

双馈发电机简化动态模型及在风电系统中应用

李 晶¹, 王伟胜², 宋家骅³

(1. 华北电力大学 电气工程系, 河北 保定 071003; 2. 中国电力科学研究院, 北京 100085; 3. 东北电力学院 电气工程系, 吉林 吉林 132012)

摘要: 从电机基本原理出发, 在定子旋转磁场坐标下, 建立了由转子励磁电压双轴分量及发电机输入的机械转矩为控制变量的双馈发电机简化 3 阶动态模型。该模型简洁、明确、能较准确地描述发电机动态特性, 易于数字仿真的实现。同时, 根据所建模型及 Matlab 软件, 详细比较了双馈发电机精确模型和简化模型在发电机运行状态发生改变后的各个物理量的响应特性。比较结果充分说明了该简化模型有良好的精确度, 能很好的代替精确模型应用在转速变化范围较大, 发电机功率因数较高的双馈发电机的建模和相关研究中, 例如风力发电中变速恒频风电机组建模及并网运行的研究。

关键词: 双馈发电机; 简化动态模型; Matlab

中图分类号: TM 303.3

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2005)01-0058-05

0 引言

双馈发电机又称交流励磁发电机, 其结构与绕线式异步电动机相同。双馈发电机可吸收和发出无功功率, 为系统无功功率和电压调节提供有效手段; 能变速运行, 提高能量转化效率; 而且在转速变化时, 输出电压和频率可维持不变。因此, 双馈发电机在船用轴带发电、风能发电、潮汐发电和余热发电有很好的技术优势^[1,2]。

关于双馈电机动态数学模型方面, 主要包括 3 种类型即 a, b, c 坐标系下的模型; $d, q, 0$ 坐标系下的模型; 涉及 2 种坐标系统的混合模型。目前, 国内学者研究分析双馈电机所采用的动态模型一般为 $d, q, 0$ 坐标系统下的基本磁链方程和电压方程^[3-6]。无论采用那种坐标系统, 以基本磁链方程和电压方程作为双馈电机动态模型, 分析其转速在一定范围内变化的电机动态特性, 无疑数学模型都过于复杂, 不利于仿真系统的实现, 同时, 随着双馈电机应用领域的不断扩展, 包含双馈电机的大型相关系统的研究迫切需要能正确反映双馈电机动态特性且比较简单明了的动态数学模型。这方面, 国外学者已取得了一些成果。

文献[7]从电机运行机理出发, 根据磁链、电势、电流关系和派克变换推导了“ $d, q, 0$ ”坐标系统的双馈电机 3 阶机电暂态模型。该模型是建立在 d 轴超前 q 轴 90° 的坐标系统中, 并以电机暂态电势为状

态变量的动态方程。文献[8]根据异步化电机标幺值下的经典电机方程, 考虑了转子部分阻尼绕组的作用, 建立了以转子绕组励磁电流和转子阻尼绕组电流为状态变量的 5 阶双馈电机次暂态数学模型。

本文以研究并网型变速恒频双馈风力发电机组及其接入电网的运行特性为目标, 推导了形式简单、能正确反映双馈发电机运行特性、且易于整个系统仿真实现的简化动态数学模型。该模型是根据建立在定子磁场旋转坐标系统中($d_c, q_c, 0$ 坐标系)标幺值形式的典型电机磁链和电压方程^[9], 在忽略了电机定子磁链暂态过程的前提下, 得到的采用转子励磁电压和发电机输入机械转矩为控制变量的 3 阶动态模型。同时, 作者以转子励磁电压双轴分量及输入的机械转矩发生变化为例, 详细比较了双馈发电机精确模型和简化模型中电机各个物理量的响应特性。响应结果充分说明了简化模型具有良好的精确度, 能很好地代替精确模型应用在转子转速变化范围较大, 发电机功率因数较高的双馈发电机的建模和研究中。而且, 本文又以某一变速恒频双馈风电机组为例, 对风速发生阶跃变化时的机组运行特性进行了仿真, 仿真结果也说明了双馈发电机简化动态模型的有效性。

1 双馈发电机简化动态数学模型

1.1 基本电压方程和磁链方程

假设发电机为三相对称的理想电机, 按照电动机正方向的规定, 不计零轴分量, 以定子旋转磁场坐标系统($[d_c, q_c, 0]$)为参考, 建立双馈发电机电压、磁链标幺值形式的方程如下^[10]:

$$\begin{bmatrix} U_{dcs} \\ U_{qcs} \\ U_{der} \\ U_{qcr} \end{bmatrix} = p \begin{bmatrix} \psi_{dcs} \\ \psi_{qcs} \\ \psi_{der} \\ \psi_{qcr} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -r_s & x_{ss} & 0 & X_m \\ -x_{ss} & -r_s & -X_m & 0 \\ 0 & sX_m & -R_r & sX_{rr} \\ -sX_m & 0 & -sX_{rr} & -R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{dcs} \\ I_{qcs} \\ I_{der} \\ I_{qcr} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \psi_{dcs} \\ \psi_{qcs} \\ \psi_{der} \\ \psi_{qcr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{ss} & 0 & X_m & 0 \\ 0 & x_{ss} & 0 & X_m \\ X_m & 0 & X_{rr} & 0 \\ 0 & X_m & 0 & X_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{dcs} \\ I_{qcs} \\ I_{der} \\ I_{qcr} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中 $U_{dcs}, U_{qcs}, U_{der}, U_{qcr}$ 为定子绕组和转子绕组电压的 d, q, c 轴分量; $I_{dcs}, I_{qcs}, I_{der}, I_{qcr}$ 为定子绕组和转子绕组电流的 d, q, c 轴分量; $\psi_{dcs}, \psi_{qcs}, \psi_{der}, \psi_{qcr}$ 为定子合成磁链和转子合成磁链的 d, q, c 轴分量; r_s 为定子绕组电阻; R_r 为转子绕组电阻; X_m 为激磁电抗; x_{ss} 为定子漏抗; X_r 为转子漏抗折合到定子侧的折合值; $x_{ss} = x_s + X_m, X_{rr} = X_r + X_m$; s 为转差率; p 为微分算子。

1.2 双馈发电机简化动态模型的建立

当电机转子转速在较大范围内变化时,转子磁链增量对发电机动态过程的影响远大于定子磁链增量带来的影响^[11],因此在研究双馈发电机动态过程中可以不考虑定子磁链暂态过程,即令 $p\psi_{dcs} = p\psi_{qcs} = 0$,则由式(1)得:

$$\begin{bmatrix} U_{der} \\ U_{qcr} \end{bmatrix} = p \begin{bmatrix} \psi_{der} \\ \psi_{qcr} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} sX_m I_{qcs} - R_r I_{der} + sX_{rr} I_{qcr} \\ -sX_m I_{dcs} - sX_{rr} I_{der} - R_r I_{qcr} \end{bmatrix} \quad (3)$$

由式(2)得:

$$I_{der} = \frac{\psi_{der} - X_m I_{dcs}}{X_{rr}}, \quad I_{qcr} = \frac{\psi_{qcr} - X_m I_{qcs}}{X_{rr}} \quad (4)$$

将式(4)代入式(3)消去转子励磁电流并整理得到由定子电流和转子磁链表示的转子励磁绕组电压方程为

$$\begin{bmatrix} U_{der} \\ U_{qcr} \end{bmatrix} = p \begin{bmatrix} \psi_{der} \\ \psi_{qcr} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -R_r/X_{rr} & s \\ -s & -R_r/X_{rr} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \psi_{der} \\ \psi_{qcr} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_r X_m/X_{rr} & 0 \\ 0 & R_r X_m/X_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{dcs} \\ I_{qcs} \end{bmatrix} \quad (5)$$

同时,将式(4)代入式(1)中定子部分表达式,并整理得到由定子电流和转子磁链表示的定子电压方程为

$$\begin{bmatrix} U_{dcs} \\ U_{qcs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -X_m/X_{rr} \\ X_m/X_{rr} & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \psi_{der} \\ \psi_{qcr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r_s & -X' \\ X' & r_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{dcs} \\ I_{qcs} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中 $X' = x_{ss} - X_m^2/X_{rr}$

$$\text{令 } \begin{bmatrix} E'_d \\ E'_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -X_m/X_{rr} \\ X_m/X_{rr} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_{der} \\ \psi_{qcr} \end{bmatrix}, \text{并代入式(5)整理得到:}$$

$$\begin{bmatrix} U_{der} \\ U_{qcr} \end{bmatrix} = p \begin{bmatrix} 0 & X_{rr} \\ -X_{rr} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E'_d \\ E'_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{sX_{rr}}{X_m} & \frac{R_r}{X_m} \\ -\frac{R_r}{X_m} & \frac{sX_{rr}}{X_m} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} E'_d \\ E'_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{R_r X_m}{X_{rr}} & 0 \\ 0 & \frac{R_r X_m}{X_{rr}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{dcs} \\ I_{qcs} \end{bmatrix} \quad (7)$$

令 $\begin{bmatrix} U'_{dr} \\ U'_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -X_m/X_{rr} \\ X_m/X_{rr} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{der} \\ U_{qcr} \end{bmatrix}$, 并定义转子绕组短路时间常数 $\tau'_0 = X_{rr}/R_r$, 重新代入式(7)整理得到:

$$p \begin{bmatrix} E'_d \\ E'_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U'_{dr} \\ U'_{qr} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1/\tau'_0 & -s \\ s & 1/\tau'_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E'_d \\ E'_q \end{bmatrix} + \frac{1}{\tau'_0} \begin{bmatrix} 0 & X' - X_{ss} \\ X_{ss} - X' & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{dcs} \\ I_{qcs} \end{bmatrix} \quad (8)$$

令 $U_s = U_{dcs} + jU_{qcs}, E' = E'_d + jE'_q, I_s = I_{dcs} + jI_{qcs}, U_r = U_{der} + jU_{qcr}, U'_r = U'_{dr} + jU'_{qr}, I_r = I_{der} + jI_{qcr}$, 并定义 E' 为双馈发电机暂态电势, X' 为发电机暂态电抗, 则式(6)(8)可改写为相量形式的状态方程:

$$\frac{dE'}{dt} = U'_r - \frac{1}{\tau'_0} [E' - j(x_{ss} - X')I_s] - jsE' \quad (9)$$

$$U_s = E' + (r_s + jX')I_s$$

方程(9)即是由发电机状态量 E' 、定子部分的电气量 I_s 、转子部分控制变量 U'_r (或 U_r) 和电机参数表示的相量形式的双馈发电机简化动态数学模型。

1.3 转子运动方程

双馈发电机转子运动方程如下所示:

$$\frac{ds}{dt} = -\frac{1}{\tau_j} [T_m - T_e - D(1-s)] \quad (10)$$

式中 T_m 为发电机输入的机械转矩(p.u.), 由机械部分参数确定; T_e 为发电机电磁转矩(p.u.), 由式(11)计算得到; τ_j 为转子惯性时间常数(p.u.); D 为阻尼系数; s 为转差率。

$$P_e = \text{Re} \{ U_s I_s^* \} \\ T_e = -P_e / \omega_e \quad (11)$$

式中 ω_e 为定子磁场旋转角速度(p.u.), 一般为同步转速, 标么值为 1; P_e 为发电机电磁功率(p.u.)。

以上建立的双馈发电机电气部分和机械部分的动态模型均采用标么值。转子绕组控制电压 U'_r (或转子绕组电压 U_r) 的数值由发电机转子励磁控制部分确定。

2 简化动态模型与精确模型比较分析

本部分将基于 Matlab 软件, 以某变速恒频风力发电机组中双馈发电机运行状态的改变为例, 对考虑定子磁链暂态过程的双馈发电机精确模型即式(1)(2), 和不计定子磁链暂态过程的简化模型即式(9)作对比仿真及分析。

双馈发电机的电机参数为 $R_r=0.007\ 3\ \text{p.u.}$, $r_s=0.007\ 6\ \text{p.u.}$, $x_s=0.124\ 8\ \text{p.u.}$, $x_r=0.088\ 4\ \text{p.u.}$, $X_m=1.836\ 5\ \text{p.u.}$, $\tau_j=7.10\ \text{p.u.}$ 。假定发电机机端电压 $U_s=0+j1$ 保持不变,发电机初始运行点为 $s=0.08$, $P_s=-0.368\ 7\ \text{p.u.}$, $Q_s=0.074\ 9\ \text{p.u.}$, $U_{\text{dcr}}=-0.003\ 1\ \text{p.u.}$, $U_{\text{qcr}}=0.085\ 6\ \text{p.u.}$, $T_m=0.368\ 7\ \text{p.u.}$ 。假设双馈发电机运行状态在第 10 s 发生变化,其输入的机械转矩、转子绕组励磁电压双轴分量的改变如图 1 所示,则发电机电气量的动态响应特性见图 2。图 2 中虚线代表精确模型,实线代表简化模型,响应的最终稳态值见表 1。

由图 2 可知:双馈发电机简化模型在描述发电机定子有功、无功、电磁转矩和转差率这些物理量的动态特性上,其动态过程与发电机精确模型相比,误差微小。这是因为:当双馈发电机转子转速变化范围较大时,定子暂态过程对双馈发电机动态过程的影响远远小于转子暂态过程对其带来的影响。

由表 1 可知:在初始运行条件相同,控制变量的控制条件和模式也相同的条件下,对于定子侧无功功率,简化模型和精确模型的最终稳态值误差比较大,而其他响应量的稳态误差很小或几乎没有。这是因为:转差率稳态值的微小误差影响了电压电流方程里的系数矩阵,使得两种模型在相同的控制条件下的定子电流直轴分量稳态值 I_{dcs} 差别较大,从而影响了定子侧无功功率的稳态值。虽然,精确模型和简化模型在对无功功率稳态值的影响比较大,

但是对于实际应用在风力发电机组中的双馈发电机而言,一般无功流量都较小,发电机的功率因数都很高(一般保持在 0.98 或以上)。故简化模型对无功功率的影响可以不予考虑。

综合以上分析可知:本文提出的双馈发电机简化模型具有良好的精确程度,可以代替双馈发电机精确模型应用转子转速变化范围较大,发电机功率因数较高的双馈发电机的建模和相关研究中,例如变速恒频风力发电系统的研究。

3 简化模型在风电系统中的应用

以某一变速恒频双馈风电机组为例,其双馈发电机参数与本文第 3 部分电机参数相同。风力机功率特性及其传动部分数学模型如下:

$$P_r=C_pA\frac{\rho v^3\times 10^3}{2P_N}\tag{12}$$

式中 P_r 为风力机机械功率(p.u.); C_p 为风能转换效率系数,它是桨距角 β 和叶尖速率比 λ ($\lambda=R\omega/v$) 的函数; R 为叶片半径(m),本处为 35m; ω 为风力机叶片转速(rad/s); A 为叶片扫掠面积(m^2)本处为 3 959 m^2 ; ρ 为空气密度(kg/m^3),本处为 1 kg/m^3 ; v 为风速(m/s); P_N 为功率基值(kW),本处为 1 500 kW。

而从轮毂到发电机转子之间的机械传动部分,可以近似用一阶惯性环节描述,如式(13)所示:

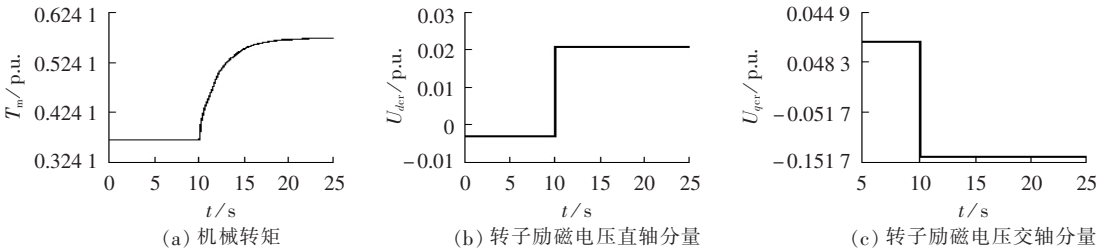


图 1 双馈发电机控制变量的变化

Fig.1 Change of control variables of doubly-fed generator

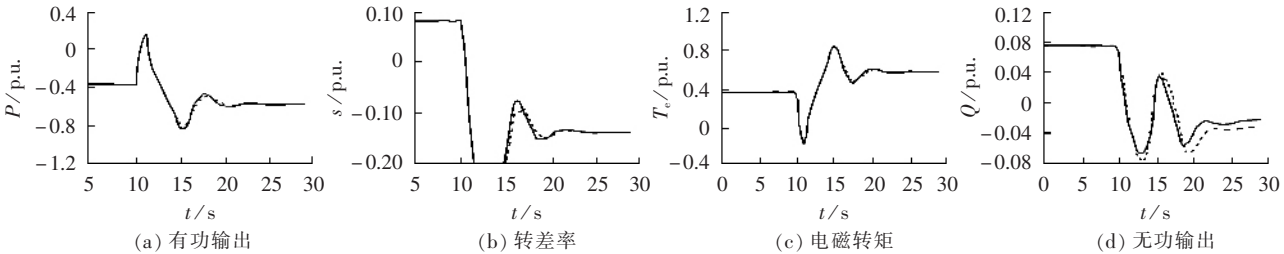


图 2 双馈发电机电气量的响应

Fig.2 Response on electrical variables of doubly-fed generator

表 1 双馈发电机控制变量及响应变量稳态值对比表

Tab.1 The steady state values of control variables and response variables of doubly-fed generator

模型	控制变量变化后的稳定值			响应变量最终稳态值			
	T_m	U_{dcr}	U_{qcr}	P_s	Q_s	s	T_e
精确模型	0.573 5	0.021 1	-0.140 3	-0.573 5	-0.026 7	-0.137 35	0.573 5
简化模型				-0.573 5	-0.021 4	-0.137 50	0.573 5

$$\frac{dT_m}{dt} = \frac{1}{\tau_d} (T_M - T_m) \quad (13)$$

式中 τ_d 为机械传动部分的时间常数(s),本处取 1 s;
 T_m 为发电机转子轴上的机械转矩(p.u.); T_M 为
 风力机末端轴上的机械转矩(p.u.) ($T_M = P_T / \omega$)。

令 d_c 轴与定子磁链方向保持一致,风电机组并
 网母线端电压 $U_s = 0 + j1$ 保持不变,定子侧有功功率、

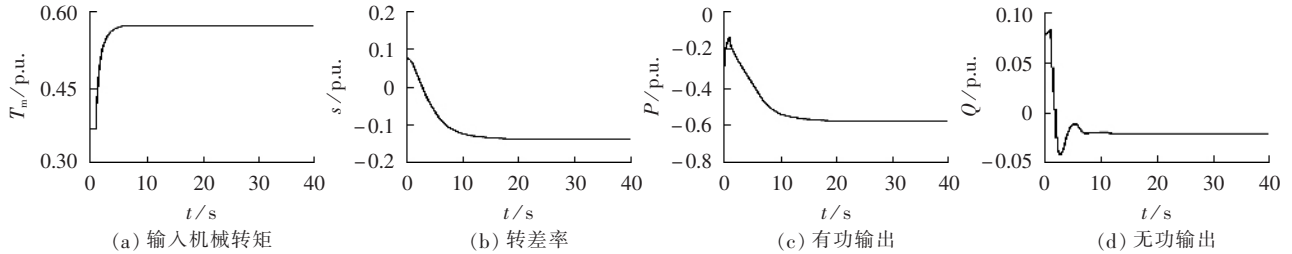


图 3 风电机组在风速发生阶跃变化时的动态响应图

Fig.3 Dynamic response of variable speed wind turbine to wind speed step change

4 结论

本文通过对双馈发电机机理的分析,建立了定子旋转坐标系下的双馈发电机简化动态数学模型,该模型是以转子励磁电压双轴分量和发电机机械转矩为控制变量,以发电机暂态电势双轴分量和电磁转矩为状态变量的 3 阶机电暂态模型。同时,作者应用 Matlab 软件,详细模拟比较了双馈发电机精确模型和简化模型在转子励磁电压和机械转矩发生变化时各个物理量的响应特性,并分析了稳态误差,从而说明了本文提出的双馈发电机简化动态模型具有很高的精确度,可以代替精确模型应用在转子转速变化范围较大,发电机功率因数较高的双馈发电机的建模和相关研究中。例如,以双馈发电机作为发电机形式的大型变速恒频风力发电机组及其并网后运行特性的分析和研究中。

参考文献:

- [1] 廖 勇,杨顺昌. 交流励磁发电机运行及控制原理[J]. 电工技术学报,1997,12(10):21-25.
LIAO Yong, YANG Shun-chang. Principles of operation and control for alternating current excitation generators [J]. *Journal of Electrician Technique*, 1997, 12(10): 21-25.
- [2] 黄守道,胡必武,欧阳红林,等. 双馈电机的工业应用展望[J]. 湖南大学学报(自然科学版),1999,26(4):67-70.
HUANG Shou-dao, HU Bi-wu, OUYANG Hong-lin, et al. Prospects of industrial application of doubly-fed machine [J]. *Journal of Hunan University (Sci. & Tech.)*, 1999, 26(4):67-70.
- [3] 杨顺昌,廖 勇. 交流励磁发电机参数变化时的解耦励磁控制[J]. 中国电机工程学报,1999,19(2):37-46.
YANG Shun-chang, LIAO Yong. Decoupled excitation control for AC excitation generators with parameter variation [J]. *Proceedings of the CSEE*, 1999, 19(2):37-46.

无功功率与转子励磁电压双轴分量的解耦控制仍采用功率外环,电流内环的 PI 控制方式^[10],当假设风速在 0 时刻从 8 m/s 发生阶跃变化至 10 m/s 时,风电机组中机械量及电气量的响应见图 3。由图 3 可知,该简化模型能有效的,准确的反映风电机组的运行特性。同时也大大简化了风电机组的建模问题,从而为风电系统并网运行的研究带来很大的方便。

- [4] 廖 勇,杨顺昌. 交流励磁发电机励磁控制[J]. 中国电机工程学报,1998,18(2):87-90.
LIAO Yong, YANG Shun-chang. Excitation control of alternating current excitation generators [J]. *Proceedings of the CSEE*, 1998, 18(2):87-90.
- [5] 廖 勇,杨顺昌. 双馈发电机考虑主磁路饱和数学模型[J]. 电工技术学报,1996,11(4):1-5.
LIAO Yong, YANG Shun-chang. A saturation model of doubly-fed generator [J]. *Journal of Electrician Technique*, 1996, 11(4):1-5.
- [6] 肖 刚,杨顺昌,廖 勇,等. 矩阵式变换器励磁的双馈发电机系统建模与仿真 [J]. 重庆大学学报(自然科学版),2003,26(3):89-94.
XIAO Gang, YANG Shun-chang, LIAO Yong, et al. Modeling and simulation of the doubly-fed generator with the matrix AC-AC converter as an exciter [J]. *Journal of Chongqing University*, 2003, 26(3):89-94.
- [7] FEIJOO A JOSEA C, CAMILOA C. A third order model for the doubly-fed induction machine [J]. *Electric Power Systems Research*, 2000, 56(2):121-127.
- [8] EKANAYAKE J B, HOLDSWORTH L, WU Xue-guang. Dynamic modeling of doubly fed induction generator wind turbines [J]. *IEEE Trans. on Power Systems*, 2003, 18(2):803-809.
- [9] MITSUTOSHI, YAMAMOTO, Motoyoshi O. Active and reactive power control for doubly-Fed wound rotor induction generator [J]. *IEEE Trans. Power Electronics*, 1991, 16(4):624-629.
- [10] 高景德,王祥珩,李发海. 交流电机及其系统的分析[M]. 北京:清华大学出版社,1993.
GAO Jing-de, WANG Xiang-heng, LI Fa-hai. Analysis of alternating current machine and its system [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1993.

(责任编辑:柏英武)

作者简介:

李 晶(1977-),女,内蒙古通辽人,博士研究生,目前从

事变速恒频风电机组特性分析与控制领域的研究工作(E-mail:lijing770314@sohu.com);
王伟胜(1968-),男,山西长治人,高级工程师,博士,主

要从事电力系统分析和新能源发电领域的教学与科研工作;
宋家骅(1939-),男,安徽怀远人,教授,博士研究生导师,长期从事电力系统稳定分析与控制领域的教学与科研工作。

Simplified dynamic model of doubly-fed induction generator and its application in wind power

LI Jing¹, WANG Wei-sheng², SONG Jia-hua³

(1. North China University of Electric Power, Baoding 071003, China;

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100085, China;

3. Northeast Institute of Electric Power Engineering, Jilin 132012, China)

Abstract: Based on the theory of induction machine, a simplified three-order dynamic model for doubly-fed generator is presented, which adopts the reference frame of stator's circumrotatory magnetic field with the rotor voltage and mechanical torque as control variables. The simplified model describes dynamic characteristics correctly and is easily implemented by computer. Based on Matlab software, response characteristics of electrical variables when changes have been taken place on generator's running state are simulated and compared between simplified model and exact model. Results show that the simplified model has better definition and can substitute for the exact model in research of doubly-fed generator with high power factor and large range in rotor speed, such as modeling of variable-speed wind turbines and research of operating characteristics in network.

This project is supported by the National High Technology Research and Development of China (863 Program)(2001AA512021-5).

Key words: doubly-fed generator; dynamic model; Matlab