

文章编号: 1000-8152(2008)02-0348-05

## 无刷双馈风力发电机模型降阶 第 II 部分: 模型降阶的合理性分析

刘永强, 王佩

(华南理工大学 电力学院, 广东广州 510640)

**摘要:** 无刷双馈风力发电系统是一个多时间尺度高维数系统, 其稳定性分析与控制是非常复杂的。在实际问题分析中, 具有快变特征的动态常被略去。然而, 在什么条件下无刷双馈电机的快动态允许被略去是一个必须回答的理论问题。以基于物理电路的计及快动态和慢动态的无刷双馈电机模型为基础, 研究了降阶的条件。研究表明无刷双馈风力发电机在一些可接受的条件下, 降阶是合理的和可行的, 降阶不会引起“质”的错误。研究结论对简化无刷双馈风力发电机模型以及实现功率调节控制具有重要意义。

**关键词:** 无刷双馈风力发电机; 模型降阶; 稳定性; 多时间尺度系统

中图分类号: TP273 文献标识码: A

### Order reduction for brushless doubly-fed wind generators

Part two: rationality analysis of reducing order

LIU Yong-qiang, WANG Pei

(School of Electrical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510640, China)

**Abstract:** The stability analysis and control of brushless doubly-fed wind generator is extremely complex due to its multi-time scale nature and high dimensionality. In order to carry out the stability analysis in control design, a common practice is to neglect the very fast transients. However, under what conditions the fast dynamics of brushless doubly-fed wind generator can be neglected is still an important theoretical question to be answered. Based on physical circuit of brushless doubly-fed wind generator including the fast and slow dynamics, the conditions of reducing model order are studied in this paper. The research shows that the result is reasonable and feasible under some acceptable conditions, without causing qualitative error. The conclusions presented in this paper have significance in model reduction and power regulation for brushless doubly-fed wind generator.

**Key words:** brushless doubly-fed wind generator; reduction order; stability; multi-time scale system

### 1 引言(Introduction)

无刷双馈风力发电机可以看作是由两台感应电机构成的一种电机<sup>[1]</sup>, 它具有多个不同跨度的时间常数。利用系统的时间尺度特征进行降阶分析已得到广泛的研究<sup>[2~8]</sup>。无刷双馈风力发电系统由于变量众多, 加大了分析与控制的难度。在传统的电机瞬变分析中, 通过略去变化较快的动态来简化电机模型, 如略去电机定子磁链动态等。然而从文献[2]中可知, 略去快动态是有条件的, 未经证明地随意略去快动态可能引起“质”的错误, 微分方程的研究也表明了简化系统可能导致平衡点附近的结构性差异。实际非线性系统稳定性分析及控制包括静态稳定和暂态稳定两个方面, 前者对应于平衡点的稳定性问题, 后者对应于稳定域问题。

对于无刷双馈风力发电系统的稳定性分析与转速控制(或称最大风能跟踪控制)来说, 用简化降阶模型替代原高阶模型须满足下面3个条件:

1) 简化降阶系统与原系统在对应的平衡点上具有相同的稳定性, 即若简化系统在平衡点 $p$ 是稳定的(不稳定的、渐近稳定的), 那么原系统在相应的平衡点 $p'$ 上也是稳定的(不稳定的、渐近稳定的), 反之亦然;

2) 若原系统快变量初始值给定且简化降阶模型与原模型具有相同的慢变量初始值, 则存在正实数 $T$ , 使得当 $t > T$ 的简化降阶系统与原系统的轨线充分靠近。通常要求时间 $T$ 较短, 即对给定初始值, 原系统轨线应很快与简化降阶系统轨线重合;

3) 原系统的稳定域连续依赖奇异摄动参数 $\varepsilon$ , 且

当 $\varepsilon \rightarrow 0$ 时原系统的稳定域边界与简化降阶系统相应的稳定域边界重合。

本文按文献[1]中所推出的无刷双馈风力发电机的双电机模型, 依据文献[2]所得到的关于降阶合理性的结果, 研究了无刷双馈风力发电机实现简化降阶的可行性和合理性, 证明了在一些可接受条件下, 略去系统的快动态是合理的。本文所得到的结论对简化无刷双馈风力发电系统模型及简化系统控制方法具有重要的意义。

## 2 多时间尺度模型及其降阶方程(Multi-time scale model and its reduced equation)

从基本原理来讲, 可以认为无刷双馈电机是两台感应电机耦合而成的一种新型电机, 一台称为功率电机, 另一台称为控制电机。在文献[1]中, 完整的无刷双馈电机的双电机模型可以表示为

$$\varepsilon_1 \frac{dI_s}{dt} = A(\Omega_r)I_s + B(\Omega_r)I_r + CU_s, \quad (1)$$

$$\varepsilon_2 \frac{dI_r}{dt} = \bar{A}(\Omega_r)I_r + \bar{B}(\Omega_r)I_s, \quad (2)$$

$$J \frac{d\Omega_r}{dt} = T_t - T_{em}(I_r, I_s) - K_d\Omega_r. \quad (3)$$

这里:  $I_r = [i_{dr1} \ i_{qr1} \ i_{dr2} \ i_{qr2}]^T$  是双馈电机的转子电流向量,  $I_s = [i_{dp} \ i_{qp} \ i_{dc} \ i_{qc}]^T$  是双馈电机的定子电流向量,  $U_s = [u_{dp} \ u_{qp} \ u_{dc} \ u_{qc}]^T$  是双馈电机的功率绕组和控制绕组电压向量; 矩阵  $A(\Omega_r), B(\Omega_r), \bar{A}(\Omega_r), \bar{B}(\Omega_r) \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$ ,  $C \in \mathbb{R}^{4 \times 2}$ ;  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  为系统的摄动参数,  $\varepsilon_1 = \omega_s^{-1}l_p/r_p$ ,  $\varepsilon_2 = \omega_s^{-1}l_r/r_r$ ;  $\omega_s, \omega_c$  分别为功率电机和控制电机定子角频率;  $\Omega_r$  为电机转速;  $J$  为转动惯量;  $T_t, T_{em}$  分别为风力机输出力矩(即无刷双馈电机的驱动力矩)和电磁力矩;  $K_d$  为阻尼系数。

若系统原模型(1)~(3)满足文献[2]的降阶条件, 则在  $\varepsilon_1 \ll \varepsilon_2 \ll 1$  的条件下, 可得到两种降阶形式:

1) 若略去功率绕组和控制绕组的电流动态, 则原模型降阶为含4个代数约束方程的5阶模型; 转子电流动态方程:

$$l_{r1} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{dr1} \\ i_{qr1} \end{bmatrix} = l_{r1}(\omega_s - p_p\Omega_r) \begin{bmatrix} i_{qr1} \\ -i_{dr1} \end{bmatrix} + l_{m1}(\omega_s - p_p\Omega_r) \begin{bmatrix} i_{qp} \\ -i_{dp} \end{bmatrix} - r_{r1} \begin{bmatrix} i_{dr1} \\ i_{qr1} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$l_{r2} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{dr2} \\ i_{qr2} \end{bmatrix} = l_{r2}(-p_c\omega_r - \omega_c) \begin{bmatrix} i_{qr2} \\ -i_{dr2} \end{bmatrix} + l_{m2}(-p_c\Omega_r - \omega_c) \begin{bmatrix} i_{qc} \\ -i_{dc} \end{bmatrix} - r_{r2} \begin{bmatrix} i_{dr2} \\ i_{qr2} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

代数约束方程:

$$\left( \frac{l_p\omega_s}{l_{m1}} - \frac{l_{m1}(\omega_s - p_p\Omega_r)}{l_{r1}} \right) \begin{bmatrix} i_{qp} \\ -i_{dp} \end{bmatrix} - \frac{r_s}{l_{m1}} \begin{bmatrix} i_{dp} \\ i_{qp} \end{bmatrix} +$$

$$p_p\Omega_r \begin{bmatrix} i_{qr1} \\ -i_{dr1} \end{bmatrix} + \frac{r_{r1}}{l_{r1}} \begin{bmatrix} i_{dr1} \\ i_{qr1} \end{bmatrix} + \frac{1}{l_{m1}} \begin{bmatrix} u_{dp} \\ u_{qp} \end{bmatrix} = 0, \quad (6)$$

$$\left( -\frac{l_c\omega_c}{l_{m2}} + \frac{l_{m2}(\omega_c + p_c\Omega_r)}{l_{r2}} \right) \begin{bmatrix} i_{qc} \\ -i_{dc} \end{bmatrix} - \frac{r_c}{l_{m2}} \begin{bmatrix} i_{dc} \\ i_{qc} \end{bmatrix} + p_c\Omega_r \begin{bmatrix} i_{qr2} \\ -i_{dr2} \end{bmatrix} + \frac{r_{r2}}{l_{r2}} \begin{bmatrix} i_{dr2} \\ i_{qr2} \end{bmatrix} + \frac{1}{l_{m2}} \begin{bmatrix} u_{dc} \\ u_{qc} \end{bmatrix} = 0. \quad (7)$$

这里:  $i_{dr} = i_{dr1} + i_{dr2}$ ,  $i_{qr} = i_{qr1} - i_{qr2}$ ;  $p_r, p_c$  分别为转子和控制绕组的极对数;  $l_{m1}$  为功率电机定、转子绕组的互感;  $l_p, r_p, l_{r1}, r_{r1}$  分别为功率电机定转子绕组的自感与电阻;  $l_{m2}$  为控制电机定、转子绕组的互感;  $l_c, r_c, l_{r2}, r_{r2}$  分别为控制电机定转子绕组的自感与电阻。这样微分方程(3)~(5)与代数约束方程(6)(7)构成了无刷双馈电机的5阶模型。

2) 略去功率绕组、控制绕组和转子绕组电流动态, 则原模型进一步降阶为仅含转子运动微分方程和一组代数约束方程的1阶模型。代数约束方程为

$$\begin{bmatrix} A_r & A_l \\ -A_l & A_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \frac{1}{\omega_s} B_1 \begin{bmatrix} u_{dp} \\ u_{qp} \end{bmatrix} + \frac{1}{\omega_s} B_2 \begin{bmatrix} u_{dc} \\ u_{qc} \end{bmatrix} = 0. \quad (8)$$

这里:

$$I_d = [i_{dp} \ i_{dc} \ i_{dr1} \ i_{dr2}]^T, I_q = [i_{qp} \ i_{qc} \ i_{qr1} \ i_{qr2}]^T,$$

$$A_r = -\text{diag}\{r_s, r_c, r_{r1}, r_{r2}\},$$

$$A_l = \begin{bmatrix} l_p & 0 & l_{m1} & 0 \\ 0 & -l_c\omega_c\omega_s^{-1} & 0 & -l_{m2}\omega_c\omega_s^{-1} \\ l_{m1}S_p & 0 & l_{r1}S_p & 0 \\ 0 & -l_{m2}S_p & 0 & -l_{r2}S_p \end{bmatrix},$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T, \quad (9)$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T.$$

这里  $S_p$  为功率电机的转差率, 转子运动方程(3)与代数约束方程(8)构成了无刷双馈电机的1阶简化模型。

## 3 降阶的合理性分析(Rationality analysis of reducing order)

### 3.1 概述(Outline)

在文献[2]中可知, 要实现系统降阶, 则系统必须满足一定的条件, 其中多数条件是通有的, 而由文献[9]可知文献[2]中的条件C3)对实际系统几乎都是成立的, 因此需要验证的条件是文献[2]中的条件A2)。也就是说如果多时间尺度无刷双馈风力发电机的边界层系统是大范围渐近稳定的, 则在无刷双馈风力发电机的分析与控制中使用降阶模型是合理的, 不会引起“质”的错误。

在上节简化模型的分析中可以看出, 在将无刷双馈电机表示为两台感应电机的模型中, 原模型降阶

为5阶模型意味着固定 $I_r, \Omega_r$ 后的两台感应电机的定子绕组电流方程(1)被视作原模型的快子系统。类似地，原模型降为1阶模型意味着固定 $\Omega_r$ 后的两台电机定、转子绕组电流方程(1)(2)被视作原模型的快子系统。很明显，若快子系统是大范围渐近稳定的，则系统降阶是合理的。为方便后面的分析，先给出无源性的概念。考虑下列控制系统：

$$\Sigma : \dot{x} = f(x) + g(x)u, y = h(x). \quad (9)$$

其中： $x \in \mathbb{R}^n, u \in \mathbb{R}^m, y \in \mathbb{R}^m, f, g, h \in \mathbb{C}^1$ 。

**定义3.1** 系统 $\Sigma$ 在 $\mathbb{C}^r(r \geq 0)$ 上是严格无源的，存在非负函数 $V(x), V(0) = 0$ ，正定函数 $S(x)$ ，对于所有的 $t > 0$ ：

$$\begin{aligned} V(x(\tau)) - V(x(0)) = \\ \int_0^\tau y(t)^T u(\tau) dt - \int_0^\tau S(x(t)) dt. \end{aligned} \quad (10)$$

**注3.1** 如果将 $\int_0^\tau y(t)^T u(\tau) dt$ 视作外部在0到 $\tau$ 期间注入到系统的总能量，则严格无源性意味着系统在0到 $\tau$ 期间的能量增长总是小于外部在0到 $\tau$ 期间注入的总能量。对实际线性系统来说严格无源性与系统大范围渐进稳定是完全一致的。

### 3.2 降阶的合理性分析(Rationality analysis of reducing order)

**定理3.1** 在将定子绕组电流视作快动态的无刷双馈风力发电机奇异摄动模型中(其简化模型为5阶模型)，其边界层系统是大范围渐近稳定的。

**证** 容易理解，若把无刷双馈电机看成是两台感应电机的合成，如果每台感应电机在“冻结”慢变量后，相应的定子绕组电流模型都是大范围渐近稳定的，则该命题得证。原模型中的功率电机定子绕组电流方程可写为

$$\begin{aligned} l_p \begin{bmatrix} \frac{di_{dp}}{dt} \\ \frac{di_{qp}}{dt} \end{bmatrix} = l_p \omega_s \begin{bmatrix} i_{qp} \\ -i_{dp} \end{bmatrix} + l_{m1} \omega_s \begin{bmatrix} i_{qr1} \\ -i_{dr1} \end{bmatrix} - \\ r_s \begin{bmatrix} i_{dp} \\ i_{qp} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{dp} \\ u_{qp} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (11)$$

式(11)左乘行向量 $[i_{dp} \ i_{dq}]$ ，则

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} l_p (i_{dp}^2 + i_{qp}^2) \right) = \\ P_{emp} - r_s (i_{dp}^2 + i_{qp}^2) + u_{dp} i_{dp} + u_{qp} i_{qp}. \end{aligned} \quad (12)$$

对式(12)两边从0到 $\tau$ 积分可得

$$\begin{aligned} V_p(\tau) - V_p(0) = \int_0^\tau \frac{1}{2} l_p (i_{dp}^2 + i_{qp}^2) dt = \\ \int_0^\tau P_{emp} dt - \int_0^\tau r_s (i_{dp}^2 + i_{qp}^2) dt + \\ \int_0^\tau (u_{dp} i_{dp} + u_{qp} i_{qp}) dt. \end{aligned} \quad (13)$$

控制电机在“冻结”慢变量后的定子绕组电流方程写为

$$\begin{aligned} l_c \begin{bmatrix} \frac{di_{dc}}{dt} \\ \frac{di_{qc}}{dt} \end{bmatrix} = -l_c \omega_c \begin{bmatrix} i_{qc} \\ -i_{dc} \end{bmatrix} - l_{m2} \omega_c \begin{bmatrix} i_{qr2} \\ -i_{dr2} \end{bmatrix} - \\ r_c \begin{bmatrix} i_{dc} \\ i_{qc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{dc} \\ u_{qc} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (14)$$

将上式左乘行向量 $[i_{dc} \ i_{qc}]$ ，则

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} l_c (i_{dc}^2 + i_{qc}^2) \right) = \\ P_{emc} - r_c (i_{dc}^2 + i_{qc}^2) + u_{dc} i_{dc} + u_{qc} i_{qc}. \end{aligned} \quad (15)$$

对式(15)两边从0到 $\tau$ 积分可得

$$\begin{aligned} V_c(\tau) - V_c(0) = \int_0^\tau \frac{1}{2} l_c (i_{dc}^2 + i_{qc}^2) dt = \\ \int_0^\tau P_{emc} dt - \int_0^\tau r_c (i_{dc}^2 + i_{qc}^2) dt + \\ \int_0^\tau (u_{dc} i_{dc} + u_{qc} i_{qc}) dt. \end{aligned} \quad (16)$$

在式(13)(16)中， $P_{emp}, P_{emc}$ 分别表示功率电机和控制电机的电磁功率，它是指穿越气隙注入到定子绕组的电磁功率(建模时已略去铁损耗)，这样式(13)(16)右端的前两项就构成了注入到定子绕组的总能量。对照严格无源性的定义，可知，式(13)和(16)说明定子绕组电感储能能在0到 $\tau$ 时间内的增长严格小于在0到 $\tau$ 期间注入到定子绕组的总能量，因此快子系统是严格无源的，相应的边界层系统也是渐近稳定的。证毕。

**定理3.2** 在将定、转子绕组电流视作快动态的无刷双馈电机奇异摄动模型中(其简化模型为1阶模型)，其边界层系统是大范围渐近稳定的。

**证** 与定理3.1的证明思路类似，功率电机在“冻结”慢变量后，定、转子绕组的方程为

$$\begin{aligned} l_p \begin{bmatrix} \frac{di_{dp}}{dt} \\ \frac{di_{qp}}{dt} \end{bmatrix} + l_{m1} \begin{bmatrix} \frac{di_{dr1}}{dt} \\ \frac{di_{qr1}}{dt} \end{bmatrix} = \\ l_p \omega_s \begin{bmatrix} i_{qp} \\ -i_{dp} \end{bmatrix} + l_{m1} \omega_s \begin{bmatrix} i_{qr1} \\ -i_{dr1} \end{bmatrix} - r_s \begin{bmatrix} i_{dp} \\ i_{qp} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{dp} \\ u_{qp} \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} l_{r1} \begin{bmatrix} \frac{di_{dr1}}{dt} \\ \frac{di_{qr1}}{dt} \end{bmatrix} + l_{m1} \begin{bmatrix} \frac{di_{dp}}{dt} \\ \frac{di_{qp}}{dt} \end{bmatrix} = \\ l_{r1} \omega_s S_p \begin{bmatrix} i_{qr1} \\ -i_{dr1} \end{bmatrix} + l_{m1} \omega_s S_p \begin{bmatrix} i_{qp} \\ -i_{dp} \end{bmatrix} - r_{r1} \begin{bmatrix} i_{dr1} \\ i_{qr1} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (18)$$

将式(17)左乘行向量 $[i_{dp} \ i_{qp}]$ ，式(18)左乘行向量

$[i_{dr1} \ i_{qr1}]$ , 再将这两式相加, 将此式两边从0到 $\tau$ 积分, 则

$$\begin{aligned} & \int_0^\tau \frac{1}{2} \{ l_{m1}(i_{dp} + i_{dr1})^2 + l_{m1}(i_{qp} + i_{qr1})^2 + \\ & l_{p\sigma}(i_{qp}^2 + i_{dp}^2) + l_{r1\sigma}(i_{dr1}^2 + i_{qr1}^2) \} dt = \\ & \int_0^\tau P_{\Omega p} dt + \int_0^\tau (u_{dp}i_{dp} + u_{qp}i_{qp}) dt - \\ & \int_0^\tau \{ r_s(i_{qp}^2 + i_{dp}^2) + r_{r1}(i_{dr1}^2 + i_{qr1}^2) \} dt. \end{aligned} \quad (19)$$

这里 $l_{p\sigma}, l_{r1\sigma}$ 分别表示功率电机定、转子绕组漏感.

在“冻结”慢变量后, 控制电机的定、转子绕组电流方程为

$$\begin{aligned} l_c \begin{bmatrix} \frac{di_{dc}}{dt} \\ \frac{di_{qc}}{dt} \end{bmatrix} + l_{m2} \begin{bmatrix} \frac{di_{dr2}}{dt} \\ \frac{di_{qr2}}{dt} \end{bmatrix} = \\ l_c(-\omega_c) \begin{bmatrix} i_{qc} \\ -i_{dc} \end{bmatrix} + l_{m2}(-\omega_c) \begin{bmatrix} i_{qr2} \\ -i_{dr2} \end{bmatrix} - \\ r_c \begin{bmatrix} i_{dc} \\ i_{qc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{dc} \\ u_{qc} \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} l_{r2} \begin{bmatrix} \frac{di_{dr2}}{dt} \\ \frac{di_{qr2}}{dt} \end{bmatrix} + l_{m2} \begin{bmatrix} \frac{di_{dc}}{dt} \\ \frac{di_{qc}}{dt} \end{bmatrix} = \\ -l_{r2}\omega_s S_p \begin{bmatrix} i_{qr2} \\ -i_{dr2} \end{bmatrix} - l_{m2}\omega_s S_p \begin{bmatrix} i_{qc} \\ -i_{dc} \end{bmatrix} - \\ r_{r2} \begin{bmatrix} i_{dr2} \\ i_{qr2} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (21)$$

将式(20)左乘行向量 $[i_{dc} \ i_{qc}]$ , 式(21)左乘行向量 $[i_{dr2} \ i_{qr2}]$ , 再将这两式相加, 将此式两边从0到 $\tau$ 积分可得

$$\begin{aligned} & \int_0^\tau \frac{1}{2} \{ l_{m2}(i_{dc} + i_{dr2})^2 + l_{m2}(i_{qc} + i_{qr2})^2 + \\ & l_{c\sigma}(i_{qc}^2 + i_{dc}^2) + l_{r2\sigma}(i_{dr1}^2 + i_{qr1}^2) \} dt = \\ & \int_0^\tau P_{\Omega c} dt + \int_0^\tau (u_{dc}i_{dc} + u_{qc}i_{qc}) dt - \\ & \int_0^\tau \{ r_c(i_{dp}^2 + i_{qp}^2) + r_r(i_{dr1}^2 + i_{qr1}^2) \} dt. \end{aligned} \quad (22)$$

这里 $l_{c\sigma}, l_{r2\sigma}$ 分别表示控制电机定、转子绕组漏感. 在式(19)(22)中,  $P_{\Omega p}, P_{\Omega c}$ 分别表示功率电机和控制电机由机械功率转换为电功率的那部分功率, 它与定子绕组端口输出功率一起构成了注入到电机定、转子的总功率. 对照严格无源性的定义, 可知, 式(19)和(22)说明定、转子绕组电感储能能在0到 $\tau$ 期间内的增长, 严格小于在0到 $\tau$ 期间内注入到定、转子绕组的总能量, 因此快子系统是严格无源的, 相应的边界层系统也是渐近稳定的. 证毕.

**注 3.2** 由于略去定子电流动态, 或略去定、转子电流动态, 无刷双馈电机的快子系统都是严格无源和渐

稳定的, 因此, 对应的系数矩阵必有负实部特征根, 满足文献[2]中引理2.1的降阶条件.

**注 3.3** 当分析无刷双馈发电系统时, 不仅有静态稳定问题, 也可能出现大干扰(如输电线路一回断线等), 因此系统存在暂态稳定问题. 根据文献[2], 不论是静态稳定分析, 还是暂态稳定分析都可采取降阶模型以简化分析、控制过程. 另外注意到在整个分析过程中并未要求机端电压不变, 因此本文所得到的结论可适用于单机无限大系统也适用于多机系统.

#### 4 仿真实例(Simulation example)

为观测无刷双馈电机原系统与其降阶系统响应的差异, 本文采用MATLAB作为仿真软件, 得到了完整模型、5阶模型及1阶模型各电流及转速的仿真波形. 仿真参数如下:  $p_p = 3, p_c = 1; l_p = 0.27, l_c = 0.27, l_{m1} = l_{m2} = 0.26, r_s = r_{r1} = r_{r2} = 0.5, r_c = 0.8, l_r = 0.54, J = 2, U_{dp} = -225, U_{qp} = 200, U_{dc} = -120, U_{qc} = 30$ . 设各变量初始值为:  $i_{dp} = 13.458, i_{dc} = 4.1114, i_{dr1} = -2.1406, i_{dr2} = 1.6148, i_{qp} = 4.8747, i_{qc} = 4.8498, i_{qr1} = -1.8431, i_{qr2} = -4.3401; \Omega_r(0) = 114$ . 图1~3分别给出了功率电机和控制电机定子电流及双馈电机转速的变化. 图中虚线、细实线和粗实线分别表示完整模型、5阶降阶模型和1阶降阶模型的响应曲线. 仿真表明, 在保证一定精度的条件下采用略去定子电流动态, 保留转子电流动态的5阶模型较为合理.

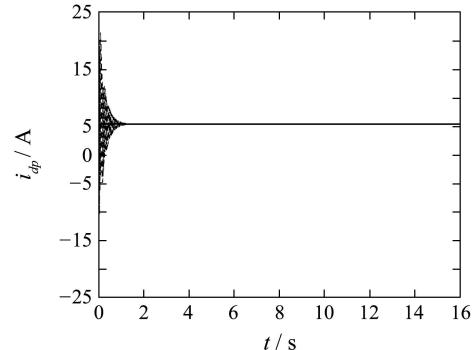


图 1(a) 电流 $i_{dp}$ 波形

Fig. 1(a) Waveform of current  $i_{dp}$

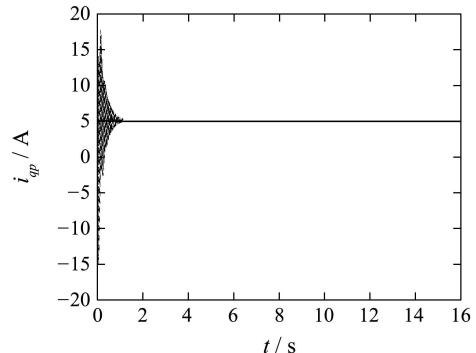


图 1(b) 电流 $i_{qp}$ 波形

Fig. 1(b) Waveform of current  $i_{qp}$

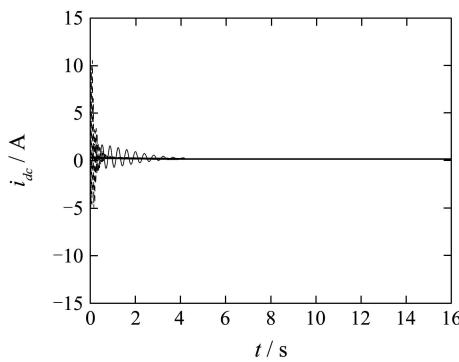


图 2(a) 电流*i<sub>dc</sub>*波形  
Fig. 2(a) Waveform of current  $i_{dc}$

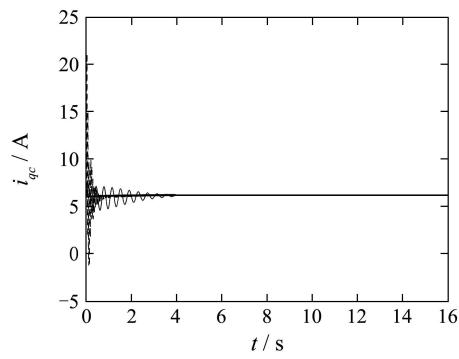


图 2(b) 电流*i<sub>qc</sub>*波形  
Fig. 2(b) Waveform of current  $i_{qc}$

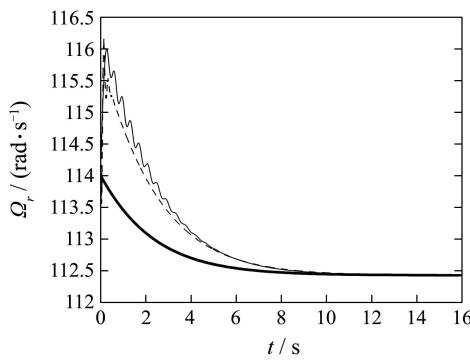


图 3 转速Ω<sub>r</sub>波形  
Fig. 3 Waveform of rotational speed  $\Omega_r(t)$

## 5 结论(Conclusions)

综合上面的分析可得到以下结论:

1) 无刷双馈风力发电机可有3种不同阶数的模

型, 即高阶的原模型、5阶模型和1阶模型;

2) 对于两种不同的降阶模型, 其相应的边界层系统都是大范围渐近稳定的, 因此利用原模型是机电动态耦合系统且时间尺度跨度大的特点, 略去变化较快的电磁动态实现降阶是合理的;

3) 本文所做的降阶合理性分析, 即适用于静态稳定分析, 也适用于暂态稳定分析; 同时这一结论对单机系统或多机系统都适用。

## 参考文献(References):

- [1] 王佩, 刘永强. 无刷双馈风力发电机模型降阶研究: 第I部分—无刷双馈风力发电机多时间尺度模型[J]. 控制理论与应用, 2008, 25(1): 135–138.  
(WANG Pei, LIU Yongqiang. A study on order reduction for brushless doubly-fed wind generators—Part one: Multi-time scale model of brushless doubly-fed wind generators[J]. *Control Theory & Applications*, 2008, 25(1): 135–138.)
- [2] 刘永强, 徐鹏. 一类多时间尺度机电耦合系统的模型降阶[J]. 控制理论与应用, 2008, 25(1): 139–140.  
(LIU Yongqiang, XU Peng. A study on order reduction for a class multi-time scale electromechanical coupling system[J]. *Control Theory & Applications*, 2008, 25(1): 139–140.)
- [3] P W SAUER, S AHMED-ZAID, M A PAI. Systematic inclusion of stator transient in reduced order synchronous machine models[J]. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1984, 6(6): 1348–1354.
- [4] SAUER P W, AHMED-ZAID S, KOKOTOVIC P V. An integral manifold approach to reduced order dynamic modeling of synchronous machines[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1988, 2(1): 17–23.
- [5] WINKELMAN J R, CHOW J H, ALLEMONG J J, et.al. Multi-time scale analysis of a power system[J]. *Automatica*, 1980, 16(1): 35–43.
- [6] CHOW J H. Time-scale modeling of dynamic networks with applications to power systems[M]//*Lecture Notes in Control and Information Sciences*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1982.
- [7] AVRAMOVIC B, KOKOTOVIC P V, WINKELMAN J R, et.al. Area decomposition for electro-mechanical models of power systems[J]. *Automatica*, 1980, 16(4): 637–648.
- [8] SAUER P W, LAGESSE D J, AHMED-ZAID S, et al. Reduced order modeling of interconnected multimachine power systems using time-scale decomposition[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1987, 5(2): 310–319.
- [9] HSIAO-DONG CHIANG, MORRIS W, FELIX F WU. Stability region of nonlinear autonomous dynamical systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1988, 33(1): 16–26.