

文章编号:1671-6833(2015)03-0016-04

# 基于逆系统方法的永磁同步风力发电系统随机最优控制

刘艳红, 齐书康

(郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:** 风力发电系统是典型的强耦合非线性随机系统. 针对永磁同步风力发电系统的随机最优控制问题, 建立了系统的非线性动态模型; 然后, 采用逆系统方法设计了反馈线性化控制器, 将永磁同步风力发电系统转化为具有线性传递关系且已解耦的伪线性系统; 最后, 考虑风速随机性并设计了线性二次型高斯随机最优控制器. 仿真结果验证了所提控制策略的有效性.

**关键词:** 风力发电系统; 永磁同步发电机; 逆系统方法; 随机最优控制

**中图分类号:** TP273

**文献标志码:** A

doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2015.03.004

## 0 引言

风能是比较廉价且具有良好发展前景的可再生新型能源. 目前世界各国均高度重视风能的开发利用, 并致力于提高风力发电系统控制技术以实现最大风能捕获<sup>[1-3]</sup>. 风力发电系统是典型的强耦合多变量非线性动态系统. 目前多种方法被应用于最大风能捕获控制研究, 但由于风速变化的随机性, 当风机运行点偏离线性化点时, 难以保证系统的动态性能. 反馈线性化方法基于受控系统的非线性动态模型设计控制器, 能够保证系统在大范围运行时的动态性能<sup>[4-5]</sup>. 逆系统方法基于受控非线性系统的逆构造可通过状态反馈实现的积分逆系统, 并实现系统的线性化和解耦, 具有物理概念清楚、便于应用等优点, 被广泛应用于电力系统控制研究<sup>[6-7]</sup>.

笔者采用逆系统方法并结合线性二次型高斯方法研究永磁同步风力发电系统的最大风能捕获控制问题. 首先建立了永磁同步风力发电系统非线性动态模型. 然后采用逆系统方法推导出系统的二阶积分逆模型, 将风力发电系统补偿为具有线性传递关系且已解耦的伪线性系统. 最后, 考虑风力发电系统的随机性并将风速扰动视为随机扰动, 设计了线性二次高斯控制器实现最优控制. 在随机风速变化下的仿真结果验证了所提出的控制方案的有效性.

## 1 永磁同步风力发电系统动态模型

永磁同步风力发电系统包括风力机、永磁同步发电机和变流器. 考虑到永磁同步风力发电系统中风力机和永磁同步电机的动态变化过程远远慢于变流器, 而且系统的负载转矩随着风速的变化而变化, 可以把变流器等效为可变负载  $R_s$  和常电感  $L_s$ . 风力发电系统结构图如图 1 所示.

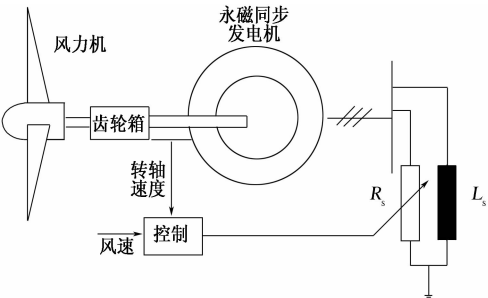


图 1 永磁同步风力发电系统结构图

Fig.1 Configuration of the permanent magnet synchronous wind power system

### 1.1 风力机输出特性

风力机捕获的机械转矩可表示为<sup>[8]</sup>

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

式中:  $\Gamma_{wt}$  为风机轴上的机械转矩;  $C_T(\lambda, \beta)$  为转矩系数,  $\lambda = \frac{r\Omega_1}{v}$  为叶尖速比,  $\beta$  为桨距角,  $\Omega_1$  为风轮角速度;  $r$  为风轮半径;  $\rho$  为空气密度;  $v$  为风速. 为获得最大风能, 桨距角  $\beta$  需保持恒定值 0,

收稿日期:2015-01-25; 修订日期:2015-03-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61473265); 河南省教育厅科学技术重点研究项目(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、电力系统控制研究, E-mail: liuyh@zzu.edu.cn.

则转矩系数可表示为

$$C_T = a_6 \lambda^6 + a_5 \lambda^5 + a_4 \lambda^4 + a_3 \lambda^3 + a_2 \lambda^2 + a_1 \lambda + a_0. \quad (2)$$

当风力机运行在最佳叶尖速比  $\lambda_{opt}$  处时,转矩系数可以简化表示为

$$C_T = a_0 + a_1 \lambda + a_2 \lambda^2. \quad (3)$$

结合式(1)和式(3),有

$$\Gamma_{wt} = d_1 v^2 + d_2 v \Omega_h + d_3 \Omega_h^2. \quad (4)$$

其中,  $d_1 = \frac{1}{2} \pi \rho a_0 r^3$ ,  $d_2 = \frac{1}{2} \pi \rho a_1 r^4$ ,  $d_3 = \frac{1}{2} \pi \rho a_2 r^5$ .

## 1.2 永磁同步风力发电系统动态模型

在  $d-q$  同步旋转坐标系下永磁同步发电机的电磁方程满足:

$$\begin{cases} (L_d + L_s) \dot{i}_d = -(R + R_s) i_d + p(L_q + L_s) i_q \Omega_h; \\ (L_q + L_s) \dot{i}_q = -(R + R_s) i_q - p(L_d + L_s) i_d \Omega_h + p \Phi_m \Omega_h. \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $R$  为定子电阻;  $p$  为极对数;  $i_d$  和  $i_q$  分别为定子电流在  $d$  轴和  $q$  轴的分量;  $\Omega_h$  为旋转角速度;  $L_d$  和  $L_q$  分别为定子  $d$  轴和  $q$  轴的电感;  $\Phi_m$  为永磁同步电机的磁通。

永磁同步风力发电系统的机械运动方程为

$$J \dot{\Omega}_h = \Gamma_{wt} - \Gamma_G. \quad (6)$$

忽略铁损和单极电压,有

$$\Gamma_G = p[\Phi_m i_q + (L_d - L_q) i_d i_q]. \quad (7)$$

假设永磁体安装在转子表面,则  $L_d = L_q$ ,从而有

$$\Gamma_G = p \Phi_m i_q. \quad (8)$$

综合式(4)~(6)和(8)可以得到风力发电系统的动态模型. 选状态变量  $\mathbf{x} = [i_d, i_q, \Omega_h]^T$ , 控制输入  $u = R_s$ , 输出变量  $\mathbf{y} = \Omega_h - \Omega_{ref}$ , 其中  $\Omega_{ref}$  为参考角速度. 则风力发电系统的动态模型可以表示为下面标准非仿射非线性系统:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, u); \\ \mathbf{y} = \mathbf{h}(\mathbf{x}). \end{cases} \quad (9)$$

其中,  $\mathbf{f}(\cdot) = [f_1, f_2, f_3]^T$ ,  $f_1 = \frac{1}{L_d + L_s} [-R x_1 + (L_q - L_s) \cdot p x_2 x_3] - \frac{1}{L_d + L_s} x_1 u$ ,  $f_2 = \frac{1}{L_q + L_s} [-R x_2 - (L_d + L_s) \cdot p x_1 x_3 + p \Phi_m x_3] - \frac{1}{L_q + L_s} x_2 u$ ,  $f_3 = \frac{1}{J} (d_1 v^2 + d_2 v x_3 + d_3 x_3^2 - p \Phi_m x_2)$ ,  $\mathbf{h}(\mathbf{x}) = x_3 - \Omega_{ref}$ .

## 2 控制器设计

### 2.1 风力发电系统线性化和解耦控制

采用逆系统方法完成系统的精确线性化,同时实现转速与磁链动态的解耦.

首先,对输出  $y$  求导直到  $u$  显式出现:

$$\dot{y} = \dot{x}_3 = \frac{1}{J} (d_1 v^2 + d_2 v x_3 + d_3 x_3^2 - p \Phi_m x_2); \quad (10)$$

$$\ddot{y} = \frac{2 d_1 v \dot{v} + d_2 \dot{v} x_3 + d_2 v + 2 d_3 x_3 \dot{x}_3}{J} - \frac{p \Phi_m}{J(L_q + L_s)} \cdot [-R x_2 - p(L_d + L_s) x_1 x_3 + p \Phi_m x_3] + \frac{p \Phi_m x_2}{J(L_q + L_s)} u. \quad (11)$$

故系统的相对阶  $r=2$ . 令

$$\begin{cases} \varphi = \ddot{y}; \\ u = -\frac{L_q + L_s}{p \Phi_m x_2} (2 d_1 v \dot{v} + d_2 \dot{v} x_3) - \frac{(d_2 v + 2 d_3 x_3)(L_q + L_s)}{p \Phi_m x_2} \dot{y} + \frac{-R x_2 - p(L_d + L_s) x_1 x_3 + p \Phi_m x_3}{x_2} + \frac{J(L_q + L_s)}{p \Phi_m x_2} \varphi. \end{cases} \quad (12)$$

则可得永磁同步风力发电系统的  $\alpha$  阶积分逆系统,其中  $\varphi$  为逆系统的输入. 将  $\alpha$  阶积分逆系统串联在风力发电系统模型之前,可以得到线性化且状态解耦的伪线性系统,其动态方程满足

$$\ddot{y} = \varphi. \quad (13)$$

### 2.2 线性二次型高斯最优控制

基于上节得到的伪线性系统,可利用线性控制理论设计反馈控制器满足动态性能的要求. 考虑到风力发电系统不可避免地受到风速随机扰动和量测噪声的影响,笔者对伪线性系统设计二次型高斯(LQG)最优控制器<sup>[9]</sup>.

考虑风速随机扰动和量测噪声,则风力发电系统线性化模型可以表示为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A} \mathbf{x}(t) + \mathbf{B} \varphi + \mathbf{G} \boldsymbol{\omega}(t); \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{C} \mathbf{x}(t) + \mathbf{v}(t). \end{cases} \quad (14)$$

其中,  $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ ;  $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$ ;  $\mathbf{C} = [1 \quad 0]$ ;  $\mathbf{G} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$ ;

$\mathbf{x} = [x_1, x_2]^T = [y, \dot{y}]^T$ ;  $\boldsymbol{\omega}(t)$  和  $\mathbf{v}(t)$  是相互独立且均值为零的高斯白噪声信号,其中  $\boldsymbol{\omega}(t)$  为干扰噪声,  $\mathbf{v}(t)$  为由传感器带来的量测输出噪声,它们的协方差矩阵满足:

$$\begin{cases} E[\boldsymbol{\omega}(t) \boldsymbol{\omega}^T(t)] = \Xi \geq 0; \\ E[\mathbf{v}(t) \mathbf{v}^T(t)] = \Theta > 0. \end{cases} \quad (15)$$

选择最优控制的目标函数:

$$J = E \left\{ \int_0^\infty [\mathbf{x}^T(t) \mathbf{Q} \mathbf{x}(t) + \varphi^T \mathbf{R} \varphi] dt \right\}. \quad (16)$$

其中,  $\mathbf{Q}$  为半正定对称矩阵;  $\mathbf{R}$  为正定对称矩阵.

最优控制律可构造为

$$\varphi = -\mathbf{k}_c \hat{\mathbf{x}}(t). \quad (17)$$

其中,反馈矩阵  $\mathbf{k}_c = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P}_c$ ,  $\mathbf{P}_c$  由下面矩阵 Riccati 方程确定:

$$A^TP_c + P_cA - P_cBR^{-1}B^TP_c + M^TQM = 0. \tag{18}$$

状态估计  $\hat{x}(t)$  动态方程为

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + B\varphi + k_f[y(t) - C\hat{x}(t)]. \tag{19}$$

其中,  $k_f$  为 Kalman 滤波增益,  $k_f = P_fC^T\Theta^{-1}$ ,  $P_f$  满足矩阵 Riccati 方程:

$$P_fA^T + AP_f - P_fC^T\Theta^{-1}CP_f + G\Xi G^T = 0. \tag{20}$$

2.3 稳定性分析

由于系统相对阶  $r=2$ , 故闭环系统包含有零动态, 整个系统的稳定性取决于零动态系统<sup>[10]</sup>. 下面求零动态系统. 选择坐标变换

$$\Phi(x) = \begin{bmatrix} \varphi_1(x) \\ \varphi_2(x) \\ \varphi_3(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_1(x) \\ z_2(x) \\ z_3(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h(x) \\ L_fh(x) \\ \varphi_3(x) \end{bmatrix}. \tag{21}$$

其中, 函数  $\varphi_3(x)$  满足  $L_g\varphi_3(x) = 0$ , 且 Jacobian 矩阵  $J_\Phi = \frac{\partial \Phi(x)}{\partial x}|_{x=x^0}$  非奇异. 选择

$$\varphi_3(x) = -\frac{1}{L_d + L_s} \frac{x_1}{x_2} = a_3 \frac{x_1}{x_2}. \tag{22}$$

其中,  $a_3 = -\frac{1}{L_d + L_s}$ . 则有

$$L_i\varphi_3(x) = -\frac{a_3^2}{x_2}[-Rx_1 + p(L_q - L_s)x_2x_3] + \frac{a_3^2x_1}{x_2^2}[-Rx_2 - p(L_d + L_s)x_1x_3 + p\Phi_mx_3]. \tag{23}$$

将式(23)中的  $x$  转换成  $z$ , 有

$$\begin{aligned} L_i\varphi_3(x)|_{x=\Phi^{-1}(z)} &= L_i\varphi_3(\Phi^{-1}(z_1, z_2, z_3)) \\ &= a_3Rz_3 - a_3^2p(L_d - L_s)z_1 - a_3Rz_3 + \frac{a_3d_4p\Phi_mz_1z_3}{d_1v^2 + d_2vz_1 + d_3z_1^2 - Jz_2^2}. \end{aligned} \tag{24}$$

令  $z_1=0, z_2=0$ , 则零动态系统为

$$\dot{z}_3 = L_i\varphi_3(\Phi^{-1}(0, z_3)) = 0. \tag{25}$$

故系统零动态稳定的, 整个系统稳定.

综合逆系统(12)、最优控制律(17), 可得永磁同步风力发电系统的控制结构如图 2 所示.

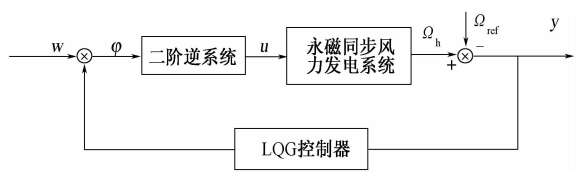


图 2 整个系统控制结构图  
Fig.2 Configuration of the control system

3 仿真分析

为了验证笔者所设计的控制器的有效性, 采用 MATLAB/Simulink 搭建永磁同步风力发电系统. 永磁同步发电机的额定功率为 3 kW, 定子电阻为 3.3  $\Omega$ , 极对数为 3, 由永磁体决定的恒值磁

通为 0.438 2 Wb,  $d$  轴和  $q$  轴电感为 41.56 mH. 风力机的桨叶半径为 2.5 m, 转矩系数中参数选为  $a_0=0.125\ 3, a_1=-0.004\ 7, a_2=-0.000\ 5$ . 反馈增益  $k_c=[31.622\ 8\ 8.015\ 3]^T, k_f=[1.414\ 2\ 1]^T$ . 在仿真过程中假设风速在 9 m/s 和 12 m/s 之间随机波动, 其变化曲线如图 3 所示, 仿真结果如图 4~6 示.

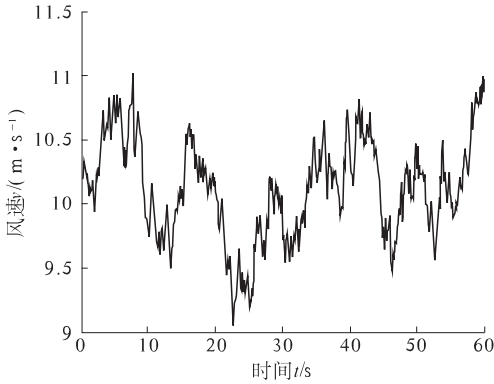


图 3 风速变化曲线  
Fig.3 Wind speed curve

从仿真结果可以看出, 在随机风速变化条件下, 永磁同步风力发电系统的风能利用系数和叶尖速比可保持在最优值  $C_{p\_max}=0.47, \lambda_{opt}=7$  附近, 从而实现最大风能捕获. 此外, 风力发电系统输出功率能快速跟踪风机捕获的机械功率.

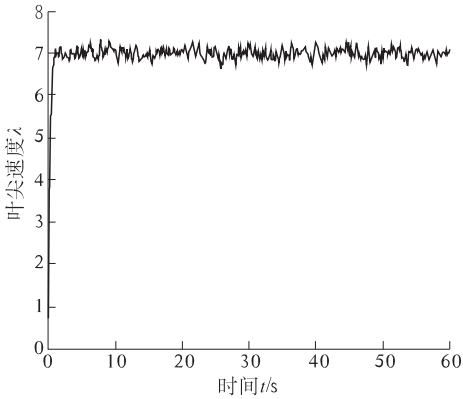


图 4 叶尖速比变化曲线  
Fig.4 Response of the tip speed ratio

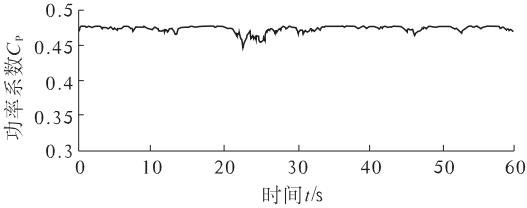


图 5 风能利用系数变化曲线  
Fig.5 Response of the wind energy utilization coefficient

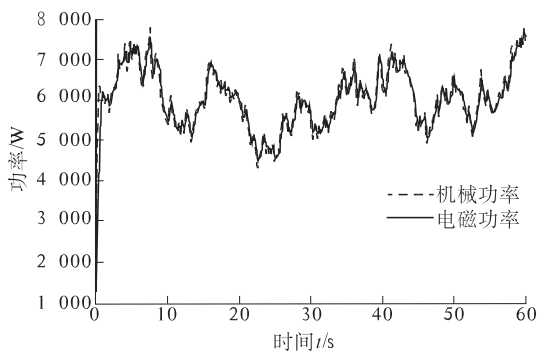


图6 机械功率和电磁功率曲线

Fig. 6 Response of the mechanical power and electromagnetic power

#### 4 结束语

笔者研究了永磁同步风力发电系统的随机最优控制问题. 首先分析了风力机的输出特性,建立了永磁同步电机的非线性控制数学模型,然后基于逆系统方法实现了系统的精确线性化和解耦,在考虑风速变化随机性条件下设计了线性二次型高斯随机最优控制器,分析了闭环系统的稳定性. 仿真结果表明:所提出的控制器能够在随机风速下实现风能最大捕获.

#### 参考文献:

- [1] 舒进,张保会,李鹏,等. 变速恒频风电机组运行控制[J]. 电力系统自动化,2008,32(16):89-93.
- [2] HONG C M, CHEN C H, TU C T. Maximum power point tracking-based control algorithm for PMSG wind

generation system without mechanical sensors[J]. Energy conversion and management,2013,69:58-67.

- [3] TAN K, ISLAND S. Optimum control strategies in energy conversion of PMSG wind turbine system without mechanical sensors[J]. IEEE Transactions Energy Conversion, 2004, 19(2): 392-399.
- [4] 王伟,陈奇,纪志成. 基于反馈线性化 PMSG 风力发电系统控制[J]. 系统仿真学报,2010,22(6):1397-1401.
- [5] 王利兵,毛承雄,陆继明,等. 基于反馈线性化原理的直驱风力发电机组控制系统设计[J]. 电工技术学报,2011,26(7):1-6.
- [6] 李春文,刘艳红,陈铁军,等. 基于逆系统方法的广义非线性系统控制及电力系统应用[J]. 控制理论与应用,2007,24(5):799-802.
- [7] 葛友,李春文. 逆系统方法在电力系统综合控制中的应用[J]. 中国电机工程学报,2001,21(4):1-4.
- [8] MAUREEN H M. Systematic control design methodology for variable-speed wind turbine, NREL/TP-500-29415[R]. Colorado, USA: National Renewable Energy Laboratory, 2002.
- [9] 范晓旭,白焰,吕跃刚,等. 大型风力发电机组线性二次型高斯最优控制策略[J]. 中国电机工程学报,2010,30(20):100-105.
- [10] GENG Hua, ZHOU Wei-song, YANG Geng. Inverse-system control approach for variable-speed variable-pitch wind generator[C]//Proceeding of the 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Taipei, Taiwan:IEEE Press, 2007:1627-1632.

## The Stochastic Optimal Control of Permanent Magnet Synchronous Wind Power Generation System Based on an Inverse System Method

LIU Yan-hong, QI Shu-kang

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

**Abstract:** The wind power generation systems are typical strong coupling, nonlinear and stochastic. For the optimal stochastic control of the system, this paper proposes a nonlinear system dynamic model for the system. Then the feedback linearization controller is designed by using the inverse system method and the considered system is transformed to a decoupled pseudo-linear system. Finally, with the consideration of the randomness of wind speed, a linear quadratic Gaussian stochastic optimal controller is put forward. The simulation results demonstrate the effectiveness of the proposed control scheme.

**Key words:** wind power generation system; permanent magnet synchronous generator; inverse system method; stochastic optimal control