

不平衡电网电压下双馈感应发电机无源控制

刘 军, 蒋说东

(西安理工大学 自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 本文以抑制电网电压不平衡所带来的定、转子不平衡电流为目标, 提出了一种基于无源化方法的双馈感应发电机不平衡控制策略. 首先在分析了正转同步旋转坐标系下的双馈感应发电机正序模型及负序模型无源性的基础上, 设计了正、负序模型的无源性状态反馈控制器; 然后给出了一种期望状态值计算方法, 根据不平衡控制目标得到定、转子电流负序分量的指令值, 结合定子电压的正序分量和电磁转矩的期望值计算出定、转子电流正序分量的给定值; 最后得到电网电压不平衡条件下双馈感应发电机的无源控制器. 仿真结果表明: 所提出的控制方案有效地抑制了电网电压不平衡故障时定子及转子的不平衡电流, 降低了输出电磁转矩的波动, 提高了双馈感应发电机系统在电网电压不平衡条件下实现不间断运行的能力.

关键词: 双馈感应发电机; 无源性控制; 不平衡电网电压; 状态反馈

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Passivity-based control of double-fed induction generator under unbalanced grid voltage fault

LIU Jun, JIANG Shuo-dong

(Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an Shaanxi 710048, China)

Abstract: To inhibit the imbalance current in the stator and the rotor caused by the unbalanced grid voltage, we propose a passivity control strategy for the double-fed induction generator system (DFIG). On the basis of the passivity of the positive and negative sequence models in the positive synchronously rotating frame, a passivity state feedback controller is first designed. Next, a method for calculating expectation values is developed, by which we calculate the command values for the negative sequence components of the stator current and the rotor current based on the unbalanced control objectives. The command values of the positive sequence components of the stator current and the rotor current are calculated on the basis of positive sequence components of the stator voltage and the expectation values of the electromagnetic torque. Thus, a passive controller for DFIG under unbalance grid voltage condition is designed. Simulation results show that the proposed scheme effectively inhibits the imbalance currents in the stator and the rotor, reduces the output torque fluctuation, and enhances the non-interrupt operation ability of DFIG under unbalanced grid voltages.

Key words: double-fed induction generator; passivity-based control; unbalanced grid voltage; state feedback

1 引言(Introduction)

变速恒频双馈感应发电机(double-fed induction generator system, DFIG)以其调速范围宽、有功功率和无功功率可独立调节以及所需励磁变频器容量较小等优点, 在风力发电系统中得到了广泛应用^[1]. 由于DFIG的定子绕组直接与电网相连, 使得机组对电网电压的变化非常敏感. 若电网电压出现不平衡故障, 很小的不平衡电压会造成DFIG定、转子电流严重不平衡, 使DFIG定、转子绕组产生不平衡发热、转矩发生脉动, 导致输向电网的功率发生振荡^[2-5]. 而传统的DFIG励磁控制策略是在三相电网电压平衡的条件下得到的, 无法对DFIG定、转子负序电流进行有效控制, 因此也无法抑制定、转子绕组中的不

平衡电流. 如何抑制不平衡电网电压故障所产生的不平衡电流已成为国内外学者研究的热点^[3-7]. 文献[3]直接在正转同步速旋转坐标系中的 $d-q$ 轴PI电流控制器上分别加入两个补偿器以消除转矩、定子无功功率脉动, 然而其改善控制性能的能力取决于补偿器. 文献[4-5]提出了正、负序双 $d-q$ 、PI电流控制技术, 该方法是对反馈电流采用了陷波器来提取正、负序电流分量, 分解过程中必然会引入延时和误差, 影响了控制系统的动态性能. 同时该方法采用双PI电流控制环, 控制系统比较繁琐. 文献[6-7]分析了两相静止 α, β 坐标系下的DFIG正负序模型, 通过引入比例谐振(P-R)电流控制器, 对反馈电流无需提取正、负序电流分量, 即能获得良好静态跟踪

性能以及动态响应能力. 但是电流期望值是根据控制目标计算出来的, 因此外环属于开环控制, 容易受到参数变化的影响.

无源化方法是从能量角度对系统进行分析, 通过给定期望状态值、配置系统能量耗散特性方程中的无功分量, 迫使系统总能量来跟踪预期的能量函数, 从而保证系统的稳定性, 并使系统的状态变量渐近地收敛到设定值. 其优点是: 在设计控制器时, 不需要对对象模型进行精确线性化, 因而能有效地提高系统的鲁棒性, 而且所设计的控制律是全局稳定的^[8-15]. 本文在分析电网电压不平衡故障对DFIG定、转子电流影响的基础上, 建立了正转旋转坐标系下的DFIG数学模型, 并对正序模型及负序模型分别进行了无源性分析, 设计了相应的无源性反馈控制律; 同时给出了一种期望状态值计算方法, 根据正序定子电压及电磁转矩期望值计算出正序定、转子电流指令值, 再结合给定的负序定、转子电流指令, 最终设计出电网电压不平衡条件下双馈感应发电机的无源控制器. 该方法不需要对反馈电流做任何处理, 因此在电流控制内环中不会引入延时和误差. 仿真结果表明该方法能有效地减小电网电压不平衡故障情况下DFIG定转子的不平衡电流及电磁转矩波动.

2 不平衡电网电压下DFIG的模型及无源性分析(DFIG model and passivity analysis under unbalanced grid voltage)

采用电动机惯例建模, 可得到在正转两相同步旋转坐标系下DFIG的状态方程:

$$\begin{bmatrix} u_{dr} \\ u_{qr} \\ u_{ds} \\ u_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r + L_r p & -(w_s - w_r)L_r \\ (w_s - w_r)L_r & R_r + L_r p \\ L_m p & -w_s L_m \\ w_s L_m & L_m p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \\ i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$J\dot{w}_m + fw_m = n_p L_m (i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr}) - T_L, \quad (2)$$

式中: R_s, R_r 分别为定、转子电阻; L_s, L_r 分别为定、转子电感; L_m 为互感; w_s, w_r 分别为正转同步旋转速度和转子角速度; J 为转动惯量; f 为阻尼系数; T_L 为风力机输出的机械转矩; n_p 为极对数; p 为微分算子; u_{dr}, u_{qr} 分别为转子电压的 d, q 分量; u_{ds}, u_{qs} 分别为定子电压的 d, q 分量.

当电网电压不平衡时, DFIG定、转子电压及电流可表示为正序分量与负序分量和的形式. 如图1所

示正序分量沿着正转旋转 $(dq)^+$ 坐标系以 w_s 同步速逆时针旋转, 负序分量沿着反转旋转 $(dq)^-$ 坐标系以 w_s 同步速顺时针旋转. 此时在正转旋转坐标系中正序分量表现为直流量, 而负序分量则表现为二倍基频交流量^[4].

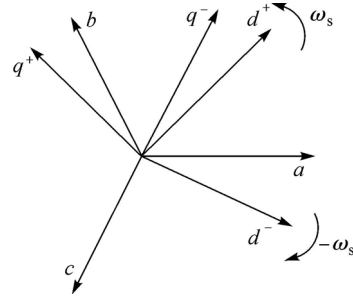


图1 正反转同步旋转坐标系下矢量图

Fig. 1 Vector diagram in the positive-and negative synchronously rotating frame

因此DFIG定、转子电压及电流可表示为

$$\begin{bmatrix} u_{dr} \\ u_{qr} \\ u_{ds} \\ u_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{dr}^+ + u_{dr}^- \\ u_{qr}^+ + u_{qr}^- \\ u_{ds}^+ + u_{ds}^- \\ u_{qs}^+ + u_{qs}^- \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \\ i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{dr}^+ + i_{dr}^- \\ i_{qr}^+ + i_{qr}^- \\ i_{ds}^+ + i_{ds}^- \\ i_{qs}^+ + i_{qs}^- \end{bmatrix},$$

$u_{ds}^+, u_{qs}^+, u_{dr}^+, u_{qr}^+, i_{ds}^+, i_{qs}^+, i_{dr}^+, i_{qr}^+$ 分别为正转旋转坐标下DFIG定子电压、定子电流和转子电压及转子电流的正序分量; $u_{ds}^-, u_{qs}^-, u_{dr}^-, u_{qr}^-, i_{ds}^-, i_{qs}^-, i_{dr}^-, i_{qr}^-$ 分别为正转旋转坐标下的定子电压、定子电流与转子电压及转子电流的负序分量.

由此可将原DFIG状态方程分为两种情况: 正序方程如式(3)所示, 只含有正序分量; 负序方程如式(4)所示, 只含有负序分量.

$$\begin{bmatrix} u_{dr}^+ \\ u_{qr}^+ \\ u_{ds}^+ \\ u_{qs}^+ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r + L_r p & -(w_s - w_r)L_r \\ (w_s - w_r)L_r & R_r + L_r p \\ L_m p & -w_s L_m \\ w_s L_m & L_m p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dr}^+ \\ i_{qr}^+ \\ i_{ds}^+ \\ i_{qs}^+ \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} u_{dr}^- \\ u_{qr}^- \\ u_{ds}^- \\ u_{qs}^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r + L_r p & -(w_s - w_r)L_r \\ (w_s - w_r)L_r & R_r + L_r p \\ L_m p & -w_s L_m \\ w_s L_m & L_m p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dr}^- \\ i_{qr}^- \\ i_{ds}^- \\ i_{qs}^- \end{bmatrix}. \quad (4)$$

由于正序方程与负序方程的系数矩阵完全相同, 所以正序方程与负序方程具有相同的稳定特性. 因此在对系统进行无源性分析时, 只需分析正序方程的无源性就能推导出负序方程的无源性.

令DFIG系统状态变量的正序分量

$$x^+ = [x_1^+ \ x_2^+ \ x_3^+ \ x_4^+ \ x_5^+]^T = [i_{dr}^+ \ i_{qr}^+ \ i_{ds}^+ \ i_{qs}^+ \ \omega_m]^T$$

分别为转子、定子绕组电流的 d, q 分量及转子机械角速度, 将DFIG系统状态方程的正序方程整理为欧拉方程形式:

$$D\dot{x}^+ + C(x^+, w_s)x^+ + Rx^+ = u^+, \quad (5)$$

式中:

$$u^+ = [u_{dr}^+ \ u_{qr}^+ \ u_{ds}^+ \ u_{qs}^+ \ -T_L]^T,$$

$$D = \begin{bmatrix} L_r I & L_m I & 0 \\ L_m I & L_s I & 0 \\ 0 & 0 & J \end{bmatrix}, \quad R = \begin{bmatrix} R_r I & 0 & 0 \\ 0 & R_s I & 0 \\ 0 & 0 & f \end{bmatrix},$$

$$C(x^+, w_s) = \begin{bmatrix} C_{e1} & C_e \\ -C_e^T & 0 \end{bmatrix},$$

其中:

$$I = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad I_1 = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$C_{e1} = \begin{bmatrix} L_r w_s I_1 & L_m w_s I_1 \\ L_m w_s I_1 & L_s w_s I_1 \end{bmatrix},$$

$$C_e = [-n_p(L_r x_2^+ + L_m x_4^+) \ n_p(L_r x_1^+ + L_m x_3^+) \ 0 \ 0]^T.$$

忽略定、转子绕组的电容效应, 定义DFIG的正定二次型能量函数为

$$H(x^+) = \frac{1}{2} x^{+T} D x^+. \quad (6)$$

对式(6)求导, 并将式(5)代入, 得

$$\dot{H}(x^+) = x^{+T} D \dot{x}^+ = -x^{+T} C(x^+, w_s)x^+ - x^{+T} R x^+ + u^{+T} x^+. \quad (7)$$

由于 $C(x^+, w_s)$ 具有反对称性, 即 $C(x^+, w_s) = -C(x^+, w_s)^T$, 可得 $x^{+T} C(x^+, w_s)x^+ = 0$. 将式(7)两边同时积分可得

$$H(x(t)^+) - H(x(0)^+) = \int_0^t u^{+T} x^+ dt - \int_0^t x^{+T} R x^+ dt < \int_0^t u^{+T} x^+ dt. \quad (8)$$

式(8)左边看作是正序系统能量的增量, 右边看作是外部电网供给的能量, 若将 $u^+ = [u_{ds}^+ \ u_{qs}^+ \ u_{dr}^+ \ u_{qr}^+ \ -T_L]^T$ 看作系统的输入, $x^+ = [i_{dr}^+ \ i_{qr}^+ \ i_{ds}^+ \ i_{qs}^+ \ \omega_m]^T$ 看作系统的输出, 则映射 $u^+ \mapsto x^+$ 为输出严格无源的.

根据上述方法, 也可推导出映射 $u^- \mapsto x^-$ 为输

出严格无源的, 即可得到负序方程也是无源的, 从而保证了在电网电压不平衡条件下双馈感应发电机系统是无源的.

3 电网电压不平衡下双馈感应发电机的无源性控制策略(Passivity-based control of DFIG under unbalanced grid voltage fault)

3.1 状态反馈控制器的设计(State feedback controller design)

根据上节的分析可知系统的无源性与DFIG的结构及所设定的输入输出变量直接相关, 而原状态方程是正序分量与负序分量线性叠加的结果. 因此在设计状态反馈控制器时, 首先设计出原状态方程的状态反馈控制律, 再通过线性分离得到正序分量的控制律和负序分量的控制律. 然后再根据正、负序不同的控制目标对相应的控制律进行修正, 最后通过线性叠加得到电网电压不平衡条件下的无源性反馈控制律.

借助于矢量控制的思想, 按照定子磁场定向的方法, 制定控制目标如下:

1) 电磁转矩渐近跟踪 $\lim_{t \rightarrow \infty} (T_e - T_e^*) = 0$, 式中 T_e^* 为DFIG期望输出转矩.

2) 定子磁场渐近定向 $\lim_{t \rightarrow \infty} \psi_{ds} = \lim_{t \rightarrow \infty} (L_m x_2 + L_s x_4) = 0$.

在两相旋转坐标系中, 电机的转矩可以表示为

$$T_e = n_p L_m (x_1 x_4 - x_2 x_3). \quad (9)$$

为了确保控制系统满足Lyapunov稳定性, 同时又能使系统获得期望的跟踪性能, 可以通过选择适当的 x^* 来实现. 设系统状态期望值

$$x^* = [x_1^* \ x_2^* \ x_3^* \ x_4^* \ x_5^*]^T,$$

同时定义实际状态与状态参考值间的跟踪误差向量 $e = x - x^*$. 根据正序方程(5), 可以写出系统的误差方程为

$$D\dot{e} + C(x, w_s)e + Re = \xi, \quad (10)$$

其中 ξ 可作为DFIG系统新的输入:

$$\xi = u - \{D\dot{x}^* + C(x, w_s)x^* + R x^*\}. \quad (11)$$

定义误差系统的能量函数为 $H(e) = \frac{1}{2} e^T D e$, 对其求导得

$$\dot{H}(e) = e^T D \dot{e} = e^T \xi - e^T C(x, w_s)e - e^T R e = e^T \xi - e^T R e. \quad (12)$$

由于 R 为电阻和转子旋转阻尼系数所组成的矩阵, 因此 R 是正定的. 若令 $\xi = -K e$, 其中 $K = \text{diag}\{k_1, k_2, k_3, k_4, k_5\}$, 则有 $\dot{H}(e) = -e^T (R + K)e$. 只要取 $K > -R$, 则 $\dot{H}(e) < 0$; 又由于 D 为正定阵,

则误差系统的能量函数 $H(e) > 0$. 根据Lyapunov稳定性定理可知 $H(e) > 0, \dot{H}(e) < 0$, 则 e 可渐近收敛到零, 即可得 $x \rightarrow x^*$.

由于并网型双馈感应发电机定子端直接与电网相接, 定子电压为不可控量, 因此只能通过控制转子电压来实现电机的励磁控制, 在此可令 $k_3 = k_4 = 0$.

根据式(11)可得

$$u = \xi - \{D\dot{x}^* + C(x, w_s)x^* + Rx^*\} = Ke - \{D\dot{x}^* + C(x, w_s)x^* + Rx^*\}. \quad (13)$$

取式(13)的第5行可得

$$-T_L = J\dot{x}_5^* + fx_5^* - n_p x_1^*(L_r x_2 + L_m x_4) + n_p x_2^*(L_r x_1 + L_m x_3) + k_5(x_5 - x_5^*). \quad (14)$$

式(14)为转速反馈控制律. 由于作为输入变量的 T_L 为风力机的输出机械转矩, 它跟风速直接相关, 为时变未知的, 因此只有通过改变电磁转矩的期望值来实现转速控制. 本文不引入式(14)控制环, 而是通过引入转速控制器来代替转速反馈控制律. 于是在此可令 $k_5 = 0$, 而转速控制器的输出令为 T_e^* , 从而解决了 T_L 时变未知时转速控制的问题. 综上可取 $K = \text{diag}\{k_1, k_2, 0, 0, 0\}$.

取式(13)的第1, 2行可得控制律:

$$\begin{bmatrix} u_{dr} \\ u_{qr} \end{bmatrix} = L_r \begin{bmatrix} \dot{x}_1^* \\ \dot{x}_2^* \end{bmatrix} + L_m \begin{bmatrix} \dot{x}_3^* \\ \dot{x}_4^* \end{bmatrix} + w_s L_r \begin{bmatrix} -x_2^* \\ x_1^* \end{bmatrix} + w_s L_m \begin{bmatrix} -x_4^* \\ x_3^* \end{bmatrix} + R_s \begin{bmatrix} x_1^* \\ x_2^* \end{bmatrix} - n_p \begin{bmatrix} -(L_r x_2 + L_m x_4) \\ (L_r x_1 + L_m x_3) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} k_1(x_1 - x_1^*) \\ k_2(x_2 - x_2^*) \end{bmatrix}. \quad (15)$$

适当调节 k_1, k_2 可使系统能量函数快速收敛, 从而实现定子磁场渐近定向和电磁转矩快速跟踪.

根据式(15)可以得出正序分量的控制律和负序分量的控制律, 分别为式(16)和(17):

$$\begin{bmatrix} u_{dr}^+ \\ u_{qr}^+ \end{bmatrix} = L_r \begin{bmatrix} \dot{x}_1^{*+} \\ \dot{x}_2^{*+} \end{bmatrix} + L_m \begin{bmatrix} \dot{x}_3^{*+} \\ \dot{x}_4^{*+} \end{bmatrix} + w_s L_r \begin{bmatrix} -x_2^{*+} \\ x_1^{*+} \end{bmatrix} + w_s L_m \begin{bmatrix} -x_4^{*+} \\ x_3^{*+} \end{bmatrix} + R_s \begin{bmatrix} x_1^{*+} \\ x_2^{*+} \end{bmatrix} - n_p \begin{bmatrix} -(L_r x_2^+ + L_m x_4^+) \\ (L_r x_1^+ + L_m x_3^+) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} k_1(x_1^+ - x_1^{*+}) \\ k_2(x_2^+ - x_2^{*+}) \end{bmatrix}, \quad (16)$$

$$\begin{bmatrix} u_{dr}^- \\ u_{qr}^- \end{bmatrix} = L_r \begin{bmatrix} \dot{x}_1^{*-} \\ \dot{x}_2^{*-} \end{bmatrix} + L_m \begin{bmatrix} \dot{x}_3^{*-} \\ \dot{x}_4^{*-} \end{bmatrix} + w_s L_r \begin{bmatrix} -x_2^{*-} \\ x_1^{*-} \end{bmatrix} + w_s L_m \begin{bmatrix} -x_4^{*-} \\ x_3^{*-} \end{bmatrix} + R_s \begin{bmatrix} x_1^{*-} \\ x_2^{*-} \end{bmatrix} - n_p \begin{bmatrix} -(L_r x_2^- + L_m x_4^-) \\ (L_r x_1^- + L_m x_3^-) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} k_1(x_1^- - x_1^{*-}) \\ k_2(x_2^- - x_2^{*-}) \end{bmatrix}. \quad (17)$$

为了抑制定、转子的不平衡电流, 令

$$\begin{cases} i_{ds}^{*-} = 0, & i_{dr}^{*-} = 0, \\ i_{qs}^{*-} = 0, & i_{qr}^{*-} = 0, \end{cases}$$

即

$$\begin{cases} x_3^{*-} = 0, & x_1^{*-} = 0, \\ i_4^{*-} = 0, & x_2^{*-} = 0. \end{cases}$$

由式(15)-(17)可得电网电压不平衡条件下的无源性反馈控制律:

$$\begin{bmatrix} u_{dr} \\ u_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{dr}^+ + u_{dr}^- \\ u_{qr}^+ + u_{qr}^- \end{bmatrix} = L_r \begin{bmatrix} \dot{x}_1^{*+} \\ \dot{x}_2^{*+} \end{bmatrix} + L_m \begin{bmatrix} \dot{x}_3^{*+} \\ \dot{x}_4^{*+} \end{bmatrix} + w_s L_r \begin{bmatrix} -x_2^{*+} \\ x_1^{*+} \end{bmatrix} + w_s L_m \begin{bmatrix} -x_4^{*+} \\ x_3^{*+} \end{bmatrix} + R_s \begin{bmatrix} x_1^{*+} \\ x_2^{*+} \end{bmatrix} - n_p \begin{bmatrix} -(L_r x_2 + L_m x_4) \\ (L_r x_1 + L_m x_3) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} k_1(x_1 - x_1^{*+}) \\ k_2(x_2 - x_2^{*+}) \end{bmatrix}. \quad (18)$$

由无源性反馈控制律式(18)可知, 只要确定好正序定、转电流的期望值, 而不需要对反馈电流做任何处理就能获得期望的控制效果, 极大的简化了控制系统.

3.2 系统期望状态正序分量的确定(Determination of the sequence components of the system expected states)

由于定、转子负序电流期望给定为0, 因此只需确定定、转子正序电流期望给定 $i_{ds}^+, i_{qs}^+, i_{dr}^+, i_{qr}^+$ 即可. 对于期望状态的求取, 文献[14-15]给出求解的期望状态一般方法, 但求解方法比较复杂. 本文结合控制目标提出了一种电网电压不平衡下双馈感应发电系统的期望状态值计算方法. 该方法无需给定定子磁链幅值, 控制算法简单, 同时也考虑到了电网电压变化带来的影响. 在确定定、转子正序电流期望给定之前, 首先需要进行定子电压正序分量的提取, 考虑到电网电压中负序分量通过正转旋坐标系变换后将表现为二倍频的谐波, 对此可采用二倍频陷波器

予以有效滤除.

根据所制定控制目标:

$$n_p L_m (x_1^{*+} x_4^{*+} - x_2^{*+} x_3^{*+}) = T_e^{*+} = T_e^*, \quad (19)$$

$$L_m x_2^{*+} + L_s x_4^{*+} = 0. \quad (20)$$

由式(11)中的第3行可推导得到式(21)

$$(L_m \dot{x}_1^{*+} + L_s \dot{x}_3^{*+}) + R_s x_3^{*+} - w_s (L_m x_2^{*+} + L_s x_4^{*+}) = u_{ds}^+, \quad (21)$$

其中 $L_m \dot{x}_1^{*+} + L_s \dot{x}_3^{*+} = \dot{\psi}_s^*$, 式中 ψ_s^* 为定子磁链的幅值. 由于电气调节速率远大于转速调节速率, 因此在电流调节时转速可认为是不变的, 则定子磁链期望值变化量很小. 同时本文考虑的主要是电网电压稳态不平衡故障时的控制策略, 定子磁链的幅值在稳态运行中基本保持不变, 因此在设定控制目标时, 可设 $\dot{\psi}_s^* \approx 0$. 由此可根据式(21)及式(11)中的第4行得

$$\begin{cases} R_s x_3^{*+} - w_s (L_m x_2^{*+} + L_s x_4^{*+}) = u_{ds}^+, \\ R_s x_4^{*+} - w_s (L_m x_1^{*+} + L_s x_3^{*+}) = u_{qs}^+. \end{cases} \quad (22)$$

由式(20)(22)可得

$$\begin{cases} x_1^{*+} = \frac{u_{qs}^+ - R_s x_4^{*+} - L_s x_3^{*+}}{w_s L_m}, \\ x_2^{*+} = -\frac{L_s x_4^{*+}}{L_m}, \\ x_3^{*+} = -\frac{u_{ds}^+}{R_s}. \end{cases} \quad (23)$$

将式(23)代入式(19)可得

$$x_4^{*+2} - \frac{u_{qs}^+ R_s - L_s u_{ds}^+ (w_s - 1)}{R_s^2} x_4^{*+} + \frac{T_e^* w_s}{n_p R_s} = 0, \quad (24)$$

对式(24)进行求解可得

$$x_{41}^{*+} = \frac{u_{qs}^+ R_s - L_s u_{ds}^+ (w_s - 1)}{2R_s^2} + \frac{\sqrt{(u_{qs}^+ R_s - L_s u_{ds}^+ (w_s - 1))^2 - \frac{4T_e^* w_s R_s^3}{n_p}}}{2R_s^2}, \quad (25a)$$

$$x_{42}^{*+} = \frac{u_{qs}^+ R_s - L_s u_{ds}^+ (w_s - 1)}{2R_s^2} - \frac{\sqrt{(u_{qs}^+ R_s - L_s u_{ds}^+ (w_s - 1))^2 - \frac{4T_e^* w_s R_s^3}{n_p}}}{2R_s^2}, \quad (25b)$$

舍弃式(25b)的结果. 从而根据式(23)和(25)可得正旋转坐标系下系统状态期望值正序分量.

3.3 转速控制器的设计(Speed controller design)

根据前面的设计目标, 在实现DFIG磁链、转矩渐近跟踪的基础上, 需要设计转速控制器, 建立转速误差反馈. 本文采用常规PI调节器, 控制器输出为期望转矩 T_e^* , 即 $T_e^* = k_p (w_m^* - w_m) + k_i \int (w_m^* - w_m) dt$, 其中 k_p, k_i 分别为比例增益和积分增益.

4 仿真研究(Simulation)

取双馈感应发电机的参数为: 额定电压220 V, 定子电阻 $R_s = 1.9188 \Omega$, 转子电阻 $R_r = 2.5712 \Omega$, 定子漏感 $L_s = 0.24144 \text{ H}$, 转子漏感 $L_r = 0.24144 \text{ H}$, 互感 $L_m = 0.234 \text{ H}$, 极对数 $n_p = 2$, 转动惯量 $J = 0.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$. 仿真系统结构如图2所示.

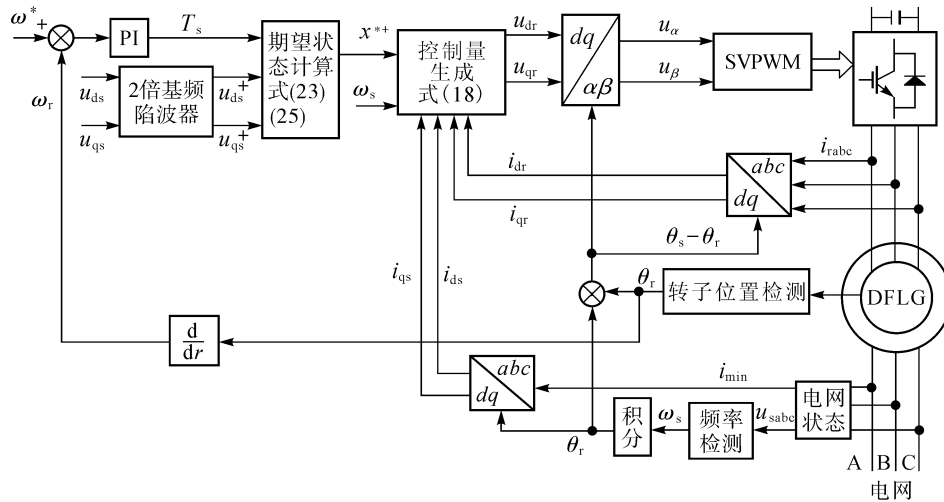


图 2 不平衡电网电压下双馈感应发电机无源控制框图

Fig. 2 Diagram of passivity-based control for DFIG under unbalanced grid voltage condition

设电网电压稳态不平衡度为5%, DFIG定子端电压波形见图3. 风速从2 s时的6 m/s变到2.5 s

时的7 m/s, 转速给定则从118.12 rad/s到137.8 rad/s, 如图4所示. 图5-6分别是定子、转子期望电流与实

际电流跟踪波形. 图7为定子磁链期望值与实际计算值波形. 图8为电磁转矩期望值与实际值波形. 图9-10分别为电网电压不平衡时采用常规矢量控制策略和本文提出的不平衡控制策略时DFIG定、转子稳态电流.

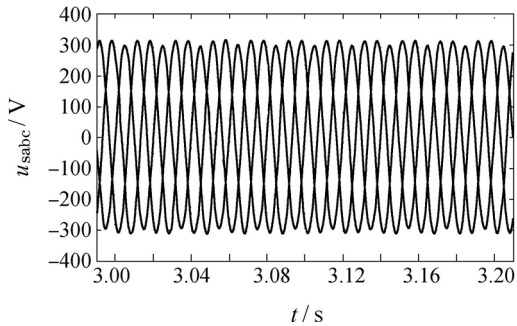


图3 发电机定子端不平衡电压波形

Fig. 3 Stator terminal unbalanced voltage

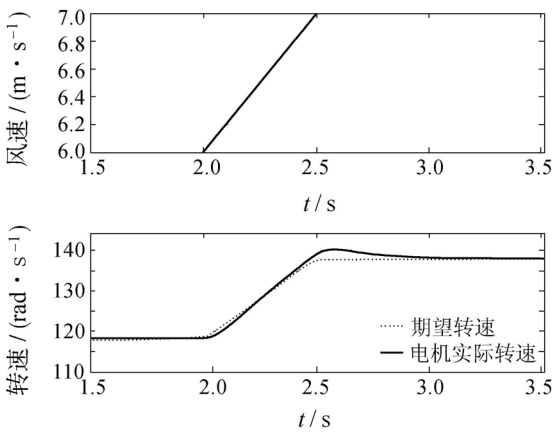


图4 风速波形(上图); 转速跟踪波形(下图)

Fig. 4 Wind speed (up); DFIG speed tracking waveform (down)

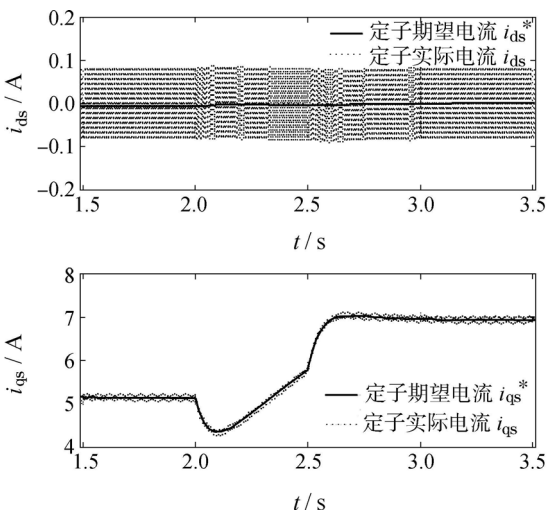


图5 发电机定子电流d, q分量跟踪波形

Fig. 5 d, q component of stator current tracking waveform unbalanced voltage

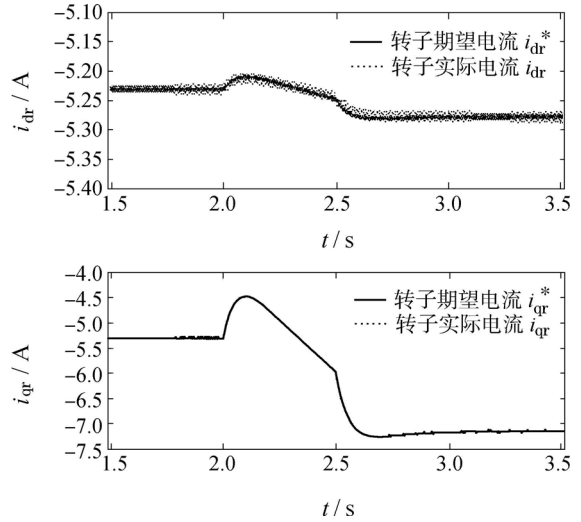


图6 发电机转子电流d, q分量动态跟踪波形

Fig. 6 d, q component of rotor current tracking waveform

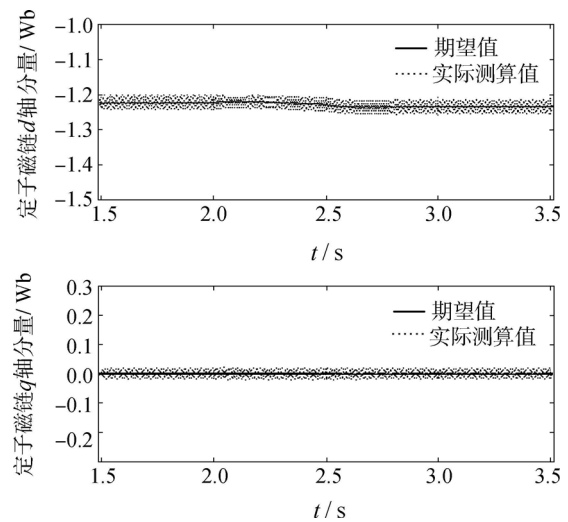


图7 定子磁链d, q分量跟踪波形

Fig. 7 d, q component of stator flux tracking waveform

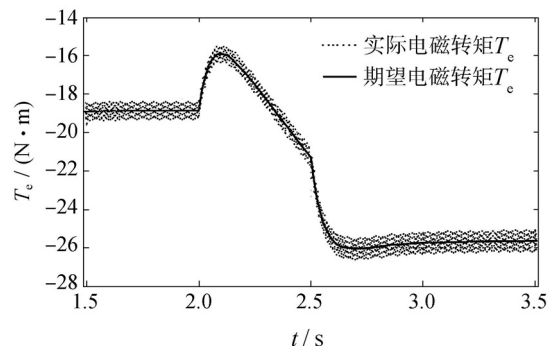


图8 电磁转矩跟踪波形

Fig. 8 Electromagnetic torque tracking waveform

由图4-8可知, 由于输入风速发生变化, 导致期望转速和期望电磁转矩产生相应的变化, 但所设计的无源性控制策略, 在期望值发生变化时对期望值依然能进行很好的跟踪, 具有良好的动态性能. 同时由于电网电压的不平衡, 导致稳态时实际

值在期望值附近有小范围的振荡, 但通过与常规矢量控制策略相比其振荡幅度得到了很大的抑制。

由图9-10可以看出采用常规矢量控制策略时, 定子电流含有明显的负序分量, 转子电流也包含了大量的高次谐波. 采用基于无源性的不平衡控制策略时, 定子电流的负序分量得到很大的抑制, 转子电流的高次谐波同样得到有效的抑制. 分别作FFT分析发现: 采用常规矢量控制策略时, 定子电流含有大量的3次谐波分量及少量的直流分量, 总谐波失真率为8.06%, 转子电流含有大量的谐波, 总谐波失真率为21.18%, 采用本文提出的不平衡控制策略时, 定子电流含有极少量的谐波分量, 总谐波失真率为0.04%, 转子电流含有的谐波分量较小, 总谐波失真率为0.59%.

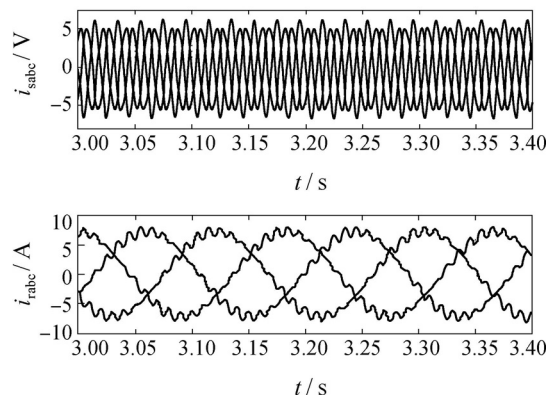


图 9 采用常规矢量控制策略时定、转子电流
Fig. 9 Stator and rotor current under conventional vector control strategy

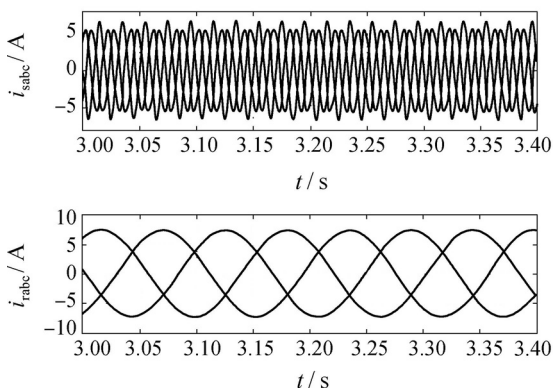


图 10 采用不平衡控制策略时定、转子电流
Fig. 10 Stator and rotor current under unbalanced control strategy

图11为不平衡电网电压故障下发电机转子侧变流器分别采用基于无源性的不平衡控制策略和传统矢量控制策略时电磁转矩的波形. 图12-13为两种控制策略下的定子电流谐波分析图. 图14-15为两种控制策略下的转子电流谐波分析图. 图中: Fundamental表示基频, THD表示总谐波失真.

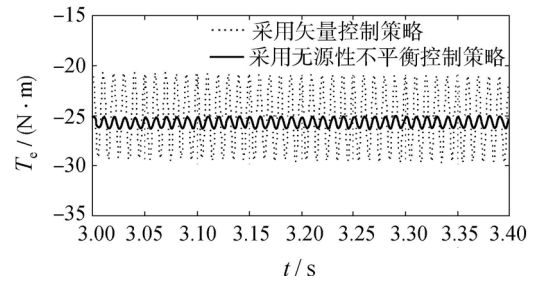


图 11 两种控制策略下的电磁转矩波形
Fig. 11 Electromagnetic torque waveforms between two different strategies

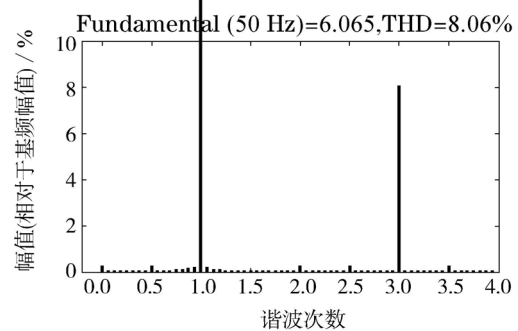


图 12 采用常规矢量控制策略时定子电流谐波分析
Fig. 12 Harmonic analysis of stator current under conventional vector control strategy

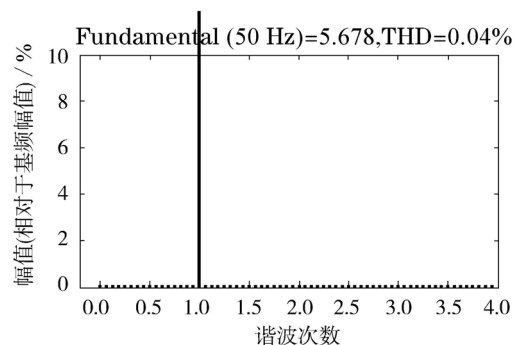


图 13 采用不平衡控制策略时定子电流谐波分析
Fig. 13 Harmonic analysis of stator current under unbalanced control strategy

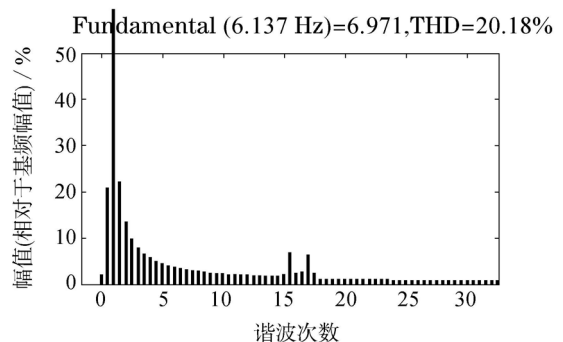


图 14 采用常规矢量控制策略时转子电流谐波分析
Fig. 14 Harmonic analysis of rotor current under conventional vector control strategy

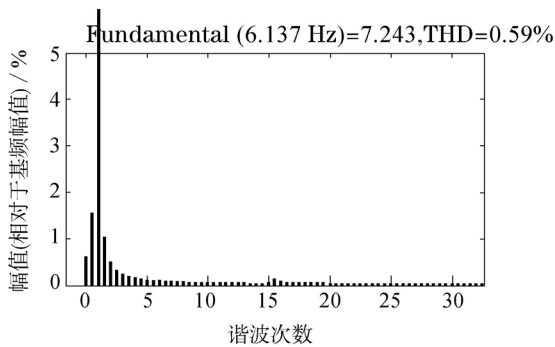


图 15 采用不平衡控制策略时转子电流谐波分析

Fig. 15 Harmonic analysis of rotor current under unbalanced control strategy

由图15可知采用基于无源性的不平衡控制策略下电磁转矩的波动明显小于传统矢量控制策略下电磁转矩的波动。

5 结论(Conclusions)

本文分析了电网电压不平衡条件下DFIG正、负序模型的无源性。同时结合无源控制方法以抑制转子不平衡电流为控制目标,提出了一种电网电压不平衡情况下双馈感应发电系统不平衡控制策略。首先根据控制目标给出了一种期望状态值计算方法;然后设计了正转同步速旋转坐标系中DFIG正序模型及负序模型的无源性反馈控制器。该方法实现了不平衡电网电压条件下转子正、负序电流的独立跟踪控制,有效地提高了稳态不平衡电网电压时风电机组的不间断运行能力。与以往的方法相比,该方法具有以下优点:1)控制律的设计是全局稳定的。2)不需要对反馈电流做任何处理,在电流控制内环中不会引入延时和误差,同时也简化了控制器。3)电流期望值是根据电磁转矩期望值来计算,而文中将转速反馈控制的输出作为电磁转矩期望值,因此外环属于闭环控制,从而使整个控制系统具有良好的鲁棒性。

参考文献(References):

- [1] HANSEN A D, HANSEN L H. Wind turbine concept market penetration over 10 years (1995–2004) [J]. *Wind Energy*, 2007, 10(1): 81–97.
- [2] TREMBLAY E, CHANDRA A, LAGACE P J, et al. Study of grid-side converter control for grid-connected DFIG wind turbines under unbalanced load condition [C] // *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*. Montreal, Quebec, Canada: IEEE Conference Publications, 2006: 1619–1624.
- [3] BREKKEN T K A, MOHAN N. Control of a doubly fed induction wind generator under unbalanced grid voltage conditions [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2007, 22(1): 129–135.
- [4] 胡家兵, 贺益康. 不平衡电压下双馈异步风力发电系统的建模与控制 [J]. *电力系统自动化*, 2007, 31(14): 47–56. (HU Jiabing, HE Yikang. Modeling and control of the dfig based wind-power generation system under unbalanced grid voltage conditions [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2007, 31(14): 47–56.)
- [5] 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.
- [6] 胡家兵, 贺益康, 王宏胜. 不平衡电网电压下双馈感应发电机转子侧变换器的比例-谐振电流控制策略 [J]. *中国电机工程学报*, 2010, 30(6): 48–56. (HU Jiabing, HE Yikang, WANG Hongsheng. Proportional-resonant current control scheme for rotor-side converter of double-fed induction generators under unbalanced network voltage conditions [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2010, 30(6): 48–56.)
- [7] 胡家兵, 贺益康, 王宏胜, 等. 不平衡电网电压下双馈感应发电机网侧和转子侧变换器的协同控制 [J]. *中国电机工程学报*, 2010, 30(9): 97–104. (HU Jiabing, HE Yikang, WANG Hongsheng, et al. Coordinated control of grid-and rotor-side converters of double-fed induction generator under unbalanced network voltage conditions [J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2010, 30(9): 97–104.)
- [8] 张兴华, 戴先中. 基于无源性的感应电机转矩与转速控制 [J]. *电工技术学报*, 2001, 16(4): 34–38. (ZHANG Xinhua, DAI Xianzhong. Torque and speed control of induction motor based on passivity [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2001, 16(4): 34–38.)
- [9] 陈峰, 徐文立. 基于无源性的异步电机自适应控制 [J]. *自动化学报*, 2000, 26(6): 776–781. (CHEN Feng, XU Wenli. Passivity-based adaptive control of induction motor [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2000, 26(6): 776–781.)
- [10] 马良河, 姜建国. 异步电动机的无源性跟踪控制—转子电阻及负载转矩皆未知时变的情形 [J]. *控制理论与应用*, 2005, 22(1): 72–75. (MA Lianghe, JIANG Jianguo. Induction motor tracking control based on passivity principle – In case of time-varying and unknown load torque and rotor resistance [J]. *Control Theory & Applications*, 2005, 22(1): 72–75.)
- [11] 王涛, 肖建, 李冀昆. 感应电机无源性分析及自适应控制 [J]. *中国电机工程学报*, 2007, 27(6): 31–34. (WANG Tao, XIAO Jian, LI Jikun. Passivity analysis of induction motor and adaptive control [J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2007, 27(6): 31–34.)
- [12] LEE S, NAM K. Dynamic modeling and passivity-based control of an induction motor powered by doubly fed induction generator [C] // *Industry Applications Conference*. Salt Lake City: IEEE Conference Publications, 2003: 1970–1975.
- [13] 吕惠子, 杨俊华, 杨金明, 等. 无刷双馈调速电机无源性分析及自适应控制 [J]. *控制理论与应用*, 2009, 26(12): 1425–1429. (LÜ Huizi, YANG Junhua, YANG Jinming, et al. Passivity analysis and adaptive control of brushless doubly-fed machines for adjustable speed drives [J]. *Control Theory & Applications*, 2009, 26(12): 1425–1429.)
- [14] XUE H, WANG Y F, FAN Y. Adaptive passivity-based control strategies of doubly fed induction wind power generator systems [C] // *International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems*. Hefei, China: IEEE, 2010: 731–734.
- [15] 马良河, 姜建国. 感应电动机时变转矩跟踪的无源性控制器设计 [J]. *电机与控制学报*, 2002, 6(4): 284–287. (MA Lianghe, JIANG Jianguo. Design of a passivity-based controller in tracking time-varying torque of induction motors [J]. *Electric Machines and Control*, 2002, 6(4): 284–287.)

作者简介:

刘军 (1963–), 男, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为工业控制及自动化, E-mail: liujun0310@sina.com;

蒋说东 (1983–), 男, 博士研究生, 目前研究方向为风力发电技术及控制理论与应用, E-mail: jsd1210@sohu.com.