

DOI: 10.7667/PSPC171714

风力发电系统最大功率跟踪自适应鲁棒控制

茅靖峰, 吴博文, 吴爱华, 张旭东

(南通大学电气工程学院, 江苏 南通 226019)

摘要: 为了提高风力发电系统最大功率跟踪(MPPT)运行的工作性能, 针对系统未知建模误差和外部扰动等不确定问题, 提出了一种 MPPT 自适应鲁棒控制方法。该方法建立在基于广义扰动的风力发电系统角速度跟踪动态模型基础上, 不依赖于系统模型参数和外部扰动辨识。利用 MPPT 跟踪偏差的非线性状态反馈和扰动边界值的在线实时估计, 自适应地调整切换控制项增益, 以加快系统收敛的速度。实际控制律经过一阶积分输出, 进一步削弱控制输出信号幅值的抖振, 平滑发电转矩, 提高跟踪精度。通过构造 Lyapunov 函数, 验证了闭环系统的全局稳定性。通过与常规线性 PID 控制和非线性动态状态反馈控制(SFC)进行仿真比较, 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自适应性。

关键词: 风力发电系统; 最大功率跟踪; 自适应控制; 鲁棒控制

Adaptive robust MPPT control for wind power generation system

MAO Jingfeng, WU Bowen, WU Aihua, ZHANG Xudong

(School of Electrical Engineering, Nantong University, Nantong 226019, China)

Abstract: In order to improve the working performance of the Maximum Power Point Tracking (MPPT) for wind power generation system, this paper proposes an Adaptive Robust Control (ARC) method to overcome uncertain problems, including unknown modeling errors and external disturbances. The ARC method is designed according to a new dynamic model of angular velocity tracking for wind power generation system based on generalized perturbation. It does not require the system model parameters and external disturbance identification. In terms of the on-line estimation of the disturbance boundary value and the nonlinear state feedback based on MPPT tracking error, the gain of the switching control is adaptively adjusted to speed up the convergence of the system. A first-order integral process is involved in the control law to further weaken the chattering of output signal amplitude, hence smooth the torque and improve the tracking accuracy during generation. In addition, the global stability of the closed-loop control system is proved by the Lyapunov approach. By simulation comparing with the conventional linear PID control and the nonlinear dynamic State Feedback Control (SFC), the results show that the proposed controller has good performance in the process of realizing MPPT and has stronger robustness and adaptability.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61673226 and No. 51877112), Six Talents Peak Projects of Jiangsu Province (No. 2015-JY-028), and Natural Science Foundation of the Jiangsu Higher Education Institutions of China (No. 17KJA470006).

Key words: wind power generation system; maximum power point tracking; adaptive control; robust control

0 引言

风能作为一种蕴藏量丰富的自然资源, 因其可再生性和对环境的友好性在世界范围内受到了普遍

重视, 已成为全球装机容量最大与增长速度最快的绿色能源。

最大功率跟踪(MPPT)控制器在风力发电机组风功率捕获运行中起着至关重要的作用, 其控制性能的优劣直接关系到机组的运行状态和发电经济性^[1-5]。针对风力发电系统这一典型复杂多变量非线性系统, 国内外学者在该领域研究应用了多种非线性控制方法, 如非线性 PI 控制^[6]、状态反馈控制^[7]、

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(61673226, 51877112); 江苏省六大人才高峰项目资助(2015-JY-028); 江苏省高校自然科学基金研究重大项目资助(17KJA470006)

自抗扰控制^[8]、模型预测控制^[9]、模糊神经网络控制^[10]、滑模控制^[11]和反演控制^[12]等。

实际上由于风力发电机组机电结构和运行环境的复杂性以及风速的随机变化和外界环境干扰等因素的不可避免, MPPT 控制系统模型中存在两种明显的不确定性, 即风力发电系统机电模型参数误差的不确定性和机组附加扰动转矩的不确定性, 这造成系统精确的机电耦合动态模型建立非常困难。

为此, 不少文献在非线控制律设计基础上, 引入如观测器法^[13-15]、模糊推理法^[16-17]、卡尔曼滤波法^[18]、支持向量机法^[19]等辨识技术, 形成基于辨识的非线性复合控制律。这类方法的优点是可以在线估算获取风力发电系统运行状态或是扰动转矩的不确定值, 继而实现对非线性控制律的补偿, 在控制原理上, 可以进一步提高 MPPT 的控制性能。但缺点也较明显, 即其控制性能较大地依赖于辨识算法的精度指标, 且会因辨识机构的数据样本量、积分阶数、延迟时间或采样计算误差等实际情况以及系统中的诸多不确定性, 导致不期望的控制效果。

针对上述问题, 本文根据风力发电 MPPT 控制机电耦合非线性方程, 首先建立出一种基于广义扰动的风力发电系统角速度跟踪动态模型, 再应用自适应控制技术进行不确定广义扰动的在线估计, 避免精确的系统不确定项辨识, 最后设计非线性控制律, 实现 MPPT 发电的自适应鲁棒控制。

该方法一方面采用自适应技术来估计不确定扰动项, 有效降低了因常值鲁棒控制律增益过大引起的控制律保守性过高问题, 并提高系统对扰动抑制的自适应鲁棒性; 另一方面将跟踪偏差的非线性状态反馈引入控制律, 以加快系统收敛的速度, 缩短不确定项估计的时延; 同时, 将控制律输出的一次积分作为实际功率控制量, 以进一步平滑 MPPT 功率跟踪的调节过程, 确保功率跟踪控制无静差。通过稳定风速和自然风况条件下的仿真实验, 验证了该方法较常规线性 PID 控制和非线性动态状态反馈控制(SFC)更好的 MPPT 发电鲁棒性和自适应性。

1 系统建模与分析

1.1 风力机模型及特性

根据贝茨理论, 风力机捕获得到的气动机械功率为^[6-7]

$$P_a = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (1)$$

式中: ρ 为空气密度; v 为风速; R 为风力机叶片半径; $C_p(\lambda, \beta)$ 为风力机的风能利用系数, 其中 β 为桨距角, λ 为叶尖速比, 其定义表达式为

$$\lambda = \frac{R \omega_r}{v} \quad (2)$$

式中, ω_r 为风力机角速度。

风力机转轴输出的气动机械转矩可表示为

$$T_a = K_a \omega_r^2 \quad (3)$$

式中, K_a 为风力机运行状态系数, 其表达式为

$$K_a = \frac{1}{2} \rho \pi R^5 \frac{C_p(\lambda, \beta)}{\lambda^3} \quad (4)$$

风能利用系数 $C_p(\lambda, \beta)$ 为叶尖速比 λ 和桨距角 β 的非线性函数, 当风速一定时, 决定了风力机捕捉风功率能力的强弱, 其近似经验表达式可描述为^[6-7]

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \beta - c_4 \right) \exp\left(\frac{-c_5}{\lambda_i}\right) + c_6 \lambda \quad (5)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (6)$$

式中: $c_1=0.5176$; $c_2=116$; $c_3=0.4$; $c_4=5$; $c_5=21$; $c_6=0.0068$ 。

图 1 是由式(5)和式(6)作出的风能利用系数 $C_p(\lambda, \beta)$ 函数的三维关系曲线。

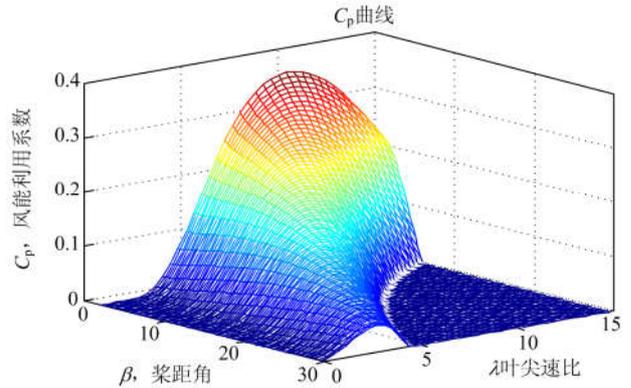


图 1 C_p 与 λ 和 β 的关系图

Fig. 1 Relationship of C_p versus λ and β

由图 1 可见, 仅当桨距角 $\beta=0$ 且叶尖速比 λ 处于某一最佳工作点 λ_{opt} 上运行时, 风能利用系数 C_p 即可达到最大值 C_{pmax} , 风力机获得最大风功率捕获。因此, 设计风力发电控制器, 使得风力机角速度 ω_r 跟随风速 v 的变化, 并稳定在最优角速度 ω_r^* 上, 其中

$$\omega_r^* = \frac{\lambda_{opt} v}{R} \quad (7)$$

就实现了风力发电系统的 MPPT 最大功率跟踪运行。

1.2 风力发电传动系统模型

三叶片变速风力发电机组(VSWT)二阶传动系

统模型如图 2 所示^[7,12]。

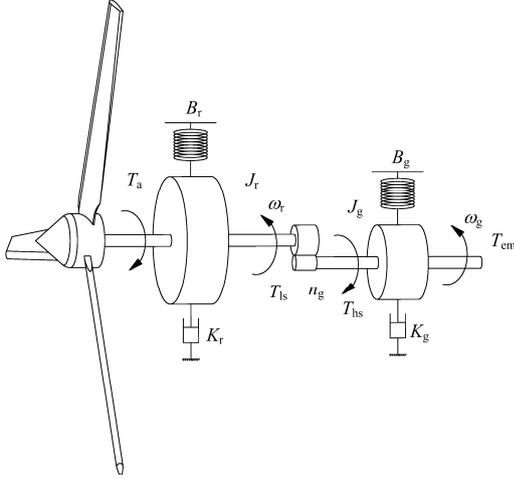


图 2 风力发电机组传动系统模型
Fig. 2 Wind turbine drive train model

图 2 中，气动机械转矩 T_a 驱动风力机低速轴以 ω_r 的角速度转动，低速转矩 T_{ls} 是作用在风力机转子上的制动转矩。发电机通过高速转矩 T_{hs} 驱动，其制动转矩则是发电机的电磁转矩 T_{em} 。高速轴和低速轴通过传动变速箱齿轮链接，齿轮传动比为 n_g 。

依据图 2，风力发电系统的机电耦合动力学模型可表述为^[7,20]

$$J_r \dot{\omega}_r = T_a - K_r \theta_r - B_r \omega_r - T_{ls} \quad (8)$$

$$J_g \dot{\omega}_g = T_{hs} - K_g \theta_g - B_g \omega_g - T_{em} \quad (9)$$

式中： J_r 和 J_g 分别为风力机和发电机转子的转动惯量； K_r 和 B_r 分别为风力机转子低速轴的刚度系数和阻尼系数； K_g 和 B_g 分别为发电机转子高速轴的刚度系数和阻尼系数； θ_r 和 θ_g 分别为风力机侧和发电机侧的转子扭转角，其关系与齿轮箱传动比 n_g 可近似为

$$n_g = \frac{T_{ls}}{T_{hs}} = \frac{\omega_g}{\omega_r} = \frac{\theta_g}{\theta_r} \quad (10)$$

由式(8)一式(10)，风力发电系统的机电耦合动力学模型可重写为

$$J_t \dot{\omega}_r = T_a - K_t \theta_r - B_t \omega_r - T_g \quad (11)$$

式中： J_t 为传动系统总转动惯量， $J_t = J_r + n_g^2 J_g$ ； K_t 为传动系统总刚度系数， $K_t = K_r + n_g^2 K_g$ ； B_t 为传动系统总阻尼系数， $B_t = B_r + n_g^2 B_g$ ； T_g 为风力机低速轴上发电等效电磁转矩， $T_g = n_g T_{em}$ 。

1.3 发电机动态模型

发电机转矩输入给定电磁转矩 T_{em}^* 与输出电磁转矩 T_{em} 的关系模型可表达为一阶线性模型^[7]

$$\dot{T}_{em} = -\frac{1}{\tau_T} T_{em} + \frac{1}{\tau_T} T_{em}^* \quad (12)$$

式中， τ_T 为发电机响应时间常数。

2 MPPT 控制器设计

2.1 非线性动态状态反馈控制

风力发电系统 MPPT 控制问题可以描述为，针对系统动力学模型式(11)，设计控制律 T_g ，使得风力机在切入风速至额定风速工况以内，保证实际角速度 ω_r 快速准确地跟随最优角速度 ω_r^* 。

为此，定义风力机转子角速度跟踪偏差为

$$\omega_e = \omega_r - \omega_r^* \quad (13)$$

选取 PID 控制律为发电等效电磁转矩控制信号期望值的调节律。

$$T_g^* = K_p \omega_e + K_i \int_0^t \omega_e dt + K_d \frac{d\omega_e}{dt} \quad (14)$$

则针对机电耦合动力学模型(11)，可根据线性系统极点配置等方法适当选取控制参数 K_p , K_i , K_d ，使得风力机转子角速度跟踪偏差 ω_e 收敛。进一步地，若设定跟踪偏差具有二阶动态收敛过程，即

$$\ddot{\omega}_e + a_1 \dot{\omega}_e + a_0 \omega_e = 0 \quad (15)$$

式中， a_1 和 a_2 为待设计控制参数， $a_1 > 0$ ， $a_2 > 0$ 。

将式(13)、式(15)代入式(11)，则可得 MPPT 非线性动态状态反馈控制律 SFC^[7] 为

$$T_g^* = T_a - K_t \theta_r - B_r \omega_r - J_t \dot{\omega}_r^* + J_t \left(a_1 \omega_e + a_0 \int_0^t \omega_e dt \right) \quad (16)$$

显然，式(14)和(16)形式的 MPPT 固定参数控制律，在设计过程中，未考虑被控系统的模型不确定和扰动，因此，其实际控制性能的自适应性和鲁棒性需要进一步提高。

2.2 基于广义扰动的系统模型

考虑系统(11)存在参数不确定和外界干扰引起附加扰动转矩 T_d 情况，对式(13)求导，并代入式(11)可得考虑扰动条件的风力发电系统转子角速度跟踪动态模型。

$$J_t \dot{\omega}_e = -T_g + \psi(t) \quad (17)$$

式中， $\psi(t)$ 为角速度跟踪模型中的非线性、不确定和干扰项，定义为

$$\psi(t) = K_a \omega_r^2 - K_t \theta_r - B_t \omega_r - T_d - J_t \dot{\omega}_r^* \quad (18)$$

定义风力机转子角速度跟踪状态函数为

$$s = \dot{\omega}_e + \sigma \omega_e \quad (19)$$

式中， σ 为组合系数，为待设计控制参数， $\sigma > 0$ 。

对式(19)求导，并代入(17)得

$$J_t \dot{s} = -\dot{T}_g + \dot{\psi}(t) + \sigma J_t \dot{\omega}_e \quad (20)$$

重新整理的风力发电系统角速度跟踪动态模型

可表述为

$$J_r \dot{s} = -u + \xi(t) \quad (21)$$

式中: u 为虚拟控制律, $u = \dot{T}_g$; $\xi(t)$ 为广义扰动, 包括系统中的非线性、不确定和干扰项, 定义为

$$\begin{aligned} \xi(t) = & \dot{\psi}(t) + \sigma J_r \dot{\omega}_e = \\ & \dot{K}_a \omega_r^2 + 2K_a \omega_r \dot{\omega}_r - K_t \omega_r + (\sigma J_t - B_t) \dot{\omega}_r - \\ & (\dot{T}_d + J_t \dot{\omega}_r^* + \sigma J_t \dot{\omega}_r^*) \end{aligned} \quad (22)$$

考察式(22)可知, 存在正常数 b_m 、 b_1 、 b_2 、 b_3 、 b_4 , 使得

$$|\xi(t)| \leq b_0 + b_1 |\omega_r| + b_2 |\dot{\omega}_r| + b_3 |\dot{\omega}_r \omega_r| + b_4 |\omega_r|^2 \leq b_m \phi \quad (23)$$

式中:

$$\phi = 1 + |\omega_r| + |\dot{\omega}_r| + |\dot{\omega}_r \omega_r| + |\omega_r|^2 \quad (24)$$

$$b_m = \max \{b_0, b_1, b_2, b_3, b_4\} \quad (25)$$

2.3 自适应鲁棒控制

分析式(21)可知, 通过定义风力机转子角速度跟踪状态函数 s , 风力发电系统 MPPT 控制的转子角速度跟踪问题已转化为了 s 的稳定性问题, 即针对风力发电系统(21), 设计虚拟控制律 u , 使得系统中的 s 渐进稳定, 即当 $t \rightarrow \infty$ 时, 有 $s \rightarrow 0$, $\omega_e \rightarrow 0$ 。系统控制框图如图 3 所示。

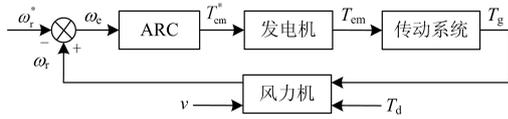


图 3 系统控制框图

Fig. 3 Control system scheme

为此, 对于存在系统广义扰动的风力发电系统(21), 设计控制器

$$u = k_0 s + (k_1 |\omega_e|^\gamma + \hat{b}_m \phi) \text{sgn}(s) \quad (26)$$

式中: $\text{sgn}(s)$ 为符号函数; k_0 和 k_1 为状态量控制增益, $k_0 > 0$, $k_1 > 0$, 设计用来保证系统稳定; γ 为幂指数参数, $0 < \gamma < 1$, 用来调节角速度跟踪偏差状态反馈的强弱; \hat{b}_m 为 b_m 的估计值, 设计用来补偿扰动, 为了在线实时估计扰动的边界值, 削弱符号函数控制量的切换抖振, 减小稳态误差, 切换控制增益 \hat{b}_m 的自适应律设计为

$$\dot{\hat{b}}_m = \alpha \phi |s| \quad (27)$$

式中, α 为自适应项增益, $\alpha > 0$, 表征自适应律收敛速度的快慢。

选取 Lyapunov 函数

$$V = \frac{1}{2} J_t s^2 + \frac{1}{2\alpha} (b_m - \hat{b}_m)^2 \quad (28)$$

对式(28)求导得到

$$\begin{aligned} \dot{V} = & J_t \dot{s} s + \frac{1}{\alpha} (b_m - \hat{b}_m) (-\dot{\hat{b}}_m) = \\ & -us + \xi(t)s + \frac{1}{\alpha} (b_m - \hat{b}_m) (-\dot{\hat{b}}_m) \end{aligned} \quad (29)$$

代入控制律式(26), 可得

$$\begin{aligned} \dot{V} = & -\left(k_0 s + (k_1 |\omega_e|^\gamma + \hat{b}_m \phi) \text{sgn}(s)\right) s + \\ & \xi(t)s + \frac{1}{\alpha} (b_m - \hat{b}_m) (-\dot{\hat{b}}_m) \leq \\ & -k_0 s^2 - (k_1 |\omega_e|^\gamma + \hat{b}_m \phi) |s| + \\ & |\xi(t)| |s| + \frac{1}{\alpha} (b_m - \hat{b}_m) (-\dot{\hat{b}}_m) \end{aligned} \quad (30)$$

将式(23)和(27)代入式(30)可得

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & -k_0 s^2 - (k_1 |\omega_e|^\gamma + \hat{b}_m \phi) |s| + \\ & b_m \phi |s| + \frac{1}{\alpha} (b_m - \hat{b}_m) (-\dot{\hat{b}}_m) = \\ & -k_0 s^2 - k_1 |\omega_e|^\gamma |s| \leq 0 \end{aligned} \quad (31)$$

由此可知, s 一致有界, 且 $\lim_{t \rightarrow \infty} V(t) = V(\infty)$ 存在。

即闭环系统全局渐近稳定, 当 $t \rightarrow \infty$ 时, 有 $s \rightarrow 0$, $\omega_e \rightarrow 0$ 。

自适应鲁棒控制律(26)不依赖于风力发电系统转动惯量 J_t 、刚度系数 K_t 和阻尼系统 B_t 以及外部干扰的界, 因此控制器的设计对系统参数变化、外部干扰具有鲁棒性。

自适应鲁棒控制律(26)引入的非线性状态反馈项 $|\omega_e|^\gamma$, 可通过适当地选取参数 k_0 、 k_1 , 加快系统状态量 s 和 ω_e 的收敛速度, 减少扰动 b_m 的在线实时估计边界值, 有效削弱符号函数控制量的切换抖振。

通过对式(26)两边积分, 可获得发电等效电磁转矩的控制信号期望为

$$T_g^* = k_0 \omega_e + \int_0^t \left[k_0 \sigma \omega_e + (k_1 |\omega_e|^\gamma + \hat{b}_m \phi) \text{sgn}(s) \right] dt \quad (32)$$

为了降低符号函数在切换过程的抖振幅度, 将其采用 S 型函数近似为

$$\text{sgn}(s) = \frac{s}{|s| + \varepsilon} \quad (33)$$

式中, ε 为任意小的正常数。

发电机的电磁转矩 T_{em} 期望控制输入量为

$$T_{em}^* = \frac{T_g^*}{n_g} \quad (34)$$

由于风力发电机的期望电磁转矩控制输入值 T_{em} 包含有符号函数和跟踪偏差 ω_e 的一阶积分形式，因此，该控制律可有效地抑制抖振现象，提高系统功率跟踪控制过程的平滑性和鲁棒性，并可使得风力发电系统 MPPT 控制稳态无误差。

3 仿真研究分析

为了验证所提自适应鲁棒控制方法的有效性和正确性，采用 Matlab/Simulink 进行了仿真研究，所用风力发电机组系统参数为：叶片半径 $R=21.64\text{ m}$ ，空气密度 $\rho=1.293\text{ kg/m}^3$ ，最佳叶尖速比 $\lambda_{opt}=8.1$ ，最大风能利用系数 $C_{pmax}=0.48$ ，额定风速 $v_N=13\text{ m/s}$ ，额定最优角速度 $\omega_{rN}=4.866\text{ rad/s}$ ，转子惯量 $J_r=325\ 000\text{ kg}\cdot\text{m}^2$ ，发电机惯量 $J_g=34.4\text{ kg}\cdot\text{m}^2$ ，转子阻尼系统 $B_r=27.36\text{ N}\cdot\text{m/rad/s}$ ，转子刚度系数 $K_r=9\ 500\text{ N}\cdot\text{m/rad}$ ，发电机阻尼系数 $B_g=0.2\text{ N}\cdot\text{m/rad/s}$ ，发电机刚度系数 $K_g=0.2\text{ N}\cdot\text{m/rad}$ ，齿轮传动比 $n_g=43.165$ ，风力机额定功率 $P_{aN}=1\text{ MW}$ ，额定转矩 $T_{gN}=200\text{ kN}\cdot\text{m}$ ，转矩过载系数 1.6，最大转矩 $T_{gmax}=320\text{ kN}\cdot\text{m}$ ，转矩传递时间常数 $\tau_T=0.01$ 。

设计的自适应鲁棒控制器参数为： $\sigma=0.5$ ， $\alpha=2$ ， $\varepsilon=0.01$ ， $k_0=40$ ， $k_1=200\ 000$ 。

为了进行控制器性能对比，设计了 MPPT 传统 PID 控制器，参数为： $K_p=320\ 000$ ， $K_i=80\ 000$ ， $K_d=4\ 000$ ；以及非线性动态状态反馈控制器 SFC，参数为： $a_1=2$ ， $a_0=0.8$ 。

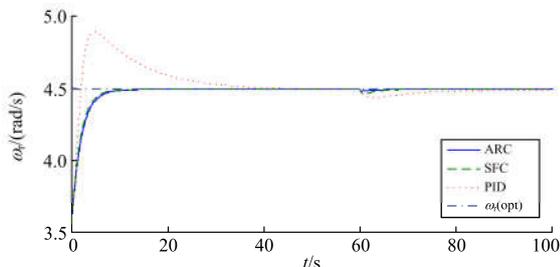
3.1 稳定风速条件的仿真分析

在风力发电系统运行于稳定风速 $v=12\text{ m/s}$ 条件下，进行 100 s 时长的两个阶段仿真。

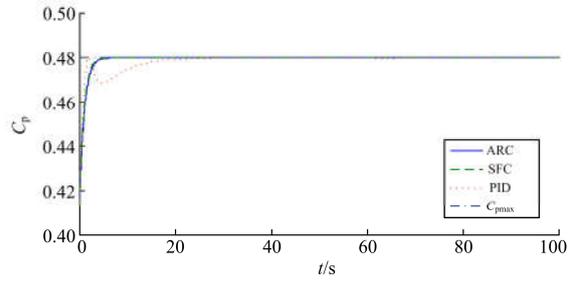
第一阶段为系统的启动突跳阶跃仿真，以对比分析三类控制器的 MPPT 快速跟踪性能。设置条件为：风力机初始角速度 $\omega_r(0)=3.56\text{ rad/s}$ ，电磁转矩 $T_g(0)=0$ ，附加扰动转矩 $T_d(0)=0$ ，仿真时长 0~60 s。

第二阶段为系统的稳态抗干扰能力仿真，以对比分析三类控制器的鲁棒性能。设置条件为：系统初态处于 MPPT 稳定运行状态，附加扰动转矩 T_d 在 60 s 时刻由 0 突变为 30 kN，仿真时长 60~100 s。

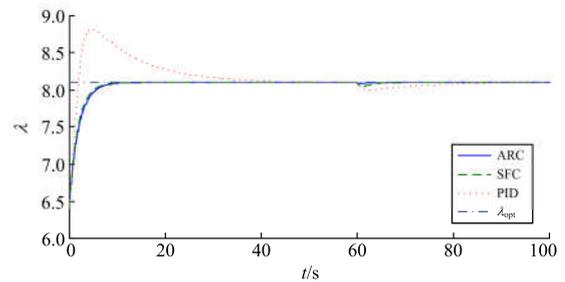
以上两个阶段的系统的响应曲线如图 4 所示。



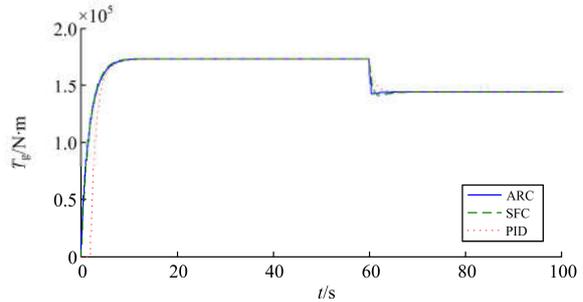
(a) 转子角速度 ω_r 响应曲线



(b) 风能利用系数 C_p 响应曲线



(c) 叶尖速比 λ 响应曲线



(d) 控制律输出转矩 T_g 响应曲线

图 4 稳定风速条件系统响应曲线

Fig. 4 Response curves under stable wind speed condition

图 4(a) 为风力机 MPPT 转子角速度 ω_r 动态跟踪仿真波形。由图可见，ARC 控制器驱使风力发电系统在启动初始的 0~10 s 内，转子角速度 ω_r 即无超调地跟踪到最优值 $\omega_r^*=4.49\text{ rad/s}$ ，进入了 MPPT 运行状态。在第二阶段的 60 s 时刻，因为突然增加的扰动转矩， ω_r 偏离 ω_r^* ，但在 8 s 的调节时间内又无静差地跟踪到了 ω_r^* 。相比 SFC 控制器在启动初始阶段 MPPT 跟踪速度与 ARC 相近，并略有优势，但在第 60 s 后的扰动抑制阶段， ω_r 最大偏差和平抑调节时间均较 ARC 大了一倍以上，而 PID 控制器的启动阶跃跟踪和扰动抑制调节时间均大于 30 s，最大超调量近 10%。该仿真波形表明，ARC 控制器有良好的 MPPT 跟踪能力，以及抗扰动能力。

图 4(b) 和图 4(c) 分别为风能利用系数 C_p 和叶尖速比 λ 响应曲线。ARC 控制器在系统启动后 10 s 内，风能利用系数就达到理论最大值 $C_{pmax}=0.48$ ，

叶尖速比 λ 达到理论最优值 $\lambda_{opt}=8.1$, 在第二阶段 60 s 时刻, 扰动发生后, 风能利用系数和叶尖速比均出现了约 2% 的短时间偏离, 但在 8 s 内很快恢复到 C_{pmax} 和 λ_{opt} 。该仿真波形表明, 在系统有无扰动条件下, ARC 控制方法均能够有效地控制风力利用系数 C_p 和叶尖速比 λ 始终保持在最大和最优值上, 较 PID 和 SFC 控制, ARC 控制有更佳的风能吸收性能和鲁棒性能。

图 4(d) 是风力发电系统的风力机低速轴上发电等效电磁转矩 T_g 响应曲线。由图可见, 在第一阶段的系统启动突跳阶跃情况下和第二阶段的系统受扰动情况下, 三种控制器均能使得转矩 T_g 在最大转矩过载量 $1.6T_{gN}$ 幅值范围内动态调整, 并进入新的稳定状态。但相比之下, ARC 控制较 PID 和 SFC 控制更加快速和平稳, 且控制幅值并不比后两者大。

3.2 自然连续风条件的仿真分析

该仿真算例, 通过自然连续风引起的气动转矩 T_a 的随机强不确定、系统模型参数的较大扰动和附加扰动转矩 T_d 的大幅变化等仿真设置条件, 来对比分析三类控制器的 MPPT 动态鲁棒性能。

自然连续风速选用 280 s 时长的慢速变化平均风速叠加快速变化湍流风速模型, 以更接近实际风场的随机风速情况, 更好地表征实际自然风的非线性性和不确定性的特征, 如图 5 所示。

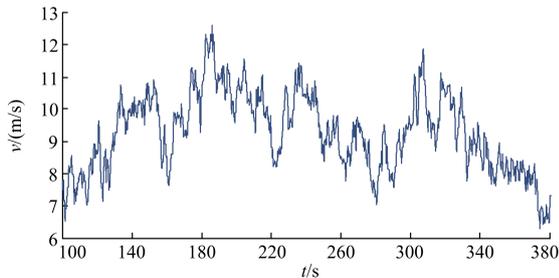


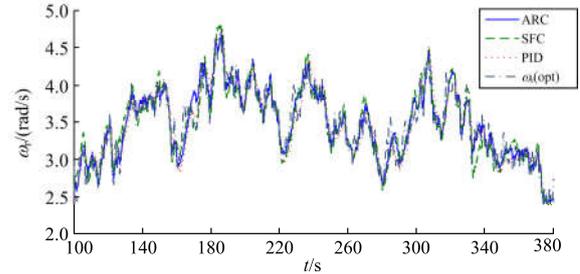
图 5 自然连续风速模型

Fig. 5 Natural wind speed curve

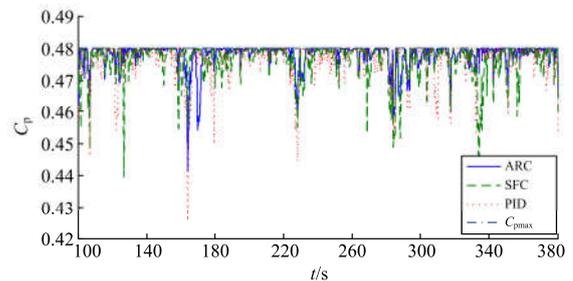
在自然连续风速的情况下, 设定系统模型(12)中, 总转动惯量 J_t 和总阻尼系数 B_t 变化为原初始值的 110%, 并在附加扰动转矩 $T_d=30(1+\cos(2t))$ kN·m 条件下, 对三种控制器进行仿真的结果如图 6 所示。

图 6 为风力机 MPPT 转子角速度 ω_r 和风能利用系数 C_p 动态响应曲线。相比之下, ARC 控制的角速度跟踪特性比 PID 和 SFC 控制更加紧密。后两者控制器无法使系统保持在最大的风能利用率 C_{pmax} 运行状态上, 分别偏离最大风能利用率 8% 和 12.5% 左右, 甚至出现不稳定的大波动现象。该仿真结果表明, ARC 在系统受强参数不确定性、模型参数

扰动和大扰动工作状态下, 均能保证系统在自然连续风速下的最大风能利用率运行, 且动态过程优于 PID 和 SFC。



(a) 转子角转速 ω_r 响应曲线



(b) 风能利用系数 C_p 响应曲线

图 6 自然连续风速条件系统响应

Fig. 6 Response curves under natural wind speed condition

4 结论

为了提升风力发电系统 MPPT 运行的工作性能, 在考虑风力发电机系统模型不确定、强外部干扰和非线性等特点基础上, 建立了基于广义扰动的风力发电系统角速度跟踪动态模型, 并设计了一种独立于系统模型的 MPPT 自适应鲁棒控制器。该控制律不依赖于系统模型参数和不确定项辨识, 对 MPPT 跟踪运行控制和扰动平抑具有强鲁棒性和自适应。利用基于偏差的非线性状态反馈以及扰动项边界值的自适应在线实时估计方法, 实现了对扰动的快速有效补偿, 同时降低了符号函数控制量切换增益幅值, 控制输出平滑连续, 体现了良好的工程实用性。从仿真结果可以看出, 该 ARC 控制方法能够良好地实现 MPPT 跟踪控制, 相比于 PID 和 SFC 控制有更好的控制性能。

参考文献

- [1] AJAMI A, ALIZADEH R, ELMIM M. Design and control of a grid tied 6-switch converter for two independent low power wind energy resources based on PMSGs with MPPT capability[J]. Renewable Energy, 2016, 87(1): 532-543.
- [2] 吴定会, 刘稳, 宋锦. 基于 SDW-LSI 算法的风力机故障估计与容错控制[J]. 电力系统保护与控制, 2017,

- 45(4): 64-71.
WU Dinghui, LIU Wen, SONG Jin. Fault estimation and fault tolerant control of wind turbines based on the SDW-LSI identification algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(4): 64-71.
- [3] LARA D, MERINO G, SALAZAR L. Power converter with maximum power point tracking MPPT for small wind-electric pumping systems[J]. Energy Conversion and Management, 2015, 97: 53-62.
- [4] 沈阳武, 葛云霞, 崔挺, 等. 基于阻抗比判据的永磁直驱风力发电系统并网稳定分析方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(18): 45-53.
SHEN Yangwu, GE Yunxia, CUI Ting, et al. A stability analysis method for the grid-connected permanent magnet synchronous generator based on impedance ratio criterions[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(18): 45-53.
- [5] 李咸善, 徐浩, 杜于龙. 采用叶尖速比法和爬山搜索法相结合的风力发电系统最大功率点跟踪研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 66-71.
LI Xianshan, XU Hao, DU Yulong. Maximum power tracking of wind power generation system using the combination of tip speed ratio method and climbing search method[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(13): 66-71.
- [6] REN Yaxing, LI Liuying, BRINDLEY J, et al. Nonlinear PI control for variable pitch wind turbine[J]. Control Engineering Practice, 2016, 50: 84-94.
- [7] BOUKHEZZAR B, SIGUERDIDJANE H. Nonlinear control of a variable-speed wind turbine using a two-mass model[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2011, 26(1): 149-162.
- [8] 刘英培, 梁海平, 栗然. 基于无源性与自抗扰控制的双馈风力发电系统研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(18): 121-130.
LIU Yingpei, LIANG Haiping, LI Ran. Research on doubly-fed wind power generation with passivity-based control and active disturbance rejection control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(18): 121-130.
- [9] SONG Dongran, YANG Jian, DONG Mi, et al. Model predictive control with finite control set for variable-speed wind turbines[J]. Energy, 2017, 126: 564-572.
- [10] AHMED M, ABDERREZAK G, HOCINE B, et al. New neural network and fuzzy logic controllers to monitor maximum power for wind energy conversion system[J]. Energy, 2016, 106: 137-146.
- [11] MERABET A, AHMED K T, IBRAHIM H, et al. Implementation of sliding mode control system for generator and grid sides control of wind energy conversion system[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(3): 1327-1335.
- [12] 吴爱华, 赵不赓, 茅靖峰, 等. 基于转矩观测器的垂直轴风力发电最大功率跟踪反演控制[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(2): 7-13.
WU Aihua, ZHAO Buhui, MAO Jingfeng, et al. Back-stepping control for vertical axis wind power generation system maximum power point tracking based on torque observer[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(2): 7-13.
- [13] IMRAN R M, HUSSAIN D, MU A, et al. Optimal tuning of multivariable disturbance-observer-based control for flicker mitigation using individual pitch control of wind turbine[J]. IET Renewable Power Generation, 2017, 11(8): 1121-1128.
- [14] FANTINO R, SOLSONA J, BUSADA C. Nonlinear observer-based control for PMSG wind turbine[J]. Energy, 2016, 137: 248-257.
- [15] 茅靖峰, 吴爱华, 吴国庆, 等. 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[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(18): 58-65.
MAO Jingfeng, WU Aihua, WU Guoqing, et al. Adaptive sliding mode MPPT control for PMSG-based wind energy conversion systems based on extended state observer[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(18): 58-65.
- [16] AAMER B A, LIU Xiaodong. Adaptive neuro-fuzzy algorithm to estimate effective wind speed and optimal rotor speed for variable-speed wind turbine[J]. Neurocomputing, 2018, 272: 495-504.
- [17] MAJID M, MOJTABA K, RUPP C, et al. Application of imputation techniques and adaptive neuro-fuzzy inference system to predict wind turbine power production[J]. Energy, 2017, 138: 394-404.
- [18] ABDELRAHEM M, HACKL C M, KENNEL R. Simplified model predictive current control without mechanical sensors for variable-speed wind energy conversion systems[J]. Electrical Engineering, 2017, 99(1): 367-377.
- [19] SHAFIEI A, DEHKORDI B M, KIYOUARS A, et al. A control approach for a small-scale PMSG-based WECS in the whole wind speed range[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(12): 9117-9130.
- [20] LI Danyong, SONG Yongduan, GAN Zhongxue, et al. Fault-tolerant optimal tip-speed-ratio tracking control of wind turbines subject to actuation failures[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(12): 7513-7523.

收稿日期: 2017-11-21; 修回日期: 2018-01-29

作者简介:

茅靖峰(1976—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为风力发电技术、容错控制; E-mail: mao.jf@163.com

吴博文(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为风力发电容错控制; E-mail: 342410121@qq.com

吴爱华(1978—), 女, 博士研究生, 副教授, 研究方向为风力发电技术、容错控制。E-mail: wahmx@163.com

(编辑 葛艳娜)