

# 基于逆系统方法的双馈风力发电系统内模控制

刘波, 张玉财, 阎晓坤

(东北电力大学 自动化工程学院, 吉林省 吉林市 132012)

## Internal Model Control of Doubly Fed Induction Generators Based on Inverse System Method

LIU Bo, ZHANG Yucui, YAN Xiaokun

(School of Automation Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, Jilin Province, China)

**ABSTRACT:** In allusion to the defects of unsatisfactory dynamic performance and weak anti-interference ability existing in approximate linearization-based separation control method being adopted in doubly-fed wind power generation system, from the viewpoints of power electronic device and electrical motor system integration a unified model of doubly-fed wind power generation system is built and by use of the principle of inverse system the doubly-fed wind power generation system is accurately linearized and synthesized by internal model control (IMC) theory, and then an inverse system internal model control strategy for doubly-fed wind power generation system is proposed to implement nonlinear decoupling control of doubly-fed wind power generation system. Simulation results show that the proposed control strategy not only can enhance the robustness of control system, but also improve response speed of doubly-fed wind power generation system, thus the proposed control strategy makes doubly-fed wind power generation system possessing satisfactory steady state behavior and dynamic performance.

**KEY WORDS:** doubly-fed wind power generation system; unified model; inverse system; internal model control; nonlinear control

**摘要:** 针对双馈风力发电系统采用的基于近似线性化模型的分离控制方法存在系统动态性能差、抗扰能力弱等缺点,从电力电子装置与电机系统集成的角度,建立了双馈风力发电系统的统一模型,应用逆系统原理将双馈风力发电系统进行精确线性化,运用内模控制理论对其进行综合,提出了双馈风力发电系统的逆系统内模控制策略,实现了系统的非线性解耦控制。仿真结果表明,该控制策略不仅提高了系统的鲁棒性,还加快了系统的响应速度,使系统具有良好的稳态和动态性能。

**关键词:** 双馈风力发电系统; 统一模型; 逆系统; 内模控制; 非线性控制

基金项目: 吉林省教育厅“十一五”科学技术研究项目资助(2009102)。

## 0 引言

目前双馈风力发电系统采用的是分离控制技术,通常的控制策略是将双脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)变换器分成网侧变换器和转子侧变换器分别进行控制,二者之间采用大容量电解电容来进行解耦<sup>[1-2]</sup>。未考虑双馈发电机、网侧变换器以及转子侧变换器之间的关联。大多数双馈发电系统都是在同步旋转坐标系下建立了电机数学模型后,找到其稳态情况下有功和无功的解耦模型,通过常规的比例积分(proportion integration, PI)调节来实现对双馈发电机的矢量控制,进行有功和无功的独立调节<sup>[3-4]</sup>。这种控制策略是在系统稳定点附近来设计控制器,当参数发生变化或者扰动较大时,会使系统的极点发生漂移,引起系统不稳定<sup>[5-6]</sup>,这也是利用线性控制理论来解决双馈发电机这样一个非线性系统的必然结果。这种控制策略仅仅能满足静态控制的需要,而在动态过程中无法获得高性能控制。

本文基于非线性控制理论,从系统集成的角度将网侧变换器、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,建立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<sup>[7-8]</sup>,提出双馈风力发电系统的逆系统内模控制策略,实现对双馈发电系统的高性能解耦控制。

## 1 双馈发电系统的统一模型

双馈风力发电系统主要由双馈发电机和双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 $L$ 滤波器组成,用来消除由变换器引起的谐波;而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<sup>[9-10]</sup>。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, 构成一种与静态模型不同的  $T$  型模型表示法<sup>[11-12]</sup>, 这样就得到双馈风力发电系统的等效电路如图 1 所示。

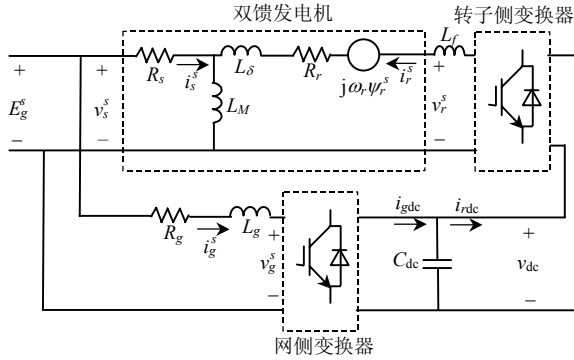


图 1 变速恒频双馈风力发电系统等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit of the DFIG system

根据等效电路, 通过对各个部分的建模, 综合可得双馈风力发电系统在同步旋转坐标系下的统一数学模型为

$$\begin{cases} E_{gd} = R_s i_{sd} + d\psi_{sd} / dt - \omega_1 \psi_{sq} \\ E_{gq} = R_s i_{sq} + d\psi_{sq} / dt + \omega_1 \psi_{sd} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} v_{rd} = S_{md} v_{dc} = R_r i_{rd} + d\psi_{rd} / dt - (\omega_1 - \omega_r) \psi_{rq} \\ v_{dq} = S_{mq} v_{dc} = R_r i_{rq} + d\psi_{rq} / dt + (\omega_1 - \omega_r) \psi_{rd} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} v_{gd} = S_{gd} v_{dc} = E_{gd} - R_g i_{gd} - L_g di_{gd} / dt + \omega_1 i_{gq} \\ v_{gq} = S_{g1} v_{dc} = E_{gq} - R_g i_{gq} - L_g di_{gq} / dt - \omega_1 i_{gd} \end{cases} \quad (3)$$

$$\frac{1}{2} C_{dc} \frac{d}{dt} v_{dc}^2 = P_g - P_r = (v_{gq} i_{gq} + v_{gd} i_{gd}) - v_{dc} i_{rdc} \quad (4)$$

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

$$T_e = n_p \operatorname{Im}[\psi_m \dot{i}_r] = n_p \operatorname{Im}[\psi_r \dot{i}_r] = n_p \operatorname{Im}[\psi_s \dot{i}_r] \quad (6)$$

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;  $i$  为电流;  $\psi$  为磁链;  $v_{dc}$  表示变速恒频双馈风力发电系统等效电路中直流侧电压;  $L_g$  为电网侧滤波电感;  $\omega_1, \omega_r$  分别为电机同步角速度和电机转子角速度;  $J$  为电机转动惯量;  $T_L$  为风力机提供的原动机转矩;  $T_e$  为电磁转矩;  $n_p$  为电机极对数;  $\psi_m$  为定子与转子的互感磁链。

## 2 双馈发电系统的逆系统内模控制

逆系统方法的基本思想是: 对于给定的系统, 先用对象的模型生成一种可用反馈方法实现的原系统的“ $\alpha$  积分逆系统”, 并将对象补偿成为具有线性传递关系且已解耦的规范化系统(称为伪线性系统), 再用线性系统的各种设计理论来完成伪线性系统的综合。其实质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<sup>[13]</sup>。

内模控制属于模型预测控制的一种。其原理是在控制系统中引入内部模型, 将反馈量变为扰动估计量的反馈<sup>[14]</sup>。

根据双馈风力发电系统的结构、运行状态以及统一的数学模型, 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如式(7)和式(8)所示, 则可以写出双馈风力发电系统的状态方程如式(9)所示。

$$u = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6 \ x_7 \ x_8]^T = [i_{sd} \ i_{sq} \ i_{rd} \ i_{rq} \ i_{gd} \ i_{gq} \ v_{dc} \ \omega_r]^T \quad (7)$$

$$u = [u_1 \ u_2 \ u_3 \ u_4]^T = [u_{rd} \ u_{rq} \ v_{gd} \ v_{gq}]^T \quad (8)$$

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = \frac{1}{L_m^2 - L_s L_r} [R_s L_r x_1 - (\omega_1 L_s L_r - \omega_s L_m^2) x_2 - R_r L_m x_3 - \omega_r L_m L_r x_4 - L_r E_{gd} + L_m u_1] \\ \frac{dx_2}{dt} = \frac{1}{L_m^2 - L_s L_r} [(\omega_1 L_s L_r - \omega_s L_m^2) x_1 + R_s L_r x_2 + \omega_r L_m L_r x_3 - R_r L_m x_4 - L_r E_{gq} + L_m u_2] \\ \frac{dx_3}{dt} = \frac{1}{L_m^2 - L_s L_r} [-R_s L_m x_1 + \omega_r L_m L_s x_2 + R_r L_s x_3 + (\omega_1 L_m^2 - \omega_s L_s L_r) x_4 + L_m E_{gd} - L_s u_1] \\ \frac{dx_4}{dt} = \frac{1}{L_m^2 - L_s L_r} [-\omega_r L_m L_s x_1 - R_s L_m x_2 - (\omega_1 L_m^2 - \omega_s L_s L_r) x_3 + R_r L_s x_4 + L_m E_{gq} - L_s u_2] \\ \frac{dx_5}{dt} = -\frac{R_g}{L_g} x_5 - \frac{1}{L_g} u_3 + \frac{1}{L_g} E_{gd} + \omega x_6 \\ \frac{dx_6}{dt} = -\frac{R_g}{L_g} x_6 - \frac{1}{L_g} u_4 + \frac{1}{L_g} E_{gq} - \omega x_5 \\ \frac{dx_7}{dt} = \frac{1}{C_{dc} x_7} (u_3 x_6 + u_4 x_5) - \frac{i_{rdc}}{C_{dc}} \\ \frac{dx_8}{dt} = \frac{n_p}{j} (T_e - T_L) \end{cases} \quad (9)$$

为使双馈风力发电系统发出最大的有功功率，选择有功功率作为其中一个被控制量，对于接入电网的双馈风力发电系统，要求它能够维持电网的安全稳定，所以第二个输出量为无功功率<sup>[14]</sup>。要使得整个双馈风力发电系统稳定地工作，直流侧电压  $v_{dc}$ 、 $i_{gq}$  作为双馈风力发电系统的另外 2 个输出量<sup>[14-15]</sup>。于是可以写出输出方程为

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s L_r}{L_m} x_1 + \frac{\omega_1 L_s L_r - \omega_s L_m^2}{L_m} x_2 + R_r x_3 + \omega_r L_r x_4 + \frac{L_r}{L_m} u_{sd} \\ -\frac{\omega_1 L_s L_r - \omega_s L_m^2}{L_m} x_1 - \frac{R_s L_r}{L_m} x_2 - \omega_r L_r x_3 + R_r x_4 + \frac{L_r}{L_m} u_{sq} \\ -R_g x_5 + E_{gd} + \omega L_g x_6 - L_g \frac{E_{gd} x_5^2}{C_{dc} x_7^2} + L_g \frac{i_{rdc} x_5}{C_{dc} x_7} - L_g \frac{i_{rdc}^* x_7}{E_{gd}} \\ -R_g x_6 + E_{gd} + \omega L_g x_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{L_m^2 - L_s L_r}{L_m E_{gd}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{L_m^2 - L_s L_r}{L_m E_{gd}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -L_g \frac{C_{dc} x_7}{E_{gd}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -L_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \varphi_3 \\ \varphi_4 \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中  $\varphi = [\varphi_1 \ \varphi_2 \ \varphi_3 \ \varphi_4]^T = [\dot{y}_1 \ \dot{y}_2 \ \dot{y}_3 \ \dot{y}_4]^T$ 。

将式(11)表示的  $\alpha$  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，如图 2 所示。上面双馈风力发电系统的伪线系统的传递关系可表示为

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{s} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{s} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{s^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \varphi_3 \\ \varphi_4 \end{bmatrix} \quad (12)$$

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<sup>[16]</sup>。

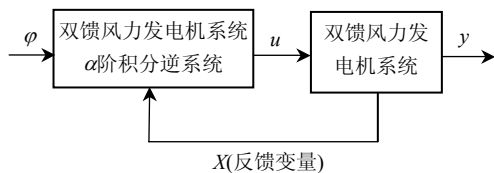


图 2 双馈风力发电系统的伪线性系统示意图

Fig. 2 Pseudo linear of the DFIG system

为了提高系统的鲁棒性以及动态响应特性，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<sup>[16-17]</sup>，取系统内部模型为式(13)。由于  $\hat{G}(s)$  为稳定传递函数，且完全可逆，故内模控制器  $G_c(s)$  可取为式(14)<sup>[18]</sup>。

$$\begin{cases} y_1 = P_s = u_{sd} i_{sd} + u_{sq} i_{sq} = u_{sd} x_1 + u_{sq} x_2 \\ y_2 = Q_s = u_{sq} i_{sd} - u_{sd} i_{sq} = u_{sq} x_1 + u_{sd} x_2 \\ y_3 = x_7 = v_{dc} \\ y_4 = x_6 = i_{gq} \end{cases} \quad (10)$$

对输出方程进行  $\alpha$  阶求导变换，可证明该系统可逆，同时可求出系统的  $\alpha$  阶积分逆系统为

$$\hat{G}(s) = \begin{bmatrix} \frac{1}{s} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{s} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{s^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{s} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$G_c(s) = F(s) \hat{G}(s)^{-1} \quad (14)$$

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  $F(s)$ <sup>[18-19]</sup>。

1) 当  $F(s)$  取一型滤波器时， $F(s) = \frac{1}{(T_f s + 1)^n}$ ，

则闭环系统的误差为

$$E(s) = \frac{(T_f s + 1)^n - 1}{(T_f s + 1)^n + G_m(s)} R(s) \quad (15)$$

设  $\lim_{s \rightarrow 0} G_m(s) = C$  (常数)，则当输入分别为阶跃和斜坡信号时，系统的稳态误差为

$$\begin{cases} e_1(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{(T_f s + 1)^n - 1}{(T_f s + 1)^n + G_m(s)} \frac{r_0}{s} = 0 \\ e_2(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{(T_f s + 1)^n - 1}{(T_f s + 1)^n + G_m(s)} \frac{r_0}{s^2} = \frac{n T_f r_0}{1 + C} \\ (\frac{n T_f r_0}{1 + C} \text{为常数}) \end{cases}$$

2) 当  $F(s)$  取二型滤波器时， $F(s) = \frac{n T_f s + 1}{(T_f s + 1)^n}$ ，

同理可推得系统在阶跃、斜坡及加速度信号的作用下，系统的稳态误差分别为

$$\begin{cases} e(\infty) = 0, R(s) = \frac{r_0}{s} \text{ 或 } R(s) = \frac{r_0}{s^2} \\ e(\infty) = \frac{n(n-1)T_f^2 r_0}{2(1+C)} = (\text{常数}), R(s) = \frac{r_0}{s^3} \end{cases}$$

同理可推得系统对扰动的抑制能力，因此，对伪线性系统引入内模控制结构，采用一型滤波器可无静差跟踪阶跃信号，并可完全抑制恒值扰动；采用二型滤波器可无静差跟踪阶跃和斜坡信号，并可完全抑制阶跃和斜坡扰动。

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3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。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<sup>[20-21]</sup>。

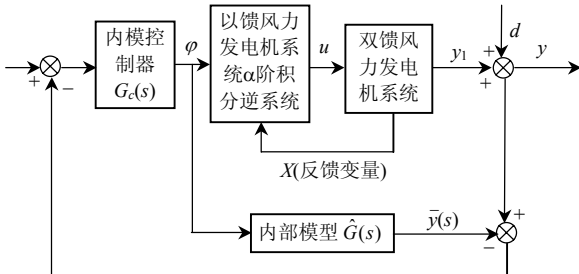


图3 双馈风力发电系统的逆系统内模控制示意图  
Fig. 3 Control scheme of DFIG system

### 3 仿真及结果

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。取一型滤波器，跟踪阶跃  $r(t) = 0.1$  和  $r(t) = 0.1t$ ，结果如图4所示。

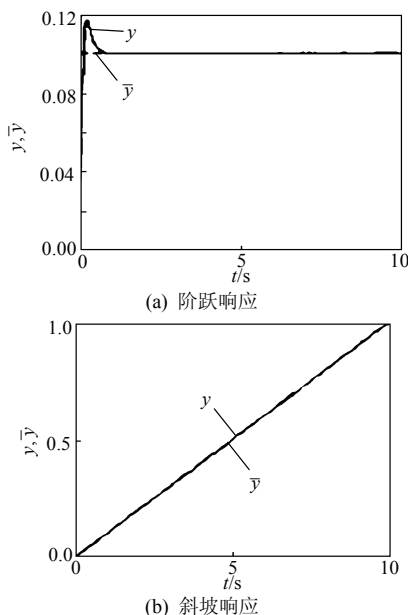


图4 系统的阶跃响应和斜坡响应

Fig. 4 The system's step response and ramp response

图5给出了在本文提出的控制策略下，当风速在2s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和无功功率的仿真波形。

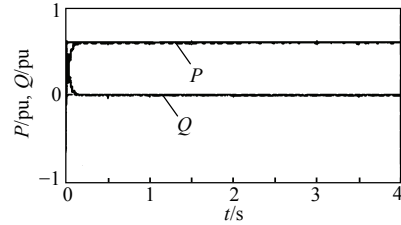


图5 非线性控制策略下的抗扰性仿真  
Fig. 5 Simulation result of novel control strategy

图6给出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2s时由0.25 pu 阶跃至0.75 pu 时以及无功功率在3s由0阶跃至-0.2 pu 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和稳态特性，而且在调节过程中二者相互无影响，解耦性能良好。

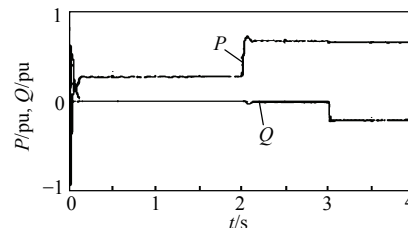


图6 有功功率和无功功率调节过程  
Fig. 6 Simulation result of variable active and reactive power

### 4 结论

1) 本文在充分考虑双馈风力发电系统内部运行机制的动态统一数学模型的基础上，使用逆系统控制理论，将其作为一个整体，进行精确线性化解耦，如此来实现对双馈发电系统的高性能解耦控制，保证了系统在大范围内稳定。

2) 本文提出的逆系统内模控制策略能够使系统可渐近无差跟踪阶跃和斜坡信号，实现了双馈风力发电系统的有功功率和无功功率的解耦控制，该控制策略不仅加快了系统的响应速度，还提高了系统的抗干扰能力，保证了系统的全局稳定性，使系统具有良好的稳态和动态性能。

### 参考文献

[1] 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(in Chinese).
- [2] 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(in Chinese).
- [3] 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.
- [4] 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(in Chinese).
- [5] 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(in Chinese).
- [6] Lid 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.
- [7] 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(in Chinese).
- [8] 李春文, 冯元锷. 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: 97-107.
- [9] 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.
- [10] 李晶, 李建林, 许洪华. 基于配电网无功优化的变速恒频双馈风电机组控制策略[J]. 电网技术, 2006, 30(15): 59-64.  
Li Jing, Li Jianlin, Xu Honghua. A control strategy of doubly-fed variable speed wind turbines based on reactive power optimization of distribution systems[J]. Power System Technology, 2006, 30(15): 59-64(in Chinese).
- [11] 冯双磊, 赵海翔, 任普春, 等. 基于 PSCAD/EMTDC 的双馈式变速恒频风电机组动态模型仿真[J]. 电网技术, 2007, 31(17): 30-35.  
Feng Shuanglei, Zhao Haixiang, Ren Puchun, et al. PSCAD/EMTDC based simulation study on dynamic model of doubly-fed variable speed wind turbine[J]. Power System Technology, 2007, 31(17): 30-35(in Chinese).
- [12] 徐大平, 肖运启, 秦涛, 等. 变桨距型双馈风电机组并网控制及建模仿真[J]. 电网技术, 2008, 32(6): 100-105.  
Xu Daping, Xiao Yunqi, Qin Tao, et al. Cutting-in control of variable-pitch doubly-fed wind power generation system and its modeling and simulation[J]. Power System Technology, 2008, 32(6): 100-105(in Chinese).
- [13] 陈谦, 王建国, 李燕. 基于逆系统内模算法的交流励磁发电机解耦控制研究[J]. 电网与清洁能源, 2009, 25(12): 57-61.  
Chen Qian, Wang Jianming, Li Yan. Study on decoupling control of ac excited generator based on inverse system internal mode algorithm[J]. Power System and Clean Energy, 2009, 25(12): 57-61(in Chinese).
- [14] 庄圣贤, 陈永校. 基于自适应内模控制的异步电机的电流的调节[J]. 电工技术学报, 2000, 15(2): 61-65.  
Zhuang Shengxian, Chen Yongxiao. Current regulation of vector-controlled induction motors based on adaptive internal model control[J]. Transactions of CES, 2000, 15(2): 61-65(in Chinese).
- [15] 杨立永, 李华德, 王久和. 基于逆系统理论的感应电动机控制策略[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2005, 24(5): 706-708.  
Yang Liyong, Li Huade, Wang Jiuhue. Induction motor control based on inverse system theory[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2005, 24(5): 706-708(in Chinese).
- [16] 王晓兰, 吴东佶. 基于内模原理的双馈发电机功率解耦控制[J]. 电气自动化, 2008, 30(2): 6-8.  
Wang Xiaolan, Wu Dongji. The decoupling control of power of doubly-fed induction generator based on the internal model control theory[J]. Electrical Automation, 2008, 30(2): 6-8(in Chinese).
- [17] 李晶, 王伟胜, 宋家骅. 双馈感应发电机的线性化动态模型及运行特性分析[J]. 电网技术, 2004, 28(13): 13-17.  
Li Jing, Wang Weisheng, Song Jiahua. Linearized dynamic model of doubly-fed induction generator and analysis of its operating performance[J]. Power System Technology, 2004, 28(13): 13-17(in Chinese).
- [18] 张鲁华, 蔡旭, 郭家虎. 变速恒频双馈风力发电机组的非线性因素分析[J]. 电网技术, 2009, 33(19): 164-168.  
Zhang Luhua, Cai Xu, Guo Jiahu. Analysis on nonlinear factors of variable speed constant frequency doubly fed wind turbine generator system[J]. Power System Technology, 2009, 33(19): 164-168(in Chinese).
- [19] 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, Lü Zhaoxia, Hu Weili, et al. Nonlinear internal model control based on inverse system method[J]. Acta Automatic Sinica, 2002, 28(5): 715-721(in Chinese).
- [20] 任丽娜, 焦晓红, 邵立平. 双馈型变速恒频风力发电系统的鲁棒控制[J]. 控制理论与应用, 2009, 26(4): 377-382.  
Ren Lina, Jiao Xiaohong, Shao Liping. Robust control for doubly-fed induction generators (DFIG) with variable speed and constant frequency in wind power systems[J]. Control Theory & Applications, 2009, 26(4): 377-382(in Chinese).
- [21] 郭家虎, 蔡旭, 龚幼民. 双馈风力发电系统的非线性解耦控制[J]. 控制理论与应用, 2009, 26(9): 958-964.  
Guo Jiahu, Cai Xu, Gong Youming. Nonlinear control of wind power generation based on DFIG[J]. Control Theory & Applications, 2009, 26(9): 958-964(in Chinese).



刘波

收稿日期: 2010-07-12.

作者简介:

刘波(1960), 男, 自动化工程学院教授, 主要研究方向为电力电子与新能源发电, E-mail: 2006\_liuobo@sina.com.

(责任编辑 褚晓杰)