

基于灰色预测模型的风机机侧控制研究

王洋 迟耀丹 杨浩远 林广彬 邢晓柯 林国雄
(吉林建筑大学电气与计算机学院)

摘要: 随着科技与技术的更新迭代,对能源的需求呈现出日益增长的态势,世界各地把注意力投入到风力发电产业中,风速的时变性和不确定性使得最大风能利用率难以实现。因此,本文针对永磁直驱风力发电机机侧控制系统,提出灰色预测对PI模块进行控制反馈的方法,利用灰色预测方法提高跟踪速度,构建灰色预测PI控制和永磁直驱风力发电机结合的仿真模型。结果表明,灰色预测PI控制的响应速度更快、有功输出更高。

关键词: 永磁直驱风力发电机; 灰色预测PI控制; 最大风能利用系数; 有功功率

2025.06.DQGY
24

0 引言

由于碳达峰、碳中和概念的普及,新能源受到越来越多的重视,风能作为新能源的一种,也在逐渐得到广泛关注。由于风速的随机性,导致风力所产生的电能不稳定,很难并入到人们日常生活所使用的电网中。此外,环境等不确定因素也会使得风能利用率有所降低,能源产出有所减少。由此,研究如何提高风机的响应速度有重要意义。文献[1]综述了风力发电的现状和未来发展趋势。文献[2]针对永磁直驱风力发电机机侧变流器交直流电压值不匹配问题提出输出电压的控制策略。文献[3]对风力发电系统采用了变步长爬山法的控制方法,达到最大功率点跟踪的控制。文献[4]研究了永磁直驱风力发电机机侧控制原理。文献[5]将灰色预测与模糊PID结合实现风机叶片变桨距优化控制。文献[6]基于风力发电的最大功

率点跟踪进行了仿真实验。

本文基于永磁直驱风力发电机系统,提出了灰色预测与PI控制器相结合的方法,对传统风机模型进行反馈和改进,并与常规PI控制进行对比,提高风能转换装置的性能和效率。

1 永磁直驱电机的数学模型

永磁直驱电机的定子采用三相对称的绕组设计,并根据发电机的惯例来确定各物理量的正方向,如图1展示的是两极永磁同步电机的结构图。针对永磁直驱风力发电机,提出以下的基础假设:

- 1) 定子和转子的感应电动势和磁场呈正弦分布。
- 2) 在忽略定子铁心饱和效应的同时,将磁路视为线性系统进行处理。
- 3) 不考虑铁心涡流和磁滞损耗。

基金项目:吉林省科技发展计划项目(20240304183SF)。

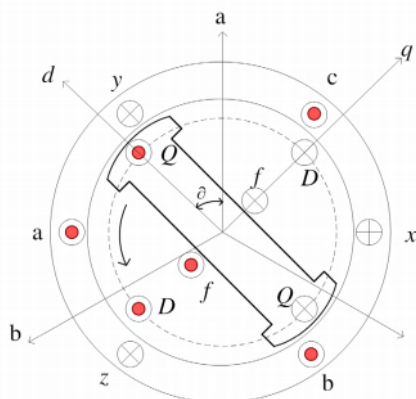


图1 两极永磁同步电机结构图

针对永磁直驱风力发电机，构建一个基于 dq 轴的数学模型，该模型旨在深入分析永磁同步电机在稳态与暂态条件下的运行特性。

$$u_d = \frac{d\psi_d}{dt} - \omega_e \psi_q + r_s i_d \quad (1)$$

$$u_q = \frac{d\psi_q}{dt} - \omega_e \psi_d + r_s i_q \quad (2)$$

$$\psi_d = L_d i_d + \psi_f \quad (3)$$

$$\psi_q = L_q i_q \quad (4)$$

式中， u_d, u_q 为 d, q 轴电压； i_d, i_q 为 d, q 轴电流； L_d 为定子直轴电感； L_q 为永磁体励磁磁链； ψ_d, ψ_q 为 d, q 轴磁链； ω_e 为电角速度； r_s 为定子相电阻。

电机电磁转矩方程为：

$$T_e = 3p(\psi_d i_q - \psi_q i_d) / 2 \quad (5)$$

机械运动方程为：

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = T_L - T_e \quad (6)$$

式中， J 为机组的等效转动惯量； T_e 为电磁转矩； ω_r 为发电机转子的机械转速，它与电角速度 ω_e 的关系式为 $\omega_e = p\omega_r$ ； p 为电机的极对数。

2 风力机动力学特性

风力机作为风力发电机的核心输入系统，其功能

是将自然界中的风能转化为叶片旋转的机械能，进而驱动发电机进行电力生产。实现最大风能的利用系数需要做出如下假设：

风能完全且平均地覆盖在叶片上，风力和叶片之间没有摩擦损耗，叶片旋转时没有能量丢失。风力机的动力学特性如下：

$$E = mv^2 / 2 \quad (7)$$

式中： v 为风速； m 为空气质量。

假设空气密度为 ρ ， S 为叶片的旋转面积，则空气质量 m 为：

$$m = \rho Sv \quad (8)$$

由此在理想条件下，风力机吸收的最大功率

P_{\max} 为：

$$P_{\max} = 8\rho Sv^3 / 27 \quad (9)$$

定义风能利用系数为：

$$C_p = \frac{P}{\rho Sv^3 / 2} \quad (10)$$

将式 (9) 代入到式 (10) 时，可以推导出最大风能利用系数 $C_{p\max}$ 为：

$$C_{p\max} = \frac{P_{\max}}{\rho Sv^3 / 2} \approx 0.593 \quad (11)$$

风能利用系数是衡量风力发电机性能的一个重要指标，它直接反映了发电机风轮扫掠面积内风能量转化为电功率的效率。在理论上的最优条件下，风力发电机的最大风能利用系数能够达到 0.593，这代表了能量转换的极限效率。但由于实际的影响因素，比如转轴间的摩擦、风吹到叶片的不均匀受力和电能的传输损耗等情况，导致实际情况中风能利用效率有所降低。

同时， C_p 也可以用下式来表示：

$$\begin{cases} C_p(\lambda, \beta) = 0.5176 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) \\ e^{\frac{-21}{\lambda_i} + 0.0068\lambda} \\ \frac{1}{\lambda_i} = \left(\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \right)^{-1} \end{cases} \quad (12)$$

式中, β 为桨叶节距角, λ 为叶尖速比。

不同的风速条件下, 都会有相应的最佳叶尖速比值, 当风力机快速且稳定地保持在最佳叶尖速比时, 会达到最大功率点跟踪的效果, 之后不论增大还是减小叶尖速比, 风能利用系数都会受到影响而降低。

此外, 桨叶节距角的变化也是一个关键因素。不同的桨叶节距角会直接导致叶尖速比的数值发生变化, 进而影响风能利用系数的表现。本文为了研究最大风能利用率, 将桨叶节距角取 0。

3 永磁直驱风力发电机机侧变流器的结构

图 2 展示机侧变流器所采用的矢量控制策略, 该策略核心在于构建一个由功率外环与电流内环组成的双闭环控制系统。其中, 功率外环负责监测并调节输出功率, 确保其符合设定要求; 而电流内环则紧密跟踪电流指令, 实现电流的精确控制, 以确保系统的动态响应与稳定性。

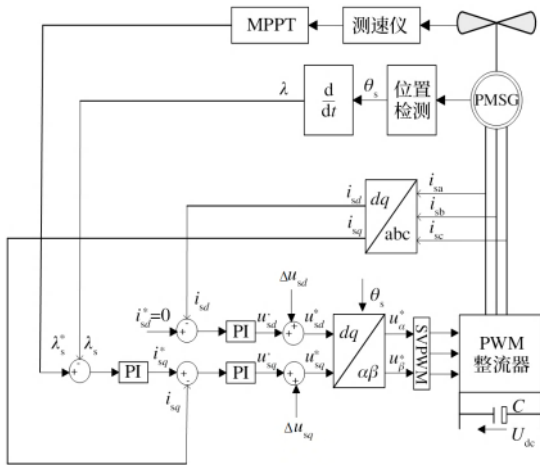


图 2 机侧变流器矢量控制图

q 轴: 在给定风速条件下, 通过计算得到的最优叶尖速比值被用来确定风力机能够输出的最大功率, 这一功率值被设定为外环功率控制的参考基准。随后, 该参考值与发电机实际产生的有功功率进行实时

对比, 根据计算得到的差值经过 PI 控制器的调节得到有功电流参考值 i_{sq}^* 。将参考值与实际的 q 轴电流做比较, 产生的差值经过 PI 调节得到 u'_{sq} , 然后将输出值与解耦得到的 Δu_{sq} 相加, 得到用于控制电磁转矩的 q 轴调制电压。

d 轴: 电流初始值 $i_{sd}^*=0$ 。将初始值与实际 d 轴电流进行比较, 差值经 PI 调节得 u'_{sd} , 然后与解耦得到的 d 轴分量 Δu_{sd} 相加, 得到 d 轴调制电压。如此, 得到 dq 轴两个调节电压, 经 dq 到 $\alpha\beta$ 变换, 得到 u_{α}^* 和 u_{β}^* , 这一转换步骤是为了与电机侧变换器的实际输出相匹配。

最后, 采用 SVPWM 方法, 基于 $\alpha\beta$ 坐标系下的电压值, 生成相应的 PWM 波形。这些 PWM 波形随后被用于控制电机侧变换器, 实现对电机电磁转矩和磁链的精确控制。

4 灰色预测 PI 控制器设计

将灰色预测引入到机侧变流器 PI 控制模块中, 形成反馈。图 3 为灰色预测 PI 控制系统原理图, 可以通过已知数据 $x^{(0)}$ 进行预测, 将其结果与累加数据 $\hat{x}^{(1)}(k)$ 做差得到下一个未知数据 $\hat{x}^{(0)}(k+1)$, 输入到 PI 控制环节中, 来减小超调量, 提高控制效果。

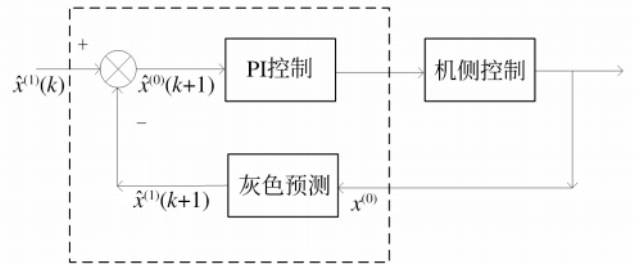


图 3 灰色预测 PI 控制原理图

算法原理如下所示:

首先, 有一个已知的数据序列:

$$x^{(0)} = \begin{pmatrix} x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \\ x^{(0)}(3), \dots, x^{(0)}(n) \end{pmatrix} \quad (13)$$

1) 对已知数据进行一次累加得到 $x^{(1)}$:

$$x^{(1)} = \begin{pmatrix} x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \\ x^{(1)}(3), \dots, x^{(1)}(n) \end{pmatrix} \quad (14)$$

$$x^{(1)}(1) = x^{(0)}(1), x^{(1)}(2) = x^{(1)}(1) + x^{(0)}(2) \\ \dots, x^{(1)}(n) = x^{(1)}(n-1) + x^{(0)}(n)$$

所以:

$$x^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k x^{(0)}(i) \quad (15)$$

式中, $k=1,2,3, \dots, n_0$

2) 生成 $x^{(1)}(k)$ 的预测数列:

$$z^{(1)}(k) = [x^{(1)}(k) + x^{(1)}(k-1)] / 2 \quad (16)$$

式中, $k=2,3, \dots, n_0$

3) 根据已知数据和预测数列来建立 $x^{(1)}$ 灰微分方程:

$$x^{(0)}(k) + \hat{a}z^{(1)}(k) = \hat{u} \quad (17)$$

式中, $k=2,3, \dots, n_0$. \hat{a} 、 \hat{u} 分别为发展系数和灰色作用量, 这两个参数用于计算最小化误差的平方和, 从而找到与给定数据最匹配的函数。通过最小二乘法来求取 \hat{a} 、 \hat{u} , 从而得到 $x^{(0)}$ 的预测值。

4) 将 \hat{a} 、 \hat{u} 参数构成矩阵 $Y=BU$ 进行求解:

$$B = \begin{pmatrix} -(x^{(1)}(2) + x^{(1)}(1))/2 & 1 \\ -(x^{(1)}(3) + x^{(1)}(2))/2 & 1 \\ \dots & \dots \\ -(x^{(1)}(n) + x^{(1)}(n-1))/2 & 1 \end{pmatrix} \quad (18)$$

$$Y = \begin{pmatrix} x^{(0)}(1) \\ x^{(0)}(2) \\ \dots \\ x^{(0)}(n) \end{pmatrix} \quad (19)$$

从而求出 $(Y-BU)^T(Y-BU)$ 的估计值 $\hat{u} = [\hat{a}, \hat{u}]^T = (B^T B)^{-1} B^T Y$, 再代入一组数据求得 \hat{a} 。

5) 构建一阶常微分方程来求解拟合曲线的函数表达式和相应的 GM(1, 1) 的白化方程:

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + \hat{a}x^{(1)} = \hat{u} \quad (20)$$

6) 将参数 \hat{a} 、 \hat{u} 的值代入式(20), 得到响应函数:

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = \left(x^{(0)}(1) - \frac{\hat{u}}{\hat{a}} \right) e^{-\hat{a}k} + \frac{\hat{u}}{\hat{a}} \quad (21)$$

式中, $k=0,1, \dots, n$, k 大于 n 则为预测值。

下一个预测数据为:

$$\hat{x}^{(0)}(k+1) = \hat{x}^{(1)}(k+1) - \hat{x}^{(1)}(k) \quad (22)$$

图 4 和图 5 为灰色预测 PI 控制和常规 PI 控制在仿真中的比较。通过 Matlab 中的 Simulink 进行仿真模块的搭建, 得到如下情况。

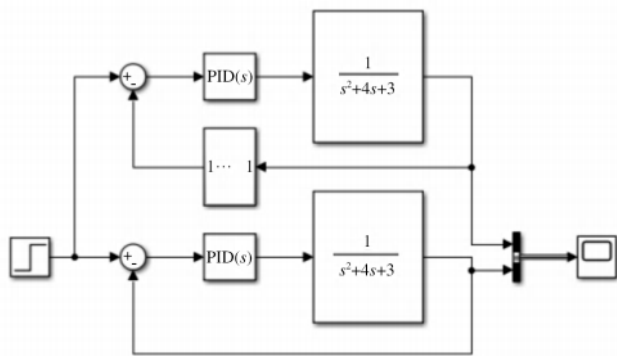


图 4 灰色预测 PI 控制与常规 PI 控制仿真图

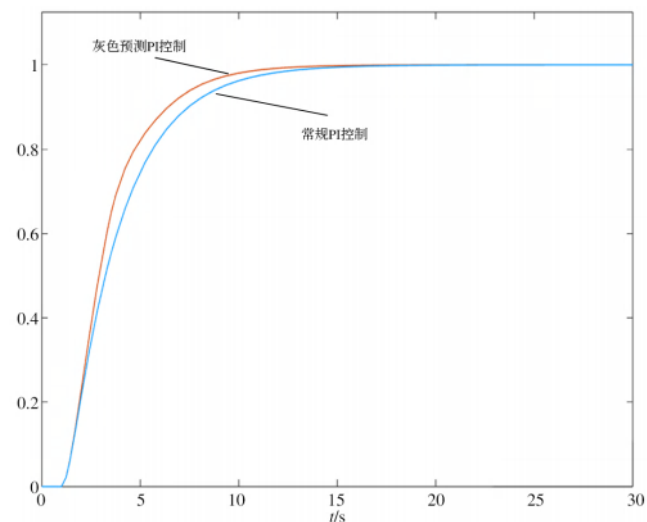


图 5 灰色预测 PI 控制与常规 PI 控制对比

从上述的仿真结果对比中, 可以明显观察到采用灰色预测 PI 控制的系统相较于常规 PI 控制系统展现出

更快的响应速度。这一发现表明，灰色预测机制的有效集成使得控制算法能够更前瞻性地预测系统行为，从而更快地调整控制输入，以达到期望的系统状态。

本文运用 Matlab/Simulink 仿真软件成功建立了上述永磁直驱风力发电机的仿真模型，为了探索不同控制策略对系统性能的影响，分别采用常规 PI 控制算法与结合灰色预测理论的 PI 控制算法来调整系统结构。随后，通过对这两种控制方案下的仿真结果进行详细比较，旨在深入分析并评估它们各自在改善系统动态响应、提高稳定性及优化性能方面的表现。

系统部分参数：控制风速在切入风速和切出风速之间，叶片半径为 14m，桨距角 $\beta=0$ ，频率 50Hz，转动惯量 $J=60\text{kg}\cdot\text{m}^2$ ，空气密度为大气密度，额定功率为 300kW，仿真时间为 0.3s。

两种控制方法的最大风能利用系数由图 6 可知，在风速为 12m/s 的控制条件下，常规 PI 控制有比较大的波动，在 0.022s 处才有所收敛，灰色预测 PI 控制在 0.015s 就有所反应，虽然两者最后达到最大风能利用系数的值相同，但灰色预测 PI 控制波动幅度受影响更小。

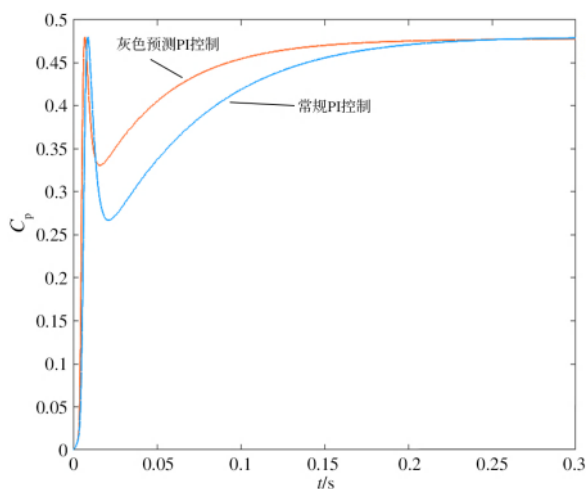


图 6 最大风能利用系数曲线对比

从图 7 可以看出该风速下不同控制方式所产生的

有功输出的值。其中，灰色预测 PI 控制有功输出相对较多，常规 PI 控制的有功功率相对减少，且波动幅度较不稳定。

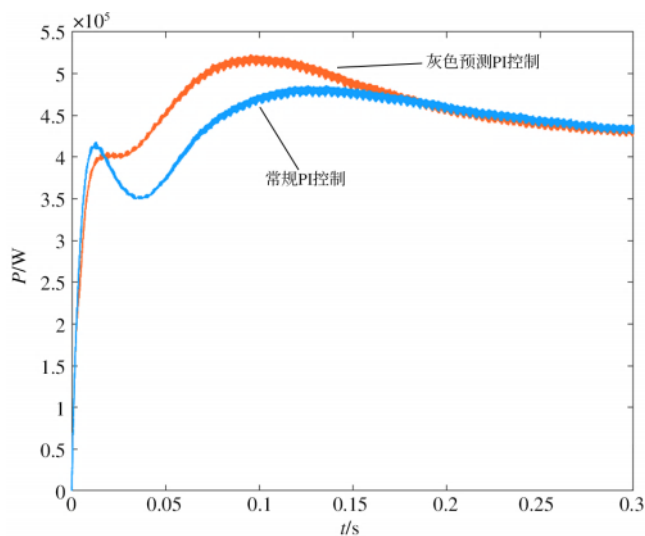


图 7 有功功率曲线对比

风力发电机 d 轴电流值的变化规律曲线如图 8 所示，由于电流初始值 $i_{sd}^*=0$ ，不同的控制方式会对 d 轴电流收敛到 0 的速度有所影响。其中，常规 PI 控制恢复到 0 的速度为 0.165s，灰色预测 PI 控制为 0.108s，说明灰色预测 PI 控制的精度更高。

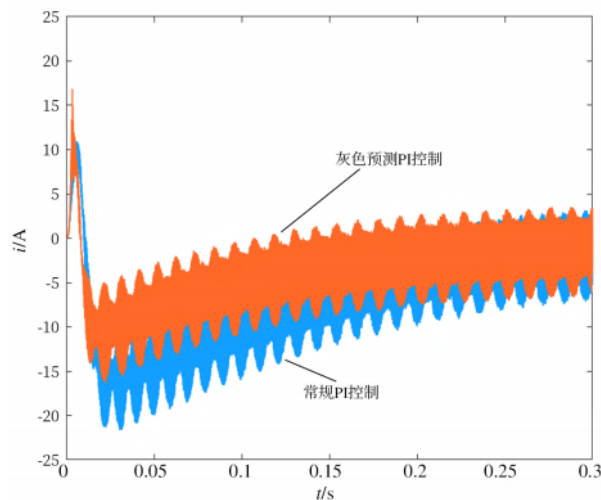


图 8 i_d 曲线对比

(下转第 35 页)

(上接第 28 页)

总而言之,只要输入风速满足该风机的有效风能区间值内,灰色预测PI控制的鲁棒性和跟踪效果都更好。

5 结束语

本文提出PI控制与灰色预测模型相结合的方法,运用到永磁直驱风力发电机机侧模型上,进行灰色预测PI控制与常规PI控制的仿真对比实验,验证了灰色预测PI控制有更好的稳定性与可行性。

本文仍存在一些问題,没有研究随机风速下最大风能利用率的变化情况。没有探讨实际应用时所产生的相关问题,比如误差等因素。

参考文献

[1] 王伟刚. 新能源风力发电的研究综述 [J]. 电工技

术, 2024 (4): 49-52.

- [2] 王淑玉, 罗振鹏, 张思清, 等. 永磁直驱风力发电机输出电压控制策略 [J]. 微电机, 2022, 55 (1): 71-75.
- [3] 许素玲. 基于双 PWM 变流器的风力发电系统控制策略仿真研究 [J]. 电工技术, 2023 (12): 26-29.
- [4] 林立, 何洋, 周建华, 等. 直驱永磁同步风力发电机侧系统建模及仿真 [J]. 电气传动, 2020, 50 (2): 73-76.
- [5] 戴文俊, 蒋慧, 胡艳丽. 灰色预测模糊 PID 控制器在风电机组变桨距控制中的应用 [J]. 长春工业大学学报, 2023, 44 (2): 141-146.
- [6] 鲁闯, 朱东柏, 沈中元, 等. 直驱风力发电系统 MPPT 控制方法的研究 [J]. 电测与仪表, 2008 (8): 61-64.

(收稿日期: 2024-09-03)