

电网电压不平衡工况下双馈感应风力发电机组的自抗扰控制

陈思哲¹, 张淼¹, 吴捷², 唐雄民¹

(1. 广东工业大学 自动化学院, 广东 广州 510006; 2. 华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640)

摘要: 本文提出电网电压不平衡工况下双馈感应电机(DFIG)的自抗扰控制(ADRC)方法, 抑制不平衡电压引起的电磁转矩和无功功率波动, 延长风力发电机组的工作寿命. 在正、负序同步旋转坐标系中推导了电网电压不平衡工况下DFIG的电磁转矩表达式, 计算出消除电磁转矩波动所需的负序转子电流, 将其叠加到正序转子电流参考值上, 以减小电磁转矩波动. 采用ADRC实现对转子电流的有效控制, 减少控制器对发电机精确模型的依赖, 提高控制系统的鲁棒性. 仿真结果表明所提出的控制方案有效地减小了电网电压不平衡工况下DFIG的电磁转矩和无功功率波动, 同时减小了不平衡电流, 有利于延长DFIG风力发电机组的工作寿命.

关键词: 风力发电; 双馈感应电机; 电网电压不平衡; 自抗扰控制

中图分类号: TM315 **文献标识码:** A

Active disturbance-rejection control of wind turbines based on double-fed induction generator under unbalanced grid voltage

CHEN Si-zhe¹, ZHANG Miao¹, WU Jie², TANG Xiong-min¹

(1. Faculty of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou Guangdong 510006, China;
2. College of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510640, China)

Abstract: An active disturbances rejection control (ADRC) scheme of the double-fed induction generators (DFIG) under unbalanced grid voltage is proposed to suppress electromagnetic torque pulsations and reactive power pulsations caused by unbalanced grid voltages, with the purpose of extending the working life of wind turbines. The expressions of the electromagnetic torque of DFIG under unbalanced grid voltage are derived in the positive-sequence and negative-sequence synchronously rotating frames, and the negative-sequence rotor current for eliminating electromagnetic torque pulsations are calculated, which is added to the positive sequence rotor current reference value to minimize torque pulsations. ADRC is introduced to achieve effective control of rotor current, which reduces the dependency of the controller on the exact model of generator and improves the robustness of the control system. The simulation results show that the proposed control scheme effectively reduces electromagnetic torque pulsations, reactive power pulsations and unbalanced current of DFIG under unbalanced grid voltage, extending the working life of the wind turbines based on DFIG.

Key words: wind energy generation; double-fed induction generator; unbalanced grid voltage; active disturbance rejection controller

1 引言(Introduction)

由于化石能源的不断消耗和生态环境的日益恶化, 世界各国越来越重视以风能为代表的各类可再生能源的开发^[1].

基于双馈感应电机(DFIG)的变速恒频风力发电机组, 具有可独立调节电磁转矩和无功功率、实现最大风能捕获、减小传动链机械应力、提高输出电能质量、并能向电网提供必要的电压和频率支撑等优点. 与其他变速恒频风力发电机组相比, 其功率变换器只需传递滑差功率, 从而降低了风力发电机组的成本. 因此, DFIG在风力发电领域得到了广泛的应用.

关于DFIG风力发电机组在电网正常情况下的控制策略, 国内外已进行了深入的研究, 实现了功率解耦和最大风能捕获控制^[2]. 近年来, DFIG在电网故障下的运行控制成为国外研究的新热点^[3-4], 国内也有学者对此进行了研究^[5-6], 但主要围绕电网对称故障的情况.

风力发电机组常安装在边远地区, 通常是长输电线的末端, 即使在电网正常运行的情况下, 也可能由于不平衡输电线阻抗、三相不平衡负载、单相大功率负载等原因, 造成风电场接入点处的三相电压不平衡. 由于感应电机的负序阻抗远小于正序阻抗, 如果在DFIG风力发电机组控制器设计时没有考

虑不平衡电压的影响,即使很小的不平衡电压也会产生较大的不平衡电流,并且使电机的转矩和功率以2倍电网频率波动,影响风力机组的工作寿命和电网的稳定运行^[7],传统的风电场在电压不平衡达到一定程度时将会进一步削弱电网,而且使风能的利用率大大降低.从电网安全稳定运行和提高能源利用率的角度出发,要求风电机组在电网电压不平衡的情况下能尽量地维持与电网的连接.文献[8]通过控制网侧变换器以提供类似STATCOM的功能,减小电压的不平衡程度,但不涉及发电机本身的控制.文献[9-10]在正、负序同步旋转坐标下分别设计了基于定子电压定向的正、负序转子电流控制器,以实现定子电流不平衡、功率波动、电磁转矩波动的抑制.

由于建模过程中的理想化假设、参数辨识过程中的实验误差、运行过程中的温升和励磁饱和等因素,DFIG的实际模型与标称模型存在一定的偏差,因此有必要设计不依赖发电机精确模型的控制器.

本文基于正、负序同步旋转坐标系下DFIG模型,推导了电网电压不平衡时电磁转矩2倍频成分的表达式,计算出抵消电磁转矩波动所需的负序转子电流,将其叠加到正序转子电流参考值上,以抑制电磁转矩波动.引入自抗扰控制器(ADRC)对矢量控制进行改进,利用ADRC的优越特性实现对转子电流的有效控制,减少控制器对发电机精确模型的依赖,提高鲁棒性.通过对一个9MW的DFIG风力发电机组在暂态和稳态不平衡电网电压条件下的仿真,验证了所提出控制算法的有效性.

2 电网电压不平衡工况下DFIG模型(DFIG model under unbalanced grid voltage)

根据对称分量理论,任何电磁量都可以表示为正、负、零序分量之和,由于DFIG中性点不接地,零序分量不存在,只需研究其正、负序模型.

DFIG各电磁量可表示为如下正、负序分量叠加的形式^[9]:

$$F_{sdq}^s = e^{j\omega_e t} F_{sdq+}^+ + e^{-j\omega_e t} F_{sdq-}^- \quad (1)$$

$$F_{rdq}^s = e^{j(\omega_e - \omega_r)t} F_{rdq+}^+ + e^{j(-\omega_e - \omega_r)t} F_{rdq-}^- \quad (2)$$

其中: F 表示广义电磁量,包括电压、电流、磁链;上标s、+、-分别表示定子坐标系和正、负序同步旋转坐标系;下标+、-分别表示正、负序分量;下标s、r分别表示定、转子电磁量; ω_e 为同步旋转速度, ω_r 为转子角速度.

DFIG在正序同步旋转坐标下的正序模型为

$$u_{sdq+}^+ = R_s i_{sdq+}^+ + \frac{d\lambda_{sdq+}^+}{dt} + j\omega_e \lambda_{sdq+}^+ \quad (3)$$

$$u_{rdq+}^+ = R_r i_{rdq+}^+ + \frac{d\lambda_{rdq+}^+}{dt} + j(\omega_e - \omega_r) \lambda_{rdq+}^+ \quad (4)$$

$$\lambda_{sdq+}^+ = L_s i_{sdq+}^+ + L_m i_{rdq+}^+ \quad (5)$$

$$\lambda_{rdq+}^+ = L_r i_{rdq+}^+ + L_m i_{sdq+}^+ \quad (6)$$

DFIG在负序同步旋转坐标下的负序模型为

$$u_{sdq-}^- = R_s i_{sdq-}^- + \frac{d\lambda_{sdq-}^-}{dt} - j\omega_e \lambda_{sdq-}^- \quad (7)$$

$$u_{rdq-}^- = R_r i_{rdq-}^- + \frac{d\lambda_{rdq-}^-}{dt} - j(\omega_e + \omega_r) \lambda_{rdq-}^- \quad (8)$$

$$\lambda_{sdq-}^- = L_s i_{sdq-}^- + L_m i_{rdq-}^- \quad (9)$$

$$\lambda_{rdq-}^- = L_r i_{rdq-}^- + L_m i_{sdq-}^- \quad (10)$$

上述各式中: u_s 和 u_r 分别为定、转子电压; i_s 和 i_r 分别为定、转子电流; λ_s 和 λ_r 分别为定、转子磁链; R_s 和 R_r 分别为定、转子电阻; L_s 和 L_r 分别为定、转子自感; L_m 为定、转子间互感.

令定子正序电压与正序旋转坐标系 d 轴重合,忽略定子电阻压降和暂态磁通,由式(3)得

$$u_{sd+}^+ = -\omega_e \lambda_{sq+}^+ \quad (11)$$

$$0 = \omega_e \lambda_{sd+}^+ \quad (12)$$

将式(12)代入式(5)得

$$i_{sd+}^+ = -\frac{L_m i_{rd+}^+}{L_s} \quad (13)$$

$$i_{sq+}^+ = \frac{\lambda_{sq+}^+ - L_m i_{rq+}^+}{L_s} \quad (14)$$

将式(6)(13)-(14)代入式(4),并整理得正序转子电流方程如下:

$$u_{rd+}^+ = R_r i_{rd+}^+ + \sigma L_r \frac{di_{rd+}^+}{dt} - (\omega_e - \omega_r) \left(\frac{L_m \lambda_{sq+}^+}{L_s} + \sigma L_r i_{rq+}^+ \right) \quad (15)$$

$$u_{rq+}^+ = R_r i_{rq+}^+ + \sigma L_r \frac{di_{rq+}^+}{dt} + (\omega_e - \omega_r) \sigma L_r i_{rd+}^+ \quad (16)$$

其中 $\sigma = 1 - L_m^2 / (L_r L_s)$.

同样,令定子负序电压与负序同步旋转坐标系的 d 轴重合,可推导得(17)-(22):

$$u_{sd-}^- = \omega_e \lambda_{sq-}^-, \quad (17)$$

$$0 = \omega_e \lambda_{sd-}^-, \quad (18)$$

$$i_{sd-}^- = -\frac{L_m i_{rd-}^-}{L_s} \quad (19)$$

$$i_{sq-}^- = \frac{\lambda_{sq-}^- - L_m i_{rq-}^-}{L_s} \quad (20)$$

$$u_{rd-}^- = R_r i_{rd-}^- + \sigma L_r \frac{di_{rd-}^-}{dt} + (\omega_e + \omega_r) \left(\frac{L_m \lambda_{sq-}^-}{L_s} + \sigma L_r i_{rq-}^- \right) \quad (21)$$

$$u_{rq-}^- = R_r i_{rq-}^- + \sigma L_r \frac{di_{rq-}^-}{dt} - (\omega_e + \omega_r) \sigma L_r i_{rd-}^- \quad (22)$$

将负序转子电流方程(21)–(22)通过坐标变换到正序同步旋转坐标系中, 得

$$u_{rd-}^+ = R_r i_{rd-}^+ + \sigma L_r \frac{di_{rd-}^+}{dt} + (\omega_e + \omega_r) \frac{L_m \lambda_{sq-}^+}{L_s} - (\omega_e - \omega_r) \sigma L_r i_{rq-}^+, \quad (23)$$

$$u_{rq-}^+ = R_r i_{rq-}^+ + \sigma L_r \frac{di_{rq-}^+}{dt} + (\omega_e - \omega_r) \sigma L_r i_{rd-}^+. \quad (24)$$

将式(15)与式(23)相加, 式(16)与式(24)相加可得正序同步旋转坐标系下DFIG转子电流控制方程:

$$\sigma L_r \frac{di_{rd}^+}{dt} = u_{rd}^+ - R_r i_{rd}^+ + (\omega_e - \omega_r) \sigma L_r i_{rq}^+ - \frac{\omega_r L_m \lambda_{sq}^+}{L_s} + \frac{\omega_e L_m (\lambda_{sq+}^+ - \lambda_{sq-}^+)}{L_s}, \quad (25)$$

$$\sigma L_r \frac{di_{rq}^+}{dt} = u_{rq}^+ - R_r i_{rq}^+ - (\omega_e - \omega_r) \sigma L_r i_{rd}^+, \quad (26)$$

其中:

$$F_{rd}^+ = F_{rd+}^+ + F_{rd-}^+, \quad F_{rq}^+ = F_{rq+}^+ + F_{rq-}^+.$$

3 电网电压不平衡工况下DFIG电磁转矩 (Electromagnetic torque of DFIG under unbalanced grid voltage)

电网电压不平衡工况下DFIG电磁转矩为

$$T_e = 1.5 L_m \text{Im}[i_{sdq}^s (i_{rdq}^s e^{j\omega_r t})^*]. \quad (27)$$

将式(1)–(2)代入式(27), 经过推导得

$$T_e = T_{e0} + \cos(2\omega_e t) T_{ec2} + \sin(2\omega_e t) T_{es2}, \quad (28)$$

其中: T_{e0} 为直流分量, T_{ec2} 和 T_{es2} 为2倍频分量的幅值, 其表达式如下:

$$T_{e0} = 1.5 L_m (i_{sq+}^+ i_{rd+}^+ - i_{sd+}^+ i_{rq+}^+ + i_{sq-}^- i_{rd-}^- - i_{sd-}^- i_{rq-}^-), \quad (29)$$

$$T_{ec2} = 1.5 L_m (i_{sq-}^- i_{rd+}^+ - i_{sd-}^- i_{rq+}^+ + i_{sq+}^+ i_{rd-}^- - i_{sd+}^+ i_{rq-}^-), \quad (30)$$

$$T_{es2} = 1.5 L_m (i_{sd+}^+ i_{rd-}^- + i_{sq+}^+ i_{rq-}^- - i_{sd-}^- i_{rd+}^+ - i_{sq-}^- i_{rq+}^+). \quad (31)$$

将(11)–(14)和(17)–(20)代入(29)–(31)得

$$T_{e0} = \frac{1.5 L_m (-u_{sd+}^+ i_{rd+}^+ + u_{sd-}^- i_{rd-}^-)}{\omega_e L_s}, \quad (32)$$

$$T_{ec2} = \frac{1.5 L_m (-u_{sd+}^+ i_{rd-}^- + u_{sd-}^- i_{rd+}^+)}{\omega_e L_s}, \quad (33)$$

$$T_{es2} = -\frac{1.5 L_m (u_{sd+}^+ i_{rq-}^- + u_{sd-}^- i_{rq+}^+)}{\omega_e L_s}. \quad (34)$$

根据式(28), 电网电压不平衡工况下DFIG电磁转矩由直流成分和2倍电网频率的交流成分组成; 根据式(30)–(31), 电磁转矩中2倍电网频率的波动是在正、负序电流共同作用下产生的。

DFIG运行于同步旋转速度 $\pm 30\%$ 以内的区域, 转差率 s 的变化范围在0.3之间, DFIG的负序转子等效电阻 $R_r/(2-s)$ 远小于正序转子等效电阻 R_r/s , 因此即使较小的负序电压也会引发较大的负序电流. 传统矢量控制策略未考虑负序电流的影响, 即使在较小的不平衡电网电压下, DFIG的电磁转矩也会存在较大的2倍电网频率波动. 此外, 不平衡电压也会导致DFIG的无功功率波动, 其成因与电磁转矩波动相同。

4 电网电压不平衡工况下DFIG控制系统 (Control system of DFIG under unbalanced grid voltage)

4.1 ADRC原理(Principle of ADRC)

ADRC包括跟踪微分器(TD)、扩张状态观测器(ESO)和非线性反馈控制律(NLSEF), 其各部分功能如下: TD基于广义微分理论提取微分信号, 解决了微分物理不可实现的问题, 并可实现对输入信号的快速无超调跟踪; ESO在观测对象状态变量的同时, 实时估计内外部扰动并加以补偿, 提高系统的鲁棒性; NLSEF采用非线性反馈控制代替线性加权组合的PID控制, 获得了更好的控制性能^[11]。

设有如下非线性不确定对象:

$$\dot{x} = b_0 u + w(t), \quad (35)$$

其中: $w(t)$ 为未知外扰; u 为控制输入; b_0 为控制输入系数。

适用于该对象的自抗扰控制器如下:

$$\begin{cases} \dot{z}_{11} = -R_1 \text{fal}(z_{11} - v, \alpha_0, \delta_0), \\ \varepsilon_2 = z_{21} - y, \\ \dot{z}_{21} = z_{22} - \beta_{21} \text{fal}(\varepsilon_2, \alpha_2, \delta_2) + b_0 u, \\ \dot{z}_{22} = -\beta_{22} \text{fal}(\varepsilon_2, \alpha_2, \delta_2), \\ \varepsilon_1 = z_{11} - z_{21}, \\ u_0 = \beta_{11} \text{fal}(\varepsilon_1, \alpha_1, \delta_1) + \beta_{12} \text{fal}(\dot{\varepsilon}_1, \alpha_1, \delta_1), \\ u' = u_0 - \frac{z_{22}}{b_0}, \end{cases} \quad (36)$$

其中: $R_1, \beta_{11}, \beta_{12}, \beta_{21}, \beta_{22}, \alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \delta_0, \delta_1, \delta_2$ 均为自抗扰控制器参数. 非线性函数取为

$$\text{fal}(\varepsilon, \alpha, \delta) = \begin{cases} |\varepsilon|^\alpha \text{sgn} \varepsilon, & |\varepsilon| > \delta, \\ \frac{\varepsilon}{\delta^{1-\alpha}}, & |\varepsilon| \leq \delta. \end{cases} \quad (37)$$

4.2 转子参考电流值计算(Calculation of rotor current reference)

由式(33)–(34)可知, 为了使电磁转矩的2倍频成分为零, 负序转子电流的参考值应设定为

$$i_{rd-\text{ref}}^- = \frac{u_{sd-}^- i_{rd+}^+}{u_{sd+}^+}, \quad (38)$$

$$i_{rq-\text{ref}}^- = -\frac{u_{sd-}^- i_{rq+}^+}{u_{sd+}^+}. \quad (39)$$

将负序转子电流参考值通过坐标变换到正序同步旋转坐标下,得

$$i_{rd-ref}^+ = e^{-j2\omega_e t} i_{rd-ref}^- = e^{-j2\omega_e t} \frac{u_{sd-}^- i_{rd+}^+}{u_{sd+}^+}, \quad (40)$$

$$i_{rq-ref}^+ = e^{-j2\omega_e t} i_{rq-ref}^- = -e^{-j2\omega_e t} \frac{u_{sd-}^- i_{rq+}^+}{u_{sd+}^+}. \quad (41)$$

正序转子电流用于控制电磁转矩和无功功率的直流成分,其参考值由外环的PI控制器产生:

$$i_{rd+ref}^+ = (T_{e0.ref} - T_{e0})(k_p + \frac{k_i}{s}), \quad (42)$$

$$i_{rq+ref}^+ = (Q_{s0.ref} - Q_{s0})(k_p + \frac{k_i}{s}). \quad (43)$$

转子电流参考值为正、负序参考值之和为

$$i_{rd.ref}^+ = i_{rd+ref}^+ + i_{rd-ref}^+, \quad (44)$$

$$i_{rq.ref}^+ = i_{rq+ref}^+ + i_{rq-ref}^+. \quad (45)$$

4.3 电网电压不平衡工况下DFIG控制系统设计(Control system design of DFIG under unbalanced grid voltage)

在转子电流控制方程(25)-(26)的推导过程中,忽略了定子电阻压降和定子暂态磁通,同时发电机运行过程中由于励磁饱和、温升等原因,参数会发生变化.因此,将上述定子电阻压降、定子暂态磁通、参数误差等对控制系统的影响统一视为扰动,表示

为 w_d 和 w_q ,作用于转子电流控制方程:

$$\sigma L_r \frac{d}{dt} i_{rd}^+ = u_{rd}^+ - R_r i_{rd}^+ + (\omega_e - \omega_r) \sigma L_r i_{rq}^+ - \frac{\omega_r L_m \lambda_{sq}^+}{L_s} + \frac{\omega_e L_m (\lambda_{sq+}^+ - \lambda_{sq-}^+)}{L_s} + w_d, \quad (46)$$

$$\sigma L_r \frac{d}{dt} i_{rq}^+ = u_{rq}^+ - R_r i_{rq}^+ - (\omega_e - \omega_r) \sigma L_r i_{rd}^+ + w_q. \quad (47)$$

令控制器的输出为

$$u_{rd}^+ = u_{rd}'^+ + R_r i_{rd}^+ - (\omega_e - \omega_r) \sigma L_r i_{rq}^+ + \frac{\omega_r L_m \lambda_{sq}^+}{L_s} - \frac{\omega_e L_m (\lambda_{sq+}^+ - \lambda_{sq-}^+)}{L_s}, \quad (48)$$

$$u_{rq}^+ = u_{rq}'^+ + R_r i_{rq}^+ + (\omega_e - \omega_r) \sigma L_r i_{rd}^+, \quad (49)$$

则式(46)-(47)可表示为

$$\frac{d}{dt} i_{rd}^+ = \frac{u_{rd}'^+ + w_d}{\sigma L_r}, \quad (50)$$

$$\frac{d}{dt} i_{rq}^+ = \frac{u_{rq}'^+ + w_q}{\sigma L_r}. \quad (51)$$

根据式(50)-(51)分别设计转子绕 d 、 q 轴电流的ADRC,通过ESO实时估计扰动 w_d 和 w_q 对系统的影响并加以前馈补偿,从而提高系统的鲁棒性,使转子电流跟踪给定参考值.设计的 d 轴转子电流ADRC如图1所示, q 轴ADRC与 d 轴相似.

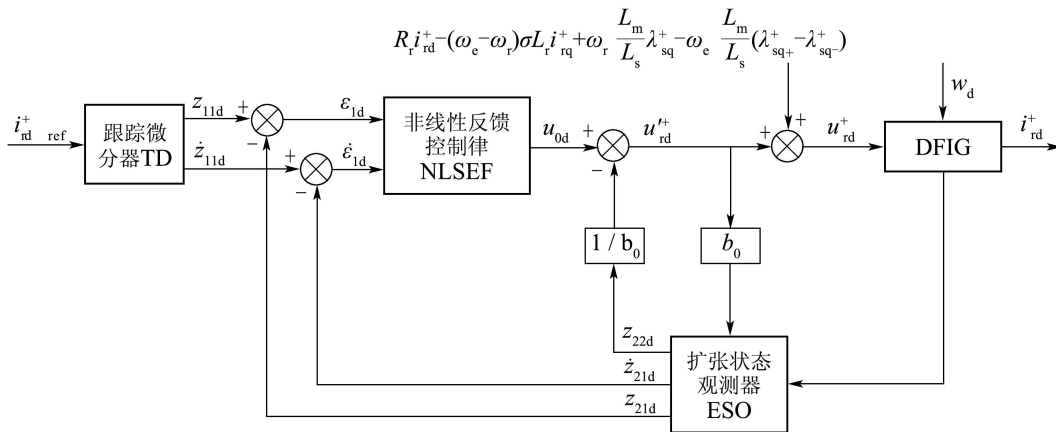


图1 d 轴转子电流的ADRC

Fig. 1 ADRC of d -axis rotor current

根据不平衡电网电压下DFIG的数学模型和制定的控制策略,建立如图2所示的DFIG控制系统,其中:电磁转矩参考值为风力机转速的函数,其控制目标是使风力机跟踪最佳功率曲线,无功功率参考值为零.

4.4 正负序分离(Decomposition of positive- and negative-sequence components)

为实现电网电压不平衡工况下DFIG的控制,

必须将正、负序分量从不平衡电磁量中提取出来.

正序分量以同步旋转速度正向旋转,因此在正序同步旋转坐标系中体现为直流量,在负序同步旋转坐标系中体现为2倍电网频率的交流量;

同理,负序分量以同步旋转速度反向旋转,因此在负序同步旋转坐标系中体现为直流量,在正序同步旋转坐标系中体现为2倍电网频率的交流量.

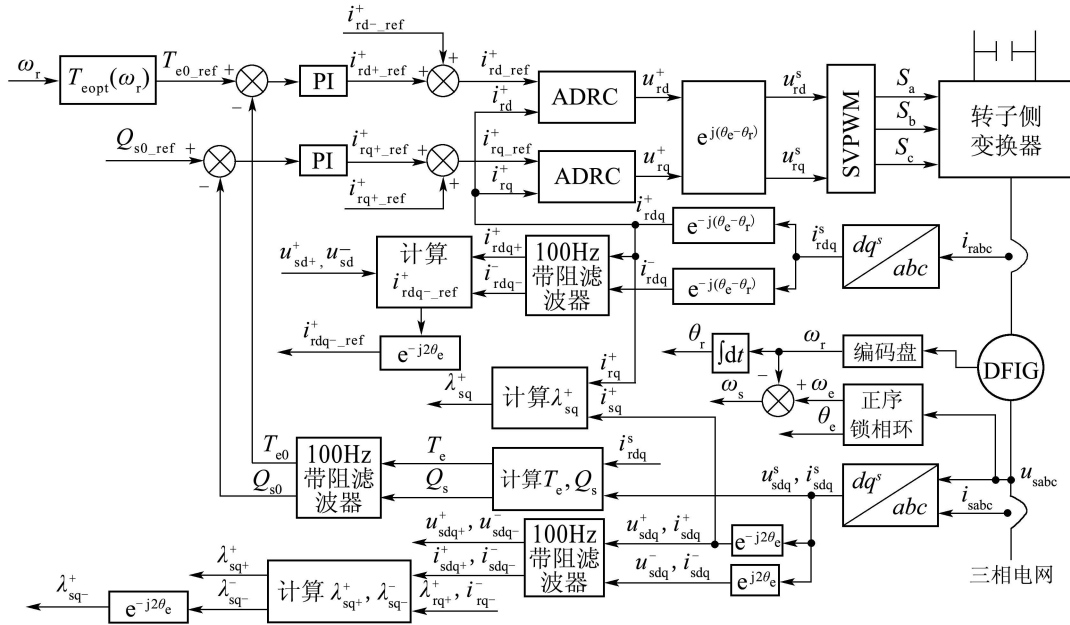


图 2 电网电压不平衡工况下DFIG控制原理框图

Fig. 2 Diagram of proposed DFIG control scheme under unbalanced grid voltage conditions

鉴于以上特点, 本文采用图3所示的正负序分离方法, 其原理如下: 将不平衡电磁量经旋转坐标变换分别变换到正、负序同步旋转坐标系中, 根据不平衡电磁量在正、负序同步旋转坐标系中均体现为直流分量和100 Hz交流分量叠加的特点, 在正、负序同步旋转坐标系中分别采用100 Hz带阻滤波器滤除2倍电网频率的交流成分, 保留直流成分, 即可从不平衡电磁量中提取出正、负序分量。

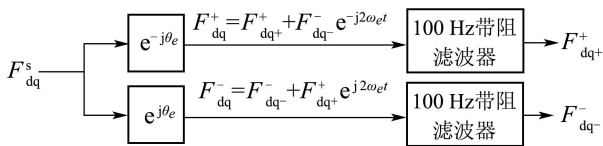


图 3 正负序分离方法框图

Fig. 3 Block diagram of decomposition scheme of positive and negative-sequence components

5 仿真结果(Simulation results)

在 MATLAB/SIMULINK 的环境下建立 9 MW 的 DFIG 风力发电机组的仿真模型, 代表一个由 6 台 1.5 MW 风机组成的风电场, 分别进行暂态和稳态仿真分析。DFIG 参数: 额定功率 9 MW, 定子额定电压 690 V, 定子电阻 0.00706 pu, 定子漏感 0.171 pu, 转子电阻 0.005 pu, 转子漏感 0.156 pu, 励磁电感 2.9 pu, 惯性时间常数 5.04 s, 极对数 3。

5.1 暂态仿真(Transient simulations)

风电场接入点电压在 0.3 s 时出现 5% 的不平衡, 在 0.9 s 时恢复到平衡状态, 针对这种电网故障进行

了传统矢量控制方法和本文方案的仿真对比, 仿真结果如图 4 所示。

从图 4(a) 可以看出, 传统的矢量控制策略由于没有考虑各电磁量的负序成分的影响, 即使较小的不平衡电压也会导致较大的不平衡电流, 从而使电磁转矩和无功功率以 2 倍电网频率波动。不平衡电流将会使发电机绕组出现不平衡加热; 电磁转矩的 2 倍频波动将产生严重的冲击应力, 影响风力机组的工作寿命, 并造成噪声污染; 无功功率的 2 倍频波动将影响电网的稳定运行。

从图 4(b) 可以看出, 在增加了负序补偿量, 并采用 ADRC 控制后, 发电机的电磁转矩波动大大减小, 有利于延长风电机组的工作寿命; 同时发电机的电流不平衡程度, 无功功率波动也有所减小, 有利于电网的安全稳定运行; 由于对负序成分的抑制是以增加转子控制电压补偿量为代价的, 因此, 直流母线电容电压波动没有得到改善。

5.2 稳态仿真(Steady simulations)

改变定子电压不平衡因数(VUF), 分别绘制传统矢量控制和 ADRC 控制在稳态情况下电磁转矩波动幅值、无功功率波动幅值和定子电流不平衡因数(CUF), 如图 4 所示(VUF 和 CUF 定义为电压和电流的负序分量幅值与正序分量幅值之比)。

从图 5 可见, 与传统矢量控制方法相比, 提出的控制方法在电网电压不平衡工况下, 能很好的减小电磁转矩波动、无功功率波动和定子电流不平衡程度。

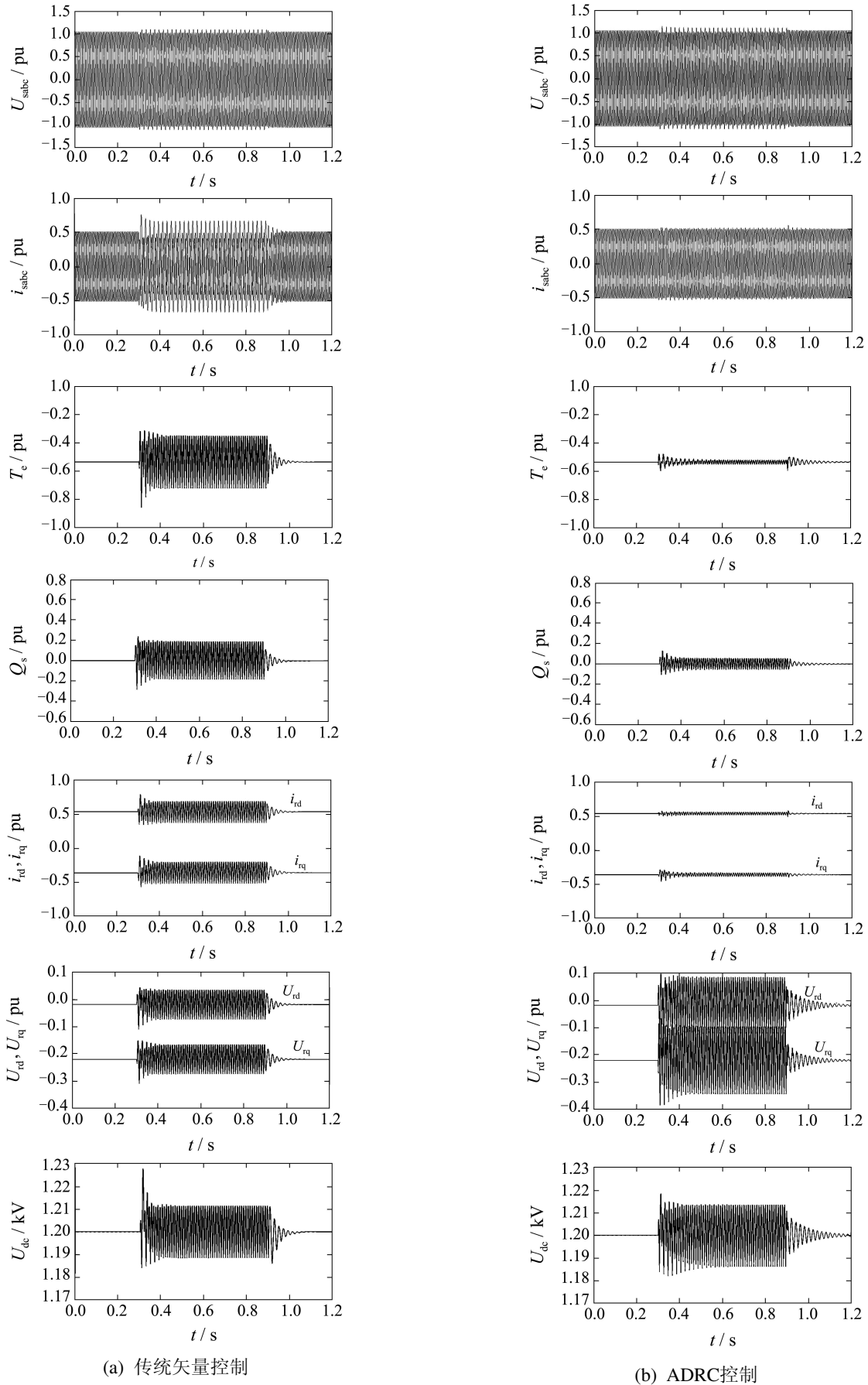


图4 电网电压不平衡工况下传统控制与ADRC控制的仿真对比

Fig. 4 Comparison of conventional and ADRC control under unbalanced grid voltage

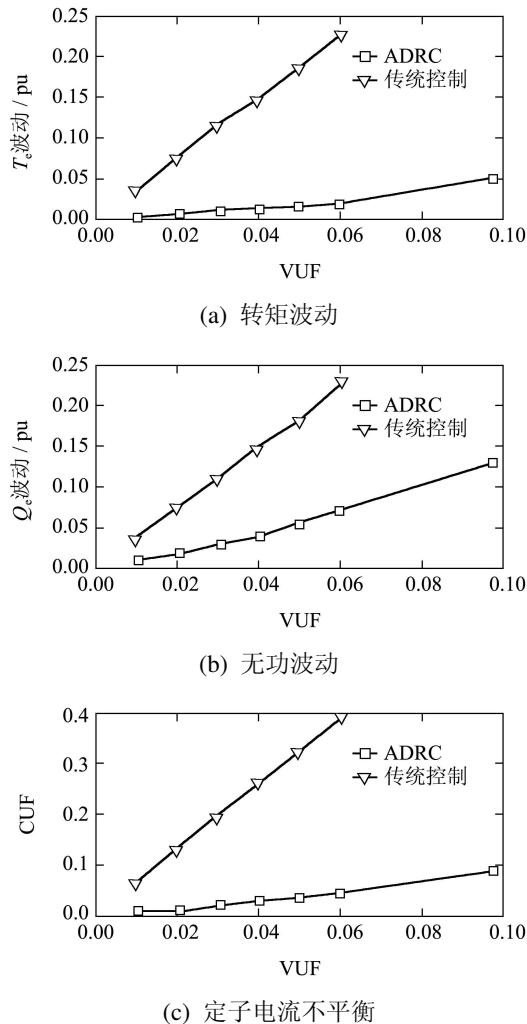


图5 不同电压不平衡因数下的稳态仿真对比

Fig. 5 Comparison of conventional and ADRC control under different unbalanced voltage factor

6 结论(Conclusion)

基于正、负序同步旋转坐标系下DFIG模型, 推导了电网电压不平衡工况下电磁转矩2倍频成分的表达式, 计算出抵消电磁转矩波动所需的负序转子电流, 将其叠加到正序转子电流参考值上, 以抑制电磁转矩波动。设计了转子电流自抗扰控制器, 利用ADRC的优越特性实现对转子电流的有效控制, 减少控制器对发电机精确模型的依赖。

在MATLAB/SIMULINK中的暂态和稳态仿真结果表明: 传统的矢量控制策略即使在较小的不平衡电网电压下, 也会产生较大的2倍频转矩和无功功率波动, 影响电网的稳定运行和风力机组的工作寿命, 同时会产生较大的不平衡电流, 使发电机绕组出现不平衡加热; 在增加了负序补偿量, 并采用ADRC控制后, 发电机电磁转矩和无功功率波动大大减小, 不平衡电流也得到很大抑制, 有效的提高了电网的稳定性并延长了风力机组的工作寿命。

参考文献(References):

- [1] 吴捷, 杨俊华. 绿色能源与生态环境控制[J]. 控制理论与应用, 2004, 21(6): 864 – 869.
(WU Jie, YANG Junhua. Control on green energy source and ecologic environment[J]. *Control Theory & Applications*, 2004, 21(6): 864 – 869.)
- [2] 郑雪梅, 李琳, 徐殿国. 双馈风力发电系统最大风能追踪滑模变结构控制[J]. 控制理论与应用, 2010, 27(7): 923 – 926.
(ZHENG Xuemei, LI Lin, XU Dianguo. Sliding-mode control of maximum power-point tracking in wind-power system for doubly-fed induction generator[J]. *Control Theory & Applications*, 2010, 27(7): 923 – 926.)
- [3] LUNA A, de ARAUJO L F K, SANTOS D, et al. Simplified modeling of a DFIG for transient studies in wind power applications[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, 58(1): 9 – 20.
- [4] YAN X, VENKATARAMANAN G, FLANNERY P S, et al. Voltage-sag tolerance of DFIG wind turbine with a series grid side passive-impedance network[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2010, 25(4): 1048 – 1056.
- [5] 向大为, 杨顺昌, 冉立. 电网对称故障时双馈感应发电机不脱网运行的励磁控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(3): 164 – 170.
(XIANG Dawei, YANG Shunchang, RAN Li. Ride-through control strategy of a doubly fed induction generator for symmetrical grid fault[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2006, 26(3): 164 – 170.)
- [6] 包能胜, 朱瑞丹, 倪维斗. 双馈型机组风电场三相电网短路故障暂态特性分析[J]. 控制理论与应用, 2008, 25(1): 141 – 144.
(BAO Nengsheng, ZHU Ruidan, NI Weidou. Three phase short circuit fault transient analysis of wind farm installed with DFIG wind turbine system[J]. *Control Theory & Applications*, 2008, 25(1): 141 – 144.)
- [7] MULJADI E, YILDIRIM D, BATAN T. Understanding the unbalanced-voltage problem in wind turbine generation[C] // *The 34th IEEE Industry Applications Conference*. New York: IEEE, 1999, (s): 3 – 7.
- [8] RATHI M R, JOSE P P, MOHAN N. A novel H_{∞} -based controller for wind turbine applications operating under unbalanced voltage conditions[C] // *The 13th International Conference on Intelligent Systems Application to Power Systems*. Piscataway: IEEE, 2005: 1 – 6.
- [9] XU L, WANG Y. Dynamic modeling and control of DFIG-based wind turbines under unbalanced network conditions[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2007, 22(1): 314 – 323.
- [10] 胡家兵, 贺益康, 郭晓明, 等. 不平衡电压下双馈异步风力发电系统的建模与控制[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(14): 47 – 56.
(HU Jiabing, HE Yikang, GUO Xiaoming, et al. Modeling and control of the DFIG based wind-power generation system under unbalanced grid voltage conditions[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2007, 31(14): 47 – 56.)
- [11] 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.)

作者简介:

陈思哲 (1981—), 男, 博士, 讲师, 目前研究方向为风力发电机组控制技术, E-mail: cszscut@126.com;

张 淼 (1968—), 男, 博士, 教授, 目前研究方向为风力发电中电力电子技术, E-mail: bezhangm@gdut.edu.cn;

吴 捷 (1937—), 男, 博士生导师, 主要从事智能控制在电力系统及新能源中的应用方面的研究工作, E-mail: epjiewu@scut.edu.cn;

唐雄民 (1977—), 男, 博士, 副教授, 目前研究方向为电力电子技术, E-mail: tangxiongmin@126.com.