

双馈风电机组的通用型机电暂态模型及其 电磁暂态模型的对比分析

刘其辉, 韩贤岁

(新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206)

摘要: 针对风力发电系统的电磁暂态模型复杂、计算速度慢的问题, 研究了一种风力发电系统的通用性机电暂态模型。该模型不包含电力电子器件, 由纯粹的数学计算完成, 模型简单、计算速度快。该机电暂态模型分为风速模型、风力机及其控制模型、发电机/变流器模型、电气控制模型四部分。在 PSCAD 对该机电暂态模型进行了仿真, 得到的结果与电磁暂态模型的仿真结果吻合, 且仿真时间大大减少, 验证了该模型在保证一定计算精度的前提下大大提高了计算速度。该通用性机电暂态模型为大规模并网风电场的仿真建模提供了模型参考, 具有实用价值。

关键词: 双馈风电机组; 电磁暂态模型; 机电暂态模型; PSCAD; 仿真对比

Comparative study on electromechanical and electromagnetic transient model for grid-connected DFIG

LIU Qi-hui, HAN Xian-sui

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,
North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The computing speed of electromagnetic transient model for wind power system is very slow because of its complexity. To solve this problem, a general electromechanical transient model is studied, in which there are not electrical components and high frequency switching device, and it only consists of pure mathematic calculations, is simple and has fast calculation speed. There are four parts including wind speed model, wind turbine control, generator/convertor model, and electrical control model. By comparing the simulation results of this electromechanical transient model with electromagnetic transient model in PSCAD, we found that the simulation time is reduced greatly and the results are agreeable basically, the simulation efficiency can be increased significantly at the same time guarantee the accuracy of the calculation accuracy. The electromechanical transient model provides reference model for simulation and modeling of large scale grid-connected wind farm and is of great practical value.

This work is supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 2014MS03).

Key words: DFIG; electromagnetic transient model; electromechanical transient model; PSCAD; simulation comparison

中图分类号: TM74 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)23-0089-06

0 引言

风力发电是目前发展最成熟的新能源发电技术, 但是, 其间歇性、随机性给电网运行带来了较大的影响, 并网问题成为风电发展的瓶颈^[1-3]。要研究风电对系统的影响, 风力发电机组的动态模型成为研究的基础和关键。目前, 风电的电磁暂态模型相对成熟, 文献[4-9]详细建立了双馈式风电机组(Doubly Fed Induction Generator, DFIG)的发电机、

轴系、风力机、变流器及其控制的精确模型。这种考虑电力电子装置建模的详细电磁暂态模型, 仿真速度慢, 消耗时间长, 占用计算机内存大, 适用于风电本身的控制策略研究、元件和控制参数设计、谐波分析与治理等。若在潮流计算和机电暂态仿真中采用详细模型的风电系统(即双馈风电机组的电磁暂态模型)不仅模型复杂, 而且计算时间长, 不适合实际工程的应用。本文结合系统分析的需要, 开展适用于潮流计算和机电暂态仿真的 DFIG 机电暂态模型研究。

就风电机组建模而言, 相关研究主要存在两方

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(2014MS03)

面的问题：首先是适合系统分析的风机模型有待于完善，如何把精确的电磁暂态模型简化成适合系统分析的机电模型成为研究的难点^[10-11]；其次，风电机组模型有待于标准化，只有制定风力发电机组建模和校验的国际标准^[12-13]，才能适用于未来新型风力发电机组的暂态建模。

为了更好地研究DFIG机电暂态模型，在研究DFIG机电暂态及运行控制方式的基础上，利用PSCAD仿真工具搭建了DFIG机电暂态模型，并与电磁暂态模型仿真的结果进行对比，验证了该机电暂态模型的正确性及有效性。

1 PSASP 风电模型原理

DFIG的整体结构如图1所示，励磁控制系统由交-直-交变频器组成，是两个背靠背互联的电压源换流器(VSC)，即机侧变流器和网侧变流器构成。

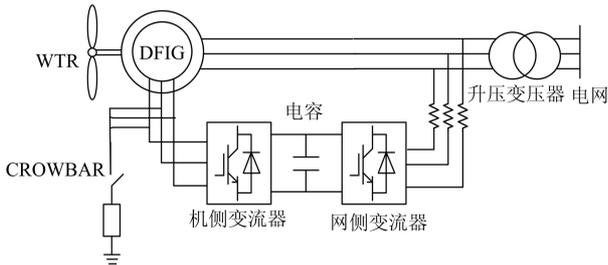


图1 双馈风电机组原理图

Fig. 1 Structure of DFIG

目前国内主流的系统仿真软件有BPA和PSASP，都有各自的DFIG风机模型，模型基本相同，现选取PSASP的机电暂态模型介绍。

该模型对发电机/变流器进行了简化，一定程度上忽略变流器的动态过程。发电机/变流器简化为电抗后的可控电流源，模型由4个部分构成，如图2所示，包括发电机/变流器模型、电气控制模型、风力机及其控制模型、风速模型。图中： P_{elec} 为发电机电磁转矩； V_{term} 为机端电压； P_{gen} 、 Q_{gen} 为发电机有功功率和无功功率。

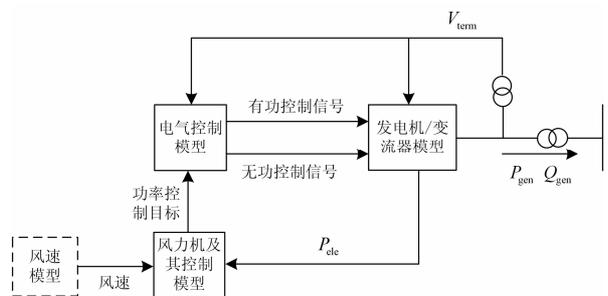


图2 PSASP双馈风机整体框图

Fig. 2 Whole control block of DFIG on PSASP

1.1 发电机/变流器模型

与传统的发电机不同，将DFIG的发电机/变流器模型等值为代数运算的可控电流源，其控制框图如图3所示，图中 E_{qcmd}^* 、 I_{pcmd} 为励磁电压和有功电流控制信号； x' 为等值电抗，它并不代表实际的次暂态电抗； I_{source} 为DFIG向系统注入的可控电流源。简化模型构造了有功控制通道和无功控制通道， E_{qcmd}^* 、 I_{pcmd} 由电气控制模型计算获得，分别控制风电机组向电网注入的有功电流和无功电流。

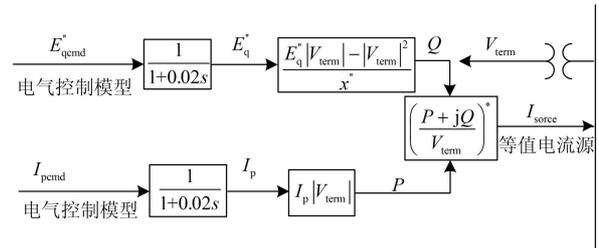


图3 发电机/变流器模型控制框图

Fig. 3 Control block of the generator/convertor model

与详细DFIG模型相比，该部分将DFIG等效为二阶可控电流源，忽略发电机转子磁链动态过程，保留机电特性，大大节省了计算时间，提高了计算速度。

1.2 电气控制模型

电气控制模型根据电网的情况与风力机模型提供的有功指令控制发电机注入电网的有功功率与无功功率，如图4所示，图中 V_{rif} 为被控节点参考电压； Z_c 为参考节点到监测节点间阻抗， Q_{max} 、 Q_{min} 为机组无功出力限值； I_{pmax} 为变流器有功电流输出上限值；电气控制模型包括有功控制和无功控制两个环节，无功通道计算得到 E_{qcmd}^* ，有功通道计算得到 I_{pcmd} ，最后将计算得到的 E_{qcmd}^* 和 I_{pcmd} 送到发电机/变流器模型中。

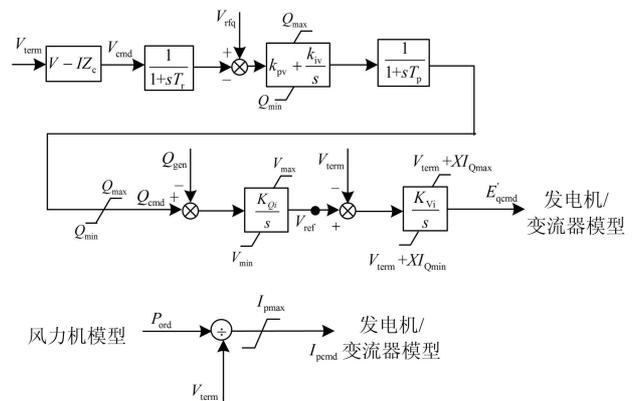


图4 电气控制模型控制框图

Fig. 4 Control block of the electrical control model

器积分系数 k_{itrq} : 0.6, 有功电流指令限幅上限 I_{pmax} : 1.1 pu, 无功调节器积分系数 k_{qi} : 0.05, 机端电压调节器积分系数 k_{vi} : 0.05, 无功调节器输出限幅上限 V_{max} : 1.1 pu, 无功调节器输出限幅下限 V_{min} : 0.9 pu。

(3) 风力机及其控制模型参数

① 风力机参数

额定功率: 1.5 MW, 叶片半径: 35.2 m, 空气密度: 1.225 kg/m^3 , 额定风速: 11.8 m/s, 切入风速: 3 m/s, 切出风速: 25 m/s, 风轮额定转速为 ω_r : 15.4 rpm。

② 轴系模型参数

转动轴的阻尼系数 D_{ig} : 1.5 pu, 转动轴的刚性系数 k_{ig} : 1.246 pu, 发电机惯性时间常数 T_j : 0.54 s, 风力机惯性时间常数 T_H : 4.64 s。

③ 桨距角控制模型参数

桨距角控制比例系数 k_{pp} : 150, 桨距角控制积分系数 k_{ip} : 25, 桨距角补偿比例系数 k_{pc} : 3, 桨距角补偿积分系数 k_{ic} : 30, 叶片惯性时间常数 T_H : 0.3 s, 桨距角上限 θ_{max} : 27° , 桨距角下限 θ_{min} : 0° , 桨距角变化率上限 $(d\theta/dt)_{max}$: $10^\circ/\text{s}$, 桨距角变化率下限 $(d\theta/dt)_{min}$: $-10^\circ/\text{s}$ 。

测试算例如图 7 所示, 把 DFIG 等值为可控电流源, 通过线路与无穷大系统相连。

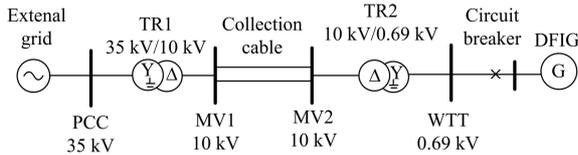


图 7 简单算例示意图
Fig. 7 Simple example

2.2 仿真验证

1) 电磁暂态模型和机电暂态模型对比

为了验证简化原理和双馈风电机组简化模型的合理性, 在 PSCAD/EMTDC 中建立了 DFIG 的电磁暂态和机电暂态模型。

在 10 s 时, 风速由 6 m/s 阶跃到 10 m/s, 仿真结果如图 8 所示, 左侧波形为电磁模型仿真结果, 右侧波形为机电模型仿真结果, 两个模型基于 PSCAD 同一仿真平台。其中表 1 为在稳态时 DFIG 输出结果对比。

由仿真结果可知, 两者的整体结果表现出良好的一致性, 在风速阶跃的工况下, 均能实现最大风能追踪、有功无功解耦控制、单位功率因数运行等控制目标, 电磁模型由于考虑了电力电子器件, 波形略有毛刺, 但是不影响分析, 从而验证了 PSCAD 机电暂态模型的正确性。

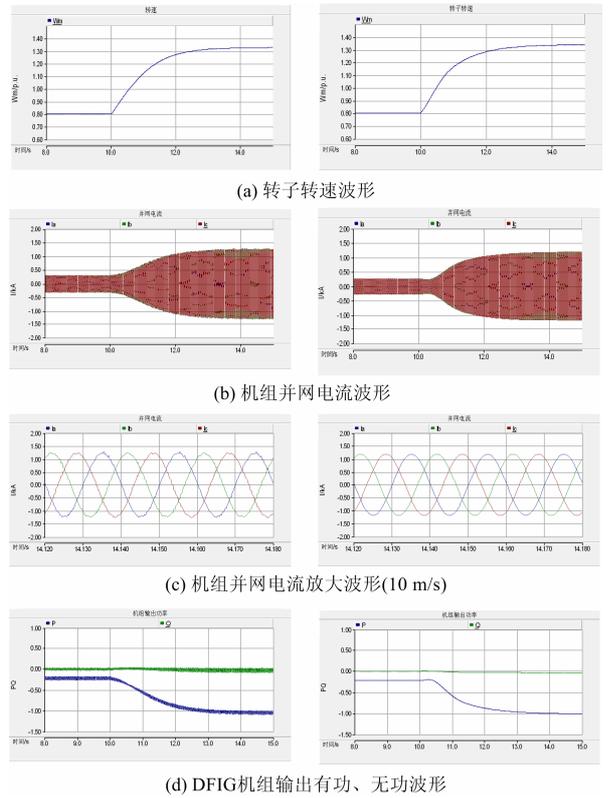


图 8 阶跃风速工况下 DFIG 电磁模型与简化模型运行特性对比

Fig. 8 Comparison of output characteristics under the step wind speed

表 1 电磁模型和简化模型稳态输出结果对比

Table 1 Comparison of output characteristics under the step wind speed

	电磁模型	PSCAD 机电模型	误差
转子转速/p.u.	0.8022~1.3382	0.8011~1.3368	0.0011~0.0014
并网电流/kA	0.1866~0.8567	0.1870~0.8672	0.0004~0.0105
有功功率/MW	0.2230~1.025	0.2339~1.037	0.0109~0.012

为了验证机电暂态模型可以大大提高计算速度, 通过统计仿真耗时进行分析。仿真耗时是指完成仿真所用的时间。对比主要从两个方面: ① 仿真步长的不同, 分别取 $20 \mu\text{s}$ 和 $2 \mu\text{s}$ 的仿真步长; ② 风电机组的数量不同, 分别考虑了单台风电机组和三台风电机组。共有四种对比情况, 仿真耗时对比如表 2 所示。

由表 2 可以看出, 在相同的仿真步长下, 机电模型比电磁模型计算时间明显缩短; 在风电机组数增加时, 仿真时间不随台数成倍数延长, 且随着

风电机组台数的增加, 仿真耗时减小地更加明显。说明机电暂态模型计算速度要比电磁模型快得多, 大大节省了仿真时间。

表 2 仿真耗时对比

Table 2 Comparison of the simulation time

单台风电机组		电磁模型/s	简化模型/s
仿真	20 μ s	240.0	15.0
步长	2 μ s	1 380.0	120.0
三台风电机组		电磁模型	简化模型
仿真	20 μ s	1 680.0	24.0
步长	2 μ s	6 840.0	240.0

2) 跨平台仿真结果对比

为了进一步验证模型的正确性, 本文基于 PSASP 和 PSCAD 两种不同的仿真平台, 采用相同的机电暂态模型和参数, 在 10 s 时风速发生阶跃扰动, 其运行特性如图 9 所示, 图中左侧为基于 PSCAD 的仿真结果, 右侧为基于 PSASP 的仿真结果。

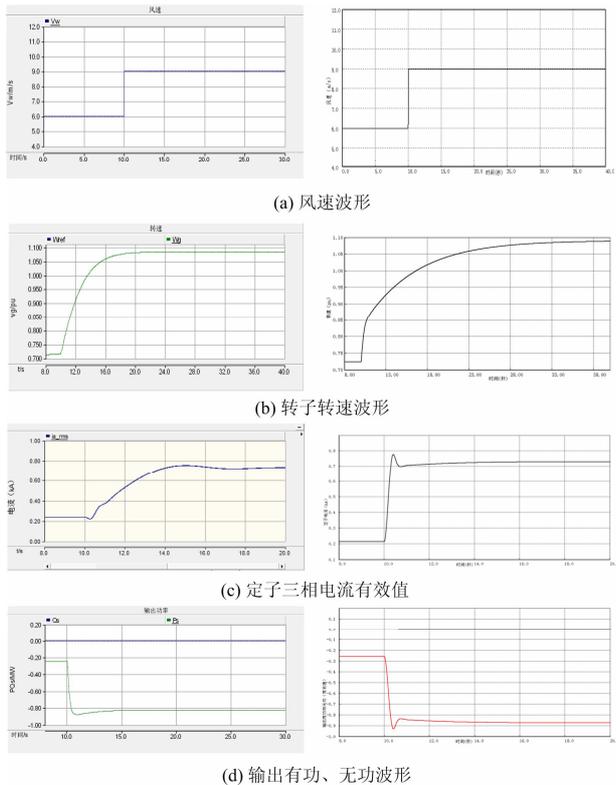


图 9 阶跃风速下输出特性对比

Fig. 9 Comparison of output characteristics under the step wind speed

基于 PSCAD 的机电暂态模型在 10 s 时发生风速阶跃扰动, 转速为由 0.727 pu 经过一定的过渡时

间稳定在 1.086 pu, 输出电流有效值变化为 0.207~0.693 kA, 有功功率输出变化为 0.245~0.827 MW, 无功功率输出基本维持在 0 Mvar; 基于 PSASP 的机电暂态模型在 10 s 时, 发电机转速由 0.733 pu 经过一定的过渡时间稳定在 1.092 pu, 输出电流有效值从 0.215 kA 过渡到 0.727 kA, 有功功率从 0.257 MW 过渡到 0.857 MW, 无功为 0 Mvar 基本不变。

通过对比基于 PSCAD 与 PSASP 的机电暂态模型阶跃风速下的仿真结果, 得出以下结论: 基于两种平台的机电模型动态过程保持较高的一致性, 尤其是稳态情况下两种模型的运行特性接近完全一致, 从而验证模型的有效性。

3 结语

(1) 通过机电暂态模型和电磁暂态模型的仿真结果和仿真耗时分析, 验证了 DFIG 机电暂态模型在保证一定计算精度的前提下大大降低了计算速度。

(2) 在阶跃风速下, 通过 PSASP 和 PSCAD 两个不同的仿真平台, 基于两种平台的机电模型动态过程保持较高的一致性, 尤其是稳态情况下两种模型的运行特性接近完全一致。

该机电暂态模型可用于大规模风力发电系统的暂态仿真, 为风电场建模仿真及并网风力发电系统带给电网的暂态稳定性研究等问题提供模型参考。

参考文献

- [1] 魏巍, 王渝红, 李兴, 等. 大型风电场建模及接入甘肃嘉酒电网仿真分析[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(18): 96-101.
WEI Wei, WANG Yu-hong, LI Xing, et al. Simulation of large scale wind farms integration into Gansu Jiayu power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(18): 96-101.
- [2] 石立宝, 戴世强, 徐政, 等. 大规模双馈型风电场并网的系统暂态稳定仿真[J]. 电力系统及其自动化学报, 2009, 21(4): 1-7.
SHI Li-bao, DAI Shi-qiang, XU Zheng, et al. Transient stability simulation with large scale grid connected wind farms of DFIG type[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2009, 21(4): 1-7.
- [3] 樊延芳, 晁勤, 高瑜. 大型双馈式变速恒频发电机组对电网的影响仿真分析[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(16): 30-37.
FAN Yan-fang, CHAO Qin, GAO Yu. Simulation of

- influence of large double-fed variable speed wind turbine into grid[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(16): 30-37.
- [4] 郭家虎, 张鲁华, 蔡旭. 双馈风力发电系统在电网三相短路故障下的响应和保护[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(6): 40-44.
GUO Jia-hu, ZHANG Lu-hua, CAI Xu. Response and protection of DFIG system under three-phase short circuit fault of grid[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(6): 40-44.
- [5] 冯双磊, 赵海翔, 任普春, 等. 基于 PSCAD/EMTDC 的双馈式变速恒频风电机组动态模型仿真[J]. 电网技术, 2007, 31(17): 30-35.
FENG Shuang-lei, ZHAO Hai-xiang, REN Pu-chun, et al. PSCAD/EMTDC based simulation study on dynamic Model of doubly-fed variable speed wind turbine[J]. Power System Technology, 2007, 31(17): 30-35.
- [6] 张先勇, 舒杰. 基于无源性理论的双馈风力发电机双 PWM 变换器协调控制[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 183-188.
ZHANG Xian-yong, SHU Jie. Passivity-based co-operation control of dual PWM converters for doubly-fed wind power generator[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 183-188.
- [7] 黄学良, 刘志仁, 祝瑞金, 等. 大容量变速恒频风电机组接入对电网运行的影响分析[J]. 电工技术学报, 2010, 25(4): 142-149.
HUANG Xue-liang, LIU Zhi-ren, ZHU Rui-jin, et al. Impact of power system integrated with large capacity of variable speed constant frequency wind turbines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(4): 142-149.
- [8] 刘其辉, 谢孟丽. 双馈式变速恒频风力发电机的空载及负载并网策略[J]. 电工技术学报, 2012, 27(10): 60-67.
LIU Qi-hui, XIE Meng-li. Strategies of grid-connection of doubly-fed variable-speed constant-frequency wind power generator with no-load and with load[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(10): 60-67.
- [9] 王勇, 张纯江, 柴秀慧, 等. 电网电压跌落情况下双馈风力发电机电磁过渡过程及控制策略[J]. 电工技术学报, 2011, 26(12): 14-19.
WANG Yong, ZHANG Chun-jiang, CHAI Xiu-hui, et al. Electromagnetic transient process and control strategy for doubly-fed wind power generator under grid voltage dip[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(12): 14-19.
- [10] ESCRIBANO A H, LAZARO E G. Assessment of DFIG simplified model parameters using field test data[C] // Power Electronics and Machines in Wind Applications, July 16-18, 2012, Denver, America: 1-7.
- [11] ASMINE M, BROCHU J, FORTMANN J, et al. Model validation for wind turbine generator models[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2011, 26(3): 1769-1782.
- [12] FARIA M K. Validation and analysis of wind power plant models using short-circuit field measurement data[C] // Power Energy Society General Meeting, July 26-30, 2009, Calgary, Canada: 1-6.
- [13] ZHAO Hao-ran, WU Qiu-wei, MARGARIS I, et al. Implementation of IEC generic models of type 1 wind turbine generator in DIGSILENT PowerFactory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(8): 26-33.

收稿日期: 2014-02-22; 修回日期: 2014-07-14

作者简介:

刘其辉(1974-), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为新能源发电与并网技术;

韩贤岁(1988-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为新能源发电与并网技术。E-mail:han_xiansui@163.com