以不断更新虚拟模型，从而实现在线控制策略的优化和故障预警。此外，利用虚拟模型的仿真数据分析 MPPT 控制策略对设备寿命的影响，也有助于进一步延长设备使用寿命。在具体实施中，相关工作人员可依托数字孪生平台建立多尺度仿真模型，涵盖从风机叶片气动特性到控制系统响应的微观细节，通过实时数据映射实现物理机组与虚拟模型的同步运行。例如，在风速突变或设备老化等复杂工况下，虚拟模型可快速模拟不同控制参数组合的效果，提前预测功率波动趋势并生成最优调节指令，指导物理控制器进行自适应调整，从而避免传统控制中因滞后性导致的功率损失，推动小型风力发电机在控制精度、运行效率与设备可靠性等方面得到综合提升^[10]。

四、结语

综上所述，探索与实践小型风力发电机最大功率跟踪控制理论对提升风能利用效率、推动小型风力发电系统推广应用任重道远。未来，小型风力发电机 MPPT 控制理论应继续向自适应、自优化、自协同的方向发展，以覆盖其全场景、全生命周期应用。同时，相关研究人员要认识到模型算法难免会与实际系统输出有所出入，所以在实际应用中，应多采用实际数据对模型算法进行调整，使小型风力发电机最大功率跟踪控制理论与技术的应用更加符合实际需求。

参考文献

[1] 刘庆元, 房文伟, 张靖, 等. 风力发电机组群能量控制技术改进及系统优化 [J]. 粘接, 2024, 51(12): 146-149.
[2] 王少仪. 浅谈风力发电机组性能优化及功率提升方法 [J]. 电力设备管理, 2024, (17): 84-86.
[3] 黄晓军. 风力发电机组的恒功率控制算法研究 [J]. 科技风, 2024, (21): 4-6.
[4] 曹晨光. 风力发电机组中的全功率变流器故障分析 [J]. 电子技术, 2024, 53(06): 172-173.
[5] 赵紫帆, 孙冠群, 杨建青, 等. 一种开关磁阻风力发电机新型功率变换系统及其最大功率点跟踪控制 [J]. 电气技术, 2024, 25(04): 1-6+58.
[6] 刘晓燕, 张仁光. 风力发电机组全功率变频器增益自动控制技术 [J]. 装备制造技术, 2024, (03): 121-124.
[7] 莫岳平, 徐迪, 史宏俊, 等. 风力发电机最大功率模型自校正复合自抗扰控制 [J]. 江苏大学学报 (自然科学版), 2023, 44(03): 337-343.
[8] 谈鹏. 基于 PLC 风力发电机变桨控制系统设计 [J]. 甘肃科技, 2022, 38(17): 1-4.
[9] 杨继光. 风力发电机组电气控制系统检修分析 [J]. 设备管理与维修, 2022, (15): 61-62.
[10] 张思维. 基于 LQG-I 的风力发电机组控制系统设计 [J]. 电子制作, 2022, 30(14): 67-70.