文章编号:1000-8152(2012)02-0245-06

双馈感应风力发电机组的滑模直接电压控制

张 淼1,李运德1,陈思哲1,吴 捷2

(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:为解决PI矢量控制动态响应慢且依赖电机精确参数的问题,本文将滑模控制与空间矢量调制结合,提出了一种开关频率固定的滑模直接电压控制(SMDVC)方法,以实现双馈感应电机(DFIG)的电网同步控制.实验结果表明,提出的SMDVC方法具有比PI矢量控制更好的动态性能,即使在电网电压不平衡工况下,也能较好地控制DFIG定子电压实现对电网电压的精确跟踪.

关键词:风力发电;双馈感应电机;滑模直接电压控制中图分举号:TM315 文献标识码:A

Sliding-mode-direct-voltage-control of wind turbines based on double-fed induction generators

ZHANG Miao¹, LI Yun-de¹, CHEN Si-zhe¹, WU Jie²

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

Abstract: To handle the slow dynamic response and the dependency on accurate machine parameters in PI vector control, we propose a sliding-mode direct-voltage-control (SMDVC) with constant switching frequency to realize the grid-synchronized control for the double-fed induction generators (DFIG). Experimental results show that the proposed SMDVC method is with better dynamic performance than the PI vector control; it can effectively control the stator voltages of DFIG to accurately track the grid voltages under imbalance conditions.

Key words: wind power generation; doubly-fed induction generator; sliding-mode-direct-voltage-control

1 引言(Introduction)

为缓解能源危机与环境污染,大规模开发以风能、太阳能为代表的各类可再生能源,已经成为人 类社会实现长期可持续发展的必然选择^[1].

基于双馈感应电机(double-fed induction generators, DFIG)的风力发电机组,具有灵活调节电磁转矩 和无功功率、实现最大风能捕获、减小机械应力、提 高电能质量等优点,而且其变流器只需传输滑差功 率,容量小、成本低,因此在大功率变速恒频风力发 电中得到广泛应用.

随着风力发电机组单机容量的不断增加,无冲击 并网控制技术越来越受到重视.实现风力发电机组 的无冲击并网,不仅能有效的保护发电机、变流器 和传动机构等部件,而且对于电力系统的安全稳定 运行也具有至关重要的作用.

文献[2]采用基于矢量定向的并网控制方法,在同步旋转d-q轴坐标系中设计了双闭环嵌套结构的电网同步控制器,内环为转子电流环,外环为定子电

压环,以控制定子电压跟踪电网电压. 文献[3]设计 了基于直接电压控制的电网同步控制方法,通过转 子电压直接控制定子电压,简化控制器结构.

上述基于PI矢量控制的DFIG电网同步控制,具 有动态响应慢、依赖电机精确参数等缺点.为解决 这一问题,文献[4]将直接转矩控制的思想应用于 DFIG的电网同步控制,采用与直接转矩控制相同 的开关表和滞环控制器以调节转子磁链,在此基础 上设计控制器以实现对定子电压幅值、频率和相位 的控制.文献[5]提出直接虚拟转矩控制方法以实 现DFIG的电网同步控制,通过调节转子磁通和所定 义的虚拟转矩,控制定子电压跟踪电网电压.

虽然直接转矩控制具有动态响应快且不依赖电机参数等优点,但滞环控制器使变流器的开关频率变化,造成波形畸变,影响输出电能质量^[6-7].

为解决PI矢量控制动态响应慢和直接转矩控制 开关频率变化的问题,本文将滑模控制与空间矢量 调制结合,提出一种开关频率固定的滑模直接电压

收稿日期: 2011-06-11; 收修改稿日期: 2011-09-22.

基金项目: 广东省重大科技专项资助项目(2009A080304011); 国家自然科学基金重点资助项目(60534040); 广东省 "211" 工程资助项目(粤 发改[431]).

控制(SMDVC)方法,以实现DFIG的电网同步控制. 实验结果表明,提出的SMDVC方法具有很好的动态 响应特性,即使在电网电压不平衡工况下,依旧能实 现定子电压对电网电压的精确跟踪.

2 模型分析(Model analysis)

图1为基于DFIG的风力发电机组.DFIG定子绕 组直接与电网连接,转子绕组由双PWM变换器励磁, 其中转子侧变换器用于控制DFIG,而网侧变换器主 要用于稳定直流侧电容电压.



图 1 基于DFIG的风力发电机组

Fig. 1 Wind Turbine Based on the DFIG

由于并网前DFIG的定子绕组悬空,定子电流为 零,DFIG在同步旋转d-q轴坐标系中的电压和磁链 方程如下:

$$\vec{u}_{\rm dqs} = \frac{\mathrm{d}\lambda_{\rm dqs}}{\mathrm{d}t} + \mathrm{j}\omega_{\rm e}\vec{\lambda}_{\rm dqs},\tag{1}$$

$$\vec{u}_{\rm dqr} = R_{\rm r}\vec{i}_{\rm dqr} + \frac{\mathrm{d}\lambda_{\rm dqr}}{\mathrm{d}t} + j(\omega_{\rm e} - p_n\omega_{\rm r})\vec{\lambda}_{\rm dqr}, \quad (2)$$

$$\lambda_{\rm dqs} = L_{\rm m} i_{\rm dqr},\tag{3}$$

$$\lambda_{\rm dqr} = L_{\rm r} i_{\rm dqr},\tag{4}$$

其中: R_r 为转子电阻, L_m 为定转子互感, L_r 为转子自 感, \vec{u}_{dqs} , $\vec{\lambda}_{dqs}$ 分别表示定子电压、磁链矢量, \vec{u}_{dqr} , \vec{i}_{dqr} , $\vec{\lambda}_{dqr}$ 分别表示转子电压、电流、磁链矢量, ω_e 为 同步旋转速度, ω_r 为转子角速度, p_n 为电机极对数.

由式(1)-(4)可见, DFIG是一个多变量系统, 其dq轴间存在交叉耦合.为选择最合适的输入输出控制 关系, 采用基于相对增益阵列(RGA)的多变量控制 系统分析方法, 以计算转子d-q轴电压、转子d-q轴电 流、定子d-q轴电压之间的相关程度, 作为选择控制 关系的理论依据.

RGA是将系统传递函数矩阵中的元素与其转置 矩阵的逆矩阵中对应位置的元素相乘所得到的矩 阵. RGA中某元素的值越大,说明该元素所对应的输 入和输出变量之间的相关程度越高^[8].

首先,分析转子d-q轴电流与定子d-q轴电压间的 相关程度.将式(3)代入式(1),并进行拉氏变换,得转 子电流对定子电压的传递函数矩阵:

$$\begin{bmatrix} u_{\rm ds} \\ u_{\rm qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{\rm m}s & -\omega_{\rm e}L_{\rm m} \\ \omega_{\rm e}L_{\rm m} & L_{\rm m}s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\rm dr} \\ i_{\rm qr} \end{bmatrix}, \qquad (5)$$

其中: u为电压, i为电流, s为拉普拉斯算子, 下标d和 q分别表示d, q轴, 下标s和r分别表示定、转子.

式(5)中传递函数矩阵的RGA为

$$\begin{bmatrix} L_{\rm m}s & -\omega_{\rm e}L_{\rm m} \\ \omega_{\rm e}L_{\rm m} & L_{\rm m}s \end{bmatrix} \cdot \times \left(\begin{bmatrix} L_{\rm m}s & -\omega_{\rm e}L_{\rm m} \\ \omega_{\rm e}L_{\rm m} & L_{\rm m}s \end{bmatrix}^{\rm T} \right)^{-1} = \frac{1}{s^2 + \omega_{\rm e}^2} \begin{bmatrix} s^2 & \omega_{\rm e}^2 \\ \omega_{\rm e}^2 & s^2 \end{bmatrix},$$
(6)

其中".×"表示将矩阵中对应位置的元素相乘.

由于RGA方法只用于分析系统各变量间的相关 程度,并不直接用于设计控制器,为简化RGA计算过 程,一般在零频率下计算系统的RGA以获得稳态情 况下的输入输出控制关系^[8].因此,式(6)的计算结果 如下:

$$\frac{1}{s^2 + \omega_{\rm e}^2} \begin{bmatrix} s^2 & \omega_{\rm e}^2 \\ \omega_{\rm e}^2 & s^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}.$$
 (7)

根据式(7)的RGA计算结果,式(5)中正确的输入 输出控制关系为:转子d轴电流控制定子q轴电压;转 子q轴电流控制定子d轴电压.

接着,分析转子d-q轴电压与转子d-q轴电流间的 相关程度.将式(4)代入式(2),并进行拉氏变换,得转 子电压与转子电流的传递函数矩阵:

$$\begin{bmatrix} u_{\rm dr} \\ u_{\rm qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{\rm r} + L_{\rm r}s & -\omega_{\rm s}L_{\rm r} \\ \omega_{\rm s}L_{\rm r} & R_{\rm r} + L_{\rm r}s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\rm dr} \\ i_{\rm qr} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

其中 $\omega_{\rm s} = (\omega_{\rm e} - p_n \omega_{\rm r})$ 为滑差速度.

式(8)中传递函数矩阵的RGA为

$$\begin{bmatrix} R_{\rm r} + L_{\rm r}s & -\omega_{\rm s}L_{\rm r} \\ \omega_{\rm s}L_{\rm r} & R_{\rm r} + L_{\rm r}s \end{bmatrix} \cdot \times \\ \left(\begin{bmatrix} R_{\rm r} + L_{\rm r}s & -\omega_{\rm s}L_{\rm r} \\ \omega_{\rm s}L_{\rm r} & R_{\rm r} + L_{\rm r}s \end{bmatrix}^{\rm T} \right)^{-1} = \\ \frac{1}{(R_{\rm r} + L_{\rm r}s)^2 + (\omega_{\rm s}L_{\rm r})^2} \begin{bmatrix} (R_{\rm r} + L_{\rm r}s)^2 & (\omega_{\rm s}L_{\rm r})^2 \\ (\omega_{\rm s}L_{\rm r})^2 & (R_{\rm r} + L_{\rm r}s)^2 \end{bmatrix} .$$

$$(9)$$

当DFIG运行于同步转速附近时,ω_s约等于零,式 (9)的计算结果为

$$\frac{1}{(R_{\rm r} + L_{\rm r}s)^2 + (\omega_{\rm s}L_{\rm r})^2} \times \left[\begin{pmatrix} (R_{\rm r} + L_{\rm r}s)^2 & (\omega_{\rm s}L_{\rm r})^2 \\ (\omega_{\rm s}L_{\rm r})^2 & (R_{\rm r} + L_{\rm r}s)^2 \end{bmatrix} = \left[\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ \end{pmatrix} \right].$$
(10)

根据式(10)的RGA计算结果,式(8)中正确的输入 输出控制关系为:转子d轴电压控制转子d轴电流;转 子q轴电压控制转子q轴电流.当DFIG运行于同步转 速±30%以内区域时, RGA分析得到的输入输出控 制关系与同步转速时相同.

总结前面分析,并网前DFIG转子d-q轴电压与 定子d-q轴电压的控制关系为:转子d轴电压控制定 子q轴电压,转子q轴电压控制定子d轴电压.

根据前面分析结果,推导转子电压对定子电压的 直接控制关系.将式(5)两边同乘以*s*,得

$$\begin{bmatrix} su_{\rm ds} \\ su_{\rm qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{\rm m}s^2 & -s\omega_{\rm e}L_{\rm m} \\ s\omega_{\rm e}L_{\rm m} & L_{\rm m}s^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\rm dr} \\ i_{\rm qr} \end{bmatrix}.$$
 (11)

根据RGA分析结果,式(11)中矩阵对角线元素的作用很小,可视为扰动.将式(8)代入式(11),得

$$\begin{bmatrix} su_{\rm ds} \\ su_{\rm qs} \end{bmatrix} = \frac{\omega_{\rm e}L_{\rm m}}{L_{\rm r}} \begin{bmatrix} -u_{\rm qr} \\ u_{\rm dr} \end{bmatrix} + \omega_{\rm e}L_{\rm m} \begin{bmatrix} \omega_{\rm s} & \frac{R_{\rm r}}{L_{\rm r}} \\ -\frac{R_{\rm r}}{L_{\rm r}} & \omega_{\rm s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\rm dr} \\ i_{\rm qr} \end{bmatrix} + L_{\rm m}s^2 \begin{bmatrix} i_{\rm dr} \\ i_{\rm qr} \end{bmatrix}.$$
 (12)

3 滑模直接电压控制器设计(Design of SMDVC)

滑模控制通过不断切换控制器结构,强迫系统状态沿滑动面运动,从而使系统的响应特性仅决定于预先设计的滑动面,而与系统参数和外界扰动无关,因此具有动态响应快、鲁棒性好等优点^[9].

在DFIG的电网同步控制过程中,电网电压是唯一不受DFIG运行状态影响的电磁量,因此令同步旋转坐标系的q轴与电网电压矢量重合, d轴与电网电压矢量垂直.

电网同步控制的目标是控制DFIG的定子d-q轴 电压分别跟踪电网d-q轴电压,从而使定子与电网电 压的幅值、频率和相位相同.因此定义系统状态变 量为定子d-q轴电压与电网d-q轴电压的偏差:

$$\begin{bmatrix} x_{\rm d} \\ x_{\rm q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{\rm ds} - u_{\rm dg} \\ u_{\rm qg} - u_{\rm qs} \end{bmatrix}.$$
 (13)

根据状态变量设计系统的滑动面如下:

$$\begin{bmatrix} s_{\mathrm{d}} \\ s_{\mathrm{q}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{\mathrm{d}} \\ x_{\mathrm{q}} \end{bmatrix} + c \int_{-\infty}^{t} \begin{bmatrix} x_{\mathrm{d}}(z) \\ x_{\mathrm{q}}(z) \end{bmatrix} \mathrm{d}z = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$
(14)

其中: c为滑动面系数, z为积分器辅助变量.

令式(14)中积分器的初始状态为

$$\int_{-\infty}^{0} \begin{bmatrix} x_{\rm d}(z) \\ x_{\rm q}(z) \end{bmatrix} \mathrm{d}z = -\frac{1}{c} \begin{bmatrix} x_{\rm d0} \\ x_{\rm q0} \end{bmatrix}, \qquad (15)$$

其中 x_{d0} 和 x_{q0} 分别为 x_{d} 和 x_{q} 的初始状态.

因此,
$$\Delta t_0 = 0$$
时式(14)满足如卜夫系:

$$\begin{bmatrix} s_{d}(t_{0}) \\ s_{q}(t_{0}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{d}(t_{0}) \\ x_{q}(t_{0}) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_{d0} \\ x_{q0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$
 (16)

式(16)说明,只需按式(15)设定积分器的初始状态,便可使系统状态在初始时刻即处于滑动面上,即进入滑模运动状态.

滑模控制器输出由等效控制和开关控制组成

$$\begin{bmatrix} u_{\rm qr} \\ u_{\rm dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{\rm qr}^{\rm eq} \\ u_{\rm dr}^{\rm eq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta u_{\rm qr} \\ \Delta u_{\rm dr} \end{bmatrix}.$$
 (17)

等效控制的作用是控制DFIG的标称额定模型, 使系统状态在理想情况下沿着滑动面运动.根据 式(16),系统的状态变量在初始时刻即处于滑动面 上,因此设计等效控制时只需令

$$\dot{s}_{\rm d} = \dot{s}_{\rm q} = 0.$$
 (18)

满足上述条件的等效控制为

$$\begin{bmatrix} u_{\rm qr}^{\rm eq} \\ u_{\rm dr}^{\rm eq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{\rm r0}\omega_{\rm s} & R_{\rm r0} \\ R_{\rm r0} & -L_{\rm r0}\omega_{\rm s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\rm dr} \\ i_{\rm qr} \end{bmatrix} + \frac{L_{\rm r0}}{\omega_{\rm e}L_{\rm m0}} \left(c \begin{bmatrix} x_{\rm d} \\ x_{\rm q} \end{bmatrix} + \frac{\rm d}{\rm dt} \begin{bmatrix} -u_{\rm ds}^* \\ u_{\rm qs}^* \end{bmatrix} \right), \quad (19)$$

其中R_{r0}, L_{r0}, L_{m0}为电机的标称额定参数.

等效控制只能保证系统状态在理想情况下沿着 滑动面运动.当系统存在参数误差时,必须通过开关 控制的作用,在系统状态离开滑动面后能将其拉回 到滑动面上.设计滑模控制器的开关控制为

$$\begin{bmatrix} \Delta u_{\rm qr} \\ \Delta u_{\rm dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{\rm d1} x_{\rm d} \text{sgn}(s_{\rm d} x_{\rm d}) + K_{\rm d2} \text{sgn} s_{\rm d} \\ K_{\rm q1} x_{\rm q} \text{sgn}(s_{\rm q} x_{\rm q}) + K_{\rm q2} \text{sgn} s_{\rm q} \end{bmatrix},$$
(20)

其中K为开关常数,其选取原则是在系统参数误差存在且有界的情况下,使滑模存在条件成立:

$$\begin{bmatrix} s_{\rm d} \dot{s}_{\rm d} \\ s_{\rm q} \dot{s}_{\rm q} \end{bmatrix} < \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \tag{21}$$

SMDVC算法的原理如图2所示.由式(19)可知, 当定子电压参考值u^{*}_{ds},u^{*}_{qs}阶跃变化时,其微分项为 无穷大,然而实际的控制器无法输出无穷大电压.为 解决这一问题,在图2中定子电压参考值u^{*}_{ds},u^{*}_{qs}的 前向通道上增加了限制定子电压参考值变化速度的 环节,从而限定了微分项的最大值.

式(20)中的开关函数会引起滑动面附近的抖振. 为解决这一问题,在图2中采用饱和函数取代开关函数,从而将滑动面附近的微小领域内不连续的开关 控制变成连续的线性控制,避免边界层内的抖振.由 于滑模控制器中存在积分控制环节,可有效消除边 界层内线性控制所导致的稳态误差^[9].



Fig. 2 Block diagram of the proposed SMDVC

4 实验结果(Experimental results)

在实验室中搭建了图3所示的基于DFIG的风 力发电实验平台.采用直流电动机代替风力机 与DFIG同轴连接.DFIG的定、转子绕组均采用星 型联接方式,定子绕组通过并网开关和三相自耦 调压器与电网连接,转子绕组由基于智能功率模 块的PWM变换器进行励磁控制.

实验平台中的控制器采用型号dSpace DS1103. dSpace以5kHz的频率采样电网电压、定子电压、转子电流和电机转速,按设计的控制算法进行处理,并产生开关频率为10kHz的SVPWM信号以驱动转子变换器.实验过程中的数据和波形可在安装dSpace的计算机上显示和保存.



图 3 基于DFIG的实验平台 Fig. 3 Experimental platform based on DFIG

实验平台中DFIG的额定功率为1.8kW,额定频 率为50Hz,同步转速为1500RPM,定转子匝数比 为3.1667,定、转子额定电压分别为380V,120V, 定、转子额定电流分别为4.5A,10A,定转子间互 感为0.2987H(折算到定子侧),定、转子漏感均为 0.0186H(折算到定子侧),转子电阻为5.8985Ω(折 算到定子侧),定子电阻为2.6596Ω.

在SMDVC算法中,定子q轴和d轴电压参考值

变化速度分别限定为 \pm 5000 V/s和 \pm 500 V/s,滑动 面系数c的值设定为80.为确定开关控制常数,假 定DFIG参数误差范围为额定值 \pm 50%,为满足式 (21)的滑模存在条件,式(20)中开关常数应设定为 $K_{d1}=0.04, K_{d2}=37.23, K_{q1}=0.04, K_{q2}=28.87.$

在相同的实验条件下对传统PI矢量控制方法 与提出的SMDVC方法进行比较.PI矢量控制采用 双闭环结构,内环为转子电流控制环,外环为定子 电压控制环,通过设定PI控制器参数,使内、外环 的闭环时间常数分别为2ms和20ms.

首先,在正常情况下进行实验研究.图4为PI矢 量控制下的电网q轴电压、定子q轴电压和定子d轴 电压波形(电网d轴电压为零,图中未画出).PI矢量 控制有效地控制定子d-q轴电压分别跟踪电网dq轴电压,且具有良好的控制性能.由于定子d-q轴 电压很好地实现了对电网d-q轴电压的跟踪,图5中 的定子线电压在4个周期后即获得与电网电压相 同的幅值、频率和相位,满足了并网条件.

在相同的条件下, SMDVC方法的实验结果如 图6--7所示. 图6为电网q轴电压、定子q轴电压和定 子d轴电压波形. 图7为电网、定子线电压波形. 可见, SMDVC同样在4个周期内使定子电压与电网 电压具有相同的幅值、频率和相位.



图 4 PI矢量控制的电网、定子*d*-*q*轴电压 Fig. 4 Grid, stator *d*-*q* axis voltages with PI vector control



图 5 PI矢量控制的电网、定子线电压











图 7 SMDVC的电网、定子线电压 Fig. 7 Grid, stator line voltages with SMDVC

由图4--7可见,在正常情况下,PI矢量控制与提出的SMDVC都能很好地实现DFIG的电网同步控制,且都具有良好的控制性能.

大型风电场常处于长输电线末端,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、三相不平衡负载或单相大功率负载等原因,造 成风力发电机组接入点处的电网电压不平衡^[10].

不平衡电压矢量由正、负序分量组成. 在同步旋转坐标系中,正序分量为直流量,负序分量为二倍电网频率的交流量,因此不平衡电网电压将体现为直流分量与100 Hz交流分量的叠加.

在电网电压不平衡工况下,同步旋转坐标系中的电网*d-q*轴电压是周期性变化的,这对DFIG电网同步控制方法的动态性能提出了较高的要求.

在实验平台中,增加一台调压器单独降低C相 电压,以模拟不平衡程度为10%的电网电压,对PI 矢量控制方法和SMDVC方法进行实验对比.

图8-9为PI矢量控制的实验结果.由于矢量控制的动态响应速度慢,DFIG定子q轴电压无法实现对周期变化的电网q轴电压的准确跟踪,因此定子线电压与电网线电压间存在较大的偏差,将会引起并网时刻的电流冲击.

图10-11为采用SMDVC方法的实验结果.采用 SMDVC后, DFIG定子q轴电压迅速跟踪周期变化 的电网q轴电压, 两者基本不存在偏差, 因此定子 线电压很好地实现了对不平衡电网电压的跟踪.





under unbalanced grid voltage







图 9 电网电压不平衡时PI矢量控制的电网、定子线电压

Fig. 9 Grid, stator line voltages with PI vector control under

unbalanced grid voltage



图 10 电网电压不平衡时SMDVC的电网、定子d-q轴电压

Fig. 10 Grid, stator *d-q* axis voltages with SMDVC under unbalanced grid voltage





由图8-11可见, SMDVC方法具有比PI矢量控制方法更好的动态性能,即使在电网电压不平衡工况下,依旧能很好地实现DFIG的电网同步控制.

5 结论(Conclusion)

本文采用RGA方法分析并网前DFIG的模型,

建立转子电压对定子电压的直接控制关系,消除 了转子电流控制环节.在此基础上将滑模控制与 空间矢量调制结合,提出开关频率固定的SMDVC 方法,以实现DFIG的电网同步控制,从而克服了PI 矢量控制动态响应慢、依赖电机精确参数的缺点.

实验结果表明,提出的SMDVC方法具有比PI 矢量控制更好的动态性能,即使在电网电压不平 衡工况下,也能控制DFIG定子电压实现对电网电 压的精确跟踪.

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] MOREL L, GODFROID H, A MIRZAIAN, et al. Double-fed induction machine: converter optimisation and field oriented control without position sensor[J]. *IEE Proceedings on Electric Power Applications*, 1998, 145(4): 360 – 368.
- [3] WONG K C, HO S L, CHENG K W E. Direct voltage control for grid synchronization of doubly-fed induction generators[J]. *Electric Power Components and Systems*, 2008, 36(9): 960 – 976.
- [4] GóMEZ S A, AMENEDO J L R. Grid synchronisation of doubly fed induction generators using direct torque control[C] //Proceedings of the 28th IEEE Industrial Electronics Annual Conference. Piscatway: IEEE, 2002: 3338 – 3343.
- [5] ARBI J, GHORBAL M J B, SLAMA-BELKHODJA I, et al. Direct virtual torque control for doubly fed induction generator grid connection[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, 56(10): 4163 – 4173.
- [6] BUJA G S, KAZMIERKOWSKI M P. Direct torque control of PWM inverter-fed AC motors-a survey[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2004, 51(4): 744 – 757.
- [7] HOLTZ J. Pulsewidth modulation for electronic power conversion[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1994, 82(8): 1194 – 1214.
- [8] ALBERTOS P, SALA A. *Multivariable Control Systems*[M]. London: Springer-Verlag, 2004: 129 – 136.
- [9] UTKIN V I, GÜLDNER J, SHI J X. Sliding Mode Control in Electromechanical Systems[M]. Florida: CRC, 1999: 115 – 130.
- [10] 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.

作者简介:

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;

李运德 (1982—), 男, 硕士, 目前研究方向为风力发电与电机 控制技术, E-mail: liyund456@163.com;

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;

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.