

基于 RT-LAB 的双馈风电场动态建模

董建政¹, 李征¹, 蔡旭^{1,2}

(1. 上海交通大学风力发电研究中心, 上海 200240; 2. 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240)

摘要: 风电场动态等值模型需要与风电场动态详细模型进行比较, 以评估其等值效果。RT-LAB 仿真平台具有强大的计算能力, 能保证大规模风电场模型的仿真计算。在 RT-LAB 仿真平台上建立了包含 48 台 2 MW 双馈机组的风电场动态详细模型, 研究了双馈机组空载并网前后控制策略、电机模型及其切换。对风电场按最大功率跟踪控制发电和按调度指令发电以及机组并网、解列的工况进行了仿真分析。结果表明该模型能较好地反映风电场动态特性, 对风电场动态等值模型的评估以及风电场控制器的开发具有重要意义。

关键词: RT-LAB; 双馈; 风电场; 动态建模; 空载并网

Dynamic modeling of wind farm with doubly-fed induction generators based on RT-LAB

DONG Jianzheng¹, LI Zheng¹, CAI Xu^{1,2}

(1. Wind Power Research Center, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. School of Naval Architecture, Ocean & Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Wind farm dynamic equivalent model should be compared with its detailed model for effect evaluation. RT-LAB simulation platform with powerful computing capability can ensure simulation of large-scale wind farm. A dynamic detailed wind farm model consisting of 48 units of 2 MW doubly-fed induction generators (DFIG) is established on the platform. The motor models and control strategies for idle load grid-connection are studied. Wind farm operating scenarios such as maximum power point tracking (MPPT), power dispatching, grid-connection and cutting-off are simulated. The results show that the model can reflect the dynamic characteristics of the wind farm. It is useful for the evaluation of dynamic equivalent model and the development of wind farm controllers.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2011AA05A104) and Shanghai Science Fund (No. 11dz1200204).

Key words: RT-LAB; doubly-fed; wind farm; dynamic modeling; idle load grid-connection

中图分类号: TM614 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)07-0083-07

0 引言

在风力发电发展初期, 风电场规模比较小, 单个风电机组在不同时间尺度下的模型及其简化是当时建模的重点。随着风电场规模的不断扩大, 以及风电机组类型的多样化, 如何对整个风电场进行建模引起了国内外学者的关注。大型风电场的建模思路大致可分为两类^[1]: 第一类是采用详细模型, 基于原有的单个风电机组建模成果, 通过变压器、集电线路, 将一个个风电机组连接起来, 构成实际风

电场的虚拟映射。采用这种建模方式可以充分利用原有的单机建模成果, 但增大了仿真模型的阶数, 对仿真建模的软件工具和计算机的硬件运算能力都提出了严峻的挑战。

第二类是采用等值模型, 将风电场用一个或者多个风电机组进行等效, 主要关注整个风电场对电网呈现出的外部特性。依据时间尺度的差异, 风电场等值建模可分为暂态等值、动态等值、稳态等值三种。其中, 大型风电场动态等值模型是当前风电场等值研究的热点。国内外学者提出了多种风电场动态等值方法, 讨论了机组划分^[2-5]、机组参数等值^[6-7]、线路参数等值^[8-9]等问题。

动态等值的核心思想, 是在保持整个风电场对

基金项目: 国家 863 计划(2011AA05A104); 上海市科学基金(11dz1200204)

电网呈现的外特性不变的同时,对详细风电场模型进行降阶简化。各种动态等值方法的效果,需要与详细风电场模型进行对比。限于研究工具的计算能力,作为对比的详细风电场规模通常比较小。RT-LAB 实时仿真平台在电力系统仿真中的应用,为建立大规模动态详细风电场模型提供了强有力的技术手段。它通过高频多核的硬件配置和分布式并行计算的软件协调,能保证大规模风电场模型的数字仿真,甚至实时仿真。仿真规模可根据硬件配置的扩展进行灵活的改变。特别地,在实时仿真情况下,在 RT-LAB 仿真平台上运行的风电场与外部物理控制器通过输入输出板卡进行数据交互,构成风电场控制器的硬件在环(hardware in the loop),对于加快风电场控制策略向实际应用转变,推动风电场控制器的多工况测试,都具有重要的意义。

本文首先建立了双馈风电机组的单机模型,包括空载并网前后的电机模型及其控制策略。然后以此为基础,考虑到风电场内部的线路参数,在 RT-LAB 仿真平台上建立了包含 48 台 2 MW 双馈机组的动态详细风电场模型。最后对风电场按最大功率跟踪控制发电和按调度指令发电,以及机组并网、解列等多种工况进行了仿真。

1 双馈风电机组建模

1.1 双馈电机模型

1.1.1 并网后电机数学模型

忽略空间谐波、磁链饱和、铁心损耗,假设双馈电机定、转子三相绕组对称。采用保持功率不变的 $\sqrt{2/3}$ 坐标变换,实现三相静止坐标系 abc 到两相同步旋转坐标系 dq 的变换。按照电动机惯例,电压-电流方程可表示为^[10]

$$\begin{bmatrix} u_{sd} \\ u_{sq} \\ u_{rd} \\ u_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_s p & -\omega_1 L_s & L_m p & -\omega_1 L_m \\ \omega_1 L_s & R_s + L_s p & \omega_1 L_m & L_m p \\ L_m p & -s\omega_1 L_m & R_r + L_r p & -s\omega_1 L_r \\ s\omega_1 L_m & L_m p & s\omega_1 L_r & R_r + L_r p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中: R_s 为定子电阻; R_r 为转子电阻; L_m 为定转子互感; L_s 为定子自感; L_r 为转子自感; ω_1 为电网同步角速度; s 为电机转差率; p 为微分算子。

电磁转矩方程为

$$T_e = n_p L_m (i_{sq} i_{rd} - i_{sd} i_{rq}) \quad (2)$$

其中, n_p 为电机极对数。

1.1.2 并网前电机数学模型

并网前电机空载运行,定子侧开路,所以定子电流为零,方程组(1)化简为

$$\begin{bmatrix} u_{sd} \\ u_{sq} \\ u_{rd} \\ u_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_m p & -\omega_1 L_m \\ \omega_1 L_m & L_m p \\ R_r + L_r p & -s\omega_1 L_r \\ s\omega_1 L_r & R_r + L_r p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \quad (3)$$

由方程组(1)和方程组(3)可知,发电机空载运行时,状态变量有两个(i_{rd} 、 i_{rq}),转子电压为输入量,定子电压为输出量;发电机并网运行后,状态变量变为四个(i_{sd} 、 i_{sq} 、 i_{rd} 、 i_{rq}),转子电压、定子电压都变为输入量。在双馈电机并网仿真过程中,并网前使用由方程组(3)建立的电机空载模型,并网后使用由方程组(1)建立的电机并网模型。而在并网瞬间要进行两种模型的切换和状态变量的数据转移。文献[11]提出了一种在 Simulink 环境下编写 S 函数分别建立并网前后电机模型,并按照并网信号进行模型切换的方法。但是 RT-LAB 不支持 M 函数,也不支持由 M 语言编写的 S 函数^[12]。为了避免由于软件兼容问题造成的编译报错,最好都使用 Simulink 自身的库模块进行建模。Simulink/Continuous 子库中的积分模块提供了接收外部数据进行初始化的功能。初始化动作可由上升沿/下降沿或者电平的高低来触发。在模型切换过程中,在并网信号跳变的时刻,将空载模型的状态变量终值提供给并网模型,触发后者状态变量的初始化,可实现电机模型的顺利衔接。

1.2 变流器控制策略

由于并网前后,网侧变流器沿用同一种控制策略,可参考文献[13],本文不再赘述。而在并网前后,转子侧变流器控制目标不同,所以使用了不同的控制策略,以下将对此进行说明。

1.2.1 并网后转子侧变流器控制策略

并网后,转子侧变流器的控制目标是使定子发出的有功无功功率解耦,按照最大功率跟踪控制策略或者上级的有功调度指令调节有功功率,按照恒功率因素控制方式或者无功调度指令调节无功功率。采用定子电压定向控制策略^[14-15],使同步旋转坐标系的 q 轴定向到定子电压矢量方向上,则 $u_{sd} = 0$, $u_{sq} = u_s$ 。由于定子电阻很小,稳态时,忽略定子电阻上的压降,则由式(1)可得

$$u_{sd} \approx -\omega_1 L_s i_{sq} - \omega_1 L_m i_{rq} \quad (4)$$

$$u_{sq} \approx \omega_1 L_s i_{sd} + \omega_1 L_m i_{rd} \quad (5)$$

考虑到 $u_{sd} = 0$, $u_{sq} = u_s$, 则

$$i_{sq} = -\frac{L_m}{L_s} i_{tq} \quad (6)$$

$$i_{sd} = \frac{u_s}{\omega_1 L_s} - \frac{L_m}{L_s} i_{td} \quad (7)$$

将式(6)、式(7)带入到电磁转矩方程(2)可得

$$T_e = n_p L_m i_{tq} \frac{u_s}{\omega_1 L_s} \quad (8)$$

由式(8)可以看出, 通过控制转子电流 q 轴分量 i_{tq} 可以控制电机的电磁转矩, 进而可以控制定子发出的有功功率。

在定子电压定向的条件下, 定子发出的无功功率可表示为

$$Q_s = u_{sq} i_{sd} = \frac{u_s^2}{\omega_1 L_s} - \frac{L_m}{L_s} u_s i_{td} \quad (9)$$

由式(9)可以看出, 通过控制转子电流 d 轴分量 i_{td} 可以控制定子发出的无功功率。

只要给定电磁转矩及无功功率的参考值, 就可以通过式(8)、式(9)得到转子电流 dq 轴分量的参考值。由于我们无法直接控制转子电流, 但能通过 PWM 变频器控制转子电压, 所以需要设计转子电流控制环, 通过控制转子电压间接实现对转子电流的控制。

忽略暂态分量, 由式(1)可以得到稳态时转子电压方程为

$$\begin{aligned} u_{td} &= -s\omega_1 L_m i_{sq} + R_r i_{td} - s\omega_1 L_r i_{tq} \\ u_{tq} &= s\omega_1 L_m i_{sd} + R_r i_{tq} + s\omega_1 L_r i_{td} \end{aligned} \quad (10)$$

于是得到转子侧变流器的控制策略, 如图 1, 其中 $-s\omega_1 L_m i_{sq} - s\omega_1 L_r i_{tq}$ 是转子电流 d 轴分量 i_{td} 的补偿项; $s\omega_1 L_m i_{sd} + s\omega_1 L_r i_{td}$ 是转子电流 q 轴分量 i_{tq} 的补偿项。

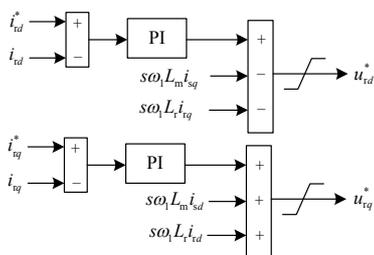


图 1 并网后转子侧变流器控制策略

Fig. 1 Control strategy for rotor-side converter after grid-connection

1.2.2 并网前转子侧变流器控制策略

并网前, 转子侧变流器的控制目标是对电机进

行励磁, 使定子电压的幅值、相角、频率接近电网电压。忽略暂态分量, 则由方程(3)可得定子电压方程为

$$\begin{aligned} u_{sd} &= -\omega_1 L_m i_{tq} \\ u_{sq} &= \omega_1 L_m i_{td} \end{aligned} \quad (11)$$

考虑到定子电压的参考值 $u_{sd}^* = 0$, $u_{sq}^* = u_s$, 则

$$\text{转子电流参考值 } i_{tq}^* = 0, \quad i_{td}^* = \frac{u_s}{\omega_1 L_m}。$$

同样需要设计转子电流控制环, 通过控制转子电压间接实现对转子电流的控制。忽略暂态分量, 由式(3)可以得到稳态时转子电压方程为

$$\begin{aligned} u_{td} &= R_r i_{td} - s\omega_1 L_r i_{tq} \\ u_{tq} &= R_r i_{tq} + s\omega_1 L_r i_{td} \end{aligned} \quad (12)$$

于是得到转子侧变流器的控制策略, 其中 $-s\omega_1 L_r i_{tq}$ 是转子电流 d 轴分量 i_{td} 的补偿项; $s\omega_1 L_r i_{td}$ 是转子电流 q 轴分量 i_{tq} 的补偿项。

并网前后需要对转子侧变流器的控制策略进行切换, 如图 2, 实际上并网前后转子电流控制内环并没有发生变化, 并网前转子侧变流器控制策略的补偿项是并网后控制策略补偿项中 i_{sd} 、 i_{sq} 为零时的特例, 并网前后改变的是转子电流的给定参考值。

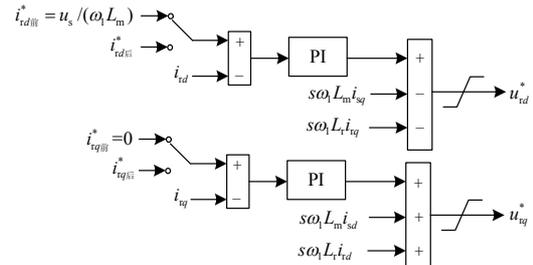


图 2 转子侧变流器控制策略切换

Fig. 2 Control strategy switching for rotor-side converter

2 双馈风电场建模

本文建立的双馈风电场容量为 96 MW, 包括 48 台同种型号的双馈风电机组。这 48 台风电机组分 6 排 8 列布置, 每台风电机组首先经过 37/0.69 kV 箱式变压器升压, 然后由 0.3 km LGJ-95 架空线 T 接到主集电线路 LGJ-185 上, 同一排风机与风机之间相距 0.7 km。6 条主集电线路汇聚到分段单母线上, 经两台容量为 50 MVA 的 115/37 kV 升压变压器升压后, 按扩大单元接线方式汇聚到送出母线上。最后由两回长度为 50 km 的 LGJ-240 架空线路送出, 接入到短路容量为 3 000 MVA 的电力系统中。

具体接线如图 3。机组、变压器、线路参数见附录。

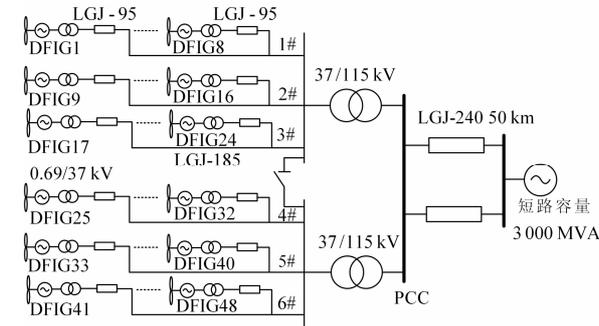


图 3 双馈风电场连接示意图

Fig. 3 DFIG based wind farm connection diagram

3 RT-LAB 实时仿真平台

RT-LAB 实时仿真平台包括上位机和下位机两部分。上位机使用普通的 PC 机，运行 Windows 操作系统以及 RT-LAB 软件包(包括 RT-LAB、RT-EVENTS、ARTEMIS 等)。下位机使用加拿大 Opal-RT 公司生产的并行计算机 OP5600，该机型包含两个 Intel i7-6Core 3.46 GHz 处理器，8 GB 内存，1 块 FPGA 板卡，运行 QNX 或者 RedHawk Linux 实时操作系统。根据仿真系统的规模，可以灵活配置下位机台数。上位机和下位机之间通过 TCP/IP 以太网进行通信，下位机之间通过 IEEE1394 火线进行通信。RT-LAB 仿真平台支持纯数字仿真及实时运行两种工作方式，支持基于 Matlab/Simulink 以及 MATRIXx/SystemBuild 建立的模型，完全集成第三方建模环境(如 StateFlow、StateMate、AMESim 等)，以及 C、C++、Fortran 的合法代码。

模型分割是整个并行仿真系统的核心思想。如果仿真模型较为复杂，无法在单个处理器上实时运行，通过 RT-LAB 提供的工具能够方便地把仿真模型分割成几个规模较小的子模型，然后在多个处理器上并行处理这些子模型。在一个计算步长内，计算机系统不但要解算仿真模型，还要管理任务，如读写 I/O、刷新系统时钟、处理通信，这就限制了用于解算仿真模型的系统资源，从而限制了单处理器上计算模型的大小。RT-LAB 通过优化资源配置，降低了管理任务占用的系统资源，提高了计算复杂模型的能力。

Simulink 模型需要按照 RT-LAB 的要求进行一定的改造，才能运行在仿真平台上。在 RT-LAB 里，所有的顶层子系统的命名都含有一个前缀，以区分它们的功能：“SC_”表示控制台子系统，一个模型中只能有一个控制台，用来查看数据和在线调参；“SM_”表示主计算子系统，一个模型中只能有一

个主计算子系统；“SS_”表示从计算子系统，一个模型里可以有多个从计算子系统。每一个 SM 或 SS 模块占用实时仿真器 OP5600 的一个计算单元(Core)。本文中的双馈风电场模型的顶层子系统如图 4，其中 SC_console 模块采集仿真中的相应信号进行观测，并输出控制信号；六个 SS 模块对应着 6 排双馈风电机组；SM_Power_System 模块对应着 35 kV 母线至电力系统一侧的模型；Stubline 是 RT-LAB 提供的解耦模块，它的作用是使 SM、SS 模块中的电气模型解耦，实现并行计算。

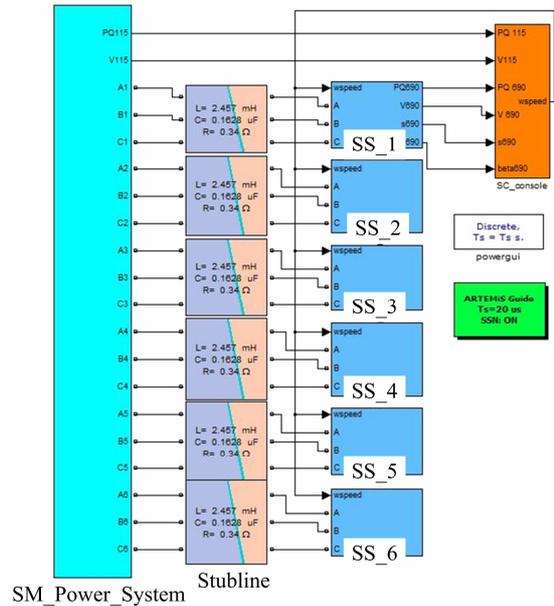


图 4 风电场模型顶层子系统

Fig. 4 Top subsystem of wind farm model

4 仿真分析

4.1 按最大功率跟踪控制发电

双馈风电场模型按最大功率跟踪控制(Maximum Power Point Tracking, MPPT)^[16]发电的仿真结果如图 5 所示，双馈风电机组按单位功率因数方式运行。图 5 (a)为 DFIG8(见图 3)桨距角随时间变化的波形。图 5 (b)为 DFIG8 发出的有功功率和无功功率随时间变化的波形，当风速过大时，风电机组在恒功率段运行，同时变桨动作，将发出的有功功率限制在额定功率 2 MW。图 5(c)为风电场 PCC 点(见图 3)有功功率和无功功率随时间变化的波形，由图可见，有功功率的波动，引起了无功功率的波动。图 5(d)为 DFIG8 机端电压和风电场 PCC 点的电压标幺值，风速的随机变化造成风电场输出功率的随机变化，进而引起电压的波动。需要指出的是，仿真中的风速是白噪声序列通过线性滤波器得到的随机风速，各机组风况相同。考虑各机组风况差异

及风速相关性的研究将在后续工作中给出。

4.2 按调度指令发电

当风电场送出断面潮流受限制时, 风电场接收调度中心的指令, 将有功上限值按平均分配方式下发至各机组。风电机组根据转速-功率曲线得到有功上限值对应的转速上限值。当风速增大, 引起转速越限时, 变桨动作, 限制机组功率。如图 6 所示, 实线表示按最大功率跟踪控制发电的情况, 虚线表示最大有功出力减少至额定值 70% 的情况。图 6(a) 为 DFIG8 桨距角随时间变化的波形, 图 6(b) 为 DFIG8 输出的有功功率随时间变化的波形, 图 6(c) 为 PCC 点的无功功率随时间变化的波形, 图 6(d) 为 PCC 点的有功功率随时间变化的波形。

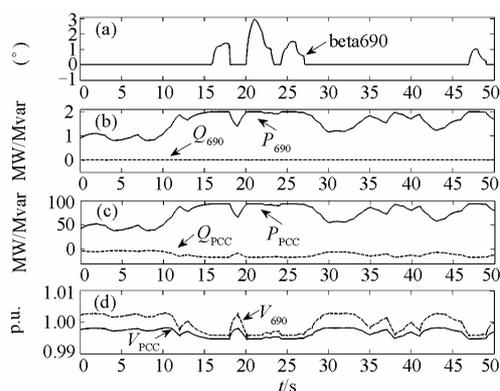


图 5 按最大功率跟踪控制发电

Fig. 5 Generation with MPPT strategy

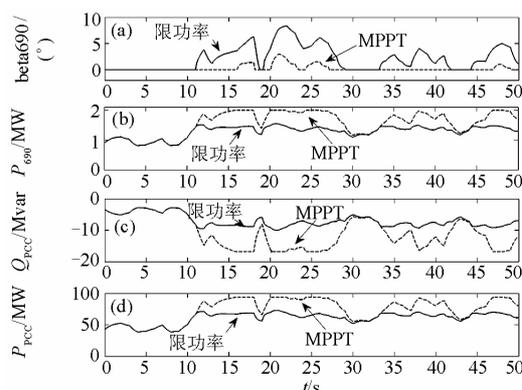


图 6 按调度指令发电

Fig. 6 Generation with dispatching orders

4.3 双馈风电机组并网

为了观察风电机组并网对风电场造成的扰动, 将仿真风速统一设置为 10 m/s。图 7 是 DFIG8 并网时的仿真结果。在 $t=1.0$ s 时刻, DFIG8 定子侧并网, 并网后双馈机组按最大功率跟踪控制发电。图 7(a) 为定子侧 a 相电流并网前后的波形, 可见软并网方式下电流冲击不大。图 7(b) 为 DFIG8 发出的有功、

无功功率并网前后的波形, 风电机组在并网后逐渐运行到最大功率点, 所以有功功率在并网后逐渐增大并稳定在一个值。图 7(c) 为并网前后 DFIG8 机端电压、35 kV 母线及 PCC 点电压标么值, 可见空载并网基本不影响 35 kV 母线及 PCC 点电压, 并网后由于 DFIG8 向系统倒送有功功率, 抬升了自身的机端电压。

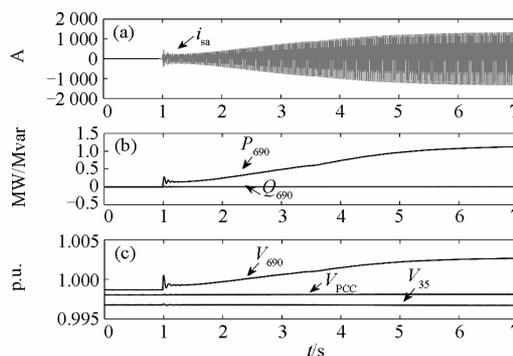


图 7 双馈风电机组并网

Fig. 7 DFIG grid-connection

4.4 双馈风电机组解列

为了观察风电机组解列对风电场造成的扰动, 将仿真风速统一设置为 10 m/s。图 8 是 DFIG8 解列时的仿真结果。在解列前, DFIG8 按最大功率跟踪控制发电。 $t=15.0$ s, 改变转子侧变流器控制策略, 使电机定子电流迅速减小。 $t=15.4$ s 时, 定子电流接近为零, 断路器动作, 使定子与电网脱离。图 8(a) 为定子侧 a 相电流在解列前后的波形, 图 8(b) 为 DFIG8 发出的有功、无功功率在解列前后的波形, 图 8(c) 为解列前后 DFIG8 机端电压、35 kV 母线及 PCC 点电压标么值。由图 8 可见, 电流环有较快的响应速度, 但在响应时, DFIG8 有功功率发生较大振荡, 使机端电压发生较大波动, 但对 PCC 点电压基本没有影响。

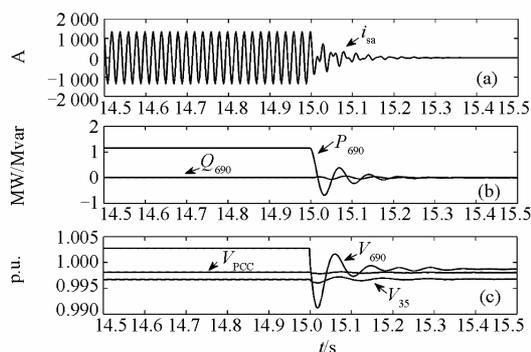


图 8 双馈风电机组解列

Fig. 8 DFIG cutting-off

现分别列出以上 4 种运行工况的仿真耗时，以便读者了解 RT-LAB 仿真平台的计算性能。由于每次仿真的耗时都有细微差异，所以取模型仿真步长为 20 μ s，仿真时间为 60 s，运行三次，取仿真耗时的平均值。按最大功率跟踪控制、按调度指令发电、双馈风电机组并网、双馈风电机组解列工况的仿真耗时分别为：121.3 s，120.5 s，115.3 s，115.4 s。

5 结论

本文考虑了风电场内部集电线路的参数，建立了包含 48 台 2 MW 双馈机组的风电场动态详细模型。仿真结果表明，该模型不仅能反映风电场按最大功率跟踪控制发电的工况，还能模拟风电机组并网、解列的动态过程。当风电场送出断面潮流受限时，还能将调度指令下发到各机组，限制其最大有功出力。本文所建立的基于 RT-LAB 的风电场模型不论是对风电场动态等值模型的评估，还是对风电场控制器的研究开发，都具有重大的意义。

附录

表 1 双馈风电机组参数

Table 1 Parameters of DFIG

参数	数值
额定功率	2.0 MW
额定频率	50 Hz
极对数	2
额定电压	690 Vrms
定子电阻	0.004 88 pu
转子电阻	0.005 49 pu
定子漏感	0.138 6 pu
转子漏感	0.149 3 pu
励磁电感	3.952 7 pu
惯性时间常数	3.5 s

表 2 变压器参数

Table 2 Parameters of transformers

变压器型号	S11-2150/35	SZ10-50000/110
类型	三相双绕组	三相双绕组
额定容量	2 150 kVA	50 MVA
变比	37±2×2.5%/0.69 kV	115±8×1.25%/37 kV
空载损耗	2.1 kW	37.6 kW
负载损耗	17.1 kW	216 kW
空载电流	0.25%	0.40%
短路阻抗	6.5%	10.5%
联接组	Dyn11	YNd11

表 3 架空线路参数

Table 3 Parameters of overhead lines

线路型号	LGJ-95	LGJ-185	LGJ-240
电阻/(Ω /km)	0.33	0.17	0.132
电抗/(Ω /km)	0.385	0.386	0.386
电容/(nF/km)	—	—	9.04

参考文献

- [1] 葛江北, 周明, 李庚银. 大型风电场建模综述[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(17): 146-153.
GE Jiangbei, ZHOU Ming, LI Gengyin. Review on large-scale wind farm modeling[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(17): 146-153.
- [2] 米增强, 苏勋文, 杨奇逊, 等. 风电场动态等值模型的多机表征方法[J]. 电工技术学报, 2010, 25(5): 162-169.
MI Zengqiang, SU Xunwen, YANG Qixun, et al. Multi-machine representation method for dynamic equivalent model of wind farms[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(5): 162-169.
- [3] 徐玉琴, 张林浩, 王娜. 计及尾流效应的双馈机组风电场等值建模研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(1): 70-76.
XU Yuqin, ZHANG Linhao, WANG Na. Study on equivalent model of wind farms with DFIG considering wake effects[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(1): 70-76.
- [4] 黄梅, 万航羽. 在动态仿真中风电场模型的简化[J]. 电工技术学报, 2009, 24(9): 147-152.
HUANG Mei, WAN Hangyu. Simplification of wind farm model for dynamic simulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(9): 147-152.
- [5] 付蓉, 谢俊, 王保云. 风速波动下双馈机组风电场动态等值[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(15): 1-6.
FU Rong, XIE Jun, WANG Baoyun. Study on dynamic equivalence model of wind farms with DFIG under wind turbulence[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(15): 1-6.
- [6] 乔嘉廉, 鲁宗相, 闵勇, 等. 风电场并网的新型实用等效方法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(4): 209-213.
QIAO Jiageng, LU Zongxiang, MIN Yong, et al. New dynamic equivalence method for grid-connected wind farm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(4): 209-213.
- [7] 包能胜, 徐军平, 倪维斗, 等. 大型风电场失速型机组等值建模的研究[J]. 太阳能学报, 2008, 28(11): 1284-1289.
BAO Nengsheng, XU Junping, NI Weidou, et al.

- Investigation of equivalent modeling of multiple stall wind turbine systems on large scale wind farm[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2008, 28(11): 1284-1289.
- [8] FERNÁNDEZ L M, JURADO F, SAENZ J R. Aggregated dynamic model for wind farms with doubly fed induction generator wind turbines[J]. *Renewable Energy*, 2008, 33(1): 129-140.
- [9] 金宇清, 黄桦, 鞠平, 等. 用于风电场聚合建模的内部集电网络变换方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2012, 40(16): 34-41.
JIN Yuqing, HUANG Hua, JU Ping, et al. Collector network transformation methods for wind farm aggregated modeling[J]. *Power System Protection and Control*, 2012, 40(16): 34-41.
- [10] 林成武, 王凤翔, 姚兴佳. 变速恒频双馈风力发电机励磁控制技术[J]. *中国电机工程学报*, 2004, 23(11): 122-125.
LIN Chengwu, WANG Fengxiang, YAO Xingjia. Study on excitation control of VSCF doubly fed wind power generator[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2004, 23(11): 122-125.
- [11] 刘其辉, 贺益康, 卞松江. 变速恒频风力发电机空载并网控制[J]. *中国电机工程学报*, 2004, 24(3): 6-11.
LIU Qihui, HE Yikang, BIAN Songjiang. Study on the no-load cutting-in control of the variable-speed constant-frequency wind-power generator[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2004, 24(3): 6-11.
- [12] OPAT-RT. RT-LAB version 8.3 user guide[M]. Canada: OPAL-RT Inc, 2007.
- [13] PENA R, CLARE J C, ASHER G M. Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable-speed wind-energy generation[J]. *IEE Proceedings-Electric Power Applications*, 1996, 143(3): 231-241.
- [14] 吴国祥, 马祎炜, 陈国呈, 等. 双馈变速恒频风力发电空载并网控制策略[J]. *电工技术学报*, 2007, 22(7): 169-175.
WU Guoxiang, MA Yiwei, CHEN Guocheng, et al. Research on idle load grid-connection control strategy for variable-speed constant-frequency wind power generation[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2007, 22(7): 169-175.
- [15] 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 Qihui, XIE Mengli. 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.
- [16] 赵梅花, 杨勇, 钟沁宏. 新型混合励磁直驱式风力发电系统 MPPT 控制[J]. *电工技术学报*, 2013, 28(5): 30-36.
ZHAO Meihua, YANG Yong, ZHONG Qinhong. Tracking the peak power points for a wind energy conversion system based on hybrid excitation synchronous generator[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2013, 28(5): 30-36.

收稿日期: 2014-05-01; 修回日期: 2014-06-06

作者简介:

董建政(1989-), 男, 硕士研究生, 研究方向为风力发电; E-mail: tjudong@163.com

李征(1961-), 女, 教授, 研究方向为风力发电、控制系统;

蔡旭(1964-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为智能电网技术、大功率电力电子、风力发电。

(编辑 周金梅)