

双馈风力发电系统的非线性解耦控制

郭家虎^{1, 2}, 蔡 旭², 龚幼民³

(1. 安徽理工大学 电气与信息工程学院, 安徽 淮南 232001; 2. 上海交通大学 电子信息与电气工程学院, 上海 200030;
3. 上海大学 机电工程与自动化学院, 上海 200072)

摘要: 为了克服双馈风力发电系统基于近似线性化模型的分离控制方法动态性能差, 抗扰能力弱的缺点, 研究了双馈风力发电系统的精确线性化解耦控制. 首先从电力电子装置与电机系统集成角度, 建立了双馈风力发电系统的统一模型; 然后应用逆系统理论, 推导出其逆系统模型, 将其精确线性化成一个伪线性系统; 最后运用内模控制理论对其进行综合以提高系统的鲁棒性, 实现了双馈风力发电系统的高性能控制. 仿真和实验结果表明, 该控制策略不仅可以加快系统的响应速度, 保证系统的全局稳定性, 而且还可以减少所需的直流滤波储能电容, 提高系统可靠性.

关键词: 双馈风力发电系统; 统一模型; 逆系统理论; 内模控制; 精确线性化

中图分类号: TM315 **文献标识码:** A

Nonlinear control of wind power generation based on DFIG

GUO Jia-hu^{1, 2}, CAI Xu², GONG You-ming³

(1. School of Electrical and information Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China;
2. School of Electronic, Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China;
3. School of Mechatronics Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: To deal with the undesirable performance and the low disturbance-rejection of the separated control for a double-fed induction generation(DFIG) based on a simplified model; we propose an accurately linearized decoupling control for the DFIG. First, we develop an integrated model for the assembly of electronic devices and the DFIG, and then, derive its inverse model by using the inverse system theory. This inverse model is then accurately linearized and installed in front of the original system. Thus, a pseudo linear system is developed, which is then synthesized based on the internal-model-control(IMC) theory to improve the robustness, realizing a high-performance control for the DFIG. Simulation results and experimental data validate the desirable performance and high robustness, the suppression of dc-bus voltage fluctuations, the reduction of the size of electrolytic capacitor, and the enhancement of the reliability of the wind generation system.

Key words: DFIG system; unified model; inverse system; internal model control; exact linearization

1 引言(Introduction)

变速恒频双馈风力发电机组是目前风力发电的主流机型^[1], 它通过一个双PWM变换器来实现交流励磁控制, 通常的控制策略是将双PWM变换器分成网侧变换器和转子侧变换器分别进行控制, 两者之间采用大容量电解电容来进行解耦^[2].网侧变换器的控制一般是将其近似线性化后, 采用线性串级双闭环控制结构来实现在单位功率因数下直流侧电压恒定的控制目标^[3].它在系统的镇定点附近来设计控制器以达到所要求的闭环响应特性, 当系统参数变化

或有外部发生扰动时, 都会使系统的闭环极点偏移, 导致系统运行不稳定^[4].

转子侧变换器的控制是根据双馈发电机的功率特性通过线性坐标变换把转子电流分解成为两个相互正交的分量, 找出转子电流与定子有功功率和无功功率的关系, 再通过转子电压对转子电流的控制, 达到对定子有功功率和无功功率的控制, 不同之处就在于选取了不同的坐标系统, 如定子磁链定向^[5]、气隙磁链定向^[5]、和定子电压(电网电压)定向^[7]等.这种方法设计的解耦控制策略在忽略如发电

机机械损耗和定子铜耗等的基础上采取近似线性化的方法。除此这外,在双馈风力发电机的动态过程中,由于“发电机反电势”的存在,转子电压的两个正交分量和转子电流的两个正交分量并不是完全封闭的、解耦的关系^[8],所以上述通过静态补偿的方法来实现双馈发电机有功功率和无功功率的解耦控制仅仅能满足静态控制的需要,在动态过程中并不总是能够获得预期的效果。

更为重要的是,对于双馈风力发电系统,无论是从电流流向的角度看,还是从能量传递的角度看都是一个整体。在一般的控制方法中,转子侧变换器的控制是考虑了双馈发电机特性的,但是割断了网侧变换器和转子侧变换器之间的联系,从而难以达到理想的系统性能或者是需要一些特定的条件如大容量的电解电容才能满足系统要求^[8~10]。负载前馈控制^[9]或联合控制方法^[10],从网侧变换器和转子侧变换器的关联特性出发来实现控制,加入了电流前馈或功率前馈控制来提高双馈风力发电机的动态响应,并没有真正意义上从整体的观点来实现协调控制,从而难以达到良好的控制特性。由于风能是一种剧烈变化的随机性很强的可再生能源,整个系统的静态稳定性和动态调节速度对风电系统的运行特性至关重要,所以将网侧变换器,转子侧变换器,电网以及双馈发电机内部运行机制有机的结合起来,从系统集成的角度来建立其数学模型,运用非线性控制方法来实现高性能,高容错的控制是非常必要的。

本文基于非线性控制理论从系统集成的角度对双馈风力发电系统的构成及相关的控制技术进行了研究。首先从整体出发、以系统的眼光将网侧变换器,转子侧变换器,电网以及双馈发电机内部运行机制有机地结合起来,从电力电子装置与电机系统集成角度建立了变速恒频双馈风力发电系统的统一数学模型;然后利用逆系统理论将双馈风力发电系统进行精确线性化,提出了双馈风力发电系统的逆系统内模控制策略,实现了对双馈发电系统的高性能解耦控制。

2 双馈风力发电系统的统一数学模型(Unified model of DFIG system)

双馈风力发电系统主要由双馈发电机和采用背靠背联接的双PWM变换器组成,在网侧变换器和电网之间有一个滤波器,一般由L滤波器(或LCL滤波器)组成,用来消除由变换器引起的谐波;而同样,在转子侧变换器与双馈发电机转子中间也有一个用来消除谐波的L滤波器,其值一般很小,可以忽略不计。从动态的观点出发,定子漏感和转子漏感对电机本

身的影响是相同的,因此,将定子漏感置于转子电路,可以构成一种与Park Model不同的 T 型表示法。这种模型表示法特别适合分析对电机保持定子磁通幅值为常数的控制,这样得到双馈风力发电系统的等效电路图如图1所示。

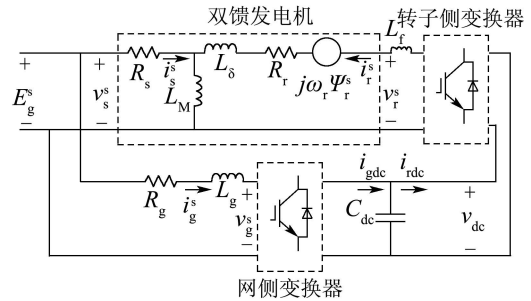


图1 变速恒频双馈风力发电系统等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit of the DFIG system

根据上面的等效电路图可以写出双馈风力发电系统在同步旋转坐标系下的统一数学模型:

$$\frac{d\Psi_s}{dt} = E_g - R_s i_s - j\omega_1 \Psi_s, \quad (1)$$

$$\frac{d\Psi_r}{dt} = S_m v_{dc} - R_r i_r - j\omega_s \Psi_r, \quad (2)$$

$$L_g \frac{di_r}{dt} = E_g - R_g i_g - j\omega_g L_g i_g - S_g v_{dc}, \quad (3)$$

$$\frac{dW_{dc}}{dt} = \frac{1}{2} \frac{dv_{dc}^2}{dt} = C_{dc} v_{dc} \frac{dv_{dc}}{dt} = P_g - P_r, \quad (4)$$

$$\frac{J}{n_p} \frac{d\omega_r}{dt} = T_e - T_L. \quad (5)$$

其中:

$$\Psi_s = L_M(i_s + i_r), \quad (6)$$

$$\Psi_r = L_\delta(i_r + L_M(i_s + i_r)), \quad (7)$$

$$T_e = 3n_p I - m[\Psi_s i_r^*], \quad (8)$$

$$P_r = 3\text{Re}[v_r i_r^*], \quad (9)$$

$$P_g = 3\text{Re}[v_g i_g^*]. \quad (10)$$

式中:下标r, s和g分别代表转子量、定子量和电网量, v 为电压矢量, i 为电流矢量, Ψ 为磁链矢量, L_g , L_r 和 L_M , 分别为电网侧滤波电感、转子电感和互感, ω_g , ω_1 , ω_s 分别为电网旋转角速度、电机同步角速度和转差角速度, 满足 $\omega_s = \omega_1 - \omega_r = s\omega_1$, 其中 ω_r 为电机转子角速度。 J 为电机转动惯量, T_L 为风力机提供的原动机转矩, T_e 电磁转矩, n_p 为电机极对数, $W_{dc} = \frac{1}{2} C_{dc} v_{dc}^2$ 为贮存在直流电容上的能量。

上面从空间矢量的概念出发,建立了双馈风力发电系统在同步旋转坐标系下的统一数学模型。可以

看出,双馈风力发电系统是一个高阶、多变量、非线性、强耦合的系统,一般的基于近似线性化的控制方法很难实现其高性能的控制,所以本文尝试使用精确线性化的方法来实现对双馈风力发电系统的控制.为方便控制策略的推导,我们根据上面的统一数学模型来建立以 d, q 轴分量形式表示的双馈风力发电系统的状态方程.选择状态变量和输入变量分别为

$$X = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6 \ x_7 \ x_8]^T = [i_{sd} \ i_{sq} \ i_{rd} \ i_{rq} \ i_{gd} \ i_{gq} \ v_{dc} \ \omega_r]^T, \quad (11)$$

$$X = [u_1 \ u_2 \ u_3 \ u_4]^T = [u_{rd} \ u_{rq} \ u_{gd} \ u_{gq}]^T. \quad (12)$$

根据(1)~(5)所表示的统一数学模型,就可以写出双馈风力发电系统的状态方程为

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} = & -\frac{L_M + L_\delta}{L_M L_\delta} R_s x_1 + \left(\frac{L_M}{L_\delta} x_8 + \omega_1\right) x_2 + \\ & \frac{1}{L_\delta} R_r x_3 + \frac{L_M + L_\delta}{L_\delta} x_4 x_8 + \\ & \frac{L_M + L_\delta}{L_M L_\delta} E_{gd} - \frac{1}{L_\delta} u_1, \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \frac{dx_2}{dt} = & -\left(\frac{L_M}{L_\delta} x_8 + \omega_1\right) x_1 - \frac{L_M + L_\delta}{L_M L_\delta} R_s x_2 + \\ & \frac{1}{L_\delta} R_r x_4 - \frac{L_M + L_\omega}{L_\omega} x_3 x_8 + \\ & \frac{L_M + L_\delta}{L_M L_\delta} E_{gq} - \frac{1}{L_\omega} u_2, \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \frac{dx_3}{dt} = & \frac{1}{L_\delta} R_s x_1 - \frac{L_M}{L_\delta} x_2 x_8 - \frac{1}{L_\delta} R_r x_3 - \\ & \left(\frac{L_M}{L_\delta} x_8 - \omega_s\right) x_4 - \frac{1}{L_\delta} E_{gd} + \frac{1}{L_\delta} u_2, \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \frac{dx_4}{dt} = & \frac{L_M}{L_\delta} x_1 x_8 + \frac{1}{L_\delta} R_s x_2 + \left(\frac{L_M}{L_\delta} x_8 - \omega_s\right) x_3 - \\ & \frac{1}{L_\delta} R_r x_4 - \frac{1}{L_\delta} E_{gq} + \frac{1}{L_\delta} u_1, \end{aligned} \quad (16)$$

$$\frac{dx_5}{dt} = -\frac{R_g}{L_g} x_5 - \frac{1}{L_g} u_3 + \frac{1}{L_g} E_{gd} + \omega_g x_6, \quad (17)$$

$$\frac{dx_6}{dt} = -\frac{R_g}{L_g} x_6 - \frac{1}{L_g} u_4 + \frac{1}{L_g} E_{gq} + \omega_g x_5, \quad (18)$$

$$\frac{dx_7}{dt} = -\frac{1}{C_{dc} x_7} (u_3 x_6 + u_4 x_5) - \frac{i_{rdc}}{C_{dc}}, \quad (19)$$

$$\frac{dx_8}{dt} = -\frac{n_p}{J} (T_e - T_L). \quad (20)$$

对于风电场来说,总是希望在一定的风速条件下发出最多的电能来提高经济效益,而对于电力系统运营部门来说则要求接入电网的风力发电系统能够

对电网的安全和稳定提供支持,显然双馈风力发电系统的控制目标就是控制双馈发电机的有功功率和无功功率,即在最大程度利用风能的同时维持电网的稳定,优化其功率因数.而要使得整个双馈风力发电系统稳定地工作,其前提是在单位功率因数下保持双PWM变换器的直流侧电压恒定,所以直流侧电压 v_{dc} , i_{gq} 为双馈风力发电系统的另外两个输出量.于是可以写出双馈风力发电系统的输出方程为

$$\begin{aligned} X = [y_1 \ y_2 \ y_3 \ y_4]^T = \\ [h_1(x) \ h_2(x) \ h_3(x) \ h_4(x)]^T = \\ [P_s \ Q_s \ v_{dc} \ i_{gq}]^T. \end{aligned} \quad (21)$$

3 双馈风力发电系统的精确线性化解耦控制(Exact linearization decoupled control for DFIG system)

3.1 双馈风力发电系统的逆系统(The inverse system of DFIG system)

逆系统方法的实质还是应用反馈线性化方法来实现多变量、非线性、强耦合系统的精确线性化解耦,适合于分析和设计非线性系统,尤其对于多输入多输出的非线性系统,下面将对双馈风力发电系统应用逆系统理论来实现其高性能的控制.要实现双馈风力发电系统的逆系统非线性控制,首先要求出其 α 阶积分逆系统.根据逆系统求解方法^[15,16],首先对输出方程进行 α 阶求导变换,构成新的方程如下:

$$\begin{cases} y_1^{(\alpha_1)} = h_1(x, u), \\ \vdots \\ y_r^{(\alpha_r)} = h_r(x, u). \end{cases} \quad (22)$$

其中 $\alpha_i (1 \leq i \leq r)$ 的数值按下式定义:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial u} [f^k g_i] = 0, \quad k = 0, 1, 2, \dots, \alpha_i - 1, \\ \frac{\partial}{\partial u} [f^k g_i] \neq 0, \quad k = \alpha_i. \end{cases} \quad (23)$$

式中:

$$f g_i = \left[\frac{\partial}{\partial u^T} g_i \right] f, \quad f^k g_i = f(f^{(k-1)} g_i).$$

当 $k = 0$ 时, $f^0 g_i = g_i$.

按照上述方法可以计算出 $i = 4$,

$$\alpha = [\alpha_1 \ \alpha_2 \ \alpha_3 \ \alpha_4] = [1 \ 1 \ 2 \ 1],$$

满足 $1 \leq i \leq 8$, $\alpha_i \leq \infty$, 由逆系统理论可知,双馈风力发电系统是一可逆的系统,同时可以求解出双馈

风力发电系统的 α 阶积分逆系统为

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{L_M + L_\delta}{L_M} R_s x_1 + L_\delta \left(\frac{L_M}{L_\delta} x_8 + \omega_1 \right) x_2 + \\ R_r x_3 + (L_M + L_\delta) x_4 x_8 + \frac{L_M + L_\delta}{L_M} v_{sd} \\ - L_\delta \left(\frac{L_M}{L_\delta} x_8 + \omega_1 \right) x_1 - \frac{L_M + L_\delta}{L_M} R_s x_2 - \\ (L_M + L_\delta) x_3 x_8 + R_r x_4 + \frac{L_M + L_\delta}{L_M} v_{sq} \\ \frac{2i_L}{3x_5} + \frac{x_6^2}{x_5 x_7} + \omega L_g \frac{x_6}{x_7} - \frac{x_6}{x_5 x_7} e_q \\ - \frac{1}{x_7} R_g x_6 - \omega L_g \frac{x_5}{x_7} + \frac{1}{x_7} e_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -L_\delta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -L_\delta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -L_g \frac{C_{dc} x_7}{E_g q} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -L_g \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \varphi_3 \\ \varphi_4 \end{bmatrix}. \quad (24)$$

将式(24)表示的 α 阶积分逆系统串联到原系统之前, 得到一个组合系统, 这个组合系统具有线性传递函数关系, 而且是精确解耦的, 通常称之为伪线性系统, 其传递关系可表示为

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{s} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{s} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{s^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \varphi_3 \\ \varphi_4 \end{bmatrix}. \quad (25)$$

这时系统的输入 U 和输出 Y 被分解为4个没有耦合关系的子系统, 可以作为4个单变量线性系统来进行控制器的设计。

3.2 双馈风力发电系统的逆系统内模控制(The internal model control of DFIG based on inverse system method)

由于建模误差, 参数漂移以及外部干扰等不确定因素的影响, 可能导致直接使用逆系统方法实现的控制器鲁棒性和抗干扰能力较差。内模控制是模型预测控制(MPC)的一种, 具有较好的鲁棒性^[15], 所以为了提高系统的鲁棒性以及动态响应特性, 我们对前面得到的逆系统与被控对象复合成的伪线性系统采用内模控制方法来进行综合, 以期获得更高的控制性能。取系统内部模型为

$$\hat{G}(s) = \begin{bmatrix} \frac{1}{s} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{s} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{s^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{s} \end{bmatrix}. \quad (26)$$

由于 $\hat{G}(s)$ 为稳定传递函数, 且完全可逆, 故内模控制器 $G_c(s)$ 可取为

$$G_c(s) = F(s)G(s)^{-1}. \quad (27)$$

为了减小内模控制系统对建模误差的敏感性, 提高双馈风力发电系统闭环系统的鲁棒稳定性, 引入了一个低通滤波器 $F(s)$, 滤波器 $F(s)$ 要使 $G_c(s)$ 正则即物理上可实现, 在这里我们使用一型滤波器即

$$F(s) = \text{diag}\{f_1(s), f_2(s), f_3(s), f_4(s)\} = \text{diag}\left\{\frac{1}{T_{s1}s + 1}, \frac{1}{T_{s2}s + 1}, \frac{1}{T_{s3}s + 1}, \frac{1}{T_{s4}s + 1}\right\}. \quad (28)$$

其中 $T_{s1}, T_{s2}, T_{s3}, T_{s4}$ 分别为各变量系统的闭环时间常数。基于逆系统方法的内模控制器结构简单, 通过调节滤波器参数或改变滤波器的结构, 以满足系统性能要求。

综合以上分析可得出双馈风力发电系统的逆系统内模控制规律, 整个控制系统的结构如图2所示, 其中系统的输入为 u , 输出为 y , r 为系统的参考输入, d 为外界干扰。由于系统中一些寄生参数的存在以及电路参数会发生变化, 会导致被控制量也会有所偏差, 为了达到良好的跟踪特性并增强系统的鲁棒性, 可以使用一个PI调节器来控制有功电流和无功电流的给定值。

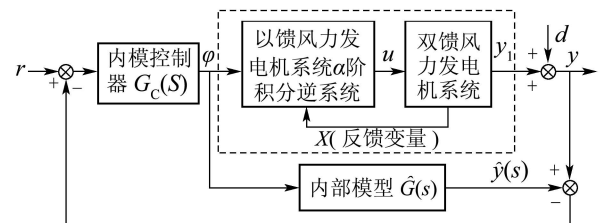


图2 双馈风力发电系统的逆系统内模控制示意图

Fig. 2 Control scheme of DFIG system

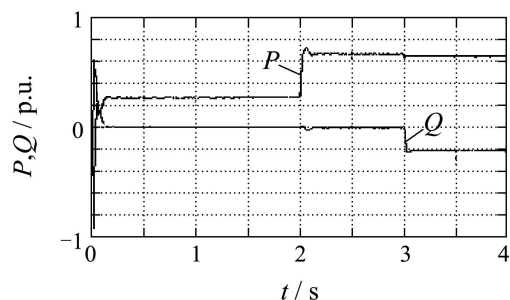
4 仿真和实验(Simulation and experiment)

4.1 仿真结果(Simulation Result)

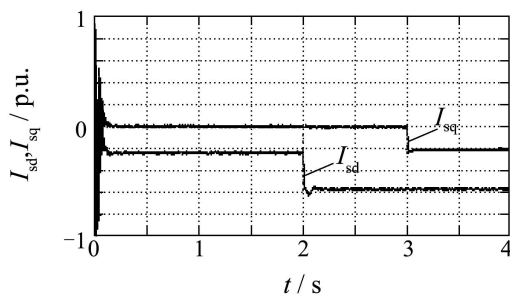
为了验证上面提出的控制策略的有效性, 在MATLAB/SIMULINK平台下进行了控制系统的仿真, 仿真参数如下: 定子电阻 $R_s = 0.0071$ p.u., 定子电感 $L_s = 0.171$ p.u., 定转子互感 $L_m = 2.9$ p.u., 转子电阻 $R_r = 0.005$ p.u., 转子电感 $L_r = 0.156$ p.u., 功率 $P = 1.5$ MW, 定子电压 $v_s = 690$ V, 电机极对数 $p = 3$, 变换器进线电阻 $R_g = 0.003$ p.u., 进线电抗 $L_G = 0.3$ p.u., 直流侧电容 $C = 0.06$ F, 直

流侧电压 $v_{dc} = 1200$ V.

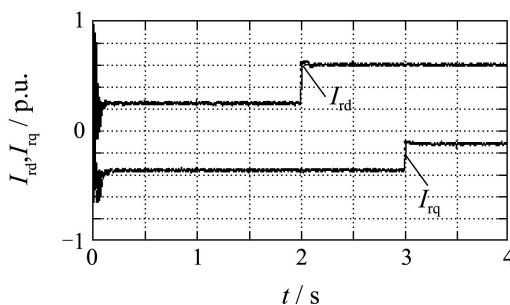
图3表示了双馈风力发电系统在逆系统内模控制策略下,有功功率在2 s时由0.25 p.u.阶跃至0.75 p.u.时以及无功功率在3 s由0阶跃至-0.2 p.u.时的仿真结果.从仿真结果可以看到,当有功功率和无功功率给定值发生阶跃变化时,系统的输出功率可以很快地跟踪上而且超调小,响应速度快,具有十分良好的动态特性和稳态特性,而且在调节过程中两者相互无影响,解耦性能良好.



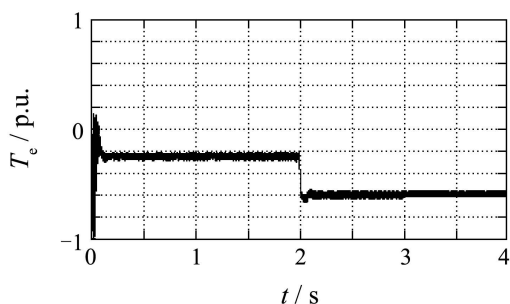
(a) 有功功率和无功功率



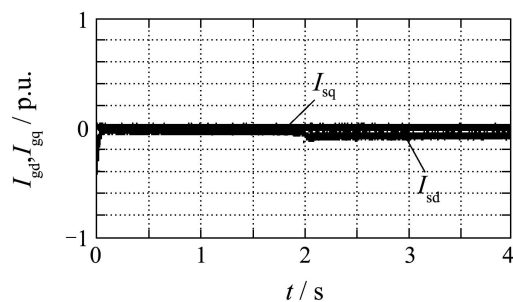
(b) 定子电流



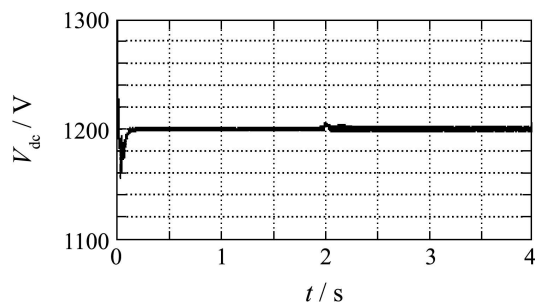
(c) 转子电流



(d) 电磁转矩



(e) 网侧电流

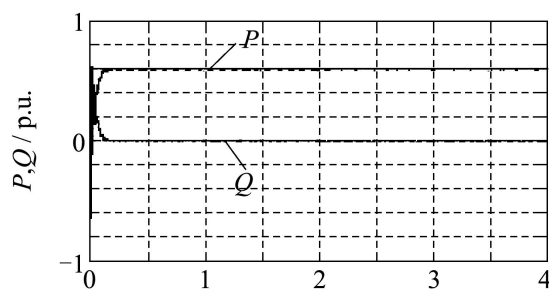


(f) 直流电压

图3 有功功率和无功功率调节过程仿真

Fig. 3 Simulation result of variable active and reactive power

图4表示的是在本文提出的控制策略下,当风速在2 s时从12 m/s变到6 m/s,而有功功率给定值保持不变时双馈风力发电系统的有功功率,无功功率以及直流母线电压的仿真波形.图5表示的是在同等条件下使用传统的以定子磁链定向的矢量控制方法^[5]时的仿真波形.可以看到,在风速突变时,直流母线电压波动很大,而且恢复时间较长,这是由于以定子磁链定向的矢量控制方法是在忽略定子电阻等的基础上采取近似线性化的方法,所以其解耦控制仅仅能满足静态控制的需要,在动态过程中并不总是能够获得预期的效果.而在本文提出的控制策略下直流侧电压的波动就非常小,恢复时间也相当短.这就意味着双馈风力发电系统在基于统一模型基础上的逆系统内模控制策略可以使直流母线的滤波储能电容大大减小,从而可以降低整个装置的体积、重量和成本,同时提高整个系统的可靠性.



(a) 有功功率和无功功率

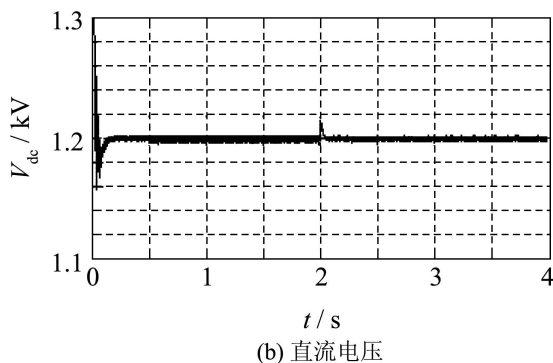


图4 非线性控制策略下系统的抗扰性仿真

Fig. 4 Simulation result of novel control strategy

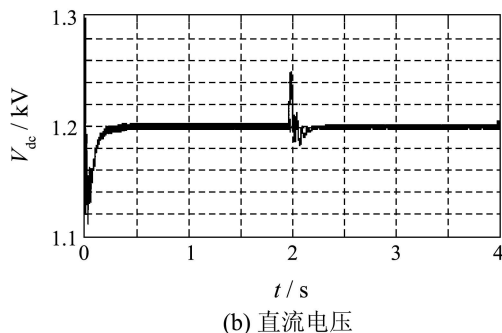
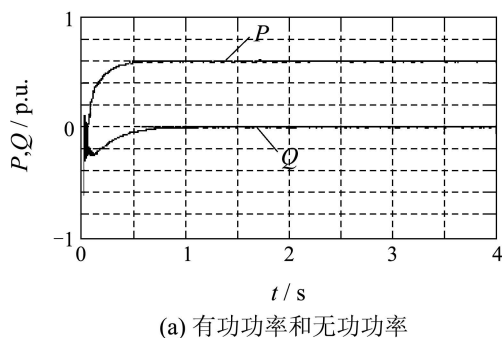


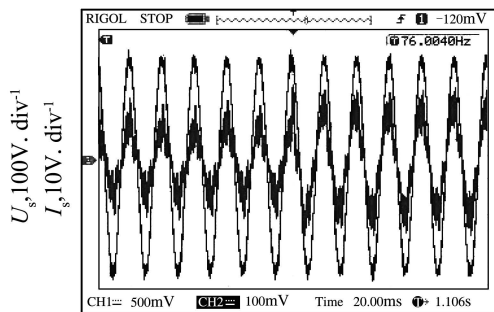
图5 传统控制策略下系统的抗扰性仿真

Fig. 5 Simulation result of traditional control strategy

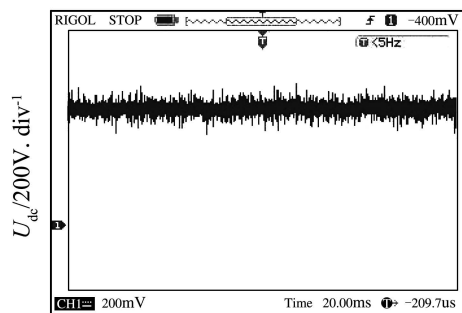
4.2 实验结果(Experimental result)

为了验证本文提出的双馈风力发电机控制策略的有效性, 在一套160 kW的变速恒频双馈风力发电系统实验平台上进行了实验研究. 该实验平台由一台160 kW的绕线式异步感应电动机及一个背靠背联接的双PWM变换器构成, 原动机转矩由一台160 kW的直流电动机及其控制系统构成的风力机模拟系统提供, 控制核心采用dSPACE1005半原型实物仿真系统. 图6表示了双馈风力发电机有功功率的动态调节过程. 双馈风力发电机的输出有功功率给定值从20 kW阶跃变化至30 kW, 而无功功率保持为0时的动态响应特性. 由图中可以看出, 在有功功率给定值变化时, 双馈风力发电机定子电流幅值增加, 而相位不发生变化, 即有功功率不会影响无功

功率的变化, 完全实现了双馈风力发电机的有功功率和无功功率的解耦控制. 从图中还可以看出在功率给定值阶跃变化时, 双馈风力发电机的输出功率的响应时间非常快, 在1个周波内就可以跟踪上设定值, 超调量很小; 而直流母线电压在功率变化时基本上没有变化, 以上结果都表明系统具有良好的稳态特性和动态响应能力.



(a) 定子电压与电流



(b) 直流电压

图6 有功功率变化时的实验结果

Fig. 6 Experimental result of variable active power

5 结论(Conclusion)

目前双馈风力发电系统的控制均是采用近似线性化的分离控制技术, 忽略了双馈发电机、网侧变换器和转子侧变换器的内在联系以及它们的非线性本质, 从而无法获得高性能的控制. 本文针对这一缺点, 从整体出发、以系统的眼光将网侧变换器、转子侧变换器、电网以及双馈发电机内部运行机制有机的结合起来, 从电力电子装置与电机系统集成的角度来建立了双馈风力发电系统的统一模型.

基于所得到的统一模型, 从一般非线性系统的相对阶的定义出发, 使用非线性逆系统控制理论将双馈风力发电系统进行精确线性化解耦. 为了提高系统的鲁棒性, 引入了内模控制方法来对精确线性化解耦后的伪线性系统进行综合, 实现了双馈发电系统的高性能解耦控制. 该控制策略不仅加快了系统的响应速度, 提高了系统的抗扰能力, 保证了系统的全局稳定性, 而且可以减小所需的直流滤波储能电

容,降低装置的重量、体积和成本,提高整个系统的可靠性。

参考文献(References):

- [1] ACKERMANN T, SODER L. An overview of wind energy-status[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2002, 6(1/2): 67 – 127.
- [2] 贺益康, 何鸣明, 赵仁德, 等. 双馈风力发电机交流励磁用变频电源拓扑浅析[J]. *电力系统自动化*, 2006, 30(4): 105 – 112.
(HE Yikang, HE Mingming, ZHAO Rende, et al. Analysis on the frequency converter served for the AC excitation of wind power DFIG [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2006, 30(4): 105 – 112.)
- [3] 赵仁德, 贺益康, 黄科元, 等. 变速恒频风力发电机用交流励磁电源的研究[J]. *电工技术学报*, 2004, 19(6): 1 – 6.
(ZHAO Rende, HE Yikang, HUANG Keyuan, et al. Investigation of AC excitation power supply used in VSCF wind power generator[J]. *Transactions of CES*, 2004, 19(6): 1 – 6.)
- [4] MULLANE A, LIGHTBODY G, YACAMINI R. Comparison of a cascade and feedback linearization scheme for DC link voltage control in a grid connected wind turbine[C] // *Proceedings of the 36th Universities Power Engineering Conference*. UK: IEEE, 2001, 9.
- [5] PENA R, CLARE J C, ASHER G M. Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable speed wind energy generation[J]. *IEEE Proceedings-Electric Power Applications*, 1996, 143(3): 231 – 241.
- [6] MISUTOSHI Y, OSAMU M. Active and reactive power control for doubly-fed wound rotor induction generator[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 1991, 6(4): 624 – 629.
- [7] 李辉, 杨顺昌, 廖勇. 并网双馈发电机电网电压定向励磁控制的研究[J]. *中国电机工程学报*, 2003, 23(8): 159 – 162.
(LI Hui, YANG Shunchang, LIAO Yong. Studies on excitation control of power system voltage oriented for doubly fed generators connected to an infinite bus[J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2003, 23(8): 159 – 162.)
- [8] LI D D, CHEN C. Decoupled control of speed and reactive power of doubly-fed induction generator[C] // *IEEE 2004 International Conference on Power System Technology*, Singapore: IEEE, 2004, 11.
- [9] 李晶, 宋家骅, 王伟胜. 考虑变频器特性的变速恒频双馈风力发电机组控制策略的研究与仿真[J]. *电网技术*, 2004, 28(21): 11 – 16.
(LI Jing, SONG Jiahua, WANG Weisheng. Study and dynamic simulation of control strategy for variable Speed wind turbine with doubly-fed generator considering frequency converter characteristics[J]. *Power System Technology*, 2004, 28(21): 11 – 16.)
- [10] MALESANI L, ROSSETTO L, TENTI P, et al. AC/DC/AC PWM converter with reduced energy storage in the DC link[J]. *IEEE Trans Ind Applicat*, 1995, 31(2): 287 – 292.
- [11] 王锋, 姜建国. 风力发电机用双PWM变换器的功率平衡联合控制策略研究[J]. *中国电机工程学报*, 2006, 26(22): 134 – 139.
(WANG Feng, JIANG Jianguo. Research of power-balancing combined control scheme for back to back PWM converters used in the wind generator[J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2006, 26(22): 134 – 139.)
- [12] ZHAO D Y, CHEN J Y, WANG Z J. An approximate inverse system control based active DC filter applied in HVDC[C] // *35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference*. Germany: IEEE, 2004: 765 – 770.
- [13] WU R, DEWAN S B, SLEMON G R. Analysis of an ac-to-dc voltage source converter using PWM with phase and amplitude control[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1991, 27(2): 355 – 364.
- [14] TZANN SHIN L. Input-output linearization and zero-dynamics control of three-phase AC/DC voltage-source converters[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2003, 18(5): 11 – 22.
- [15] 李春文, 冯元锐. 多变量非线性控制的逆系统方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 1991.
(LI Chunwen, FENG Yuankun. *The Inverse System Method for Multi-variable Nonlinear Control*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1991.)
- [16] 陈庆伟, 吕朝霞, 胡维礼, 等. 基于逆系统方法的非线性内模控制[J]. *自动化学报*, 2002, 28(5): 715 – 721.
(CHEN Qingwei, LV Zhaoxia, HU Weili, et al. Nonlinear internal model control based on inverse system method[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2002, 28(5): 715 – 721.)

作者简介:

郭家虎 (1974—), 男, 博士, 副教授, 目前研究方向为电力电子与电力传动以及新能源发电, E-mail: hn_gjh@163.com;

蔡旭 (1964—), 男, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为配电网安全、新能源发电等, E-mail: xucai@sjtu.edu.cn;

龚幼民 (1939—), 男, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为电力电子与电力传动, E-mail: 360@china.com.