

## 中低风速条件下风力发电系统控制策略与发电效率分析

风能作为可持续、低环境影响的清洁能源，已成为全球范围内发展最快的可再生能源之一。然而，在中低风速条件下有效运行风力发电系统仍然面临重要挑战，尤其是近年来在分布式能源系统中广泛部署的小型和中型风力机组。低风速会导致空气动力矩下降，发电功率降低，从而显著影响风电项目的能量产出和经济效益。

风力机组在中低风速下的运行性能，受控制策略选择与实施的影响极大。传统的控制方法，如桨距控制、叶片速比优化以及发电机扭矩调节，多数针对中高风速设计，当风速低于额定阈值时，其效果往往下降。风机可能出现效率低下、机械应力增加，甚至在长时间低风条件下无法发电的情况。

为解决这一问题，近年来提出了多种先进控制策略，包括自适应桨距控制、变速运行以及基于实时风速测量的预测扭矩控制。这些方法旨在在保证风机安全可靠运行的前提下，最大化能量捕获。同时，功率电子设备的应用，如并网变流器和智能逆变器，也在低风速波动条件下维持系统效率和电能质量方面起着关键作用。

准确建模中低风速下风力机组的动力学行为，对于评估不同控制策略的有效性至关重要。模型需同时考虑空气动力、机械特性及电气特性，包括叶片空气动力学、发电机性能以及结构振动。此外，环境因素如湍流强度、风切变以及大气稳定性也应纳入，以反映实际运行条件。通过系统仿真研究，可识别最优控制参数，评估能量产出，并分析系统可靠性。

本文重点研究中低风速条件下风力发电系统的控制策略及发电效率优化方

法。建立了风机动态建模框架，涵盖空气动力、机械结构及电气子系统，模拟不同风况下的风机行为。通过功率系数、能量产出及机械载荷变化等关键性能指标，评估各类控制策略的效果。研究结果为中低风速环境下风机运行提供工程参考，有助于提升能源捕获效率和系统可靠性，为分布式及并网风力发电系统的设计与优化提供技术支持。