

# 电网电压非平衡状态下双馈发电机转子侧变换器的改进控制策略

赵帅央<sup>1</sup>, 葛宝明<sup>1</sup>, 毕大强<sup>2</sup>

(1. 北京交通大学电气工程学院, 北京 100044; 2. 清华大学电力系统国家重点实验室, 北京 100084)

**摘要:** 针对传统双馈感应发电机 (DFIG) 传统矢量控制方法在电网电压非平衡状态下控制性能较差, 不利于 DFIG 系统的稳定运行的缺点, 在改进锁相环的基础上建立了转子侧变换器的改进控制策略, 以提高 DFIG 在电网电压非平衡状态下的控制性能。基于电网非平衡时正负序电压分量的空间矢量关系, 详细分析了该控制原理, 并在 Matlab/Simulink 中进行了系统仿真。仿真结果验证了电网电压非平衡时该控制策略可有效减小 DFIG 转子电流谐波含量和电磁转矩脉动, 稳定机端功率输出, 提高了双馈风力发电系统在电网电压非平衡状态下的稳定性。

**关键词:** 双馈感应发电机; 电压非平衡; 矢量控制; 正序和负序; 锁相环

## Improved control method for DFIG rotor side converters under unbalanced grid voltage

ZHAO Shuai-yang<sup>1</sup>, GE Bao-ming<sup>1</sup>, BI Da-qiang<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. State Key Lab of Power Systems, Dept of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Traditional vector control method of doubly-fed induction generator (DFIG) has poor performance and causes unstable operation of DFIG system under unbalanced grid voltage. Aiming at the defect, this paper proposes an improved control method of rotor side converters based on a new software phase-locked loop (SPLL). According to the relationship between positive and negative sequence components of voltage vector under unbalanced grid, this paper analyses the principle of the proposed control method in detail and conducts the simulation in Matlab/Simulink. Simulation results verifies that the improved control method can effectively reduce the rotor-current harmonics and electromagnetic torque ripple and stabilize the output power of DFIG under unbalanced grid voltage. Therefore, the improved method can improve the stability of DFIG system under the unbalanced grid voltage.

**Key words:** doubly-fed induction generator (DFIG); unbalanced grid voltage; vector control; positive and negative sequence; phase-locked loop

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)19-0010-07

## 0 引言

DFIG 只需供给转差功率就可以调节风力机的转速, 实现最大风能跟踪, 所需变流器容量小, 具有有功功率和无功功率独立调节等特点, 因此目前 DFIG 在风力发电系统中应用比较广泛。随着风力发电容量的增加, 风电和电网的相互影响越来越突出, 实际中电网经常会出现非平衡状态, 引起电机各电磁量的波动, 这对机组的稳定运行不利, 因此

研究电网电压非平衡状态下双馈发电机组的控制策略是十分必要的。目前, 国内外对电网电压非平衡状态下双馈发电机组的控制策略研究较少, 国内文献大都研究平衡状态下的控制策略, 广泛采用基于定子磁链定向的矢量控制策略, 其中包括一些改进的矢量控制方法<sup>[1-5]</sup>。因为没有考虑电网电压非平衡时负序分量的影响, 这些控制方法在电网非平衡状态下的控制性能变差。文献[6-7]分析了电网电压非平衡状态下网侧变换器的控制策略, 但没有提及非平衡状态下转子侧变换器的控制方法。国外文献对电网对称故障下 DFIG 控制策略的研究较多<sup>[8-11]</sup>, 同时对电网非平衡状态下转子侧的控制方法有一些研

**基金项目:** 电力系统国家重点实验室资助 (SKLD09KM03); 台达电力电子科教发展计划基金资助 (DREG2009006)

究, 文献[12]在电压非平衡状态下利用定子端功率, 定子磁链和转子电压的关系直接计算出转子侧变换器的正负序给定电压, 该方法计算量大并且忽略了正负序分量的初始相位差, 导致模型存在偏差, 控制稳定性较差。文献[13-17]利用定子端功率、磁链和转子电流的关系计算出转子侧正负序电流, 组成双电流闭环, 该方法同样忽略了电网电压非平衡时正负序分量的初始相位差, 并且使用功率开环控制不利于最大功率跟踪和电网故障下无功功率的补偿。

针对目前电网电压非平衡状态下 DFIG 控制存在的问题, 本文在改进锁相环的基础上提出了转子侧变换器的改进控制策略, 以提高 DFIG 在电网电压非平衡状态下的控制性能。所提锁相环可以准确检测出电网电压的相位和频率, 正负序 d、q 轴电压分量和电网不平衡程度, 为电机的精确控制提供了必要的信息。转子侧变换器的正序电压分量采用功率闭环和电流闭环控制, 负序电压分量采用功率开环和电流闭环控制。改进后的控制策略可有效减小转子电流谐波含量和电磁转矩脉动, 稳定机端输出功率; 同时能够准确实现最大功率跟踪和无功功率控制。通过对一台 1.5 MW/690 V 的 DFIG 风力发电系统的仿真, 验证了该控制策略的正确性和有效性。

## 1 电网电压非平衡时电压分量的检测

理想电力系统的三相电压平衡, 但由于各种不对称因素导致实际电力系统并非完全平衡。设定电网非平衡发生时刻电压正负序分量的初始相位差为  $\phi$ , 而基于 dq 变换的传统软件锁相环忽略掉  $\phi$  值的影响<sup>[18-19]</sup>, 不能对正序电压相位实现无差跟踪, 导致正负序 d、q 轴电压分量的检测存在偏差。本文设计的锁相环考虑了  $\phi$  值的影响, 将电网电压矢量  $u_s$  分解为正序矢量  $u_s^p$  和负序矢量  $u_s^n$ , 并分别进行 dq 变换, 以实现正负序间解耦, 再通过频率反馈和相移便得到电压的频率、相位、正负序 d、q 轴电压分量和电网不平衡程度, 为转子侧变换器的精确控制提供了必要信息。各电压量的矢量关系如图 1 所示,

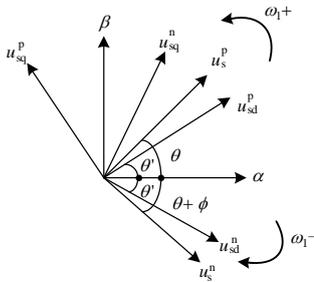


图 1 电网故障时电压空间矢量图

Fig.1 Voltage vector diagram under grid fault

各电压分量均为标么值,  $u_s^p$ 、 $u_s^n$  分别为矢量  $u_s^p$ 、 $u_s^n$  的幅值,  $\theta$  为电压正序矢量的相位,  $\theta'$  为电压正序矢量 d 轴分量的相位。

由矢量图分析可得:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} u_{sd}^p \\ u_{sq}^p \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos \theta' & \sin \theta' \\ -\sin \theta' & \cos \theta' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{sa} \\ u_{sb} \end{bmatrix} = \\ &\begin{bmatrix} \cos \theta' & \sin \theta' \\ -\sin \theta' & \cos \theta' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix} u_s^p + \\ &\begin{bmatrix} \cos \theta' & \sin \theta' \\ -\sin \theta' & \cos \theta' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\theta + \phi) \\ -\sin(\theta + \phi) \end{bmatrix} u_s^n = \\ &\begin{bmatrix} \cos(\theta - \theta') \\ \sin(\theta - \theta') \end{bmatrix} u_s^p + \begin{bmatrix} \cos(\theta + \theta' + \phi) \\ -\sin(\theta + \theta' + \phi) \end{bmatrix} u_s^n \end{aligned} \quad (1)$$

电网电压定向 d 轴, 当锁相环作用时,  $\omega_1 t = \theta \approx \theta'$ , 由式 (1) 得:

$$\begin{cases} u_{sd}^p = u_s^p + u_s^n \cos(2\omega_1 t + \phi) \\ u_{sq}^p = u_s^p \sin(\omega_1 t - \theta) - u_s^n \sin(2\omega_1 t + \phi) \approx \\ u_s^p (\omega_1 t - \theta) - u_s^n \sin(2\omega_1 t + \phi) \end{cases} \quad (2)$$

同理可知:

$$\begin{cases} u_{sd}^n = u_s^n \cos \phi + u_s^p \cos(2\omega_1 t) \\ u_{sq}^n = u_s^n \sin(2\omega_1 t - \theta - \phi) + u_s^p \sin 2\omega_1 t \approx \\ u_s^n \sin(-\phi) + u_s^p \sin(2\omega_1 t) \end{cases} \quad (3)$$

$f_1$  为电网电压频率,  $\omega_1 = 2\pi f_1$ , 可知:

$$\begin{cases} \cos(2\omega_1 t) + \cos\left[2\omega_1\left(t + \frac{1}{4f_1}\right)\right] = 0 \\ \sin(2\omega_1 t) + \sin\left[2\omega_1\left(t + \frac{1}{4f_1}\right)\right] = 0 \end{cases} \quad (4)$$

则有:

$$\begin{cases} u_{sd}^p(t) + u_{sd}^p\left(t + \frac{1}{4f_1}\right) = 2u_s^p \\ u_{sq}^p(t) + u_{sq}^p\left(t + \frac{1}{4f_1}\right) = 2(\omega_1 t - \theta') \\ u_{sd}^n(t) + u_{sd}^n\left(t + \frac{1}{4f_1}\right) = 2u_s^n \cos \phi \\ u_{sq}^n(t) + u_{sq}^n\left(t + \frac{1}{4f_1}\right) = -2u_s^n \sin \phi \end{cases} \quad (5)$$

所以有:

$$\begin{cases} u_s^n = \sqrt{(u_s^n \sin(-\phi))^2 + (u_s^n \cos \phi)^2} \\ u_s^p = \frac{1}{2} \left[ u_{sd}^p(t) + u_{sd}^p\left(t + \frac{1}{4f_1}\right) \right] \\ \omega_1 t - \theta = \frac{1}{2} \left[ u_{sq}^p(t) + u_{sq}^p\left(t + \frac{1}{4f_1}\right) \right] \\ U_{br} = u_s^n / u_s^p \end{cases} \quad (6)$$

公式 (6) 中,  $U_{br}$  为电网不平衡程度, 由式 (5) 可以得到电网电压非平衡状态下用于系统控制的正负序 d、q 轴电压分量  $u_{sd}^p$ 、 $u_{sq}^p$ 、 $u_{sd}^n$ 、 $u_{sq}^n$  分别为:

$$\begin{cases} u_{sd}^p = u_s^p \\ u_{sq}^p = (\omega_1 t - \theta') = 0 \\ u_{sd}^n = u_s^n \cos \phi \\ u_{sq}^n = -u_s^n \sin \phi \end{cases} \quad (7)$$

根据公式 (5) ~ (7) 可得出改进锁相环的原理框图, 如图 2 所示。

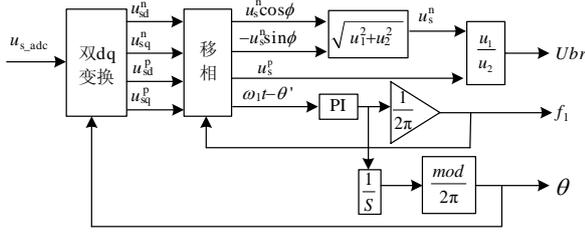
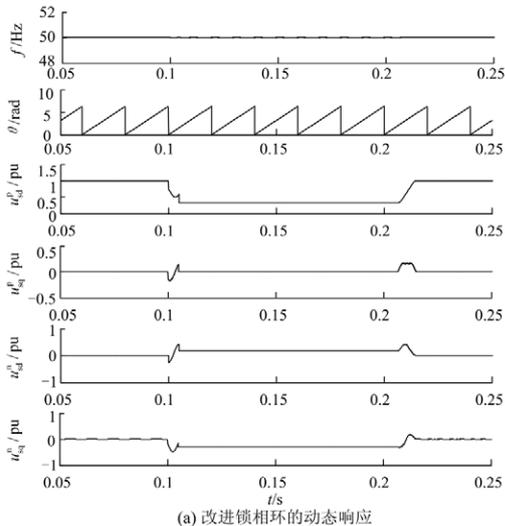


图 2 改进锁相环的原理框图  
Fig.2 Block diagram of the improved SPLL

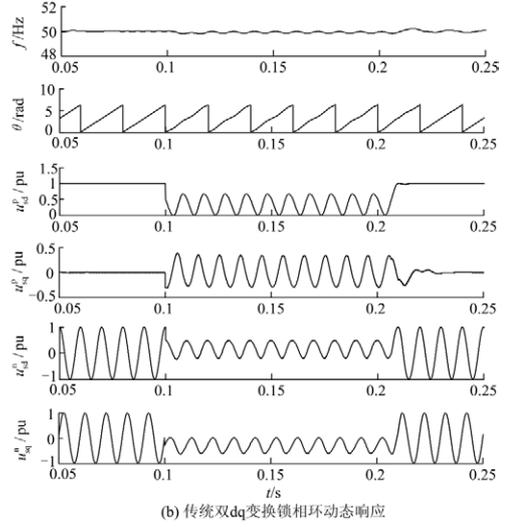
为了验证该锁相环的性能, 本文进行了仿真。设定 0.1~0.2 s 内 b 相和 c 相电压发生短路接地故障, 改进锁相环和传统双 dq 变换锁相环的检测波形分别如图 3 (a)、(b) 所示。由两相短路接地故障时的边界条件分析可知此时电压的正、负、零序分量幅值相等, 即:

$$u_s^p(\text{pu}) = u_s^n(\text{pu}) = u_s^0(\text{pu}) = 1/3 \quad (8)$$

从仿真结果可看出改进锁相环检测到的正序 d、q 轴电压分量的标么值分别为 0.333、0; 负序 d、q 轴电压分量的标么值分别为 0.166、0.289; 所以正负序电压分量的幅值都为 0.333, 可见该锁相环能够准确检测出电压的正负序 d、q 轴分量、相位和频率, 而传统双 dq 变换锁相环的各检测测量波动较大并存在误差。



(a) 改进锁相环的动态响应



(b) 传统双dq变换锁相环动态响应

图 3 两相短路接地时两种锁相环的动态响应比较  
Fig.3 Dynamic response of two SPLLs under two phases short-circuit with ground

## 2 双馈风力发电机的数学模型

DFIG 风力发电系统原理如图 4 所示, 根据双馈发电机定子和转子的电路关系可以得到 DFIG 的 T 形等效电路如图 5 所示。

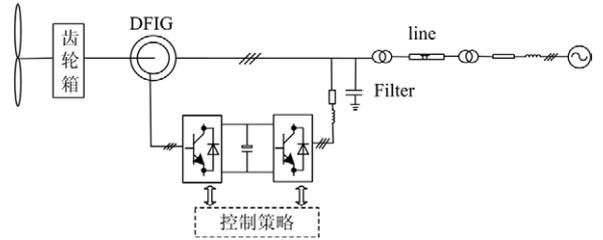


图 4 变速恒频 DFIG 风力发电系统原理图  
Fig.4 Schematic diagram of a DFIG-based wind power system

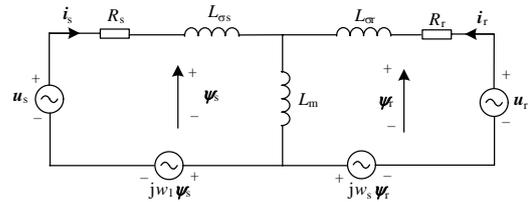


图 5 同步旋转坐标系下 DFIG 的等效电路  
Fig.5 Equivalent circuit of DFIG under the synchronous reference frame

根据图 5 可以得到同步旋转坐标系下 DFIG 的电压方程:

$$\begin{cases} u_s = R_s i_s + \frac{d\psi_s}{dt} + j\omega_1 \psi_s \\ u_r = R_r i_r + \frac{d\psi_r}{dt} + j(\omega_1 - \omega_r) \psi_r \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $\mathbf{u}_s$ 、 $\mathbf{u}_r$  分别为定、转子电压矢量;  $\mathbf{i}_s$ 、 $\mathbf{i}_r$  分别为定、转子电流矢量;  $\boldsymbol{\psi}_s$ 、 $\boldsymbol{\psi}_r$  分别为定、转子磁链矢量;  $R_s$ 、 $R_r$  分别为定、转子电阻;  $\omega_1$  为同步电角速度;  $\omega_r$  为转子电角速度;  $\omega_s = \omega_1 - \omega_r$  为转差电角速度;  $L_s = L_{os} + L_m$ ,  $L_r = L_{or} + L_m$  分别是定、转子绕组自感,  $L_{os}$ ,  $L_{or}$  和  $L_m$  分别为定子漏感, 转子漏感和定转子间互感。

### 3 DF IG 转子侧变换器的改进控制策略

电网故障下, 尤其在电网电压非平衡状态下三相三线制电路中的电压和电流都存在正负序分量。转子侧变换器广泛采用基于定子磁链定向或电压定向的矢量控制方法, 由于电网非平衡时各电磁量会产生负序分量导致定向精度降低和控制性能变差。为此, 本文基于电网非平衡时各电压分量的空间矢量关系, 提出一种转子侧变换器的改进控制方法, 其正序电压分量采用功率闭环和电流闭环控制, 负序电压分量采用功率开环和电流闭环控制。设定磁链定向于 d 轴, 由公式 (9) 可知转子侧变换器的电压方程为:

$$\begin{cases} u_{rd} = R_r i_{rd} + \sigma L_r \frac{di_{rd}}{dt} - \omega_s \sigma L_r i_{rq} \\ u_{rq} = R_r i_{rq} + \sigma L_r \frac{di_{rq}}{dt} + \omega_s \left( \frac{L_m}{L_s} \psi_{sd} + \sigma L_r i_{rd} \right) \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $\sigma = 1 - L_m^2 / (L_r L_s)$  为电机漏磁系数。在三相电压不平衡时, 发电机三相输出的复功率矢量可以描述为:

$$P_s(t) + jQ_s(t) = -\frac{3}{2} \mathbf{u}_s^* \mathbf{i}_s = -\frac{3\mathbf{u}_s}{2L_s} (\boldsymbol{\psi}_s - L_m \mathbf{i}_r^*) \quad (11)$$

代入各电磁量, 求解式 (10) 可得到:

$$\begin{cases} P_s(t) = P_{s0} + P_{sc2} \cos(2\omega_1 t) + P_{ss2} \sin(2\omega_1 t) \\ Q_s(t) = Q_{s0} + Q_{sc2} \cos(2\omega_1 t) + Q_{ss2} \sin(2\omega_1 t) \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $P_{s0}$ ,  $Q_{s0}$  为定子侧输出有功、无功功率的平均值;  $P_{sc2}$ ,  $P_{ss2}$  为二次有功余弦、正弦项谐波峰值;  $Q_{sc2}$ ,  $Q_{ss2}$  为二次无功余弦、正弦项谐波峰值。展开式 (12) 可得到:

$$\begin{bmatrix} P_{s0} \\ Q_{s0} \\ P_{ss2} \\ Q_{ss2} \\ P_{sc2} \\ Q_{sc2} \end{bmatrix} = -\frac{3}{2L_s} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\psi_{sd}^p & -\psi_{sq}^p & \psi_{sd}^n & \psi_{sq}^n \\ \psi_{sd}^n & \psi_{sq}^n & \psi_{sd}^p & \psi_{sq}^p \\ -\psi_{sq}^n & \psi_{sd}^n & \psi_{sq}^p & -\psi_{sd}^p \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{sq}^p \\ -u_{sd}^p \\ -u_{sq}^n \\ u_{sd}^n \end{bmatrix} +$$

$$\frac{3L_m}{2L_s} \begin{bmatrix} u_{sd}^p & u_{sq}^p & u_{sd}^n & u_{sq}^n \\ u_{sq}^p & -u_{sd}^p & u_{sq}^n & -u_{sd}^n \\ u_{sd}^n & -u_{sq}^n & -u_{sd}^p & u_{sq}^p \\ u_{sd}^n & u_{sq}^n & u_{sd}^p & u_{sq}^p \\ -u_{sd}^n & -u_{sq}^n & u_{sd}^p & u_{sq}^p \\ u_{sq}^n & -u_{sd}^n & u_{sq}^p & u_{sd}^p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{rd}^p \\ i_{rq}^p \\ i_{rd}^n \\ i_{rq}^n \end{bmatrix} \quad (13)$$

忽略定子电阻时:

$$\mathbf{u}_{sdq} = \mathbf{j} \omega_s \boldsymbol{\psi}_{sdq} \quad (14)$$

由式 (14) 可知:

$$\begin{cases} \psi_{sd}^p = \frac{u_{sq}^p}{\omega_1}, & \psi_{sq}^p = -\frac{u_{sd}^p}{\omega_1} \\ \psi_{sd}^n = -\frac{u_{sq}^n}{\omega_1}, & \psi_{sq}^n = \frac{u_{sd}^n}{\omega_1} \end{cases} \quad (15)$$

可给定功率  $P_{s0}^*$ 、 $Q_{s0}^*$ 、 $P_{ss2}^*$ 、 $P_{sc2}^*$ , 则其对应的正负序电流指令为  $i_{rd}^{p*}$ 、 $i_{rq}^{p*}$ 、 $i_{rd}^{n*}$ 、 $i_{rq}^{n*}$ , 令  $P_{ss2}^* = P_{sc2}^* = 0$ 。将公式 (15) 代入公式 (13), 变换可得到:

$$\begin{bmatrix} i_{rd}^{p*} \\ i_{rq}^{p*} \\ i_{rd}^{n*} \\ i_{rq}^{n*} \end{bmatrix} = \frac{2L_s}{3DL_m} \begin{bmatrix} u_{sd}^p & u_{sq}^p & -u_{sd}^n & -u_{sq}^n \\ u_{sq}^p & -u_{sd}^p & u_{sd}^n & -u_{sq}^n \\ -u_{sd}^n & -u_{sq}^n & -u_{sd}^p & u_{sq}^p \\ -u_{sd}^n & u_{sq}^n & u_{sd}^p & u_{sq}^p \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_{s0}^* \\ Q_{s0}^* + \frac{3D}{2L_s \omega_1} \\ \frac{3u_{sd}^p \cdot u_{sd}^n}{L_s \omega_1} \\ \frac{3u_{sd}^p \cdot u_{sq}^n}{L_s \omega_1} \end{bmatrix} \quad (16)$$

式 (16) 中,  $D = (u_{sd}^p)^2 + (u_{sq}^p)^2 - (u_{sd}^n)^2 - (u_{sq}^n)^2$ 。由式 (16) 可知通过给定平均功率就可以计算出转子侧给定电流的正负序分量, 但是功率开环控制不利于准确实现最大功率跟踪和无功功率补偿, 由于转子侧电流正序分量在系统控制中起主导作用, 所以本文通过功率闭环控制来得到正序 d、q 轴给定电流分量, 同时通过功率开环控制得到负序 d、q 轴给定电流分量。转子侧变换器的输入端电压在正序同步坐标系下可表示为:

$$\mathbf{u}_{rdq}(p) = \mathbf{u}_{rdq}^p + \mathbf{u}_{rdq}^n e^{-j2\omega_1 t} = \mathbf{u}_{rd}(p) + \mathbf{j} \mathbf{u}_{rq}(p) \quad (17)$$

由公式 (17) 可得:

$$\mathbf{u}_{ra\beta} = \mathbf{u}_{rdq}(p) e^{j(\omega_1 - \omega_r)t} = \mathbf{u}_{rdq}^p e^{j(\omega_1 - \omega_r)t} + \mathbf{u}_{rdq}^n e^{-j(\omega_1 + \omega_r)t} \quad (18)$$

其中,  $u_{\text{ro}\beta}$  为  $\alpha\beta$  坐标系下转子侧变换器的电压矢量。由公式 (10)、(16)、(18) 可以得到电网电压非平衡状态下转子侧变换器的控制策略, 控制框图如图 6 所示。图中  $\Delta u_{\text{rd}}^{\text{p}}$ 、 $\Delta u_{\text{rq}}^{\text{p}}$ 、 $\Delta u_{\text{rd}}^{\text{n}}$ 、 $\Delta u_{\text{rq}}^{\text{n}}$  为电压补偿量, 由公式 (10) 和公式 (15) 可计算得:

$$\begin{cases} \Delta u_{\text{rd}}^{\text{p}} = -\omega_s \sigma L_r i_{\text{rq}}^{\text{p}} \\ \Delta u_{\text{rq}}^{\text{p}} = \omega_s \left( \frac{L_m}{L_s} \frac{u_{\text{sq}}^{\text{p}}}{\omega_1} + \sigma L_r i_{\text{rd}}^{\text{p}} \right) \\ \Delta u_{\text{rd}}^{\text{n}} = -\omega_s \sigma L_r i_{\text{rq}}^{\text{n}} \\ \Delta u_{\text{rq}}^{\text{n}} = \omega_s \left( \sigma L_r i_{\text{rd}}^{\text{p}} - \frac{L_m}{L_s} \frac{u_{\text{sq}}^{\text{n}}}{\omega_1} \right) \end{cases} \quad (19)$$

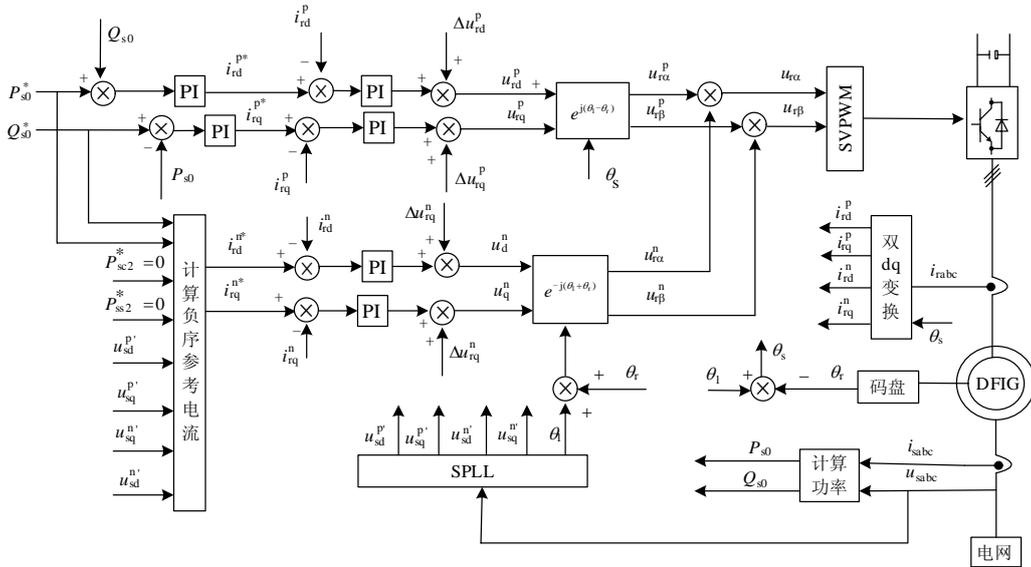


图 6 电网电压非平衡状态下转子侧变换器的控制框图

Fig.6 Schematic diagram of the proposed rotor-side controller under unbalanced grid voltage

## 4 仿真研究

### 4.1 电网电压轻微非平衡时

按照以上控制策略建立 DFIG 风电系统的仿真模型。由于电力系统三相元件或负荷不对称, 电力系统不可能做到严格的三相对称, 因此要求接入电网的电力设备能够在电压非平衡程度为 2%, 短时间内不超过 4% 的电网环境下运行, 这种非平衡为正常性非平衡。设定 0.6 s 时刻风速由 10 m/s 降到 8 m/s, 0.8 s 时刻给定无功功率由 0 MW 变为 -1 MW, 电网电压非平衡程度为 2%, 仿真波形如图 7 所示。由波形可知, 机端输出有功功率跟踪风速变化, 无功功率跟踪给定变化, 定子电流、转子电流、电磁转矩等相应发生改变, 各波形变化符合 DFIG 运行机理。可见该控制策略能够在电网电压轻微非平衡时准确跟踪给定功率指令, 实现最大风能跟踪, 具有良好的控制精度和动态性能, 证明了该控制策略的正确性。

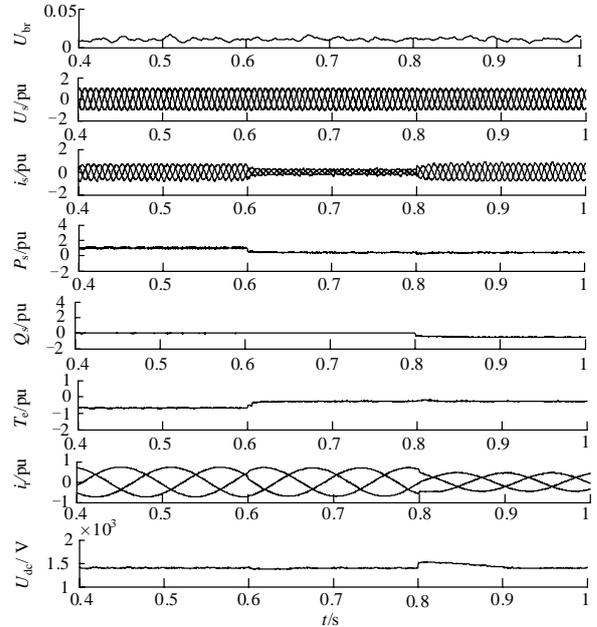


图 7 DFIG 实现功率跟踪的仿真结果

Fig.7 Simulation results of DFIG system when power change

## 4.2 电网电压严重非平衡时

当风速为 10 m/s, 系统运行在单位功率因数时, 设定 0.6 s 时刻电网发生单相电压跌落故障, 电压的非平衡程度由 2% 上升到 7.5%。为比较分析, 图 8 为改进控制策略的仿真波形, 图 9 为采用磁链定向的传统矢量控制策略的仿真波形。由于电网电压非

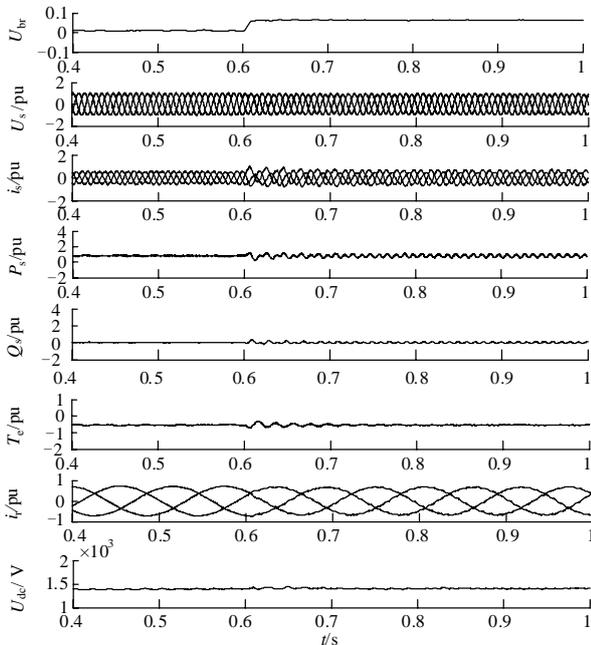


图 8 电压非平衡状态下改进控制策略的仿真结果

Fig.8 Simulation results of DFIG system using the proposed control under unbalanced grid voltage

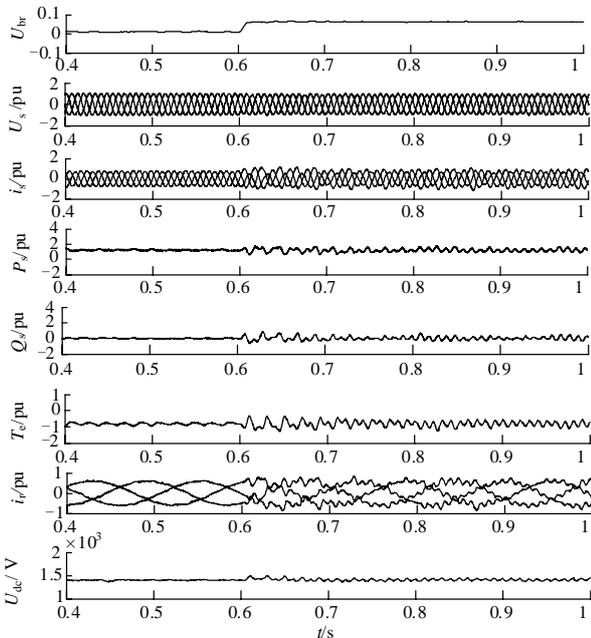


图 9 电压非平衡状态下传统控制策略的仿真结果

Fig.9 Simulation results of DFIG system using the traditional control under unbalanced grid voltage

平衡时双馈电机的各电磁量在同步旋转坐标系中均表现为直流量和二倍频交流量之和。传统矢量控制方法难以消除其中二倍频成分的影响, 定向精度降低, 所以图 9 中各检测量在 0.6 s 后波动较大, 直流链电压、电磁转矩和功率都存在大量二次纹波, 转子电流也存在大量谐波。相比, 改进控制策略可以有效消除负序分量的影响, 使得各电、磁量在同步旋转坐标系中近似表现为直流量, 所以图 8 中转子电流谐波、无功功率波动和电磁转矩脉动大幅减小, 各波形较平稳, 控制效果良好, 体现了本文所提出控制策略的优越性。

## 5 结论

针对电网电压非平衡状态下传统矢量控制策略的缺点, 本文在改进锁相环的基础上建立了 DFIG 转子侧变换器的改进控制策略。该锁相环可以在电网电压非平衡状态下准确地检测出电压的频率、相位、正负序 d、q 轴分量和不平衡程度, 为转子侧变换器的精确控制提供了必要信息。转子侧变换器的正序电压分量采用功率闭环和电流闭环控制, 负序电压分量采用功率开环和电流闭环控制。改进的控制策略可在电网电压非平衡状态下有效消除各电、磁量在同步坐标系中的二倍频交流成分, 减小转子电流谐波含量和电磁转矩脉动, 稳定机端输出功率; 同时能够准确跟踪给定功率, 从而实现最大功率跟踪。因此该控制策略适用于电网电压非平衡状态下双馈风力发电机组的有效控制, 可提高 DFIG 并网运行的稳定性。

## 参考文献

- [1] 胡家兵, 孙丹, 贺益康, 等. 电网电压骤降故障下双馈风力发电机建模与控制[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(8): 21-25.  
HU Jia-bing, SUN Dan, HE Yi-kang, et al. Modeling and control of DFIG wind energy generation system under grid voltage dip[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(8): 21-25.
- [2] 姚骏, 廖勇, 周求宽, 等. 双PWM控制交流励磁电源直流链电压的稳定控制策略[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(21): 63-66.  
YAO Jun, LIAO Yong, ZHOU Qiu-kuan, et al. Stable control strategy on DC-link voltage in a dual PWM control AC excitation power supply[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(21): 63-66.
- [3] 孙秋霞, 李伟力, 程鹏. 电网波动下双馈风力发电励磁系统的仿真分析[J]. 现代电力, 2006, 23(4): 29-34.  
SUN Qiu-xia, LI Wei-li, CHENG Peng. Simulation

- analysis of double-fed wind power generation excitation system under grid fluctuation[J]. *Modern Electric Power*, 2006, 23 (4) : 29-34.
- [4] 韦立祥, 孙旭东, 刘丛伟, 等. 一种新型的双PWM三电平调速系统控制方法[J]. *清华大学学报: 自然科学版*, 2002, 42 (3) : 295-298.
- WEI Li-xiang, SUN Xu-dong, LIU Cong-wei, et al. Control method for dual-PWM three-level electric drive system[J]. *Journal of Tsinghua Univ: Sci & Tech*, 2002, 42 (3) : 295-298.
- [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系统仿真研究[J]. *中国电机工程学报*, 2007, 31 (6) : 130-135.
- XIANG Da-wei, YANG Shun-chang, RAN Li. System simulation of a doubly fed induction generator ride-through control for symmetrical grid fault[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2007, 31 (6) : 130-135.
- [6] 林资旭. 变速恒频风力发电机网侧变换器在输入电压不平衡时控制技术研究[D]. 北京: 中国科学院电工研究所, 2005.
- [7] 续艳珍. 电网电压不平衡时三相PWM整流器控制策略的研究[D]. 济南: 山东大学, 2005.
- [8] Bollen M, Olguin G, Martins M. Voltage dips at the terminals of wind power installations[J]. *Wind Energy*, 2005, 8 (3) : 307-318.
- [9] Vicatos M S, Tegopoulos J A. Transient state analysis of doubly fed induction generator under three phase short circuit[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 1991, 6 (1) : 62-75.
- [10] Kasem A H, Saadany E F, Tamaly H H. An improved fault ride-through strategy for doubly fed induction generator-wind turbines[J]. *IET Renew Power Gener*, 2006, 2 (4) : 201-214.
- [11] Johan M, Sjoerd W H, de Haan. Ride-through of wind turbines with doubly-fed induction generator during a voltage dip[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2005, 20 (2) : 435-441.
- [12] HU Jia-bing, HE Yi-kang, XU Lie. Dynamic modeling and direct power control of wind turbine driven DFIG under unbalanced network voltage conditions[J]. *Zhejiang Univ: Sci A*, 2008, 9 (12) : 1731-1740.
- [13] WANG Yi, XU Lie, Williams B W. Control of DFIG-based wind farms for network unbalance compensation[J]. *IEEE Trans on Power Systems*, 2008, 23 (8) : 113-119.
- [14] XU Lie. Coordinated control of DFIG's rotor and grid side converters during network unbalance[J]. *IEEE Trans on Power Systems*, 2008, 23 (3) : 1041-1049.
- [15] XU Lie, WANG Yi. Dynamic modeling and control of DFIG-based wind turbines under unbalanced network conditions[J]. *IEEE Trans on Power Systems*, 2007, 22 (1) : 314-323.
- [16] Salvador A, Sergio B, Josep B. Comparison of control strategies to meet low voltage ride-through requirement in distributed power generation systems[C]. //IEEE Ind Appl Meeting. Spain: 2002.
- [17] Chung S K. Phase-locked loop for grid-connected three-phase power conversion systems[J]. *IEE Proceedings, Electric Power Applications*, 2005, 147 (3) : 213-219.
- [18] Rodríguez P, Pou J, Bergas J, et al. Double synchronous reference frame PLL for power converters control[J]. *IEEE Power Electron*, 2005, 7(1): 1415-1421.
- [19] 周鹏, 贺益康, 胡家兵. 电网不平衡状态下风电机组运行控制中电压同步信号的检测[J]. *电工技术学报*, 2008, 23 (5) : 108-113.
- ZHOU Peng, HE Yi-kang, HU Jia-bing. Detection of voltage synchronization signals for a wind energy generation system unbalance grid conditions[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2008, 23 (5) : 108-113.

收稿日期: 2009-10-25; 修回日期: 2009-12-17

作者简介:

赵帅央 (1984-), 男, 博士研究生, 研究方向为风力发电控制技术; E-mail: 08121982@bjtu.edu.cn

葛宝明 (1971-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电机及其控制;

毕大强 (1973-), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统主设备继电保护、电力电子技术在电力系统中的应用。