

基于扩张状态观测的永磁直驱风力发电系统 MPPT 自适应滑模控制

茅靖峰, 吴爱华, 吴国庆, 张旭东, 吴国祥

(南通大学电气工程学院, 江苏 南通 226019)

摘要: 为了提高永磁直驱风力发电系统的发电工作性能, 针对风速波动范围宽和不确定强的最大功率跟踪 (MPPT) 控制特点, 应用滑模控制理论和扩张状态观测器方法, 设计了一种基于最佳叶尖速比 (TSR) 控制策略的最大功率跟踪自适应积分滑模控制器。控制器采用基于最佳转速跟踪偏差的积分型滑模面函数结构, 确保转速跟踪控制稳态无静差。利用扩张状态观测器对风力机实时机械转矩进行估计, 以获得转矩扰动上界的估计值。同时引入非线性幂次组合函数和转速跟踪偏差负反馈环节, 构造基于状态偏差的滑模变速趋近律, 使得切换增益具有随最佳转速跟踪偏差实现自适应调整的特性, 并可有效抑制滑模控制输出的抖振。通过与智能 PID 控制器相比较的仿真实验, 验证了该控制器实现最大功率跟踪控制的良好效果, 具有较强的鲁棒性和适应性。

关键词: 风力发电系统; 永磁同步发电机; 最大功率跟踪; 滑模控制; 扩张状态观测器; 自适应控制

Adaptive sliding mode MPPT control for PMSG-based wind energy conversion systems based on extended state observer

MAO Jing-feng, WU Ai-hua, WU Guo-qing, ZHANG Xu-dong, WU Guo-xiang
(School of Electrical Engineering, Nantong University, Nantong 226019, China)

Abstract: This paper presents a novel maximum power point tracking (MPPT) control strategy for direct-driven permanent magnet synchronous generator (PMSG) based on wind energy conversion systems (WECS). Considering wind energy's drastically nonlinear and uncertainty features, the proposed control strategy adopts wind turbine's optimum tip speed ratio (TSR) tracking algorithm to achieve maximum energy conversion efficiency, and implements an extended state observer (ESO) of the wind turbine aerodynamic torque with an adaptive sliding mode control (SMC) method to realize high tracking performance for the optimum TSR. The integral term in the sliding mode surface function can ensure the TSR tracking control without steady error. The wind turbine aerodynamic torque can be evaluated exactly by the ESO which increases the determinacy of wind power disturbance in MPPT control system. Due to the new reaching-law algorithm designed by power combination function and optimum speed tracking error negative feedback loop, the gain of the switch function is granted the capability of automatic adjust with TSR tracking error, and the chattering amplitude can be progressively damped. Simulation results show that the proposed controller has a better stability, adaptability and robustness compared with that of intelligent PID controller.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61004053 and No. 61273151).

Key words: wind energy conversion systems; permanent magnet synchronous generator; maximum power point tracking; sliding mode control; extended state observer; adaptive control

中图分类号: TM614; TP273

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2014)18-0058-08

0 引言

永磁直驱风力发电系统省去了双馈型风力发电

基金项目: 国家自然科学基金 (61004053, 61273151); 江苏省自然科学基金 (BK20141238); 江苏省高校青蓝工程资助项目; 江苏省高校研究生科研创新计划项目 (CX13-681); 南通市应用研究计划项目 (BK2012009, BK2013062)

系统中的精密齿轮箱、电刷和滑环等机械易损部件, 具备了机械结构简单、运行可靠、发电效率高、摩擦损耗小、噪音低、装机容量大、便于维护等突出特点, 已逐渐成为风力发电装备研究和制造应用领域中的热点^[1-4]。

针对大、中型永磁直驱风力发电系统, 由于其旋转主轴的转动惯量较大、风力机的性能参数明确, 因此常采用最佳特性曲线方法进行额定风速以下运

行时的最大功率跟踪 (MPPT) 控制^[5-8]。该方法的关键是要求发电机的机械输出能够快速准确地跟随实时变化的最优参考值进行调节, 以驱使风力机的转速随风速发生变化并保持恒定的最佳叶尖速比 (TSR), 实现最大风能捕获。

然而, 由于风力发电系统本身的非线性、不确定和大惯量, 以及风功率的大范围随机变动性特点, 常常使得基于 TSR 的发电转速的精确控制较为困难。基于某工作平衡点附近局部线性化设计的经典线性 MPPT 控制器, 存在大范围适应性问题。为了进一步提高 MPPT 控制性能, 国内外学者在该领域应用了各种非线性控制方法, 如文献[9]应用模糊 PID 控制, 文献[10]应用反馈线性化控制, 文献[11]应用鲁棒控制, 文献[12]应用滑模控制, 文献[13]应用模糊神经网络方法, 文献[14]应用自抗扰控制、文献[15]应用分数阶控制, 文献[16]应用内模控制等。

滑模控制 (SMC) 是一类对系统参数扰动和外界干扰鲁棒性很强的非线性控制技术, 它通过快速的切换控制驱使系统状态轨迹达到预定的滑模面, 并沿着它收敛于状态原点, 具有响应速度快、控制器易于工程实现等优点。在 SMC 控制的实际系统应用中, 提高稳态跟踪的控制精度、抑制滑模控制律符号函数引起的抖振, 以及合理选取切换函数的增益是常需要关注的问题。扩张状态观测器 (ESO) 是一种性能良好的观测器^[17], 它不依赖被控对象精确模型, 不仅能得到不确定系统的状态, 还可以对系统内外部扰动量进行实时估计, 将这种扰动估计值补偿到控制系统中, 能够取得较好的控制效果^[18-20]。

本文应用基于最佳叶尖速比控制方法的风力发电最大功率跟踪策略, 结合滑模控制与扩张状态观测器估计技术, 设计了一种直驱式永磁同步风力发电系统 MPPT 自适应积分滑模控制器。控制器采用积分型滑模面结构, 以减少系统在最佳转速跟踪动态过程中的稳态误差; 将风力机时变的机械转矩看作系统外部扰动, 利用 ESO 对风力机机械转矩进行估计, 以获得扰动上界的实时估计值, 进而得到合适大小的切换增益; 同时将控制系统状态偏差幅值作为负反馈量, 引入切换增益的调节机制, 以协调 MPPT 的快速跟踪与超调抑制的控制特性。

1 系统建模与分析

1.1 风力机数学模型

根据贝茨 (Betz) 理论, 风力机旋转主轴上输

出的机械功率为

$$P_w = \frac{1}{2} \rho \pi C_p (\lambda, \beta) R_T^2 v_w^3 \quad (1)$$

式中: ρ 为空气密度; R_T 为风力机叶片半径; v_w 为风速; $C_p(\lambda, \beta)$ 为风能利用系数, 其最大理论值为 0.593; β 为桨距角; λ 为叶尖速比, 其定义表达式为

$$\lambda = \frac{\omega_r R_T}{v_w} \quad (2)$$

式中, ω_r 为风力机角速度。

当风速 v_w 一定时, 风能利用系数 $C_p(\lambda, \beta)$ 决定了风力机吸收风能的大小, 其近似函数表达式为

$$C_p(\lambda, \beta) = \sum_{n=0}^6 a_n(\beta) \lambda^n \quad (3)$$

图1所示为桨叶节距角 β 固定不变时, 一种风力机的风能利用系数 $C_p(\lambda, \beta)$ 与其叶尖速比 λ 的函数曲线关系。

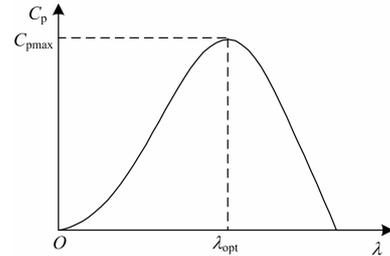


图1 风能利用系数与叶尖速比的关系

Fig. 1 Characteristic curve of C_p versus λ

由图1可知, 仅当风力机在最佳叶尖速比 λ_{opt} 上转动时, 其风能利用系数 $C_p(\lambda, \beta)$ 才能达到最大数值 C_{pmax} 。此时, 由式 (1) 和式 (2) 可得, 风力机轴上输出的最大机械功率表达式为

$$P_{opt} = \frac{\rho \pi C_{pmax} R_T^5}{2 \lambda_{opt}^3} \omega_r^3 \quad (4)$$

相应地, 风力机轴上输出的最大机械转矩为

$$T_{opt} = \frac{P_{opt}}{\omega_r} = \frac{\rho \pi C_{pmax} R_T^5}{2 \lambda_{opt}^3} \omega_r^2 \quad (5)$$

根据式 (4) 和式 (5) 可以绘出风力机在不同风速下输出的特性曲线簇, 如图2所示。

将图2中不同风速下的最大功率点连接起来, 即可获得风力机的最大功率曲线 P_{opt} , 根据函数关系可得最佳转矩曲线 T_{opt} 。

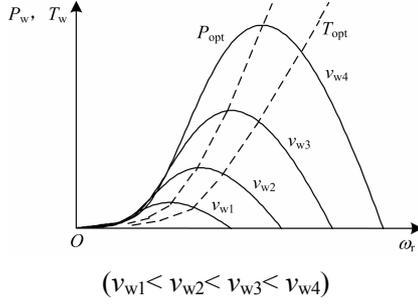


图2 风力机输出特性曲线

Fig. 2 Output characteristics curves of wind turbine

1.2 PMSG数学模型

假设气隙磁场正弦分布、磁路不饱和，忽略铁芯涡流和磁滞损耗，PMSG在d-q旋转坐标系下的数学模型可表示为

$$\begin{cases} u_{sd} = R_s i_{sd} + L_d \frac{di_{sd}}{dt} - L_q \omega_e i_{sq} \\ u_{sq} = R_s i_{sq} + L_q \frac{di_{sq}}{dt} + L_d \omega_e i_{sd} + \omega_e \psi_f \end{cases} \quad (6)$$

式中： u_{sd} 、 u_{sq} 、 i_{sd} 、 i_{sq} 、 L_d 、 L_q 分别为定子电压、电流和电感在 d、q 轴上的分量； R_s 为定子电枢电阻； ω_e 为电角速度； ψ_f 为永磁转子的磁链。

电磁转矩方程

$$T_e = \frac{3}{2} n_p \left[\psi_f i_{sq} + (L_d - L_q) i_{sd} i_{sq} \right] \quad (7)$$

式中， n_p 为发电机极对数。

本文考虑表贴式结构的PMSG，由于其dq轴电感量 $L_d=L_q$ ，因此电磁转矩方程可简化写为

$$T_e = \frac{3}{2} n_p \psi_f i_{sq} \quad (8)$$

1.3 机电耦合传动模型

对于永磁直驱风力发电机系统，风力机角速度 ω_r 与PMSG的转子机械角速度 ω_t 及其电角速度 ω_e 的关系为

$$\omega_r = G_m \omega_t = G_m \frac{\omega_e}{n_p} \quad (9)$$

式中， G_m 为旋转主轴的机械传动比，对于直驱式系统，此处取 $G_m=1$ 。

为此，结合PMSG的电磁转矩式(8)可得系统的机电耦合运动学方程为

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = T_w(\omega_r, v_w) - \frac{3}{2} n_p \psi_f i_{sq} - B \omega_r \quad (10)$$

式中： J 为旋转主轴的转动惯量； B 为系统摩擦系数； $T_w(\omega_r, v_w)$ 为风力机转矩。

1.4 最大功率跟踪策略分析

根据图2并结合叶尖速比定义式(2)可知，实现最大功率跟踪时，风速与转速存在固定关系

$$\omega_r^* = \frac{\lambda_{opt}}{R_T} v_w = K_{opt} v_w \quad (11)$$

式中， K_{opt} 为最佳转速风速比。

因此，分析式(10)可得基于最佳叶尖速比控制的功率跟踪策略是：以当前风速下的最佳角速度 ω_r^* 为期望给定值，控制器根据运动方程式(10)，快速准确地调节PMSG的 i_{sq} 电流分量，进而影响发电机的电磁转矩 T_e ，最终使得风力机的机械转矩 T_w 与角速度 ω_r 之间满足由式(5)给出的最佳转矩曲线关系。当风力机达到最大功率跟踪，运行在当前风速下的最佳功率曲线点上时，PMSG转换得到的电能也最大。

2 MPPT控制器设计

2.1 扩张状态观测器设计

式(10)中，风力机的机械转矩 $T_w(\omega_r, v_w)$ 不易在线测量获得。为此，可以将其看作为系统扰动项，通过设计扩张状态观测器的方法对 $T_w(\omega_r, v_w)$ 进行实时估计。

一个带未知扰动的非线性不确定系统可表示为

$$\dot{x}^{(n)} = f(x, x^{(1)}, \dots, x^{(n-1)}, t) + w(t) + bu \quad (12)$$

式中： $f(x, x^{(1)}, \dots, x^{(n-1)}, t)$ 为未知函数； $w(t)$ 为未知扰动； $x(t)$ 为系统状态变量； u 为系统控制量； b 为控制量增益。

若定义 $d(t)=f(x, x^{(1)}, \dots, x^{(n-1)}, t)+w(t)$ ，则由式(12)表示的不确定系统的 $n+1$ 阶ESO的一般形式为^[17]

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 - g_1(z_1 - x(t)) \\ \vdots \\ \dot{z}_n = z_{n+1} - g_n(z_1 - x(t)) + bu \\ \dot{z}_{n+1} = -g_{n+1}(z_1 - x(t)) \end{cases} \quad (13)$$

式中： $z_1 \rightarrow x(t)$ ， \dots ， $z_n \rightarrow x_{n-1}(t)$ ， $z_{n+1} \rightarrow d(t)$ 是对未知扰动 $w(t)$ 的估计； $g_i(\cdot)$ 为非线性函数，一般取为非线性组合幂次函数，其表达式为

$$\text{fal}(z, \alpha, \delta) = \begin{cases} |z|^\alpha \text{sgn}(z), & |z| > \delta \\ \frac{z}{\delta^{(1-\alpha)}}, & |z| \leq \delta \end{cases} \quad (14)$$

图3给出了 $\text{fal}(\cdot)$ 函数和 $\text{sgn}(\cdot)$ 函数的特性曲线

图, 可见非线性组合幂次函数 $\text{fal}(\cdot)$ 具有“小误差 ($|z| \leq \delta$), 大增益; 大误差 ($|z| > \delta$), 小增益”的良好工程特性^[17], 有利于实现对未知状态量的快速动态跟踪。

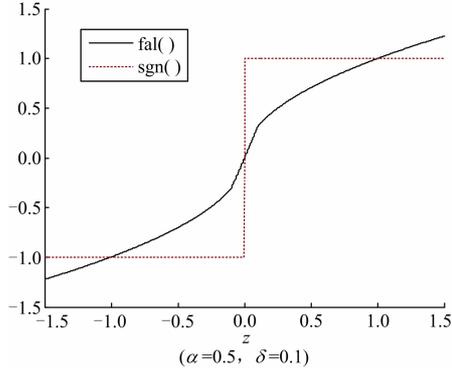


图 3 fal 函数输出特性

Fig. 3 Output characteristic curve of fal function

考察永磁直驱风力发电系统的机电耦合运动学方程式 (10), 并对照一般表达式 (12), 若令 $x = \omega_r$, $a = -B/J$, $f(x, t) = ax$, $w(t) = T_w(\omega_r, v_w)/J$, $b = -1.5n_p \psi_f / J$, $u = i_{sq}$. 则式 (10) 可变形为形如式 (12) 的一阶系统方程。因此, 其二阶扩张状态观测器可设计为

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 - \beta_{01} \text{fal}(z_1 - x, \alpha_1, \delta_1) + bu \\ \dot{z}_2 = -\beta_{02} \text{fal}(z_2 - x, \alpha_2, \delta_2) \end{cases} \quad (15)$$

式中: z_1 为状态量 x 的跟踪信号; z_2 为未知扰动 $w(t)$ 的观测信号; β_{01} 和 β_{02} 为输出误差校正增益; δ_1 和 δ_2 为滤波因子; α_1, α_2 为非线性因子, $0 < \alpha_2 < \alpha_1 < 1$ 。

因此, 由式 (15) 便可得到永磁直驱风力发电系统中未知待估的风力机实时转矩 $T_w(\omega_r, v_w)$ 。

2.2 积分滑模控制器设计

对于基于最佳叶尖速比方法的转速跟踪型控制器设计, 首先定义最佳机械角速度的跟踪误差 x_e 为状态量, $x_e = \omega_r^* - \omega_r$, 则基于 PMSG 的永磁直驱风力发电系统 MPPT 控制的机电耦合运动学方程式 (10), 可重新写为

$$\dot{x}_e = ax_e - bu - c - w(t) \quad (16)$$

式中, $c = -B\omega_r^*/J$ 。

选取积分滑模面函数

$$s(x_e) = k_p x_e + k_i \int_0^t x_e dt \quad (17)$$

式中, $k_p, k_i > 0$ 为滑模面系数, 决定最终滑模状态的品质。

当系统状态处于滑模面上时, $s(t) = \dot{s}(t) = 0$,

即

$$k_p \dot{x}_e + k_i x_e = 0 \quad (18)$$

求解式 (18), 可得

$$x_e = \omega_r^* - \omega_r = C_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (19)$$

式中: C_0 为任意常数; τ 为收敛时间常数, $\tau = k_p/k_i$ 。

由式 (19) 可知, 积分滑模面函数式 (17), 可以使系统状态 x_e 按照指数曲线形式衰减至零, 从而实现无超调的状态跟踪控制。因此, 可以通过被控永磁直驱风力发电系统转速响应的固有周期来合理选取偏差 x_e 的收敛时间常数 τ , 进而计算得到积分滑模面的系数取值, 即可达到理想的 TSR 最佳转速跟踪控制效果。

选取滑模趋近律

$$\dot{s}(x_e) = -\varepsilon \text{sgn}(s), \quad \varepsilon > 0 \quad (20)$$

由式 (17) 和式 (20) 可解得永磁直驱风力发电系统最佳转速跟踪滑模控制律为

$$u = \frac{1}{k_p b} \left\{ \left[(k_p a + k_i) x_e - k_p c \right] + \varepsilon \text{sgn}(s) \right\} \quad (21)$$

选取 Lyapunov 函数

$$V = \frac{1}{2} s^2 \quad (22)$$

根据 Lyapunov 稳定性条件, 当条件 $s\dot{s} < 0$ 满足时, 系统在整个状态空间都趋向于滑模面, 并在进入滑动模态后以选定的趋近规律渐近到达稳态。该条件即是求取控制律参数的依据。

为此, 对式 (22) 求导, 并由系统式 (16) 和滑模控制律式 (21) 可得

$$\begin{aligned} \dot{V} = s\dot{s} = & s \left[k_p (ax_e - bu - c - w(t)) + k_i x_e \right] = \\ & -\varepsilon |s| - k_p w(t) s \end{aligned} \quad (23)$$

显然, 为使得永磁直驱风力发电系统 MPPT 滑模控制系统稳定, 即满足 $s\dot{s} < 0$ 条件, 其控制律符号函数的增益系数 ε 必须满足

$$\varepsilon > k_p |w(t)| = k_p |T_w(\omega_r, v_w)| \quad (24)$$

当条件式 (24) 满足时, 控制律式 (21) 满足滑动模态的到达条件, 能够驱使系统沿着滑模面 s 趋近于平衡原点。

2.3 抖振分析与抑制

分析式 (21) 可知, 正是符号函数 $\text{sgn}(s)$ 这一

部分切换控制律实现了系统对不确定性和外加干扰 $w(t)$ 的鲁棒控制, 且系统需要克服的不确定摄动和外加干扰越大, ε 也要取得越大。

因此, 如果控制器不进行风力机机械转矩 $T_w(\omega_r, v_w)$ 的实时估计, ε 需要保守设计, 即取较大的 ε 值以确保最大功率跟踪过程的全局稳定。但显然, 过大的 ε 必然引起控制律 u 的大幅抖振现象, 危及风力机系统的机电稳定。为此, 将状态观测器估计的风力机实时机械转矩 $T_w(\omega_r, v_w)$ 代入滑模控制律, 可以在最合理的动态趋近率参数的条件下达到 TSR 最佳转速跟踪的全局渐近稳定控制目的。

为了进一步抑制抖振, 并赋予切换控制律增益系数随系统状态的变化进行自适应调节的能力, 将最佳转速跟踪状态偏差幅值 $|x_e|$ 作为增益系数因子, 并考虑将非线性组合幂次函数 $\text{fal}(\cdot)$ 代替切换控制律中的符号函数 $\text{sgn}(\cdot)$, 形成新的趋近律

$$\dot{s}(x_e) = -k_p \left| \hat{T}_w \right| |x_e| \text{fal}(s, \alpha, \delta) \quad (25)$$

式中, \hat{T}_w 为风力机机械转矩 $T_w(\omega_r, v_w)$ 的扩张状态观测器估计值。

再次分析图 3 可见, 式 (25) 中的非线性组合幂次函数 $\text{fal}(\cdot)$ 具有连续光滑的非线性输出特性, 在抑制抖振的同时, 也使得滑模切换控制律呈现“大范围逼近, 柔和趋近”的控制特点。

由式 (17) 和式 (25) 可解得永磁直驱风力发电系统基于新趋近率的最佳转速跟踪滑模控制律

$$u = \frac{1}{k_p b} \left\{ \left[(k_p a + k_i) x_e - k_p c \right] + k_p \left| \hat{T}_w \right| |x_e| \text{fal}(s, \alpha, \delta) \right\} \quad (26)$$

另根据 Lyapunov 函数式 (22), 易证, 基于新趋近率的滑模控制律式 (26) 满足

$$\dot{s}\dot{s} = \begin{cases} -k_p \left| \hat{T}_w \right| |x_e| |s|^{(1+\alpha)} \leq 0, & |s| > \delta \\ -k_p \left| \hat{T}_w \right| |x_e| \frac{s^2}{\delta^{(1-\alpha)}} \leq 0, & |s| \leq \delta \end{cases} \quad (27)$$

因此, 滑模控制律式 (26) 能够将系统引导到滑动模态上, 并在系统状态轨迹向滑模面趋近过程中, 根据增益 $|x_e|$ 所具有的状态偏差负反馈性质, 使其幅值逐渐衰减并很快趋向于零, 最后使系统稳定于平衡原点。

3 实验分析

依据前文分析, 应用 Matlab/Simulink 建立基于 PMSG 的永磁直驱风电系统数值模型, 进行算法的验证, 其中, PMSG 采用基于 $i_d=0$ 的磁场定向解耦策略控制策略。控制结构原理框图如图 4 所示。

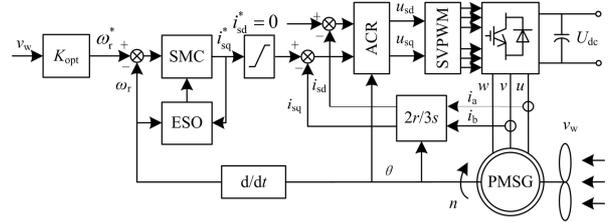


图 4 最大功率跟踪滑模控制原理图

Fig. 4 Schematic diagram of MPPT control system

永磁同步发电机参数: 额定功率 $P_N=7.5$ kW, 额定转速 $n_N=450$ r/min, 极对数 $n_p=6$, 每极主磁通 $\psi_f=0.35 \times 10^{-3}$ Wb, 定子电阻 $R_s=0.12$ Ω , 定子交直流电感 $L_{sd}=L_{sq}=8.5$ mH。

风力机参数: 风轮半径 $R_1=2.06$ m, 最大风能利用系数 $C_{Pmax}=0.48$, 最佳叶尖速比 $\lambda_{opt}=8.1$, 最佳转速风速比 $K_{opt}=3.93$, 额定风速 $v_{wN}=12$ m/s, 空气密度 $\rho=1.293$ kg/m³, 旋转主轴转动惯量 $J=3.5$ kg·m², 系统摩擦系数 $B=0.02$ N·s/rad。

扩张状态观测器参数: $\beta_{01}=20$, $\beta_{02}=400$, $\alpha_1=0.5$, $\alpha_2=0.25$, $\delta_1=\delta_2=0.1$ 。

针对直驱式传动主轴的秒级动态响应时间, 依据式 (19) 的指数衰减特性分析, 可选取转速跟踪偏差的收敛时间常数 $\tau=0.5$ s, 则积分滑模面参数可通过优选设计为 $k_p=0.08$, $k_i=0.16$ 。滑模趋近律幂次组合函数参数: $\alpha=0.5$, $\delta=0.1$ 。滑模控制量输出限幅: $|u|=|i_{sq}|<28$ A。

仿真方案为在快速突变风速和连续自然风速模拟两种条件下, 永磁直驱风力发电系统 MPPT 动态跟踪的性能。

为了进行控制效果对比, 设计了固定参数 PID 控制器和智能 PID 控制器。其中, 智能 PID 控制器以角速度给定值 ω_r^* 和跟踪误差 x_e 为输入量, 其智能决策器根据实时的误差量 x_e 反馈与预设的阈值 γ 进行比较, 实现 2 组优化的 PID 控制参数的切换。选取预设阈值 $\gamma=0.1\omega_r^*$, 当 $|x_e|>\gamma$ 时, $K_p=-8.65$, $K_i=0$, $K_d=0.41$; 当 $|x_e|\leq\gamma$ 时, $K_p=-4.53$, $K_i=-0.14$, $K_d=0.82$; PID 控制量输出限幅: $|u|=|i_{sq}|<28$ A。

图 5 为在风速 $v_w(t)=2.55\alpha(t)+2.55\alpha(t-3)-3.83\alpha(t-6)$ 时, 根据最佳转速风速比关系, 计算得到最优指令转速 $\omega_r^*(t)=K_{opt}v_w(t)=10\alpha(t)+10\alpha(t-3)-15\alpha(t-6)$ 情况

下, 三种控制器对MPPT最佳指令转速 $\omega_t^*(t)$ 的跟踪转速 ω_t 曲线。

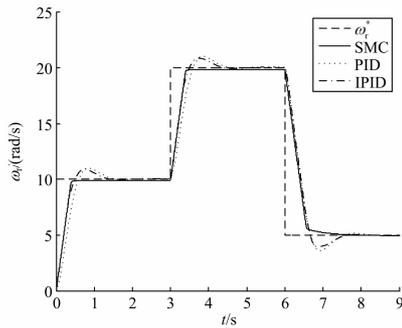


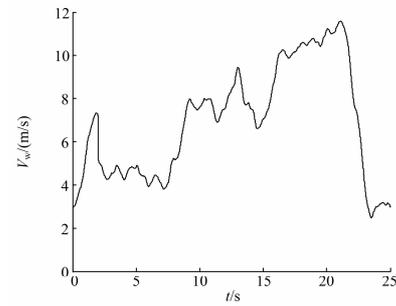
图5 快速突变风速MPPT响应

Fig. 5 MPPT response curves under rapid wind speed changes condition

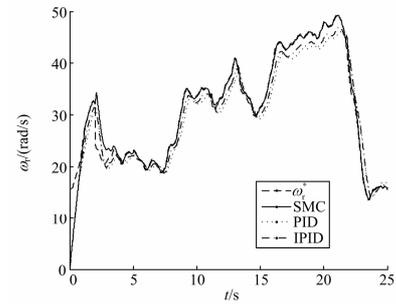
由图5可见, 对于阶跃快速突变型的转速给定指令, 三种控制方法均可实现转速的稳态跟踪无静差, 即达到了MPPT目的。但对于永磁直驱式风力发电系统这一较大转动惯量的传动主轴特性和随风速及转速快速变化的风力机机械转矩特点, 为了协调跟踪控制的快速性和准确性指标, 优化参数的固定参数PID控制器, 上升时间达到了0.8 s, 但产生了8%的超调和1.5 s的调节过渡时间; 智能PID控制器, 通过控制增益的在线切换, 使得响应速度与SMC接近, 但由于有限数量的切换规则, 亦使其产生了一定的超调和较长的调节过渡时间; 而SMC控制器可以达到快速无超调的跟踪, 稳定跟踪时间0.5 s。进一步对图5分析可知, SMC控制量输出具有在大跟踪误差时, 快速响应, 在小跟踪误差时, 柔和趋近的良好非线性特性, 且没有抖振现象, 总体控制效果优于PID控制。

图6为在连续自然风速模拟条件下, 三种控制器在实现MPPT跟踪的动态过程中的转速跟踪曲线、叶尖速比调节曲线、风能利用系数 C_p 变化曲线, 以及在SMC控制下的风力机实时机械转矩 T_w 曲线和其ESO估计曲线。

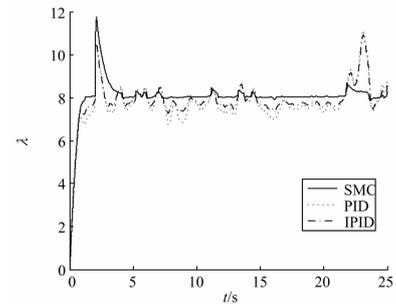
由图6(a)~图6(d)可见, 在风速连续大范围波动的情况下, SMC控制器能够使直驱系统的转速快速准确地跟踪到最佳转速 ω_t^* , 叶尖速比保持在最佳值 $\lambda_{opt}=8.1$ 附近, 风能利用系数保持在最大值 $C_{pmax}=0.48$ 附近, 且波动较小。进一步分析图6(e)可知, SMC控制器中的ESO部分能够有效地估计出风力机的实时机械转矩, 并通过其对切换控制律增益的实时在线调节, 确保了SMC控制器输出响应的快速无抖振。



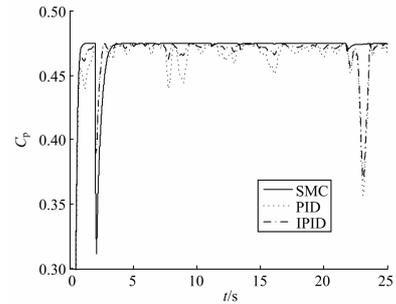
(a) 连续自然风速模拟信号



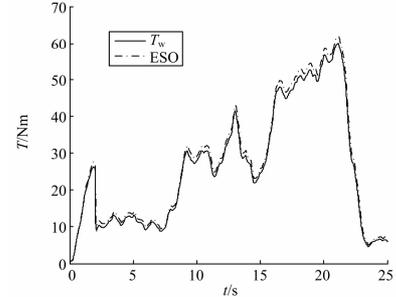
(b) 最佳转速跟踪曲线



(c) 叶尖速比调节曲线



(d) 风能利用系数变化曲线



(e) 风力机机械转矩及其ESO估计值曲线

图6 连续自然风速MPPT响应

Fig. 6 MPPT response curves under natural wind speed changes condition

对比三种控制器的MPPT效果可见,对于转速输入给定和风力机机械转矩均在连续非线性变化的MPPT控制应用背景下,SMC控制可以比PID控制具有更有效的抑制系统状态参数变化的能力,也可有效避免在智能PID控制器设计中的基于经验和试凑法的逻辑划分、规则数量选取及参数整定问题,其大范围适应性和鲁棒性强于PID控制。

仿真结果表明:(1)由于滑模面函数的积分项作用,使得直驱系统在最佳工作状态点大范围变化的情况下,转速跟踪控制稳态无静差;(2)由于采用了含扩张状态观测估计和基于转速跟踪偏差负反馈的幂次组合变速趋近律方法,使得SMC切换控制增益系数在线自适应调节,且输出平滑无抖振,MPPT跟踪控制效果优于PID控制;(3)通过滑模面函数及其收敛时间参数的优化配置,使得直驱系统的MPPT控制效果在快速跟随和抑制超调方面具有良好的协调能力,大范围适应性和鲁棒性良好。

4 结论

本文提出了一种基于扩张状态观测器的直驱式永磁同步风力发电系统MPPT自适应积分滑模控制器。该方法具有切换增益依据最佳转速跟踪偏差和风力机实时机械转矩而进行自适应调整的良好特性;基于指数收敛时间常数设计的积分型滑模面结构可以进一步减少PMSG在最佳转速跟踪动态过程的稳态误差;在保证MPPT跟踪响应快速无超调的基础上,滑模控制输出无抖振。仿真结果验证了设计的滑模控制器在突变风速和大范围连续变化风速范围情况下,直驱式永磁同步风力发电系统均能较好地实现MPPT运行,性能优于PID控制器。

参考文献

- [1] 王凤翔. 永磁电机在风力发电系统中的应用及其发展趋势[J]. 电工技术学报, 2012, 27(3): 12-24.
WANG Feng-xiang. Application and development tendency of PM machines in wind power generation system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(3): 12-24.
- [2] 孟鹏, 邱晓燕, 林伟, 等. 直驱式永磁同步风力发电动态特性的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(14): 38-43.
MENG Peng, QIU Xiao-yan, LIN Wei, et al. Study of the dynamic characteristics of directly driven permanent magnet synchronous wind turbine[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(14): 38-43.
- [3] 王文亮, 葛宝明, 毕大强. 储能型直驱永磁同步风力发电控制系统[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(14): 43-48, 78.
WANG Wen-liang, GE Bao-ming, BI Da-qiang. Energy storage based direct-drive permanent magnet synchronous wind power control system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(14): 43-48, 78.
- [4] 黄守道, 肖磊, 黄科元, 等. 不对称电网故障下直驱型永磁风力发电系统网侧变流器的运行与控制[J]. 电工技术学报, 2011, 26(2): 173-180.
HUANG Shou-dao, XIAO Lei, HUANG Ke-yuan, et al. Operation and control on the grid-side converter of the directly-driven wind turbine with PM synchronous generator during asymmetrical faults[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(2): 173-180.
- [5] 赵仁德, 王永军, 张加胜. 直驱式永磁同步风力发电系统最大功率追踪控制[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(27): 106-111.
ZHAO Ren-de, WANG Yong-jun, ZHANG Jia-sheng. Maximum power point tracking control of the wind energy generation system with direct-driven permanent magnet synchronous generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(27): 106-111.
- [6] 姚骏, 廖勇, 瞿兴鸿, 等. 直驱永磁同步风力发电机的最佳风能跟踪控制[J]. 电网技术, 2008, 32(10): 11-15, 27.
YAO Jun, LIAO Yong, QU Xing-hong, et al. Optimal wind-energy tracking control of direct-driven permanent magnet synchronous generators for wind turbines[J]. Power System Technology, 2008, 32(10): 11-15, 27.
- [7] ZOU Y, ELBULUK M E, SOZER Y. Stability analysis of maximum power point tracking (MPPT) method in wind power systems[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2013, 49(3): 1129-1136.
- [8] XIA Y, AHMED K H, WILLIAMS B W. A new maximum power point tracking technique for permanent magnet synchronous generator based wind energy conversion system[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2011, 26(12): 3609-3620.
- [9] 孟克其劳, 陈虎, 钱春震, 等. 永磁直驱风力发电系统最大功率追踪策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(22): 83-87, 93.
MENG Keqilao, CHEN Hu, QIAN Chun-zhen, et al. Study on maximum power point tracking strategy for

- direct-driven permanent magnet synchronous generating system[J]. *Power System Protection and Control*, 2012, 40(22): 83-87, 93.
- [10] KIM K H, JEUNG Y C, LEE D C, et al. LVRT scheme of PMSG wind power systems based on feedback linearization[J]. *IEEE Trans on Power Electronics*, 2012, 27(5): 2376-2384.
- [11] CORRADINI M L, IPPOLITI G, ORLANDO G. Robust control of variable-speed wind turbines based on an aerodynamic torque observer[J]. *IEEE Trans on Control Systems Technology*, 2013, 21(4): 1199-1206.
- [12] VALENCIAGA F, PULESTON P F. High-order sliding control for a wind energy conversion system based on a permanent magnet synchronous generator[J]. *IEEE Trans on Energy Conversion*, 2008, 23(3): 860-867.
- [13] SINGH M, CHANDRA A. Application of adaptive network based fuzzy inference system for sensorless control of PMSG-based wind turbine with nonlinear load compensation capabilities[J]. *IEEE Trans on Power Electronics*, 2011, 26(1): 165-175.
- [14] 杨金明, 吴捷, 杨俊华. 基于自抗扰控制器的风力发电系统的最大风能捕获控制[J]. *太阳能学报*, 2004, 25(4): 525-529.
YANG Jin-ming, WU Jie, YANG Jun-hua. Maximum wind energy capture control with auto disturbance rejection controller[J]. *Acta Energlae Solaris Sinica*, 2004, 25(4): 525-529.
- [15] 李志民, 孙其振, 孙勇, 等. PMSG 风力发电系统最大风能追踪的分数阶控制[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2012, 24(6): 67-72.
LI Zhi-min, SUN Qi-zhen, SUN Yong, et al. Maximum energy tracking of PMSG wind power generation system by fractional-order control[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2012, 24(6): 67-72.
- [16] 胡书举, 赵栋利, 郭金东, 等. 永磁直驱风电系统 PMSG 的内模控制策略研究[J]. *可再生能源*, 2009, 27(3): 21-26.
HU Shu-ju, ZHAO Dong-li, GUO Jin-dong, et al. Study on the internal model control tactic of PMSG for direct-driven wind power system[J]. *Renewable Energy Resources*, 2009, 27(3): 21-26.
- [17] 韩京清. 一类不确定对象的扩张状态观测器[J]. *控制与决策*, 1995, 10(1): 85-88.
HAN Jing-qing. The "extended state observer" of a class of uncertain systems[J]. *Control and Decision*, 1995, 10(1): 85-88.
- [18] 夏长亮, 刘均华, 俞卫, 等. 基于扩张状态观测器的永磁无刷直流电机滑模变结构控制[J]. *中国电机工程学报*, 2006, 26(20): 139-143.
XIA Chang-liang, LIU Jun-hua, YU Wei, et al. Variable structure control of BLDCM based on extended state observer[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2006, 26(20): 139-143.
- [19] LIU Hui-xian, LI Shi-hua. Speed control for PMSM servo system using predictive functional control and extended state observer[J]. *IEEE Trans on Industrial Electronics*, 2012, 59(2): 1171-1183.
- [20] 姚兴佳, 王晓东, 单光坤, 等. 双馈风电机组传动系统扭振抑制自抗扰控制[J]. *电工技术学报*, 2012, 27(1): 136-141.
YAO Xing-jia, WANG Xiao-dong, SHAN Guang-kun, et al. Torque vibration active disturbance rejection control of double-fed wind turbine drive train[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2012, 27(1): 136-141.

收稿日期: 2013-12-01

作者简介:

茅靖峰 (1976-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为风力发电技术。E-mail: mao.jf@163.com