

# 基于LPV的直驱式永磁同步风电系统控制器设计

刘香霞, 沈艳霞, 潘庭龙, 万红淑

江南大学 电气自动化研究所, 无锡 214122  
E-mail: xiangxia321@126.com

**摘要:** 针对直驱式永磁同步风电系统额定风速以下需要实现风能最大捕获, 但电磁转矩震荡大的问题, 根据时间的多尺度特性和频率分离原理, 将风速分为低频和高频两部分. 低频部分采用PI控制, 建立高频风速时的直驱式永磁同步风电系统的LPV模型, 并设计基于此模型的增益调度控制器以补偿电磁转矩, 有效减小震荡. 仿真结果表明该控制器可有效减小震荡, 提高系统的可靠性.

**关键词:** 直驱式永磁发电机组, LPV, 双频环, 风电转换系统

## LPV Based Direct-driven Permanent Magnet Synchronous Wind Power System Controller Design

LIU Xiang-Xia, SHEN Yan-Xia, PAN Ting-Long, WAN Hong-Shu

Institute of Electrical Automation, Jiangnan University, Wuxi 214122, P.R. China  
E-mail: xiangxia321@126.com

**Abstract:** The direct-driven permanent magnet synchronous wind power system has high mechanical oscillation, when the generator is controlled to maximize the efficiency of captured wind energy. To solve these problems, the wind speed is distributed to low frequency and high frequency parts, and it is based on multi-time scale of wind speed and frequency separation principle. The low frequency part of the system still adopts PI control, and for the high frequency part, this paper establishes LPV model and designs gain varying controller based on the model. The controller can compensate mechanical torque and decrease mechanical oscillation efficiently. The simulation results show that the controller reduces the overshoot of mechanical torque, and enhance the system reliability.

**Key Words:** Direct-Driven Permanent Magnet Synchronous Wind Turbine, LPV, Two-Frequency-Loop, Wind Power Conversion System

### 1. 引言

风能是一种无污染的可再生资源, 风力发电技术经过20多年的发展, 成本已大大降低, 风力发电系统的性能也逐渐优化. 风力发电已成为一个国家经济发展的重要策略<sup>[1,2]</sup>.

目前大多数风电系统均采用双馈发电机, 发电机与风力机之间有齿轮箱, 齿轮箱不仅消耗一部分能量, 且噪声大、故障率高, 且维护费用昂贵. 永磁同步电机是一种较新型的电机, 没有电刷和换相器, 故障率低、功率因数大、维护费用低, 因此该电机可有效地提高系统运行的可靠性, 近几年被应用于风力发电系统中. 直驱式永磁同步风电机组是风力机与发电机直接相连, 不需要齿轮箱, 从而大大提高可靠性, 并降低维护费用.

风力发电系统中, 额定风速以下的控制目标是实现风能最大捕获, 传统的控制方法易导致电机的电磁转矩震荡较大. 由于风力发电系统是一个典型的非线性系

统, 很多控制方法都需要将非线性模型转化为线性模型, 如最基本的线性控制方法PI和PID控制<sup>[3]</sup>, 较先进的如LQ和LQG控制<sup>[4]</sup>, 但因其鲁棒性不高, 这些方法的应用范围受到限制. 风速的不确定性常使系统线性化后的模型精度不高, 文献[5]中提出的LPV(Linear Parameter Varying)控制方法可有效地解决上述问题.

本文首先根据风速的多时间尺度特性, 介绍风力发电系统的双频环模型<sup>[6,7]</sup>, 低频部分采用PI控制方法, 高频部分在已建立的LPV模型的基础上, 采用LPV控制方法, 既提高了建模的精度, 又可同时实现风能的最大捕获和抑制机械振荡. 本文搭建了基于MATLAB的仿真模型, 仿真结果表明LPV控制的直驱式永磁同步风电系统性能良好, 稳定性高, 证实了该控制方法的可行性和优越性.

### 2. 风能转换系统建模

由于电磁时间常数远远小于机械时间常数, 本文忽略发电机的电磁响应的动态过程, 建立理想的风电系统模型. 变速恒频风力机经过传动机构带动发电机并网运行的风力发电机组的结构框图如图1所示.

\*此项工作得到教育部新世纪优秀人才支持计划基金资助, 项目批准号: NCET-10-0437; 中国博士后科学基金特别资助, 项目批准号: 201003553

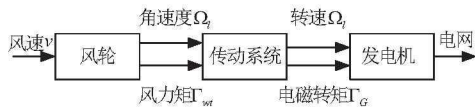


图1 变速恒频风力发电系统结构图

其中，传动系统代表风轮机与发电机直接相连的轴系，无齿轮传动箱。由于风轮机与发电机直接相连，风轮机的角速度与发电机的转速相同，都为 $\Omega_l$ 。

## 2.1 风速模型

风速是不确定的，根据其多时间尺度特性和频率分离原理，许多文献将风速 $v(t)$ 看作由两个分量组成的非统计随机过程<sup>[8,9]</sup>，即

$$v(t) = \bar{v}(t) + \Delta v(t) \quad (1)$$

其中， $\bar{v}(t)$ 是低频分量，描述风速的长时间尺度、低频变化； $\Delta v(t)$ 是脉动分量，描述风速的快速、高频变化。低频分量常被描述为韦伯分布，高频分量则用高斯白噪声 $e(t)$ 作为扰动信号的一阶滤波器组成，其表达式如下：

$$\Delta \dot{v}(t) = -\frac{1}{T_w} \Delta v(t) + \frac{1}{T_w} e(t) \quad (2)$$

其中， $T_w$ 为滤波器时间常数，且 $T_w = L_t / \bar{v}$ ， $L_t$ 为风速脉动长度。

## 2.2 风轮模型

根据贝兹理论，风轮产生的机械功率为：

$$P_{wr} = 0.5\pi\rho R^2 C_p(\lambda) v^3 \quad (3)$$

其中， $\rho$ 为空气密度， $R$ 为风轮半径， $v$ 为风速， $\lambda$ 为叶尖速比，且 $\lambda = R \cdot \Omega_l / v$ ， $\Omega_l$ 为风轮转动的角速度， $C_p(\lambda)$ 为风轮的功率系数，是叶尖速比 $\lambda$ 和桨距角 $\beta$ 的函数，表达形式如下：

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.22 \left( \frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{\frac{-12.5}{\lambda_i}}$$

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

因本文讨论额定风速以下情况，故桨距角 $\beta$ 视为0。

风轮产生的风力矩：

$$\Gamma_{wr} = \frac{P_{wr}}{\Omega_l} = 0.5\pi\rho R^3 v^2 C_T(\lambda) \quad (4)$$

其中， $C_T(\lambda)$ 为转矩系数，且 $C_T(\lambda) = C_p(\lambda) / \lambda$ 。

## 2.3 传动模型

对于直驱式风电系统，风力机与发电机之间无齿轮箱，通过轴直接相连。可得传动模型如下：

$$J_l \dot{\Omega}_l = \Gamma_{wr} - \frac{1}{\eta} \Gamma_G \quad (5)$$

其中， $\Gamma_G$ 为发电机电磁转矩， $\eta$ 为传动轴的效率； $J_l$ 为传动系统的总转动惯量。如此，式(4)和(5)组成风电系统基本的低频非线性模型。

## 2.4 永磁同步发电机模型

在分析永磁同步电机的基本电磁关系时，假定永磁同步电机为理想电机，即满足：

- (1) 忽略铁心磁饱和的影响，不计涡流及磁滞损耗；
- (2) 永磁材料的电导率为零；
- (3) 转子上没有阻尼绕组；
- (4) 定子三相对称，感应电动势为正弦。

永磁同步发电机在d, q轴坐标系下的电磁转矩为：

$$\Gamma_G = p(\Phi_d i_q - \Phi_q i_d) = p[\Phi_m i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (6)$$

假设永磁同步发电机的负载为一个独立的对称三分段电阻负载 $R_l$ ，则状态量和输入量定义为：

$$x = [x_1(t) \ x_2(t)]^T \equiv [i_d(t) \ i_q(t)]^T$$

$$u \equiv R_l$$

永磁同步发电机的状态模型如下：

$$\begin{cases} \dot{x} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d + L_s} (-R x_1 + p(L_q - L_s) x_2 \Omega_l) \\ -\frac{1}{L_q + L_s} (-R x_2 - p(L_d + L_s) x_1 \Omega_l + p \Phi_m \Omega_l) \end{bmatrix} + \\ \begin{bmatrix} -\frac{1}{L_d + L_s} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L_q + L_s} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (7)$$

$$y \equiv \Gamma_G = p \Phi_m x_2$$

其中， $p$ 是电机的极对数， $i_d$ ， $i_q$ 是定子电流， $\Phi_d$ ， $\Phi_q$ ， $\Phi_m$ 是通量，对于永磁材料来说 $\Phi_m$ 是个常量， $R$ 是定子电阻， $L_d$ ， $L_q$ 分别是d, q轴定子电感， $L_s$ 是电网及变流器等效的电感。

## 3. LPV控制器设计

### 3.1 LPV理论

LPV理论最早是由Shamma教授提出的，其动态特性依赖于实时可测的调节参数<sup>[5]</sup>。因其中的调节参数可以反映系统的非线性特性，LPV系统可用于描述非线性系统，运用线性化方法设计增益调度控制器，使控制器的增益随参数的变化而变化。

参照文献[6,7]，一般的LPV模型形式如下：

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A(\rho(t))x(t) + B(\rho(t))e(t) \\ z(t) = C(\rho(t))x(t) + D(\rho(t))e(t) \end{cases} \quad (8)$$

其中,  $\rho(t) = [\rho_1(t) \ \rho_2(t) \ \cdots \ \rho_s(t)]^T$  为实时可测参数。系统的LPV模型存在外部干扰  $e(t)$ , 为了有效的抑制扰动, 提高系统的动态性能, 需要根据LPV动态模型设计控制器  $K(s)$ , 使得从扰动输入  $e(t)$  到控制输出  $y(s)$  的闭环传递函数  $T_{ez}(s)$  的  $H_\infty$  范数小于给定的性能指标  $\gamma$ , 即

$$\|T_{ez}(s)\|_\infty < \gamma_\infty$$

$u(t)$  为控制输入量, 则有

$$u(t) = K(\rho(t)) \cdot x(t)$$

根据定理1求解状态反馈控制器增益矩阵。

**定理1<sup>[10]</sup>** 对于式(8)所描述的LPV系统模型和给定的正常数  $\gamma_\infty$ , 如果存在连续可微的对称正定矩阵  $X(\rho(t))$ 、对称正定矩阵  $Y$  和矩阵  $V$ 、 $R(\rho(t))$ , 使得

$$\begin{bmatrix} -(V+V^T) & * & * & * & * & * \\ M & -X(\rho(t)) + Y & * & * & * & * \\ 0 & 0 & -Y & * & * & * \\ L^T(\rho(t)) & 0 & 0 & -\gamma_\infty I & * & * \\ 0 & C(\rho(t))V & 0 & 0 & -\gamma_\infty I & * \\ V^T & 0 & 0 & 0 & 0 & -X(\rho(t)) \end{bmatrix} < 0 \quad (9)$$

其中

$M = V^T A^T(\rho(t)) + R^T(\rho(t)) B^T(\rho(t)) + X(\rho(t))$ , 对所有参数变化轨迹成立, 则系统参数二次稳定且满足给定的  $H_\infty$  性能指标。

若不等式(9)存在可行解, 则依赖于参数的状态反馈控制器增益矩阵为:

$$K(\rho(t)) = R(\rho(t)) V^{-1}$$

### 3.2 高频部分LPV模型

将风力发电系统的高频模型转化成3.1节所述LPV模型的形式, 首先, 根据式(5)可得

$$J_T \frac{\Delta \Omega_l}{\Delta \Omega_l} = \Delta \Gamma_{wt} - \frac{1}{\eta} \frac{\Gamma_G}{\Gamma_{wt}} \Delta \Gamma_G \quad (10)$$

其中,  $J_T = J_l \overline{\Omega_l} / \overline{\Gamma_{wt}}$ ,  $\frac{\Delta \Omega_l}{\Delta \Omega_l} = \frac{\Delta \Omega_l}{\Omega_l}$ ,  $\Delta \Omega_l = \dot{\Omega}_l - \overline{\Omega_l}$ ,

$\overline{\Omega_l}$  为  $\Omega_l$  的稳定值,  $\overline{\Omega_l}$ ,  $\overline{\Delta \Omega_l}$ ,  $\overline{\Delta \Gamma_{wt}}$  等同理。

根据文献[9]中的高频脉动风速建模方法及式(2), 可得

$$\frac{\Delta v}{T_w} = \frac{1}{T_w} (e - \Delta v) \quad (11)$$

根据系统低频子模型可得

$$\Delta \Gamma_{wt} = \gamma \cdot \Delta \Omega_l + (2 - \gamma) \Delta v \quad (12)$$

其中  $\gamma$  的取值依赖于系统的低频运行点, 其值为

$$\gamma = \frac{\bar{\lambda} C'_p(\bar{\lambda})}{C_p(\bar{\lambda})} - 1, \quad C'_p(\bar{\lambda}) = \frac{dC_p(\bar{\lambda})}{d\lambda}$$

将式(10), (11)带入式(12)可得

$$\begin{aligned} \frac{\Delta \Gamma_{wt}}{J_T \eta \Gamma_{wt}}(t) &= \left( \frac{\gamma}{J_T} - \frac{1}{T_w} \right) \Delta \Gamma_{wt}(t) + \frac{\gamma}{T_w} \Delta \Omega_l(t) \\ &\quad - \frac{\gamma}{J_T \eta \Gamma_{wt}} \Delta \Gamma_G(t) + \frac{2 - \gamma}{T_w} e(t) \end{aligned} \quad (13)$$

式(10)和(13)组成风电系统的高频模型, 针对此模型, 选取时变参数  $\rho(t) = \gamma(t)$ , 控制输入向量  $u(t) = \Delta \Gamma_G(t)$ , 状态向量  $x(t) = [\Delta \Omega_l(t) \ \Delta \Gamma_{wt}(t)]^T$ , 定义系统被调输出向量:  $z(t) = \Delta \lambda(t) = C(\rho(t))x(t)$  可得风力发电系统高频部分的LPV模型为

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A(\rho(t))x(t) + B(\rho(t))u(t) + Le(t) \\ z(t) = C(\rho(t))x(t) \end{cases}$$

系统系数矩阵如下

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1/J_T \\ \gamma/T_w & \gamma/J_T - 1/T_w \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} -1/\Gamma_{wt} & -\gamma/\Gamma_{wt} \\ J_T/\Gamma_{wt} & J_T/\Gamma_{wt} \end{bmatrix}^T,$$

$$L = \begin{bmatrix} 0 & (2 - \gamma)/T_w \end{bmatrix}^T, \quad C = \begin{bmatrix} 2 & -1 \\ 2 - \gamma & -2 - \gamma \end{bmatrix}$$

## 4. 仿真结果及分析

根据图1及上述分析, 搭建基于LPV的直驱式永磁同步风电系统总体结构如图2所示。

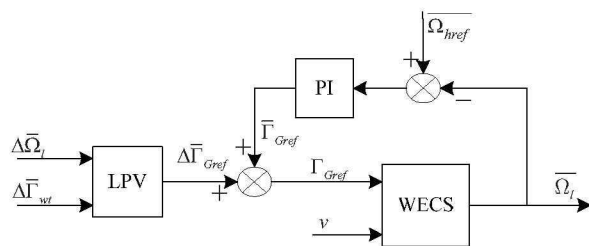


图2 基于LPV的增益调度控制结构图

在MATLAB仿真软件环境下, 采用LMI和Simulink工具箱, 分别描述和求解定理1中的矩阵, 并搭建系统的整体仿真图。仿真参数为风轮半径  $R = 2.5 \text{ m}$ , 转动惯量  $J_T = 0.5632 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ , 时间常数  $T_w = 21.4286 \text{ s}$ , 叶尖速比的最优值  $\lambda_{opt} = 7$ , 传动轴的传动效率  $\eta = 0.95$ , 空气密度  $\rho = 1.25 \text{ kg/m}^3$ , 永磁同步电机的最大转矩  $\Gamma_{Gmax} = 50 \text{ Nm}$ , 风轮功率因数的最大值  $C_{pmax} = 0.476$ 。

风轮功率因数  $C_p$  和叶尖速比  $\lambda$  的仿真结果如图3, 图4所示。图3是功率因数  $C_p$  的仿真结果, 可以看出,  $C_p$  的值比较稳定, 且很接近最大值0.467; 从图4的仿真结果可以看出, 叶尖速比跟踪最优值的精度较高, 系统的



鲁棒性较好，能够很好的实现风能最大捕获，同时，震荡也较小，解决了最大风能捕获的同时震荡大的矛盾。证明了该控制方法的有效性和优越性。

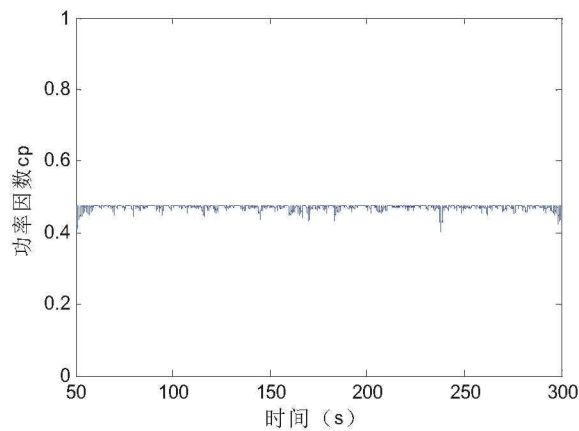


图3 功率因数  $c_p$

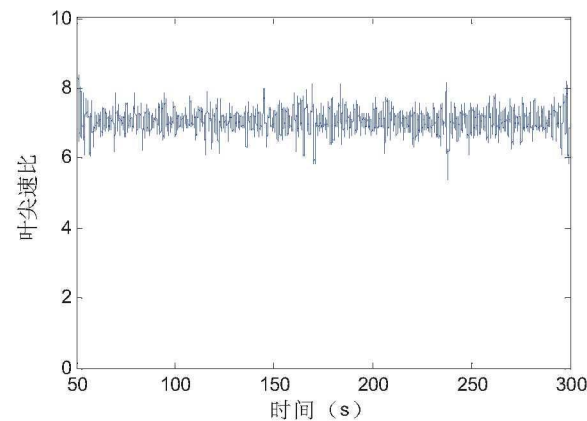


图4 叶尖速比  $\lambda$

5. 结语

本文针对直驱式永磁同步风电系统额定风速以下，需要风能最大捕获并保证较小的机械振荡，同时提高系统模型精度的问题，首先建立系统的基本模型，再对系统的高频部分，根据LPV理论线性化，并设计LPV控制器，结合低频的PI控制，能够较好的控制转矩。基于

MATLAB的仿真结果表明，直驱式永磁同步风电系统在额定风速以下时，通过本文的方法可实现风能最大捕获，同时使输出功率都稳定在稳态值附近。论文的研究成果在直驱式永磁同步风电系统等中具有较广阔的应用前景

参考文献

[1] Akpınar, E.K, Akpınar, S, An Investigation for Wind Power Potential Required in Installation of Wind Energy Conversion System. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 2006, 220(1): 1-13.

[2] 雷亚洲, Gordon Lightbody. 风力发电与电力市场. *电力系统自动化*, 2005, 29(10): 1-5.

[3] TAPIA A, TAPIA G, OSTOLAZA JX, et al. Modeling and control of a wind turbine driven doubly fed induction generator. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2003, 18(2): 194-204.

[4] MUHANDO BE, SENJYU T, URASAKI N, et al. Gain scheduling control of variable speed WTG under widely varying turbulence loading. *Renewable Energy*, 2007, 32(14): 2407-2423.

[5] Shamma, J., Athans, H.. Guaranteed Properties of gain scheduled control for linear parameter-varying plants. *Automatica*, 1991, 27(3), 559-564.

[6] Inlian Munteanu, Nicolaos Antonio Cutululis, Antoneta Iuliana Bratcu, et al. Optimization of Variable Speed Wind Power Systems Based on a LQG Approach. *Control Engineering Practice*, 2005, 13(7): 903-912.

[7] Inlian Munteanu, Antoneta Iuliana Bratcu, Nicolaos Antonie Cutululis et al. *Optimal Control of Wind Energy Systems*. London: Springer, 2008, 176-185.

[8] Bianchi F, De Battista H, Mantz RJ. *Wind turbine control systems principles, modelling and gain scheduling design*. London: Springer, 2006, 20-47.

[9] Nichita C, Luca D, Dakyo B, Ceang E. Large band simulation of the wind speed for real time wind turbine simulators. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2002, 17(4): 523-529.

[10] 王俊玲. 时滞线性参数变化系统的稳定性分析与增益调度控制. 北京: 科学出版社, 2008, 78-82.