

电压跌落时双馈电机电磁暂态过程仿真与分析

陈 伟,王小龙,张浩琛

(兰州理工大学 电气工程与信息工程学院,兰州 730050)

摘要:双馈风力发电机(DFIG)因其具有优良的发电运行性能,在目前的风力发电中得到了广泛地应用。为了研究其不同数学模型在电压跌落故障时的暂态特性,该文以 MATLAB/SIMULINK 为仿真平台,分别建立了 DFIG 完整的五阶数学模型及忽略定子磁链暂态变化的三阶模型,在此基础上搭建了相应的风电系统仿真模型,并对风电系统在相同电压跌落幅度时的电磁暂态过程进行了仿真研究。仿真结果表明,DFIG 的五阶数学模型在电压跌落时的暂态响应更为清晰和细致,能更精确地表征其在电压跌落时的暂态响应过程。

关键词:风力发电;电压跌落;数学模型;暂态响应

中图分类号: TM743 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000 - 0682(2014) 05 - 0010 - 04

Simulation and analysis of doubly - fed induction generator transient response during voltage dip

CHEN Wei , WANG Xiaolong , ZHANG Haochen

(College of Electrical and Information Engineering Lanzhou University of Technology , Lanzhou 730050 , China)

Abstract: DFIG has been widely used in the current wind power generation due to its good operating performance. In order to study the transients characteristics with the different models in the voltage dip , this paper set up the 5th order model and 3th order model which ignored the stator flux linkage transient changes of the DFIG ,then built the corresponding wind power system models and simulated the electro-magnetic transient process of the wind power systems based on MATLAB/SIMULINK during the voltage dip. The simulation results show that the 5th order model can provides more clear and detailed transient responses when the voltage drops ,it can more accurately characterizes the transient response process under the voltage dip faults.

Key words: wind power generation; voltage dip; math model; transient response

0 引言

目前,变速恒频发电技术已广泛应用于世界各地的风电领域,其中,双馈感应发电机(DFIG)是最为主流的风力发电机类型^[1]。DFIG 的独特结构是定子端直接并入大电网,转子侧通过调节变流器来

实现对电机并网、有功和无功等控制。

在理想电网条件下,DFIG 具有优良的发电运行性能,然而变流器装置主要由 IGBT 全功率器件组成,且容量很小,一般仅为发电机额定容量的三分之一左右,在面对常见的故障类型如电网电压跌落时,其独特的结构导致风电机组对电网波动极为敏感^[2]。在电网发生电压跌落故障时,定子磁链不能发生突变,使得定子侧产生直流暂态分量,较大的转差频率加上定、转子漏感一般很小(约 0.1 pu),势必引起转子侧感生过电压和过电流。电流的大幅升高会造成电机电磁转矩的剧烈变化,对风电机组机械系统产生很大的应力冲击,同时,直流电容充电,直流母线电压升高。如不采取保护措施,过电压和

收稿日期:2013 - 12 - 05

基金项目:甘肃省电网公司科技项目资助(2010406029);甘肃省高等学校基本科研业务费专项资金项目资助(1103ZTC141)

作者简介:陈伟(1976),男,博士,教授,研究方向为电能质量分析和控制,新能源发电技术。

通讯作者:王小龙(1989),男,硕士研究生,研究方向为电能质量分析与控制。

过电流将导致变流器、定/转子绕组及直流母线的损坏^[3]。

近年来,随着风力发电在电力系统中所占比重的不断增加,风电机组的低电压穿越要求及相关规范也在不断提高和完善。大量文献对双馈风力发电机应对电压跌落的控制策略和保护装置进行了研究,其中附加 crowbar 电路是目前较为常用的方法^[4-7]。电压跌落时风力发电机的电磁暂态过程,是设计风电系统保护电路及制定运行策略的理论基础,因此,对于 DFIG 电压跌落时暂态过程的研究显得尤为重要。考虑到电压跌落时间很短,该文可忽略转速变化,在文献[8]基础上建立了双馈电机的五阶模型,该模型包含完整的电磁暂态变化,并与三阶模型进行比较,以 MATLAB/SIMULINK 为平台,对电压跌落过程中的双馈电机暂态特性进行了详尽的仿真分析。

1 DFIG 的数学模型

DFIG 风力发电系统结构如图 1 所示。

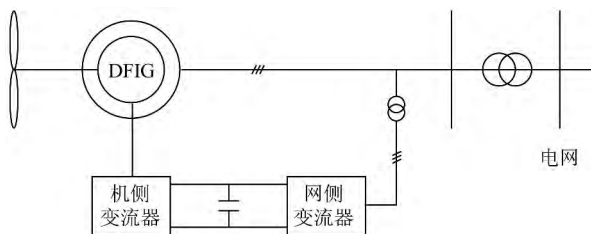


图 1 DFIG 风力发电系统结构示意图

双馈风力发电机常用的数学模型有八阶模型、五阶模型及其他降阶模型。为简化求解,在电压跌落的短暂时间内,八阶模型包含的复杂机械传动过程可以忽略。而其他降阶模型降低了系统控制的难度,且使仿真速度加快,但它们大多对系统进行了简化,当电网发生电压跌落故障时,忽略这些暂态部分将大大降低系统模型的精确度。故该文通过对比五阶模型和三阶模型在故障期间的动态响应,说明五阶模型比降阶模型更适合进行电压跌落过程的暂态分析研究。

1.1 DFIG 的五阶数学模型

$d-q$ 坐标系下 DFIG 的五阶数学模型如下所示:

$$\begin{cases} u_{ds} = R_s i_{ds} - \omega_1 \psi_{qs} + p\psi_{ds} \\ u_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_1 \psi_{ds} + p\psi_{qs} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} u_{dr} = R_r i_{dr} - s\omega_1 \psi_{qr} + p\psi_{dr} \\ u_{qr} = R_r i_{qr} + s\omega_1 \psi_{dr} + p\psi_{qr} \end{cases} \quad (2)$$

其中:

$$\begin{cases} \psi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \\ \psi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \psi_{dr} = L_r i_{dr} + L_m i_{ds} \\ \psi_{qr} = L_r i_{qr} + L_m i_{qs} \end{cases} \quad (4)$$

式中:下标 s, r 分别表示定、转子分量; u, i, ψ 分别表示电压、电流、磁链; $L_s = L_{ss} + L_m, L_r = L_{rr} + L_m, L_m, L_{ss}$ 和 L_{rr} 分别为定、转子间的互感、定子漏感和转子漏感; ω_1 为同步电角速度; ω_r 为转子电角速度; s 为转差, $s\omega_1 = \omega_1 - \omega_r$; p 为微分算子。

由式(4)可得:

$$i_{dr} = \left(\frac{\psi_{dr} - L_m i_{ds}}{L_r} \right), i_{qr} = \left(\frac{\psi_{qr} - L_m i_{qs}}{L_r} \right) \quad (5)$$

设 $L' = L_s - \frac{L_m^2}{L_r}$, 将式(5)代入式(3)中:

$$\psi_{ds} = L' i_{ds} + e_d, \psi_{qs} = L' i_{qs} - e_d \quad (6)$$

$$\text{式中: } e_d = -\frac{L_m}{L_r} \psi_{qr}, e_q = -\frac{L_m}{L_r} \psi_{dr} \quad (7)$$

将式(6)代入定子电压方程可得:

$$\begin{cases} u_{ds} = R_s i_{ds} - L' \dot{i}_{qs} + e_d + L' p i_{ds} + p e_q \\ u_{qs} = R_s i_{qs} - L' \dot{i}_{ds} + e_q + L' p i_{qs} + p e_d \end{cases} \quad (8)$$

将式(7)代入式(5)可得:

$$\begin{cases} i_{dr} = \left(\frac{\psi_{dr} - L_m i_{ds}}{L_r} \right) = \frac{e_q}{L_m} - \frac{L_m}{L_r} i_{ds} \\ i_{qr} = \left(\frac{\psi_{qr} - L_m i_{qs}}{L_r} \right) = -\frac{e_d}{L_m} - \frac{L_m}{L_r} i_{qs} \end{cases} \quad (9)$$

同时电磁转矩方程为:

$$\begin{aligned} T_e &= n_p (\psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds}) = \\ n_p [& (L' i_{ds} + e_d) i_{qs} - (L' i_{qs} - e_d) i_{ds}] = \\ n_p (& e_q i_{qs} + e_d i_{ds}) \end{aligned} \quad (10)$$

将式(4)、式(7)代入式(10),化简得:

$$T_e = n_p L_m (i_{dr} i_{qs} - i_{qr} i_{ds}) \quad (11)$$

式中: n_p 为电机极对数。

1.2 DFIG 的三阶数学模型

DFIG 的五阶数学模型可以提供包括发电机定子磁链变化的系统暂态分析,但是不可避免的增大了系统模型阶数和仿真研究的难度。在进行系统稳定性分析时,通常需要对模型降阶,这种降阶模型称为暂态稳定性模型。

典型的三阶数学模型忽略了定子磁链的暂态变化,即认为 $p\psi_{ds} = p\psi_{qs} = 0$, 这时可以转子电压或转子电流作为被控量来构建三阶模型,由此设计的控制系统降低了控制难度,对电流具有很快的瞬时响应速度。

忽略式(1)的微分项,可得降阶的DFIG的三阶数学模型为:

$$\begin{cases} u_{ds} = R_s i_{ds} - \omega_1 \psi_{qs} \\ u_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_1 \psi_{ds} \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} u_{dr} = R_r i_{dr} - s\omega_1 \psi_{qr} + p\psi_{dr} \\ u_{qr} = R_r i_{qr} + s\omega_1 \psi_{dr} + p\psi_{qr} \end{cases} \quad (13)$$

与五阶模型类似,进一步整理可得定子电压方程为:

$$\begin{cases} u_{ds} = R_s i_{ds} - L' \dot{i}_{qs} + e_d \\ u_{qs} = R_s i_{qs} - L' \dot{i}_{ds} + e_q \end{cases} \quad (14)$$

若忽略电阻影响,定子电流方程为:

$$\begin{cases} \dot{i}_{ds} = \frac{u_{qs}}{L_s} - \frac{L_m}{L_s} \dot{i}_{dr} \\ \dot{i}_{qs} = -\frac{u_{ds}}{L_s} - \frac{L_m}{L_s} \dot{i}_{qr} \end{cases} \quad (15)$$

电磁转矩方程即为:

$$T_e = -n_p \frac{L_m}{L_s} (i_{dr} u_{ds} + i_{qr} u_{qs}) \quad (16)$$

2 仿真研究

在 MATLAB/SIMULINK 平台上,建立了 DFIG 及其控制系统的仿真模型。为简便起见,以系统稳定运行时刻为 0 时刻计,0.5~1.0 s 内发生了 50% 的机端电压跌落,随后电压恢复正常。采用定子磁链定向的控制方法,对比研究了基于五阶模型和三阶模型的系统暂态输出,如图 2~图 6 所示。

仿真所用参数为:额定功率 1.5 MW,定子额定电压 690 V,额定频率 50 Hz,定子电阻 0.023(标么值,下同),转子电阻 0.016,定子漏感 0.18,转子漏感 0.16,励磁电感 2.9,网侧变换器最大电流 0.8 pu。

由仿真结果图可以看出,五阶模型可以显示包括定子电压、电流,转子电压、电流在内的暂态变化,反映了 DFIG 的更多细节。

三阶模型显示的暂态输出与五阶模型近似,但只能以平均值的形式表示暂态过程,且不能精确反映故障过程中电机输出量的振荡变化。

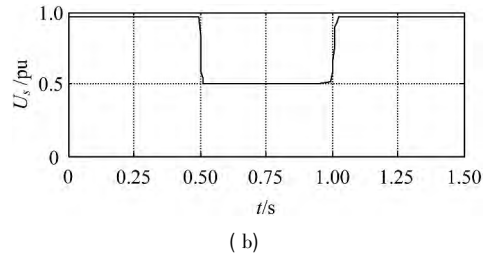
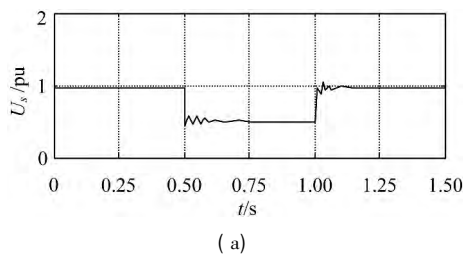


图 2 电压跌落期间 DFIG 的定子电压暂态响应

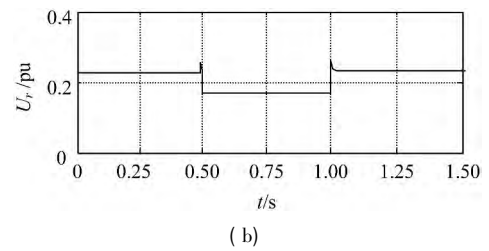
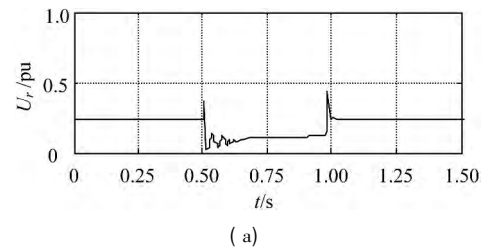


图 3 电压跌落期间 DFIG 的转子电压暂态响应

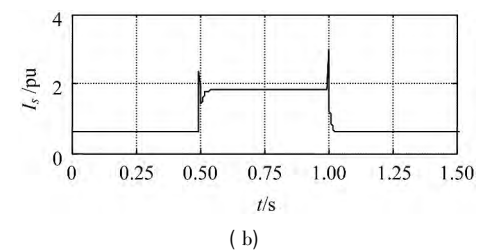
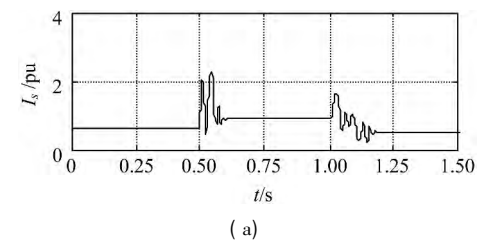
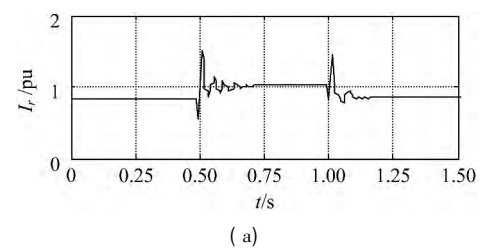
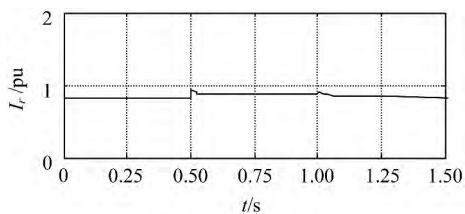


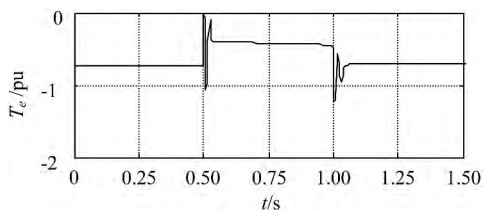
图 4 电压跌落期间 DFIG 的定子电流暂态响应



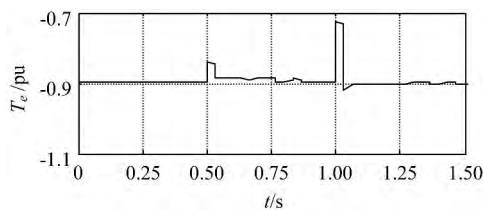


(b)

图5 电压跌落期间DFIG的转子电流暂态响应



(a)



(b)

图6 电压跌落期间DFIG的电磁转矩暂态响应

3 结论

为研究电压跌落故障时变速恒频DFIG发电机的暂态特性,该文分别建立了五阶和三阶数学模型。通过仿真结果可知,三阶模型仿真速度快,利于研究包含DFIG风力发电机组的系统稳态研究;与三阶模型相比,五阶模型能提供更加精确和细致的暂态响应,对系统运行时的控制策略及保护电路设计具有指导意义。

(上接第7页)

参考文献:

- [1] 陶永华. 新型PID控制及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002: 1-30.
- [2] 周建新, 岂兴明, 矫津毅, 等. MATLAB控制系统仿真与实例详解[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2008.
- [3] 刘金琨. 先进PID控制及其MATLAB仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003: 87-117.
- [4] 吕鹏涛, 惠增宏. NF-3风洞神经网络自适应稳风速控制系统研制[J]. 实验流体力学, 2009, 23(4): 82-86.
- [5] 王雪松, 程玉虎, 彭光正. 电气比例压力阀自校正压力调节器的设计[J]. 电机与控制学报, 2006, 10(1):

参考文献:

- [1] 贺益康, 周鹏. 变速恒频双馈异步风力发电机系统穿越技术综述[J]. 电工技术学报, 2009, 24(9): 140-146.
- [2] 郑太一, 严干贵, 周志强, 等. 电网电压跌落时风电机组运行仿真与实证分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2009, 21(3): 90-96.
- [3] 杨淑英, 张兴, 张崇巍, 等. 电压跌落激起的双馈型风力发电机电磁过渡过程[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(19): 85-90.
- [4] 胡家兵, 贺益康. 双馈风力发电系统的低电压穿越运行与控制[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(2): 49-52.
- [5] 关宏亮, 赵海翔, 王伟胜, 等. 风电机组低电压穿越功能及其应用[J]. 电工技术学报, 2007, 22(10): 173-177.
- [6] 蒋学冬, 赵航. 应对电网电压骤降的双馈感应风力发电机Crowbar控制策略[J]. 电网技术, 2008, 32(12): 84-89.
- [7] 姚俊, 廖勇. 基于Crowbar保护控制的交流励磁风电系统运行分析[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(23): 79-83.
- [8] EKANAYAKE J B, HOLDSWORTH L, JENKINS N. Comparison of 5th order and 3rd order machine models for doubly-fed induction generator(DFIG) wind turbines[J]. Electric Power Systems Research, 2003, 67(3): 207-215.
- [9] 胡家兵, 孙丹, 贺益康, 等. 电网电压骤降故障下双馈风力发电机建模与控制[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(8): 21-26.
- [10] PETERSSON A. Analysis, modeling and control of doubly-fed induction generators for wind turbines[D]. Gothenburg, Sweden: Chalmers Univ, 2003.
- [11] 向大为, 杨顺昌, 刘永前, 等. 风电场出力短期预报研究综述[J]. 现代电力, 2007, 24(5): 6-11.

27-30.

- [6] 崔保健, 李国新. 基于比例阀门的精密气压控制方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2005, 13(12): 1366-1368.
- [7] 钟敏玲. 一种基于单神经元的PID改进算法[J]. 哈尔滨师范大学自然科学学报, 2008(05): 32-35.
- [8] 侯远龙, 徐群. 单个神经元自适应PSD智能控制电液伺服系统[J]. 电气传动自动化, 1996(04): 44-47.
- [9] 赵建海, 谢友宝. 电气比例阀气压控制系统数学模型的建立及研究[J]. 科技信息, 2008.
- [10] 吴志敏. 基于新型PID神经网络的自适应控制系统研究[J]. 科学技术与工程, 2008, 1(8): 76-79.