

永磁直驱风电系统建模及其机电暂态模型参数辨识*

程 玮, 陈宏伟, 石庆均

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 针对基于双脉宽调制 (PWM) 变换器的永磁直驱风电系统的运行特性, 分析了风力机特性、电机侧变换器和电网侧变换器的控制策略, 利用 Matlab/Simulink 建立了反映电力电子开关动作的永磁直驱风电系统详细模型, 并在此基础上根据同步电机 3 阶暂态模型, 建立了直驱风机的机电暂态数学模型, 采用粒子群算法 (PSO) 对模型进行了参数辨识。仿真结果表明, 该详细模型能够描述永磁直驱风电系统对不同风速的响应, 实现风能的最大功率跟踪; 机电暂态数学模型与详细模型特性接近, 能够从总体上反映永磁直驱风电系统对端电压变化的有功、无功响应, PSO 参数辨识有效。研究结果表明, 所建立的详细模型能够用于控制方式的研究以改善输出特性, 机电暂态模型能够用于研究电网与永磁直驱风电系统的相互影响。

关键词: 双脉宽调制变换器; 机电暂态; 参数辨识; 粒子群算法

中图分类号: TM614

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2012)07-0817-04

Modeling for direct-driven wind-power system with PMSG and parameter estimation for its electromechanical transient mathematical model

CHENG Wei, CHEN Hong-wei, SHI Qing-jun

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at the characters of direct-driven wind-power system with permanent magnet synchronous generator (PMSG) based on back-to-back pulse width modulation (PWM) converter, the wind turbine, the control strategies of turbine-side converter and grid-side converter were analyzed. PMSG detail model using Matlab/Simulink was established. Based on this, electromechanical transient model for direct-driven wind-turbine generator was constructed according to 3 orders synchronous generator model. Particle swarm optimization (PSO) algorithm was used to identify the parameter for the mathematical model. The simulation results show that the detail model can reflect direct-driven wind-power system's operation as wind speed changing, while it can track the maximum power point. The electromechanical transient model coincides with the detail model well. It reflects the active and reactive power of the direct-driven wind-power system when grid voltage is changed. The parameter identification using PSO is effective. The results indicate that the detail model can be used to refine power output control strategy, the electromechanical transient model can be used to study direct-driven wind-power system interacted with the grid.

Key words: back-to-back pulse width modulation (PWM) converter; electromechanical transient; parameter estimation; particle swarm optimization (PSO) algorithm

0 引 言

当前, 变速恒频 (variable-speed constant-frequency, VSCF) 风力发电系统已被广泛应用, 其特点是通过先进的变速和变桨技术, 在风速变化时调节发电机转速处于相应的最佳值从而最大限度地捕获风能, 提高了风力发电的效率, 且低风速情况下风机转速下降, 从而大大降低了系统的机械应力和装置成本。目前的变速恒频风力发电系统主要有使用双馈感应发电机

(DFIG) 的双馈风电系统和使用永磁同步发电机 (PMSG) 的永磁直驱风电系统两种。其中双馈风力发电机的市场份额最大^[1-2], 但由于双馈风机需要高造价的齿轮箱, 加上滑环和电刷大量的后期维护, 不仅增加了装置成本, 而且降低了系统的发电效率和可靠性。永磁直驱式风电系统采用低速 PMSG, 结构简单, 具有较高的可靠性, 机械损耗小, 便于维护, 不需要外部励磁, 低电压穿越能力更强, 并网功率控制灵活。此外在低风速下也可以高效率发电, 并且易于实现电网电压

收稿日期: 2012-01-04

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (“863” 计划) 资助项目 (2009AA05Z221)

作者简介: 程 玮 (1985-), 男, 河北唐山人, 主要从事风机并网发电、光伏并网发电方面的研究。E-mail: chengweizju@163.com

故障条件下风电系统的不间断并网运行^[3],是风力发电技术领域的重要方向。

本研究在 Matlab/Simulink 环境下对双 PWM 变换器结构的永磁直驱风电系统进行了建模仿真。机组转子侧变频器的控制是在同步旋转坐标系实现的,而系统侧变频器采用基于网侧电压的矢量控制。仿真结果可验证所提模型的正确性和控制策略的有效性。此外,本研究还建立直驱风机的机电暂态数学模型^[4-5],利用粒子群算法(PSO)对模型进行了参数辨识,得到的功率曲线与之前由 Simulink 模型得到的功率曲线能较好地吻合。

1 风力机特性

风力发电系统中,风力机作为原动机,风吹动风力机叶片使其旋转从而将风能转换为机械能,再由发电机将机械能转变为电能,是整个风力发电系统能量转换的首要部件。根据空气动力学原理,风机捕获的风能可由下式得到^[6]:

$$P_m = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \rho \pi R^2 V^3 \quad (1)$$

式中: $C_p(\lambda, \beta)$ — 风机功率系数, ρ — 空气密度, R — 风轮半径, V — 风速。

实际上, $C_p(\lambda, \beta)$ 就是风力机将风能转换为机械能的效率,它是叶尖速比 λ 和桨叶节距角 β 的函数。叶尖速比 λ 可由下式得出:

$$\lambda = \frac{\omega R}{V} \quad (2)$$

式中: ω — 风力机转速。

存在着一个最优叶尖速比 λ_{opt} 使得 C_p 最大,即可使风力机输出的功率 P_m 最大,最大功率与风速呈 3 次方关系:

$$P_{m, \max} = \frac{1}{2} \rho \pi R^5 \frac{C_{p, \max}}{\lambda_{opt}^3} \omega^3 \quad (3)$$

2 直驱风机系统模型

永磁直驱风电机组可以通过多种变换器拓扑实现并网^[7],其中双 PWM 变换器结构以其灵活的控制方法可实现对电机调速和输送到电网电能的优良控制。同时双 PWM 变换器结构也可实现对发电机侧电流的有效控制,其中通过控制直轴电流为零即可实现发电机最大功率输出,通过控制发电机的电磁转矩可以控制电机转速,使得风力发电机运行在最佳转速下,以最大的效率捕获风能。故本研究对双 PWM 型结构的永磁同步发电系统进行建模,发电机输出的功率通过机侧变换器变换为稳压电容 C 上的直流能量,网侧变换器控制输向电网的交流电流 I_{AC} 使得直流电压 u_{dc} 恒定。其结构如图 1 所示。

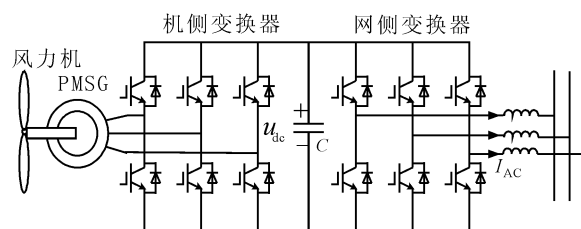


图 1 基于双 PWM 变换器的永磁直驱风电系统结构

2.1 电机侧变换器的控制策略

本研究通过对电机侧变换器的控制,可实现励磁与转矩的解耦控制以控制电机的转速或定子输出有功功率,使得在风速变化时永磁同步发电机的转速始终处于相应的最佳转速,从而实现最大风能追踪。

电机侧变换器一般采用基于转子磁场定向的矢量控制技术。本研究采用零 d 轴电流控制^[8],将 d 轴定向于转子磁场方向, q 轴超前 d 轴 90° ,控制 d 轴电流为 0,减小发电机的损耗,高效地捕获风能。电机侧变换器控制框图如图 2 所示。

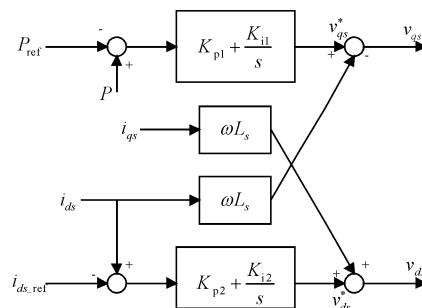


图 2 电机侧变换器控制框图

根据控制框图,本研究将 PI 控制的偏差输入量设为 x_1 、 x_2 , 则控制方程组可以写为:

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = P - P_{ref} = \Delta P \\ \frac{dx_2}{dt} = i_{ds} - i_{ds,ref} = \Delta i_{ds} \\ v_{qs} = K_{p1} \Delta P + K_{i1} x_1 - L_s \omega i_{ds} \\ v_{ds} = K_{p2} \Delta i_{ds} + K_{i2} x_2 + L_s \omega i_{qs} \\ P_{ref} = P_B \frac{\omega}{\omega_B} \end{cases} \quad (4)$$

式中: K_{p1} , K_{i1} — 有功功率控制的比例系数和积分系数; K_{p2} , K_{i2} — 定子侧变换器电流控制的比例系数和积分系数; P_{ref} — 有功功率的参考值; P — 发电机输出有功功率; $i_{ds,ref}$ — 定子 d 轴电流参考值,即 $i_{ds,ref} = 0$; i_{ds} 、 i_{qs} — 定子 d 轴、 q 轴电流; v_{ds} 、 v_{qs} — 定子 d 轴、 q 轴电压; L_s — dq 轴定子自感; ω_B — 发电机转速的基准值; P_B — 与基准转速相对应的发电机的功率; ω — 发电机转速,对于直驱式风机可以不考虑传动轴的扭振,其值等于风力机转速。

2.2 电网侧变换器的控制策略

对于网侧变换器,本研究采用基于电网电压定向

矢量控制技术,其控制任务有两个:①保证直流母线电压的稳定,这是使电机侧变换器和电网侧变换器正常工作的前提,主要是通过控制输出电流的有功分量来实现的;②实现输出有功、无功的解耦控制,使风机功率平稳传输到电网上,并可在需要对电网进行无功支持,理论上可获得任意可调的功率因数。

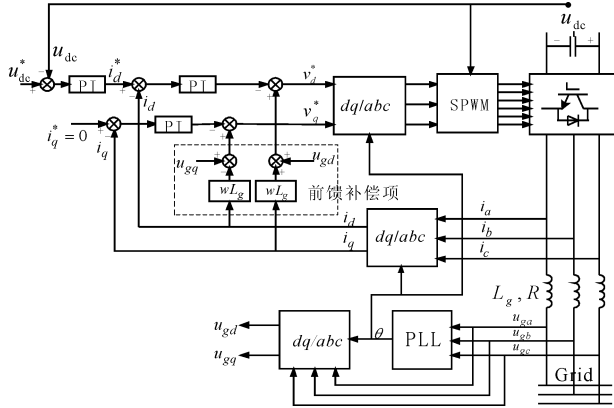


图3 电网侧变换器控制框图

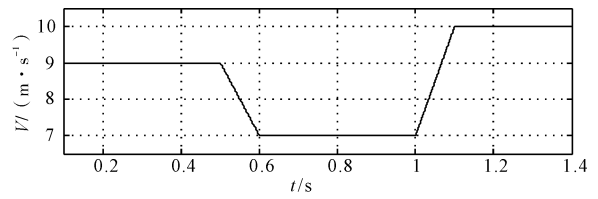
本研究选取电网电压矢量方向为 \$d\$ 轴,沿电压矢量旋转方向超前 \$90^\circ\$ 为 \$q\$ 轴,首先由锁相环 PLL 得到电网电压相角 \$\theta\$,进而通过 \$abc/dq\$ 变换得到电压、电流的 \$d\$ 轴、\$q\$ 轴分量 \$u_{gd}\$、\$u_{gq}\$、\$i_d\$、\$i_q\$,然后采用内环电流控制,外环功率控制,外环通过对 \$u_{dc}\$ 的 PI 调节得到电流的 \$d\$ 轴给定 \$i_d^*\$,网侧无功设为 0,直接得到电流的 \$q\$ 轴给定 \$i_q^* = 0\$,内环通过前馈补偿实现解耦,最后通过 \$dq/abc\$ 变换得到变流器三相电压给定,本研究采用 SPWM 算法触发变流器,所建立的网侧变换器的控制框图如图 3 所示。

2.3 系统仿真

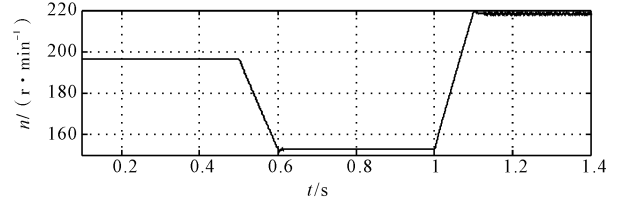
基于上述对永磁直驱风力发电系统各组成部分工作原理的分析,本研究在仿真软件 Matlab/Simulink 环境下构建了双 PWM 背靠背型永磁直驱风力发电并网系统的仿真模型。本研究设定风速的变化情况,仿真得到相应的风机转速和风电系统输入电网的有功功率,模型仿真结果如图 4 所示。仿真结果表明,系统可以很好地追踪到最大功率点,本研究所建立的永磁直驱风力发电系统模型反映出风速变化时的响应特性。

3 直驱风机系统的机电暂态模型参数辨识

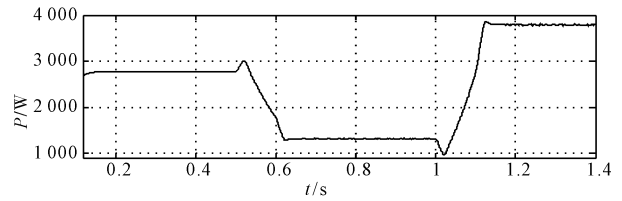
由于永磁直驱风力发电系统本质上是同步发电机,本研究采用同步发电机 3 阶机电暂态模型^[9-11]对永磁直驱风力发电系统进行建模和参数辨识。又考虑到风力发电系统中的控制环节,本研究采用在原同步发电机 3 阶模型无功功率部分加入一个与电压有关的



(a) 风速变化曲线



(b) 电机转速变化曲线



(c) 风电系统输出功率

图4 模型仿真结果

二次函数来实现。

同步发电机三阶机电暂态模型由下式表示:

$$\begin{cases} T_J \frac{d\omega}{dt} = P_m - P - D(\omega - 1) \\ \frac{d\delta}{dt} = \omega_s(\omega - 1) \\ T'_d \frac{dE'}{dt} = E_f - \frac{x_d}{x'_d} E' + \frac{(x_d - x'_d)}{x'_d} V \cos \delta \end{cases} \quad (5)$$

其中:

$$E_f = E_{f0} - k(V - V_0) \quad (6)$$

其功率方程组是:

$$\begin{cases} P = \frac{E'V}{x'_d} \sin \delta \\ Q = \frac{E'V \cos \delta - V^2}{x'_d} + (A_q V^2 + B_q V + C_q) \end{cases} \quad (7)$$

式中: \$E'\$—暂态电势; \$\delta\$—功角; \$\omega\$—发电机转速; \$P\$—发电机输出有功功率; \$Q\$—发电机输出无功功率; \$P_m\$—风力机输入有功功率; \$\omega_s\$—电网同步频率; \$E_f\$、\$E_{f0}\$—励磁电压及其初始值; \$V\$、\$V_0\$—端口电压及其初始值; \$T_J\$—惯性时间常数; \$T'_d\$—暂态开路时间常数; \$x_d\$、\$x'_d\$—\$d\$ 轴同步电抗和暂态电抗; \$k\$—励磁电压调节系数; \$D\$—阻尼系数。

本研究利用 PSO 算法^[12-15]对该直驱风机系统的机电暂态数学模型进行参数辨识。当风速保持 10 m/s 不变,风机端口电压 \$V\$ 在 0.1 s 时由 1 p. u. 降到 0.75 p. u., 0.2 s 时电压恢复,观测有功 \$P\$ 和无功 \$Q\$, 辨识参数为 \$x_d, x'_d, T'_d, T_J, D, k, A_q, B_q, C_q\$。

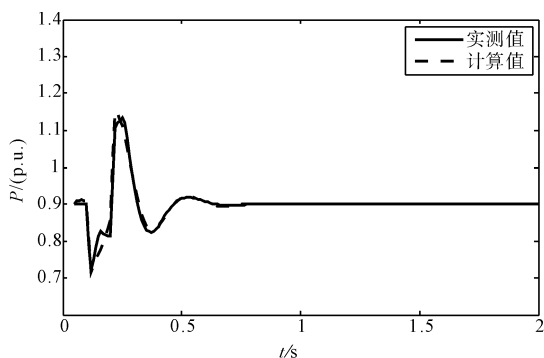
将 Simulink 仿真得到的数据输入到 PSO 参数辨

识程序中,得出的参数辨识结果如表 1 所示。

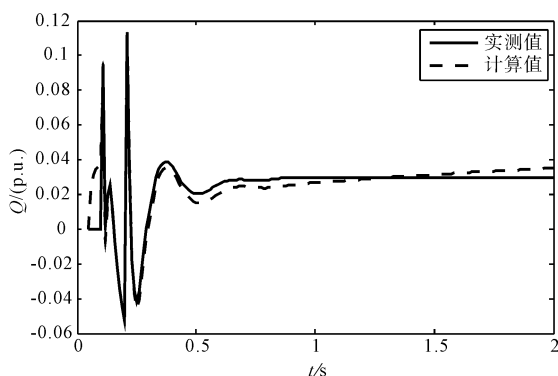
表 1 辨识所得参数

参数名	辨识值
x_d	0.985 962
x'_d	1.0
T'_d	0.01
T_J	0.005
D	0.050 516
k	1.453 617
A_q	-9.127 713
B_q	10.0
C_q	-4.455 556

有功功率 P 和无功功率 Q 的参数拟合曲线如图 5 所示。图 5 中实测值为 Matlab/Simulink 仿真结果,计算值为 PSO 参数辨识后的拟合曲线。从图 5 中可以看出输出有功和无功的实测值与计算值基本重合。由此得出结论:本研究所建立的机电暂态模型能反映永磁直驱发电系统的动态特性。



(a) 有功功率曲线拟合



(b) 无功功率曲线拟合

图 5 参数辨识结果

4 结束语

风力发电系统的优良控制对其安全平稳运行具有重要意义,本研究利用 Matlab/Simulink 对基于双 PWM 变换器的永磁直驱风电系统进行了建模仿真。仿真结果表明,本研究所建模型能够反映永磁直驱风

电系统随风速变化的特性。

此外,本研究还建立了直驱风机的机电暂态数学模型,利用 PSO 算法对模型中的参数进行了辨识,得到的时域功率仿真曲线与永磁直驱风电系统的 Simulink 模型仿真得到的功率曲线能较好地吻合。仿真结果表明,该直驱风机的数学模型能够较好地描述直驱风机的机电暂态特性,同时也验证了该 PSO 辨识算法的有效性。

参考文献 (References):

- [1] 胡非凡,胡幸江,陈国定. 变速恒频双馈风力发电机矢量控制研究[J]. 机电工程,2009,26(11):27-30.
- [2] 胡书举,李建林,许洪华. 永磁直驱风电系统变流器拓扑分析[J]. 电力自动化设备,2008,28(4):77-81.
- [3] ABBEY C, JOOS G. Effect of Low Voltage Ride Through (LVRT) Characteristic on Voltage Stability [C]//IEEE Power Engineering Society General Meeting. USA: [s. n.], 2005: 1901-1907.
- [4] 鞠平. 电力系统建模理论与方法[M]. 北京:科学出版社,2010.
- [5] 周盛,余丹萍,江全元. CRH3 动车组牵引传动系统的负荷建模[J]. 机电工程,2011,28(1):118-122.
- [6] FRERIS L L. Wind Energy Conversion System [M]. London: Prentice Hall, 1990.
- [7] BAROUDI J A, DINAVAH V, KNIGHT A M. A review of power converter topologies for wind generators[J]. Renewable Energy, 2007, 32(14): 2369-2385.
- [8] 徐佳园. 永磁同步电机最大转矩电流比控制[D]. 北京:北京交通大学电气工程学院,2010.
- [9] 倪以信,陈寿孙,张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京:清华大学出版社,2002.
- [10] 王正风,王厚文. 同步发电机暂态分析中模型的合理选择[J]. 华东电力,2003,20(8):4-8.
- [11] 申健,金钧. 电力系统仿真分析中几种同步发电机数学模型的比选[J]. 电气技术,2007,11(9):48-51.
- [12] 胡家声,郭创新,曹一家. 基于扩展粒子群优化算法的同步发电机参数辨识[J]. 电力系统自动化,2004,28(6):35-40.
- [13] 黄其新,孙黎霞,甄威,等. 同步发电机参数辨识的蚁群算法及扰动分析[J]. 电力自动化设备,2009,29(11):50-53.
- [14] 苏艳苹. 基于蚁群算法的电力电子电路故障诊断[J]. 机电工程技术,2010,39(7):54-56.
- [15] 龙云,王建全. 基于粒子群算法的同步发电机参数辨识[J]. 大电机技术,2003,4(1):8-11.

[编辑:李辉]