

双馈发电机在不平衡电压下的二阶滑模控制

管萍, 王一博

(北京信息科技大学 自动化学院, 北京 100192)

摘要: 针对双馈风力发电机在电网电压不平衡时运行不佳的问题, 将自适应二阶滑模应用到双馈风力发电机的直接功率控制系统中。采用滑模观测器对系统因负序分量引起的不确定部分进行估计, 设计自适应二阶滑模控制器, 推导了控制器参数的自适应律, 使控制器参数能够在线修正。同时证明了控制系统在有限时间稳定。仿真研究显示所设计风力发电系统能对有功、无功功率及其定子电流进行有效控制, 削减了传统滑模中的抖振。

关键词: 双馈风力发电机; 不平衡电网; 直接功率控制; 二阶滑模控制

中图分类号: TM28 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed19168

Second-order Sliding Mode Control of Doubly Fed Generator Under Unbalanced Voltage

GUAN Ping, WANG Yibo

(School of Automation, Beijing Information Science and Technology University, Beijing, 100192, China)

Abstract: The adaptive second-order sliding mode control was applied to the direct power control of doubly fed induction generator in order to solve the problem of poor performance of doubly fed induction generator under unbalanced grid voltage. A sliding mode observer was used to estimate the uncertain part of the system caused by negative sequence component. The adaptive second-order sliding mode controller was designed. The adaptive law was deduced, and the controller parameters could be adjusted on-line. At the same time, it was proved that the control system is stable in finite time. The simulation results show that the designed wind generator control system can effectively control active power, reactive power and stator current, and weaken chattering in traditional sliding mode.

Key words: doubly fed induction wind generator; unbalanced power grid; direct power control; second-order sliding mode control

近年来,随着世界关注的焦点从化石能源转向可再生能源,双馈型风力发电机作为目前国内大规模并网风电机组的主流机型,在国际上引起了广泛的关注^[1-4]。其中直接功率控制因其结构简单、动态性能好、解耦性好等优点得到广泛应用,已经成为现在研究的热点。文献[5]提出了基于滑模变结构控制的双馈风力电机直接功率控制策略,简化了控制结构,提高了系统动态性能。然而在理想电网条件下提出的。文献[6]在不平衡电网电压条件下,在直接功率控制的基础上设计了基于谐振滑模控制的算法,然而由于滑模变结构本身的抖震问题,实验结果并不十分理想。文献[7]基于传统滑模变结构的直

接功率控制,提出了一种新型的功率优化补偿控制策略,不过其没有考虑系统因负序电压引起的不确定部分,从而影响了控制的精度。而二阶滑模控制能够削减传统滑模控制切换时的抖振,使系统具有较好的跟踪精度^[8]。

针对双馈风力发电机在不平衡电网电压下运行性能欠佳,将自适应二阶滑模应用到风力发电的直接功率控制系统中。用滑模观测器对系统不确定部分进行估计,设计了二阶滑模控制器并推导了自适应律,用功率补偿策略来满足不同的控制目标。仿真研究显示所提出风力发电控制系统达到了对有功、无功功率和定子电流的设定目标,能有效地减弱传统滑模存在的抖振。

基金项目: 国家自然科学基金项目(61573230)

作者简介: 管萍(1968-),女,博士,副教授, Email: lgygp@sina.com

1 双馈风力发电机在不平衡电压下数学模型

双馈风力发电机在不平衡电网电压下功率控制的状态空间表达式如下所示^[7]:

$$\begin{bmatrix} \frac{dP}{dt} \\ \frac{dQ}{dt} \end{bmatrix} = k \begin{bmatrix} -L_r R_s & -L_m^2 \omega_{slip} - L_r L_s \omega_s \\ -L_m^2 \omega_{slip} + L_r L_s \omega_s & -L_r L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} - \frac{3}{2} k L_m \begin{bmatrix} u_{sa} & u_{s\beta} \\ u_{s\beta} & -u_{sa} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{ra} \\ u_{r\beta} \end{bmatrix} + \frac{3}{2} k L_r \begin{bmatrix} u_{sa}^2 + u_{s\beta}^2 \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{3}{2} k L_m \begin{bmatrix} R_r u_{sa} i_{ra} - L_r \omega_r u_{s\beta} i_{ra} + L_r \omega_r u_{sa} i_{r\beta} + R_r u_{s\beta} i_{r\beta} \\ R_r u_{sa} i_{ra} + L_r \omega_r u_{s\beta} i_{ra} + L_r \omega_r u_{sa} i_{r\beta} - R_r u_{s\beta} i_{r\beta} \end{bmatrix} + 3 \omega_s \begin{bmatrix} u_{s\beta}^- i_{sa} - u_{sa}^- i_{s\beta} \\ u_{sa}^- i_{sa} + u_{s\beta}^- i_{s\beta} \end{bmatrix}$$

其中 $k = 1/(\sigma L_s L_r)$
 $\sigma = 1 - L_m^2 / (L_s L_r)$

式中: P, Q 分别为定子的有功和无功功率; L_m 为两相静止坐标系中定转子同轴等效绕组间的互感; ω_r 为转子角速度; ω_s 为同步角频率; ω_{slip} 为转差角频率; R_s 与 R_r 分别为定、转子绕组电阻; L_s 与 L_r 分别为定、转子等效绕组自感; U_{sa} 与 $U_{s\beta}$, U_{ra} 与 $U_{r\beta}$ 分别为定子、转子电压在静止坐标系 α, β 轴上的分量; i_{sa} 与 $i_{s\beta}$, i_{ra} 与 $i_{r\beta}$ 分别为定子、转子在静止坐标系 α, β 轴上的电流分量; u_{sa}^- 、 $u_{s\beta}^-$ 为定子电压在静止坐标系 α, β 轴上的负序分量。

电机功率表达式经整理可表示为 $\dot{x} = f(x) + gu + D$ (1)

其中

$$f(x) = k \begin{bmatrix} -L_r R_s & -L_m^2 \omega_{slip} - L_r L_s \omega_s \\ -L_m^2 \omega_{slip} + L_r L_s \omega_s & -L_r L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} + \frac{3}{2} k L_m \begin{bmatrix} u_{sa}^2 + u_{s\beta}^2 \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{3}{2} k L_m \begin{bmatrix} R_r u_{sa} i_{ra} - L_r \omega_r u_{s\beta} i_{ra} + L_r \omega_r u_{sa} i_{r\beta} + R_r u_{s\beta} i_{r\beta} \\ R_r u_{sa} i_{ra} + L_r \omega_r u_{s\beta} i_{ra} + L_r \omega_r u_{sa} i_{r\beta} - R_r u_{s\beta} i_{r\beta} \end{bmatrix}$$

$$x = \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} \quad u = \begin{bmatrix} u_{ra} \\ u_{r\beta} \end{bmatrix} \quad D = 3 \omega_s \begin{bmatrix} u_{s\beta}^- i_{sa} - u_{sa}^- i_{s\beta} \\ u_{sa}^- i_{sa} + u_{s\beta}^- i_{s\beta} \end{bmatrix}$$

$$g = \frac{3}{2} k L_m \begin{bmatrix} u_{sa} & u_{s\beta} \\ u_{s\beta} & -u_{sa} \end{bmatrix}$$

式中: D 为双馈风力发电机的负序电压等作用所产生的不确定扰动项, 扰动项的存在将导致功率以及定子电流出现二倍频波动。文中使用观测器对不确定项进行估计, 在此基础上设计了二阶滑模控制律, 以消除由负序分量引起的不确定性

的影响, 提升系统的跟踪精度。

2 不平衡电网电压条件下的二阶滑模控制策略

设 $x_{ref} = [P_{ref} \ Q_{ref}]^T$, 其中 P_{ref} 和 Q_{ref} 分别为有功功率和无功功率的期望值, e 为误差, $e = x_{ref} - x = \begin{bmatrix} P_{ref} - P \\ Q_{ref} - Q \end{bmatrix}$, 则

$$\dot{e} = \dot{x}_{ref} - f(x) - gu - D \quad (2)$$

2.1 滑模观测器的设计

系统中含有不确定部分 D , 本文采用超螺旋算法来设计观测器对不确定部分进行估计。

定理 1: 假设 $D = [D_1 \ D_2]^T$, 若它满足条件 $|D_i| \leq \delta |\sigma_i|^{1/2}$, 其中 $i = 1, 2$, δ 为未知正数, 则对系统(式(1))构造如下滑模观测器:

$$\begin{cases} \dot{\sigma} = x + z \\ \dot{z} = -f(x) - gu - v \\ \hat{D} = v \end{cases} \quad (3)$$

其中

$$\sigma = [\sigma_1 \ \sigma_2]^T \quad v = [v_1 \ v_2]^T$$

$$v_i = \alpha_1 |\sigma_i|^{1/2} \text{sign}(\sigma_i) + \alpha_2 \int \text{sign}(\sigma_i) dt \quad (4)$$

式中: σ 为观测器的滑模面; z 为辅助变量; v 为辅助控制输入; \hat{D} 为滑模观测器对不确定部分 D 的估计值。对于式(3), 若满足 $\alpha_1 > 2$, $\alpha_2 > [\alpha_1^3 + (4\alpha_1 - 8)\delta^2] / \alpha_1(4\alpha_1 - 8)$, 则能使得 $\sigma_i, \dot{\sigma}_i$ 在有限时间收敛到零。

证明: 对 σ 求导, 并把式(1)、式(4)代入, 得:

$$\begin{cases} \dot{\sigma} = -\alpha_1 |\sigma_i|^{1/2} \text{sign}(\sigma_i) + w_i + D_i \\ \dot{w}_i = -\alpha_2 \text{sign}(\sigma_i) \end{cases} \quad (5)$$

令 $\zeta_i = \begin{bmatrix} \zeta_{i1} \\ \zeta_{i2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |\sigma_i|^{1/2} \text{sign}(\sigma_i) \\ w_i \end{bmatrix}$, 则 $\dot{\zeta}_i = A \zeta_i + B D_i$

其中 $A = |\sigma_i|^{1/2} \begin{bmatrix} -\alpha_1/2 & 1/2 \\ -\alpha_2 & 0 \end{bmatrix}$ $B = |\sigma_i|^{-1/2} \begin{bmatrix} 1/2 \\ 0 \end{bmatrix}$

选取 Lyapunov 函数 $V = \zeta_i^T P \zeta_i$, 其中

$$P = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 2\alpha_2 + \alpha_1^2/2 & -\alpha_1/2 \\ -\alpha_1/2 & 1 \end{bmatrix} \text{ 为正定矩阵。}$$

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \dot{\zeta}_i^T P \zeta_i + \zeta_i^T P \dot{\zeta}_i = -\zeta_i^T Q \zeta_i / |\sigma_i|^{1/2} + 2 D_i B^T P \zeta_i \\ &\leq -\zeta_i^T Q \zeta_i / |\sigma_i|^{1/2} + 2 \delta |\sigma_i|^{1/2} B^T P \zeta_i \\ &= -\zeta_i^T Q \zeta_i / |\sigma_i|^{1/2} - \frac{1}{\zeta_{i1}^T} \zeta_i^T \hat{Q} \zeta_i = -\zeta_i^T \tilde{Q} \zeta_i / |\sigma_i|^{1/2} \end{aligned} \quad (6)$$

其中

$$\tilde{Q} = Q + \hat{Q}$$

$$Q = \frac{\alpha_1}{2} \begin{bmatrix} 2\alpha_2 + \alpha_1^2 & -\alpha_1 \\ -\alpha_1 & 1 \end{bmatrix} \quad \hat{Q} = \begin{bmatrix} (-2\alpha_2 - \alpha_1^2/2)\delta & \delta\alpha_1/4 \\ \delta\alpha_1/4 & 0 \end{bmatrix}$$

令 \tilde{Q} 的最小特征值 $\lambda_{\min}(\tilde{Q}) > 0$, 可得:

$$\alpha_1 > 2, \alpha_2 > \frac{\alpha_1^3 + (4\alpha_1 - 8)\delta^2}{\alpha_1(4\alpha_1 - 8)}$$

则 $\tilde{Q} > 0$, 所以 \dot{V} 负定。则

$$\dot{V} \leq -\gamma(\tilde{Q})V^{1/2} \quad (7)$$

其中 $\gamma(\tilde{Q}) = \lambda_{\min}(\tilde{Q})/\lambda_{\max}(\mathbf{P})$

式中: $\lambda_{\max}(\mathbf{P})$ 为 \mathbf{P} 的最大特征值。

$$\text{设 } \dot{v} = -\gamma v^{1/2}, v(0) = v_0 \geq 0 \text{ 则 } v(t) = (v_0^{1/2} - \frac{\gamma}{2}t)^2$$

令 $T = 2V^{1/2}(\sigma, w)/\gamma(\tilde{Q})$, 由比较原理可得当 $t \geq T$ 时, $V = 0$, 系统(式(3))的状态可在有限时间 T 内趋于零。

2.2 控制器的设计

为了提高系统控制性能, 实现在线调节功能, 在二阶滑模的基础上加入了自适应控制。设

$$\begin{cases} \dot{e} = -l_1 |e|^{1/2} \cdot \text{sign}(e) + e_w \\ \dot{e}_w = -l_2 \text{sign}(e) \end{cases} \quad (8)$$

将式(8)代入式(2), 并与2.1节的观测器结合得:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{u}} = \mathbf{g}^{-1}[\dot{\mathbf{x}}_{\text{ref}} - \mathbf{f}(\mathbf{x}) + l_1 |e|^{1/2} \cdot \text{sign}(e) - e_w - \hat{\mathbf{D}}] \\ \dot{e}_w = -l_2 \text{sign}(e) \end{cases} \quad (9)$$

其中

$$\begin{aligned} \dot{l}_1 &= \rho \|\mathbf{x}\|_2 \|e\|_2 \\ l_2 &= \varepsilon l_1 / 2 + \varepsilon^2 / 2 + \lambda / 2 \end{aligned}$$

式中: l_1, l_2 为可调参数; \dot{l}_1 为可调参数 l_1 的自适应律; ρ 为设定参数; ε, λ 为任意正实数。

定理2: 对于风力发电系统(式(1))在自适应二阶滑模控制(式(9))下, 当选取适当的参数 ρ, α_1, α_2 时, 能在有限时间内使 $e \rightarrow 0$ 和 $\dot{e} \rightarrow 0$ 。

证明: 把式(9)代入式(2)得:

$$\begin{cases} \dot{e} = -l_1 |e|^{1/2} \cdot \text{sign}(e) + e_w + \tilde{\mathbf{D}} \\ \dot{e}_w = -l_2 \text{sign}(e) \end{cases} \quad (10)$$

其中

$$\tilde{\mathbf{D}} = \hat{\mathbf{D}} - \mathbf{D}$$

选取 Lyapunov 函数:

$$V_1 = V_0 + \frac{1}{2k_1}(l_1 - l_1^*)^2 + \frac{1}{2k_2}(l_2 - l_2^*)^2 \quad (11)$$

其中

$$V_0 = \zeta_i^T \mathbf{P}_1 \zeta_i$$

式中: l_1^*, l_2^* 分别为 l_1, l_2 的上限值, 为大于零的常数; \mathbf{P}_1 为正定阵。与式(6)、式(7)证明相似, 可得:

$$\zeta_i = \begin{bmatrix} \zeta_{i1} \\ \zeta_{i2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |e_i|^{1/2} \text{sign}(e_i) \\ e_{w_i} \end{bmatrix} \quad \mathbf{P}_1 = \begin{bmatrix} \lambda + \varepsilon^2 & -\varepsilon \\ -\varepsilon & 1 \end{bmatrix}$$

$$\dot{V}_0 = -\zeta_i^T \tilde{\mathbf{Q}}_1 \zeta_i / |e_i|^{1/2}$$

$$\text{当 } l_1 > \frac{(\varepsilon + \delta)(\lambda + \varepsilon^2) + \frac{3}{4}\delta^2}{\lambda} \text{ 时, 有 } \tilde{\mathbf{Q}}_1 > 0, V_0$$

负定。则

$$\begin{cases} \dot{V}_0 \leq -\gamma_1(\tilde{\mathbf{Q}}_1)V_0^{1/2}, \\ \dot{V}_1 \leq -\gamma_1(\tilde{\mathbf{Q}}_1)V_0^{1/2} + \frac{1}{k_1}(l_1 - l_1^*)\dot{l}_1 + \frac{1}{k_2}(l_2 - l_2^*)\dot{l}_2 \\ \leq -\eta\sqrt{V_1} + \frac{1}{k_1}(l_1 - l_1^*)\dot{l}_1 + \frac{1}{k_2}(l_2 - l_2^*)\dot{l}_2 + \\ \frac{\rho\|\mathbf{x}\|_2\|e\|_2}{k_1}|l_1 - l_1^*| + \frac{\hat{\rho}\|\mathbf{x}\|_2\|e\|_2}{k_2}|l_2 - l_2^*| \end{cases} \quad (12)$$

其中

$$\gamma_1(\tilde{\mathbf{Q}}_1) = \lambda_{\min}(\tilde{\mathbf{Q}}_1) / \lambda_{\max}(\mathbf{P}_1)$$

$$\eta = \min\{\gamma_1(\tilde{\mathbf{Q}}_1), \sqrt{2}\rho\|\mathbf{x}\|_2\|e\|_2, \sqrt{2}\hat{\rho}\|\mathbf{x}\|_2\|e\|_2\}$$

假设 l_1, l_2 的自适应律能使得 l_1, l_2 有界为 l_1^*, l_2^* 。由 $l_1 - l_1^* < 0, l_2 - l_2^* < 0$ 得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &\leq -\eta\sqrt{V_1} - \frac{1}{k_1}|l_1 - l_1^*|(\dot{l}_1 - \rho\|\mathbf{x}\|_2\|e\|_2) - \\ &\frac{1}{k_2}|l_2 - l_2^*|(\dot{l}_2 - \hat{\rho}\|\mathbf{x}\|_2\|e\|_2) \end{aligned} \quad (13)$$

令

$$\dot{l}_1 = \rho\|\mathbf{x}\|_2\|e\|_2, \text{ 由 } \dot{l}_2 = \hat{\rho}\|\mathbf{x}\|_2\|e\|_2$$

得

$$\dot{l}_2 = \frac{\varepsilon}{2}\rho\|\mathbf{x}\|_2\|e\|_2, \text{ 从而:}$$

$$\dot{V}_1 \leq -\eta\sqrt{V_1} = -\eta V_1^{1/2} \quad (14)$$

式(14)与式(7)相似, 同理, 系统能在有限时间内稳定。

2.3 参考功率的计算

发电机输出的瞬时定子的有功功率、无功功率为

$$\begin{cases} P_s = \frac{3}{2}(u_{sa}i_{sa} + u_{sb}i_{sb}) \\ Q_s = \frac{3}{2}(u_{sb}i_{sa} - u_{sa}i_{sb}) \end{cases} \quad (15)$$

在电网电压不平衡条件下:

$$\begin{cases} u_{sa\beta} = u_{sa\beta}^+ + u_{sa\beta}^- = (u_{sa}^+ + u_{sa}^-) + j(u_{sb}^+ + u_{sb}^-) \\ i_{sa\beta} = i_{sa\beta}^+ + i_{sa\beta}^- = (i_{sa}^+ + i_{sa}^-) + j(i_{sb}^+ + i_{sb}^-) \end{cases} \quad (16)$$

将式(16)代入式(15)可得:

$$\begin{cases} P_s = P_{sA} + P_{sB} + P_{sC} + P_{sD} \\ Q_s = Q_{sA} + Q_{sB} + Q_{sC} + Q_{sD} \end{cases} \quad (17)$$

其中

$$P_{sA} = \frac{3}{2}(u_{sa}^+ i_{sa}^+ + u_{sb}^+ i_{sb}^+) \quad P_{sB} = \frac{3}{2}(u_{sa}^- i_{sa}^- + u_{sb}^- i_{sb}^-)$$

$$P_{sC} = \frac{3}{2}(u_{sa}^+ i_{sa}^- + u_{sb}^+ i_{sb}^-) \quad P_{sD} = \frac{3}{2}(u_{sa}^- i_{sa}^+ + u_{sb}^- i_{sb}^+)$$

$$Q_{sA} = \frac{3}{2}(u_{sa}^+ i_{sa}^+ - u_{sb}^+ i_{sb}^+) \quad Q_{sB} = \frac{3}{2}(u_{sa}^- i_{sa}^- - u_{sb}^- i_{sb}^-)$$

$$Q_{sC} = \frac{3}{2}(u_{sa}^+ i_{sa}^- - u_{sb}^+ i_{sb}^-) \quad Q_{sD} = \frac{3}{2}(u_{sa}^- i_{sa}^+ - u_{sb}^- i_{sb}^+)$$

式中: P_{sA}, P_{sB} 和 Q_{sA}, Q_{sB} 分别为平均有功和无功功率; P_{sC}, P_{sD} 和 Q_{sC}, Q_{sD} 分别为二倍频的有功和无功部分。

在不平衡电网电压下,有功和无功的二倍频波动部分也被输入到电网中,使得我们必须使功率参考量加入补偿量,来满足电机的并网要求。

目标 I :使DFIG定子有功功率保持不变,剔除二倍频的有功功率部分。令有功的二倍频分量为零, $P_{sC} + P_{sD} = 0$,此时需要对无功功率的参考值进行补偿来保障定子电流的正弦度,从而可得 $Q_{sC} = Q_{sD}$ 。无功功率的补偿量为 $Q_{s,com} = 3(u_{sa}^- i_{sa}^+ - u_{sb}^- i_{sb}^+)$ 。因此参考值为: $P^* = P_{sA} + P_{sB}$, $Q^* = Q_{sA} + Q_{sB} + Q_{s,com}$ 。

目标 II :使DFIG定子无功功率保持不变,剔除二倍频的无功功率部分。令无功的二倍频分量为零, $Q_{sC} + Q_{sD} = 0$,此时,需要对有功功率的参考值进行补偿来保障定子电流的正弦度,从而可得 $P_{sC} = P_{sD}$ 。有功功率的补偿量为 $P_{s,com} = 3(u_{sa}^- i_{sa}^+ - u_{sb}^- i_{sb}^+)$ 。因此参考值为 $P^* = P_{sA} + P_{sB} + P_{s,com}$, $Q^* = Q_{sA} + Q_{sB}$ 。

目标 III :DFIG定子电流波形对称,正弦度良好,无畸变。电流波动是由负序电流所导致,故要消除它带来的影响,相当于消除由它引起的功率波动,有 $P_{sC} + P_{sD} = 0$, $Q_{sC} + Q_{sD} = 0$,故获得有功功率和无功功率的补偿量分别为

$$\begin{cases} P_{s,com} = \frac{3}{2}(u_{sa}^- i_{sa}^+ + u_{sb}^- i_{sb}^+) \\ Q_{s,com} = \frac{3}{2}(u_{sa}^- i_{sa}^+ - u_{sb}^- i_{sb}^+) \end{cases}$$

参考值为

$$\begin{cases} P^* = P_{sA} + P_{sB} + \frac{3}{2}P_{s,com} \\ Q^* = Q_{sA} + Q_{sB} + \frac{3}{2}Q_{s,com} \end{cases}$$

3 仿真验证

为验证所提控制策略的有效性,对所提的自适应二阶滑模控制风力发电系统进行仿真研究。系统的主要参数为:电机额定功率2 MW,额定频率50 Hz,定子额定电压690 V,定子电阻0.002 6 Ω,转子电阻0.002 9 Ω,定子自感0.002 587 H,转子自感0.002 587 H,定转子互感0.002 5 H。控制参数的选择为: $l_1=3\ 990\ 000$, $\alpha_1=0.001$, $\alpha_2=0.000\ 1$, $\rho=1 \times 10^{-8}$, $\varepsilon=1 \times 10^{-4}$, $\lambda=1 \times 10^{-3}$ 假设电机运行在额定状态,在0.09 s产生电压故障,电压B相和C相分别跌落25%。图1为电机三相定子电压波形。

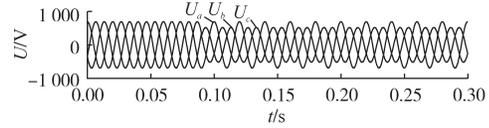


图1 电机三相定子电压波形

Fig.1 Three phase stator voltage waveforms for generator

图2为针对目标 I 的风力发电机的传统滑模和二阶滑模控制定子电流、有功功率和无功功率仿真波形。在0~0.09 s的平衡时间内,所提出的二阶滑模控制和传统滑模控制都对双馈电机进行了有效控制,定子电流均能保持波形正弦无畸变,但自适应二阶滑模控制下有功和无功功率的波动都比传统滑模小。

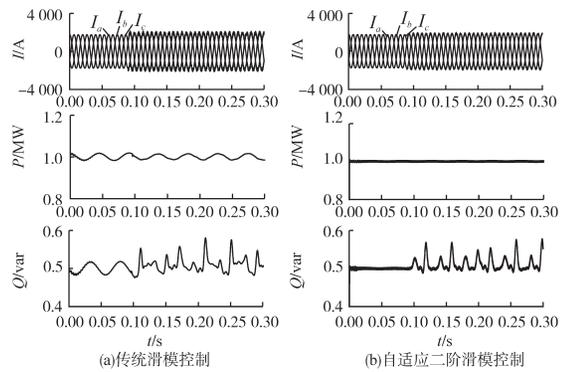


图2 目标 I 的定子电流、有功功率和无功功率波形图

Fig.2 Stator current, active power, reactive power waveforms for target I

图2中,在0.09 s发生B相和C相电压故障时,自适应二阶滑模的电流正弦度要好于传统滑模的电流正弦度。自适应二阶滑模的有功功率曲线比传统滑模有功功率曲线波动更小。自适应二阶滑模能更好地消除二倍频的有功功率波动。同时二阶滑模控制二倍频的无功功率波动比传统滑模控制二倍频的无功功率的波动明显减弱。

图3为针对目标 II 的传统滑模和二阶滑模控制的定子电流、有功功率和无功功率仿真波形。在0~0.09 s平衡状态下二者都能达到期望的目标,自适应二阶滑模的控制效果要好于传统滑模。在0.09 s以后,电网发生电压故障,二阶滑模的电流正弦度要好于传统滑模的电流正弦度;传统滑模控制的无功功率波动为-5.32%~4.11%;而二阶滑模的无功功率波动仅为-0.72%~0.66%,抖振明显被削弱,且有功功率的二倍频振动也比传统滑模的小。图4为在目标 III 下传统滑模和二阶滑模的仿真结果,在0~0.09 s平衡状态

下,两者都能达到期望目标,二阶滑模的有功、无功控制效果要好于传统滑模。在0.09 s以后,自适应二阶滑模比传统滑模的定子电流更加平滑,正弦度更好。此时2种方法都会产生有功、无功功率的波动,但自适应二阶滑模控制要好于传统滑模控制。

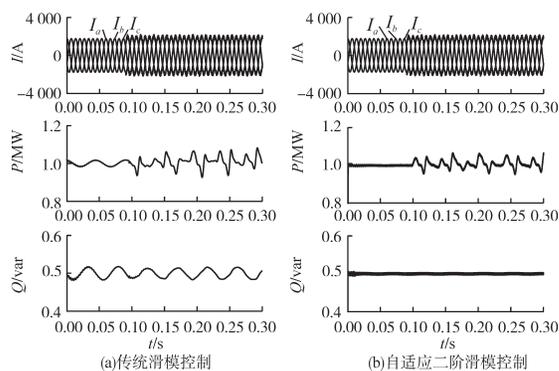


图3 目标Ⅱ的定子电流、有功功率和无功功率波形图

Fig.3 Stator current, active power, reactive power waveform for target II

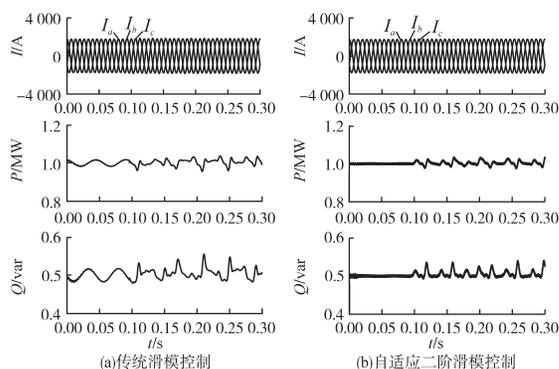


图4 目标Ⅲ的定子电流、有功功率和无功功率波形图

Fig.4 Stator current, active power, reactive power waveforms for target III

4 结论

本文针对双馈风力发电机在不平衡电网电压下运行不佳的问题,采用自适应二阶滑模直接

功率控制。构建滑模观测器来计算估计双馈风力发电机中的未知部分,以有效地补偿控制器。在此基础上构造二阶滑模变结构控制器,推导了控制器参数的调节律,从而能够在线修正调节参数,有效地提高了风力发电系统控制精度,改进了发电机的运行性能。

仿真结果显示,所提出自适应二阶滑模的风力发电控制系统实现了削减有功、无功功率的振荡、保持定子电流正弦无畸变的目标。与传统滑模控制相比,自适应二阶滑模削弱了传统滑模的抖振,从而改善了不平衡电网电压条件下双馈风力发电机的运行性能。

参考文献

- [1] 杨晨星,杨旭,童朝南. 双馈异步风力发电机低电压穿越的软撬棒控制[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(8): 2487-2495, 2558.
- [2] 宋修璞,葛宝明,毕大强,等. 具有低电压穿越功能的双馈风力发电模拟平台的设计[J]. 电气传动, 2014, 44(8): 34-38.
- [3] 谢钊文,呼小亮,李学锋. 双馈电机并网前参数优化[J]. 电气传动, 2015, 45(3): 68-71.
- [4] 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): 4184-4197.
- [5] Hu Jiabing, Nian Heng, Hu Bin, *et al.* Direct Active and Reactive Power Regulation of DFIG Using Sliding-mode Control Approach [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2010, 25(4): 1028-1039.
- [6] 全宇,年珩. 不平衡及谐波电压下双馈感应电机谐振滑模控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(2): 465-476.
- [7] 张迪,魏艳君,杨宗丰,等. 不平衡电网电压下基于滑模变结构控制的双馈风电系统转子侧变流器控制策略[J]. 电工技术学报, 2016, 31(17): 121-131.
- [8] 范金锁,张合新,王桂明,等. 一种高阶滑模控制算法的改进及应用[J]. 控制与决策, 2011, 26(9): 1436-1440.

收稿日期:2018-06-06

修改稿日期:2018-08-09