

双馈风力发电机系统的自抗扰神经网络的励磁控制

杨 苹, 周少雄, 胡 斌, 马艺玮

(华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640; 广东省绿色能源技术重点实验室, 广东 广州 510640)

摘要: 在双馈发电机传统控制方式的基础上, 将自抗扰控制技术和BP神经网络相结合, 应用于双馈风力发电机并网运行的控制上, 提出了一种新的双馈风力发电机并网运行控制方案. 该控制方案具有内外两个控制环, 内环通过BP神经网络实现双馈风力发电机的转子 d - q 轴电流控制, 外环通过自抗扰技术实现双馈风力发电机定子侧的有功、无功控制. 由于自抗扰控制器利用一阶跟踪微分器和扩张状态观测器对系统扰动进行动态跟踪补偿, 在此基础上输出双馈电机转子交-直流电流的参考值, 然后将该参考值作为BP神经网络训练样本的输入, 训练后的BP神经网络可以更好地逼近实际转子电压输出量. 论文设计并实现了该方案的具体控制算法. 仿真测试表明: 该控制方案具有优良的动态性能, 对系统的内外扰动具有较强的鲁棒性, 在没有精确的发电机参数情况下依然可实现并网系统的稳定运行.

关键词: 双馈风力发电机; 励磁控制; 自抗扰控制; BP神经网络
中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Active disturbance-rejection neural networks excitation-control of double-fed induction generator

YANG Ping, ZHOU Shao-xiong, HU Bin, MA Yi-wei

(College of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510640, China;
Guangdong Key Laboratory of Clean Energy Technology, Guangzhou Guangdong 510640, China)

Abstract: On the basis of traditional control for the double-fed induction generator (DFIG), the active disturbance-rejection method and the back-propagation neural-network control method are combined together and applied to the control of DFIG operating in the power grid. The control strategy consists of the internal and external control loops. The internal loop controls the rotor current of DFIG using the back propagation (BP) neural-network controller, while the external loop controls the active power and the reactive power by the active disturbance-rejection controller (ADRC). The ADRC tracks system dynamic disturbances by a first-order differential tracker (TD) and an extended state-observer (ESO), and outputs the reference quadrature current and the direct current of DFIG rotor. Reference values are fed to the BP neural network input for training; the trained BP neural networks precisely approximate the actual rotor output voltage. The algorithm of this strategy is developed and simulated; simulation results show that this strategy is with excellent dynamic performances, and the system is robust to the internal and external disturbances, providing a stable operation for DFIG in the power grid without knowing the exact generator parameters.

Key words: double-fed wind power generation; excitation control; active disturbance-rejection controller; back propagation neural networks

1 引言(Introduction)

风力发电作为技术最成熟、最具规模开发条件的新能源发电方式, 在电网中所占的比例不断增加^[1]. 兆瓦级变速风电机组多采用双馈感应发电机, 其定子并网, 转子由变频器提供三相滑差频率电流进行励磁^[2], 实现能量的双向流动.

目前, 双馈风电系统转子侧变换器通常采用定子磁链定向矢量控制方案或定子电压定向矢量控制方案, 以定子电压恒定、忽略定子绕组电磁动态过程

为前提, 将双馈电机简化为三阶模型, 得出简化的转子电流内环PID控制器^[3]. 此控制器只在电网正常运行且系统参数恒定时具有良好的动、静态性能. 但双馈发电机具有高阶非线性强耦合的特点, 发电机在运行过程中由于磁路饱和将会引起电感的变化, 温升将会以其电阻的变化, 这给依赖电机参数的矢量控制带来了困难. 文献[4]推导出正、负序坐标系下的双馈感应发电机电压方程和磁链方程, 通过对正、负序定子励磁进行定向, 将控制目标分成4类, 并

分别给出不同控制目标下转子电流负序分量的指令值, 得到并网型双馈感应发电机在不平衡电网电压条件下的励磁控制策略. 该控制算法的设计只针对不平衡电网电压而设计的, 而且比较复杂, 且当系统参数改变时, 无法保证其动态和稳态性能.

为此, 本文结合传统矢量控制的基本思想, 引入自抗扰、神经网络技术, 设计一种抗干扰能力较强控制算法, 控制器环基于BP神经网络实现转子 d, q 轴电流控制, 控制器外环基于自抗扰技术的有功、无功控制, 目标是使得控制系统对内外扰动具有较强的鲁棒性.

2 空间矢量控制技术(Space vector control method)

双馈电机矢量控制中比较常用的是以定子磁链为定向矢量的控制方法, 实现有功和无功都能够实现解耦控制, 获得了广泛应用.

文献[5]中给出了矢量控制技术的电流内环控制的数学模型, 具体如下:

$$\begin{cases} U_{rd} = R_r i_{rd} + \sigma L_r \frac{di_{rd}}{dt} - \omega_{s1} \sigma L_r i_{rq}, \\ U_{rq} = R_r i_{rq} + \sigma L_r \frac{di_{rq}}{dt} + \omega_{s1} \frac{L_m^2}{L_s} i_{ms} + \omega_{s1} \sigma L_r i_{rd}, \\ P_s = -\frac{1.5 U_{sq} L_m}{L_s} i_{rq}, \\ Q_s = \frac{1.5 U_{sq} (\Psi_{sd} - L_m i_{rd})}{L_s}, \end{cases} \quad (1)$$

式中: U_{rd} 和 U_{rq} 为转子电压的 d, q 轴分量; i_{rd} 和 i_{rq} 为转子电流的 d, q 轴分量; i_{ms} 为广义励磁电流; R_r 和 L_r 为转子绕组的电阻和自感; L_s 为定子绕组的自感; L_m 为定、转子绕组的互感; σ 为漏磁系数; ω_{s1} 为转差角速度; P_s 和 Q_s 为双馈电机定子侧的有功功率和无功功率; U_{sq} 为定子绕组电压直轴分量; Ψ_{sd} 为定子

绕组磁链的直轴分量.

分别对电流内环和功率外环采用PI控制, 具体如图1所示.

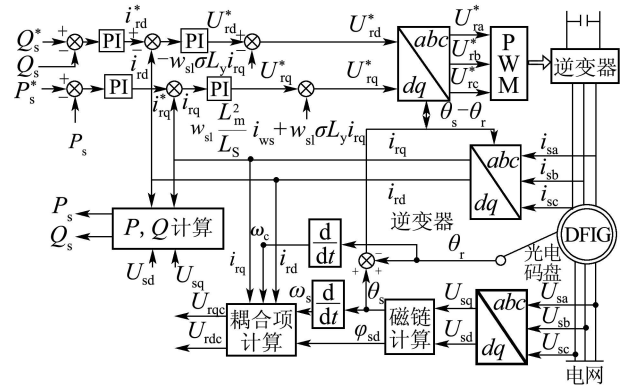


图1 基于定子磁场定向空间矢量控制技术原理图
Fig. 1 Control diagram based on the space vector of stator flux orientation

如上所述, 传统的控制模式需要建立一个有效的系统模型, 而由于空气动力学的不确定性和电力电子模型的复杂性, 系统模型是不容易确定的. 因此所有基于定子磁场定向技术的空间矢量控制控制也仅适用于某个特定的系统和某个特定的时期^[6], 由于这些原因, 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.

3 自抗扰神经网络的励磁控制(Excitation controlled by ADRC neural network)

3.1 系统控制原理图(System control diagram)

根据传统控制模式的不足, 结合自抗扰控制的优点^[7-10]和BP神经网络的优点^[11-12], 本文采用基于神经网络的电流内环控制和基于自抗扰技术的功率外环控制. 系统整体的控制拓扑如图2所示.

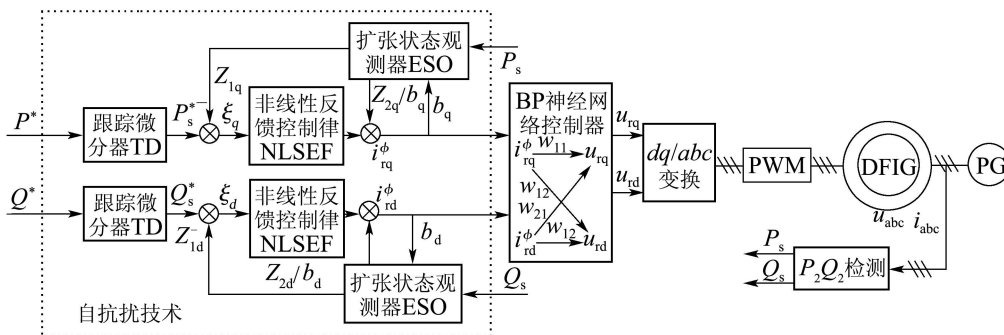


图2 基于自抗扰神经网络控制技术原理图

Fig. 2 Control diagram based on the active disturbance rejection neural networks strategy

3.2 自抗扰控制系统设计(ADRC control system design)

自抗扰控制系统的设计包括3个部分: 跟踪微

分器TD的设计^[13-16]、扩张状态观测器ESO的设计^[17-18]和非线性反馈控制律NLSEF的设计^[19]. 各个部分相关的参数采用“分离性原理”独自整

定^[20]. 具体如下:

1) 跟踪微分器TD的设计. 对有功功率和无功功率的跟踪采用一阶微分器. 微分器的模型如下:

$$\dot{P}_s^* = -h \cdot \text{fal}(\varepsilon_0, \alpha_0, \eta_0), \quad (2)$$

其中: P_s^* 为微分器的输出量; h 是步长, 仿真中设定为0.005; ε_0 为跟踪器输入 P^* 在一个步长内的变化量, 初始值设定为0.1; α_0 为衰减系数, 仿真中设定为0.8; η_0 为底数, 选定为0.005; $\text{fal}(\cdot)$ 是跟踪函数, 具体为当 $\eta > 0$ 时,

$$\text{fal}(\varepsilon, \alpha, \eta) = \begin{cases} |\varepsilon|^\alpha \text{sgn} \varepsilon, & |\varepsilon| > \eta, \\ \frac{\varepsilon}{\eta^{(1-\alpha)}}, & |\varepsilon| < \eta. \end{cases} \quad (3)$$

2) 扩张状态观测器ESO的设计. 以检测的双馈电机的定子侧的有功功率 P_s 和无功功率 Q_s 为量测输入分别构造扩张状态观测器, 具体如下:

$$\begin{cases} \xi_x = Z_{1x} - y_s, \\ \dot{Z}_{1x} = Z_{2x} - \beta_{1x} \cdot \text{fal}(\xi_x, \alpha_{1x}, \delta) + b_x \cdot i_{rx}^*, \\ \dot{Z}_{2x} = -\beta_{2x} \cdot \text{fal}(\xi_x, \alpha_{2x}, \delta), \end{cases} \quad (4)$$

式中: x 代表 d 或 q ; y 表示 P 或 Q (当 x 为 d 时, y 为 Q ; 当 x 为 q 时, y 为 P), Z_{1x} 为定子有功功率和无功功率的实际跟踪值; Z_{2x} 为扰动量的估计值; 仿真时具体的相关参数取值为: β_{1x} 为300, β_{2x} 为400, α_{1x} 为0.8, δ 为0.005, b_x 为500.

3) 非线性反馈控制律NLSEF的设计. 取电机定子有功功率和无功功率反馈得出状态误差, 并通过前馈环节对扩张状态观测器得出的扰动估计值进行补偿, 进而得到转子电流给定值 i_{rx}^* , 具体为

$$\begin{cases} i_{rq}^* = \beta_q \text{fal}(P_s^* - Z_{1q}, \alpha_q, \delta) - \frac{Z_{2q}}{b_q}, \\ i_{rd}^* = \beta_d \text{fal}(Q_s^* - Z_{1d}, \alpha_d, \delta) - \frac{Z_{2d}}{b_d}. \end{cases} \quad (5)$$

3.3 BP神经网络控制系统设计(BP neural network control system design)

BP神经网络控制器通过在线调节权值 w_{11} , w_{12} , w_{21} , w_{22} 使有功功率和无功功率的目标函数逐渐达到最小值, 从而实现发电机有功功率和无功功率的独立跟踪控制, BP神经网络的目标函数为

$$E = \Delta P^2 + \Delta Q^2 = (P_s^* - P_s)^2 + (Q_s^* - Q_s)^2. \quad (6)$$

根据梯度法调节权值, 得到权值变换量公式, 具体如下:

$$\begin{aligned} \Delta w_{11}^k &= \eta(2\Delta P^k \frac{P^k - P^{k-1}}{u_{rq}^k - u_{rq}^{k-1}} i_{rq}^* + \\ & 2\Delta Q^k \frac{Q^k - Q^{k-1}}{u_{rq}^k - u_{rq}^{k-1}} i_{rq}^*), \end{aligned} \quad (7a)$$

$$\begin{aligned} \Delta w_{12}^k &= \eta(2\Delta P^k \frac{P^k - P^{k-1}}{u_{rd}^k - u_{rd}^{k-1}} i_{rq}^* + \\ & 2\Delta Q^k \frac{Q^k - Q^{k-1}}{u_{rd}^k - u_{rd}^{k-1}} i_{rq}^*), \end{aligned} \quad (7b)$$

$$\begin{aligned} \Delta w_{21}^k &= \eta(2\Delta P^k \frac{P^k - P^{k-1}}{u_{rq}^k - u_{rq}^{k-1}} i_{rd}^* + \\ & 2\Delta Q^k \frac{Q^k - Q^{k-1}}{u_{rq}^k - u_{rq}^{k-1}} i_{rd}^*), \end{aligned} \quad (7c)$$

$$\begin{aligned} \Delta w_{22}^k &= \eta(2\Delta P^k \frac{P^k - P^{k-1}}{u_{rd}^k - u_{rd}^{k-1}} i_{rd}^* + \\ & 2\Delta Q^k \frac{Q^k - Q^{k-1}}{u_{rd}^k - u_{rd}^{k-1}} i_{rd}^*), \end{aligned} \quad (7d)$$

上式中 η 为学习速率, 取值为0.1. 由式(7)可以对权值不断更新, 从而搜寻到一组最优权值使目标函数为最小值.

4 仿真分析(Simulation)

为了验证自抗扰神经网络控制技术的性能, 在MATLAB 2007b/Simulink平台上对双馈发电机分别采用空间矢量控制方法和基于自抗扰神经网络控制方法进行仿真. 仿真所用双馈电机的主要参数如下: 定子额定电压690 V, 额定功率1.5 MW, 定子电阻为3.74 Ω , 定子漏感为0.31 H, 转子电阻为3.2 Ω , 转子漏感0.31 H, 定转子互感1.2 H, 极对数为2. 系统额定风速为11 m/s, 输入风机的风速为9 m/s (此时对应的视在功率为1 MW).

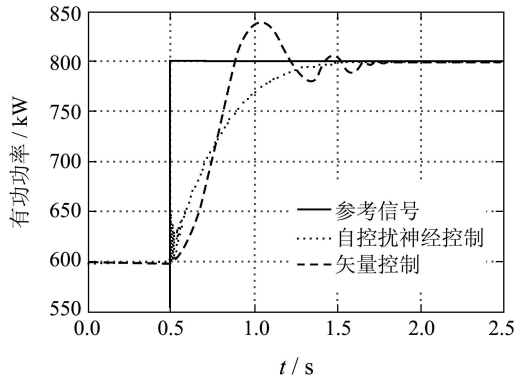
仿真实验验证包括3个部分: 1) 当电网对称时, 给定功率发生变化时, 比较两种控制算法的性能; 2) 当双馈电机参数发生变化时, 给定功率不变, 比较两种控制算法的性能; 3) 当电网电压出现波动时, 给定功率不变, 比较两种控制算法的性能.

4.1 当有功功率和无功功率参考值变化时(When the active and reactive power reference value change)

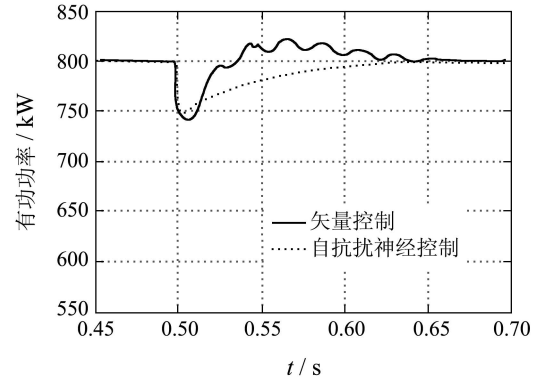
保持输入风速不变, 并设定有功功率参考值为600 kW, 无功功率的参考值为800 kVar; 在仿真时间为0.5 s时, 将有功功率和无功功率的值分别设定为800 kW, 600 kVar, 采用空间矢量控制算法和自抗扰神经网络算法得到的仿真结果如图3所示.

4.2 当电机参数发生改变时(When the motor parameters is changed)

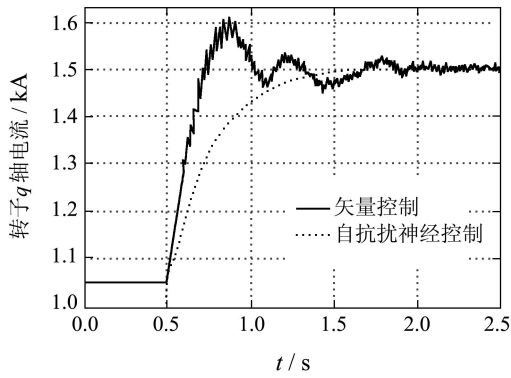
保持输入风速不变, 并设定有功功率参考值为800 kW, 无功功率的参考值为600 kVar; 在仿真时间为0.5 s时, 双馈电机的定子侧电阻变为原来的1.5倍, 采用空间矢量控制算法和自抗扰神经网络算法得到的仿真结果如图4所示.



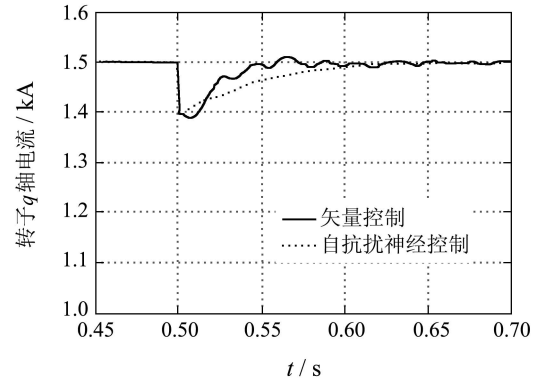
(a) 有功功率调节图



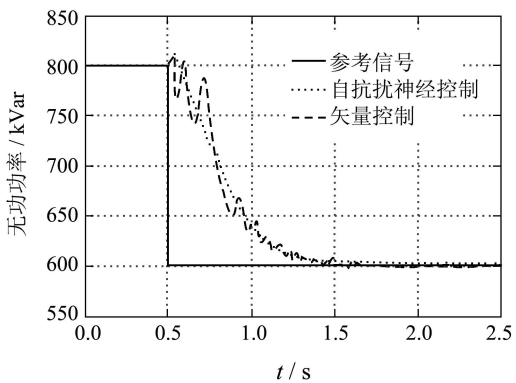
(a) 有功功率调节图



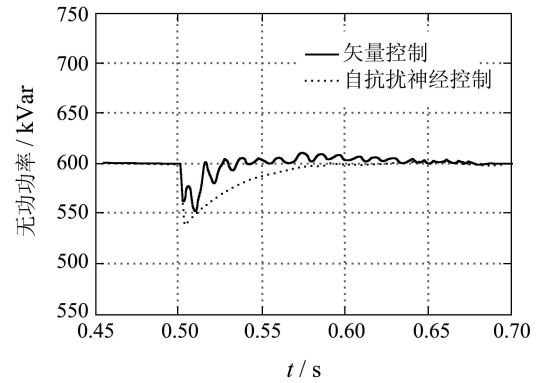
(b) 转子q轴电流分量调节图



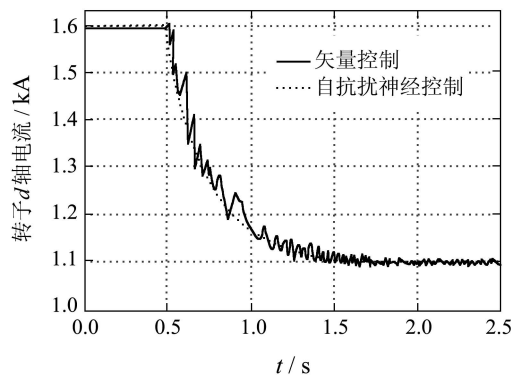
(b) 转子q轴电流分量调节图



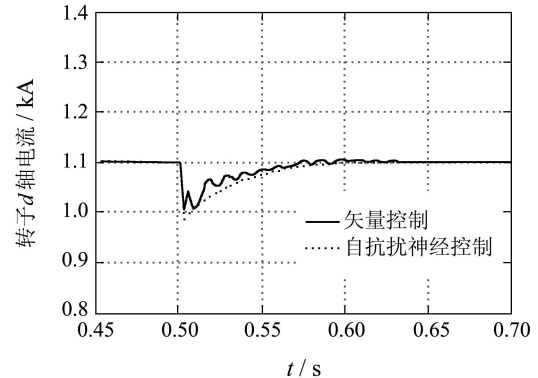
(c) 无功功率调节图



(c) 无功功率调节图



(d) 转子d轴电流分量调节图



(d) 转子d轴电流分量调节图

图3 当功率参考值变化时,两种算法各电气量仿真波形
Fig. 3 Two algorithms simulation waveform when the reference power changed

图4 当电机参数变化时,两种算法各电气量仿真波形
Fig. 4 Two algorithms simulation waveform when the motor parameters changed

4.3 当电网电压波动时(When voltage fluctuate)

保持输入风速为9m/s不变, 并设定有功功率参考值为800 kW, 无功功率的参考值为600 kVar; 在

仿真时间为0.5 s时, 电网电压变为原来的0.9倍, 且在1 s时变为原来值, 采用空间矢量控制算法和自抗扰神经网络算法得到的仿真结果如图5所示。

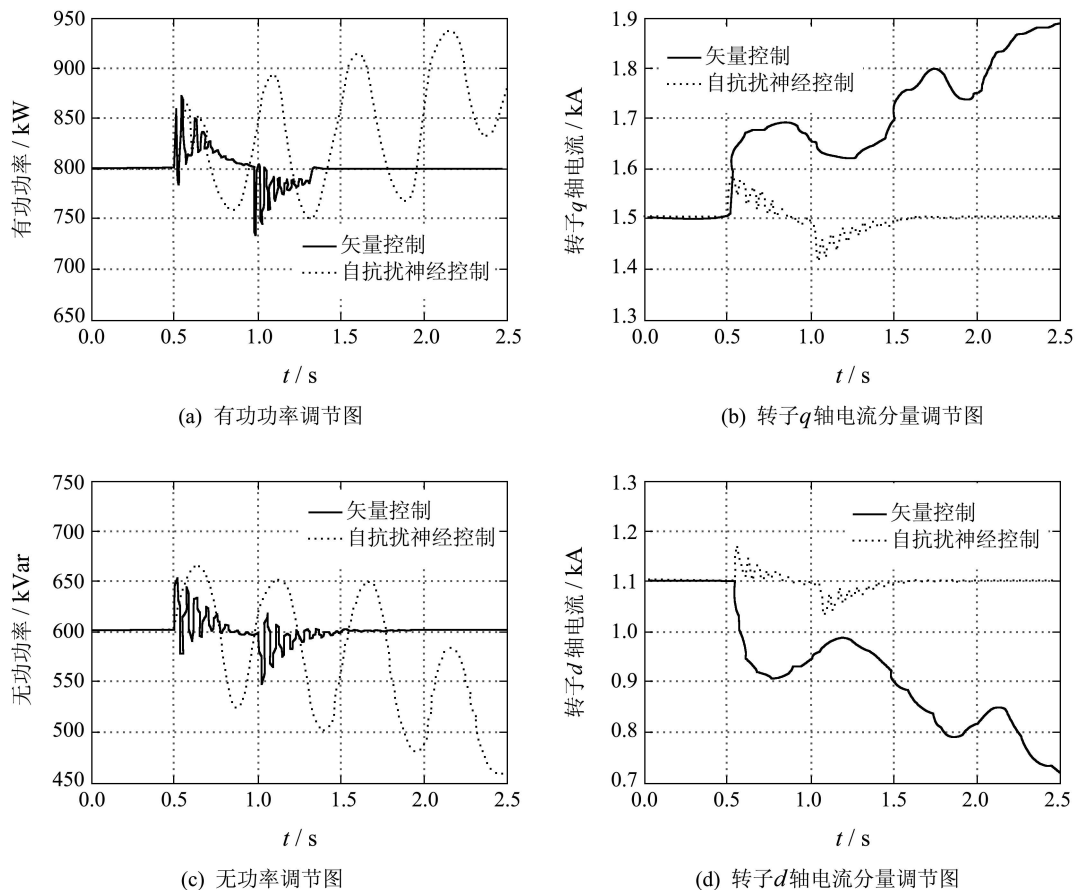


图5 当电网电压波动时, 两种算法各电气量仿真波形

Fig. 5 Two algorithms simulation waveform when voltage fluctuations changed

如图3所示, 当参考功率变化时, 自抗扰神经网络算法比矢量控制算法具有更快的跟踪速度, 且波动量小; 如图4所示, 当电机参数改变时, 自抗扰神经网络算法经过短时间平缓地过渡到稳态, 且稳态无误差, 而矢量控制的波动性比较大, 且达到稳态所需时间较长; 如图5所示, 当电网电压波动时, 自抗扰神经网络算法能够经过调整最终达到稳态, 而矢量控制最终导致发散。

5 结论(Conclusion)

为了提高交流励磁风力发电机并网运行性能, 本文根据自抗扰控制和BP神经网络原理, 设计了一种新的交流励磁风力发电系统控制算法。仿真分析表明, 该控制算法具有动态特性好, 对系统参数的依赖性小, 抗干扰能力强的优点。

参考文献(References):

- [1] ACKERMANN T. *Wind Power in Power Systems*[M]. New York: Wiley, 2005.
- [2] 胡绍猫, 陈秉均. 基于Matlab的双馈风力发电机的模型研究与仿真[J]. 机械与电子, 2006, 14(3): 25-27. (HU Shaomao, CHEN Bingjun. Research and simulation on the model of doubly-fed wind turbine based on matlab[J]. *Machinery & Electronics*, 2006, 14(3): 25-27.)
- [3] EKANAYAKE J B, HOLDSWORTH L, JENKINS N. Comparison of 5th order and 3rd order machine models for doubly fed induction generator (DFIG) wind turbines[J]. *Electric Power Systems Research*, 2003, 67(3): 207-215.
- [4] 赵阳, 邹旭东, 丁稳房. 不平衡电网电压下并网型双馈感应发电机励磁控制策略[J]. 武汉大学学报(工学版), 2009, 42(1): 110-113. (ZHAO Yang, ZOU Xudong, DING Wenfang. Excitation control strategy of grid-connecting DFIG under unbalanced grid voltage[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2009, 42(1): 110-113.)
- [5] 王荣熙, 林飞, 郝瑞祥, 等. 基变速恒频双馈异步发电机的控制策略及仿真[J]. 电机与控制应用, 2009, 36(4): 26-30. (WANG Rongxi, LIN Fei, HAO Ruixiang, et al. The research on the control strategy of VSCF doubly-fed induction generator and its simulation[J]. *Electric Machines & Control Application*, 2009, 36(4): 26-30.)
- [6] 叶杭治. 风力发电机组的控制技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002. (YE Hangye. *Wind Turbine Control Technology*[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2002.)

- [7] 韩京清. 从PID技术到“自抗扰控制”技术[J]. 控制工程, 2002, 9(3): 13 – 18.
(HAN Jingqing. From PID technique to active disturbances rejection control technique[J]. *Control Engineering of China*, 2002, 9(3): 13 – 18.)
- [8] 韩京清. 自抗扰控制技术[J]. 前沿科学, 2007, 1(1): 24 – 31.
(HAN Jingqing. Auto disturbances rejection control technique[J]. *Frontier Science*, 2007, 1(1): 24 – 31.)
- [9] 黄一, 张文革. 自抗扰控制器的发展[J]. 控制理论与应用, 2002, 19(4): 485 – 492.
(HUANG Yi, ZHANG Wenge. Development of active disturbance rejection controller[J]. *Control Theory & Applications*, 2002, 19(4): 485 – 492.)
- [10] 张淼, 吴捷. 基于自抗扰技术的光伏发电并网控制系统[J]. 控制理论与应用, 2005, 22(4): 583 – 587.
(ZHANG Miao, WU Jie. Control system of renewable energy connected grid based on the auto-disturbances rejection control technology[J]. *Control Theory & Applications*, 2005, 22(4): 583 – 587.)
- [11] LI H, SHI K L, MCLAREN P G. Neural-network-based sensorless maximum wind energy capture with compensated power coefficient[J]. *IEEE Transactions on Industry Application*, 2005, 41(6): 1548 – 1556.
- [12] 王俊普. 智能控制[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1996: 135 – 144.
(WANG Junpu. *Intelligent Control*[M]. Hefei: Press of China Science and Technology University, 1996: 135 – 144.)
- [13] 韩京清, 王伟. 非线性跟踪微分器[J]. 系统科学与数学, 1994, 14(2): 14 – 18.
(HAN Jingqing, WANG Wei. Nonlinear tracking differentiator[J]. *Journal of Systems Science and Mathematical Sciences*, 1994, 14(2): 14 – 18.)
- [14] 韩京清, 袁露林. 跟踪微分器的离散形式[J]. 系统科学与数学, 1999, 9(3): 23 – 26.
(HAN Jingqing, YUAN Lulin. The discrete form of tracking-differentiator[J]. *Journal of Systems Science and Mathematical Sciences*, 1999, 9(3): 23 – 26.)
- [15] 朱发国, 陈学允. 非线性跟踪微分器的分析与改进[J]. 控制理论与应用, 1999, 14(6): 898 – 902.
(ZHU Faguo, CHEN Xueyun. Analysis and improvement of the nonlinear tracking differentiator[J]. *Control Theory & Applications*, 1999, 14(6): 898 – 902.)
- [16] 谢云德, 龙志强. 高精度快速非线性离散跟踪微分器[J]. 控制理论与应用, 2009, 8(2): 127 – 132.
(XIE Yude, LONG Zhiqiang. A high-speed nonlinear discrete tracking-differentiator with high precision[J]. *Control Theory & Applications*, 2009, 8(2): 127 – 132.)
- [17] 韩京清. 一类不确定对象的扩张状态观测器[J]. 控制与决策, 1995, 10(1): 10 – 14.
(HAN Jingqing. The “extended state observer” of a class of uncertain systems[J]. *Control and Decision*, 1995, 10(1): 10 – 14.)
- [18] 林飞, 孙湖, 郑琼林, 等. 用于带有量测噪声系统的新型扩张状态观测器[J]. 控制理论与应用, 2005, 22(6): 995 – 998.
(LIN Fei, SUN Hu, Zheng Qionglin, et al. Novel extended state observer for uncertain system with measurement noise[J]. *Control Theory & Applications*, 2005, 22(6): 995 – 998.)
- [19] 韩京清. 自抗扰控制器及其应用[J]. 控制与决策, 1998, 13(1): 21 – 24.
(HAN Jingqing. Auto-disturbances-rejection controller and its applications[J]. *Control and Decision*, 1998, 13(1): 21 – 24.)
- [20] 张晓东, 童少为. 用MATLAB仿真分析自抗扰控制器的整定参数[J]. 微计算机信息, 2006, 22(31): 90 – 92.
(ZHANG Xiaodong, TONG Shaowei. Analyzing and confirming the parameters of ADRC with MATLAB simulation[J]. *Microcomputer Information*, 2006, 22(31): 90 – 92.)

作者简介:

杨 苹 (1967—), 女, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力电子电路的建模与控制, E-mail: eppyang@scut.edu.cn;

周少雄 (1985—), 男, 硕士研究生, 广东省绿色能源技术重点实验室, 主要从事大型风电控制系统研制, E-mail: shaoxiong.zhou@cetlab.org;

胡 斌 (1983—), 女, 硕士研究生, 广东省绿色能源技术重点实验室, 主要从事大型风电控制系统研制, E-mail: bin.hu@cetlab.org;

马艺玮 (1980—), 女, 博士研究生, 广东省绿色能源技术重点实验室, 研究方向为基于可再生能源分布式发电系统的能量管理与智能控制技术, E-mail: ma.yiwei@mail.scut.edu.cn.