第 25 卷第 1 期
2008 年 2 月

控 制 理 论 与 应 用
Control Theory & Applications

Vol. 25 No. 1
Feb. 2008

文章编号: 1000−8152(2008)01−0135−04

无刷双馈风力发电机模型降阶

第I部分: 无刷双馈风力发电机的多时间尺度模型

王 佩, 刘永强

(华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640)

摘要: 无刷双馈风力发电机中的3套绕组电流(功率绕组、控制绕组和转子绕组)产生的磁场在电机空间相互作用, 绕组间复杂的耦合关系导致无刷双馈电机模型具有高维数特征. 为了更有效地对无刷双馈风力发电机进行运行分析与功率控制, 充分利用无刷双馈风力发电机的多时间尺度特征, 实现模型降阶是必要的. 研究了无刷双馈风力发电机的多时间尺度特征, 建立了无刷双馈风力发电机的三时间尺度奇异摄动模型, 为无刷双馈风力发电机的模型降阶奠定了基础.

关键词:无刷双馈电机; 奇异摄动模型; 降阶; 多时间尺度系统

中图分类号: TP273 **文献标识码**: A

Model reduction for brushless doubly-fed wind generators

Part one: multi-time scale model of brushless doubly-fed wind generators

WANG Pei, LIU Yong-qiang

(Electric Power College, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510640, China)

Abstract: Since the magnetic fields caused by currents of the three windings (power winding, control winding and rotor winding) of brushless doubly-fed wind generator (BDFWG) interact one another in electric machine space, and the complex coupling relation among the windings exists, consequently, BDFWG model has the nature of high dimensions. It is important to reduce the order by making use of the characteristic of multi-time scale of BDFWG, either for operation analysis or for power regulation of BDFWG. In this paper, the nature of multi-time scale of BDFWG is discussed and the relevant singular perturbed model with three-time scale is built. The model of BDFWG derived in the paper lays the theoretical foundation for order reduction of BDFWG.

Key words: brushless doubly-fed wind generator; singular perturbed model; reduction order; multi-time scale system

1 引言(Introduction)

无刷双馈风力发电机(brushless doubly-fed wind generator, 简称BDFWG)是一类交流励磁异步化同步电机[1], 已成为风力发电中变速恒频发电的优化方案. 国内外对BDFWG的建模进行了较深入的研究, 也建立了比较准确实用的数学模型[2~4], 但缺乏系统化的BDFWG模型降阶方法, 其模型简化也缺乏理论依据.

BDFWG是一个大时间常数跨度的非线性系统, 它含有时间常数相差很大的变量. 转子转速, 转子电流, 定子电流各自变化快慢相差较大. 本文利用BDFWG的多时间尺度特征建立了的无刷双馈电机的多时间尺度奇异摄动模型, 为实现BDFWG的降阶奠定了基础. 为方便研究, 忽略多时间尺度模型的快变量来对模型进行简化是目前机电耦合系统惯用的工程降阶方法[5,6]. 利用系统具有的大时间常数跨度特性来简化模型, 必须解决下列两个问题: 1) 建模问题, 即要建立系统的奇异摄动模型; 2) 降阶的合理性问题, 即分析用降阶模型对系统进行分析与控制是否会出现“质”的错误.

2 无刷双馈电机原理(Principle of BDFWG)

无刷双馈电机功率绕组、控制绕组和转子绕组之间存在相互耦合, 而功率绕组与控制绕组之间没有直接耦合, 它们通过转子绕组的转换才能够间接耦合起来. 改变控制绕组注入的频率就可以调节转速, 频率转速关系可表示为

收稿日期: 2007−07−20; 收修改稿日期: 2007−10−15.
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60474048, 60534040).

$$n = 60 \times (f_p \pm f_c)/(p_p + p_c) rpm. \tag{1}$$

式(1)中: p_p, p_c分别为功率绕组和控制绕组的极对数, f_p为功率绕组频率; f_c为控制绕组频率; n为转子转速. 当$f_c > 0$时, 功率绕组和控制绕组产生的旋转磁场方向相反. 功率绕组和控制绕组在转子中产生的电流频率为

$$\begin{cases} f_{rp} = f_p - p_p n/60, \\ f_{rc} = f_c - p_c n/60. \end{cases} \tag{2}$$

BDFWG运行时, 满足

$$f_{rp} = f_{rc}. \tag{3}$$

从原理上讲, 在电机电路为线性的假设下, 可将无刷双馈电机视作两台感应电机, 一台是由功率绕组与转子绕组相互作用构成的感应电机, 其极对数为p_p, 本文将其称为功率电机; 另一台是由控制绕组与转子绕组相互作用构成的感应电机, 其极对数为p_c, 本文将其称为控制电机. 功率电机的转差率可表示为

$$S_p = (f_p - p_p n/60)/f_p = f_{rp}/f_p = \\ (\omega_s - p_p \varOmega_r)/\omega_s = (\omega_c + p_c \varOmega_r)\omega_s = f_{rc}/f_p.$$

控制电机的转差率为

$$S_c = (f_c + p_c n/60)/f_c = \\ f_{rc}/f_c = (p_c \varOmega_r + \omega_c)/\omega_c.$$

比较上面两个转差率, 有$S_c = (f_p/f_c)S_p$.

3 BDFWG的双电机模型(Two-machine model of BDFWG)

按电动机惯例, 无阻尼感应电机方程如下. 定子绕组:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} u_{ds} \\ u_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot\psi_{ds} \\ \dot\psi_{qs} \end{bmatrix} + \omega_s \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_{ds} \\ \psi_{qs} \end{bmatrix} + r_s \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix}, \\ \begin{bmatrix} \psi_{ds} \\ \psi_{qs} \end{bmatrix} = l_s \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} + l_m \begin{bmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix}. \end{cases} \tag{4}$$

转子绕组:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} u_{dr} \\ u_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot\psi_{dr} \\ \dot\psi_{qr} \end{bmatrix} + r_r \begin{bmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix}, \\ \begin{bmatrix} \psi_{dr} \\ \psi_{qr} \end{bmatrix} = l_r \begin{bmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} + l_m \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix}. \end{cases} \tag{5}$$

这里: ψ_{ds},ψ_{qs},ψ_{dr},ψ_{qr}分别表示定、转子直轴与交轴磁链; i_{ds},i_{qs},i_{dr},i_{qr}分别表示定、转子直轴与交轴电流; u_{ds},u_{qs},u_{dr},u_{qr}分别表示定、转子直轴与交轴电压; l_m为定、转子绕组的互感; l_s,r_s,l_r,r_r分别为定转子绕组的自感与电阻.

套用上面感应电机模型, 并利用坐标变换将转子方程变换成电网角频率ω_s旋转坐标下的模型, 可得功率电机模型:

$$l_p \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \begin{bmatrix} i_{dp} \\ i_{qp} \end{bmatrix} + l_{m1} \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \begin{bmatrix} i_{dr1} \\ i_{qr1} \end{bmatrix} = \\ l_p \omega_s \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dp} \\ i_{qp} \end{bmatrix} + l_{m1} \omega_s \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dr1} \\ i_{qr1} \end{bmatrix} - \\ r_p \begin{bmatrix} i_{dp} \\ i_{qp} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{dp} \\ u_{qp} \end{bmatrix}, \tag{6}$$

$$l_{r1} \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \begin{bmatrix} i_{dr1} \\ i_{qr1} \end{bmatrix} + l_{m1} \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \begin{bmatrix} i_{dp} \\ i_{qp} \end{bmatrix} = \\ l_{r1} \omega_s S_p \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dr1} \\ i_{qr1} \end{bmatrix} + \\ l_{m1} \omega_s S_p \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dp} \\ i_{qp} \end{bmatrix} - r_{r1} \begin{bmatrix} i_{dr1} \\ i_{qr1} \end{bmatrix}. \tag{7}$$

这里: i_{dp},i_{qp},i_{dr1},i_{qr1}分别表示功率电机定、转子直轴与交轴电流; u_{dp},u_{qp}分别表示定子直轴与交轴电压; 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.

类似地, 可得在ω_c旋转坐标下控制电机模型:

$$l_c \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \begin{bmatrix} i_{dc} \\ i_{qc} \end{bmatrix} + l_{m2} \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \begin{bmatrix} i_{dr2} \\ i_{qr2} \end{bmatrix} = \\ l_c(-\omega_c) \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dc} \\ i_{qc} \end{bmatrix} + \\ l_{m2}(-\omega_c) \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dr2} \\ i_{qr2} \end{bmatrix} - r_c \begin{bmatrix} i_{dc} \\ i_{qc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{dc} \\ u_{qc} \end{bmatrix}, \tag{8}$$

$$l_{r2} \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \begin{bmatrix} i_{dr2} \\ i_{qr2} \end{bmatrix} + l_{m2} \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \begin{bmatrix} i_{dc} \\ i_{qc} \end{bmatrix} = \\ -l_{r2} \omega_s S_p \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dr2} \\ i_{qr2} \end{bmatrix} - \\ l_{m2} \omega_s S_p \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dc} \\ i_{qc} \end{bmatrix} - r_{r2} \begin{bmatrix} i_{dr2} \\ i_{qr2} \end{bmatrix}. \tag{9}$$

这里: i_{dc},i_{qc},i_{dr2},i_{qr2}分别表示控制电机定、转子直轴与交轴电流; u_{dc},u_{qc}分别表示控制电机定子直轴与交轴电压; 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.

两台电机合成的转子运动方程:

$$J\frac{\mathrm{d}\Omega_r}{\mathrm{d}t}=T_t-T_e-K_d\Omega_r. \tag{10}$$

这里: J是转动惯量, k_d为阻尼系数, T_t为风力机驱动发电机的机械力矩, Ω_r是转子转速, T_e为BDFWG的电磁力矩, 表示为

$$\begin{aligned}T_e=&p_pl_{m1}(i_{dp}i_{qr1}-i_{qp}i_{dr1})-\\&p_cl_{m2}(i_{dc}i_{qr2}-i_{qc}i_{dr2}).\end{aligned}$$

4 BDFWG的三时间尺度模型((Three-time scale model of BDFWG)

无刷双馈风力发电机是典型的机电耦合系统, 机械动态相对较慢, 转子电流动态次之, 而定子电流动态最快[5]. 从上面的推导可以看出, BDFWG模型由式(6)~(9)和(10)构成, 是一个9阶机电耦合微分方程组, 电路模型为

$$\varepsilon_1\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\begin{bmatrix}i_{dp}\\i_{qp}\\i_{dc}\\i_{qc}\end{bmatrix}=$$

$$\begin{bmatrix}a_p&b_p(\Omega_r)&0&0\\-b_p(\Omega_r)&a_p&0&0\\0&0&a_c&b_c(\Omega_r)\\0&0&-b_c(\Omega_r)&a_c\end{bmatrix}\begin{bmatrix}i_{dp}\\i_{qp}\\i_{dc}\\i_{qc}\end{bmatrix}+$$

$$\begin{bmatrix}\hat{a}_p&\hat{b}_p(\Omega_r)&0&0\\-\hat{b}_p(\Omega_r)&\hat{a}_p&0&0\\0&0&\hat{a}_c&\hat{b}_c(\Omega_r)\\0&0&-\hat{b}_c(\Omega_r)&\hat{a}_c\end{bmatrix}\begin{bmatrix}i_{dr1}\\i_{qr1}\\i_{dr2}\\i_{qr2}\end{bmatrix}-$$

$$\frac{1}{r_s}\begin{bmatrix}a_p&0\\0&a_p\\0&0\\0&0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}u_{dp}\\u_{qp}\end{bmatrix}-\frac{1}{r_c}\begin{bmatrix}0&0\\0&0\\\hat{a}_p&0\\0&\hat{a}_p\end{bmatrix}\begin{bmatrix}u_{dc}\\u_{qc}\end{bmatrix},$$

$$\varepsilon_2\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\begin{bmatrix}i_{dr1}\\i_{qr1}\\i_{dr2}\\i_{qr2}\end{bmatrix}=$$

$$\begin{bmatrix}a_{r1}&b_{r1}(\Omega_r)&0&0\\-b_{r1}(\Omega_r)&a_{r1}&0&0\\0&0&a_{r2}&b_{r2}(\Omega_r)\\0&0&-b_{r2}(\Omega_r)&a_{r2}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}i_{dr1}\\i_{qr1}\\i_{dr2}\\i_{qr2}\end{bmatrix}+$$

$$\begin{bmatrix}\hat{a}_{r1}&\hat{b}_{r1}(\Omega_r)&0&0\\-\hat{b}_{r1}(\Omega_r)&\hat{a}_{r1}&0&0\\0&0&\hat{a}_{r2}&\hat{b}_{r2}(\Omega_r)\\0&0&-\hat{b}_{r2}(\Omega_r)&\hat{a}_{r2}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}i_{dp}\\i_{qp}\\i_{dc}\\i_{qc}\end{bmatrix}.$$

其中: $\varepsilon_1=\omega_s^{-1}l_p/r_p,\varepsilon_2=\omega_s^{-1}l_r/r_r$为摄动参数,

$$a_p=\frac{-l_pl_{r1}}{(l_pl_{r1}-l_{m1}^2)\omega_s},$$

$$a_c=\frac{-l_cl_{r2}}{(l_cl_{r2}-l_{m2}^2)\omega_sk_1},$$

$$\hat{a}_p=\frac{l_pl_{m1}r_{r1}}{(l_pl_{r1}-l_{m1}^2)\omega_sr_s},$$

$$\hat{a}_c=\frac{l_cl_{m2}r_{r2}}{(l_cl_{r2}-l_{m2}^2)\omega_sr_ck_1},$$

$$b_p(\Omega_r)=\frac{l_p^2l_{r1}\omega_s-l_pl_{m1}^2(\omega_s-p_p\Omega_r)}{(l_pl_{r1}-l_{m1}^2)\omega_sr_s},$$

$$b_c(\Omega_r)=\frac{-l_c^2l_{r2}\omega_c+l_cl_{m2}^2(\omega_c+p_c\Omega_r)}{(l_cl_{r2}-l_{m2}^2)\omega_sr_ck_1},$$

$$\hat{b}_p(\Omega_r)=\frac{l_pl_{r1}l_{m1}p_p\Omega_r}{(l_pl_{r1}-l_{m1}^2)\omega_sr_s},$$

$$\hat{b}_c(\Omega_r)=\frac{l_cl_{r2}l_{m2}p_c\Omega_r}{(l_cl_{r2}-l_{m2}^2)\omega_sr_ck_1},$$

$$a_{r1}=\frac{-l_pl_{r1}}{(l_pl_{r1}-l_{m1}^2)\omega_s}=a_p,$$

$$a_{r2}=\frac{-l_cl_{r2}}{(l_cl_{r2}-l_{m2}^2)\omega_sr_{r2}k_2},$$

$$\hat{a}_{r1}=\frac{l_{r1}l_{m1}r_s}{(l_pl_{r1}-l_{m1}^2)\omega_sr_r},$$

$$\hat{a}_{r2}=\frac{l_{r2}l_{m2}r_c}{(l_cl_{r2}-l_{m2}^2)\omega_sr_rk_2},$$

$$b_{r1}(\Omega_r)=\frac{-l_{m1}^2l_{r1}\omega_s+l_pl_{r1}^2(\omega_s-p_p\Omega_r)}{(l_pl_{r1}-l_{m1}^2)\omega_sr_{r1}},$$

$$b_{r2}(\Omega_r)=\frac{l_{m2}^2l_{r2}\omega_c-l_cl_r^2(\omega_c+p_c\Omega_r)}{(l_cl_{r2}-l_{m2}^2)\omega_sr_{r2}k_2},$$

$$\hat{b}_{r1}(\Omega_r)=\frac{-l_pl_{r1}l_{m1}p_p\Omega_r}{(l_pl_{r1}-l_{m1}^2)\omega_sr_{r1}},$$

$$\hat{b}_{r2}(\Omega_r)=\frac{-l_cl_{r2}l_{m2}p_c\Omega_r}{(l_cl_{r2}-l_{m2}^2)\omega_sr_{r2}k_2},$$

$$k_1=\frac{l_c}{l_p};k_2=\frac{l_{r2}r_{r2}}{l_{r1}r_{r1}}.$$

综合上面的方程, BDFWG的模型可写为

$$\varepsilon_1\frac{\mathrm{d}I_s}{\mathrm{d}t}=A(\Omega_r)I_s+B(\Omega_r)I_r+CU_s, \tag{11}$$

$$\varepsilon_2\frac{\mathrm{d}I_r}{\mathrm{d}t}=\bar{A}(\Omega_r)I_r+\bar{B}(\Omega_r)I_s, \tag{12}$$

$$J\frac{\mathrm{d}\Omega_r}{\mathrm{d}t}=T_t-T_e(I_r,I_s)-K_d\Omega_r. \tag{13}$$

这里: $I_r=[i_{dr1}\ \ i_{qr1}\ \ i_{dr2}\ \ i_{qr2}]^{\mathrm{T}}$是双馈电机的转子电流向量, $I_s=[i_{dp}\ \ i_{qp}\ \ i_{dc}\ \ i_{qc}]^{\mathrm{T}}$是双馈电机的定子电流向量, $U_s=[u_{dp}\ \ u_{qp}\ \ u_{dc}\ \ u_{qc}]^{\mathrm{T}}$是双馈电机的功率绕组和控制绕组电压向量; 矩阵$A(\Omega_r),B(\Omega_r)\in\mathbb{R}^{4\times4},\bar{A}(\Omega_r),\bar{B}(\Omega_r)\in\mathbb{R}^{4\times4},C\in\mathbb{R}^{4\times2}$. 这样

式(11)(12)和(13)就构成了无刷双馈风力发电机的三时间尺度模型.

5 结论(Conclusions)

本文利用无刷双馈电机的多时间尺度特征, 建立无刷双馈电机的奇异摄动模型. 本文的研究成果表明:

1) 将无刷双馈风力发电机视作两台感应电机的组合, 有利于建立定子电流频率旋转坐标下的模型, 使无刷双馈风力发电机组的并网分析得以简化;

2) 无刷双馈电机具有明显的多时间尺度特征. 其中机械变量可视作变化最慢的动态, 转子绕组电流次之, 定子绕组(含功率绕组和控制绕组)电流变化最快, 因此无刷双馈风力发电机模型可视作三时间尺度模型;

3) 本文建立的三时间尺度模型, 为无刷双馈电机的降阶奠定了基础.

参考文献(References):

[1] WANG F, ZHANG F, XU L. Parameter and performance comparison of doubly fed brushless machine with cage and reluctance rotor[J]. *IEEE Trans on Industry Application*, 2002, 38(5): 1237 – 1243.

[2] RUQI L, WALLAN A, SPEE R. Dynamic simula- tion of brushless doubly fed machines[J]. *IEEE Trans on Energy Conversion*, 1991, 6(3): 445 – 451.

[3] XU L, LING F, LIPO T A. Transient model of a doubly excited reluctance motor[J]. *IEEE Trans on Energy Conversion*, 1991, 6(1): 126 – 133.

[4] BOGER M S. General pole number model of the brushless doubly fed machine[J]. *IEEE Trans on Industry Application*, 1995, 3(5): 1022 – 1027.

[5] 刘永强, 严正, 倪以信, 等. 双时间尺度电力系统动态模型降阶研究(一)—电力系统奇异摄动模型[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(18): 1 – 5.
(LIU Yongqiang, YAN Zheng, NI Yixin, et al. Study on the order reduction of two-time scale sower system dynamical models: part one power system singular perturbation model[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2002, 26(18): 1 – 5.)

[6] 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.

(上接第134页)

5 结论(Conclusion)

本文主要研究了基于双PWM变频器的外转子永磁发电机直驱变速恒频风力发电控制技术. 建立了外转子永磁电机的数学模型, 并提出了变流器的控制策略, 从而使发电机能向电网稳定输送功率, 其电能频率与电网电能频率能保持一致, 相信永磁风力发电系统将在未来大中型风力发电系统中将具备更高效的实用价值和广阔的应用前景.

参考文献(References):

[1] 王承熙, 张源．风力发电[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
(WANG Chenxu, ZHANG Yuan. *Wind Power*[M]. Beijing: Electric Power Publishing Press, 2003.)

[2] 唐任远．现代永磁电机理论与设计[M]．北京: 机械工业出版社, 2002.
(TANG Yinyuan. *Modern Magneto Electric Machine Theory and Design*[M]. Beijing: Mechanical Industry Publishing Press, 2002.)

[3] MUKUND R P. *Wind and Solar Power System*[M]. Boca, Raton: CRC Press, 1999.