

文章编号:1671-6833(2016)04-0001-05

永磁直驱风力发电系统最大风能捕获滑模控制

刘艳红, 赵景隆

(郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 针对永磁直驱风力发电系统实现最大风能捕获的问题, 提出一种高阶非奇异终端滑模控制策略. 根据永磁直驱风力发电系统的非线性模型, 基于最佳转矩跟踪的最大功率点跟踪(maximum power point tracking)方法, 将高阶非奇异终端滑模控制应用于永磁同步发电机(permanent magnet synchronous generator)设计转矩控制器和电流控制器, 实现永磁直驱风力发电系统的无风速传感器最大功率点的快速跟踪和稳定控制. 仿真结果验证了所提出的控制方案的有效性.

关键词: 风力发电系统; 永磁同步发电机; 最大风能追踪; 高阶非奇异终端滑模控制

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2016.04.001

0 引言

风电是发展最快的可再生清洁能源. 永磁直驱风力发电系统具有结构简单、故障率低、发电效率及运行可靠性高等优点^[1-2], 是目前变速恒频风力发电的主流系统. 采取有效的控制策略, 使得风力发电系统在较大风速变化范围内实现最大风能追踪, 是风力发电系统研究中的重要内容^[1-6].

风力发电系统具有典型的非线性和参数摄动特性. 为了提高系统的鲁棒性, 多种鲁棒非线性控制方法, 包括模糊逻辑控制^[4]、变增益控制^[5]、积分反演^[6]、反馈线性化^[7]和神经网络控制^[8]等被应用到风力发电系统控制研究中, 但这些方法所设计的控制器结构较为复杂.

滑模控制具有对参数摄动、外部扰动鲁棒性强、响应速度迅速等优点^[9], 且控制器结构简单, 尤其适用于风力发电系统. 目前已有一些文献报道滑模控制在风力发电系统中的应用研究^[10-11], 但以往的研究侧重于滑模流形和控制律的设计, 主要采用一阶滑模, 容易产生高频抖振. 笔者从抑制传统滑模抖振和提高响应速度、控制精度的角度出发, 将高阶非奇异终端滑模控制^[12-13]应用于系统设计转矩外环控制器和电流内环控制器以实现最大风能跟踪. 具体来说, 首先是基于最佳转矩跟踪的最大功率点跟踪方法, 设计非奇异终端滑

模面和高阶滑模控制律, 确定实现最佳转矩跟踪所需要的交轴和直轴参考电流; 然后, 设计高阶终端滑模电流控制器, 在机侧脉冲宽度调制(pulse width modulation)变流器的作用下, 实现参考电流的跟踪, 从而实现在风速变化条件下, 永磁直驱风力发电系统无风速传感器的最大功率点的快速跟踪和稳定控制.

1 永磁同步风力发电系统动态模型

1.1 风力机特性分析

根据贝兹证明, 风力机捕获的功率为

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

式中: ρ 为空气密度; r 为风力机叶轮半径; v 为风速; $C_p(\lambda, \beta)$ 为风能利用系数, β 为桨距角, λ 为叶尖速比, 满足

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

式中: ω_r 为风力机机械角速度.

风力机从风能中获得的气动转矩为

$$T_a = \frac{P_a}{\omega_r} = \frac{\rho \pi r^3 C_p(\lambda, \beta) v^2}{2\lambda}. \quad (3)$$

风力机气动转矩与风能利用系数直接相关, 后者是桨距角和叶尖速比的非线性函数, 由风机叶轮流型的设计和风力机运行状况决定. 为了充

收稿日期: 2015-12-05; 修订日期: 2016-03-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61473265); 教育部博士学科点专项科研基金项目(13A520379)

作者简介: 刘艳红(1970—), 女, 河南孟州人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事复杂非线性系统分析与控制、电力系统控制等研究, E-mail: liuyh@zzu.edu.cn.

分利用风能,需使桨距角保持恒定值,此时风能利用系数可以近似地表示为^[5]

$$\begin{cases} C_p(\lambda) = 0.5176 \left(\frac{116}{\lambda_1} - 5 \right) \exp(-21/\lambda_1) + 0.0068\lambda; \\ \frac{1}{\lambda_1} = \left(\frac{1}{\lambda} - 0.035 \right). \end{cases} \quad (4)$$

1.2 永磁同步电机动态模型

在同步旋转(d, q)参考坐标系下,永磁同步电机的电压方程可以表示为

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = -\frac{R}{L}i_d + \omega_e i_q + \frac{1}{L}u_d; \\ \frac{di_q}{dt} = -\frac{R}{L}i_q - \omega_e i_d - \frac{\psi_m}{L}\omega_e + \frac{1}{L}u_q. \end{cases} \quad (5)$$

式中: i_d, i_q, u_d, u_q 分别为定子电流、电压的 d 轴和 q 轴分量; R 为定子相电阻; $L = L_d = L_q, L_d, L_q$ 分别为定子等效 d 轴和 q 轴电感; ψ_m 是永磁体的磁链; ω_e 是发电机转子电角速度。

永磁同步风力发电系统的机械运动方程为

$$\begin{cases} J\dot{\omega}_r + k\omega_r = T_\alpha - T_e; \\ \dot{\theta}_r = \omega_r. \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\dot{\theta}_r$ 为机械位置角; J 为机械惯量; k 为阻尼系数; T_e 为电磁转矩。

永磁同步电机通常采用转子磁场定向 $i_d \approx 0$ 矢量控制,同时忽略磁阻转矩,则电磁转矩可以表示为

$$T_e(t) = k_t i_q(t). \quad (7)$$

式中: k_t 为转矩常数。

2 最大风能追踪终端滑模控制

控制目标是设计高阶非奇异终端滑模控制策略在风速变化条件下,实现永磁同步风力发电系统的最大风能追踪。在风力发电系统最大功率点跟踪方法中,最佳转矩控制由于其响应快速及高效率等优点被广泛应用在风力发电系统中^[3]。本节在最佳转矩控制的MPPT方法的基础上,设计高阶非奇异终端滑模控制策略,实现风力机气动转矩对最佳转矩的快速精确跟踪,并且和普通滑模控制相比,高阶滑模有效抑制了控制量的抖振,从而使系统更加稳定地运行在最佳叶尖速比处,保持最大风能利用系数,最大效率地利用风能。

2.1 最佳转矩滑模控制

当风力机工作在最佳叶尖速比 λ_{opt} 处时,获得最大风能利用系数 C_{pmax} ,风力发电系统运行在

最佳气动力矩 T_{opt} 处,由式(2)和(3)有

$$T_{opt} = \frac{1}{2} \frac{\rho \pi r^5 C_{pmax}}{\lambda_{opt}^3} \omega_r^2 = k_{opt} \omega_r^2. \quad (8)$$

定义变量:

$$\eta_\alpha(t) = \int_0^t T_\alpha(\tau) d\tau, \quad (9)$$

$$\eta_{opt}(t) = \int_0^t T_{opt}(\tau) d\tau = \int_0^t k_{opt} \omega_r^2(\tau) d\tau. \quad (10)$$

其误差为

$$e_T = \eta_{opt} - \eta_\alpha. \quad (11)$$

定理 1 定义转矩非奇异终端滑模面如下:

$$s_T = e_T + \gamma_0 \dot{e}_T^{p_0/q_0}. \quad (12)$$

式中: $1 < p_0/q_0 < 2, p_0$ 和 q_0 为正奇数。非奇异终端滑模面 s_T 用于实现二阶滑模控制,并抑制抖振。

选取滑模面(12),设计如下控制律:

$$i_q^* = i_q^{eq} + i_q^n. \quad (13)$$

$$\begin{cases} i_q^{eq} = \frac{1}{k_t} (k_{opt} \omega_r^2 - k\omega_r - J\dot{\omega}_r); \\ i_q^n = \frac{1}{k_t} \int_0^t \left[\frac{q_0}{p_0} \gamma_0^{-1} \dot{e}_T^{2-p_0/q_0} + \eta_0 \operatorname{sgn}(s_T) \right] dt. \end{cases} \quad (14)$$

式中: $\eta_0 > 0$,则在控制律作用下, e_T 和 \dot{e}_T 将在有限时间收敛到零。

证明 选取 Lyapunov 函数 $V_1 = \frac{1}{2} s_T^2$ 。则 V_1

沿闭环系统轨线的导数为

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= s_T \dot{s}_T = s_T (\dot{e}_T + \frac{p_0}{q_0} \gamma_0 \dot{e}_T^{p_0/q_0-1} \ddot{e}_T) = \\ & s_T \frac{p_0}{q_0} \gamma_0 \dot{e}_T^{p_0/q_0-1} (\ddot{e}_T + \frac{q_0}{p_0} \gamma_0^{-1} \dot{e}_T^{2-p_0/q_0}). \end{aligned}$$

结合风力发电系统的机械运动方程(6)和在 $i_d \approx 0$ 矢量控制下电磁转矩满足式(7),可知误差动态满足

$$\dot{e}_T = T_{opt} - T_\alpha = k_{opt} \omega_r^2 - J\dot{\omega}_r - k\omega_r - k_t i_q.$$

在控制律(13)的作用下

$$\dot{e}_T = -k_t i_q^n,$$

从而

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= s_T \frac{p_0}{q_0} \gamma_0 \dot{e}_T^{p_0/q_0-1} \left[-k_t i_q^n + \frac{q_0}{p_0} \gamma_0^{-1} \dot{e}_T^{2-p_0/q_0} \right] = \\ & s_T \frac{p_0}{q_0} \gamma_0 \dot{e}_T^{p_0/q_0-1} [-\eta_0 \operatorname{sgn}(s_T)] < 0. \end{aligned}$$

由于 $1 < p_0/q_0 < 2$,即 $0 < \frac{p_0}{q_0} - 1 < 1$,又 $\gamma_0 > 0, p_0$

和 q_0 为正奇数,则 $\dot{e}_T^{p_0/q_0-1} > 0$ ($\dot{e}_T \neq 0$)。控制器满足 Lyapunov 稳定性条件,故系统状态在有限时间

内到达非奇异终端滑模流形 $s_T = 0$, 在滑模运动中, $e_T(t) = \dot{e}_T(t) = 0$, 实现气动转矩对最佳转矩的跟踪, 进而实现最大风能追踪。

2.2 参考电流跟踪滑模控制

由上节可知, 为实现最佳转矩追踪, 设计了最佳转矩终端滑模控制器, 并由控制器确定了跟踪最佳转矩所需的参考电流 i_q^* , 故需要控制器使得 q 轴电流 i_q 跟踪参考电流 i_q^* , 同时永磁同步电机采用 $i_d \approx 0$ 矢量控制, 故 d 轴参考电流 i_d^* 为 0。本小节采用高阶非奇异终端滑模控制方法设计电流控制器, 保证 q 轴和 d 轴电流在有限时间内收敛到期望参考值。

定义 d 轴和 q 轴电流误差:

$$\begin{cases} e_{i_q} = i_q^* - i_q; \\ e_{i_d} = i_d^* - i_d = -i_d. \end{cases} \quad (15)$$

定理 2 定义 q 轴和 d 轴电流控制非奇异终端滑模面:

$$\begin{cases} s_{i_q} = e_{i_q} + \gamma_1 \dot{e}_{i_q}^{p_1/q_1}; \\ s_{i_d} = e_{i_d} + \gamma_2 \dot{e}_{i_d}^{p_2/q_2}. \end{cases} \quad (16)$$

式中: $\gamma_1 > 0; \gamma_2 > 0; 1 < p_1/q_1 < 2; 1 < p_2/q_2 < 2, p_1, q_1, p_2, q_2$ 均为正奇数。非奇异终端滑模面用于实现二阶滑模控制, 并且抑制抖振。

设计滑模控制律如下:

$$u_q = u_q^{eq} + u_q^n. \quad (17)$$

$$\begin{cases} u_q^{eq} = L \left(\dot{i}_q^* + \frac{R}{L} i_q + \omega_e i_d + \frac{\psi_m}{L} \omega_e \right); \\ u_q^n = L \int_0^t \left[\frac{q_1}{p_1} \gamma_1^{-1} \dot{e}_{i_q}^{2-p_1/q_1} + \eta_1 \operatorname{sgn}(s_{i_q}) \right]. \end{cases} \quad (18)$$

$$u_d = u_d^{eq} + u_d^n. \quad (19)$$

$$\begin{cases} u_d^{eq} = L \left(\frac{R}{L} i_d - \omega_e i_q \right); \\ u_d^n = L \int_0^t \left[\frac{q_2}{p_2} \gamma_2^{-1} \dot{e}_{i_d}^{2-p_2/q_2} + \eta_2 \operatorname{sgn}(s_{i_d}) \right]. \end{cases} \quad (20)$$

式中: $\eta_1 > 0, \eta_2 > 0$ 。在控制律作用下, 系统状态在有限时间内到达滑模流形 $s_{i_q} = 0$ 和 $s_{i_d} = 0$, 即 $e_{i_q}, \dot{e}_{i_q}, e_{i_d}, \dot{e}_{i_d}$ 在有限时间内收敛到零。电流控制环的稳定性证明与最佳转矩滑模跟踪控制类似, 故略去。

综合上述讨论, 在高阶非奇异终端滑模电流控制律(17)、(19)作用下, 永磁同步发电机 q 轴和 d 轴电流可以快速有效地跟踪参考电流, 进而在最佳转矩滑模控制律(13)作用下实现对最佳转矩的跟踪, 使永磁直驱风力发电系统稳定运行在最佳叶尖速比处, 实现最大风能追踪。在具体实

现过程中采用双环路控制策略实现风力机气动转矩对最佳转矩的跟踪, 其中外环为转速反馈环, 内环为电流反馈环。此外, 由于采用最佳转矩控制的最大功率点跟踪方法, 省去了风速传感器, 因而降低了成本, 提高了系统的可靠性。笔者所设计的终端滑模最大风能追踪控制策略结构如图1所示。

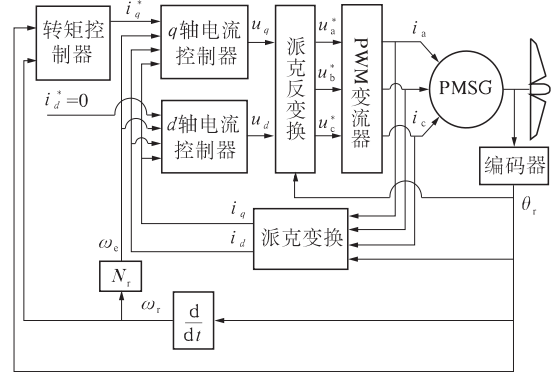


图1 整个系统控制结构图

Fig.1 Configuration of the control system

3 仿真分析

为了验证所设计的永磁同步风力发电系统高阶终端滑模最大风能追踪控制策略的有效性, 基于 MATLAB/Simulink 对系统进行仿真研究。仿真过程中采用 IEC 标准冯卡门频谱模型进行风速模拟, 平均风速为 8 m/s, 湍流强度 $I = 0.15$, 风速变化曲线如图2所示。按照文献[17]选定叶轮参数, 风力机半径为 3 m, 最佳叶尖速比为 8.1, 最大风能利用系统为 4.8。永磁同步发电机额定功率为 16 kW, 转动惯量为 $1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, 摩擦系数为 $0.002 \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}$, 转子磁链为 0.272 WB, 极对数为 2, 定子电阻为 3 Ω , d 轴和 q 轴电感为 27 mH。仿真采用的高阶非奇异终端滑模控制器参数分别为 $p_0/q_0 = p_1/q_1 = p_2/q_2 = 5/3, \gamma_0 = \gamma_1 = \gamma_2 = 20, \eta_0 = \eta_1 = 30, \eta_2 = 0.05$ 。仿真结果如图3~5所示。

图3为系统分别在非奇异终端滑模控制器与传统滑模控制器作用下实际转矩对最优转矩的跟踪曲线。传统滑模控制器的转矩跟踪误差较大, 平均误差为 14.988 N·m, 最大误差为 30.642 N·m。而高阶终端滑模控制器在整个风速范围内都具有较高的跟踪精度, 转矩跟踪平均误差为 1.397 N·m, 相比较可以看出, 高阶终端滑模控制器实际转矩对最优转矩的跟踪响应更快, 有效地提高了转矩的跟踪精度, 且跟踪曲线更加平滑稳定。这是因为一方面非奇异高阶滑模的响应速度优于传统滑模; 另一方面高阶滑模削弱了传统滑模存在的抖振。

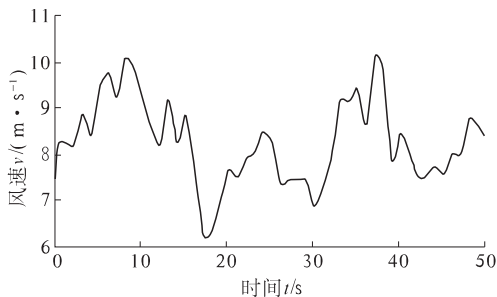


图 2 冯卡门频谱模型风速模拟曲线
Fig.2 Wind speed simulation using Von Karman spectrum model

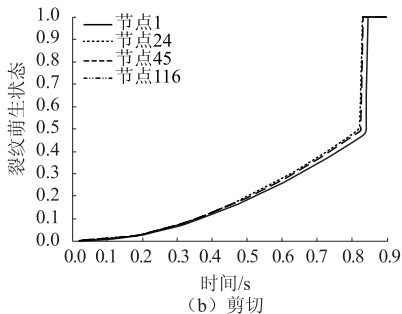
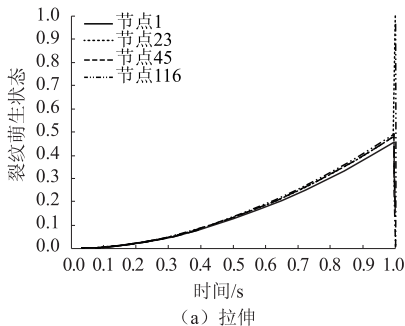


图 3 风力机转矩跟踪曲线
Fig.3 Response of the aerodynamic torque

图 4 与图 5 分别为风能利用系数曲线和叶尖速比变化曲线. 从图中可以看出,在非奇异终端滑模控制器作用下,跟踪响应更加迅速,控制精度更高,稳定性更好,抗干扰能力更强,可以更大效率地利用风能.

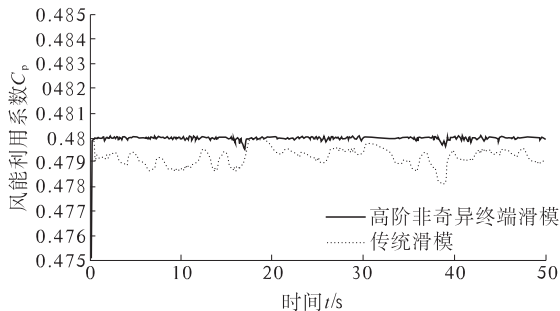


图 4 风能利用系数变化曲线
Fig.4 Response of the wind energy utilization coefficient

由仿真结果可知,在模拟自然风情况下,笔者

所设计的终端滑模最大风能追踪控制器能够保证风力机实际转矩快速跟踪风能变化,风能利用系数和叶尖速比均可以快速收敛并且稳定在最优值,从而实现在变风速条件下快速跟踪到最大功率点,使系统稳定在最大功率点附近,验证了笔者所提出的最大风能追踪策略的有效性和正确性.

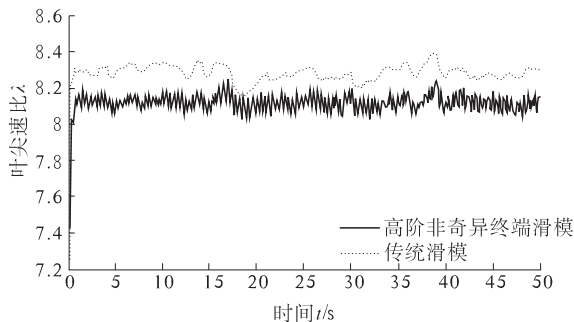


图 5 叶尖速比变化曲线
Fig.5 Response of the tip speed ratio

4 结论

笔者提出了一种改进的永磁直驱风力发电系统最大风能追踪双环路终端滑模控制策略,在转速反馈环设计高阶非奇异终端滑模转矩控制器,实现对最佳转矩的跟踪;在电流反馈环通过设计高阶非奇异终端滑模电流控制器,实现对参考电流的跟踪. 通过采用最佳转矩控制的 MPPT 方法,省去了风速传感器,避免了传统风力发电系统最大风能追踪控制策略对风速传感器精度的敏感性. 仿真结果表明:笔者所提出的高阶终端滑模控制策略对最佳转矩变化曲线的跟踪具有快速收敛性及具有更高的跟踪精度,使风力发电系统稳定运行在最佳叶尖速比处,实现对最大风能的快速跟踪,该滑模控制策略具有响应速度快、鲁棒性强等特点,且能够有效地克服传统滑模控制中的抖振问题.

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] BELTRAN B, BENBOUZID M E, AHMED A T. Second-order sliding mode control of a doubly fed induction generator driven wind turbine[J]. IEEE transactions on energy conversion, 2012, 27(2): 261-269.
[3] ABDULLAH M A, YATIM A H M, TAN C W, et al. A review of maximum power point tracking algorithms for wind energy systems[J]. Renewable and sustain-

- able energy reviews, 2012, 16(5): 3220 – 3227.
- [4] AISSAOUI A G, TAHOUR A. A Fuzzy PI control to extract an optimal power from wind turbine[J]. Energy conversion and management, 2013, 65: 688 – 696.
- [5] BIANCHI F D, BATTISTA H N D, MANTZ R J. Wind turbine control systems: principles, modelling and gain scheduling design [M]. Berlin: Springer-Verlag, 2007.
- [6] PAHLEVANINEZHAD M, EREN S, BAKHSHAI A, et al. Maximum power point tracking of a wind energy conversion system using adaptive nonlinear approach [C] // Proceedings of the 25th annual IEEE applied power electronics conference and exposition. United States: Palm Springs, CA, 2010: 149 – 154.
- [7] BOUKHEZZAR B, SIGUERDIDJANE H. Nonlinear control with wind estimation of a DFIG variable speed wind turbine for power capture optimization[J]. Energy conversion and management, 2009, 50(4): 885 – 892.
- [8] SOARES O, GONCALVES H, MARTINS A, et al. Nonlinear control of the doubly-fed induction generator in wind power systems[J]. Renew energy, 2010, 35(8): 1662 – 1670.
- [9] 王瑗琿, 张强, 王东云, 等. 基于滑模变结构的IPMC跟踪控制系统[J]. 郑州大学学报(工学版), 2014, 35(6): 104 – 107.
- [10] 郑雪梅, 李琳, 徐殿国. 双馈风力发电系统最大风能追踪滑模变结构控制[J]. 控制理论与应用, 2010, 27(7): 923 – 926.
- [11] 张志刚, 张桂香. 永磁同步风力发电系统滑模变结构矢量组合控制[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(7): 1986 – 1991.
- [12] YU X H, MAN Z H. Model reference adaptive control systems with terminal sliding modes[J]. International journal of control, 1996, 64(6): 1165 – 1176.
- [13] FENG Y, ZHENG J F, YU X H, et al. Hybrid terminal sliding-mode observer design method for a permanent-magnet synchronous motor control system[J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2009, 56(9): 3424 – 3431.

Maximum Power Point Tracking of Permanent Magnet Direct Drive Wind Power System Based on Sliding Mode Controller

LIU Yanhong, ZHAO Jinglong

(School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: To achieve maximum power point tracking (MPPT) of the permanent magnet direct drive wind power system, this paper proposes a high-order nonsingular terminal sliding-mode control strategy based on the optimal torque control algorithm. According to the nonlinear model of the permanent magnet direct drive wind power system, based on the optimum torque maximum power point tracking method, the high-order nonsingular terminal sliding-mode control is employed to design the torque controller and current controller of permanent magnet synchronous generator (PMSG). It realizes MPPT and stability control of the permanent magnet direct drive wind power system, and it does not need to measure wind speed. The simulation results demonstrate the effectiveness of the proposed control strategy.

Key words: wind energy conversion system; permanent magnet synchronous generator; maximum power point tracking; high-order nonsingular terminal sliding-mode controller