

基于自抗扰控制器的变速恒频风力发电并网控制

付旺保¹, 赵栋利², 潘磊², 许洪华³

(1. 中国科学院研究生院电工研究所, 北京市海淀区 100080; 2. 中国科学院电工研究所, 北京市海淀区 100080; 3. 北京科诺伟业科技有限公司, 北京市海淀区 100083)

Cutting-in Control of the VSCF Wind-power Generator Based on Auto-disturbance Rejection Controller

FU Wang-bao¹, ZHAO Dong-li², PAN Lei², XU Hong-hua³

(1. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Institute of Electrical Engineering, Haidian District, Beijing 100080, China; 2. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, HaiDian District, Beijing 100080, China 3. Beijing Corona Science & Technology CO., Ltd, HaiDian District, Beijing 100083, China)

ABSTRACT: By analyzing the operation behavior of an A.C. excited variable-speed constant-frequency(VSCF) wind-power generator, the field-oriented vector control technique and the auto-disturbance rejection controller(ADRC) were transplanted into the cutting-in control of the doubly-fed induction generator with no-load and a novel cutting-in control strategy was obtained. The strategy can realize cutting-in without accurate parameters of doubly-fed induction generator(DFIG) and the controller can be designed without accurate DFIG model. Extended States Observer(ESO) in ADRC can calculate the value of disturbance on line, and by compensating the disturbance the system model can be transformed into a certain series-connection integral object. The control system consists of two current controllers using ADRC and one voltage controller based on differential coefficient detection. The simulation results show that the controllers ensure very good robustness and adaptability under modeling uncertainty and external disturbance, and produce good dynamic performance.

KEY WORDS: Variable-speed constant frequency(VSCF); Doubly-fed induction generator; Field oriented vector control; Auto-disturbance rejection controller; Cutting-in

摘要:通过分析交流励磁变速恒频风力发电机组运行特点,将矢量控制技术与自抗扰控制器(ADRC)结合起来应用于双馈发电机空载并网控制上,得到了一种新型并网控制策略。该控制方案不需要精确电机参数就可以实现并网,控制

器的设计也不需要建立精确的数学模型。自抗扰控制器利用其内部的扩张状态观测器可以估计出系统的内外扰动,通过前馈补偿的方法可将系统模型等效为确定性的积分串联型对象。控制系统包括两个采用ADRC的电流控制器和一个基于“微分检测”的电压控制器。仿真表明控制器对电机模型的不确定性和外部扰动变化具有较强的鲁棒性,并网控制系统具有优良的动态性能。

关键词: 变速恒频; 双馈电机; 矢量控制; 自抗扰控制器; 并网

1 引言

目前随着化石能源的逐渐枯竭以及对环保的日益重视,迫切需要人们开发清洁的可再生能源,风力发电便是其中之一^[1]。随着电力电子技术与微控制器技术的发展,风力发电技术也从失速型发电技术发展 to 变速型发电技术。变速型发电技术相对失速型发电技术,具有能够最大限度地吸收风能,并且电气与机械之间是柔性连接等优点。变速恒频双馈风力发电是一种变速型风力发电,其电力电子变流器容量只需要额定容量的1/3,是一种新型的有前途的风力发电技术。变速恒频风力发电控制主要包括并网控制与有功无功解耦控制,机组运行首先必须进行并网控制,只有顺利地实现机组并网,才能进行后续有功无功解耦控制,因而并网控制引起了同行的重视。

变速恒频风力发电并网控制在国内外已有研究,文献[2]详细介绍了整个变速恒频风力发电电控系统,其中包括并网控制;文献[3-4]基于电机矢量

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)子项目(2003AA512022-2)。

The National High Technology Research and Development of China(863 Programme)(2003AA512022-2).

控制研究出了空载并网控制。双馈发电机是一种绕线式异步电机，具有高阶非线性强耦合的特点，直接对其进行控制难度很大，通过矢量变换可以简化电机模型，使异步电机控制变得如直流电机控制一样方便。但是发电机在运行中由于磁路饱和和将会引起电感的变化，温升将会引起电阻的变化，这给依赖电机参数的矢量控制带来了困难。同时，商业化的机组如果每台发电机都需要测量其参数并且修改控制器，这将会带来额外的成本。因而设计一种自身不需要电机参数的控制算法或者能够辨识发电机参数的控制算法变得非常必要。本文在文献[2-4]的基础上引入自抗扰控制器，设计出一种既能保留矢量控制优良的动态性能又可以摒弃矢量控制依赖电机参数的弱点的新型并网控制算法。该算法包括内环转子 d 、 q 轴电流控制，以及外环定子电压控制，电流控制采用“简化的自抗扰控制器”，定子电压控制采用“基于微分检测”的控制器。

文献[5]提出了自抗扰控制器及其应用，文献[6-9]给出了自抗扰控制器在电气工程领域应用的实例，文献[10]介绍了自抗扰控制器的参数整定方法。由于自抗扰控制器中采用了非线性函数，增加了工程实现的难度。借鉴文献[11-12]的思想，将“扩张状态观测器”中的非线性函数去掉，将“非线性组合环节”用一纯比例环节代替，去除“跟踪-微分器”，得到了“简化的自抗扰控制器”，将其应用于转子电流闭环控制。仿真表明“简化的自抗扰控制器”依然能够获得通常自抗扰控制器的优异性能。用后向差分法将上述控制算法离散化，在 matlab6.5/simulink 平台上对该算法进行了仿真，将所有涉及乘法运算的控制器参数设置成 2 的幂次，仿真结果表明该算法能够顺利实现并网并且动态响应快，无超调。

2 双馈发电机模型

在同步旋转坐标系下^[13-15]，当双馈发电机定子开路且定子磁链达到稳态时，定子电压与定子磁链的关系如式(1)所示，定子磁链与转子电流关系如式(2)所示，转子电流与转子电压之间的关系如式(3)所示^[2-4]

$$\begin{cases} u_{ds} = -w_s Y_{qs} \\ u_{qs} = w_s Y_{ds} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} Y_{ds} = L_m i_{dr} \\ Y_{qs} = L_m i_{qr} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \dot{i}_{dr} = -\frac{R_r}{L_r} i_{dr} + w_d + u_{dr} \\ \dot{i}_{qr} = -\frac{R_r}{L_r} i_{qr} + w_q + u_{qr} \end{cases} \quad (3)$$

式中 R_r 为转子绕组等效电阻； L_r 、 L_m 分别为转子绕组自感及互感； i_{dr} 、 i_{qr} 分别为 d 、 q 轴转子电流； u_{ds} 、 u_{qs} 、 u_{dr} 、 u_{qr} 分别为 d 、 q 轴定、转子电压； Y_{ds} 、 Y_{qs} 分别为 d 、 q 轴定子磁链； w_d 、 w_s 分别为同步角频率和转差角频率

$$\begin{cases} w_d = w_s i_{qr} + \frac{1-L_r}{L_r} u_{dr} \\ w_q = -w_s i_{dr} + \frac{1-L_r}{L_r} u_{qr} \end{cases}$$

由式(1)~(3)可得出转子电流矢量、定子磁链矢量与定子电压矢量之间的向量关系如图 1 所示

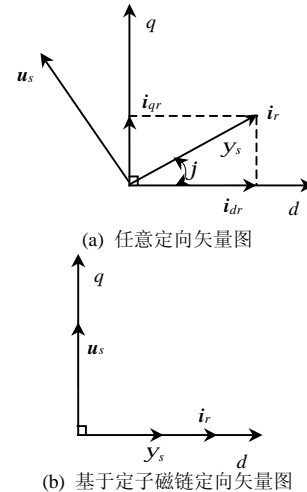


图 1 定子磁链定子电压以及转子电流矢量关系图
Fig. 1 The stator flux, voltage and rotor current vectors

并网控制要求定子电压幅值相位、频率和电网电压幅值相位、频率一致。从图 1 可以看出， u_s 与 i_r 在幅值上成比例，在相位上相差 90° ，因而控制 i_r 的幅值与相位就可以完全控制 u_s 的幅值与相位，因而并网控制的关键在于转子电流的控制。为了简化控制，将 i_{qr} 控制成 0， i_{dr} 控制成 $|i_r|$ ，也就是基于定子磁场定向。当电机磁路饱和和互感变化时，电压控制器只需要调节 i_d 大小就可以调节 $|u_s|$ 大小，从而满足并网要求。

3 双馈发电机转子励磁控制系统

双馈发电机转子励磁控制系统包括电压控制器与电流控制器，其控制目标是使定子电压幅值、相位、频率和电网电压幅值、相位、频率一致。

电流控制器采用“简化的自抗扰控制器”来实

现。该控制器在“自抗扰控制器”基础上删简了跟踪-微分器，将其中的非线性函数用线性函数代替，非线性组合环节用一比例环节代替，并将控制量加上限幅环节，其框图如图2所示。“简化的自抗扰控制器”结构简单，容易工程实现；一旦参数选定，在任何工况下都可以工作，无需变更参数；考虑了工程中限幅因素，不会因为限幅而影响控制性能；控制器不依赖对象参数，具有较强的鲁棒性^[5,11]。

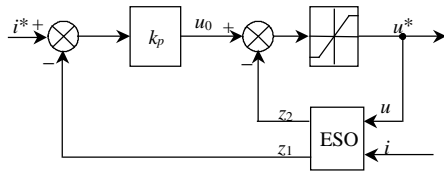


图2 电流控制器框图

Fig. 2 The current controller scheme

该控制器设计的关键在于“扩张状态观测器”(ESO)的参数选择。线性化的ESO的数学模型为^[5,11]

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = k_1(z_1 - y_1) + z_2 + u \\ \dot{z}_2 = k_2(z_1 - y_1) \end{cases} \quad (4)$$

式(3)中，设 $y_1 = i_{dr}$ ， $y_2 = -\frac{R_r}{L_r}i_{dr} + w_d$ ， $b(t) = \frac{dy_2}{dt}$ ，并且假设微小时间段内 $b(t)$ 维持不变，并且各个微小时间段 $b(t)$ 最大值为 B ，则转子电压与转子电流的关系可以写为

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = y_2 + u \\ \dot{y}_2 = B \end{cases} \quad (5)$$

将式(4)减去式(5)，并令 $\Delta y_1 = z_1 - y_1$ ， $\Delta y_2 = z_2 - y_2$ ，得出^[8]

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{y}_1 \\ \Delta \dot{y}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 & 1 \\ k_2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta y_1 \\ \Delta y_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ B \end{bmatrix} \quad (6)$$

式(6)的响应模态与其系统矩阵的特征值类型有关。当特征值为共轭复根或者两相等实根时，其响应可以写成式(7)所示形式

$$\begin{bmatrix} \Delta y_1 \\ \Delta y_2 \end{bmatrix} = e^{\text{Re}[I]t} D \begin{bmatrix} \Delta y_{10} \\ \Delta y_{20} \end{bmatrix} + B \begin{bmatrix} j_1 + j_2 e^{\text{Re}[I]t} \\ j_3 + j_4 e^{\text{Re}[I]t} \end{bmatrix} \quad (7)$$

当特征值为两不等实根时，其响应与式(7)类似，用 $c_1 e^{\text{Re}[I_1]t} + c_2 e^{\text{Re}[I_2]t}$ 替换 $e^{\text{Re}[I]t}$ 即可。对应特征值的三种不同情况，可以得出 $j_1 = \frac{1}{|I_1| |I_2|}$ ，

$$j_3 = -\frac{\text{Re}[I_1]}{|I_1|^2} - \frac{\text{Re}[I_2]}{|I_2|^2}$$

其中 I_1, I_2 为系统矩阵的特征值。从式(7)可以看出，若选择合适的参数 $k_1、k_2$ ，

使得系统矩阵特征值的实部 $\text{Re}[I] < 0$ ，并且 $Bj_1 \approx 0$ ， $Bj_3 \approx 0$ ，则 $\Delta y_1 \rightarrow 0$ ， $\Delta y_2 \rightarrow 0$ ，即 $z_1 \rightarrow y_1$ ， $z_2 \rightarrow y_2$ 。

由于特征值为两相等实根时，矩阵 D 以及 $j_2、j_4$ 中包含斜坡函数 t ，而其它情况下矩阵 D 以及 $j_2、j_4$ 中包含 t 的正余弦函数，因而该情况下 ESO 收敛速度较慢。对于特征值为共轭复根与不等实根的情况，通过仿真对比发现，若 ESO 获得相同的性能，后者的参数 $k_1、k_2$ 选择需要更大，因而特征值为共轭复根的情况性能更佳。该情况下参数选择原则： $k_1 = -2a$ ， $k_2 < -a^2$ ， $a \geq 100B$ 。

d 轴电流控制器与 q 轴电流控制器结构一致，以 d 轴电流控制器为例，若参数选择合适，“扩张状态观测器”将会较好地估计出 i_{dr} 与 $-i_{dr} \cdot R_r / L_r + w_d$ 。在图2中，系统的“内外扰动”作为前馈补偿加到了发电机输入端，可以推出电压未限幅时电流控制器的传递函数为一阶传函；当电压限幅时，最大限幅电压直接加在电机转子上，控制不起作用，此时电流与电压之间传递函数仍为一阶传函。因此电流开始以电机时间常数 L_r / R_r 上升，然后以控制器时间常数 $1/k_p$ 上升至稳态值。由于传递函数均为一阶惯性环节，因而电流控制器具有一阶系统优良的动态性能。

电压控制器框图如图3所示。它只计算 d 轴电流给定值， q 轴电流给定值直接设置成 0。由于普

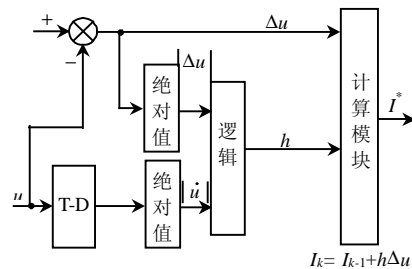


图3 电压控制器框图

Fig. 3 The voltage controller scheme

通的 PI 控制器用作电压控制时，一旦电流控制器中转子电压被限幅，积分环节仍会不停地积分，最终导致励磁电流给定过大，从而引起振荡与超调。因此电压控制器中采用“基于微分检测的控制器”替代普通的 PI 控制器，它通过观测输出信号的微分，判断电流控制器对上次“励磁电流给定”的执行情况，等到适当的时候才根据电压差值增加励磁电流给定。线性跟踪微分器(T-D)^[1,12]根据定子电压测量信号 u 估计出其微分信号 \dot{u} ，求出其绝对值，将定子电压给定信号与电机定子电压测量信号作

差，并求出其绝对值 $|\Delta u|$ 。逻辑单元判断条件“ $|\Delta u| > e_1$ 并且 $|\dot{u}| < e_2$ ”是否为真，若为真，则 $h = h_0$ ，否则 $h = 0$ 。该条件判断电流控制器动态过程是否完成以及电压偏差是否在误差限外，只有满足这两个条件，电压控制器才会动作。

电流给定计算单元根据 $i_{dr}^*(k) = i_{dr}^*(k-1) + h*(U^*(k) - U(k))$ ，计算出转子电流给定值 i_{dr}^* 。对于第一次运行的机组，将 $i_{dr}^*(0)$ 设置成零；对于运行过的机组，控制器可以获得 i_{dr} 的稳态值，直接将 $i_{dr}^*(0)$ 设置成 i_{dr} 的稳态值，电压控制器只需对转子 d 轴电流给定值进行微调。这样可以最大限度地利用系统的有效信息，改善系统的动态性能。整体控制系统框图如图4所示。

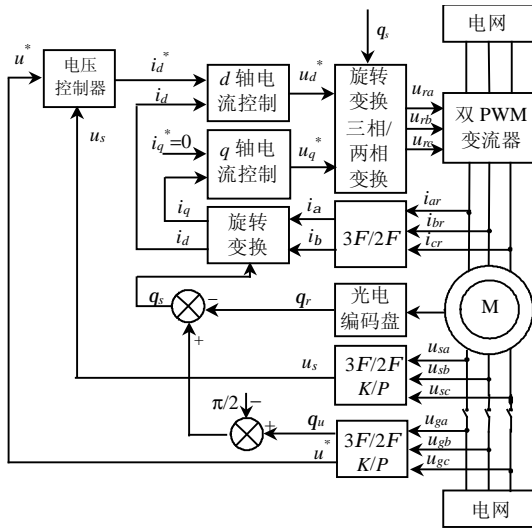
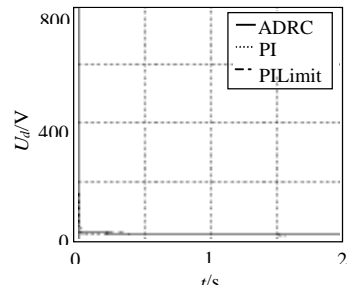


图4 整体控制系统框图
Fig. 4 The whole control system scheme

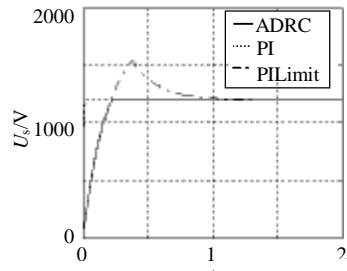
4 仿真结果

为了验证基于ADRC的并网控制算法的性能，在matlab6.5/simulink平台上进行数值仿真。首先对一台双馈发电机分别用基于ADRC并网控制算法和基于PI控制器的并网控制算法进行仿真，对比二者的仿真结果；令该电机的电阻和互感按照某一规律变化，再分别用这两种并网控制算法进行仿真，对比二者的仿真结果。

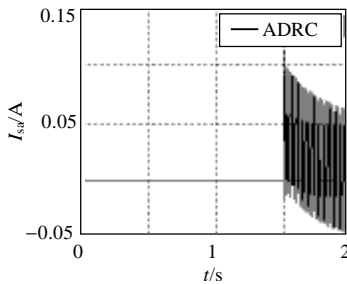
双馈发电机参数：额定功率 $P=21\text{kW}$ ，额定频率 $f=50\text{Hz}$ ，定子电阻 0.6Ω ，定子电感 157mH ，转子电阻 0.8Ω ，转子电感 157mH ，互感 153mH ，参数均折算到定子侧；电网参数： 690V ， 50Hz ，假设为无穷大电网；采样时间： $T_0=200\mu\text{s}$ 。分别采用基于ADRC的并网算法和基于PI控制器的并网算法进行仿真，在 $t=1.5\text{s}$ 并网，仿真结果如图5所示。



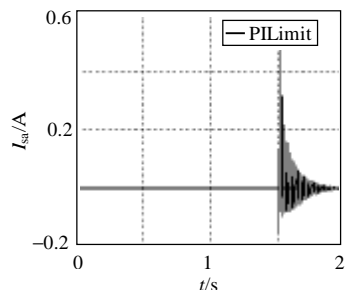
(a) 转子d轴电压



(b) 定子电压



(c) 基于ADRC并网控制算法控制机组并网时的定子A相电流



(d) 带限幅的PI控制器并网控制算法控制机组并网时的定子A相电流

图5 双馈发电机参数不变时并网仿真波形

Fig. 5 Cutting-in simulation waveform under constant DFIG parameters condition

PI控制器设计成与系统传递函数零极点对消，并且与ADRC具有相同的上升时间。由于PI控制器不限幅时，电压给定出现冲击，见图5(a)，这种情况在工程实际中是不允许出现的，因而对PI控制器中转子电压限幅情况也作了仿真，其限幅值与ADRC限幅值一致，响应曲线对应PI Limit所示曲线。定子电压幅值响应如图5(b)所示，可以看出PI控制器不限幅时动态响应特别快，无超调；ADRC动态响应较快，也无超调；限幅的PI控制器与ADRC具有相同的上升时间，不过出现了较大的超调。可

以看出两者的并网电流都比较小，相对来说基于ADRC的并网控制算法的并网电流稍微小一些。在电机参数不变的情况下，基于ADRC的并网控制算法性能略优于基于PI控制器的并网控制算法。

考虑双馈发电机转子电阻随着温度的升高而增大，互感随着磁路的饱和而减小，电阻变化以及磁路变化规律假设如图6所示。

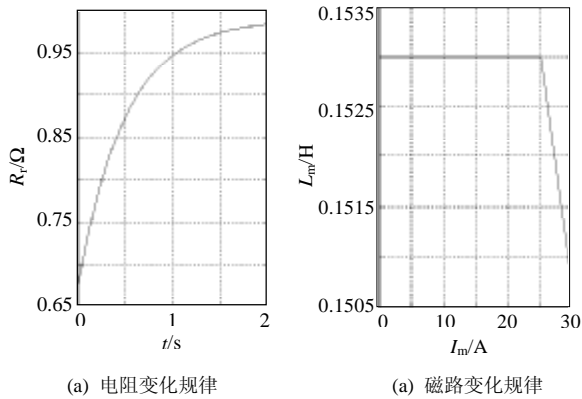


图6 双馈发电机参数变化假设曲线
Fig. 6 The hypothesis waveform of the variable DFIG parameters

分别用基于ADRC的并网控制算法和基于PI控制器的并网控制算法，对该情况下的双馈发电机进行并网控制，作出仿真波形如图7所示。

基于PI控制器的并网控制算法的动态响应明显变差，不仅有超调还有静差。这是因为电机的时间常数改变了，PI控制器传递函数不再与电机传递函数零极点对消，因而不再是一阶系统，系统响应出现了超调。同时基于PI控制器的并网算法，d轴电流给定值根据互感值计算，因而磁路饱和和互感变

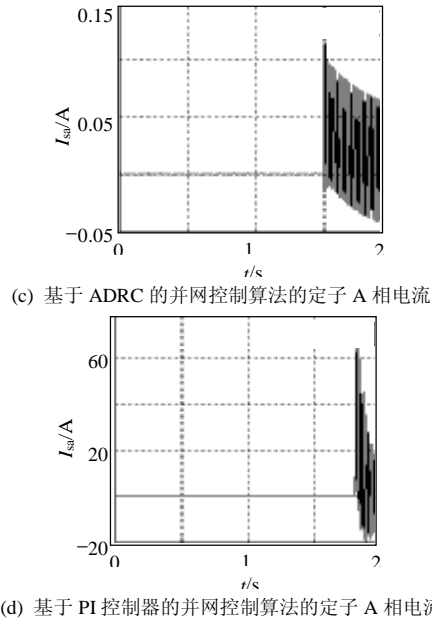
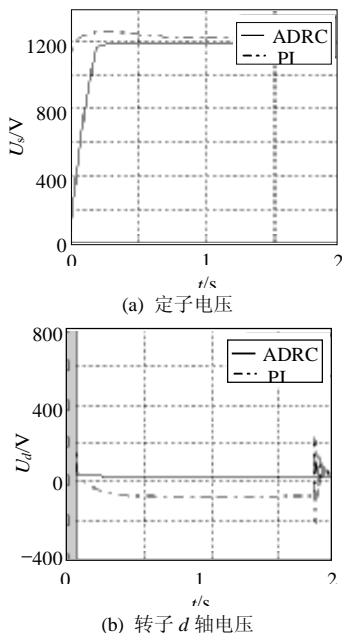


图7 双馈发电机参数变化时的并网仿真波形
Fig. 7 Cutting-in simulation waveform under variable DFIG parameters condition

化的情况下就会存在电压幅值有偏差的现象。这种情况下，基于PI控制器的并网控制算法的并网电流较大，而基于ADRC的并网控制算法的并网电流依然很小。

5 结束语

为提高变速恒频双馈风力发电并网性能，本文根据自抗扰控制器原理与双馈风力发电原理给出了变速恒频双馈风力发电新型并网控制算法。该算法既保留了矢量控制优良的动态性能，又解决了其依赖电机参数的缺点。仿真分析表明该并网控制算法具有动态特性好，无需电机参数，更换机组无需更改控制器参数，抗干扰能力强等优点。

参考文献

- [1] 叶杭冶. 风力发电机组的控制技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [2] Pena R, Clare J C, Asher G M. Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converts and its application to variable-speed wind energy generation[J]. Electric Power Applications, IEE Proceedings, 1996, 143(3): 231-241.
- [3] 赵栋利, 许洪华, 赵斌, 等. 变速恒频风力双馈发电机并网电压控制研究[J]. 太阳能学报, 2004, 25(5): 587-591. Zhao Dongli, Xu Honghua, Zhao Bin, et al. Study on the cut-in voltage control of a variable-speed constant-frequency doubly-fed induction generator[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2004, 25(5): 587-591.
- [4] 刘其辉, 贺益康, 卞松江. 变速恒频风力发电机空载并网控制[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 6-11. Liu Qihui, He Yikang, Bian Songjiang. Study on the no-load

- cutting-in control of the variable-speed constant-frequency(VSCF) wind-power generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3): 6-11.
- [5] 韩京清. 自抗扰控制器及其应用[J]. 控制与决策, 1998, 13(1): 19-23.
Han Jingqing. Auto-disturbance-rejection controller and its applications[J]. Control and Decision, 1998, 13(1): 19-23.
- [6] 夏长亮, 李正军, 杨荣, 等. 基于自抗扰控制器的无刷直流电机控制系统[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(2): 82-86.
Xia Changliang, Li Zhengjun, Yang Rong, et al. Control system of brushless DC motor based on active-disturbance rejection controller [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(2): 82-86.
- [7] 黄焕袍, 武利强, 韩京清, 等. 火电单元机组协调系统的自抗扰控制方案研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 168-173.
Huang Huanpao, Wu Liqiang, Han Jingqing, et al. A study of active disturbance rejection control on unit coordinated control system in thermal power plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(10): 168-173.
- [8] 余涛, 沈善德, 李东海, 等. 静止移相器和发电机励磁系统的自抗扰协调控制[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(9): 1-5.
Yu Tao, Shen Shande, Li Donghai, et al. Coordinated auto-disturbance-rejection control of static phase shifter and excitation system[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(9): 1-5.
- [9] 冯光, 黄立培, 朱东起. 采用自抗扰控制器的高性能异步电机调速系统[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(10): 55-58, 120.
Feng Guang, Huang Lipei, Zhu Dongqi. High performance control of induction motor based on auto-disturbance rejection controller [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(10): 55-58, 120.
- [10] 刘鸣, 邵诚. 异步电动机的自抗扰控制器及其参数整定[J]. 控制与决策, 2003, 18(5): 540-544.
Liu Ming, Shao Cheng. Auto-disturbance-rejection controller and its parameter adjusting for asynchronous motor[J]. Control and Decision, 2003, 18(5): 540-544.
- [11] 赵习为, 慕春棣. 自抗扰控制器的简易实现[J]. 制造业自动化, 1999, 21(6): 52-53.
Zhao Xiwei, Mu Chundi. Facility implementation of Auto-disturbance-rejection controller[J]. Manufacturing Automation, 1999, 21(6): 52-53.
- [12] 王庆林, 姜增如, 刘喜梅. 线性跟踪微分器及其在状态反馈控制中的应用[J]. 北京理工大学学报, 1999, 19(2): 203-206.
Wang Qinglin, Jiang Zengru, Liu Ximei. Linear tracking-范 differentiators and its applications in state feedback control[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 1999, 19(2): 203-206.
- [13] 夏超英. 交直流传动系统的自适应控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [14] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 1992.
- [15] 李永东. 交流电机数字控制系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- 收稿日期: 2005-09-15。
- 作者简介:
付旺保 (1980-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子与电力传动;
赵栋利 (1978-), 男, 工程师, 硕士, 研究方向为变速恒频风力发电;
潘磊 (1981-), 男, 工程师, 硕士, 研究方向为变速恒频风力发电;
许洪华 (1967-), 男, 研究员, 博士生导师, 研究方向为并网及独立运行风力发电、太阳光发电及其混合发电系统设计及控制技术。
- (责任编辑 韩 蕾)