

LPV动态补偿的风能转换系统变桨距控制

沈艳霞, 朱 芸, 纪志成

(江南大学 电气自动化研究所, 江苏 无锡 214122)

摘要: 当风速超过额定值时, 风能转换系统需要控制节距角来实现额定恒功率控制, 同时控制电机电磁转矩使转速维持在其额定值以减少系统振荡. 建立了风能转换系统的机理模型并得到其线性参数变化(LPV)系统模型; 在多变量(MV)控制策略的基础上, 设计了基于LPV模型的增益调度控制器, 对节距角和电磁转矩进行动态补偿; 基于dSPACE的风能转换系统硬件在回路仿真平台进行实验研究, 结果表明补偿后系统的功率误差更小, 电机转速及转矩的波动明显减小, 体现了更好的动态性能.

关键词: 风能转换系统; 线性参数变化系统模型; 增益调度控制; 动态补偿

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Variable pitch control for wind energy conversion system with LPV dynamic compensation

SHEN Yan-xia, ZHU Yun, JI Zhi-cheng

(Institute of Electrical Automation, Jiangnan University, Wuxi Jiangsu 214122, China)

Abstract: When the wind speed exceeds its rated value, pitch angle is regulated to maintain the constant power output, and the mechanical oscillation of the wind energy conversion system(WECS) is reduced by controlling the electromagnetic torque to keep the generator speed at its rated value. The nonlinear mechanistic model for WECS is established. The linear parameter varying(LPV) system model is derived. Based on the multivariable(MV) control strategy, we employ the LPV gain scheduling technique to dynamically compensate the pitch angle and the electromagnetic torque. Experiment results based on the hardware-in-the-loop simulation platform for WECS show that the output power error is reduced by the compensation, and the fluctuation of the motor speed and torque are decreased, resulting in a better dynamic performance.

Key words: wind energy conversion system; linear parameter varying system model; gain scheduling control; dynamic compensation

1 引言(Introduction)

20世纪90年代以来, 风力资源飞速发展, 风能的年增长率达到了20%左右. 风能是一种完全无污染、可再生能源, 面对全球的能源危机, 发展风能势在必行^[1].

控制技术对风力发电起到举足轻重的作用, 因此吸引了众多学者对风能转换系统控制方法研究的兴趣. 线性控制方法, 如PI和PID控制^[2], 已经广泛应用到变桨距控制中. 此外, LQ和LQG^[3]等更先进的控制方法也被用于风能转换系统中. 然而对于强非线性风能转换系统而言, 上述控制方法的鲁棒性较差使其应用受到了限制. 文献[4]提出一种多变量控制策略, 采用非线性动态反馈转矩控制方法控制发电机转矩, 采用线性比例方法控制节距角. 该控制

方法虽然有效地进行了恒功率控制, 但发电机转速振荡较大, 影响风机的运行可靠性. 文献[5]将LPV增益调度方法用于风能转换系统的鲁棒控制中, 详细介绍了额定风速以下和额定风速以上不同工况下LPV增益调度控制器的设计方法. 风能转换系统是参数时变的系统, 可将其转化为参数线性变化的系统进行处理.

LPV控制对于参数动态变化的系统具有良好的控制效果. 文献[6]建立了风能转换系统归一化误差模型, 在此基础上, 本文给出归一化误差的LPV模型, 设计增益调度控制器. 针对文献[4]中多变量控制的弱点, 利用增益调度控制器对其进行动态补偿. 为验证其可行性和优越性, 本文搭建了基于dSPACE的风能转换系统硬件在回路仿真实验平台, 进行了实验

研究. 实验结果表明, 基于LPV动态补偿的多变量控制方法减小功率误差, 降低转速的振荡, 获得更好的动态性能.

2 风能转换系统的建模(Model of wind energy conversion system)

由于电磁时间常数远远小于机械时间常数, 本文中, 忽略发电机的电磁响应的动态过程. 变速变桨距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^[7], 如图1所示.

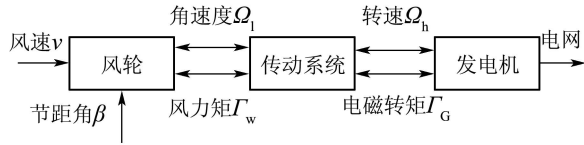


图 1 变速变桨风能转换系统结构图

Fig. 1 Basic structure of variable speed variable pitch WECS

2.1 风轮(Wind turbine)

根据贝兹理论, 风轮产生的机械功率为

$$P_{wt} = 0.5\pi\rho R^2 C_p(\lambda, \beta) v^3. \quad (1)$$

其中: ρ 为空气密度, R 为风轮半径, v 为风速, β 为节距角; λ 为叶尖速比, 且 $\lambda = \Omega_l R/v$, Ω_l 为风轮转动的角速度; $C_p(\lambda, \beta)$ 为风轮的功率系数, 其表达式^[8]如下:

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.22\left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5.0\right)e^{\frac{-12.5}{\lambda_i}}, \quad (2)$$

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

风轮产生的风力矩:

$$\Gamma_{wt} = \frac{P_{wt}}{\Omega_l} = 0.5\pi\rho R^3 v^2 \frac{C_p(\lambda, \beta)}{\lambda}. \quad (3)$$

2.2 传动系统(Drive train)

风力发电系统的传动系统连接风轮和发电机, 负责机械能的传递, 其主要机械部件为增速齿轮. 忽略粘性摩擦, 其运动方程^[9]如下:

$$J_h \dot{\Omega}_h = \frac{\eta}{i} \Gamma_{wt} - \Gamma_G, \quad (4)$$

$$J_l \dot{\Omega}_l = \Gamma_{wt} - \frac{i}{\eta} \Gamma_G. \quad (5)$$

其中: Ω_h 为发电机转子转速, $\Omega_h = i\Omega_l$, i 为齿轮变比, Γ_G 为发电机电磁转矩, η 为齿轮效率; J_h , J_l 分别为传动系统高速端和低速端的总转动惯量. 注意到, 式(4)两边同乘以 η/i , 将转化成式(5).

2.3 变桨伺服系统(Blade servo system)

变桨伺服动态系统的简化结构^[8]如图2所示. 变桨伺服动态系统未发生饱和时, 可用1阶微分方程表

示:

$$\dot{\beta} = \frac{1}{T_\beta} (\beta_{ref} - \beta). \quad (6)$$

其中: β_{ref} 为参考节距角, T_β 为变桨伺服系统的时间常数. 对变桨伺服动态系统来讲, T_β 很小, β 可以很快跟踪到 β_{ref} ^[8].

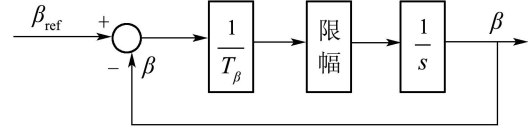


图 2 风能转换系统变桨伺服系统结构图

Fig. 2 The structure of pitch servo for WECS

2.4 风速模型(Model of wind speed)

由于风速的不确定性, 通常将风速看成非统计随机过程^[10,11], 由两部分组成:

$$v(t) = \bar{v}(t) + \Delta v(t). \quad (7)$$

其中: $\bar{v}(t)$ 为低频部分, $\Delta v(t)$ 为高频脉动部分; 通常假设 $\Delta v(t)$ 是由高斯白噪声 $e(t)$ 作为扰动信号的1阶滤波器组成, 其表达式如下:

$$\dot{\Delta v}(t) = -\frac{1}{T_w} \Delta v(t) + \frac{1}{T_w} e(t), \quad (8)$$

其中 T_w 为滤波器时间常数.

2.5 归一化误差的LPV模型(LPV model of error normalized)

式(3)(4)(6)组成了风能转换系统的非线性模型. 为得到风能转换系统的线性化模型, 将非线性系统模型在稳态点处进行线性化^[5]. 记 $\bar{x}$ 为变量 x 的稳态值, 则误差 $\Delta x = x - \bar{x}$, 归一化误差 $\Delta \bar{x} = \Delta x / \bar{x}$.

由式(3), 可得

$$\Delta \bar{\Gamma}_{wt} = \gamma \Delta \bar{\Omega}_l + (2 - \gamma) \Delta \bar{v} + \zeta \Delta \bar{\beta}. \quad (9)$$

其中:

$$\Delta \bar{\Gamma}_{wt} = \Delta \Gamma_{wt} / \bar{\Gamma}_{wt}, \quad \Delta \bar{v} = \Delta v / \bar{v},$$

$$\Delta \bar{\beta} = \Delta \beta / \bar{\beta}, \quad \Delta \bar{\Omega}_l = \Delta \Omega_l / \bar{\Omega}_l,$$

γ, ζ 的取值取决于系统稳态运行点:

$$\gamma = \bar{\lambda} C'_{p\lambda}(\bar{\lambda}, \bar{\beta}) / C_p(\bar{\lambda}, \bar{\beta}) - 1,$$

$$\zeta = \bar{\beta} C'_{p\beta}(\bar{\lambda}, \bar{\beta}) / C_p(\bar{\lambda}, \bar{\beta}),$$

$$C'_{p\lambda}(\bar{\lambda}, \bar{\beta}) = \frac{\partial C_p(\lambda, \beta)}{\partial \lambda} \Big|_{\lambda=\bar{\lambda}, \beta=\bar{\beta}},$$

$$C'_{p\beta}(\bar{\lambda}, \bar{\beta}) = \frac{\partial C_p(\lambda, \beta)}{\partial \beta} \Big|_{\lambda=\bar{\lambda}, \beta=\bar{\beta}}.$$

由式(4), 得

$$J_T \Delta \dot{\bar{\Omega}}_l = \Delta \bar{\Gamma}_{wt} - \Delta \bar{\Gamma}_G. \quad (10)$$

其中传动系统的机械时间常数 $J_T = J_1 \bar{\Omega}_1 / \bar{\Gamma}_{wt} = J_h \bar{\Omega}_h / \bar{\Gamma}_{wt}$.

由式(6), 得

$$\Delta \dot{\bar{\beta}} = \frac{1}{T_\beta} (\Delta \bar{\beta}_{\text{ref}} - \Delta \bar{\beta}). \quad (11)$$

由文献[5,8], 可得

$$\begin{aligned} \Delta \dot{\bar{\Gamma}}_{wt}(t) = & \left(\frac{\gamma}{J_T} - \frac{1}{T_w} \right) \Delta \bar{\Gamma}_{wt}(t) + \frac{\gamma}{T_w} \Delta \bar{\Omega}_1(t) + \\ & \left(\frac{\zeta}{T_w} - \frac{\zeta}{T_\beta} \right) \Delta \bar{\beta}(t) - \frac{\gamma}{J_T} \Delta \bar{\Gamma}_G(t) + \\ & \frac{\zeta}{T_\beta} \Delta \bar{\beta}_{\text{ref}}(t) + \frac{2-\gamma}{T_w} e(t). \end{aligned} \quad (12)$$

其中 $T_w = L_t / \bar{v}$, L_t 为风速脉动长度.

由于风速的不确定性, 风能转换系统的稳态运行点并非固定在某点. 为了更加精确地描述系统的运行状态, 取时变参数 $\rho(t) = (\rho_1(t) \ \rho_2(t))^T = (\gamma(t) \ \zeta(t))^T$, 同时整合式(10)~(12), 得

$$\dot{x}(t) = A(\rho(t))x(t) + B(\rho(t))u(t) + L(\rho(t))e(t). \quad (13)$$

其中: 状态 $x(t) = (\Delta \bar{\Omega}_1 \ \Delta \bar{\beta} \ \Delta \bar{\Gamma}_{wt})^T$, 控制输入

$$u(t) = (\Delta \bar{\Gamma}_G \ \Delta \bar{\beta}_{\text{ref}})^T,$$

$$L(\rho(t)) = (0 \ 0 \ (2-\gamma)/T_w)^T,$$

$$B(\rho(t)) = \begin{pmatrix} -1/J_T & 0 \\ 0 & 1/T_\beta \\ \gamma/J_T & \zeta/T_\beta \end{pmatrix},$$

$$A(\rho(t)) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1/J_T \\ 0 & -1/T_\beta & 0 \\ \gamma/T_w & \zeta/T_w - \zeta/T_\beta & \gamma/J_T - 1/T_w \end{pmatrix}.$$

额定风速以上风能转换系统的控制目的是使系统的吸收功率和转子转速稳定在其额定值处. 根据上述控制目标, 定义系统输出:

$$z(t) = \begin{pmatrix} \Delta \bar{P}(t) \\ \Delta \bar{\Omega}_h(t) \end{pmatrix} = Cx(t) + Du(t). \quad (14)$$

其中 $P(t)$ 为发电机功率,

$$P(t) = \Gamma_G(t) \cdot \Omega_h(t),$$

于是

$$\Delta P(t) = \Delta \Gamma_G(t) \cdot \bar{\Omega}_h(t) + \Delta \Omega_h(t) \cdot \bar{\Gamma}_G(t),$$

两边同除以

$$\bar{P}(t) = \bar{\Omega}_h(t) \cdot \bar{\Gamma}_G(t),$$

则有

$$\Delta \bar{P}(t) = \Delta \bar{\Omega}_h(t) + \Delta \bar{\Gamma}_G(t);$$

传动系统刚性连接, 则

$$\Delta \bar{\Omega}_1(t) = \Delta \bar{\Omega}_h(t),$$

$$C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, D = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

式(13)(14)组成风能转换系统归一化误差的LPV模型, 风能转换系统的LPV模型中的系数矩阵仿射依赖于参数向量 $\rho(t)$, 即

$$A(\rho(t)) = A_0 + \rho_1(t)A_1 + \rho_2(t)A_2,$$

$$B(\rho(t)) = B_0 + \rho_1(t)B_1 + \rho_2(t)B_2,$$

$$L(\rho(t)) = L_0 + \rho_1(t)L_1 + \rho_2(t)L_2.$$

其中:

$$A_0 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{J_T} \\ 0 & -\frac{1}{T_\beta} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T_w} \end{pmatrix}, A_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{T_w} & 0 & -\frac{1}{J_T} \end{pmatrix},$$

$$A_2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_w} - \frac{1}{T_\beta} & 0 \end{pmatrix}, B_0 = \begin{pmatrix} -\frac{1}{J_T} & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_\beta} \\ 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$B_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -\frac{1}{J_T} & 0 \end{pmatrix}, B_2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{1}{T_\beta} & 0 \end{pmatrix};$$

$$L_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{2}{T_w} \end{pmatrix}, L_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{1}{T_w} \end{pmatrix}, L_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

3 控制器设计(Controller design)

文献[4]提出了额定风速以上变速变桨风能转换系统的多变量控制策略, 该控制方法通过简单实用的非线性转矩控制及比例积分(PI)的节距角控制方法, 实现了恒功率控制目标. 然而电机转速及电磁转矩在其额定值附近具有20%左右的振荡, 影响了风能转换系统在大风速条件下运行的可靠性. 为了弥补这一缺陷, 本文设计了基于风能转换系统归一化误差的LPV模型的增益调度控制器, 对多变量控制器进行动态补偿, 其主要控制结构如图3所示:

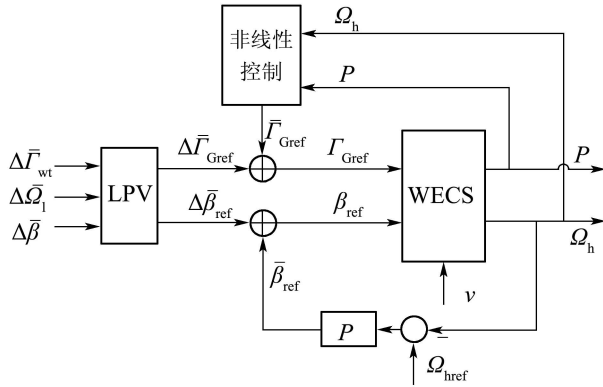


图 3 基于LPV动态补偿的多变量控制结构

Fig. 3 Multivariable control with LPV dynamic compensation

3.1 多变量控制(Multivariable control)

额定风速以上时, 风能转换系统需同时控制节距角 \$\beta\$ 和发电机电磁转矩 \$\Gamma_G\$ 以实现恒功率控制. 文献[4]提出的多变量控制简述如下:

非线性转矩控制:

$$\dot{\Gamma}_{Gref}(t) = \frac{1}{\Omega_h(t)} [c_0 \varepsilon_p - \frac{1}{J_h} (\frac{\eta}{i} \Gamma_{wt}(t) \Gamma_G(t) - \Gamma_G^2(t))]. \quad (15)$$

节距角控制:

$$\beta_{ref}(t) = K_p \varepsilon_\Omega(t) + K_I \int \varepsilon_\Omega(t) dt. \quad (16)$$

其中: 功率误差 \$\varepsilon_p(t) = P_{ref} - P(t)\$, 转速误差 \$\varepsilon_\Omega(t) = \Omega_{href} - \Omega_h(t)\$, \$P_{ref}\$ 和 \$\Omega_{href}\$ 分别为发电机额定功率和额定转速, \$c_0\$ 为正实数, \$K_p, K_I\$ 分别为比例系数和积分系数.

3.2 LPV增益调度控制(LPVS gain scheduling control)

由式(13)可知, 风能转换系统的LPV模型存在外部干扰项 \$e(t)\$, 为了有效抑制风速扰动, 提高系统的动态性能, 基于风能转换系统的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 \$z(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

$$\|T_{ez}(s)\|_\infty < \gamma. \quad (17)$$

设计如下全状态反馈控制器:

$$u(t) = K(\rho(t))x(t), \quad (18)$$

得到闭环系统:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \bar{A}(\rho(t))x(t) + L(\rho(t))e(t), \\ z(t) = \bar{C}(\rho(t))x(t). \end{cases} \quad (19)$$

其中:

$$\bar{A}(\rho(t)) = A(\rho(t)) + B(\rho(t))K(\rho(t)),$$

$$\bar{C}(\rho(t)) = C + DK(\rho(t)).$$

由于风能转换系统的LPV模型是仿射依赖于参数向量 \$\rho(t)\$ 的, 因此 \$K(\rho(t)) = K_0 + \rho_1(t)K_1 + \rho_2(t)K_2\$ [12]. 其中, \$K_i (i = 0, 1, 2)\$ 由定理1得出.

定理 1 对于由式(13)(14)组成的风能转换系统归一化误差LPV系统模型和给定的正常数 \$\gamma\$, 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

$$\begin{pmatrix} -(V + V^T) & * & * & * & * & * \\ M & L & * & * & * & * \\ 0 & 0 & -Y & * & * & * \\ M^T(\rho(t)) & 0 & 0 & -\gamma I & * & * \\ 0 & N & 0 & 0 & -\gamma I & * \\ V^T & 0 & 0 & 0 & 0 & X(\rho(t)) \end{pmatrix} < 0 \quad (20)$$

对所有参数变化轨迹成立, 则闭环系统(19)参数二次稳定且满足给定的 \$H_\infty\$ 性能指标. 其中:

$$M = V^T A(\rho(t)) + R^T(\rho(t))B^T(\rho(t)) + X(\rho(t)),$$

$$V = CV + DR(\rho(t)), L = -X(\rho(t)) + Y.$$

若不等式(20)存在可行解, 则依赖于参数的状态反馈控制器增益矩阵为

$$K(\rho(t)) = R(\rho(t))V^{-1}. \quad (21)$$

3.3 基于LPV动态补偿的多变量控制(Multivariable control based on LPV dynamic compensation)

如图3所示, 多变量控制器输出为风能转换系统总控制输入的稳态部分, LPV动态补偿控制器输出为归一化的动态部分, 则风能转换系统总控制输入为

$$\Gamma_{Gref}(t) = \bar{\Gamma}_{Gref}(t) + \Delta \Gamma_{Gref}(t) = \bar{\Gamma}_{Gref}(t) + k_\Gamma u_1(t) \bar{\Gamma}_{Gref}(t), \quad (22)$$

$$\beta_{ref}(t) = \bar{\beta}_{ref}(t) + \Delta \beta_{ref}(t) = \bar{\beta}_{ref}(t) + k_\beta u_2(t) \bar{\beta}_{ref}(t). \quad (23)$$

其中: \$\bar{\Gamma}_{ref}(t), \bar{\beta}_{ref}(t)\$ 为多变量控制输出, \$u_1 = \Delta \bar{\Gamma}_{ref}(t), u_2 = \Delta \bar{\beta}_{ref}(t)\$ 为LPV动态补偿控制输出; \$k_\Gamma, k_\beta\$ 为补偿系数, 以描述LPV控制的补偿强度.

4 实验分析(Experiment analysis)

为了验证本文所提出的基于LPV动态补偿的多变量控制方法的优越性, 基于dSPACE的风能转换系统硬件在回路仿真平台对该方法进行实验验证. 该仿真平台主要结构如图4所示.

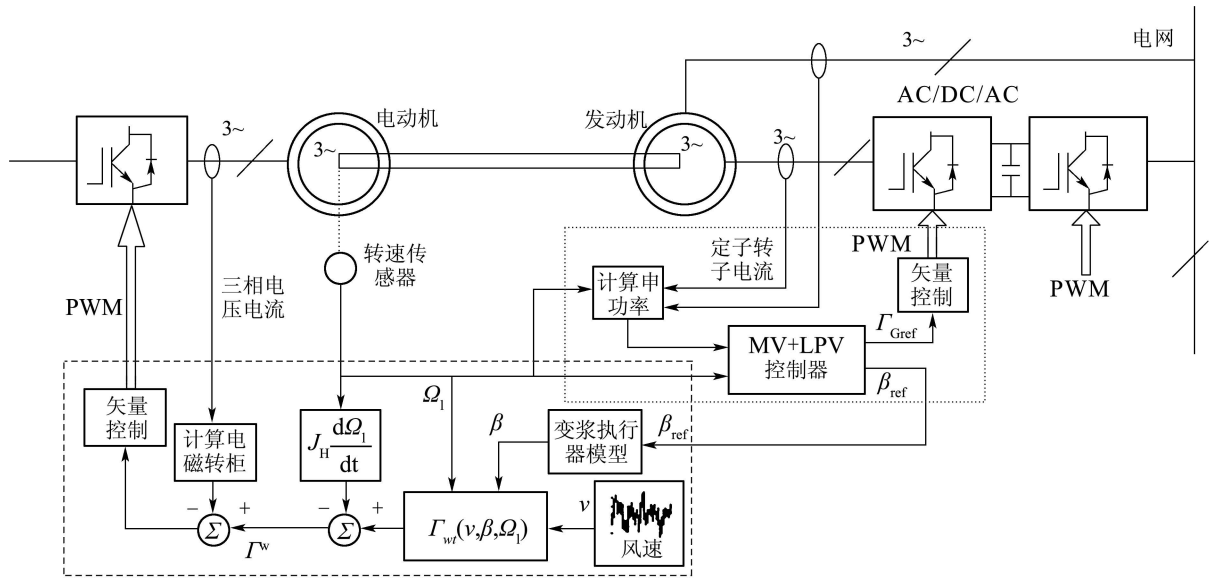


图4 基于dSPACE的风能转换系统硬件在回路仿真平台

Fig. 4 Hardware-in-the-loop simulation platform for WECS via dSPACE

该平台主要由两大部分组成: 实际被控对象为电动机与发电机, 以实物形式出现在闭环里, 省去了复杂的建模过程; dSPACE处理器提供实时控制平台, 确保仿真运行与实际时钟的严格同步^[13]. dSPACE处理器的输入输出接口采集各类传感器的信号, 通过内部模块计算所需的物理量. 变量波形可通过PC机上ControlDesk软件显示出来. 图4中短虚线模块和点虚线模块为平台的控制部分, 其MATLAB/Simulink模型通过ControlDesk软件下载到dSPACE处理器中, 其中短虚线模块采用转矩驱动模式通过控制电动机实现对风轮的模拟^[9], 点虚线模块为基于LPV动态补偿的多变量控制器, 为发电机提供参考转矩, 为风轮模拟中的变桨执行器提供参考节距角. 发电机背靠背AC-DC-AC网侧变换器的控制也在dSPACE处理器实现, 具体控制方法相关文献有详细的介绍, 此处省略.

风能转换系统的实验参数^[9]如表1:

表1 实验参数

Table 1 Experiment parameters

参数名称	参数值	参数名称	参数值
R	2.5 m	Ω_{href}	200 rad/s
i	6.25	η	0.95
J_T	0.263 kg·m ²	T_β	0.05 s
L_t	150 m	Γ_{Gmax}	40 Nm
T_w	10 s	J_g	0.01 kg·m ²
P_{ref}	6000 W	J_t	0.09 kg·m ²

多变量控制器的参数取 $c_0 = 1000$, $K_p = 0.1$, $K_I = 0.1$; 同时取补偿系数 $k_r = 1$, $k_\beta = 200$.

利用网格技术将参数 $\rho(t)$ 的变化区域进行均匀划分, 则稳定性条件式(20)对应一组LMIs, 应用LMI工具箱求解器feast来判断参数LMIs的可行性问题, 最后得到控制增益矩阵:

$$K(\rho(t)) = \begin{bmatrix} 0.92257 & 0.002314 & 0.00698 \\ -0.11595 & -0.01049 & -0.0099 \end{bmatrix} + \gamma(t) \begin{bmatrix} -0.47498 & -0.0048 & -0.0019 \\ -0.001248 & -0.000164 & -0.00011 \end{bmatrix} + \zeta(t) \begin{bmatrix} -0.0004 & -0.0006 & -0.00043 \\ -0.00008 & 0 & 0.000005 \end{bmatrix}. \quad (24)$$

采用2.4节风速的建模方法, 得到模拟风速如图5所示, 其中平均风速为20 m/s. 基于dSPACE的风能转换系统硬件在回路仿真平台的实验波形波如图6~9所示:

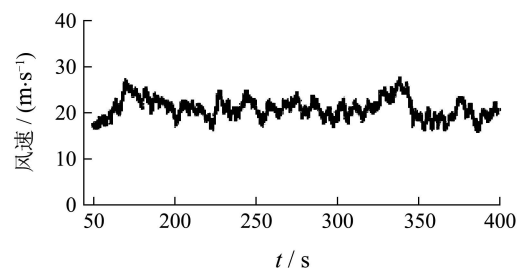
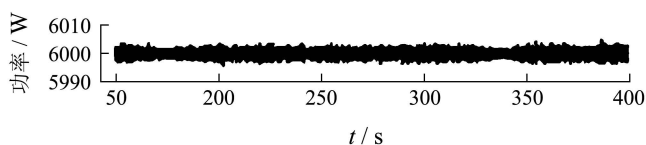
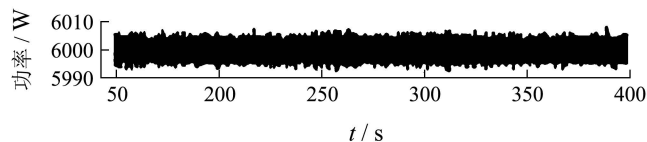


图5 风速

Fig. 5 Wind speed



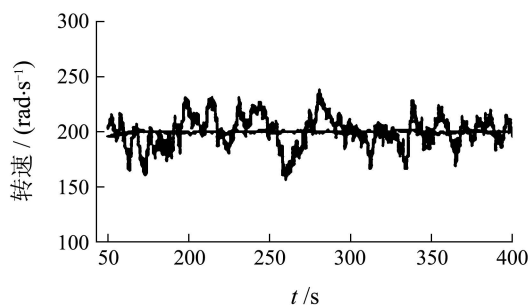
(a) MV



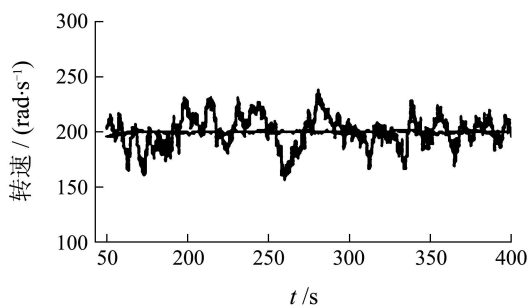
(b) MV+LPV

图 6 功率输出

Fig. 6 Power output



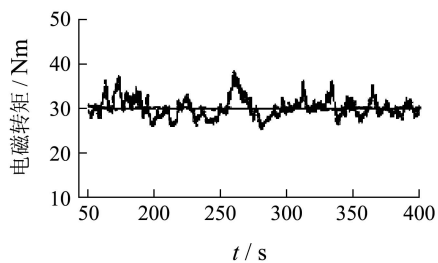
(a) MV



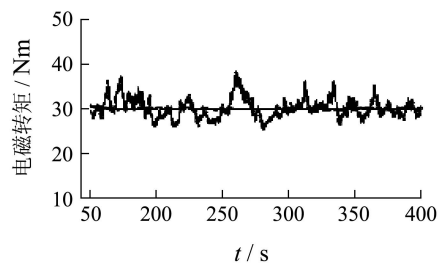
(b) MV+LPV

图 7 电机转速

Fig. 7 Generator rotor speed



(a) MV

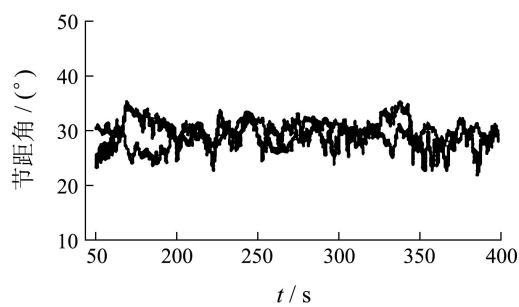


(b) MV+LPV

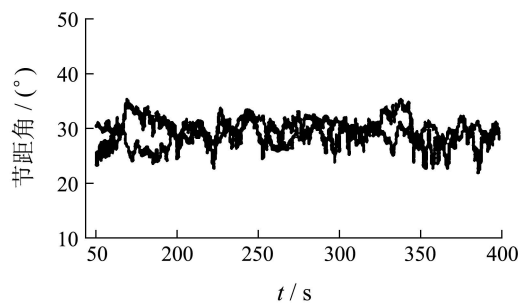
图 8 电磁转矩

Fig. 8 Electromagnetic torque

图6中的(a)(b)两子图分别为LPV动态补偿的多变量控制和多变量控制的功率曲线. 比较可知, 前者具有更小的功率误差, 保证了额定风速以上风能转换系统的恒功率输出. 图7和图8给出两种控制方法下电机转速和转矩曲线, 显然, LPV动态补偿的多变量控制使转速维持在其额定值(200 rad/s)附近, 对应的电磁转矩也在其额定值(30 Nm)附近, 大大降低了转速和转矩的振荡, 从而提高了大风速条件下风能转换系统的可靠性. 然而LPV动态补偿的多变量控制方法对变桨伺服系统的动态性能提出了更高的要求, 如图9所示; 随着伺服控制技术的提高, 这一不足可以得到一定程度的弥补.



(a) MV



(b) MV+LPV

图 9 节距角

Fig. 9 Pitch angle

5 结论(Conclusion)

本文针对额定风速以上风能转换系统进行LPV动态补偿的多变量控制. 首先建立了风能转换系统的机理模型, 并将其线性化, 得到了风能转换系统归一化误差的LPV模型. 进而设计了LPV动态补偿增益调度控制器, 结合PI和非线性转矩控制方法的多变量控制策略分别对节距角和转矩进行控制. 实验结果表明, 额定风速以上时, 本文设计的控制器能够很好地将转矩稳定在设定值附近, 振荡较小, 使得系统的输出功率较稳定, 更好地实现了风能转换系统的多变量控制.

参考文献(References):

- [1] 雷亚洲, LIGHTBODY G. 风力发电与电力市场[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(10): 1 – 5.
(LEI Yazhou, LIGHTBODY G. Wind energy and electricity market[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2005, 29(10): 1 – 5.)
- [2] TAPIA A, TAPIA G, OSTOLAZA JX, et al. Modeling and control of a wind turbine driven doubly fed induction generator[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2003, 18(2): 194 – 204.
- [3] MUHANDO BE, SENJYU T, URASAKI N, et al. Gain scheduling control of variable speed WTG under widely varying turbulence loading[J]. *Renewable Energy*, 2007, 32(14): 2407 – 2423.
- [4] BOUKHEZZAR B, LUPU L, SIGUERDIDJANE H, et al. Multi-variable control strategy for variable speed, variable pitch wind turbines[J]. *Renewable Energy*, 2007, 32(8): 1273 – 1287.
- [5] BIANCHI F D, DE BATTISTE H, MANTZ R J. *Wind Turbine Control Systems*[M]. London: Springer, 2007: 81 – 150.
- [6] MUNTEANU I, CUTULULIS N A, BRATCU A I, et al. Optimization of variable speed wind power systems based on a LQG approach[J]. *Control Engineering Practice*, 2005, 13(7): 903 – 912.
- [7] 张先勇, 吴捷, 杨金明, 等. 额定风速以上风力发电机组的恒功率 H_∞ 鲁棒控制[J]. 控制理论与应用, 2008, 25(2): 321 – 328.
(ZHANG Xianyong, WU Jie, YANG Jinming, et al. H-infinity robust control of constant power output for the wind energy conversion system above rated wind[J]. *Control Theory & Applications*, 2008, 25(2): 321 – 328.)
- [8] MUHANDO E B, SENJYU T, KINJO H, et al. Augmented LQG controller for enhancement of online dynamic performance for WTG system[J]. *Renewable Energy*, 2008, 33(8): 1942 – 1952.
- [9] MUNTEANU I, BRARCU A I, CUTULULIS N A, et al. *Optimal control of Wind Energy Systems*[M]. London: Springer, 2008: 52 – 57.
- [10] BIANCHI F, DE BATTISTA H, MANTZ R J. *Wind Turbine Control Systems-Principles, Modelling and Gain Scheduling Design*[M]. London: Springer, 2006: 20 – 47.
- [11] NICHITA C, LUCA D, DAKYO B, et al. Large band simulation of the wind speed for real time wind turbine simulators[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2002, 17(4): 523 – 529.
- [12] 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[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 78 – 83.
(WANG Junling. *Stability Analysis and Gain Scheduling Control for Linear Parameter-varying Systems with Time-delay* [M]. Beijing: Science Press, 2008: 78 – 83.)
- [13] 沈艳霞, 林瑾, 纪志成. 感应电机Backstepping控制方法及dSPACE实时仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(9): 2207 – 2211.
(SHEN Yanxia, LIN Jin, JI Zhicheng. Study on backstepping control and dSPACE realization for induction motors[J]. *Journal of System Simulation*, 2005, 17(9): 2207 – 2211.)

作者简介:

沈艳霞 (1973—), 女, 副教授, 博士, 目前研究方向为风力发电控制系统研究、电机智能控制, E-mail: shenyanxia@tom.com;

朱 芸 (1985—), 女, 研究生, 目前研究方向为风力发电控制系统研究, E-mail: aishang0701@hotmail.com;

纪志成 (1959—), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 目前研究方向为风力发电控制系统研究、高精度运动控制系统研究, E-mail: zcji@jiangnan.edu.cn.