

基于神经网络的双馈感应发电机滑模控制^{*}

王一博, 管 萍

(北京信息科技大学 自动化学院, 北京 100192)

摘 要: 针对不平衡电网下双馈感应发电机运行不佳的问题, 将神经网络控制和二阶滑模控制相结合构成的神经网络滑模控制器运用到双馈风力发电机的直接功率控制中。设计了二阶滑模控制器, 二阶滑模能够有效地削弱传统滑模控制的抖振; 接着, 设计了径向基神经网络对系统的不确定部分进行逼近; 最后, 基于李雅普诺夫稳定性定理推导了神经网络权值更新律, 证明了控制系统的稳定性。仿真结果表明所设计控制策略能对有功、无功功率及其定子电流进行有效控制, 削弱了传统滑模控制中的抖振。

关键词: 双馈感应发电机; 不平衡电网; 直接功率控制; 二阶滑模控制; 神经网络控制

中图分类号: TM 614 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2019)07-0031-08

Sliding Mode Control of Doubly Fed Induction Generator Based on Neural Network^{*}

WANG Yibo, GUAN Ping

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

Abstract: Aiming at the poor operation of doubly fed induction generator under unbalanced grid voltage, neural network sliding mode controller, which combined neural network control with second-order sliding mode control, was applied to direct power control of doubly fed wind generator. A second-order sliding mode controller was designed. The second-order sliding mode could effectively weaken the chattering of traditional sliding mode control. At the same time, a radial basis function neural network was designed to approximate the uncertain part of the system. Finally, based on Lyapunov stability theory, the adaptive law of the neural network weight was deduced, and the stability of the control system was proved. The simulation results showed that the proposed control strategy could effectively control the active power, reactive power and stator current, and weaken the chattering in traditional sliding mode control.

Key words: doubly fed induction generator (DFIG); unbalanced power grid; direct power control; second-order sliding mode control; neural network control

0 引 言

随着人们对能源需求的不断增加以及对环境保护要求的提高, 风能作为可再生、清洁能源而得到快速发展。双馈感应发电机(DFIG)作为目前国内外大规模并网风电机组的主流机型, 成为了研究热点^[1-4]。由于 DFIG 定子侧直接与电网相连, 所以电网的波动将直接影响电机的稳定运

行^[5]。在实际运行中电网经常出现不平衡等非理想情况, 导致 DFIG 电磁转矩脉动和定子侧输出的功率出现振荡, 严重降低了向电网输送的电能性能。因此, 对不平衡电网电压条件下 DFIG 控制系统的研究成为了研究热点。文献[6]提出一种 DFIG 的比例-积分-谐振控制方法, 在电网电压平衡和不平衡条件下, 实现了对电网电压的精确跟踪。由于控制是在两相旋转坐标系下进行的,

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目(61573230)

作者简介: 王一博(1991—), 男, 硕士研究生, 研究方向为风力发电机运行控制。

管 萍(1968—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为智能控制与非线性控制及其在工业和航天领域中的应用等。

所以需要获取电网电压相位信息并进行旋转坐标变换,增加了控制结构复杂性。文献[7]在不平衡电网电压下提出一种基于无源化方法的DFIG控制策略,有效地抑制了定子及转子的不平衡电流,降低了输出电磁转矩的波动,然而,使用二阶陷波器会导致相位延迟,影响系统的稳定性。滑模控制因结构简单、具有较强的鲁棒性等优点,在DFIG控制中得到广泛应用^[8-9]。为了改善风电机组的风能跟踪能力,文献[10]提出一种基于反推滑模控制的极大风能跟踪控制算法,取得了良好的控制效果,但是该方法仅针对理想电网电压的条件下的问题。文献[11]采用积分终端滑模控制,一定程度上削弱了滑模控制中的抖振问题,实现了不同的控制目标,但是,其没有考虑控制对象中因负序电压引起的不确定部分,影响了系统的控制精度。神经网络能够逼近任意的非线性函数,进行自学习,来适应环境的变化,在各个领域得到广泛应用。文献[12]基于某风电场的实测数据提出一种基于径向基函数(RBF)神经网络的未来24 h风电场功率直接预测方法,结果表明该方法能够提高预测精度。文献[13]将基于RBF的滑模控制运用到风电机组的变桨距控制中,结合滑模控制和神经网络控制的优点,实现了良好的控制效果,但针对的是电网电压平衡条件。

针对不平衡电网电压条件下DFIG控制问题,将基于RBF的神经网络的滑模控制运用到DFIG直接功率控制中,二阶滑模控制能够削弱传统滑模中的抖振,RBF神经网络可以对系统的不确定部分进行逼近,同时,因为其可以在线更新权值,所以提高了系统的控制精度;仿真结果表明本文所提控制策略能有效地削弱DFIG中有功、无功功率的二倍频波动,保持定子电流正弦。

1 不平衡电网下的DFIG数学模型

α - β 坐标系下DFIG转子侧变换器等效电路如图1所示。

图1中, L_m 为定、转子间互感; L_{ls} 、 L_{lr} 分别为

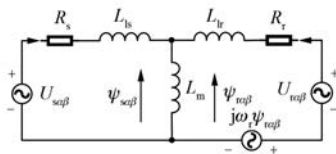


图1 α - β 坐标系下DFIG转子侧变换器等效电路

定、转子绕组间漏感; ω_r 为转子角速度; R_s 、 R_r 分别为定、转子电阻。由图1可得:

$$\begin{cases} u_{sq\beta} = R_s I_{sq\beta} + \frac{d\psi_{sq\beta}}{dt} \\ u_{rq\beta} = R_r I_{rq\beta} + \frac{d\psi_{rq\beta}}{dt} - j\omega_r \psi_{rq\beta} \end{cases} \quad (1)$$

其中:

$$\begin{cases} \psi_{sq\beta} = L_s I_{sq\beta} + L_m I_{rq\beta} \\ \psi_{rq\beta} = L_r I_{rq\beta} + L_m I_{sq\beta} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $u_{sq\beta}$ 、 $u_{rq\beta}$ ——两相静止坐标系下的定、转子电压;

$I_{sq\beta}$ 、 $I_{rq\beta}$ ——在两相静止坐标系下的定子和转子电流;

$\psi_{sq\beta}$ 、 $\psi_{rq\beta}$ ——在两相静止坐标系下的定子和转子侧磁链;

L_s 、 L_r ——定、转子自感, $L_s = L_{ls} + L_m$ 、 $L_r = L_{lr} + L_m$ 。

$$\begin{cases} u_{sq\beta} = u_{s\alpha} + j u_{s\beta} \\ u_{rq\beta} = u_{r\alpha} + j u_{r\beta} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $u_{s\alpha}$ 、 $u_{s\beta}$ 、 $u_{r\alpha}$ 、 $u_{r\beta}$ ——定、转子电压在 α 、 β 轴上的分量。

将式(2)、式(3)代入式(1)可得:

$$\begin{cases} u_{s\alpha} = R_s i_{s\alpha} + L_s \frac{di_{s\alpha}}{dt} + L_m \frac{di_{r\alpha}}{dt} \\ u_{s\beta} = R_s i_{s\beta} + L_s \frac{di_{s\beta}}{dt} + L_m \frac{di_{r\beta}}{dt} \\ u_{r\alpha} = R_r i_{r\alpha} + L_s \frac{di_{r\alpha}}{dt} + L_m \frac{di_{s\alpha}}{dt} + \omega_r L_r i_{r\beta} + \omega_r L_m i_{s\beta} \\ u_{r\beta} = R_r i_{r\beta} + L_s \frac{di_{r\beta}}{dt} + L_m \frac{di_{s\beta}}{dt} - \omega_r L_r i_{r\alpha} - \omega_r L_m i_{s\alpha} \end{cases} \quad (4)$$

其中: $i_{s\alpha}$ 、 $i_{s\beta}$ 、 $i_{r\alpha}$ 、 $i_{r\beta}$ 分别为定、转子电流在 α - β 轴上的分量,将其改写为定子电流状态方程形式为

$$\begin{bmatrix} \frac{di_{s\alpha}}{dt} \\ \frac{di_{s\beta}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_r L_r & \omega_r L_m^2 & R_r L_m & \omega_r L_m L_r \\ -\omega_r L_m^2 & -R_s L_r & -\omega_r L_m L_r & R_r L_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{s\alpha} \\ u_{s\beta} \\ u_{r\alpha} \\ u_{r\beta} \end{bmatrix}$$

$$k \begin{bmatrix} L_r & 0 \\ 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{s\alpha} \\ u_{s\beta} \end{bmatrix} + k \begin{bmatrix} -L_m & 0 \\ 0 & -L_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{r\alpha} \\ u_{r\beta} \end{bmatrix} \quad (5)$$

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

功率为

$$\begin{cases} P_s = \frac{3}{2}(u_{s\alpha} i_{s\alpha} + u_{s\beta} i_{s\beta}) \\ Q_s = \frac{3}{2}(u_{s\beta} i_{s\alpha} - u_{s\alpha} i_{s\beta}) \end{cases} \quad (6)$$

式中: P_s, Q_s ——定子有功、无功功率。

对式(6)进行求导可得:

$$\begin{cases} \frac{dP_s}{dt} = \frac{3}{2} \left(u_{s\alpha} \frac{di_{s\alpha}}{dt} + u_{s\beta} \frac{di_{s\beta}}{dt} + i_{s\alpha} \frac{du_{s\alpha}}{dt} + i_{s\beta} \frac{du_{s\beta}}{dt} \right) \\ \frac{dQ_s}{dt} = \frac{3}{2} \left(u_{s\beta} \frac{di_{s\alpha}}{dt} - u_{s\alpha} \frac{di_{s\beta}}{dt} + i_{s\alpha} \frac{du_{s\beta}}{dt} - i_{s\beta} \frac{du_{s\alpha}}{dt} \right) \end{cases} \quad (7)$$

在不平衡电网电压条件下有:

$$u_{s\alpha\beta} = u_{s\alpha\beta+} + u_{s\alpha\beta-} = u_{s\alpha} + j u_{s\beta} = (u_{s\alpha+} + u_{s\alpha-}) + j(u_{s\beta+} + u_{s\beta-}) \quad (8)$$

$$\begin{cases} u_{s\alpha+} = |u_{s+}| \sin(\omega_s t + \varphi_+) \\ u_{s\beta+} = -|u_{s+}| \cos(\omega_s t + \varphi_+) \\ u_{s\alpha-} = -|u_{s-}| \sin(\omega_s t + \varphi_-) \\ u_{s\beta-} = -|u_{s-}| \cos(\omega_s t + \varphi_-) \end{cases} \quad (9)$$

式中: $u_{s\alpha+}, u_{s\beta+}$ ——定子电压在静止坐标系上的正序分量;

$$\begin{bmatrix} \frac{dP_s}{dt} \\ \frac{dQ_s}{dt} \end{bmatrix} = k \begin{bmatrix} -L_r R_s & -L_m^2 \omega_{slip} - L_r L_s \omega_s \\ -L_m^2 \omega_{slip} + L_r L_s \omega_s & -L_r L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_s \\ Q_s \end{bmatrix} - \frac{3}{2} k L_m \begin{bmatrix} u_{s\alpha} & u_{s\beta} \\ u_{s\beta} & -u_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{r\alpha} \\ u_{r\beta} \end{bmatrix} + \frac{3}{2} k L_r \begin{bmatrix} u_{s\alpha}^2 + u_{s\beta}^2 \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{3}{2} k L_m \begin{bmatrix} R_r u_{s\alpha} i_{r\alpha} - L_r \omega_r u_{s\beta} i_{r\alpha} + L_r \omega_r u_{s\alpha} i_{r\beta} + R_r u_{s\beta} i_{r\beta} \\ R_r u_{s\alpha} i_{r\alpha} + L_r \omega_r u_{s\beta} i_{r\alpha} + L_r \omega_r u_{s\alpha} i_{r\beta} - R_r u_{s\beta} i_{r\beta} \end{bmatrix} + 3 \omega_s \begin{bmatrix} u_{s\beta-} i_{s\alpha} - u_{s\alpha-} i_{s\beta} \\ u_{s\alpha-} i_{s\alpha} + u_{s\beta-} i_{s\beta} \end{bmatrix} \quad (12)$$

可表示为

$$\dot{x} = f(x) + g u_r + D \quad (13)$$

其中:

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

$$x = \begin{bmatrix} P_s \\ Q_s \end{bmatrix}; u_r = \begin{bmatrix} u_{r\alpha} \\ u_{r\beta} \end{bmatrix}; g = \frac{3}{2} k L_m \begin{bmatrix} u_{s\alpha} & u_{s\beta} \\ u_{s\beta} & -u_{s\alpha} \end{bmatrix}; D = 3 \omega_s \begin{bmatrix} u_{s\beta-} i_{s\alpha} - u_{s\alpha-} i_{s\beta} \\ u_{s\alpha-} i_{s\alpha} + u_{s\beta-} i_{s\beta} \end{bmatrix}。$$

式中: ω_{slip} ——转差角频率, $\omega_{slip} = \omega_s - \omega_r$;

$|u_{s+}|, |u_{s-}|$ ——电网电压正负序分量幅值;

ω_s ——同步角频率;

φ_+, φ_- ——电网电压正负序分量初始相位;

$u_{s\alpha-}, u_{s\beta-}$ ——定子电压在静止坐标系上的负序分量。

$$\begin{cases} \frac{du_{s\alpha+}}{dt} = \omega_s |u_{s+}| \cos(\omega_s t + \varphi_+) = -\omega_s u_{s\beta+} \\ \frac{du_{s\beta+}}{dt} = \omega_s |u_{s+}| \sin(\omega_s t + \varphi_+) = \omega_s u_{s\alpha+} \\ \frac{du_{s\alpha-}}{dt} = -\omega_s |u_{s-}| \cos(\omega_s t + \varphi_-) = \omega_s u_{s\beta-} \\ \frac{du_{s\beta-}}{dt} = \omega_s |u_{s-}| \sin(\omega_s t + \varphi_-) = -\omega_s u_{s\alpha-} \end{cases} \quad (10)$$

进一步整理可得:

$$\begin{cases} \frac{du_{s\alpha}}{dt} = -\omega_s u_{s\beta} + 2\omega_s u_{s\beta-} \\ \frac{du_{s\beta}}{dt} = \omega_s u_{s\alpha} - 2\omega_s u_{s\alpha-} \end{cases} \quad (11)$$

将式(5)和式(11)代入式(7), 可得平衡电网下 DFIG 功率控制数学模型的状态空间表达式:

D ——DFIG 负序电压引起的系统不确定

性项。

本文设计了径向基神经网络控制器对 D 进行逼近,以消除不确定性的影响,补偿控制量 u_r ,以提升系统的跟踪精度。

2 不平衡电网条件下的神经网络滑模控制策略

设 $\mathbf{x} = \begin{bmatrix} P_s \\ Q_s \end{bmatrix}$, 有功、无功功率的期望值为 $\mathbf{x}_{\text{ref}} = \begin{bmatrix} P_{\text{ref}} \\ Q_{\text{ref}} \end{bmatrix}$, 误差 $\mathbf{e} = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix} = \mathbf{x} - \mathbf{x}_{\text{ref}} = \begin{bmatrix} P_s - P_{\text{ref}} \\ Q_s - Q_{\text{ref}} \end{bmatrix}$, 求导得:

$$\dot{\mathbf{e}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}\mathbf{u}_r + \mathbf{D} - \dot{\mathbf{x}}_{\text{ref}} \quad (14)$$

2.1 控制器设计

采用超螺旋算法设计二阶滑模趋近律^[14]:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{e}} = -k_1 |\mathbf{e}|^{\frac{1}{2}} \cdot \text{sign}(\mathbf{e}) + \mathbf{e}_w \\ \dot{\mathbf{e}}_w = -k_2 \text{sign}(\mathbf{e}) \end{cases} \quad (15)$$

将式(15)代入式(14),可得:

$$\begin{cases} \mathbf{u}_r = \mathbf{g}^{-1} [\dot{\mathbf{x}}_{\text{ref}} - \mathbf{f}(\mathbf{x}) - k_1 |\mathbf{e}|^{\frac{1}{2}} \cdot \text{sign}(\mathbf{e}) + \mathbf{e}_w - \mathbf{D}] \\ \dot{\mathbf{e}}_w = -k_2 \text{sign}(\mathbf{e}) \end{cases} \quad (16)$$

由于控制量 $\mathbf{u}_r$ 中含有不确定部分 $\mathbf{D}$, 故采用 RBF 神经网络来逼近系统的不确定部分 $\mathbf{D}$ 。所设计的 RBF 神经网络根据有功功率和无功功率的误差 $\mathbf{e} = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix}$ 来计算不确定部分 $\hat{\mathbf{D}}$ 。RBF 神经网络结构如图 2 所示。

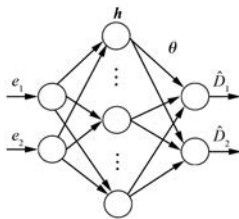


图 2 RBF 神经网络结构图

RBF 网络输入为 $\mathbf{e} = [e_1 \ e_2]^T$, 隐含层有 m 个神经元, h_j 是隐含层第 j 个神经元的输出, $h_j = \exp\left(-\frac{\|\mathbf{e} - \mathbf{c}_j\|^2}{2b_j^2}\right)$, $j = 1, 2, \dots, m$ 。隐含层采用

高斯函数, $\mathbf{c}_j = [c_{j1}, c_{j2}]^T$ 为隐含层第 j 个神经元的中心点向量值, b_j 为高斯函数方差。隐含层到输出层的权值为 $\boldsymbol{\theta} = [\theta_{11}, \theta_{12}, \dots, \theta_{1m}]^T$, 网络输出为

$$\hat{\mathbf{D}} = [\hat{D}_1 \ \hat{D}_2]^T。$$

$$\hat{\mathbf{D}} = \boldsymbol{\theta}^T \mathbf{h} \quad (17)$$

其中: $\mathbf{h} = [h_1 \ h_2 \ \dots \ h_m]^T$ 。

将式(17)代入式(16),可得神经网络滑模控制律为

$$\begin{cases} \mathbf{u}_r = \mathbf{g}^{-1} [\dot{\mathbf{x}}_{\text{ref}} - \mathbf{f}(\mathbf{x}) - k_1 |\mathbf{e}|^{\frac{1}{2}} \cdot \text{sign}(\mathbf{e}) + \mathbf{e}_w - \hat{\mathbf{D}}] \\ \dot{\mathbf{e}}_w = -k_2 \text{sign}(\mathbf{e}) \end{cases} \quad (18)$$

定理 1: 对于系统[式(13)]在神经网络滑模控制律式(18)的作用下,当选取适当的参数 k_1, k_2 时,能使误差 $\mathbf{e}$ 和误差变化率 $\dot{\mathbf{e}}$ 在有限时间内趋近于零。

证明:将式(18)代入式(14)可得:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{e}} = -k_1 |\mathbf{e}|^{\frac{1}{2}} \cdot \text{sign}(\mathbf{e}) + \mathbf{e}_w + \tilde{\mathbf{D}} \\ \dot{\mathbf{e}}_w = -k_2 \text{sign}(\mathbf{e}) \end{cases} \quad (19)$$

其中: $\tilde{\mathbf{D}} = \mathbf{D} - \hat{\mathbf{D}}, \mathbf{D} = \boldsymbol{\theta}^{*T} \mathbf{h}, \boldsymbol{\theta}^*$ 为网络的理想权值。

$$\text{令: } \boldsymbol{\zeta}_i = \begin{bmatrix} \zeta_{i1} \\ \zeta_{i2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |e_i|^{\frac{1}{2}} \text{sign}(e_i) \\ e_{wi} \end{bmatrix},$$

$$\text{则 } \dot{\boldsymbol{\zeta}}_i = \mathbf{A}\boldsymbol{\zeta}_i + \mathbf{B}\tilde{\mathbf{D}}_i。$$

$$\text{其中: } \mathbf{A} = |e_i|^{-\frac{1}{2}} \begin{bmatrix} -\frac{k_1}{2} & \frac{1}{2} \\ -k_2 & 0 \end{bmatrix}; \mathbf{B} = |e_i|^{-\frac{1}{2}} \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \\ 0 \end{bmatrix}。$$

选取 Lyapunov 函数:

$$\mathbf{V} = \boldsymbol{\zeta}_i^T \mathbf{P}_0 \boldsymbol{\zeta}_i + \frac{1}{\gamma} (\boldsymbol{\theta} - \boldsymbol{\theta}^*)^T (\boldsymbol{\theta} - \boldsymbol{\theta}^*) \quad (20)$$

$$\text{其中: } \mathbf{P}_0 = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 2k_2 + \frac{k_1^2}{2} & -\frac{k_1}{2} \\ -\frac{k_1}{2} & 1 \end{bmatrix}; \dot{\mathbf{V}} = \dot{\boldsymbol{\zeta}}_i^T \mathbf{P}_0 \boldsymbol{\zeta}_i +$$

$$\boldsymbol{\zeta}_i^T \mathbf{P}_0 \dot{\boldsymbol{\zeta}}_i + \frac{2}{\gamma} (\boldsymbol{\theta} - \boldsymbol{\theta}^*)^T \dot{\boldsymbol{\theta}} = -\boldsymbol{\zeta}_i^T \mathbf{Q}_0 \boldsymbol{\zeta}_i / |\sigma_i|^{1/2} +$$

$$2\tilde{D}_i B^T P_0 \zeta_i + \frac{2}{\gamma} (\theta - \theta^*)^T \dot{\theta} = -\zeta_i^T Q_0 \zeta_i / |\sigma_i|^{1/2} -$$

$$2(\theta h - \theta^* h)^T B^T P_0 \zeta_i + \frac{2}{\gamma} (\theta - \theta^*)^T \dot{\theta} = -\zeta_i^T Q_0 \zeta_i /$$

$$|\sigma_i|^{1/2} + 2(\theta - \theta^*) \left(-h^T B^T P_0 \zeta_i + \frac{1}{\gamma} \dot{\theta} \right); Q_0 =$$

$$\frac{k_1}{2} \begin{bmatrix} 2k_2 + k_1^2 & -k_1 \\ -k_1 & 1 \end{bmatrix}.$$

令:

$$\dot{\theta} = \gamma h^T B^T P_0 \zeta_i \quad (21)$$

则: $\dot{V} = -\zeta_i^T Q_0 \zeta_i / |\sigma_i|^{\frac{1}{2}}$. 当 $k_1 > 0, k_2 > 0$ 时, Q_0 正定, 则 $\dot{V} < 0$ 负定, 系统稳定。即对于系统 [式(13)] 在神经网络滑模控制律式(18) 的作用下, 当选取适当的参数 k_1, k_2 时能使误差 e 和误差变化率 $\dot{e}$ 在有限时间内趋近于零。

2.2 参考功率的计算

在电网电压不平衡条件下, 有:

$$\begin{cases} u_{s\alpha\beta} = u_{s\alpha\beta+} + u_{s\alpha\beta-} = \\ (u_{s\alpha+} + u_{s\alpha-}) + j(u_{s\beta+} + u_{s\beta-}) \\ i_{s\alpha\beta} = i_{s\alpha\beta+} + i_{s\alpha\beta-} = \\ (i_{s\alpha+} + i_{s\alpha-}) + j(i_{s\beta+} + i_{s\beta-}) \end{cases} \quad (22)$$

将式(22)代入式(6), 可得:

$$\begin{cases} P_s = P_{sA} + P_{sB} + P_{sC} + P_{sD} \\ Q_s = Q_{sA} + Q_{sB} + Q_{sC} + Q_{sD} \end{cases} \quad (23)$$

式中: $P_{sA}, P_{sB}, Q_{sA}, Q_{sB}$ ——平均有功和无功功率;

$P_{sC}, P_{sD}, Q_{sC}, Q_{sD}$ ——有功和无功二倍频分量。

在电网不平衡条件下, 电网电流正负分量为

$$\begin{cases} i_{s\alpha+} = |i_{s+}| \sin(\omega_s t + \varphi_{i+}) \\ i_{s\beta+} = -|i_{s+}| \cos(\omega_s t + \varphi_{i+}) \\ i_{s\alpha-} = -|i_{s-}| \sin(\omega_s t + \varphi_{i-}) \\ i_{s\beta-} = -|i_{s-}| \cos(\omega_s t + \varphi_{i-}) \end{cases} \quad (24)$$

式中: $\varphi_{i+}, \varphi_{i-}$ ——电网电流正负序分量初始相位。

由式(9)和式(24)可得:

$$P_{sA} = \frac{3}{2} (u_{s\alpha+} i_{s\alpha+} + u_{s\beta+} i_{s\beta+}) =$$

$$\frac{3}{2} |u_{s+}| |i_{s+}| \cos(\varphi_{u+} - \varphi_{i+}) \quad (25)$$

$$P_{sB} = \frac{3}{2} (u_{s\alpha-} i_{s\alpha-} + u_{s\beta-} i_{s\beta-}) =$$

$$\frac{3}{2} |u_{s-}| |i_{s-}| \cos(\varphi_{u-} - \varphi_{i-}) \quad (26)$$

$$P_{sC} = \frac{3}{2} (u_{s\alpha+} i_{s\alpha-} + u_{s\beta+} i_{s\beta-}) =$$

$$\frac{3}{2} |u_{s+}| |i_{s-}| \cos(2\omega_s t + \varphi_{u+} + \varphi_{i-}) \quad (27)$$

$$P_{sD} = \frac{3}{2} (u_{s\alpha-} i_{s\alpha+} + u_{s\beta-} i_{s\beta+}) =$$

$$\frac{3}{2} |u_{s-}| |i_{s+}| \cos(2\omega_s t + \varphi_{u-} + \varphi_{i+}) \quad (28)$$

$$Q_{sA} = \frac{3}{2} (u_{s\beta+} i_{s\alpha+} - u_{s\alpha+} i_{s\beta+}) =$$

$$\frac{3}{2} |u_{s+}| |i_{s+}| \sin(\varphi_{u+} - \varphi_{i+}) \quad (29)$$

$$Q_{sB} = \frac{3}{2} (u_{s\beta-} i_{s\alpha-} - u_{s\alpha-} i_{s\beta-}) =$$

$$-\frac{3}{2} |u_{s-}| |i_{s-}| \sin(\varphi_{u-} - \varphi_{i-}) \quad (30)$$

$$Q_{sC} = \frac{3}{2} (u_{s\beta+} i_{s\alpha-} - u_{s\alpha+} i_{s\beta-}) =$$

$$\frac{3}{2} |u_{s+}| |i_{s-}| \sin(2\omega_s t + \varphi_{u+} + \varphi_{i-}) \quad (31)$$

$$Q_{sD} = \frac{3}{2} (u_{s\beta-} i_{s\alpha+} - u_{s\alpha-} i_{s\beta+}) =$$

$$-\frac{3}{2} |u_{s-}| |i_{s+}| \sin(2\omega_s t + \varphi_{u-} + \varphi_{i+}) \quad (32)$$

在不平衡电网电压条件下, DFIG 输入电网的能量包含有功、无功的二倍频波动部分, 必须使功率参考量加入一定的补偿量, 以满足 DFIG 的并网要求。

目标 I: 保持 DFIG 定子有功功率恒定, 消除其中的二倍频波动。令有功的二倍频分量为零, 即: $P_{sC} + P_{sD} = 0$ 。得:

$$\begin{cases} |u_{s+}| |i_{s-}| = |u_{s-}| |i_{s+}| \\ \cos(2\omega_s t + \varphi_{u+} + \varphi_{i-}) = \\ -\cos(2\omega_s t + \varphi_{u-} + \varphi_{i+}) \end{cases} \quad (33)$$

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。将式(33)代入式(31)、式(32), 可得: $Q_{sC} = Q_{sD}$, 进而可得参考值补偿量 $Q_{s_com} = 3(u_{s\beta-} i_{s\alpha+} - u_{s\alpha-} i_{s\beta+})$, 因此参考值 $P_s^* = P_{sA} + P_{sB}, Q_s^* = Q_{sA} + Q_{sB} + Q_{s_com}$ 。

目标 II: 保持 DFIG 定子无功功率恒定, 消除

其中的二倍频波动。令无功的二倍频分量为零, 即 $Q_{sC} + Q_{sD} = 0$ 。得:

$$\begin{cases} |u_{s+}| |i_{s-}| = |u_{s-}| |i_{s+}| \\ \sin(2\omega_s t + \varphi_{u+} + \varphi_{i-}) = \\ \sin(2\omega_s t + \varphi_{u-} + \varphi_{i+}) \end{cases} \quad (34)$$

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。将式(34)代入式(27)、式(28), 可得: $P_{sC} = P_{sD}$, 进而可得如下的参考值补偿量 $P_{s_com} = 3(u_{s\alpha-} i_{s\alpha+} + u_{s\beta-} i_{s\beta+})$, 因此参考值 $P_s^* = P_{sA} + P_{sB} + P_{s_com}$, $Q_s^* = Q_{sA} + Q_{sB} + Q_{s_com}$ 。

目标 III: DFIG 定子电流波形对称, 正弦度良好, 无畸变。定子电流波动是由负序电流所导致, 要消除负序电流产生的影响相当于消除电流负序分量产生的功率波动, 有: $P_{sC} + P_{sD} = 0$, $Q_{sC} + Q_{sD} = 0$ 。可得补偿量:

$$\begin{cases} P_{s_com} = \frac{3}{2}(u_{s\alpha-} i_{s\alpha+} + u_{s\beta-} i_{s\beta+}) \\ Q_{s_com} = \frac{3}{2}(u_{s\beta-} i_{s\alpha+} - u_{s\alpha-} i_{s\beta+}) \end{cases} \quad (35)$$

因此参考值为

$$\begin{cases} P_s^* = P_{sA} + P_{sB} + P_{s_com} \\ Q_s^* = Q_{sA} + Q_{sB} + Q_{s_com} \end{cases} \quad (36)$$

3 仿真验证

为了验证所提控制策略的有效性, 对所提神经网络滑模控制风力发电系统进行仿真研究。电机主要参数: 电机额定功率为 2 MW, 额定频率为 50 Hz, 定子额定电压为 690 V, 定子电阻为 0.002 6 Ω , 转子电阻为 0.002 9 Ω , 定子自感为 0.002 587 H, 转子自感为 0.002 587 H, 定转子互感为 0.002 5 H。二阶滑模控制参数的选择: $k_1 = 3\,990\,000$, $k_2 = 100$ 。RBF 神经网络参数选择: 隐含层有 5 个神经元。神经元的中心值为

$$\begin{aligned} c = & \\ \begin{bmatrix} -1\,000\,000 & -500\,000 & 0 & 500\,000 & 1\,000\,000 \\ -500\,000 & -250\,000 & 0 & 250\,000 & 500\,000 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (37)$$

神经元的方差:

$$\begin{aligned} b = & \\ [150\,000 & 150\,000 & 150\,000 & 150\,000 & 150\,000] \end{aligned} \quad (38)$$

隐含层到输出层的连接权值 θ 初值设计为零附近的随机值, 用自适应律式(21)在线更新网络权值。

为了与所提控制策略进行比较, 对传统滑模控制的双馈风力发电系统也进行了仿真研究。假设电机运行在额定状态, 在 0.12 s 时 C 相产生 15% 的电压跌落故障。图 3 所示为电机三相定子电压波形。

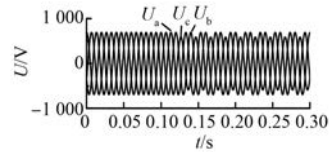


图3 电机三相定子电压波形

图 4 和图 5 所示分别为针对控制目标 I 的传统滑模控制和神经网络滑模控制的仿真波形。在 0~0.12 s 的电网电压平衡时间内, 神经网络滑模

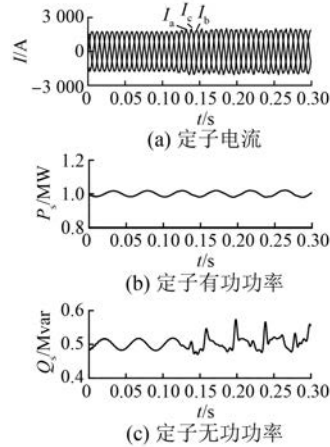


图4 目标 I 传统滑模控制

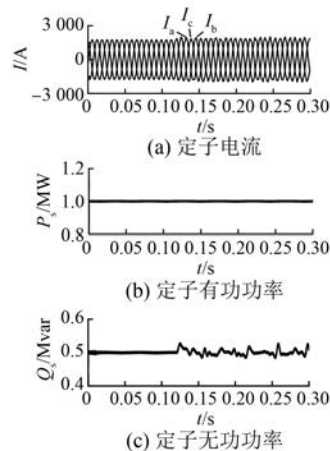


图5 目标 I 神经网络滑模控制

控制策略和传统滑模控制都实现了对 DFIG 的有效控制,定子电流波形正弦无畸变,定子有功、无功功率均保持恒定;但神经网络滑模控制下有功、无功功率的波动都小于传统滑模控制。

在 0.12 s 发生 C 相 15% 的电压跌落,由图 4(a)和图 5(a)可知,神经网络滑模控制的电流正弦度比传统滑模控制更佳。由图 4(b)和图 5(b)可知,传统滑模控制的有功功率波动范围为 $-2.29\% \sim 1.94\%$;神经网络滑模控制的有功功率波动范围为 $-0.58\% \sim 0.80\%$ 。神经网络滑模控制能更好地消除有功功率的二倍频波动。由图 4(c)和图 5(c)可以看出,传统滑模控制无功功率的二倍频波动为 $-5.32\% \sim 16.37\%$;神经网络滑模控制无功功率的二倍频波动为 $-2.87\% \sim 13.64\%$,神经网络滑模控制更佳。

图 6 和图 7 所示分别为针对控制目标 II 的传统滑模控制和神经网络滑模控制仿真波形。在 0~0.12 s 电网电压平衡状态下二者都能达到期望的目标,神经网络滑模控制效果更佳。在 0.12 s 以后,电网发生 C 相 15% 的电压跌落,由图 6(a)和图 7(a)可知,神经网络滑模控制的电流正弦度优于传统滑模控制。由图 6(b)和图 7(b)可知,传统滑模控制有功功率的二倍频波动为 $-7.44\% \sim 7.42\%$;神经网络滑模控制有功功率的二倍频波动为 $-5.64\% \sim 7.52\%$,神经网络滑模控制的控制效果更佳。

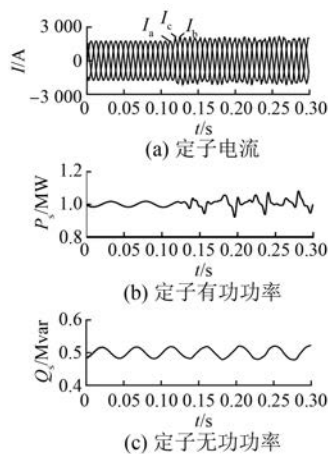


图 6 目标 II 传统滑模控制

由图 6(c)和图 7(c)可知,传统滑模控制的无功功率波动为 $-5.32\% \sim 4.11\%$;神经网络滑模控制无功功率波动仅为 $-0.95\% \sim 0.84\%$,优于传

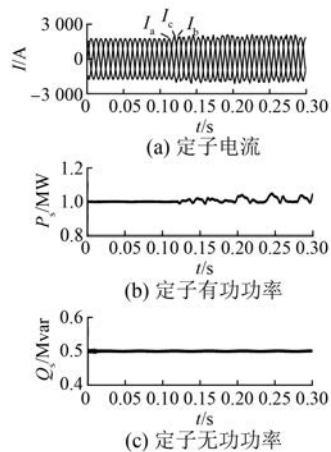


图 7 目标 II 神经网络滑模控制

统滑模控制。

图 8 和图 9 所示分别为针对控制目标 III 的传统滑模控制和神经网络滑模控制仿真波形。在 0~0.12 s 电网电压平衡状态下,二者都能达到

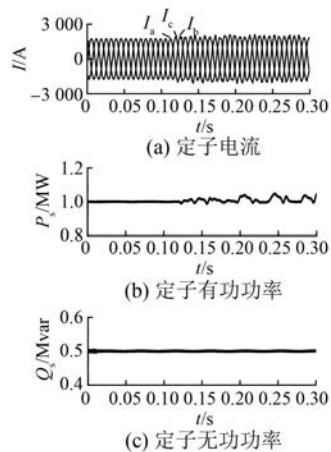


图 8 目标 III 传统滑模控制

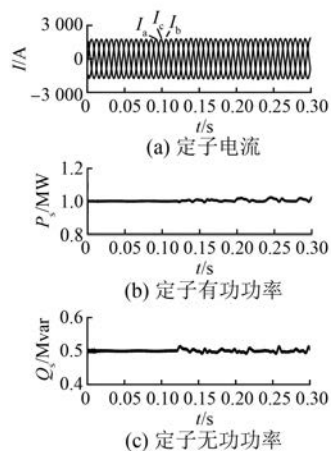


图 9 目标 III 神经网络滑模控制

期望的目标,神经网络滑模控制的有功、无功控制效果要好于传统滑模。在 0.12 s 以后,电网发生 C 相 15% 的电压跌落,由图 8(a) 和图 9(a) 可知,神经网络滑模控制的定子电流比传统滑模控制更加平滑,正弦度更好;由图 8(b)、图 8(c) 和图 9(b)、图 9(c) 可以看出,神经网络滑模控制的有功、无功功率的波动要小于传统滑模控制。

4 结 语

本文针对不平衡电网电压条件下 DFIG 运行不佳的问题,提出了解决方案。采用神经网络滑模控制策略,二阶滑模能削弱系统的抖振,神经网络控制器对系统的不确定部分进行估计,提高了系统的控制精度,改善了系统的控制性能,同时,用 Lyapunov 稳定性定理推导了神经网络的权值更新律。最后进行仿真,验证了所提神经网络滑模控制实现了消除有功、无功功率二倍频波动,保持定子电流正弦无畸变的控制目标。

【参 考 文 献】

- [1] 马宏忠,李思源.双馈异步风力发电机气隙偏心故障诊断研究现状与发展[J].电机与控制应用,2018,45(3): 117.
- [2] 李海波.MW 级双馈风力发电系统控制策略研究[J].电器与能效管理技术,2018(24): 60.
- [3] 赵晶晶,左亮亮,赵铃光,等.DFIG 在微电网中的电压控制策略与小干扰电压稳定性分析研究[J].电机与控制应用,2018,45(3): 22.
- [4] 王艾萌,张佳,郝文远.不对称电网故障下双馈风力发电机的比例-积分-谐振滑模控制器设计[J].电机与控制应用,2017,44(9): 110.
- [5] 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.
- [6] 陈思哲,章云,吴捷,等.不平衡电网电压下双馈风力发电系统的比例-积分-谐振并网控制[J].电网技术,2012,36(8): 62.
- [7] 刘军,蒋说东.不平衡电网电压下双馈感应发电机无源控制[J].控制理论与应用,2012,29(10): 1331.
- [8] WEI S, LI Z, FU Y, et al. Inter-turn faults diagnosis on stator windings of offshore wind DFIGs considering current estimated difference [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(13): 3969.
- [9] WANG Y, XIA Y, LI H, et al. A new integral sliding mode design method for nonlinear stochastic systems [J]. Automatica, 2018, 90(4): 304.
- [10] 郭风堂,包广清.反推滑模控制在电磁耦合调速型风电机组中的应用研究[J].电机与控制应用,2018,45(2): 118.
- [11] 董玲玲,管萍,杨秀媛.不平衡电网下双馈电机的直接功率控制[J].北京信息科技大学学报(自然科学版),2017,32(4): 23.
- [12] 马斌,张丽艳.一种基于径向基神经网络的短期风电功率直接预测方法[J].电力系统保护与控制,2015,43(19): 78.
- [13] 秦斌,周浩,杜康,等.基于 RBF 网络的风电机组变桨距滑模控制[J].电工技术学报,2013,28(5): 37.
- [14] MORENO J A, OSORIO M. A Lyapunov approach to second-order sliding mode controllers and observers [C] // 2008 47th IEEE Conference on Decision and Control, 2008.

收稿日期: 2019-01-25

【期刊简介】

《电机与控制应用》(原《中小型电机》)创刊于 1959 年,是经国家新闻出版总署批准注册,由上海电器科学研究所(集团)有限公司主办的具有专业权威的电工技术类科技期刊。

期刊定位于电机、控制和应用三大板块,以中小型电机为基础,拓展新型的高效节能和微特电机技术,以新能源技术和智能控制技术引领和提升传统的电机制造技术为方向,以电机系统节能为目标开拓电机相关应用,全面报道国内外的最新技术、产品研发、检测、标准及相关的行业信息。

本刊每月 10 日出版,国内外公开发行,邮发代号 4-

199。在半个多世纪的岁月中,本刊为我国中小型电机行业的技术进步与发展做出了巨大的贡献,在中国电机及其应用领域享有很高的声誉。

依托集团公司雄厚的技术实力和广泛的行业资源,《电机与控制应用》正朝着专业化品牌媒体的方向不断开拓创新,在全国科技期刊界拥有广泛的知名度,是“中国学术期刊综合评价数据库来源期刊”、“中国科学引文数据库来源期刊”、“中国学术期刊(光盘版)全文收录期刊”,得到了业内人士的普遍认可,备受广大读者的推崇和信赖,多次被评为中文核心期刊、中国科技核心期刊、全国优秀科技期刊。