

7-2-2020

Overall-wind-speed Dynamic Sliding Mode Power Control for Direct-driven PMSG-based Wind Energy Generation System

Aihua Wu

1. School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;;2. School of Mechanical Engineering, Nantong University, Nantong 226019, China;

Buhui Zhao

1. School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;;

Jingfeng Mao

2. School of Mechanical Engineering, Nantong University, Nantong 226019, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Overall-wind-speed Dynamic Sliding Mode Power Control for Direct-driven PMSG-based Wind Energy Generation System

Abstract

Abstract: A novel dynamic sliding mode control (DSMC) strategy for direct-driven PMSG system was proposed to improve wind energy generation efficiency in overall-wind-speed operating condition. Based on the multi-stage working characteristics, *optimum torque control method* was adopted to implement the MPPT task when wind speed was under the rating value, and power control method was adopted to implement the constant power generation task when wind speed was above the rating value. The controller was designed by the sliding mode reaching law method of power exponent function. Due to the switch function amplitude feedback, the switch gain was granted the capability of automatic adjust with tracking error. The tracking response time was shorten while the overshoot was effectively suppressed. The DSMC law involved a first-order integral process of the control input signal, which could make the actual PMSG control current continuously and smoothly. The integral process contributed greatly to weaken chattering. Simulation results demonstrate the effectiveness of the proposed DSMC strategy.

Keywords

wind energy generation systems, permanent magnet synchronous generator, maximum power point tracking, power control, dynamic sliding mode control

Recommended Citation

Wu Aihua, Zhao Buhui, Mao Jingfeng. Overall-wind-speed Dynamic Sliding Mode Power Control for Direct-driven PMSG-based Wind Energy Generation System[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(1): 99-105.

永磁直驱风力发电系统全风况功率滑模控制

吴爱华^{1,2}, 赵不赅¹, 茅靖峰²

(1. 江苏大学电气信息工程学院, 江苏 镇江 212013; 2. 南通大学机械工程学院, 江苏 南通 226019)

摘要: 为了提高永磁直驱风力发电系统的全风况运行性能, 根据多阶段发电的特点和要求, 分析建立了基于最佳转矩控制策略的额定风速以下最大功率跟踪控制系统模型, 以及基于恒功率控制策略的额定风速以上功率平衡控制系统模型, 设计了系统全风况发电控制器。控制器采用滑模幂指数趋近律设计方法, 并将切换函数幅值作为负反馈量, 引入切换增益的调节机制, 以协调系统跟踪的快速性指标与抑制超调的能力; 通过在滑模控制律中引入控制输入量的一阶积分项, 形成在时间上连续的动态滑模控制律, 以抑制抖振, 提高控制精度和鲁棒性。仿真实验验证了所述控制方法的先进有效性。

关键词: 风力发电; 永磁同步发电机; 最大功率跟踪; 功率控制; 动态滑模控制

中图分类号: TM614; TP273 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2016) 01-0099-07

Overall-wind-speed Dynamic Sliding Mode Power Control for Direct-driven PMSG-based Wind Energy Generation System

Wu Aihua^{1,2}, Zhao Buhui¹, Mao Jingfeng²

(1. School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;

2. School of Mechanical Engineering, Nantong University, Nantong 226019, China)

Abstract: A novel dynamic sliding mode control (DSMC) strategy for direct-driven PMSG system was proposed to improve wind energy generation efficiency in overall-wind-speed operating condition. Based on the multi-stage working characteristics, *optimum torque control method was adopted to implement the MPPT task when wind speed was under the rating value, and power control method was adopted to implement the constant power generation task when wind speed was above the rating value. The controller was designed by the sliding mode reaching law method of power exponent function. Due to the switch function amplitude feedback, the switch gain was granted the capability of automatic adjust with tracking error. The tracking response time was shorten while the overshoot was effectively suppressed. The DSMC law involved a first-order integral process of the control input signal, which could make the actual PMSG control current continuously and smoothly. The integral process contributed greatly to weaken chattering. Simulation results demonstrate the effectiveness of the proposed DSMC strategy.*

Keywords: wind energy generation systems; permanent magnet synchronous generator; maximum power point tracking; power control; dynamic sliding mode control

引言

永磁直驱风力发电系统在全风速运行工况下



收稿日期: 2014-09-11 修回日期: 2015-01-14;
基金项目: 国家自然科学基金(61004053, 61273151);
江苏省自然科学基金(BK20141238);
作者简介: 吴爱华(1978-), 女, 江苏南通, 博士生,
副教授, 研究方向为风力发电控制技术、智能检测
技术。

具有多阶段的目标控制要求, 即在低于额定风速时实现最大功率跟踪(MPPT)控制, 以捕获最大的风能; 在高于额定风速时实现恒功率控制, 以限制风能吸收, 避免机组过载而损坏机电设备。

对于风力机参数明确且转动惯量较大的系统, 常采用基于最佳特性曲线策略的最大功率跟踪控制方法^[1-4]。其中, 转矩控制策略和功率控制策略,

无需风速检测, 控制器只需根据实时的转速反馈来测算出最佳的转矩或功率指令值, 通过对发电机转矩或功率的闭环跟踪控制, 借助系统的大惯量特性, 实现风力机转速的平稳调节, 达到以较柔和的方式捕获最大风能的目的。为了提高控制性能, 国内外学者在该领域应用了多种非线性控制方法, 如反馈线性化^[5]、内模控制^[6]、鲁棒控制^[7]、模糊神经网络控制^[8]、滑模控制^[9]、自抗扰控制^[10]、分数阶控制^[11]等, 但现有文献主要集中于探讨在额定风速以下的最大功率跟踪控制, 而额定风速以上的恒功率控制是确保整机安全运行、避免过载的重要环节。为此, 在全风速运行范围内研究永磁直驱风力发电系统的发电控制技术, 具有良好的实际意义。

在分析永磁直驱风力发电最大功率跟踪控制和恒功率控制原理及特性的基础上, 以提高系统发电性能为目标, 依据转矩和功率平衡方程, 在考虑机械损耗的前提下, 提出一种永磁直驱风力发电系统全风况功率动态滑模控制器。控制器采用滑模指数趋近律设计方法, 并将切换函数幅值作为负反馈量, 引入切换增益的调节机制, 以协调系统跟踪过程的快速指标与抑制超调的能力; 同时, 在滑模控制律中引入控制输入量的一阶积分项, 使得从发电机实际电流控制输入量的角度, 得到在时间上连续的动态滑模控制律, 以有效抑制系统抖振、提高稳态控制精度、增强系统鲁棒性。应用 MATLAB/Simulink 仿真软件, 对提出的全风速功率动态滑模控制系统进行仿真建模, 通过快速阶跃变化风速和连续自然全风况两种条件下的发电性能仿真实验与分析对比, 验证了其控制的先进有效性。

1 系统数学模型与分析

1.1 风力机数学模型

根据贝茨理论, 定桨距角风力机转轴上输出的机械功率为^[1-2]

$$P_t = \frac{1}{2} \pi C_p(\lambda) \rho r_m^2 v^3 \quad (1)$$

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

$$\lambda = \frac{\omega_m r_m}{v} \quad (2)$$

式中: ω_m 为风力机角速度。

风能利用系数 $C_p(\lambda)$ 是叶尖速比 λ 的非线性函数, 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 $C_p(\lambda)$ 才能达到最大数值 C_{pmax} 。此时, 风力机转轴上输出的最大功率 P_{topt} 和最佳转矩 T_{topt} 分别为

$$P_{topt} = \frac{1}{2 \lambda_{opt}^3} \pi C_{pmax} \rho r_m^5 \omega_m^3 = K_{opt} \omega_m^3 \quad (3)$$

$$T_{topt} = \frac{P_{topt}}{\omega_m} = K_{opt} \omega_m^2 \quad (4)$$

式中, K_{opt} 为最佳转矩系数。

在不同风速条件下, 风力机转轴上输出的机械功率 P_t 与风速 v 和风力机角速度 ω_m 间的关系曲线簇, 以及最大功率 P_{topt} 和最佳转矩 T_{topt} 曲线如图 1 所示。

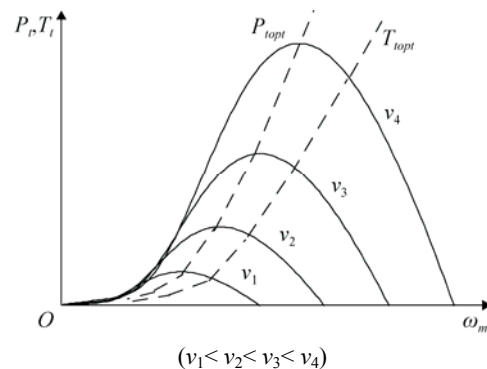


图 1 风力机输出特性曲线

显然, 风力机吸收的最大风功率 P_{topt} 随着风速 v 的增加而增大, 当风速 v 超过额定时, 风力机吸收的最大风功率 P_{topt} 将大于机组的额定功率 P_{rated} 。因此, 为保证机组的安全可靠运行, 并获得最大的风功率转换, 在额定风速以下, 风力发电系统需要实现最大功率跟踪运行, 以最大限度地吸收风能, 在额定风速以上, 需要实现恒额定功率运行, 以限制风能的吸收。由式(3)可得到两种运行模式的切换角速度为

$$\omega_{msw} = \sqrt[3]{\frac{P_{rated}}{K_{opt}}} \quad (5)$$

1.2 永磁同步发电机数学模型

永磁同步发电机(PMSG)在 d - q 旋转坐标系下的数学模型可表示为^[4-5]

$$\begin{aligned} u_d &= -R_s i_d - L_d \frac{di_d}{dt} + L_q n_p \omega_m i_q \\ u_q &= -R_s i_q - L_q \frac{di_q}{dt} - L_d n_p \omega_m i_d + n_p \omega_m \psi_f \end{aligned} \quad (6)$$

式中: u_d , u_q , i_d , i_q , L_d , L_q 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; n_p 为发电机极对数; ψ_f 为永磁磁链。

PMSG 发电电磁转矩为

$$T_e = \frac{3}{2} n_p [\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (7)$$

本文考虑表贴式结构的 PMSG, 由于其 d , q 轴电感量相等, 故其电磁转矩方程可简化写为

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

根据风力机转轴与 PMSG 转轴的直驱连接关系, 可得风力发电系统的机电耦合运动学模型为

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{J} \left(T_t - \frac{3}{2} n_p \psi_f i_q - B\omega_m \right) \quad (9)$$

式中: J 为旋转主轴的转动惯量; B 为传动摩擦系数。

2 幂指数趋近律滑模控制^[12]

考虑如下具有标准形式的非线性系统

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x) + g(x)u \\ y &= s(t, x) \end{aligned} \quad (10)$$

式中: x 为系统状态变量; u 为系统输入; y 为系统输出; $f(x)$, $g(x)$ 均为已知函数, 且对任意 x , $g(x) \neq 0$; $s(t, x)$ 为滑模切换函数。

考虑在单输入情况下, 线性切换函数设计为

$$s(t, x) = C^T x(t) \quad (11)$$

式中: C^T 为正常系数向量, 决定最终滑模状态的品质。

当系统进入滑动模运动后, 由于系统的状态轨迹保持在其上面, 故切换函数恒满足

$$y = s(t, x) = \dot{s}(t, x) = 0 \quad (12)$$

展开式(12)得

$$\begin{aligned} \dot{s} &= \frac{\partial}{\partial t} s(t, x) + \frac{\partial}{\partial x} s(t, x) (f(x) + g(x)u) = \\ &\eta(t, x) + \mathcal{G}(t, x)u = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

考虑幂指数趋近律

$$\dot{s} = -\gamma |s|^\alpha \operatorname{sgn}(s) \quad (14)$$

式中: γ 为切换增益, $\gamma > 0$; α 为幂指数, $0 < \alpha < 1$ 。

联立式(13)和式(14)可求得滑模控制律为

$$u = -\frac{\eta(t, x) + \gamma |s|^\alpha \operatorname{sgn}(s)}{\mathcal{G}(t, x)} \quad (15)$$

选择 Lyapunov 函数为 $V = s^2/2$, 通过 Lyapunov 稳定性理论得到

$$\dot{V} = s\dot{s} = -\gamma |s|^{1+\alpha} < 0 \quad (16)$$

因此, 在滑模控制律式(15)作用下, 系统全局渐进稳定, 滑动模态可达, 系统状态能够沿着滑模切换函数 s 趋近于平衡原点。

为了抑制实际系统的抖振问题, 控制律中的符号函数采用平滑处理为

$$\operatorname{sgn}(s) = \frac{s}{|s| + \sigma} \quad (17)$$

式中: σ 为数值较小的正常数。

3 全风速发电动态滑模控制

3.1 最大功率跟踪控制

实现最大风能捕获任务的控制方法常有基于最佳叶尖速比的转速控制、基于最大功率曲线的功率控制和基于最佳转矩曲线的转矩控制三种方案, 虽然其机械与气动机理相统一, 但从电磁控制的直接性与减轻对电网和机械的冲击性考虑^[13], 本文采用转矩控制策略。

首先, 根据转矩动态平衡方程, 定义 MPPT 最佳转矩控制的状态变量

$$x_{11} = \int_0^t [T_{\text{opt}} - (T_e + T_0)] dt \quad (18)$$

$$x_{12} = \dot{x}_{11} = T_{\text{opt}} - (T_e + T_0)$$

式中: T_0 为传动摩擦损耗转矩, $T_0 = B\omega_m$ 。

将式(18)求导, 并由式(9)可得, 以 x_{11} 和 x_{12} 为状态变量的 MPPT 最佳转矩控制系统非线性状态方程为

$$\begin{aligned} \dot{x}_{11} &= J\dot{\omega}_m \\ \dot{x}_{12} &= 2K_{opt}\omega_m\dot{\omega}_m - \frac{3}{2}n_p\psi_f\dot{i}_q - B\dot{\omega}_m \end{aligned} \quad (19)$$

根据式(11), 选取线性切换函数

$$s_1 = c_1x_{11} + x_{12} \quad (20)$$

式中: $c_1 > 0$ 。

根据式(14), 选取幂指数趋近律

$$\dot{s}_1 = -\gamma_1 |s_1|^{\alpha_1} \text{sgn}(s_1) \quad (21)$$

式中: $\gamma_1 > 0$; $0 < \alpha_1 < 1$ 。

对式(20)求导, 并代入式(19)得

$$\begin{aligned} \dot{s}_1 &= c_1\dot{x}_{11} + \dot{x}_{12} = \\ & c_1J\dot{\omega}_m + 2K_{opt}\omega_m\dot{\omega}_m - \frac{3}{2}n_p\psi_f\dot{i}_q - B\dot{\omega}_m \end{aligned} \quad (22)$$

将式(21)代入式(22)可得滑模控制律

$$\begin{aligned} \dot{i}_q &= \frac{2}{3n_p\psi_f} [(c_1J + B + 2K_{opt}\omega_m)\dot{\omega}_m + \\ & \gamma_1 |s_1|^{\alpha_1} \text{sgn}(s_1)] \end{aligned} \quad (23)$$

分析式(23)可知, 该滑模控制律是非线性状态方程式(19)的输入控制量, 同时, 也是 PMSG 电流控制输入量 i_q 的一阶微分形式。

因此, 根据机电耦合运动学模型式(9), 将式(23)经积分器输出后, 即可得到发电系统基于最佳转矩控制策略 MPPT 运行模式下, PMSG 动态滑模控制律形式的 q 轴参考电流值。

3.2 恒功率控制

对于定桨距角风力机, 在恒功率控制段, 需要电磁调节发电机转速, 使得机组在风速额定值以上变化时, 恒额定功率发电。

首先, 根据功率动态平衡方程, 定义恒功率控制的状态变量

$$\begin{aligned} x_{21} &= \int_0^t [P_{rated} - (P_e + P_0)] dt \\ x_{22} &= \dot{x}_{21} = P_{rated} - (P_e + P_0) \end{aligned} \quad (24)$$

式中: P_e 为发电机电磁功率, $P_e = T_e\omega_m$; P_0 为传动摩擦损耗功率, $P_0 = B\omega_m^2$ 。

将式(24)求导, 并由式(8)可得, 以 x_{21} 和 x_{22} 为状态变量的恒功率控制系统非线性状态方程为

$$\dot{x}_{21} = P_{rated} - \frac{3}{2}n_p\psi_f i_q \omega_m - B\omega_m^2 \quad (25)$$

$$\dot{x}_{22} = -\frac{3}{2}n_p\psi_f (i_q \omega_m + i_q \dot{\omega}_m) - 2B\omega_m \dot{\omega}_m$$

根据式(11), 选取线性切换函数

$$s_2 = c_2x_{21} + x_{22} \quad (26)$$

式中, $c_2 > 0$ 。

根据式(14), 选取幂指数趋近律

$$\dot{s}_2 = -\gamma_2 |s_2|^{\alpha_2} \text{sgn}(s_2) \quad (27)$$

式中, γ_2 —切换增益, $\gamma_2 > 0$; $0 < \alpha_2 < 1$ 。

对式(26)求导, 并代入式(25)得

$$\begin{aligned} \dot{s}_2 &= c_2\dot{x}_{21} + \dot{x}_{22} = \\ & c_2 \left(P_{rated} - \frac{3}{2}n_p\psi_f i_q \omega_m - B\omega_m^2 \right) - \\ & \frac{3}{2}n_p\psi_f (i_q \omega_m + i_q \dot{\omega}_m) - 2B\omega_m \dot{\omega}_m \end{aligned} \quad (28)$$

将式(27)代入式(28)可得滑模控制律

$$\begin{aligned} \dot{i}_q &= \frac{2c_2P_{rated} + 2\gamma_2 |s_2|^{\alpha_2} \text{sgn}(s_2)}{3n_p\psi_f \omega_m} - \\ & \frac{2B(c_2\omega_m + 2\dot{\omega}_m)}{3n_p\psi_f} - \left(c_2 + \frac{\dot{\omega}_m}{\omega_m} \right) i_q \end{aligned} \quad (29)$$

分析式(29)可知, 该滑模控制律作为非线性状态方程式(25)的输入控制量, 其形式为 PMSG 电流控制输入量 i_q 的一阶微分, 并在表达式中包含控制输入电流 i_q 。根据机电耦合运动学模型式(9), 将式(29)积分后, 即可得到发电系统恒功率控制运行模式下, PMSG 动态滑模控制律形式的 q 轴参考电流值。

由 Lyapunov 稳定性理论及式(16)可知, MPPT 滑模控制律式(23)和恒功率滑模控制律式(29)可以保证系统全局渐进稳定。同时, 由于 PMSG 发电机的实际电流控制输入值 i_q 是相应滑模控制律的一阶积分量, 因此, 该控制律可有效地抑制抖振现象, 提高系统控制的平滑性和鲁棒性, 并可使得 PMSG 转矩与功率控制稳态无误差。

4 系统仿真与结果分析

依据前文分析, 在 MATLAB/Simulink 环境下

建立基于常微分方程表述的永磁直驱风力发电系统及其动态滑模全风速功率控制器仿真模型。仿真求解器选用变步长 ode23tb 算法, 相对误差设置为 $1e-4$ 。系统模型参数如下:

永磁同步发电机参数: 额定功率 $P_N=5.5$ KW, 额定转速 $n_N=500$ 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 $R_s=0.24$ Ω , 定子交直流电感 $L_d=L_q=8.5$ mH。

风力机参数: 叶片半径 $r_m=1.86$ m, 最大风能利用系数 $C_{Pmax}=0.48$, 最佳叶尖速比 $\lambda_{opt}=8.1$, 最佳转矩系数 $K_{opt}=0.0354$, 额定风速 $v_{rated}=12$ $m \cdot s^{-1}$, 额定功率 $P_{rated}=5.5$ KW, 传动摩擦系数 $B=0.04$ $N \cdot s \cdot rad^{-1}$, 空气密度 $\rho=1.293$ $kg \cdot m^{-3}$, 旋转主轴转动惯量 $J=1.2$ $kg \cdot m^2$ 。

动态滑模控制器参数: $c_1=0.01$, $\gamma_1=0.01$, $c_2=20$, $\gamma_2=10$, $\alpha_1=\alpha_2=0.5$, $\sigma=0.1$ 。

仿真方案为在快速阶跃变化风速和连续自然全风况 2 种条件下, 系统的发电性能。

为了进行控制效果对比, 设计 PMSG 全风况发电 PID 功率控制器, 其 MPPT 运行控制参数为: $K_p=5.5$, $K_i=4$, $K_d=0.1$; 恒功率运行控制参数为: $K_p=2$, $K_i=1$, $K_d=0.1$ 。

图 2 为在额定风速以下, 风速以 $v(t)=6\varepsilon(t)+5\varepsilon(t-4)-3\varepsilon(t-12)$ $m \cdot s^{-1}$ 方式, 20 s 时间内跃变条件下, 2 种控制器实现 MPPT 发电的最佳转矩跟踪控制过程曲线。

由图 2(a)和图 2(d)可见, 在额定风速以下, DSMC 控制和 PID 控制方法均实现了发电机电磁转矩 T_e 在快速跳变风速情况下对风力机最佳转矩 T_{topt} 的跟踪, 在到达稳态时, 满足转矩平衡关系式 $T_{topt}=T_e+T_0$, 且尖速比稳态保持在最佳值 $\lambda_{opt}=8.1$ 上, 即说明实现了 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特性, 为了协调跟踪控制的快速性和准确性指标, 优化参数的 PID 控制器, 产生了较大的超调量和较长的调节时间; 而 DSMC 控制器产生的电磁调节转矩较之更加快速和平稳, 且没有超调。

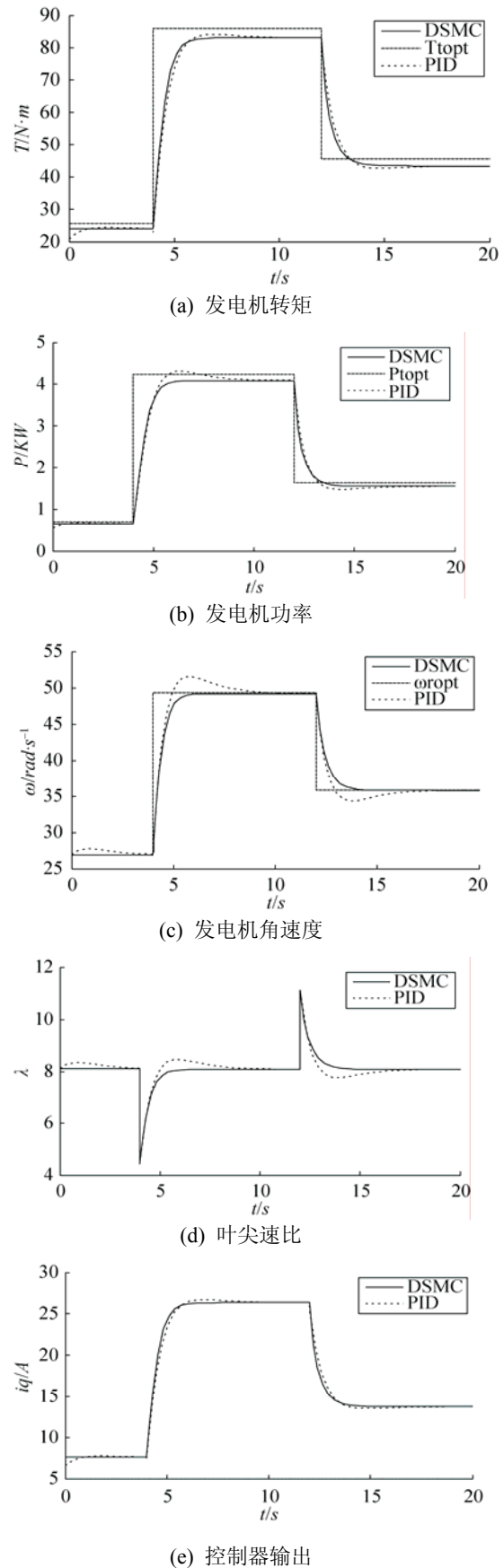


图 2 额定风速以下 MPPT 运行曲线

进一步分析发电机功率图 2(b)可见, 虽然, 在 $t=4$ s 时刻, 风速跃升 5 m/s 情况下, 由于 PID 控制过程产生了 5.8% 的超调, 使系统具有了更大的功率吸收值, 但其调节时间超过 6 s, 说明 PID 控制的功率调节过程波动大时间长, 这种特性会导致在连续的风力追踪过程中, 风力机转速动态调节频繁震荡, MPPT 性能变差; 在 $t=12$ s 时刻, 风速跃降 3 m/s 情况下, 2 种控制方法均会产生超过风力机最佳转矩 T_{topt} 值的电磁输出, 使得发电机转速快速

下降, 但 PID 控制产生了 6.6% 的超调, 较 DSMC 控制的调节时间长了 2.7 s, 说明 DSMC 控制更加平滑, 具有在大误差时, 快速响应, 在小误差时, 柔和趋近的良好非线性特性, 且从图 2(e)可见, DSMC 控制量输出没有抖振现象, 总体控制效果优于 PID 控制。

图 3 为风速在 $6\sim 15.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 区间上, 100 s 时间内连续自然全风速范围变化时, 两种控制器实现的发电过程响应曲线。

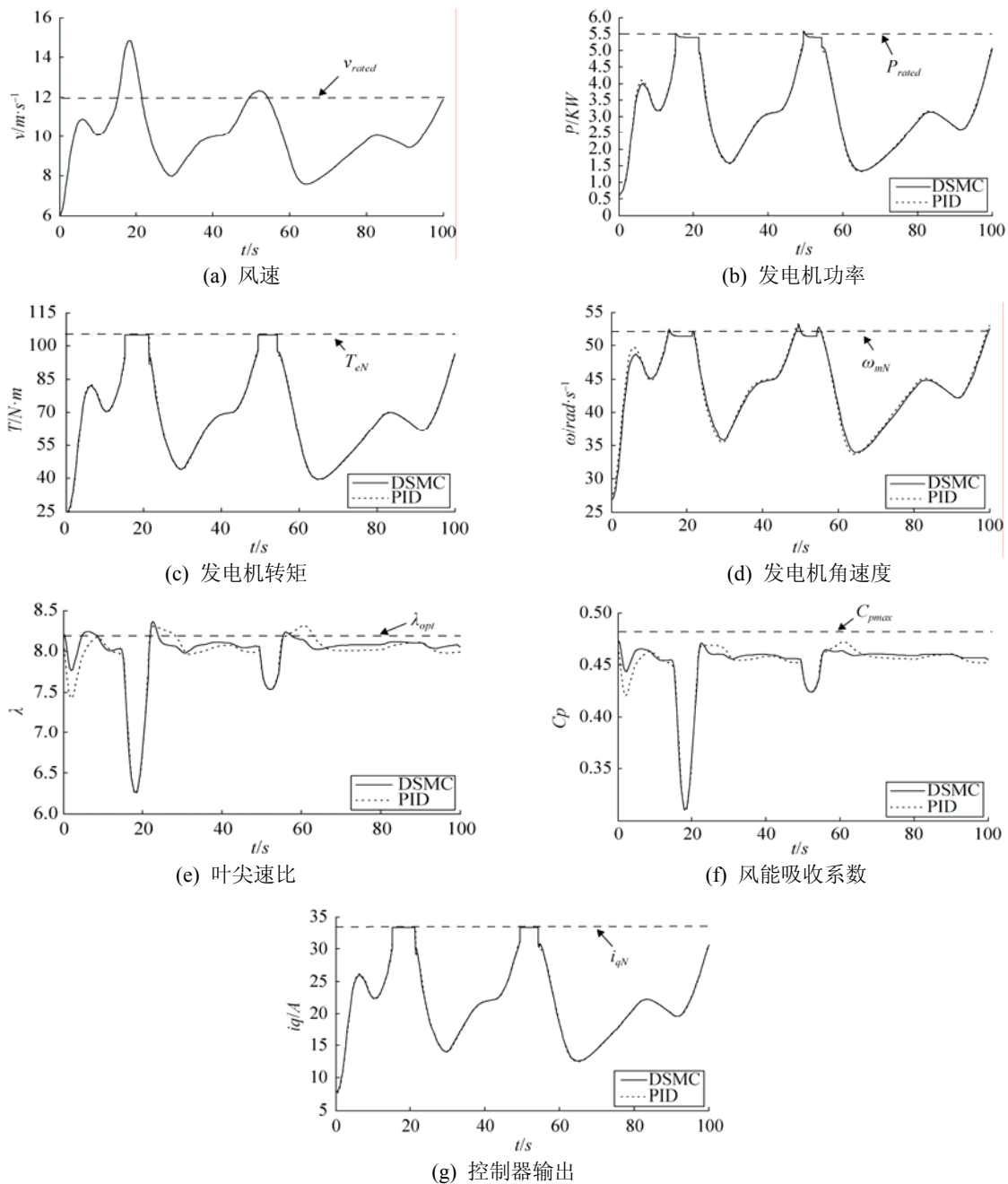


图 3 全风速范围发电运行曲线

<http://www.china-simulation.com>

由图 3 可见, 在额定风速以下运行时, 发电机电磁转矩 T_e 和功率 P_e 随风速变化, 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, 表明系统运行在 MPPT 模式。

在额定风速以上运行时, 发电机电磁功率 P_e 维持在风力机额定功率 P_{rated} 以下, 并保持基本恒定, 满足功率平衡关系式 $P_{rated}=P_e+P_0$; 同时, 风力机叶尖速比快速而较大地偏离了最优值 λ_{opt} , 导致风能利用系数较远地降低到 C_{Pmax} 线以下, 其效果保证了风力机吸收的气动功率始终处于额定值 P_{rated} 附近, 以达到系统恒功率运行的目的。

图 3 可以表明, 在风速连续大范围波动的情况下, 系统实现了 MPPT 控制和恒功率控制两种模式间切换运行, 其中, DSMC 控制器输出快速平滑无抖振, 动态调节过程较 PID 控制在快速跟随和抑制超调方面具有更好的协调能力, 大范围适应性和鲁棒性良好。

5 结论

本文提出了一种基于幂指数趋近率的永磁直驱风力发电系统全风况发电功率动态滑模控制策略。根据风力发电过程所需的平滑、高效和安全要求, 在额定风速以下, 采用最佳转矩控制策略的 MPPT 运行控制; 在额定风速以上, 采用额定功率输出的恒功率控制策略。设计的幂指数趋近律引入滑模切换函数幅值的负反馈环节, 使得滑模控制律在大偏差高速逼近和小偏差柔和趋近特性上具有良好的协调能力; 基于一阶积分环节输出的动态滑模控制量, 有效地抑制了传统滑模控制的抖振现象, 提高了发电控制的平滑性、精度和鲁棒性。通过快速阶跃变化和大范围连续变化风况条件下的 MATLAB/Simulink 系统仿真实验研究与对比分析, 验证了所提出的控制策略在永磁直驱风力发电系统全风速范围发电控制中的先进有效性。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] Yu Zou, Elbuluk M E, Sozer Y. Stability Analysis of Maximum Power Point Tracking (MPPT) Method in Wind Power Systems [J]. IEEE Transactions on Industry Applications (S0093-9994), 2013, 49(3): 1129-1136.
- [4] 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 Transactions on Power Electronics (S8858-8993), 2011, 26(12): 3609-3620.
- [5] Kim K H, Jeung Y C, Lee D C, et al. LVRT Scheme of PMSG Wind Power Systems Based on Feedback Linearization[J]. IEEE Transactions on Power Electronics (S8858-8993), 2012, 27(5): 2376-2384.
- [6] 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.
- [7] Corradini M L, Ippoliti G, Orlando G. Robust Control of Variable-Speed Wind Turbines Based on an Aerodynamic Torque Observer [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology (S1063-6536), 2013, 21(4): 1199-1206.
- [8] 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 Transactions on Power Electronics (S8858-8993), 2011, 26(1): 165-175.
- [9] Valenciaga F, Puleston P F. High-Order Sliding Control for a Wind Energy Conversion System Based on a Permanent Magnet Synchronous Generator [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion (S0885-8969), 2008, 23(3): 860-867.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 高为炳. 变结构控制的理论及设计方法[M]. 北京: 科学出版社, 1996: 28-29.
- [13] 马小亮. 变速风力发电的最大风能捕获控制方法[J]. 电气传动, 2011, 41(5): 3-6.