

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2018.04.003

双馈式风电机组的自适应 Super-twisting 功率控制

陈 柳^{1,2}, 罗治伟², 张 虎², 王 磊²

(1.重庆科能高级技工学校,重庆 400043; 2.重庆大学 自动化学院,重庆 400044)

摘 要:针对使用双馈式感应发电机的风电机组易受电网电压波动、外界风速干扰影响等问题,提出了一种自适应 Super-twisting 功率控制方法。该方法实现了风电系统随着系统工作的区域(由风速大小所决定)而变化,即在部分负荷区域优化有功功率,在全负荷区域限制有功功率。同时,在不同的区域根据需要调节无功功率达到补偿功率因数的控制目标。该方法具有易于实现、鲁棒性强的优点和自适应控制增益可调的特点,适用于带有外界干扰以及参数时变的非线性系统。通过仿真证明,以该方法设计的控制器应用于双馈式风力发电系统中控制有功功率和无功功率具有良好的鲁棒性能,且抖振得到降低,滑模变量在有限时间内迅速收敛于滑模面。

关键词:自适应控制;双馈发电机;风电机组;功率控制

中图分类号:TP29

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2018)04-020-09

Power regulation for wind turbine based on adaptive Super-twisting control

CHEN Liu¹, LUO Zhiwei², ZHANG Hu², WANG Lei²

(1. Chongqing Keneng Senior Technical School, Chongqing 400043, P.R.China; 2. School of Automation, Chongqing University, Chongqing 400044, P.R.China)

Abstract: An adaptive Super-twisting control strategy is proposed to solve the problem that the wind turbine based on a doubly-fed induction generator (DFIG) is easy to be interfered with grid voltage fluctuation and external wind speed. The strategy realizes that control objectives vary with operation zones which depend on wind speed, that is, the active power is optimized in the partial load zone and the active power is limited in the full load zone. At the same time, the stator reactive power is adjusted according to the grid need to compensate the power factor in different regions. It has the advantages of easy implementation, strong robustness and adjustable gain of adaptive control, and is suitable for non-linear systems with external disturbances and time-varying parameters. The simulation results show that the controller designed by this strategy has good robustness in active power control and reactive power control in doubly-fed wind power generation system, the chattering is reduced and the sliding variables converge fast to the sliding manifolds in finite time.

Keywords: adaptive control; DFIG; wind turbine; power control

收稿日期:2017-11-02

基金项目:国家自然科学基金项目(51205046);重庆市博士后特别资助项目(XM2014003)。

Supported by National Natural Science Foundation of China (51205046) and the Postdoctoral Special Project Funded by Chongqing Government (XM2014003).

作者简介:陈柳(1981—),女,重庆大学硕士研究生,主要从事新能源系统控制方法研究,(E-mail)8304455@qq.com。

王磊(联系人),男,重庆大学副教授,主要从事风电系统动力学与控制研究,(E-mail)leiwang08@cqu.edu.cn。

双馈式感应电机已经广泛应用于并网的变速恒频风力发电系统中^[1-2]。随着风力发电在供电体系中所占的比重快速增加,对双馈式风力发电机组的要求也越来越高。因此提高发电效率、减小负荷和降低机械效应,从而提高系统可靠性、延长使用寿命、降低发电成本成为研究的热点^[3]。双馈式感应电机是一个多变量非线性系统,对其采用的控制方法主要分为两类:线性控制和非线性控制。然而,线性控制主要借助泰勒公式对系统的动态模型在特定的区域线性化,该方法仅有效作用于线性化区域,过于依赖系统的精确模型,且对参数变化、外界干扰的鲁棒性不强^[3-4]。非线性控制主要有模糊控制^[5]、神经网络控制^[6]、反馈线性化控制^[7]以及滑模控制^[8]。滑模控制对系统参数变化和外界干扰鲁棒性强,相较于其他的非线性控制具有响应速度快、控制器易于工程实现,具有严格的稳定性等优点^[8-9]。

抖振现象是滑模控制所固有的特性,抖振的大小与控制输入的幅值成正比,是阻碍滑模控制应用的主要原因^[10]。传统的抑制抖振的方法主要采用高阶滑模控制、动态增益、趋近律等方法^[11]。高阶滑模通常需要计算滑模变量的高阶导数,而二阶滑模中的 Super-twisting 算法,不需要滑模变量导数信息。但是该算法控制增益的精确确定需要干扰项可微且有具体界值,在实际控制中这个界值却很难准确获得^[9-12]。故笔者选用自适应滑模控制,根据滑模变量的大小调节控制增益,以降低抖振。

笔者结合高阶滑模控制、自适应控制在抑制抖振现象中各自的优点,将自适应 Super-twisting 算法应用于风力发电系统中,不需要确定干扰项的准确界值即可确定控制增益。首先分析了风力发电系统以及双馈式感应电机在同步旋转坐标系下的降阶模型。接着将上述方法应用于双馈式发电机的变速恒频风力发电系统中,可通过调节风力发电机的转矩控制有功功率,实现低风速时最大风能捕获和高风速时额定功率运行。同时,根据电网功率因数需求调节定子侧无功功率,提高系统运行的动、静态性能。最后通过仿真验证了该可控制方案的可行性。

1 风机简介

风机从风能中捕获的机械功率 P_w 以及风机获得的机械转矩 T_w 可以表示为^[3-4]

$$P_w = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p(\lambda, \beta) v^3, \quad (1)$$

$$T_w(\omega_{rm}) = \frac{P_w}{\omega_{rm}} = \frac{\rho \pi R^5 C_p(\lambda, \beta) \omega_{rm}^3}{2\lambda^3}, \quad (2)$$

式中: ρ 是空气密度; R 是风机的叶片半径; v 是风速; β 是桨距角; ω_{rm} 是风机的转速; $\lambda = \omega_{rm} R / v$ 是叶尖速比; $C_p(\lambda, \beta)$ 是风能利用系数,与参数 β, λ 相关,可以表示为

$$\begin{cases} C_p(\lambda, \beta) = \frac{1}{2} \left(\frac{116}{\lambda_1} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-\frac{21}{\lambda_1}}, \\ \frac{1}{\lambda_1} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}. \end{cases} \quad (3)$$

$C_p(\lambda, \beta)$ 的特性曲线如图 1 所示,对于不同的 β 总存在唯一的 λ 使 C_p 取得极大值。当 $\beta = 0, \lambda_{opt} = 8.1$ 时, C_p 取得最大值 $C_{pmax} = 0.41$ 。

当风速达到切入风速 v_{cut-in} 时,风机开始启动;当风速达到额定风速 v_{rate} ,发电功率达到额定值;当风速达到切出速度 $v_{cut-out}$,风机停止运行^[14]。不同风速区域的控制目标不同,如图 2 所示。

为了分析的方便,可以将风机运行过程主要分为 3 部分。

1) 当风速在 v_{cut-in} 与 v_{rate} 区间时,即部分负荷区域,控制的目标是最大限度获得电能,即最大功率跟踪,此时通常保持 β 为零,使 $\lambda = \lambda_{opt}$,则 $C_p = C_{pmax}$ 。此时风机的机械转矩 T_{opt} 与风机的转速相关,即

$$T_{opt}(\omega_{rm}) = \frac{\rho \pi R^5 C_{pmax} \omega_{rm}^2}{2\lambda_{opt}^3}. \quad (4)$$

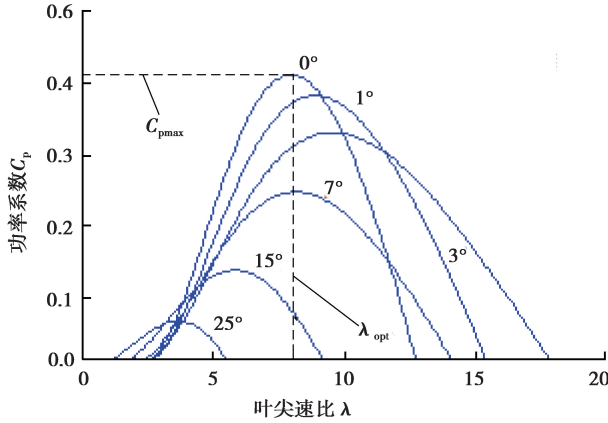


图 1 功率系数 $C_p(\lambda, \beta)$ 曲线图

Fig.1 curves of wind power coefficient

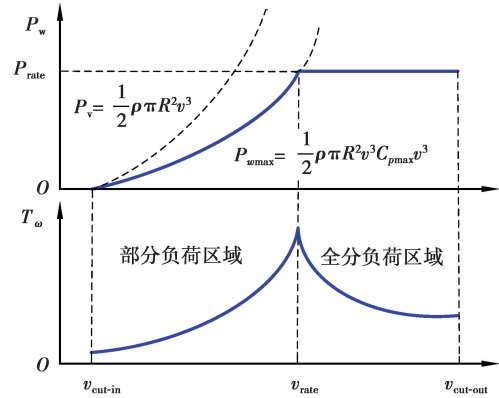


图 2 有功功率分区域控制目标

Fig.2 the aim of active power in different zones

2) 当风速在 v_{rate} 与 $v_{cut-out}$ 区间时,即全负荷区域,控制的目标是保持从风中获得的功率为额定功率,可以通过调节 β 和 λ 来实现^[8]。通过控制电磁转矩和桨距角调节 C_p ,进而控制功率。桨距系统可看作一阶惯性环节,且惯性系数为 T ,若风机获得功率为 P_t ,则桨距角的控制如图 3 所示。

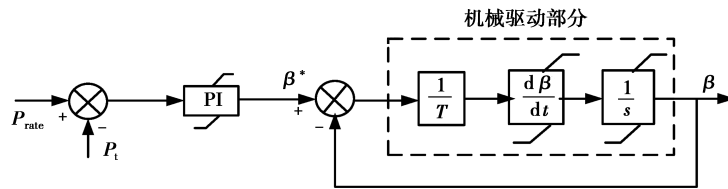


图 3 桨距角控制结构图

Fig.3 Control structure diagram of pitch angle

此时风机机械转矩与额定功率和风机转速相关,即

$$T_{opt}(\omega_{rm}) = \frac{P_{rate}}{\omega_{rm}} \tag{5}$$

3) 当风速达到 $v_{cut-out}$,为了风机免遭破坏需停止风机运行。

若忽略机组的阻尼系数、刚度系数,则风力发电机的简化轴动态运动方程可以表示为^[13-14]

$$J_t \dot{\omega}_{rm} = T_w(\omega_{rm}) - T_g, \tag{6}$$

式中: $T_g = k_g T_e$ 是发电机电磁转矩在风机侧的等效值; $J_t = J_r + k_g^2 J_g$ 是系统的总转动惯量。其中, k_g 是增速箱的增速比, T_e 是发电机的电磁转矩, J_r, J_g 分别是风机与发电机的转动惯量。

为了使系统按照既定的目标稳定运行,根据公式(4)(5)可知发电机电磁转矩的参考值 T^* 应当满足:

$$T^*(\omega_{rm}) = \begin{cases} \frac{\rho \pi R^5 C_{pmax}}{2 \lambda_{opt}^3 k_g} \omega_{rm}^2, v \leq v_{rate}; \\ \frac{P_{rate}}{\omega_{rm} k_g}, v_{rate} < v < v_{cut}; \\ 0, v > v_{rate}. \end{cases} \tag{7}$$

2 双馈式感应发电机的降阶模型

在两相同步旋转 d, q 坐标系下,双馈式感应发电机的定子和转子电压可以表示为^[15]

$$\begin{cases} u_{sd} = \dot{\psi}_{sd} + R_s i_{sd} - \omega_s \psi_{sq}, \\ u_{sq} = \dot{\psi}_{sq} + R_s i_{sq} + \omega_s \psi_{sd}, \\ u_{rd} = \dot{\psi}_{rd} + R_r i_{rd} - (\omega_s - p\omega_r) \psi_{rq}, \\ u_{rq} = \dot{\psi}_{rq} + R_r i_{rq} + (\omega_s - p\omega_r) \psi_{rd}. \end{cases} \quad (8)$$

式中: ψ_{sd}, ψ_{sq} 和 ψ_{rd}, ψ_{rq} 分别是定子磁链和转子磁链在 d, q 轴分量, 满足

$$\begin{cases} \psi_{sd} = L_s i_{sd} + L_m i_{rd}, \\ \psi_{sq} = L_s i_{sq} + L_m i_{rq}, \\ \psi_{rd} = L_r i_{rd} + L_m i_{sd}, \\ \psi_{rq} = L_r i_{rq} + L_m i_{sq}. \end{cases} \quad (9)$$

其中, u_{sd}, u_{sq} 和 u_{rd}, u_{rq} ($i_{rd}, i_{rq}, i_{sd}, i_{sq}$) 分别是定子和转子电压(电流)在 d, q 轴分量; R_s, R_r 分别是定子电阻和转子电阻; ω_s, ω_r 分别是网侧电压频率、电机转子角速度, p 为电磁极对数, L_s, L_r 和 L_m 分别是定子、转子自感和定子与转子绕组间的互感。

为了简化系统模型达到对系统进行降阶的目的, 假定同步旋转坐标系的 d 轴与定子磁链方向一致, 即 $\psi_{sd} = \psi_s, \psi_{sq} = 0$, 且忽略定子绕组的电阻^[8,15]。 U_s 为网侧电压, 满足 $U_s = \sqrt{u_{sd}^2 + u_{sq}^2}$, 则由式(8)前两项可得 $u_{sd} = 0, u_{sq} \approx \psi_s \cdot \omega_s = U_s$ 。由式(9)前两项可得 $i_{sd} = (U_s/\omega_s - L_m i_{rd})/L_s, i_{sq} = -L_m i_{rq}/L_s$, 并将其代入式(9)后两项可得

$$\begin{cases} \psi_{rd} = L_m U_s / (\omega_s L_s) + \sigma i_{rd} / L_s, \\ \psi_{rq} = \sigma i_{rq} / L_s. \end{cases} \quad (10)$$

其中 $\sigma = L_s L_r - L_m^2$ 。

将式(10)代入式(8)后两项可得:

$$\begin{cases} \frac{d i_{rd}}{dt} = \frac{L_s}{\sigma} (u_{rd} - R_r i_{rd}) + (\omega_s - p\omega_r) i_{rq}, \\ \frac{d i_{rq}}{dt} = \frac{L_s}{\sigma} (u_{rq} - R_r i_{rq}) - (\omega_s - p\omega_r) \left(\frac{L_m U_s}{\sigma \omega_s} + i_{rd} \right). \end{cases} \quad (11)$$

电磁转矩以及定子侧无功功率可表示为^[1,15]

$$\begin{cases} T_e = \frac{3pL_m}{2L_s} (\psi_{sq} i_{rd} - \psi_{sd} i_{rq}) = -\frac{3U_s p L_m i_{rq}}{2L_s \omega_s}, \\ Q_s = \frac{3}{2} (u_{sq} i_{sd} - u_{sd} i_{sq}) = \frac{3U_s}{2L_s} \left(\frac{U_s}{\omega_s} - L_m i_{rd} \right). \end{cases} \quad (12)$$

3 控制器的设计

3.1 自适应 Super-twisting 控制

对于一个单输入单输出非线性控制系统,

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(t, \mathbf{x}) + \mathbf{g}(t, \mathbf{x}) \mathbf{u}, \quad (13)$$

其中 $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^n$ 和 $\mathbf{u} \in \mathbf{R}$ 分别是系统的状态和输入; $\mathbf{f}(t, \mathbf{x}) \in \mathbf{R}^n$ 可微有界; $\mathbf{g}(t, \mathbf{x}) \in \mathbf{R}$ 是控制向量。根据期望的动态性能构建滑模变量 $\mathbf{s} = \mathbf{s}(t, \mathbf{x})$, 若系统的动态性能稳定, 则动态性能可表示为^[11]:

$$\dot{\mathbf{s}} = \underbrace{\frac{\partial \mathbf{s}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{s}}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{f}(t, \mathbf{x})}_{\varphi(t, \mathbf{x})} + \underbrace{\frac{\partial \mathbf{s}}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{g}(t, \mathbf{x}) \mathbf{u}}_{h(t, \mathbf{x})}. \quad (14)$$

式中: $\varphi(t, \mathbf{x})$ 是扰动项; $h(t, \mathbf{x})$ 是控制项。滑模控制由两部分组成^[15]: 等效输入 \mathbf{u}_{eq} 和切换输入 \mathbf{u}_w , 即

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_{eq} + \mathbf{u}_w. \quad (15)$$

1) 等效输入: 可使系统在无外界干扰的情况下沿滑模面运动, 影响着系统的响应速度和静态误差。若 $\mathbf{B}(t, x) \neq 0$, 令 $\dot{\mathbf{s}} = 0$, 可得等效输入 $\mathbf{u}_{\text{eq}} = -\mathbf{B}^{-1}(t, x)\varphi(t, x)$ 。

2) 切换输入: 使系统从任意初始阶段趋向于滑模面。自适应 Super-twisting 不需滑模变量一阶导数就可以使系统的滑模变量及其一阶导数在有限的时间内到达滑模面 $\mathbf{s}(t, x) = \dot{\mathbf{s}}(t, x) = 0$, 该算法可以表示为^[11]

$$\begin{cases} \mathbf{u}_w = -\alpha |\mathbf{s}|^{1/2} \text{sign } \mathbf{s} + \mathbf{v}, \\ \dot{\mathbf{v}} = -\beta \text{sign } \mathbf{s}. \end{cases} \quad (16)$$

式中控制增益 α, β 满足

$$\begin{cases} \dot{\alpha} = \begin{cases} \omega \sqrt{\frac{\gamma}{2}} \text{sign}(|\mathbf{s}| - \alpha), \alpha \geq \alpha_m; \\ \eta, \alpha < \alpha_m. \end{cases} \\ \beta = 2\epsilon\alpha. \end{cases} \quad (17)$$

$\omega, \gamma, u, \eta, \epsilon, \alpha_m$ 为任意的正实数。为避免滑模变量在滑模面附近时控制增益估值过高, 增加抖振效应; 同时又为防止滑模变量远离滑模面时控制增益估值过小, 影响系统的快速性, 建立一个观测区域 $M: \{\mathbf{s}, |\mathbf{s}| \leq u\}$ 。当 \mathbf{s} 到达该区域, $\alpha(t), \beta(t)$ 的取值开始下降, 以降低脉动; 当 \mathbf{s} 离开该区域, $\alpha(t), \beta(t)$ 的取值开始上升直至 \mathbf{s} 再次进入该区域, 以提高系统控制的快速性。文献[11]已对该算法稳定性进行了证明。

3.2 风力发电系统控制器设计

为了实现风力发电系统发电功率在不同风区调节, 并实现功率补偿, 可以通过控制电磁转矩调节风机转速, 进而控制发电机输出功率。这里选用加入积分环节的滑模变量 s_T, s_Q , 以消除静态误差, 即

$$\begin{cases} s_T = T_e - T^* + c_T \int (T_e - T^*) dt, \\ s_Q = Q_s - Q^* + c_Q \int (Q_s - Q^*) dt. \end{cases} \quad (18)$$

式中: c_T, c_Q 为积分系数; T^*, Q^* 分别是电磁转矩参考值、无功功率参考值, 其中 T^* 由风速大小和额定功率决定, Q^* 可以根据网侧功率补偿的实际需要加以调整。对 s_T, s_Q 分别求一阶导数, 可得:

$$\begin{cases} \dot{s}_T = c_T (T_e - T^*) - \dot{T}^* - \frac{3pL_m U_s}{2L_s \omega_s} \left\{ \frac{L_s}{\sigma} \times (u_{rq} - R_r i_{rq}) - (\omega_s - p\omega_r) \left(\frac{L_m U_s}{\sigma \omega_s} + i_{rd} \right) \right\}, \\ \dot{s}_Q = c_Q (Q_s - Q^*) - \dot{Q}^* - \frac{3L_m U_s}{2L_s} \left\{ \frac{L_s}{\sigma} \times (u_{rd} - R_r i_{rd}) + (\omega_s - p\omega_r) i_{rq} \right\}. \end{cases} \quad (19)$$

其中

$$\begin{cases} \partial \dot{s}_T / \partial u_{rq} = -3pL_m U_s / (2\omega_s \sigma) \neq 0, \\ \partial \dot{s}_Q / \partial u_{rd} = -3L_m U_s / 2\sigma \neq 0. \end{cases} \quad (20)$$

从式(20)可知, 此系统的相对度为 1, 可选用自适应 Super-twisting 滑模控制。滑模控制输入 u_{rq}, u_{rd} 可以分别表示为

$$\begin{cases} \mathbf{u}_{rq} = \mathbf{u}_{rq\text{eq}} + \mathbf{u}_{rqw}, \\ \mathbf{u}_{rd} = \mathbf{u}_{rd\text{eq}} + \mathbf{u}_{rdw}. \end{cases} \quad (21)$$

式中 $\mathbf{u}_{rq\text{eq}}, \mathbf{u}_{rd\text{eq}}$ 为等效输入, 可以通过令 $\dot{s}_T = \dot{s}_Q = 0$ 求得; $\mathbf{u}_{rqw}, \mathbf{u}_{rdw}$ 为系统的切换输入, 采用自适应 Super-twisting 滑模控制求之。故控制输入 $\mathbf{u}_{rq}, \mathbf{u}_{rd}$ 为

$$\begin{cases} \mathbf{u}_{rq\text{eq}} = -\frac{2\sigma\omega_s}{3pL_m U_s} [\dot{T}^* + c_T (T^* - T_e)] + R_r i_{rd} + \frac{\omega_s - p\omega_r}{L_s} \left(\frac{U_s L_m}{\omega_s} + \sigma i_{rd} \right), \\ \mathbf{u}_{rqw} = -\alpha_T |\mathbf{s}_T|^{1/2} \text{sign } \mathbf{s}_T - \int \beta_T \text{sign } \mathbf{s}_T dt. \end{cases} \quad (22)$$

$$\begin{cases} u_{rd\text{eq}} = -\frac{2\sigma}{3L_m U_s} [\dot{Q}^* + c_Q(Q^* - Q_s)] + R_r i_{rd} - (\omega_s - p\omega_r) \frac{\sigma i_{rq}}{L_s}, \\ u_{rdw} = -\alpha_Q |s_Q|^{1/2} \text{sign } s_Q - \int \beta_Q \text{sign } s_Q dt. \end{cases} \quad (23)$$

式(22)(23)中 $\alpha_T, \beta_T, \alpha_Q, \beta_Q$ 满足

$$\begin{cases} \dot{\alpha}_T = \begin{cases} \omega_T \sqrt{\frac{\gamma_T}{2}} \text{sign}(|s_T| - u_T), \alpha_T \geq \alpha_{mr}; \\ \eta_T, \alpha_T < \alpha_{mr}. \end{cases} \\ \beta_T = 2\epsilon_T \alpha_T. \end{cases} \quad (24)$$

$$\begin{cases} \dot{\alpha}_Q = \begin{cases} \omega_Q \sqrt{\frac{\gamma_Q}{2}} \text{sign}(|s_Q| - u_Q), \alpha_Q \geq \alpha_{mq}; \\ \eta_Q, \alpha_Q < \alpha_{mq}. \end{cases} \\ \beta_Q = 2\epsilon_Q \alpha_Q. \end{cases} \quad (25)$$

根据以上分析得该系统的结构图如图 4 所示。

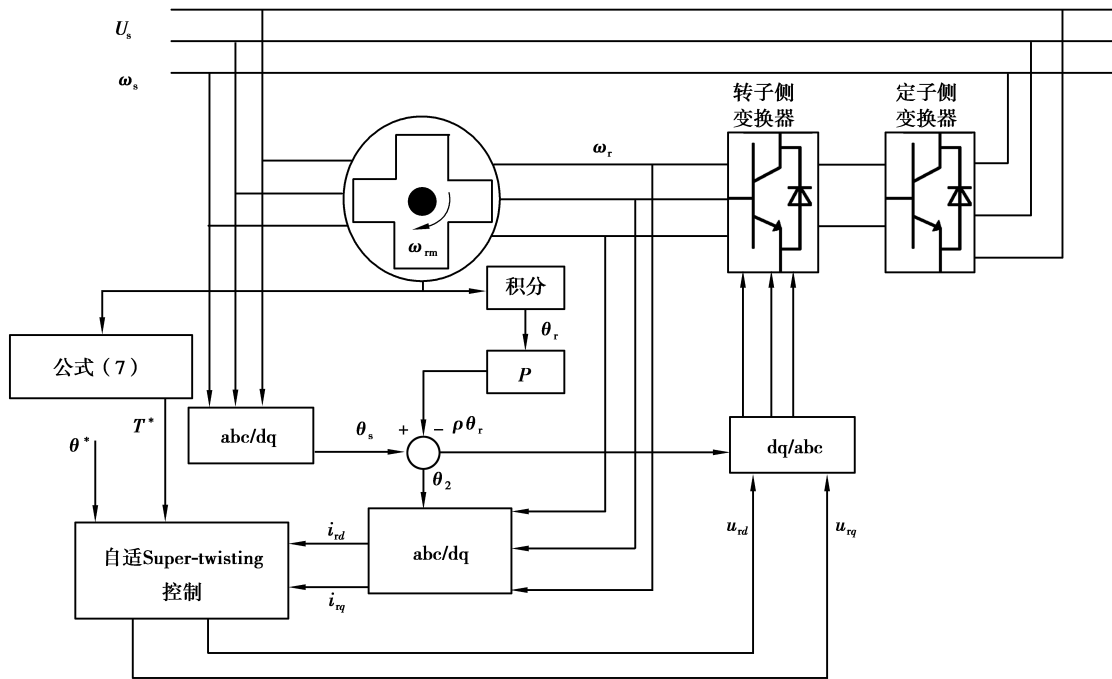


图 4 自适应 Super-twisting 控制器结构图

Fig.4 Control diagram of the adaptive Super-twisting controller

4 仿真及结果分析

笔者以 30 kW 小型水平轴变速恒频风电系统为算例,其主要参数如下: $P_{rate} = 30 \text{ kW}, \rho = 1.224 \text{ kg/m}^3, v_{rate} = 8.95 \text{ m/s}, k_{gb} = 25, J = 3.662 \text{ kg} \cdot \text{m}^2, R = 7.3 \text{ m}, \beta = 0, \lambda_{opt} = 8.1, C_{pmax} = 0.41$;双馈式发电机的参数: $p = 2, R_s = 82 \text{ m}\Omega, R_r = 228 \text{ m}\Omega, L_r = L_s = 35.5 \text{ mH}, L_m = 35.7 \text{ mH}$;电网参数: $U_s = 380 \text{ V}, \omega_s = 100 \pi \text{ (rad/s)}$ 。其中控制器参数选 $c_T = 1, \omega_T = 20, \gamma_T = 2, u_T = 3, \eta_T = 0.1, \epsilon_T = 0.5, \alpha_{mr} = 0.02, c_Q = 1, \omega_Q = 10, \gamma_Q = 2, u_Q = 2, \eta_Q = 0.02, \epsilon_Q = 1, \alpha_{mq} = 0.02$ 。仿真连续运行 260 s,以检验该控制方法的有效性。

选用在额定风速附近波动的风速,风速曲线如图 5 所示。同时,为验证控制系统对参数变化的鲁棒性,选用在额定电压附近波动且具有一定界限的网侧电压,网侧电压曲线如图 6 所示。

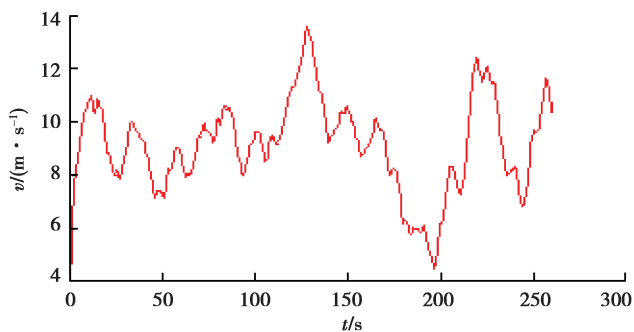


图 5 风速曲线

Fig.5 Curve of wind speed

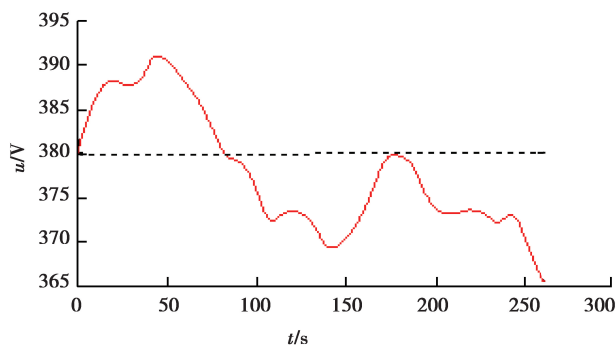
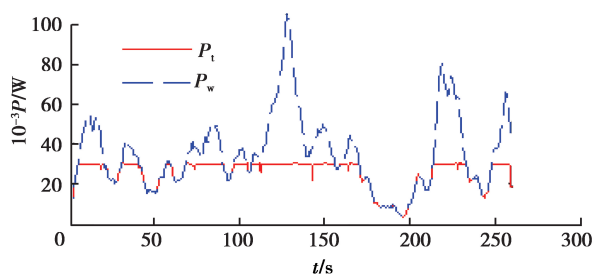
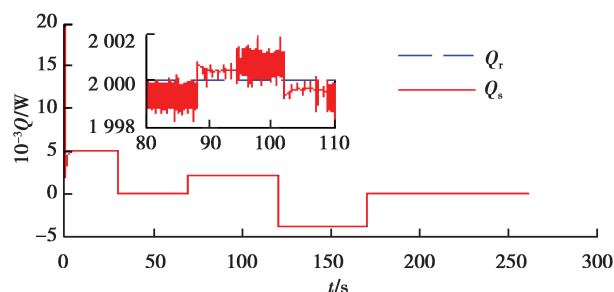


图 6 网侧电压变化曲线

Fig.6 The voltage variable of grid

风机获得功率曲线如图 7 所示,其中 P_w 为风机理论上可获得的最大功率, P_t 为风机所获得的实际功率。从图可知,当 P_w 小于额定功率 P_{rate} 时,风机工作于最大功率跟踪状态,具有良好的追踪性能;当 P_w 大于 P_{rate} 时,限制发电功率,使风机工作于额定功率状态,避免因风力过大对风机造成破坏。

定子侧无功功率如图 8 所示,定子侧无功功率根据电网功率补偿的实际需要调节,从图中可以看出无功功率的参考值与实际无功功率的误差在 2 W 之内,调节效果较好。同时从图 7 和图 8 可以看出当风速和电网电压波动时,有功功率和无功功率都能够快速调节,表明控制系统具有较强的鲁棒性。

图 7 风机可获得最大功率 P_w 和实际获得功率 P_t Fig.7 Maximum extractable power P_w and actual captured power P_t 图 8 定子侧无功功率 Q_s 以及参考无功功率 Q_r Fig.8 stator reactive power Q_s and its reference Q_r

发电机的电磁转矩变化曲线如图 9 所示,可知,电磁转矩变化基本平稳,可以有效减少电磁转矩因风速突变所造成的机械磨损,降低机械效应,提高风机的总体运行寿命。

随着控制过程中风速的变化以及网侧电压的波动,为了提升系统的快速响应,需对切换控制增益做出适当调整,如图 10 所示。

控制输入 u_{rq} , u_{rd} 以及其分量如图 11 所示。从图可知,随着风速的不停波动,等效输入迅速变化,切换输入在外界扰动和系统参数变化时,可有效提升系统的鲁棒性。同时可以看出控制输入的脉动较小,验证该控制方法具有降低抖振的作用。

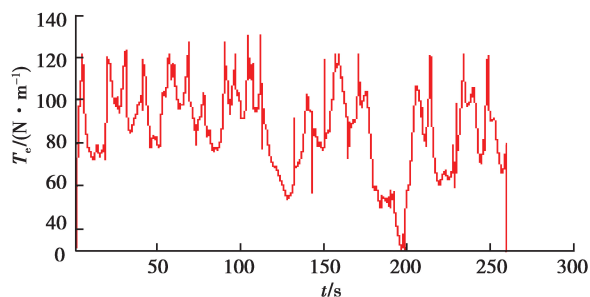


图 9 风机电磁转矩

Fig.9 The electromagnetic torque of wind turbine

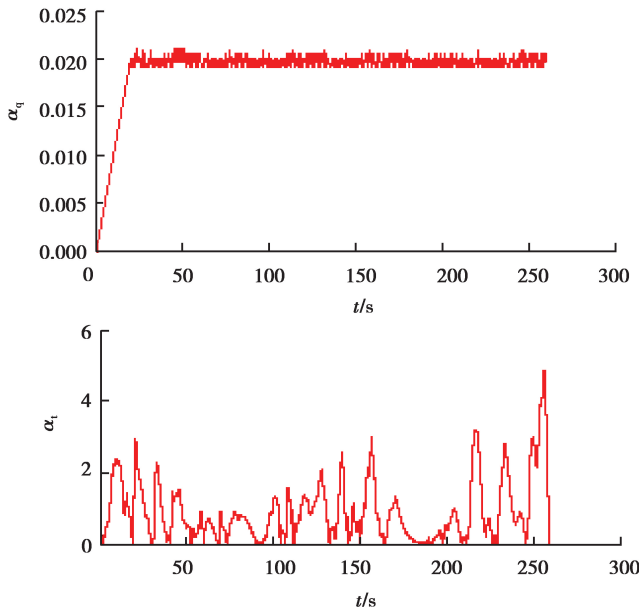


图 10 自适应增益变化

Fig.10 Adaptive gain variations

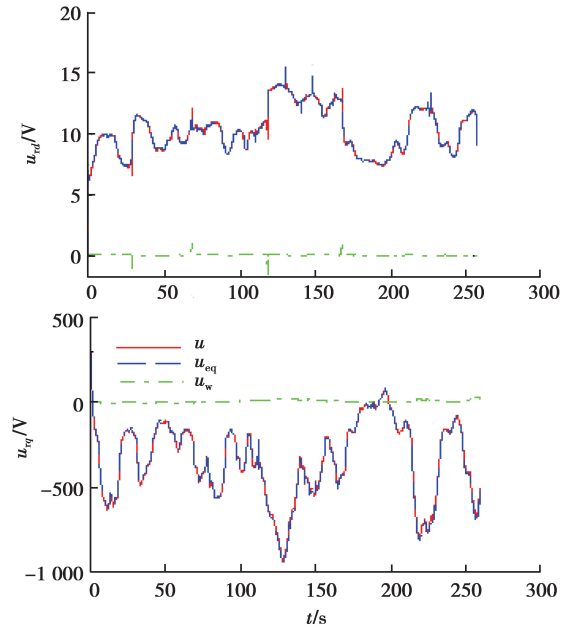


图 11 控制输入电压以及对对应组成部分

Fig.11 Control voltages and its components

随着风速的变化,滑模变量 s_Q 和 s_T 与各自导数之间的收敛曲线如图 12、13 所示,从图中可以看出, s_Q 和 s_T 以及其一阶导数都在向滑模面 $s(t, x) = \dot{s}(t, x) = 0$ 收敛,验证了自适应 Super-twisting 不需滑模变量一阶导数就可以使系统的滑模变量和它的一阶导数在有限时间内到达滑模面 $s(t, x) = \dot{s}(t, x) = 0$,保证有功功率和无功功率的控制最终不存在余差。

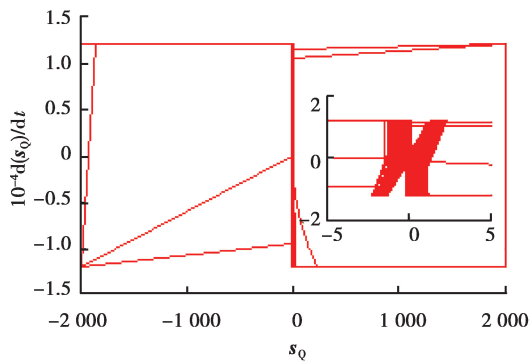


图 12 在 $s_Q - \dot{s}_Q$ 坐标中的收敛曲线

Fig.12 Convergence in the plane $s_Q - \dot{s}_Q$

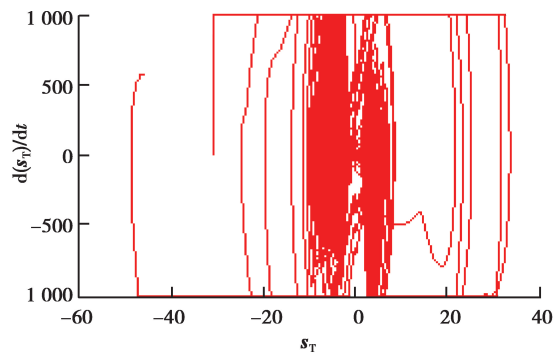


图 13 在 $s_T - \dot{s}_T$ 坐标中的收敛曲线

Fig.13 Convergence in the plane $s_T - \dot{s}_T$

5 结 论

笔者提出一种新的控制方法来控制变速恒频风力发电系统,解决了其受电网电压波动、外界风速干扰而导致控制稳定性变差问题。首先,建立风力发电系统以及双馈式感应电机降阶模型,在此基础上将自适应 Super-twisting 控制方法应用于系统模型的控制中。通过算例进行仿真分析,仿真结果表明所设计的控制器能够实现理想的控制效果,不仅具有很强的鲁棒性,且能实现控制增益随着系统运行状态的实时调整,进而保证了系统的快速性,降低了滑模控制所固有的抖振效应。后续可与实际风机试验结合,进一步验证控制器的有效性。

参考文献:

- [1] 年珩,程鹏,贺益康.故障电网下双馈风电系统运行技术研究综述[J].中国电机工程学报,2015,35(16):4184-4196.
NIAN Heng, CHENG Peng, HE Yikang. Review on operation techniques for DFIG-based wind energy conversion systems under network faults[J].Proceedings of the CSEE, 2015, 35(16): 4184-4196. (in Chinese)
- [2] 杨涛,刘国平,黄淼.双馈风电场柔性高压直流输电并网控制策略[J].重庆大学学报,2015,38(1):1-11.
YANG Tao, LIU Guoping, HUANG Miao. A new control design for grid integration of DFIG wind farm with VSC-HVDC[J]. Journal of Chongqing University, 2015, 38(1): 1-11. (in Chinese)
- [3] Liu X X, Su X J, Song Y D. Switched control of repeated scalar non-linear systems via sliding mode control technique[J]. Iet Control Theory & Applications, 2017, 11(8): 1088-1097.
- [4] Chen J, Chen J, Gong C. On optimizing the aerodynamic load acting on the turbine shaft of PMSG-based direct-drive wind energy conversion system [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(8): 4022-4.31.
- [5] Kamal E, Oueidat M, Aitouche A. Robust scheduler fuzzy controller of DFIG wind energy systems [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(3): 706-715.
- [6] Wang L, Zuo S, Song Y D, et al. Variable torque control of offshore wind turbine on spar floating platform using advanced RBF neural network[J]. Abstract and Applied Analysis, 2014(4): 1-7.
- [7] 王磊,沈涛,陈晨.基于自适应神经网络的高阶非仿射变速风力机系统全局跟踪控制方法[J].太阳能学报,2017,38(8): 2083-2089.
WANG Lei, SHEN Tao, CHEN Chen. Universal tracking control method for high-order non-affine variable speed wind turbine system based on adaptive neural network[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2017, 38(8): 2083-2089. (in Chinese)
- [8] Evangelista C A, Valenciaga F, Puleston P. Active and reactive power control for wind turbine based on a MIMO 2-sliding mode algorithm with variable gains[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2013, 28(3): 682-689.
- [9] Li P, Zheng Z. Robust adaptive second-order sliding-mode control with fast transient performance [J]. IET Control Theory Appl, 2012, 6(2): 305-312.
- [10] Utkin V, Poznyak A. Adaptive sliding mode control with application to super-twist algorithm: Equivalent control method[J]. Automatica, 2013, 49(1): 39-47.
- [11] Shtessel Y, Taleb M, Plestan F. A novel adaptive-gain supert wisting sliding mode controller: Methodology and application[J]. Automatica, 2012, 48(5): 759-769.
- [12] 李鹏,郑志强.基于类二次型 Lyapunov 函数的 Super-twisting 算法收敛性分析[J].控制与决策,2011,26(6):949-952.
LI Peng, ZHENG Zhiqiang. Convergence of super-twisting algorithm based on quadratic-like Lyapunov function[J]. Control and Decision, 2011, 26(6): 949-952. (in Chinese)
- [13] Wang L, Shen T, Chen C. Adaptive neural universal tracking control for high-order nonaffine varied-speed wind turbine system[C]//Proceedings of the 34th Chinese Control Conference, Hangzhou, 2015. [S.l.]: IEEE, 2015: 7901-7905.
- [14] Merida J, Aguilar L, Davila J. Analysis and synthesis of sliding mode control for large scale variable speed wind turbine for power optimization [J]. Renewable Energy, 2014, 71(1): 715-728.
- [15] Valenciaga F, Evangelista C. 2-sliding active and reactive power control of a wind energy conversion system[J]. IET Control Theory and Applications, 2010, 4(11): 2479-2490.

(编辑 张 苹)