

大惯量风电机组最优发电策略研究

廖卉莲¹, 李帅兵¹, 彭华坤¹, 卢晓光²

(1. 国网河南省电力公司直流中心, 河南 郑州 450000; 2. 许昌许继风电科技有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 风电机组风轮惯量持续增大, 导致最优发电阶段叶尖速比跟随能力变差的趋势明显。为解决此问题, 通过最优转矩控制的结构调整, 开发了具有惯性补偿功能的快速跟踪最优转矩控制算法; 并根据风频谱图中含能的变化规律, 进一步实现了舍弃高频波动的改进快速跟踪最优转矩控制策略; 实现了大惯量机组叶尖速比快速跟踪的同时, 输出功率波动不增加的控制效果。通过传递函数特性分析证明, 系统的中频风速段响应能力及高频风速的抗波动性都有显著提升。仿真统计表明, 新系统能提升最优发电风速段 1.6% 的发电量。

关键词: 大惯性系统, 快速跟踪, 最优叶尖速比, 风能利用率

中图分类号: TP273; TM614

文献标志码: A

文章编号: 1003-7241(2025)12-0010-04

Research on optimal generation strategy for large inertia wind turbine

LIAO Huilian¹, LI Shuaibing¹, PENG Huakun¹, LU Xiaoguang²

(1. State Grid Henan Electric Power Company DC Center, Zhengzhou 450000, China;

2. XJ-Wind Power Technology Company, Xuchang 461000, China)

Abstract: The inertia of wind turbine rotor continues to increase, leading to an obvious trend that the following ability of tip speed ratio becomes worse in the optimal generation stage. To solve this problem, a fast tracking optimal torque control algorithm with inertia compensation function is developed by adjusting the structure of the optimal torque control. According to the change rule of energy content in the wind spectrum diagram, the improved fast tracking optimal torque control strategy is further realized, which discards high-frequency fluctuations. The control effect of fast tracking of blade tip speed ratio of large inertia unit without increasing output power fluctuation is realized. Through the analysis of the transfer function characteristics, it is proved that the response capability of the system in the middle frequency wind speed band and the anti fluctuation of the high frequency wind speed have been significantly improved. The simulation statistics show that the new system can increase the generation capacity of the optimal generation wind speed range by 1.6%.

Keywords: large inertial system; fast tracking; optimum tip speed ratio; utilization rate of wind energy

0 引言

碳中和碳交易成为当前政治任务^[1-3], 作为新能源发电的代表风力发电提质增效技术改造, 成为当下学者研究的重点方向之一^[4-7]。对于已投运机组, 优化机组运行控制技术, 提高风能利用率, 在不增加硬件成本的情况下达到提质增效目标, 是当前技改市场的关注重点^[8-9]。

目前现役机组风轮直径由以 80 m 附近为主增大到以 200 m 附近为打机型, 风电机组的风轮惯量处于不断增加中^[10]。风电机组巨大的惯量, 在转速跟踪的动态过程中, 风轮转速的变化跟不上自然风速的变化, 导致运行过程偏离最佳叶尖速比, 使最佳叶尖速比带宽扩大化, 带来较大发电量损失^[11-12]。抵消风轮惯量的影响, 是机组尽量运行在最佳叶尖速比上, 是提升发电量的可靠手段。另一方面, 单纯地追求最优叶尖速比, 会导致转速波动巨大, 造成发电量输出的巨大波动, 这也是不能接受的^[13-14]。故

此发电量波动和风能利用率提高多目标优化成为最佳技术追求目标。

本文基于以上问题的解决展开分析和控制器设计, 对最优尖速比跟踪过程进行惯性补偿, 实现抵消风电机组单机容量持续扩大趋势导致的负面效益的技术效果, 同时对输出功率的大幅度波动进行抑制, 实现多目标协调优化的目的。

1 机组风能吸收传递函数搭建

风电机组传动轴转子运动方程可表示为

$$J_{\text{sum}} \dot{\omega} = T_a - T_e \quad (1)$$

其中, J_{sum} 为标幺化的风电机组传动系统总转动惯量, T_a 为标幺化的气动转矩; T_e 为标幺化电磁转矩; ω 为转速信号。

风电机组气动载荷吸收函数为非线性函数, 在选定研究点 (v_0, ω_0, β_0) 处, 可进行函数线性化处理, 现以 ω_0 为自变量进行线性化, 式(1)可化为

* 基金项目: 国家电网公司科技项目 (SGTYHT/22-JS-226); 国家重点研发计划项目 (2021YFB2400500)

收稿日期: 2023-12-08

$$J_{\text{sum}}\omega_0 \frac{d\Delta\omega}{dt} = \Delta P_a - \Delta P_e \quad (2)$$

其中, P_a 为风轮吸收功率; P_e 为电功率。现假定风能利用系数为设计值 $C_{\rho 0}$, 则有计算公式为

$$\Delta P_a = 1.5\rho\pi R^2 C_{\rho 0} v_0^2 \Delta v \quad (3)$$

电机控制转矩一般表示为 $T_e = k_{\text{opt}}\omega^2$, 则电机功率变化率以 ω_0 为自变量的线性化表达式可写为

$$\Delta P_e = 3k_{\text{opt}}\omega_0^2 \Delta\omega \quad (4)$$

其中, ρ 为空气密度; R 为风轮半径; k_{opt} 为最优转矩系数。故此, 风速变化率与电机转速变化率之间有如下传递函数关系为

$$\frac{\Delta\omega(s)}{\Delta v(s)} = \frac{0.5\rho\pi R^2 C_{\rho 0} v_0^2 / (k_{\text{opt}}\omega_0^2)}{1 + sJ_{\text{sum}} / (3k_{\text{opt}}\omega_0)} \quad (5)$$

式(5)是标准的带增益的一阶低通滤波器传递函数表达式, 时间常数为 $J_{\text{sum}} / (3k_{\text{opt}}\omega_0)$, 传递函数有唯一负特征根, 故此, 常规控制是稳定的。现时间常数 J_{sum} 为一个较大值, 且随着风轮直径的变大, 惯量会进一步增加。此时不可避免地产生控制延时, 影响最优跟风。

从叶片物理气动特性上研究, 当叶尖速比 λ_{opt} 为设计定值时, 风能吸收率最大, 偏离这个设计定值, 都会造成一定的吸收能力下降。因此当风速波动较快时, 风轮由于惯量存在, 转速不能跟随风速变化, λ_{opt} 不可能保持不变, 发电量损失明显。

由式(4)和式(5)可知, 功率与风速的传递函数为

$$\frac{\Delta P_e(s)}{\Delta v(s)} = \frac{1.5\rho\pi R^2 C_{\rho 0} v_0^2}{1 + sJ_{\text{sum}} / (3k_{\text{opt}}\omega_0)} \quad (6)$$

式(6)中的传递函数结构与式(5)相同, 其物理意义为, 大叶片机组的大惯量导风轮转速跟风效果较差, 风轮对风速波动具有较好低通滤波效果, 使得机组功率输出平稳, 但不利于风能吸收。

2 惯性补偿策略开发

随着机组 4 MW、5 MW 的出现, 最优转矩控制应用于不断增大的叶轮直径的大型风电机组时, 由于机组惯量巨大, 机组转速动态跟踪最优叶尖速比严重滞后, 此时表现为叶尖速比脱离设计定值 λ_{opt} 过大, 采集数据表现为实际测量叶尖速比以设计最优叶尖速比为中心的带状分布变宽。当然, 因风速的波动性和叶轮的惯性, 带宽不可能被缩减为 0, 合理缩减带宽宽度是提高跟随能量, 增加发电效率的设计目标。

2.1 惯量消减算法设计及传函特性分析

假设能估算出气动转矩, 则可给转矩控制以提前跟踪的控制量, 从而绕过风轮转速变化受惯性的滞后影响, 加快转速跟踪动态过程。现假设 \hat{T}_a 为气动转矩估计值, 电机转矩控制的转矩给定值可表示为

$$T_e^* = k_{\text{opt}}\omega^2 - K_A(\hat{T}_a - k_{\text{opt}}\omega^2) \quad (7)$$

式中, K_A 为比例系数, \hat{T}_a 为气动转矩估计值。

考察式(7), 当估计转矩等于最优跟踪转矩时, 表明传动处于稳定状态, 此时式(7)等同于最优跟踪公式。当估计转矩大于最优跟踪转矩时, 电机给定转矩减小, 此时在传动链风轮侧扭矩大于电机, 导致转速相对提前上升, 达到快速跟随最优尖速比的目的。反之, 风速变小, 电机侧转矩相对增大, 使转速快速降低, 从而快速接近最优尖速比。

式(7)两边同时乘以转速 ω , 并进行工作点上线性化得到如下公式为

$$\Delta P_e = (1 + K_A)3k_{\text{opt}}\omega_0^2 \Delta\omega - 1.5\rho\pi R^2 C_{\rho 0} v_0^2 M \Delta v \quad (8)$$

由式(2)、式(3)和式(8)得此时的转速风速传递函数为

$$\frac{\Delta\omega(s)}{\Delta v(s)} = \frac{(1 + K_A)3k_{\text{opt}}\omega_0^2 \Delta\omega - 1.5\rho\pi R^2 C_{\rho 0} v_0^2 M \Delta v}{1 + s \frac{J_{\text{sum}}}{K_A + 1} \cdot \frac{1}{3k_{\text{opt}}\omega_0}} \quad (9)$$

上式对比式(5), 传递函数仍然为一阶低通滤波器基本形式, 但惯性时间常数由 $J_{\text{sum}} / (3k_{\text{opt}}\omega_0)$ 变为 $\frac{J_{\text{sum}}}{K_A + 1} \cdot \frac{1}{3k_{\text{opt}}\omega_0}$, 其时间常数缩小了 $K_A + 1$ 倍。此时系统延时得以改善。

对式(8)做转速向功率的变形推导, 得风速与功率之间的传递函数为

$$\frac{\Delta P(s)}{\Delta v(s)} = 1.5\rho\pi R^2 C_{\rho 0} v_0^2 \frac{1 - s \frac{K_A J_{\text{sum}}}{K_A + 1} \cdot \frac{1}{3k_{\text{opt}}\omega_0}}{1 + s \frac{J_{\text{sum}}}{K_A + 1} \cdot \frac{1}{3k_{\text{opt}}\omega_0}} \quad (10)$$

由式(10)可知, 其为单零点单极点传递函数, 已不再具有单一的一阶低通特性。此传递函数会对高频风速变化进行响应。在快速跟踪最优叶尖速比的同时, 增加功率波动。

2.2 快速跟随控制器的发电功率平稳性改进

对惯性进行补偿的改进最优功率跟踪算法会提高跟风速度, 但由 10 式可知, 此传递函数会过多响应风速中高频波动成分, 造成发电功率的波动。现根据标准规定的典型的 Van de Hoven 自然风能频谱提供的信息, 0.5 Hz 以上的风速波动部分所含能量极少, 这为控制器进一步改造, 提供了依据。控制器改造可以不响应 0.5 Hz 以上的高频风速分量。从而既避免功率剧烈波动, 同时又快速响应能量集中的低频风速变化分量, 达到快速跟踪的效果。

为实现上述双重优化的控制效果, 在快速跟随控制器中风速频率选择性过滤控制, 整体控制器运行结构如图 1 所示。图 1 是带滤波器的改进转矩控制策略, 其中 M 为比例系数, $G(s)$ 为低通滤波器, \hat{T}_a 为气动转矩估计值。

需要说明的是, 以 0.5 Hz 为界限选择风速通过频率是基于通用风频能量谱为设计依据, 但在具体工程项目中, 更有针对性和实用价值的是采集风场当地风速, 做特

定风场风能量频谱图。用于确定 $G(s)$ 传函的通过频率。

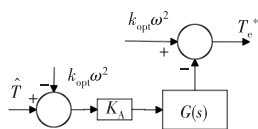


图 1 带风频选择的惯性补偿最优控制器框图

其中, $G(s)$ 的传递函数具体形式可以是最简单的一阶低通滤波器。计算公式为

$$G(s) = \frac{1}{1 + \tau s} \quad (11)$$

深入分析图 1 的系统特性可知, 稳态风速时, $\hat{T}_a = k_{opt}\omega^2$, 新系统与最优转矩控制效果相同, 风速低频区间仍然保留原最优转矩控制特性。中频段系统体现惯性补偿的快速跟风特性, 高频段响应被截止。

将改进系统进行工作点线性化处理, 可得转速风速变化率传函为

$$\frac{\Delta\omega(s)}{\Delta v(s)} = \frac{1.5\rho\pi R^2 C_{\rho 0} v_0^2 (\tau s + 1)}{J_{sum}\omega_0\tau s^2 + (\frac{J_{sum}}{K_A + 1}\omega_0 + 3k_{opt}\omega_0^2\tau)s + 3k_{opt}\omega_0^2} \quad (12)$$

应用同样方法, 可得风速到功率的传递函数为

$$\frac{\Delta P(s)}{\Delta v(s)} = 1.5\rho\pi R^2 C_{\rho 0} v_0^2 \cdot \frac{3k_{opt}\omega_0^2 + (3k_{opt}\omega_0^2\tau - J_{sum}\omega_0\frac{K_A}{K_A + 1})s}{J_{sum}\omega_0\tau s^2 + (\frac{J_{sum}}{K_A + 1}\omega_0 + 3k_{opt}\omega_0^2\tau)s + 3k_{opt}\omega_0^2} \quad (13)$$

由式(12)可知, 此传函是 2 阶系统。代入由风电机组具体参数可知, 方程各项系数非负, 系统是稳定的。本控制传递函数特性。

1) 一对零极点接近, 函数具有一阶低通滤波特性。

2) 当 $K_A = 0, \tau = 0$ 时退化为最优转矩控制。当 $K_A > 0$ 时, 其提高了机组对中低频风的动态跟踪能力。

3) 当 $K_A > 0$ 而 $\tau = 0$ 时退化为式(9)。当 $\tau > 0$ 时可抑制由于 $K_A > 0$ 所激发的高频风速的响应。

考察式(13)可知, 此传函为带零点的二阶系统。

此传递函数在合适参数情况下具有。

1) 相对于式(6), 提高对中低频风的幅频响应特性;

2) 相对于式(10), 实现了对高频风幅频响应的削弱控制。

2.3 估计转矩的输入的实现

估计转矩输入量的精确估算是惯性补偿算法成功的关键, 气动转矩估计最好的获得方案为利用有效的测量量如电机转速、电机功率, 配合风机模型进行机组实时数字孪生, 孪生的数字量之一即为估计气动转矩。因篇幅所限, 在此不作展开, 此处简化为利用简化传动链模型和电机加速度进行简单估算。气动转矩经传动链变比换算和

电机实测转矩之差, 为提供整个传动系统加速的动力。电机转矩可以实测得到, 电机转速也能够实时测得, 整个传动系统惯性常数由机组设计数据可以得到, 故此实时气动转矩的估计值为电机转矩实时值和电机加速力矩之和, 而电机加力矩为电机加速度与传动链惯性矩的乘积。为避免滞后和采样干扰信号影响, 设计转矩估算 PI 控制过程。整个实现过程如图 2 所示。

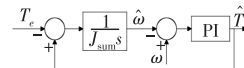


图 2 转矩估算实现过程

3 实例仿真与系统分析

现以某 4.5 兆瓦 165 m 风轮直径的风电机组关键参数为实例, 对上述控制算法进行验证及系统性能评估。图 3 为风速变化到转矩变化的 3 种系统传递函数幅频特性曲线。其中函数 sys1 为 $K_A = 0, \tau = 0$ 时机组做常规最优转矩控制转速频率响应曲线; 函数 sys2 为 $K_A = 0.4, \tau = 0$ 时机组快速跟踪控制转速频率响应曲线; 函数 sys3 为 $K_A = 0.4, \tau = 6$ 时机组优化快速跟踪控制转速频率响应曲线。由频率特性可知, 改进后的快速跟踪控制在低频区转速频率响应特性与常规最优转矩控制响应特性相同, 中频区改进后的快速跟踪控制频率响应幅度高于常规控制, 到高频区时改进后的快速跟踪控制又重新回到接近常规控制响应特性的幅度。改进后的快速跟踪控制这种频率特性的改变, 正是我们需要的对中频变化的风速快速响应以获得良好的跟踪效果, 对高频变化的风速进行抑制, 以换取转速的输出的平稳性。

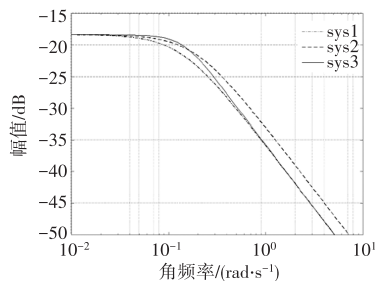


图 3 转速传递函数幅频特性曲线

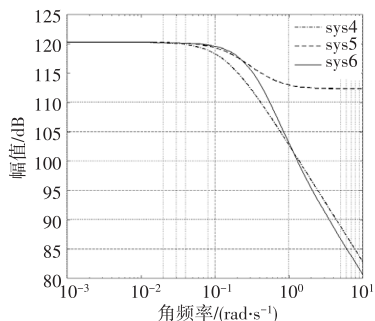


图 4 功率传递函数幅频特性曲线

图 4 为风速变化到功率变化的 3 种系统传递函数幅频特性曲线。其中函数 sys4 为 $K_A = 0, \tau = 0$ 时常规最优转

矩控制功率频率响应曲线;函数 sys5 为 $K_A = 0.4, \tau = 0$ 时机组快速跟踪控制功率频率响应曲线;函数 sys6 为 $K_A = 0.4, \tau = 6$ 时机组优化快速跟踪控制功率频率响应曲线。由频率特性可知,传递函数 sys4、sys5、sys6 在低频区功率频率响应特性相同;中频区传递函数 sys5、sys6 均高于 sys4 常规最优转矩控制功率响应幅值;而高频区传递函数 sys6 的响应远低于 sys5,在风速变化频率较高时甚至低于 sys4 常规最优转矩控制响应值。

图 5 为 3 种控制方案在 bladed 软件中实际输出功率的对比,其中,仿真风速为同一风种子。由图 5 可知,改进快速跟踪系统和快速跟踪系统较常规最优跟踪系统发电量都有所提升;快速跟踪系统因响应高频风速波动分量,导致功率波动较大,此控制不可避免地响应了部分非风速高频变化的干扰信号,导致发电量较改进快速跟踪系统并未大幅提升。经发电量统计分析,在最优发电风速段(实例机型 4.5 m/s 至 8 m/s 风速段),风文件湍流度选择 14% 情况下,快速跟踪系统较常规最优发电系统发电量提升在 1.87% 附近,而改进快速跟踪系统发电量提升在 1.65% 附近。综合功率波动情况评估,改进快速跟踪系统较其他两个控制系统优势明显。

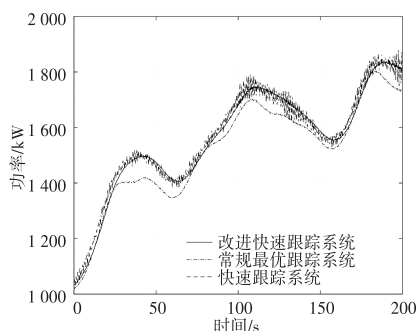


图 5 仿真输出功率比较

4 结束语

通过最优转矩控制算法结构的调整,引入估计气动转矩的控制输入量,完成了有惯性补偿功能的快速跟踪最优转矩控制算法的开发;实现了应对风轮惯量不断增加的最优叶尖速比快速跟随的目的,使风电机组发电量最优风速段的风能利用率得以提升。通过风频谱图中含能的变化规律的考量,进一步改进了快速跟踪系统设计,实现了抑制高频波动的改进快速跟踪最优转矩控制策略,改进了快速跟踪带来的输出功率波动。完成了快速跟风和电能质量双目标控制。传递函数 bode 图特性表明系统的中频风速段响应能力提高显著,高频风速段的响应得以抑制。实验结果显示,新系统能提升最优发电风速段 1.6% 的发电量。

参考文献

[1] 隆萍, 刘兴, 莉冯煜. 基于大型海上风力发电机组及关键部件可靠性验证技术[J]. 自动化与仪器仪表, 2021(12): 164-166.

[2] 常东旭, 吴宁, 刘辛裔, 等. 基于物理约束的风电场主动支撑策略研究[J]. 现代电力, 2021, 38(5): 554-560.

[3] 朱博, 束洪春, 吴水军, 等. 风电调频补偿水锤效应的频率特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(2): 65-76.

[4] 刘栋, 王景丹, 卢晓光. 基于数据驱动的偏航偏差辨识及控制优化[J]. 自动化与仪表, 2022, 37(10): 30-34.

[5] 张露江, 汤会增, 张利, 等. 大型风机风向补偿算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(19): 98-112.

[6] 田昕. 风电机组整机多目标协调优化控制[D]. 上海: 上海交通大学, 2020.

[7] SONG D, YANG J, SU M, et al. A comparison study between two MPPT control methods for a large variable-speed wind turbine under different wind speed characteristics[J]. Energies, 2017, 10(6135) 1598-6446.

[8] 程雪婷, 张家瑞, 刘新元, 等. 考虑风机排序的风电集群分层有功控制策略[J]. 电力工程技术, 2021, 40(2): 26-32, 85.

[9] 卢晓光, 李风格. 基于数字孪生的风机实时载荷预估研究[J]. 机械与电子, 2021(6): 24-28.

[10] 刘文元, 任必兴, 李海峰, 等. 直驱风电场和串补之间的次同步振荡风险[J]. 电力工程技术, 2022, 41(4): 25-32.

[11] 刘一民, 郑少明, 董鹏, 等. 新能源发电设备接入的电磁暂态仿真研究[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(1): 161-165.

[12] 雷添翔, 律方成, 刘教民, 等. 双馈风力发电机组惯量阻尼特性与改进附加频率控制策略[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(4): 190-196.

[13] 李红刚, 王红庆, 蒋成博, 等. 新能源主动支撑电网能量获取及调配策略研究[J]. 机械与电子, 2021(7): 33-38.

[14] 王鹏飞, 马小珍, 何丽娟, 等. 大规模清洁能源接入下的电力系统安全自动监测系统[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(1): 61-65.

作者简介: 廖丹莲(1982—), 女, 高级工程师, 研究方向: 特高压直流输电。

通信作者: 卢晓光(1983—), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 从事机电一体化方向设计与研发的工作。