

文章编号: 1005—0523(2004)04—0056—04

双馈异步发电机应用于风力发电中的仿真研究

章勇高^{1,2}, 龚锦红¹, 李 健³

(1. 华东交通大学 电气工程学院, 南昌 330013; 2. 华中科技大学 武汉 430074; 3. 9168 信箱, 福州 351251)

摘要:介绍了双馈异步发电机的数学模型和基于变速恒频矢量控制的风力发电系统动态仿真模型的建立, 对风电系统进行了特性分析和动态响应过程的仿真研究, 仿真表明这种基于变速恒频矢量控制风力发电系统对于电网电压和转速扰动的适应能力很强, 研究结果为风力发电系统的进一步应用研究提供了可靠的理论依据。

关 键 词:双馈异步发电机; 风力发电; 变速恒频; 仿真

中图分类号: TM343

文献标识码: A

1 引 言

科学技术的飞速发展, 引发了能源短缺及环境污染等诸多问题, 使得世界各国开始重视开发和利用可再生且无污染的风能资源。目前, 风力发电在美国、德国、丹麦等许多国家得到了迅猛发展; 我国风能资源比较丰富, 特别是西部开发战略的实施, 使得风力发电在我国发展速度很快^[1]。传统的风力发电常采用同步机, 而同步发电机必须以恒速运行作为基本约束, 任何形式的速度波动都会影响到发电机的安全运行, 甚至波及到电力系统的稳定性。因此研究适应风场变速的风力发电系统特性和动态运行过程具有重要的现实意义。

80 年代以来, 绝大多数风力发电机组采用异步发电机, 这主要是因为异步发电机对并网没有严格的频率和相位要求, 且异步发电机制造容易, 启动方便, 易于自动控制, 但不具备经济实用条件。国外

的风力发电常采用柔性可控的双馈式发电机, 实践证明它具有高品质的柔性电力系统的特点^[2~4]。

本文以双馈异步电机矢量控制变速恒频发电系统为基础, 建立双馈异步发电机数学模型, 进行发电系统的动态仿真, 其结果为风力场发电系统的设计和运行提供了可靠的理论依据, 对于双馈式发电机的国产化具有重要的参考价值。

2 双馈异步发电机矢量控制分析

由于双馈异步发电机是一个高阶非线性强耦合的多变量系统, 将矢量控制技术应用于双馈异步发电机, 可以实现原动机和发电机的充分解耦, 使原动机转速不受发电机输出频率的限制, 同时, 发电机输出电压的频率、幅值、相位也不受转子转速和瞬时位置的影响。在同步参照系内, 假定定子侧方向服从发电机惯例, 而转子侧服从电动机惯例, 电机气隙均匀, 定、转子三相对称, Y 连接。其等效原理如图 1 所示。

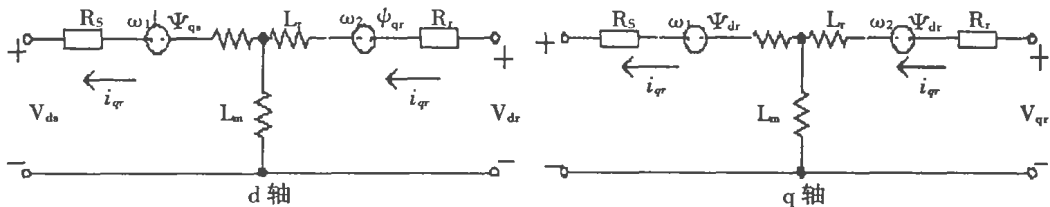


图 1 电机在 d/q 坐标系下的等效原理图

收稿日期: 2004—03—18

作者简介: 章勇高(1975—), 男, 江西人, 华东交通大学讲师, 华中科技大学博士生。

电机的磁链方程和电压方程为:

$$\begin{cases} \Psi_{ds} = -(L_s + L_m) i_{ds} + L_m i_{dr} \\ \Psi_{qs} = -(L_s + L_m) i_{qs} + L_m i_{qr} \\ \Psi_{dr} = -L_m i_{ds} + (L_r + L_m) i_{dr} \\ \Psi_{qr} = -L_m i_{qs} + (L_r + L_m) i_{qr} \\ V_{ds} = P \Psi_{ds} - \omega_1 \Psi_{qs} - R_s i_{ds} \\ V_{qs} = P \Psi_{qs} - \omega_1 \Psi_{ds} - R_s i_{qs} \\ V_{dr} = P \Psi_{dr} - \omega_2 \Psi_{qr} + R_r i_{dr} \\ V_{qr} = P \Psi_{qr} + \omega_2 \Psi_{dr} + R_r i_{qr} \\ \omega_2 = \omega_1 - \omega_r = s \omega_1 \end{cases} \quad (1)$$
$$\omega_2 = \omega_1 - \omega_r = s \omega_1 \quad (2)$$

式中下标 s, r 分别代表定子和转子, L_s, L_r, L_m 分别为定、转子自感和定转子间互感, $\omega_1, \omega_r, \omega_2$ 分别为电机同步角速度、转子角速度和转差角速度.

电机的电磁转矩和转子运动方程为:

$$T_e = 1.5 p L_m (i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr})$$
$$P \omega_2 = p (T_e - T_m) / J$$

$$(3)$$

式中 T_m 为原动机驱动转矩, P 为微分算子, p 为电机的极对数.

按定子磁链定向, 当忽略定子电阻时, 定子电压正好位于 q 轴上, 其矢量控制约束条件为

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = U_s \end{cases} \quad (4)$$

U_s 为定子电压幅值.

$$P_1 = 1.5 U_s I_s \cos \varphi$$

$$(5)$$

$$i_{ds}^* = I_s \sin \varphi$$

$$(6)$$

$$i_{qs}^* = I_s \cos \varphi$$

$$(7)$$

由式(1)和式(7)可得到转子电流和电压的表达式为:

$$\begin{cases} i_{dr}^* = (U_s + \omega_1 L_s I_s \sin \varphi + r_s I_s \cos \varphi) / (\omega_1 L_m) \\ i_{qr}^* = (\omega_1 L_s I_s \cos \varphi - r_s I_s \sin \varphi) / (\omega_1 L_m) \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} V_{dr}^* = r_r i_{dr} + \omega_2 (L_m i_{qs} - L_r i_{qr}) \\ V_{qr}^* = r_r i_{qr} + \omega_2 (L_r i_{dr} - L_m i_{ds}) \end{cases} \quad (9)$$

由式(8)(9)可知, 当电网电压和频率一定时, 转子电流只是定子功率因数和输出功率的函数, 因此, 控制转子电流或电压就可以有效地控制定子电流和定子电压的幅值和相位, 并调节电机的输出功率和功率因数, 实现了定、转子之间的机电解耦^[5-7].

3 矢量控制结构

控制系统中, 电网电压幅值和频率是固定的,

给定量为定子输出功率 P_1 和功率因数角 φ , 通过式子(5)~(7)得到定子指令电流 i_{ds}^*, i_{qs}^* ; 由式(8)可得转子指令电流 i_{dr}^*, i_{qr}^* ; 然后由式(9)得到转子指令励磁电压 V_{dr}^*, V_{qr}^* , 令:

$$\Delta x = x^* - x (x = i_{ds}, i_{qs}, i_{dr}, i_{qr}, \omega_2)$$

$$(10)$$

由式(9)可得转子电压的动态控制方程, 则

$$\begin{cases} V_{dr} = V_{dr}^* + r_r \Delta i_{dr} + \omega_2^* (L_m \Delta i_{qs} - L_r \Delta i_{qr}) \\ \quad + (L_m i_{qs}^* + L_r i_{qr}^*) \Delta \omega_2 \\ V_{qr} = V_{qr}^* + r_r \Delta i_{qr} + \omega_2 (L_r \Delta i_{dr} - L_m \Delta i_{ds}) \\ \quad + (L_r i_{dr}^* - L_m i_{ds}^*) \Delta \omega_2 \end{cases}$$

$$(11)$$

再将 V_{dr}, V_{qr} 转换成三相转子励磁电压作为变频器的给定输入. 控制系统结构如图 2 所示.

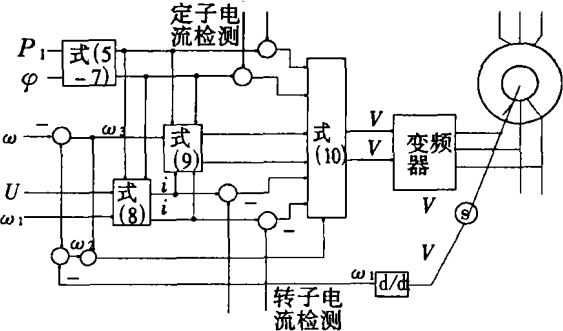


图 2 控制系统结构图

4 仿真模型的建立

由上述分析可知, 双馈异步变速恒频发电机的状态方程为

$$\dot{X} = AX + BU$$

$$(12)$$

式中 $X = (i_{ds}, i_{qs}, i_{dr}, i_{qr}, \omega_2)^T$

$$U = (V_{ds}, V_{qs}, V_{dr}, -T_m)^T$$

$$= (0, U_s, V_{dr}, V_{qr}, -T_m)^T$$

$$A = \frac{1}{M} \begin{bmatrix} r_s L_r & -a_{21} & r_r L_m & a_{41} & 0 \\ a_{12} & r_s L_r & -a_{32} & r_r L_m & 0 \\ r_s L_m & -a_{32} & r_r L_s & a_{43} & 0 \\ a_{14} & r_s L_m & -a_{34} & r_r L_s & 0 \\ a_{15} i_{qr} & -a_{25} i_{dr} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$
$$B = \frac{1}{M} \begin{bmatrix} -L_r & 0 & L_m & 0 & 0 \\ 0 & -L_r & 0 & L_m & 0 \\ -L_m & 0 & L_s & 0 & 0 \\ 0 & -L_m & 0 & L_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & b \end{bmatrix}$$

其中:

$$\begin{cases} M = L_s L_r - L_m^2 \\ a_{12} = a_{21} = \omega_1 L_s L_r - \omega_2 L_m^2 \\ a_{14} = a_{23} = L_s L_m (\omega_1 - \omega_2) \\ a_{15} = a_{25} = 1.5 p^2 L_m M / J \\ a_{32} = a_{41} = L_r L_m (\omega_1 - \omega_2) \\ a_{34} = a_{43} = \omega_1 L_m^2 - \omega_2 L_s L_r \\ b = pM / J \end{cases}$$

变速恒频发电运行的基本原理是:转子绕组由频率、幅值和相位可调的电源提供三相低频交流励磁电流,保证定子输出电压的频率、幅值和相位与电网严格一致,并有效地控制电机的输出功率和功率因数.在电机输出有功功率和功率因数可变的情况下,以电机转速为控制对象调节转子电压的幅值和相位,使电机转速等于给定值.

因此,发电运行时电机的控制矢量为 $(\omega_r, U_s, \omega_1, P_1, \cos\varphi)$,控制指令值为

$$\begin{cases} I_s = P_1 / (1.5 U_s \cos\varphi) \\ i_{ds} = I_s \sin\varphi \\ i_{qs} = I_s \cos\varphi \\ i_{dr} = (U_s + \omega_1 L_s I_s \sin\varphi + r_s I_s \cos\varphi) / (\omega_1 L_m) \\ i_{qr} = (\omega_1 L_s I_s \cos\varphi - r_s I_s \sin\varphi) / (\omega_1 L_m) \\ \omega_2 = \omega_1 - \omega_r \\ V_{dr} = r_r i_{dr} + \omega_2 (L_m i_{qs} - L_r i_{qr}) \\ V_{qr} = r_r i_{qr} + \omega_2 (L_r i_{dr} - L_m i_{ds}) \\ T_m = 1.5 p L_m (i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr}) \end{cases}$$

利用 MATLAB 建立异步发电机的模型^[8],限于篇幅,本文直接给出其仿真模型,如图 3 所示.第一步建立 abM 的子系统,其模型如图 3(a)所示.

第二步,建立 BU 子系统,其模型如图 3(b)所示.

第三步,建立 AX 子系统,其模型如图 3(c)所示.

示.

第四步,建立式(12)的子系统 DX ,子系统 DX 由 abM 、 BU 和 AX 三个子系统构成,其模型如图 3(d)所示.

第五步,建立发电系统的仿真子系统 WG ,其模型如图 3(e)所示.根据转速的变化和定子电压的变化,得到的输出变量就是发电运行时电机的控制矢量.

5 仿真结果分析

本文针对额定容量 $P_1 = 1\ 500\ \text{W}$ 、额定电压 $U_s = 220\ \text{V}$ 、转动惯量 $J = 0.025\ \text{kg} \cdot \text{m}^2$ 的三相异步发电机进行仿真,图 1 所示发电机的具体参数是: $R_s = 1.74\ \Omega$, $jX_s = j0.25\ \Omega$, $R_r = 1.3$, $jX_r = j1.8\ \Omega$, $R_m = 5.81\ \Omega$, $jX_m = j27\ \Omega$, 频率 $f = 50\ \text{Hz}$, 极对数 $p = 3$, 本仿真主要研究系统对定子电压和转速变化的动态响应过程,以适应风场风速变化和电网电压波动的不稳定情况.仿真结果如图 4、5 所示.

图 4 是定子电压从 $220\ \text{V} \sim 240\ \text{V}$ 变化过程的动态响应仿真结果.由图可见虽然电压幅值变化幅度约为 10% ,但动态调节和跟踪控制过程约为 $0.01\ \text{s}$,变化也比较平缓,体现了矢量控制的有效性,能很好的实现了定、转子的充分解耦.能很好的实现定转子的充分解耦.

图 5 是转子减速 5% (s 从 $0.05 \sim 0.10$) 的动态响应过程.结果表明,速度变化导致的响应冲击幅度最大,动态调节和跟踪控制的过程稍长(略大于 $0.01\ \text{s}$),但系统最终能够以相对较短的时间和相对较平缓的过渡实现转速变化的调控平衡过程,主要还是由于采用矢量控制技术实现了机电解耦的结果.

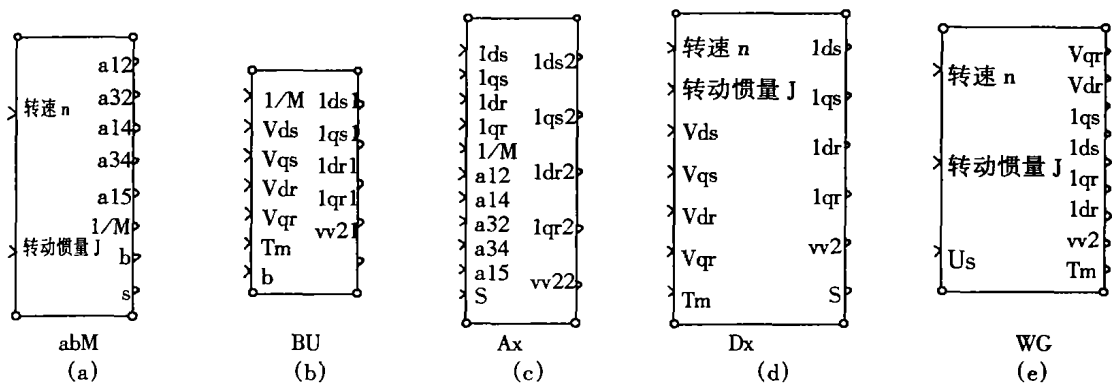


图 3 异步发电机的仿真模型

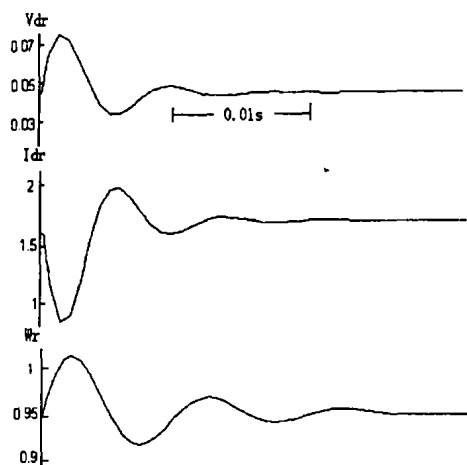


图4 定子电压变化的动态响应过程

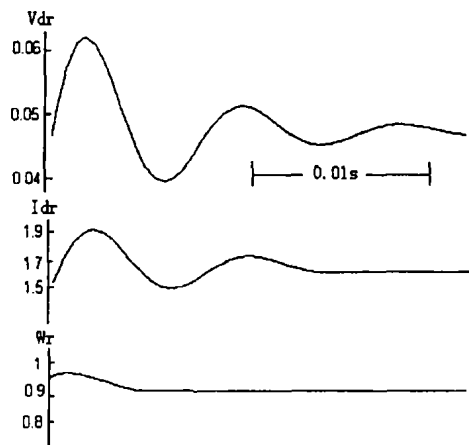


图5 转速变化的动态响应过程

6 结论

本文建立了双馈风力发电机的数学模型,进行变速恒频矢量控制分析并仿真发电系统的动态响应过程.仿真结果表明,这种基于变速恒频矢量控制风力发电系统对于电网电压和转速扰动的适应能力很强,能够在较短的时间内较平缓的实现调控,实现了发电系统的机电解耦,为风力场发电系统的设计和运行提供了可靠的理论依据.在本文建立的仿真模型基础上还可进一步研究变频器本身的特性对风力发电系统运行的影响.

参考文献:

- [1] 张宏立,于书芳,王维庆,等.变速恒频风力发电机数学模型及控制策略研究[J].新疆农业大学学报,2001,24(2):73~76.
- [2] 侯书江,蔺红,晁勤,等.风力发电机的建模与动态仿真

- [J]中小型电机,2000,27(4):5~8.
- [3] Pena R, Clare J C, Asher GM. Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable speed wind energy generation [J]. IEEProc. 2Electr. 1996, 143(3):231-241.
- [4] Xu Longya, Cheng Wei. Torque and reactive power control of a doubly fed induction machine by position sensorless scheme [J]. IEEE transactions on Industry Applications, 1995, 31(3):636-642.
- [5] 辜承林.机电动力系统分析[M].武汉:华中理工大学出版社,2001.
- [6] 欧阳红林,黄守道,蒋绿化,等.变速恒频恒压发电机的微机控制系统[J].湖南大学学报(自然科学版),1999,26(6):43~47.
- [7] 黄科元,黄守道,何庆宁,等.双馈电机气隙磁场定向矢量控制调速系统的研究[J].中小型电机,2000,27(4):29~32.
- [8] 薛定宇,陈阳泉.基于MATLAB/Simulink的系统仿真技术[M].北京:清华大学出版社,2001

Simulation Research on Doubly Fed Induction Machine for Wind-Energy Generating System Based

ZHANG Yong-gao^{1,2}, GONG Jin-hong¹, Li Jiang³

(1.School of Electrical Eng., East China Jiaotong University, Nanchang 330013; 2. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074; 3. 9168# Fuzhou 351251, China)

Abstract: In this paper the mathematic model of doubly fed induction machine and dynamic simulation model of wind power system based on variable speed constant frequency vector control are built. A simulation research on wind power system and its dynamic response is carried on. The results show this wind power system based on variable speed constant frequency vector control has the strong flexibility to the voltage of stator and the speed of rotor. The conclusions provide theoretical foundation for ulteriorly study on wind power system.

Key words: doubly fed induction machine; wind energy generation; variable speed constant frequency; simulation.