

双馈风力发电系统最大风能追踪滑模变结构控制

郑雪梅, 李 琳, 徐殿国

(哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 针对如何实现双馈风力发电机最大风能追踪(MPPT)问题, 本文采用滑模变结构控制原理和定子磁场定向矢量控制原理, 提出了滑模控制的最大风能追踪方案. 为此首先简要的介绍了定子磁场定向矢量控制的原理, 然后根据风机模型的非线性提出了滑模控制最大风能追踪方案. 此方法实现了双馈风力发电机的有功, 无功功率的解耦控制. 提高风力发电系统转速控制的抗干扰性, 实现了变速恒频控制和最大功率点跟踪的快速和稳定控制, 从而捕获更多的风能. 最后仿真结果验证本文提出的控制策略的正确性和有效性.

关键词: 双馈风力发电机; 功率解耦; 最大风能追踪; 滑模变结构控制

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Sliding-mode control of maximum power-point tracking in wind-power system for doubly-fed induction generator

ZHENG Xue-mei, LI Lin, XU Dian-guo

(School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin Heilongjiang 150001, China)

Abstract: The maximum power-point tracking(MPPT) plays an important role in the wind power system for doubly-fed induction generator(DFIG). A sliding mode control(SMC) strategy is proposed based on the theory of SMC and the control principle of the stator magnetic field orientation vector. The principle of stator magnetic field orientation vector control is briefly introduced, and then, an SMC control strategy is propose to realize the decoupling between the active power and the reactive power in DFIG, and carries out the MPPT control. It improves the rate of tracking and enhances the system stability, while capturing more wind energy and realizing the variable-speed-constant-frequency(VSCF) control. Simulation results of controller verified the accuracy and effectiveness of the proposed control strategy.

Key words: DFIG; power decoupling; MPPT; sliding mode variable structure control

1 引言(Introduction)

近年来, 变速恒频风力发电(VSCF)技术已经逐步取代了恒速恒频技术(CSCF)^[1,2]. 其中交流励磁双馈异步发电机(DFIG)方案有较大优势, 但如何使得风机输出功率达到最大值一直是风机的研究热点. 因此对最大功率点的追踪(MPPT)控制具有理论和实际意义. 传统的PID控制可以实现对风力发电系统的控制, 但PI系数对参数变化敏感, 在实际应用中其系数不易确定^[3]; 登山法^[4]可使风机的工作点在 $P_{\max}$ 附近, 但它也会一直振荡.

本文从分析DFIG的特性出发, 研究能够实现MPPT的风电系统控制方法. 根据DFIG的特性, 采用定子磁链定向的矢量变换控制技术, 实现了发电机有功、无功的解耦控制, 在此基础上采用滑模控制实现MPPT, 提高了风力发电系统转速控制的抗干

扰性, 从而使得MPPT具有快速性和稳定性, 最后给出了控制器的仿真结果, 验证了本文提出的控制策略的正确性和有效性.

2 风力机特性分析(Analysis of wind turbine characteristic)

由风力机空气动力学知, 风力机的输入功率:

$$P_v = 1/2 \rho S_w v^3, \quad (1)$$

式中: ρ 为空气密度, 一般为 1.25 kg/m^3 ; S_w 为风力机叶片迎风扫掠面积; v 为未扰动风速.

风力机的输出机械功率为

$$P_0 = C_p P_v = 1/2 \rho S_w v^3 C_p, \quad (2)$$

式中: C_p 是风能利用系数, 它与风速、叶片转速、叶片直径、桨叶节距角均有关系. 为了便于讨论 C_p 的

特性,定义风力机的另一个参数,叶尖速比 λ :

$$\lambda = R\omega/v = \pi Rn/(30v), \quad (3)$$

其中: R 为叶片半径, ω 为叶片旋转角速度, n 为叶片转速.

大型风力发电机组的风能利用系数可由经验公式近似计算^[5]:

$$c_p(\beta, \lambda) = 0.5176 \cdot \left(116 \cdot \left(\frac{1}{\lambda_i}\right) - 0.4\beta - 5\right) \cdot e^{-21\left(\frac{1}{\lambda_i}\right) + 0.0068 \cdot \lambda}, \quad (4)$$

式中: $\lambda_i = 1/\lambda + 0.08\beta - 0.035/\beta^3 + 1$, β 为节距角.

为了能充分利用风能,在风速较低时,应使 β 为0.因此总存在一个最优的角频率,使得风机的输出功率最大.当风机运行在最佳风力曲线上时,将会输出最大功率 $P_{\max}$,其值为

$$P_{\max} = k\omega^3, \quad (5)$$

式中 $k = 0.5\rho S_w(R/\lambda_{\text{opt}})^3 C_{P_{\max}}$.

3 双馈异步电机的解耦控制(Decoupling control of DFIG)

定、转子绕组电压方程^[6,7]:

$$\begin{cases} u_{m1} = -R_1 i_{m1} - \dot{\psi}_{m1} + \omega_1 \psi_{t1}, \\ u_{t1} = -R_1 i_{t1} - \dot{\psi}_{t1} - \omega_1 \psi_{m1}, \\ u_{m2} = R_2 i_{m2} + \dot{\psi}_{m2} - \omega_s \psi_{t2}, \\ u_{t2} = R_2 i_{t2} + \dot{\psi}_{t2} + \omega_s \psi_{m2}. \end{cases} \quad (6)$$

式中: $u_{m1}, u_{t1}, u_{m2}, u_{t2}$ 分别为定、转子电压的 m, t 轴分量; $i_{m1}, i_{t1}, i_{m2}, i_{t2}$ 分别为定、转子电流的 m, t 轴分量; R_1, R_2 为定、转子绕组等效电阻; $\omega_1 = 100\pi$ 为同步转速; ω_r 为发电机电角频率,它与机械角频率 ω_m 的关系为: $\omega_r = p_n \omega_m$, p_n 是发电机电极对数; $\omega_s = \omega_1 - \omega_r$ 为 mt 坐标系相对于转子的角速度.

定、转子磁链方程:

$$\begin{cases} \psi_{m1} = L_1 i_{m1} - L_m i_{m2}, \\ \psi_{t1} = L_1 i_{t1} - L_m i_{t2}, \\ \psi_{m2} = L_2 i_{m2} - L_m i_{m1}, \\ \psi_{t2} = L_2 i_{t2} - L_m i_{t1}. \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\psi_{m1}, \psi_{t1}, \psi_{m2}, \psi_{t2}$ 分别为定、转子磁链的 m, t 轴分量; L_1, L_2 分别为 mt 坐标系下定、转子绕组自感. L_m 为 mt 坐标系下同轴定、转子间的等效互感.

定子输出功率方程:

$$\begin{cases} p_1 = u_{m1} i_{m1} + u_{t1} i_{t1}, \\ q_1 = u_{t1} i_{m1} - u_{m1} i_{t1}. \end{cases} \quad (8)$$

转矩方程:

$$T_e = p_n L_m (i_{m2} i_{t1} - i_{m1} i_{t2}), \quad (9)$$

式中 T_e 为发电机的电磁转矩.

运动方程:

$$T_1 - T_e = \frac{J_g}{p_n} \frac{d\omega_r}{dt} + \frac{D_g}{p_n} \omega_r, \quad (10)$$

式中: T_1 为风机提供的拖动转矩; J_g 为发电机的转动惯量; D_g 为与转速成正比的阻转矩阻尼系数.

定子磁链定向时: $\Psi_{m1} = \Psi_1, \Psi_{t1} = 0, R_1 = 0, u_{m1} = 0, u_{t1} = -u_1$, 则式(6)~(8)分别为

$$\begin{cases} \psi_1 = u_1/\omega_1, \\ \dot{\psi}_1 = 0, \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} i_{m2} = (L_1 i_{m1} - \psi_1)/L_m, \\ i_{t2} = L_1 i_{t1}/L_m, \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} p_1 = -u_1 i_{t1}, \\ q_1 = -u_1 i_{m1}. \end{cases} \quad (13)$$

通过上述定子磁场定向,实现了双馈异步电机有功和无功的解耦,为下面控制策略的实现提供了方便.

4 滑模MPPT控制策略(Sliding mode MPPT control strategy)

为了实现最大风能追踪控制,应根据风力机最佳功率曲线和风机转速来实时计算发电机的输出有功功率 p_1^* 值:

$$p_1^* = \frac{p_{\max}}{1-s} - \Delta p, \quad (14)$$

式中: s 为转差率($s = \omega_s/\omega_1$), p 为各种损耗之和.

按照 p_1^* 控制DFIG的输出有功功率,就可实现最大风能的追踪与捕获.

为了实现最大风能追踪控制,并且有效的克服外界扰动,本文选用指数趋近律来设计滑模控制器,根据滑模控制器设计思想^[8],定义如下切换函数:

$$\begin{cases} s_1 = p_1^* - p_1, \\ s_2 = q_1^* - q_1. \end{cases} \quad (15)$$

式中: p_1^* 为由式(14)计算的最佳输出功率; q_1^* 为参考无功功率;可从电力系统侧选取性能评价函数或从DFIG侧选取性能评价函数,使其达到最优. p_1, q_1 为实时计算出的发电机定子输出功率.

将切换函数式(15)对时间求导:

$$\begin{cases} \dot{s}_1 = \dot{p}_1^* - \dot{p}_1, \\ \dot{s}_2 = \dot{q}_1^* - \dot{q}_1. \end{cases} \quad (16)$$

将式(11)代入式(16),可得

$$\begin{cases} \dot{s}_1 = \dot{p}_1^* + u_1 \dot{i}_{t1}, \\ \dot{s}_2 = \dot{q}_1^* + u_1 \dot{i}_{m1}. \end{cases} \quad (17)$$

由式(13),则有

$$\begin{cases} \dot{s}_1 = \dot{p}_1^* + u_1 L_m \dot{i}_{t2} / L_1, \\ \dot{s}_2 = \dot{q}_1^* + u_1 L_m \dot{i}_{m2} / L_1. \end{cases} \quad (18)$$

考虑式(7)、式(6)和式(13), 则可得

$$\begin{cases} \dot{s}_1 = \dot{p}_1^* + u_1 L_m \frac{u_{t2} - R_2 \dot{i}_{t2} - \omega_s \psi_{m2}}{L_1 L_2 - L_m^2}, \\ \dot{s}_2 = \dot{q}_1^* + u_1 L_m \frac{u_{m2} - R_2 \dot{i}_{m2} + \omega_s \psi_{t2}}{L_1 L_2 - L_m^2}. \end{cases} \quad (19)$$

这里选取指数趋近律, 令

$$\begin{cases} \dot{s}_1 = -k_1 s_1 - (k_2 + k_3) \operatorname{sgn} s_1, \\ \dot{s}_2 = -k_1 s_2 - (k_2 + k_3) \operatorname{sgn} s_2. \end{cases} \quad (20)$$

式中: $k_1 > 0, k_2 > 0, k_3 > 0$; k_1 的设计目的是为了加快收敛的速度; k_2 和 k_3 的实际目的是为了克服系统的扰动。

由上两式, 可得系统的控制律:

$$\begin{cases} u_{t2} = u_{t2eq} + u_{t2n}, \\ u_{m2} = u_{m2eq} + u_{m2n}. \end{cases} \quad (21)$$

式中:

$$\begin{aligned} u_{t2eq} &= R_2 \dot{i}_{t2} + \omega_s \psi_{m2}, \\ u_{t2n} &= \frac{(L_1 L_2 - L_m^2)(-k_1 s_1 - (k_2 + k_3) \operatorname{sgn} s_1 - \dot{p}_1^*)}{u_1 L_m}, \\ u_{m2eq} &= R_2 \dot{i}_{m2} - \omega_s \psi_{t2}, \\ u_{m2n} &= \frac{(L_1 L_2 - L_m^2)(-k_1 s_2 - (k_2 + k_3) \operatorname{sgn} s_2 - \dot{q}_1^*)}{u_1 L_m}. \end{aligned}$$

为了证明所设计的控制器具有渐进稳定性, 选取下面的李雅普诺夫函数进行证明:

$$v = \frac{1}{2} s_1^2, \quad (22)$$

对时间求导:

$$\begin{aligned} \dot{v} &= s_1 \dot{s}_1 = s_1 (\dot{p}_1^* + u_1 \dot{i}_{t1}) = \\ &= s_1 (\dot{p}_1^* + \frac{u_1 L_m}{L_1} \dot{i}_{t2}) = \\ &= s_1 (\dot{p}_1^* + u_1 L_m \frac{u_{t2} - R_2 \dot{i}_{t2} - \omega_s \psi_{m2}}{L_1 L_2 - L_m^2}) \\ &= s_1 (-k_1 s_1 - (k_2 + k_3) \operatorname{sgn} s_1), \end{aligned}$$

当 $s_1 > 0$ 时, k_1, k_2, k_3 均为正的常数, 所以

$$\dot{v} = -(k_1 s_1^2 + (k_2 + k_3) s_1) < 0,$$

当 $s_1 < 0$ 时,

$$\dot{v} = -(k_1 s_1^2 - (k_2 + k_3) s_1) < 0.$$

因此, 对于任意的 $s \neq 0$ 时, 总有 $\dot{v} < 0$. 根据Lyapunov稳定性定理^[9], 系统将在有限时间内到达滑模面, 当系统达到滑模面时, 有 $s_1 = p_1^* - p_1 = 0$, 系统稳定在参考点。

如果转子电阻 R_2 出现了扰动, 即转子电阻变为 $R_2 + \Delta R$, 仍然选取式(22)的李雅普诺夫函数, 而控

制率仍为(21), 则

$$\dot{v} = s_1 (-k_1 s_1 - (k_2 + k_3) \operatorname{sgn} s_1 + \frac{\Delta R_2 \dot{i}_{m2} L_m}{L_1 L_2 - L_m^2}).$$

若使: $k_1 > 0, k_2 > 0, k_3 > |\frac{\Delta R_2 \dot{i}_{m2} L_m}{L_1 L_2 - L_m^2}|$, 仍然可以保证: $\dot{v} < 0$. 同理也可以证明 s_2 的存在性和可达性。

因此, 通过证明可以看出: 采用上述控制律达到追求最大风能的目的。

5 仿真结果(Simulation results)

为验证本文所提出的最大风能追踪策略的正确性和有效性, 利用MATLAB进行了仿真研究. 仿真中设定的控制律为: 0.5 s前, DFIG空载运行; 在0.5 s时, 风速稳定在3 m/s, 在8 s时, 突变为5 m/s, 在12 s时, 再次突变为8 m/s. 当系统稳定运行, 在8 s时转子电阻出现了变化, 由原来的0.314 Ω 变为0.2 Ω . 假定空气密度为1.25 kg/m³, 增速比为 $N = 7.846$, $\omega_m = N\omega = 7.846\omega$, 极对数取为3, 可计算风速 v 在3 m/s, 5 m/s, 8 m/s时的最佳电角频率分别为132 rad/s, 221.5 rad/s和354.4 rad/s. 仿真结果为图1~图5。

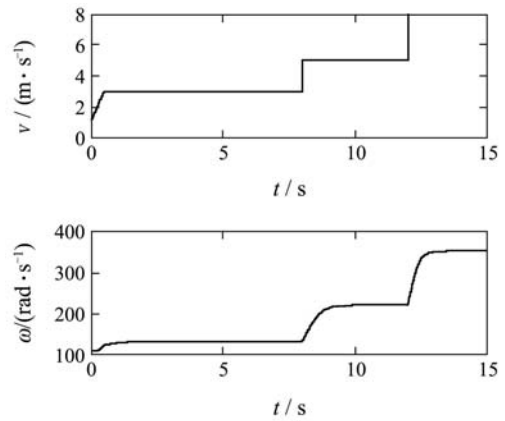


图1 风速与DFIG电角速度变化曲线

Fig. 1 Wind speed and DFIG electrical angle frequency

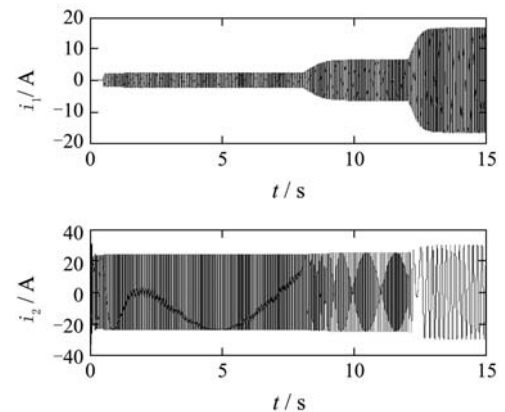


图2 DFIG定子、转子电流曲线

Fig. 2 DFIG stator and rotor current curve

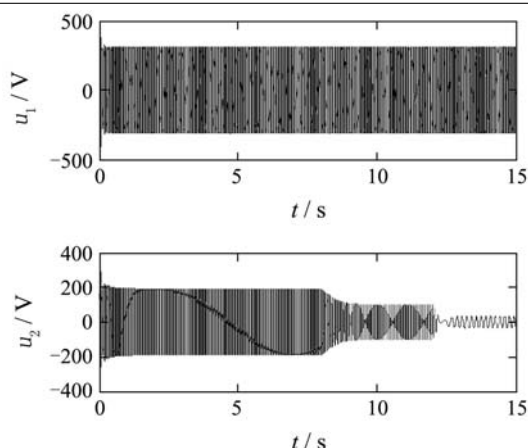


图3 DFIG定子、转子电压曲线

Fig. 3 DFIG stator and rotor voltage curve

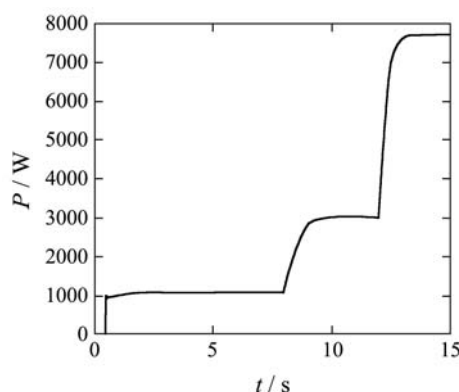


图4 DFIG输出功率曲线

Fig. 4 DFIG output power curve

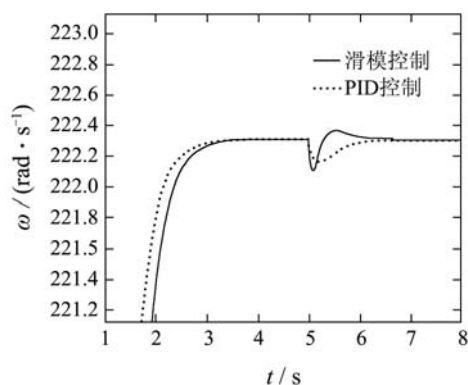


图5 滑模控制与PID控制比较图

Fig. 5 The comparison of SMC and PID

从仿真曲线可以看出, 经过每次调整后的稳定电角频率和理论值吻合, 确实实现了抗干扰性的MPPT控制和变速恒频的特性. 并且通过与传统的PID控制的比较表明了此方法的快速性.

6 结论(Conclusions)

在实际的风力发电系统中, 由于风速测量的困难性, 并且测量的误差较大, 从而影响风能的利用.

本文在分析DFIG定子磁场定向理论的基础上, 运用滑模变结构控制理论, 提出了一种新的不依赖于风速的MPPT控制策略, 提高了风能的利用率, 同时对外部扰动和内部参数变化具有鲁棒性, 并且实现了VSCF控制, MATLAB仿真结果验证了本文提出的控制策略的正确性和有效性.

参考文献(References):

- [1] 廖勇, 杨顺昌. 交流励磁发电机励磁控制[J]. 中国电机工程学报, 1998, 18(2): 87-90.
(LIAO Yong, YANG Shunchang. Excitation control of alternating current excitation generators[J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electric Engineering*, 1998, 18(2): 87-90.)
- [2] FERNANDEZ L M, GARCIA C A, JURADO F. Comparative study on the performance of control systems for doubly fed induction generator wind turbines operating with power regulation[J]. *Energy*, 2008, 33(2): 1438-1452.
- [3] MIAO Z X, FAN L L. The art modeling and simulation of induction generator in wind generation applications using high-order model[J]. *Simulation Modeling Practice and Theory*, 2008, 16(5): 1239-1253.
- [4] 凌禹, 张同庄, 邱雪峰. 直驱式风力发电系统最大风能追踪策略研究[J]. 电力电子技术, 2007, 41(7): 3-5.
(LING Yu, ZHANG Tongzhuang, QIU Xuefeng. Study on maximum power extraction control for directly driven wind power generating system[J]. *Power Electronics*, 2007, 41(7): 3-5.)
- [5] 刘其辉, 贺益康, 赵仁德. 变速恒频风力发电系统最大风能追踪控制[J]. 电力系统自动化, 2003, 7(20): 62-67.
(LIU Qihui, HE Yikang, ZHAO Rende. The maximal wind-energy tracking control of available speed constant frequency wind power generation system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2003, 7(20): 62-67.)
- [6] MORREN J, SJOERD H W. Ride through of Wind Turbines with doubly-fed induction generator during a voltage dip[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2005, 20(2): 435-441.
- [7] 刘其辉. 变速恒频风力发电系统运行与控制研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
(LIU Qihui. *The investigation of operation and control for a variable-speed constant-frequency wind power generation system*[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005.)
- [8] SLOTINE J E, LI W. *Applied Non-linear Control*[M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1991: 226-269.
- [9] 郑雪梅, 冯勇, 鲍晟. 多变量线性模型不确定系统终端滑模分解控制方法[J]. 控制理论与应用, 2004, 21(1): 11-16.
(ZHENG Xuemei, FENG Yong, BAO Sheng. Terminal sliding model decomposed control of multivariable linear uncertain systems[J]. *Control Theory & Applications*, 2004, 21(1): 11-16.)

作者简介:

郑雪梅 (1969—), 女, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为变结构控制、鲁棒控制、风力发电等, E-mail: xmzheng@hit.edu.cn;

李琳 (1983—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力电子技术的应用、非线性控制等, E-mail: landykobel@163.com;

徐殿国 (1960—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力电子与电力传动、伺服控制、风力发电控制等, E-mail: xudiang@hit.edu.cn.