

1-2-2019

Modeling and Simulation of DFIG Unit with Stator Inter-Turn Fault

Boqiang Xu

School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

Liling Sun

School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

Wenjuan Du

School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Modeling and Simulation of DFIG Unit with Stator Inter-Turn Fault

Abstract

Abstract: *The mathematical model of doubly fed induction generator (DFIG) with stator inter-turn fault, which presents itself as standard form state space equation, is deduced and established, for the first time. The corresponding simulation model, i.e. Matlab S-function block is developed and embedded in a Matlab built-in routine simulating DFIG unit comprising wind turbine, converter, related mechanical/ electrical control and DFIG. The simulation model of DFIG unit with stator inter-turn fault is established, which is a beneficial extension of Matlab simulation. The stability of DFIG unit under the healthy and faulty conditions is analyzed by using simulation. The results show that stator inter-turn fault leads to small vibration and deteriorates the stability of DFIG unit under the critical conditions of low and high wind speed.*

Keywords

DFIG (doubly fed induction generator), stator inter-turn fault, model, simulation, stability

Recommended Citation

Xu Boqiang, Sun Liling, Du Wenjuan. Modeling and Simulation of DFIG Unit with Stator Inter-Turn Fault[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(1): 205-215.

定子匝间故障下 DFIG 机组的模型与仿真

许伯强, 孙丽玲, 杜文娟

(华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206)

摘要: 建立了体现为标准形式状态空间方程的定子匝间故障下 DFIG(Doubly Fed Induction Generator) 的数学模型。在 Matlab 环境下建立了其仿真模型——S-函数模块, 将之嵌入 Matlab 内置的 DFIG 机组(由风机、变流器、相关机械与电气控制以及 DFIG 组成)仿真例程, 构建了定子匝间故障下的 DFIG 机组仿真模型, 这一工作是对 Matlab 的有益拓展。进而, 对 DFIG 机组在正常与故障情况下的运行稳定性做了仿真分析, 结果表明: 在低风速与高风速临界情况下, 定子匝间故障将导致 DFIG 机组转速小幅振荡而恶化其运行稳定性。

关键词: 双馈感应发电机; 定子匝间故障; 模型; 仿真; 稳定性

中图分类号: TM315

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X(2018)01-0205-11

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201801026

Modeling and Simulation of DFIG Unit with Stator Inter-Turn Fault

Xu Boqiang, Sun Liling, Du Wenjuan

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The mathematical model of doubly fed induction generator (DFIG) with stator inter-turn fault, which presents itself as standard form state space equation, is deduced and established, for the first time. The corresponding simulation model, i.e. Matlab S-function block is developed and embedded in a Matlab built-in routine simulating DFIG unit comprising wind turbine, converter, related mechanical/electrical control and DFIG. The simulation model of DFIG unit with stator inter-turn fault is established, which is a beneficial extension of Matlab simulation. The stability of DFIG unit under the healthy and faulty conditions is analyzed by using simulation. The results show that stator inter-turn fault leads to small vibration and deteriorates the stability of DFIG unit under the critical conditions of low and high wind speed.

Keywords: DFIG (doubly fed induction generator); stator inter-turn fault; model; simulation; stability

引言

作为清洁可再生能源, 风电具有广阔发展前景, 基于双馈感应发电机(DFIG, Doubly Fed Induction Generator)的变速恒频机组则是当前主流

的风力发电机组^[1]。因此, DFIG 的模型、仿真以及运行特性(特别是稳定性)等问题广受关注^[2-7]; 文献[2]在 Matlab 环境下, 建立了包含风速、风力机及其机械控制、DFIG、变流器及其控制的风电机组整体动态模型, 并分析了其并网运行特性; 文献[3]建立了适用于风场稳定性分析的 DFIG 动态模型, 并研究了 DFIG 控制对于风场稳定性的影响; 文献[4]对经典的 5 阶 DFIG 模型做了简化以高效分析其暂态运行特性; 文献[5]建立了全面计及控制



收稿日期: 2016-01-19 修回日期: 2016-05-05;
基金项目: 国家自然科学基金(51277077);
作者简介: 许伯强(1972-), 男, 河北, 博士, 教授, 研究方向为电机状态监测与故障诊断; 孙丽玲(1972-), 女, 河北, 博士, 副教授, 研究方向为电机状态监测与故障诊断。

<http://www.china-simulation.com>

• 205 •

(包括风机桨距控制、变流器直流电压控制, 风机层/DFIG 层控制与交互)系统而适用于控制方案、机电动态以及故障穿越能力分析的DFIG风电机组模型; 文献[6]在 Matlab 环境下, 建立了风机的疲劳、空气动力、结构及扰动模型, 并将之与 DFIG 的空间矢量模型以及变流器控制算法结合, 从而建立了 DFIG 风电机组的综合模型; 文献[7]完成了 DFIG 风电机组的动态建模, 并对其稳定性问题做了仿真分析。

另一方面, 风电机组通常尽可能连续运行以捕获最大风能, 并且处于恶劣环境(特别是海上机组), 因此故障是不可避免的^[8-9]。以陆上风电机组为例, 每台每年发生 1~3 次故障属普遍情况, 作为其组件之一的风力发电机则具有较高故障比率^[8-9]。具体至 DFIG, 直接针对其故障类型、发生概率的调查/研究尚未见诸报道, 但不妨借鉴同为“感应”属性的感应电动机的相关资料, 即文献[10-11]。据此可以推断: 匝间故障应是 DFIG 定子绕组的典型故障之一, 且其发展往往导致相间短路或接地短路等严重的定子绕组故障, 因此必须对其模型、仿真以及检测等一系列问题展开研究^[12-13]。文献[12]采用 DFIG 的绕组函数模型对其定子匝间故障进行仿真分析, 并对与之相关的转子电流特定谐波分量的产生机理以及定子匝间故障检测方法做了深入探讨。文献[13]建立了计及定子匝间故障的 DFIG 混杂(ABC 与 dq0 坐标系相结合)模型, 据此对该故障进行仿真分析, 并提出了基于定子电流信号小波分析的检测方法。

综上所述, 文献[2-7]旨在 DFIG 的控制、运行特性等问题, 因此建立、使用包含风速、风力机、DFIG、变流器及相关机械、电气控制的 DFIG 风电机组整体数学模型, 但其中的 DFIG 模型未计及定子匝间故障; 文献[12-13]旨在定子匝间的故障特征与检测方法, 仅关注该故障下的 DFIG 模型, 而忽视风速、风力机、变流器及相关机械、电气控制。

事实上, 就感应电机而言, 定子匝间是一种渐进性故障——自发生伊始而发展至相间短路、接地短路等严重故障需经历一定时间^[14-15]。文献[14]提供了一实际例证: 一台感应电机发生定子匝间故障后, 仍然持续全压运行 750 h(其间启动 67 次)。文献[15]亦提及定子匝间故障发生伊始而发展至相间短路、接地短路等严重故障可能长至数分钟或者更长(甚至太长)。这就意味着, 感应电机, 包括 DFIG 是可以带定子匝间故障而“病态”运行的。同时, DFIG 往往处于偏远地区而难于及时维护, 这进一步提升了 DFIG 带定子匝间故障而“病态”运行的概率。

因此, 建立计及定子匝间故障的 DFIG 模型并计及风速、风力机、变流器及相关机械、电气控制的 DFIG 机组整体模型, 据此研究其稳定性等运行问题是必要的。本文即致力于此。

此外, 基于 Matlab 环境而实施仿真业已成为分析 DFIG 机组以及同步风力发电机组、感应电机、永磁同步电动机乃至分布式发电系统的有力工具^[2,6,16-19], 本文亦如此展开分析。

1 DFIG 数学模型

本文针对一包含电网、线路与 DFIG 风电机组的典型系统展开研究。该系统即是 MatlabR2012a Simulink 中关于 DFIG 机组的示例程序 power_wind_dfig_det.mdl, 参阅文献[20]。图 1 表示 DFIG 风电机组的基本组成, 包括风力机、变流器以及 DFIG。

风速、风力机、变流器及相关机械与电气控制模型参阅文献[2-7], Matlab 示例程序 power_wind_dfig_det.mdl 已经对其完成了集成与仿真^[20]。本文重点在于 DFIG 模型及其 Matlab 实现, 因此不予赘述。

基于多回路理论, 建立 DFIG 数学模型, 假设 DFIG 符合理想电机条件^[21], 定子/转子三相绕组 Y 接线, 转子已经归算至定子侧。

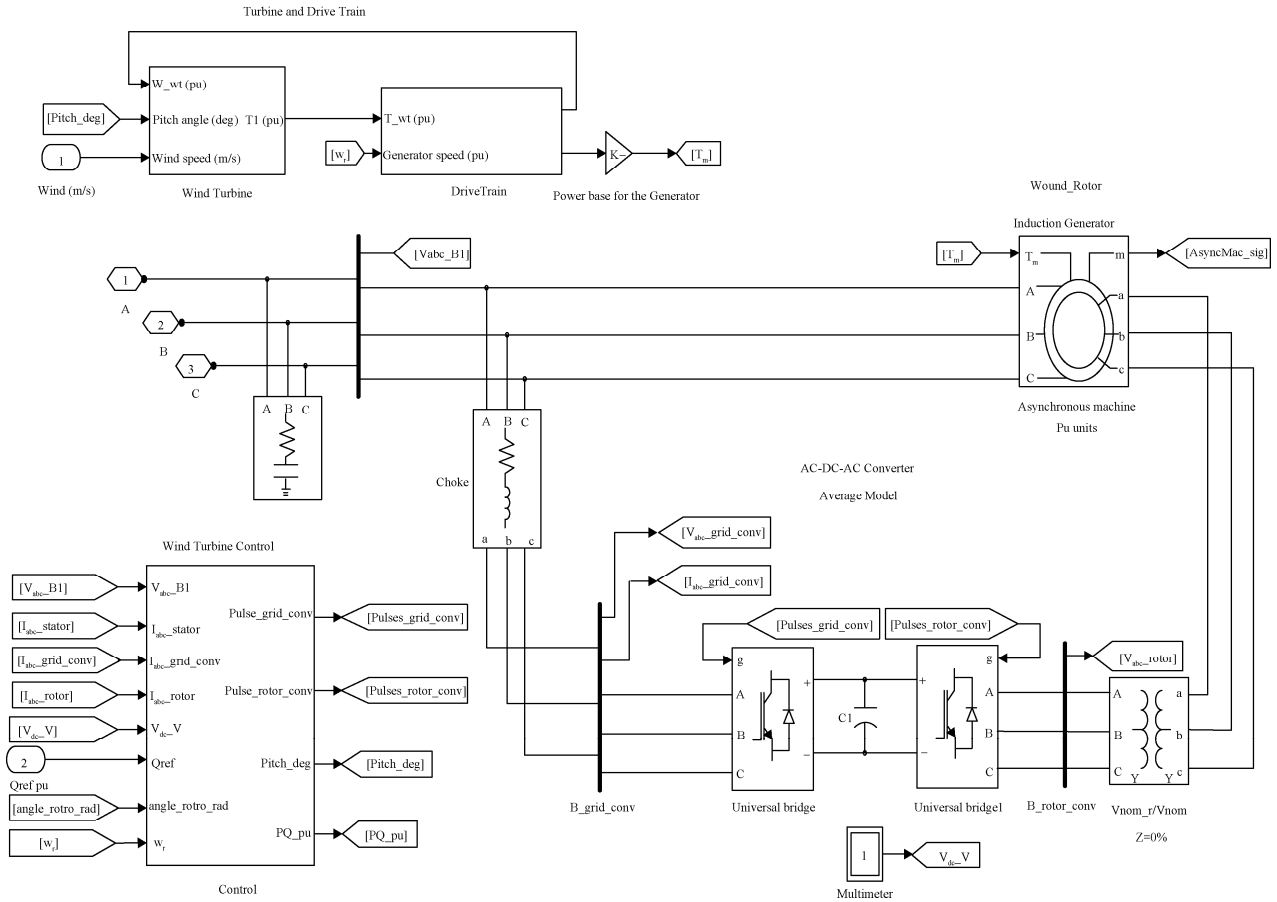


图 1 双馈风力发电机组的基本组成
Fig. 1 Schematic of DFIG unit

正常情况下 DFIG 在 ABC 坐标系统下的数学模型参阅文献[21-23], 此处不予赘述。

正常情况下的 DFIG 数学模型及其仿真已包含于 Matlab 示例程序 power_wind_dfig_det.mdl 之中, 但并未涉及定子匝间故障等 DFIG 内部故障情况。因此, 探讨定子匝间故障情况下的 DFIG 数学模型及其 Matlab 实现仍具意义, 这是对 Matlab 的有益拓展。

文献[24]指出, DFIG 发生定子匝间故障的重要原因之一即是雷击、变桨距控制以及变流器电力电子器件高速开关所导致的过电压, 而定子相绕组的第一个线圈承受该过电压的绝大部分。因此, 定子匝间故障大多发生于定子相绕组的第一个线圈。假定定子 A 相绕组发生匝间故障, 如图 2 所示。图 2 中, R_g 表示匝间故障回路过渡电阻; i_g 表示匝间故障回路电流; i_{sA} 、 i_{sB} 、 i_{sC} 分别表示定子 A、B、

C 三相绕组电流。

显然, 定子方面增加一个新的电流回路——匝间故障回路(其它回路的选取与正常情况相同)。采用文献[13, 21-23, 25]方法, 即可建立定子匝间故障情况下的 DFIG 数学模型, 如式(1)、式(2)、式(3)、式(4)所示。

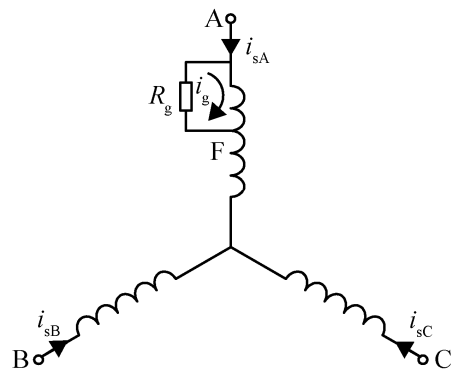


图 2 定子匝间故障示意图
Fig. 2 Illustration of stator inter-turn fault

$$U=RI+p(\Psi) \quad (1)$$

$$\Psi=MI \quad (2)$$

$$T_e=(P/2)I^T(\partial M/\partial \gamma)I \quad (3)$$

$$p(\omega_r)=(P/J)(T_e-T_m-F\omega_r/P) \quad (4)$$

其中, $U=[u_{sA} \ u_{sB} \ u_{sC} \ u_{ra} \ u_{rb} \ u_{rc} \ 0]^T$ 、 $I=[i_{sA} \ i_{sB} \ i_{sC} \ i_{ra} \ i_{rb} \ i_{rc} \ i_g]^T$ 、 $\Psi=[\psi_{sA} \ \psi_{sB} \ \psi_{sC} \ \psi_{ra} \ \psi_{rb} \ \psi_{rc} \ \psi_g]^T$, 而电阻矩阵 R 、电感矩阵 M 的展开形式以及其中各个电阻、电感参数的计算, 参阅文献[13, 25]。式(1)~(4)中, F 表示粘性摩擦系数; J 表示转动惯量; P 表示极对数; T_e 表示电磁转矩; T_m 表示机械转矩; i_{ra} 、 i_{rb} 、 i_{rc} 分别表示转子 a、b、c 三相绕组电流(归算值); u_{ra} 、 u_{rb} 、 u_{rc} 分别表示转子 a、b、c 三相绕组电压(归算值); u_{sA} 、 u_{sB} 、 u_{sC} 分别表示定子 A、B、C 三相绕组电压; $p=d/dt$ 表示微分算子; γ 表示转子 a 相绕组轴线领先于定子 A 相绕组轴线的空间电弧度; ω_r 表示转子电角速度; ψ_g 表示匝间故障回路磁链; ψ_{ra} 、 ψ_{rb} 、 ψ_{rc} 分别表示转子 a、b、c 三相绕组磁链(归

$$C = \begin{bmatrix} \cos \gamma' & -\sin \gamma' & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \cos(\gamma' - 2\pi/3) & -\sin(\gamma' - 2\pi/3) & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \cos(\gamma' + 2\pi/3) & -\sin(\gamma' + 2\pi/3) & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos(\gamma' - \gamma) & -\sin(\gamma' - \gamma) & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos(\gamma' - \gamma - 2\pi/3) & -\sin(\gamma' - \gamma - 2\pi/3) & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos(\gamma' - \gamma + 2\pi/3) & -\sin(\gamma' - \gamma + 2\pi/3) & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

在以上各式中, i_{rd} 、 i_{rq} 、 i_{r0} 分别表示转子 d、q、0 轴绕组电流(归算值); i_{sd} 、 i_{sq} 、 i_{s0} 分别表示定子 d、q、0 轴绕组电流; u_{rd} 、 u_{rq} 、 u_{r0} 分别表示转子 d、q、0 轴绕组电压(归算值); u_{sd} 、 u_{sq} 、 u_{s0} 分别表示定子 d、q、0 轴绕组电压; γ' 表示同步旋转坐标轴 d 轴领先于定子 A 相绕组轴线的空间电弧度; ψ_{rd} 、 ψ_{rq} 、 ψ_{r0} 分别表示转子 d、q、0 轴绕组磁链(归算值); ψ_{sd} 、 ψ_{sq} 、 ψ_{s0} 分别表示定子 d、q、0 轴绕组磁链。

显然, $U=CU_{dq0}$ 、 $I=CI_{dq0}$ 、 $\Psi=C\Psi_{dq0}$ 成立。

根据式(1)、式(2), 可得:

$$CU_{dq0}=RCI_{dq0}+p(MCI_{dq0})$$

上式两边左乘 C^{-1} , 即得:

算值); ψ_{sA} 、 ψ_{sB} 、 ψ_{sC} 分别表示定子 A、B、C 三相绕组磁链。

式(1)、式(2)、式(3)与式(4)即为定子匝间故障情况下 DFIG 在相坐标系统的数学模型, 据此即可在 Matlab 环境下对其进行仿真分析。但是, 电感系数矩阵 M 的许多元素与转子位置角 γ 相关, 因而是时变的、复杂的。这就使 DFIG 数学模型的求解占用大量 CPU 机时与内存。为此, 可将 DFIG 在相坐标系统的数学模型变换至 dq0 坐标系统, 从而实现模型简化^[2-7,13,21-23,25]。

文献[13, 25]已经推导出了定子匝间故障情况下 DFIG 在 dq0 坐标系统的数学模型, 在此加以简介。

定义 U_{dq0} 、 I_{dq0} 、 Ψ_{dq0} 如下:

$$U_{dq0}=[u_{sd} \ u_{sq} \ u_{s0} \ u_{rd} \ u_{rq} \ u_{r0} \ 0]^T$$

$$I_{dq0}=[i_{sd} \ i_{sq} \ i_{s0} \ i_{rd} \ i_{rq} \ i_{r0} \ i_g]^T$$

$$\Psi_{dq0}=[\psi_{sd} \ \psi_{sq} \ \psi_{s0} \ \psi_{rd} \ \psi_{rq} \ \psi_{r0} \ \psi_g]^T$$

引入变换矩阵 C 如下:

$$U_{dq0}=C^{-1}RCI_{dq0}+C^{-1}p(MCI_{dq0})$$

将 R 、 M 中各个电阻、电感参数的计算式^[13,25]代入上式并推导, 最终获得定子匝间故障情况下 DFIG 在 dq0 坐标系统的回路电压方程, 示于式(5)。

$$U_{dq0}=A_{dq0}pI_{dq0}+B_{dq0}I_{dq0} \quad (5)$$

类似地, 推导定子匝间故障情况下 DFIG 在 dq0 坐标系统的电磁转矩表达式, 示于式(6)。

$$T_e=1.5PL_m[-i_{sd}i_{rq}+i_{sq}i_{rd}-1.5\mu i_g(i_{rd}\sin\gamma'-i_{rq}\cos\gamma')] \quad (6)$$

式(6)中, L_m 表示激磁电感; μ 表示匝间故障匝数与一相总匝数的比值。

式(5)、式(6)与式(4)即为定子匝间故障情况下 DFIG 在 dq0 坐标系统的数学模型。但遗憾的是, 该数学模型并不是解析意义下标准形式的状态空

间方程, 直接据此求解必然涉及繁杂的矩阵求逆运算从而耗费大量 CPU 机时与内存, 本文则解决了这一问题。

一般而言, DFIG 定、转子三相绕组均为 Y 接, 则 $i_{s0}=0$ 、 $i_{r0}=0$ 强制成立。并且, 由于转子三相绕组对称, $u_{r0}=0$ 成立。因此, 将 i_{s0} 、 i_{r0} 、 u_{r0} 从式(5)

$$A_{dq0} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & 0 & L_m & 0 & 0 & \frac{2}{3}\mu L_s \cos \gamma' \\ 0 & L_s & 0 & 0 & L_m & 0 & -\frac{2}{3}\mu L_s \sin \gamma' \\ 0 & 0 & L_{s0} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{3}\mu L_{sl} \\ L_m & 0 & 0 & L_r & 0 & 0 & \frac{2}{3}\mu L_m \cos \gamma' \\ 0 & L_m & 0 & 0 & L_r & 0 & -\frac{2}{3}\mu L_m \sin \gamma' \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_{r0} & 0 \\ \mu L_s \cos \gamma' & -\mu L_s \sin \gamma' & \mu L_{sl} & \mu L_m \cos \gamma' & -\mu L_m \sin \gamma' & 0 & \mu^2 \left(\frac{2}{3}L_m + L_{sl} \right) \end{bmatrix}$$

$$B_{dq0} = \begin{bmatrix} r_s & -w_1 L_s & 0 & 0 & -w_1 L_m & 0 & \frac{2}{3}r_{sg} \cos \gamma' \\ w_1 L_s & r_s & 0 & w_1 L_m & 0 & 0 & -\frac{2}{3}r_{sg} \sin \gamma' \\ 0 & 0 & r_s & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{3}r_{sg} \\ 0 & -(w_1 - w_r)L_m & 0 & r_r & -(w_1 - w_r)L_r & 0 & -w_r \frac{2}{3}\mu L_m \sin \gamma' \\ (w_1 - w_r)L_m & 0 & 0 & (w_1 - w_r)L_r & r_r & 0 & -w_r \frac{2}{3}\mu L_m \cos \gamma' \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_r & 0 \\ r_{sg} \cos \gamma' - w_1 \mu L_s \sin \gamma' & -r_{sg} \sin \gamma' - w_1 \mu L_s \cos \gamma' & r_{sg} & -w_1 \mu L_m \sin \gamma' & -w_1 \mu L_m \cos \gamma' & 0 & R_g + r_{sg} \end{bmatrix}$$

其中, L_r 表示转子 d、q 轴绕组自感(归算值); L_{r0} 表示转子 0 轴绕组自感(归算值); L_s 表示定子 d、q 轴绕组自感; L_{s0} 表示定子 0 轴绕组自感; L_{sl} 表示定子一相绕组漏感; r_r 表示转子一相绕组电阻(归算值); r_s 表示定子一相绕组电阻; r_{sg} 表示定子 A 相绕组匝间故障部分的电阻; ω_1 表示同步旋转电角速度。

必须注意: 由于定子匝间故障的存在, 实际上 $u_{s0} \neq 0$, 其表达式如式(8)所示。

$$u_{s0} = r_{sg} i_g / 3 + \mu(L_s - L_m) (p i_g) / 3 \quad (8)$$

中剔除而获得一简化方程, 示于式(7)。

$$U_{dq} = A_{dq} p I_{dq} + B_{dq} I_{dq} \quad (7)$$

式(7)中, $U_{dq} = [u_{sd} \ u_{sq} \ u_{rd} \ u_{rq} \ 0]^T$ 、 $I_{dq} = [i_{sd} \ i_{sq} \ i_{rd} \ i_{rq}]^T$, 系数矩阵 A_{dq} 、 B_{dq} 可分别由式(5)中 A_{dq0} 、 B_{dq0} 删除其第 3 行、第 3 列与第 6 行、第 6 列获得, 而式(5)中系数矩阵 A_{dq0} 、 B_{dq0} 的展开形式如下:

对式(7)做解析推导, 最终获得期望的标准形式的状态空间方程, 如式(9)所示。

$$p I_{dq} = A_s I_{dq} + B_s U_{dq} \quad (9)$$

式(9)中, 系数矩阵 A_s 、 B_s 的展开形式示于式(10)~(13)。

式(9)、式(6)与式(4)即为定子匝间故障情况下 DFIG 在 dq0 坐标系统的数学模型。

注意: 上述数学模型由解析推导得出, 并采用 Matlab 符号运算功能^[20]做了验证。

需要指出, 上述数学模型是解析意义下标准形

式的状态空间方程(系首次提出),这正是本文的主要贡献之所在。显然,据此求解、仿真可以避免繁杂的矩阵求逆运算而大幅提升效率。在一台 Lenovo 计算机(CPU: Intel i5-3470 2.2 GHz, 内存: 3.3 GB)以 Matlab 语言编制四阶龙格-库塔法数值

求解程序进行测试,结果如下:式(7)、式(6)与式(4)所示数学模型单次求解需时 22 μs ,而本文所建立的、体现为标准形式状态空间方程的数学模型单次求解仅仅需时 6 μs 。

$$A_s = \begin{bmatrix} \frac{r_s L_r}{L_m^2 - L_s L_r} & w_1 - \frac{w_r L_m^2}{L_m^2 - L_s L_r} & \frac{-r_r L_m}{L_m^2 - L_s L_r} & \frac{-w_r L_m L_r}{L_m^2 - L_s L_r} & a_{15} \\ \frac{w_r L_m^2}{L_m^2 - L_s L_r} - w_1 & \frac{r_s L_r}{L_m^2 - L_s L_r} & \frac{w_r L_m L_r}{L_m^2 - L_s L_r} & \frac{-r_r L_m}{L_m^2 - L_s L_r} & a_{25} \\ \frac{-r_s L_m}{L_m^2 - L_s L_r} & \frac{w_r L_m L_s}{L_m^2 - L_s L_r} & \frac{r_r L_s}{L_m^2 - L_s L_r} & w_1 + \frac{w_r L_s L_r}{L_m^2 - L_s L_r} & \frac{-L_m \left(\frac{2}{3} \mu r_s \cos \gamma' + \frac{2}{3} \mu w_r L_s \sin \gamma' \right)}{L_m^2 - L_s L_r} \\ \frac{-w_r L_m L_s}{L_m^2 - L_s L_r} & \frac{-r_s L_m}{L_m^2 - L_s L_r} & -w_1 - \frac{w_r L_s L_r}{L_m^2 - L_s L_r} & \frac{r_r L_s}{L_m^2 - L_s L_r} & \frac{L_m \left(\frac{2}{3} \mu r_s \sin \gamma' - \frac{2}{3} \mu w_r L_s \cos \gamma' \right)}{L_m^2 - L_s L_r} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{2\mu^2 r_s - 3\mu r_s - 3R_g}{\mu^2 L_{sl}} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$a_{15} = \frac{2(\mu r_s + R_g) \cos \gamma'}{\mu L_{sl}} - \frac{4\mu r_s \cos \gamma \sin^2 \gamma'}{3L_{sl}} + \frac{2\mu w_r L_m^2 L_{sl} \sin \gamma' + 2\mu r_s \cos \gamma' [L_r L_{sl} - 2(L_m^2 - L_s L_r) \cos^2 \gamma']}{3(L_m^2 - L_s L_r) L_{sl}} \quad (11)$$

$$a_{25} = -\frac{2(\mu r_s + R_g) \sin \gamma'}{\mu L_{sl}} + \frac{4\mu r_s \cos^2 \gamma' \sin \gamma'}{3L_{sl}} + \frac{2\mu w_r L_m^2 L_{sl} \cos \gamma' - 2\mu r_s \sin \gamma' [L_r L_{sl} - 2(L_m^2 - L_s L_r) \sin^2 \gamma']}{3(L_m^2 - L_s L_r) L_{sl}} \quad (12)$$

$$B_s = \begin{bmatrix} \frac{2(L_m^2 - L_s L_r) \cos^2 \gamma' - L_r L_{sl}}{(L_m^2 - L_s L_r) L_{sl}} & \frac{-\sin(2\gamma')}{L_{sl}} & \frac{L_m}{L_m^2 - L_s L_r} & 0 & \frac{-2 \cos \gamma'}{\mu L_{sl}} \\ \frac{-\sin(2\gamma')}{L_{sl}} & \frac{2(L_m^2 - L_s L_r) \sin^2 \gamma' - L_r L_{sl}}{(L_m^2 - L_s L_r) L_{sl}} & 0 & \frac{L_m}{L_m^2 - L_s L_r} & \frac{2 \sin \gamma'}{\mu L_{sl}} \\ \frac{L_m}{L_m^2 - L_s L_r} & 0 & \frac{-L_s}{L_m^2 - L_s L_r} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{L_m}{L_m^2 - L_s L_r} & 0 & \frac{-L_s}{L_m^2 - L_s L_r} & 0 \\ \frac{-3 \cos \gamma'}{\mu L_{sl}} & \frac{3 \sin \gamma'}{\mu L_{sl}} & 0 & 0 & \frac{3}{\mu^2 L_{sl}} \end{bmatrix} \quad (13)$$

2 DFIG 仿真模型

根据上述 DFIG 数学模型,在 Matlab 环境下采用 S-函数编制、封装 DFIG 模块。关于 S-函数模块的编制、封装,参阅文献[20]。

图 3 为 S-函数 DFIG 模块的示意图,其输入为定子侧母线 B1 三相电压信号 Vabc_B1 以及转子侧母线 B_rotor_conv 三相电压信号 Vabc_rotor,其输

出为定子三相电流信号、转子三相电流信号、转速信号以及电磁转矩信号等,参阅图 1。

需要注意,S-函数 DFIG 模块的输入与输出均是“信号”性质的,Matlab 自身 DFIG 模块的输入与输出则是实际的“电气量”^[20]。而 DFIG 机组在运行过程中,需要实时测量定子三相电流、转子三相电流这些实际的“电气量”并呈送至风机控

制环节, 因此必须将 S-函数 DFIG 模块所输出的定子三相电流信号、转子三相电流信号转换为实际“电气量”而回馈至对应线路。本文采用 Matlab 受控电流源模块解决这一问题。譬如, S-函数 DFIG 模块在计算出定子三相电流信号之后, 通过

三个受控电流源模块将其回馈至定子三相线路, 参阅图 3。这种处理方法简捷、实用, 但将导致“代数环”问题, 从而延缓仿真速度、降低仿真精度^[20]。为此, 添加高频传递函数(截止频率足够高)以消除代数环, 具体参阅文献[26]。

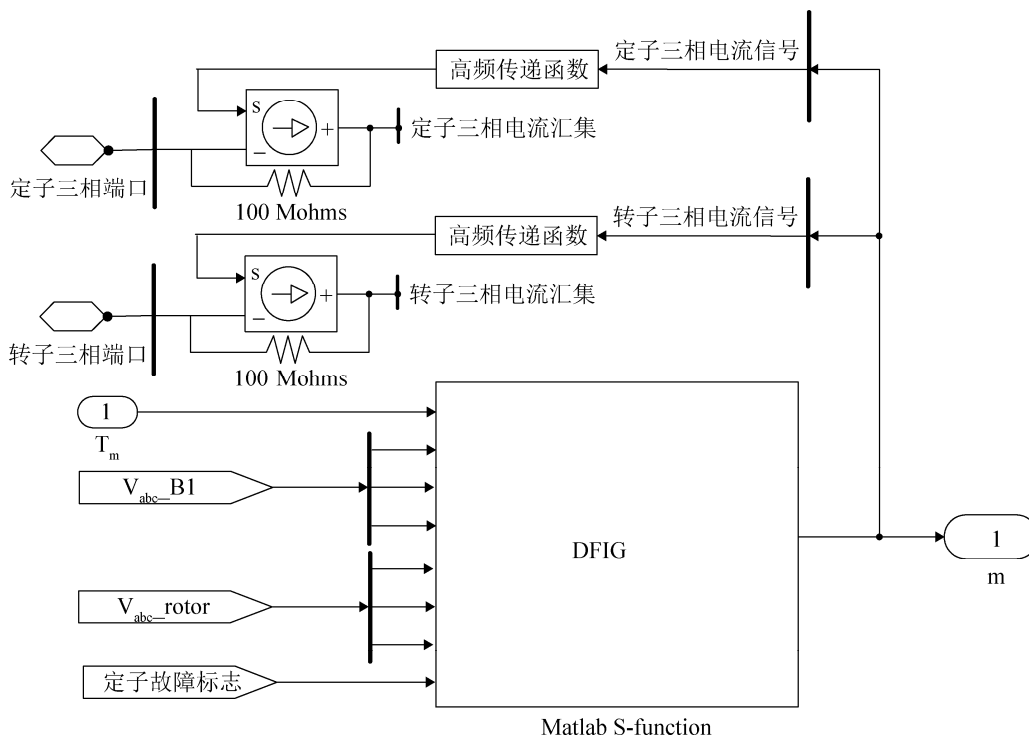


图 3 双馈风力发电机的 S-函数模块
Fig. 3 Schematic of DFIG S-function block

3 DFIG 机组仿真模型

除 DFIG 之外, DFIG 机组尚包括风力机、变流器及相关机械与电气控制环节, Matlab 示例程序 power_wind_dfig_det.mdl 已经对其完成了集成与仿真^[20], 但该示例程序无法计及 DFIG 定子匝间故障情况。为此, 根据式(9)、式(6)与式(4)定子匝间故障情况下 DFIG 在 dq0 坐标系统的数学模型, 在 Matlab 环境下采用 S-函数编制、封装 DFIG 模块, 并以之替换 power_wind_dfig_det.mdl 中、Matlab 自身的 DFIG 模块, 即可获得计及 DFIG 定子匝间故障情况的 DFIG 机组的仿真模型。这一工作是对 Matlab 的有益拓展, 并且充分利用了 Matlab 对风力机、变流器及相关机械与电气控制环节的现

有集成, 简捷易行。这是本文的另一贡献。

4 稳定性分析

本文在 Matlab 环境下, 利用例程 power_wind_dfig_det.mdl 以及上述 S-函数 DFIG 模块对定子匝间故障情况下 DFIG 机组的运行稳定特性做了仿真分析。

由于转子变流器的“励磁”作用, DFIG 实际上具有与同步发电机相同概念的功角特性——电磁转矩 T_e 与功率角 θ 之间的对应关系^[23,27], 因此借鉴同步发电机的“整步转矩系数”—— $dT_e/d\theta$ 研究其稳定性^[21-22]。对于 DFIG 而言, 功率角在空间意义上即是定、转子磁链空间矢量之间的角差^[23,27]。

针对正常与 A 相定子匝间故障($\mu=0.1$ 、 $R_g=$

0.01 Ω)两种情况,利用 power_wind_dfig_det.mdl 例程,分别针对 4 m/s、5 m/s 直至 20 m/s 等不同风速(恒定)进行仿真,从而获得相关仿真数据以待分析。譬如,图 4 给出了 15 m/s 风速时的定子匝间故障回路电流、定子三相电流、电磁转矩以及功率

角的瞬变曲线(设定在 20 s 时刻发生定子匝间故障)。进而,获得 DFIG 功角特性,如图 5 所示。另外,对低风速(以 3 m/s 为例)与高风速(以 21 m/s 为例)情况亦展开仿真,图 6 表示对应的转子转速瞬变曲线(设定在 20 s 时刻发生定子匝间故障)。

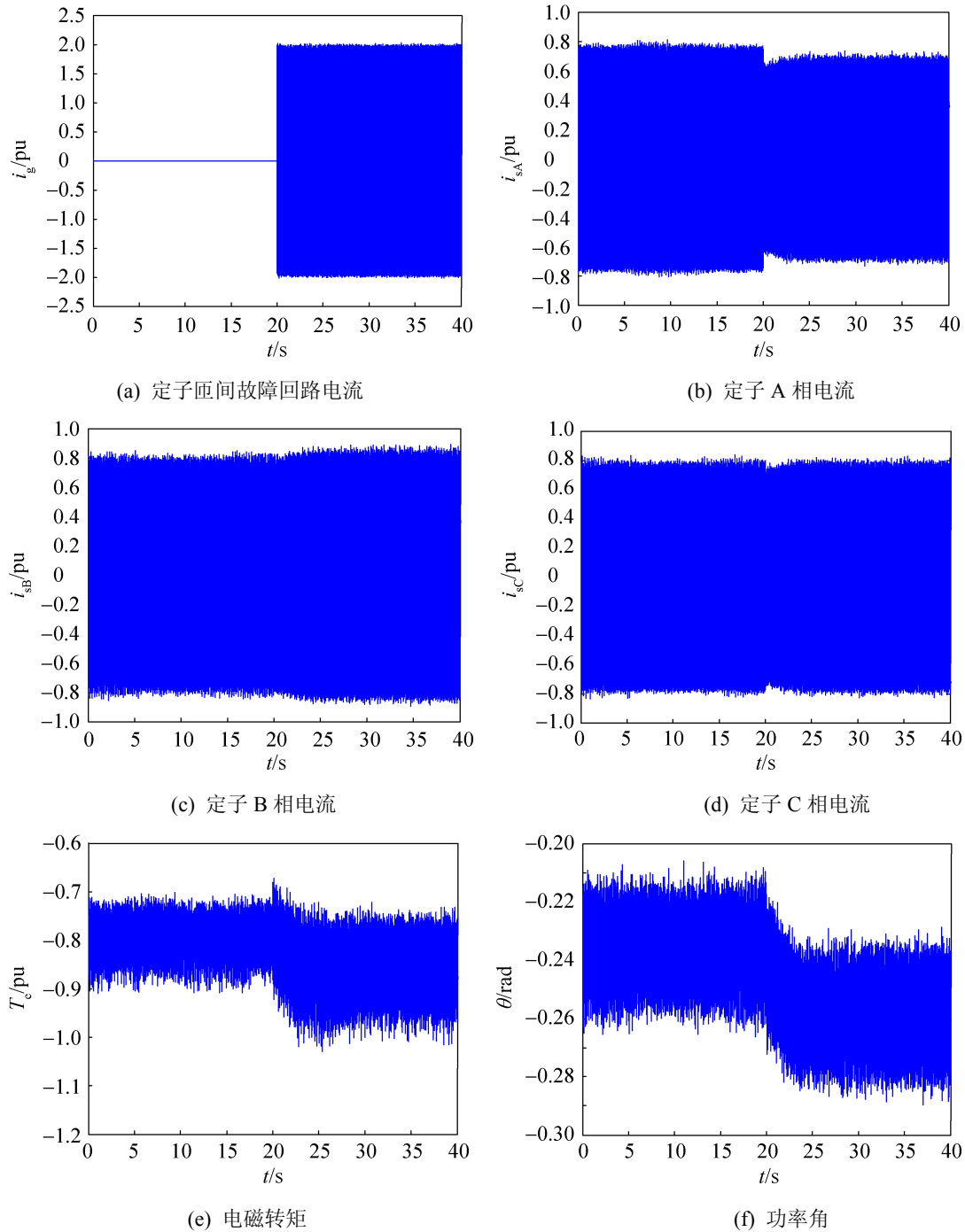


图 4 仿真结果(风速 15 m/s)

Fig. 4 Simulation results (wind speed, 15m/s)

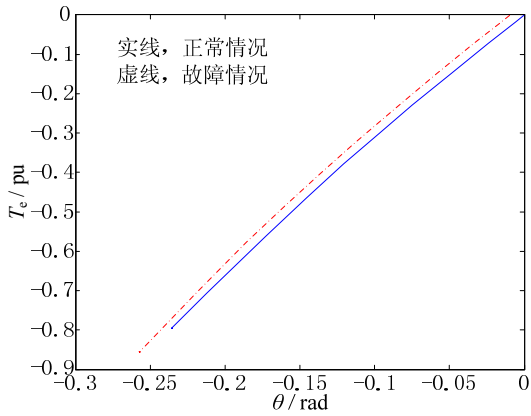
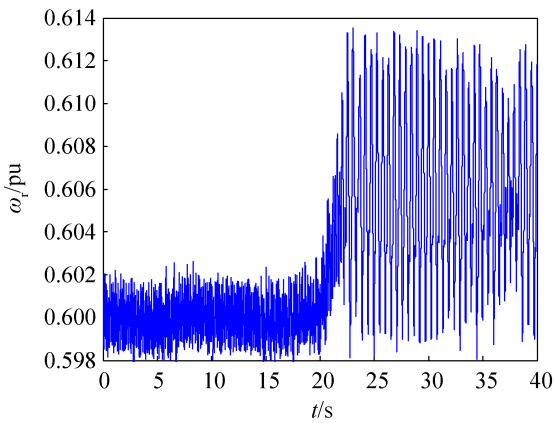
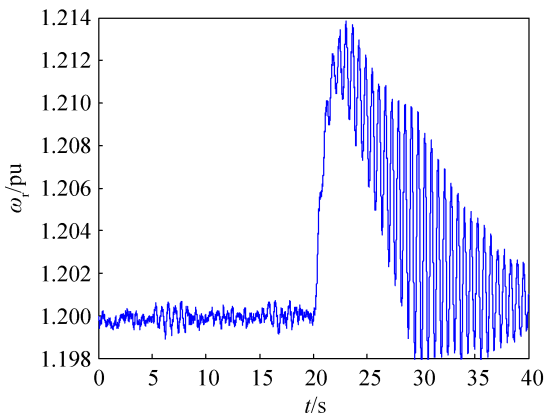


图 5 功角特性
Fig. 5 Characteristic of power angle



(a) 3m/s 风速



(b) 21m/s 风速

图 6 低风速与高风速情况下的转子转速
Fig. 6 Rotor speed with low and high wind speed

在 power_wind_dfig_det.mdl 例程中, DFIG 并联于电网, 且其风机控制、变流器控制是协调动作的, 因而其功角特性呈现线性特征, 如图 5 所示。

对图 5 功角特性做线性拟合, 获得 T_e 与 θ 之

间的一次函数关系式以及整步转矩系数: 正常情况, $T_e=3.4247\theta+0.0171$ 、 $dT_e/d\theta=3.4247>0$; 故障情况, $T_e=3.5072\theta+0.0543$ 、 $dT_e/d\theta=3.5072>0$ 。此处, “线性拟合”为多项式方法, 具体采用 Matlab 提供的 polyfit 函数, 参阅文献[20]。

对于 4~20 m/s 风速范围, 在正常与故障两种情况下, 同步转矩系数均为正值且近似相等。这就说明, DFIG 机组始终是稳定的, 这种定子匝间故障($\mu = 0.1$ 、 $R_g = 0.01 \Omega$)对其运行稳定性并无明显影响。另外, 尚对 μ 、 R_g 不同取值的其它定子匝间故障做了仿真研究, 结论与上一致。

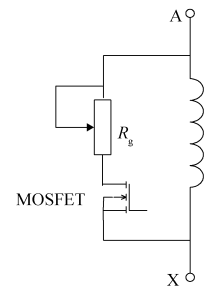
上述结论的前提是风速处于 DFIG 机组的正常风速范围(此处为 4~20 m/s)。对于低风速、高风速情况(分别对应于图 4 功角特性的下边界与上边界, $dT_e/d\theta$ 在此处无解), 尚需专门讨论。

根据图 6 可知, 在低风速与高风速下, 定子匝间故障导致转子转速发生小幅振荡, 这就意味着——该故障将恶化 DFIG 机组的运行稳定性。

在新能源电力系统国家重点实验室针对一台 DFIG 模拟机组(10 kW、380 V、28.4 A)进行了相关实验。为了避免永久性破坏定子绝缘, 定子匝间故障通过在定子 A 相绕组首、末端并联一滑线变阻器模拟(相当于 $\mu=1$)。图 7 为实验设备, 图 8 为低风速(以 1 m/s 为例)情况下的转子转速瞬变曲线(设定在 20 s 时刻发生定子匝间故障)。出于安全考虑, 未进行高风速情况下的定子匝间故障实验。根据图 8 可知, 在低风速情况下, 定子匝间故障将恶化 DFIG 机组的运行稳定性, 这与仿真结果一致。



(a) 实验机组



(b) 定子匝间故障回路

图 7 实验设备
Fig. 7 Experimental setup

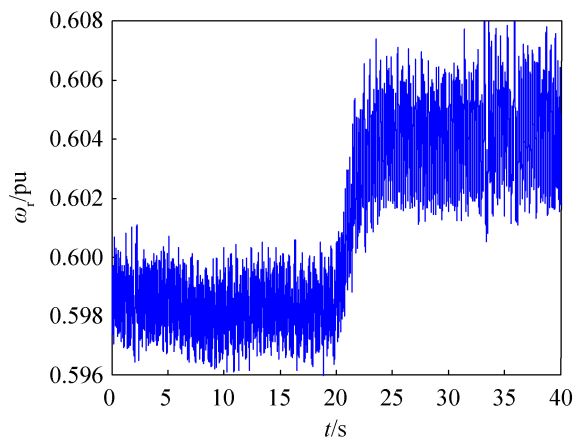


图8 实验DFIG在低风速情况下的转子转速
Fig. 8 Rotor speed of the test DFIG with low wind speed

5 结论

推导得出了定子匝间故障下DFIG在dq0坐标系统的数学模型,并在Matlab环境下建立了其S-函数模块。该数学模型是解析意义下标准形式的状态空间方程(系首次提出),这正是本文的主要贡献之所在。据此求解、仿真DFIG可以避免繁杂的矩阵求逆运算而大幅提升效率。

将所建立DFIG之S-函数模块替换Matlab内置的DFIG机组仿真例程中、Matlab自身的DFIG模块,从而获得了定子匝间故障情况下DFIG机组的仿真模型。这一工作是对Matlab的有益拓展,是本文的另一贡献。

对DFIG机组在正常与定子匝间故障情况下的稳定性做了仿真分析,结果表明:并网DFIG机组的电磁转矩—功角特性呈线性特征;对于正常风速范围,在正常与故障两种情况下,DFIG机组始终是稳定的;但在低风速、高风速两种边界情况下,定子匝间故障将恶化DFIG机组的运行稳定性。

本文所建立的计及定子匝间故障的DFIG模型以及本文所采用的仿真方法是正确可行的,可广泛用于DFIG机组的运行性能分析及其定子匝间故障检测方法研究等诸多领域。

参考文献:

[1] Li H, Chen Z. Overview of Different Wind Generator Systems and Their Comparisons[J]. IET Renewable

Power Generation(S1752-1416), 2008, 2(2): 123-138.

- [2] 李晶, 宋佳骅, 王伟胜. 大型变速恒频风力发电机组建模与仿真[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 100-105.
LI Jing, SONG Jia-hua, WANG Wei-sheng. Modeling and Dynamic Simulation of Variable Speed Wind Turbine with Large Capacity[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(6): 100-105.
- [3] Janaka B Ekanayake, Lee Holdsworth, XueGuang Wu, et al. Dynamic Modeling of Doubly Fed Induction Generator Wind Turbines[J]. IEEE Transactions on Power Systems(S0885-8950), 2003, 18(2): 803-809.
- [4] Alvaro Luna, Francisco Kleber de Araujo Lima, David Santos, et al. Simplified Modeling of a DFIG for Transient Studies in Wind Power Applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics(S0278-0046), 2011, 58(1): 9-20.
- [5] Ting Lei, Mike Barnes, Meliksah Ozakturk. Doubly-fed Induction Generator Wind Turbine Modeling for Detailed Electromagnetic System Studies[J]. IET Renewable Power Generation(S1752-1416), 2013, 7(2): 180-189.
- [6] Shih-Yu Yang, Yuan-Kang Wu, Hwei-Jeng Lin, et al. Integrated Mechanical and Electrical DFIG Wind Turbine Model Development[J]. IEEE Transactions on Industry Applications(S0093-9994), 2014, 50(3): 2090-2102.
- [7] 魏巍, 刘莹, 丁理杰, 等. 改进的双馈风力发电系统小干扰模型[J]. 电网技术, 2013, 37(12): 2904-2911.
WEI Wei, LIU Ying, DING Li-jie, et al. An Improved Small Perturbation Model for Doubly Fed Wind Power System[J]. Power System Technology, 2013, 37(12): 2904-2911.
- [8] J Ribrant, L M Bertling. Survey of Failures in Wind Power Systems with Focus on Swedish Wind Power Plants during 1997-2005[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion(S0885-8969), 2007, 22(1): 167-173.
- [9] Tavner P J, Xiang J, Spinato F. Reliability Analysis for WTs [J]. Wind Energy(S1095-4244), 2007 (10): 1-18.
- [10] Olav Vaag Thorsen, Magnus Dalva. A Survey of Faults on Induction Motors in Offshore Oil Industry, Petrochemical Industry, Gas Terminals, and Oil Refineries[J]. IEEE Transactions on Industry Applications(S0093-9994), 1995, 31(5): 1186-1196.
- [11] 肖雅丽, 方瑞明, 李文彭. 双馈感应风力发电系统状态监测方法综述[J]. 电网与清洁能源, 2012, 28(3): 68-73, 78.

- XIAO Ya-li, FANG Rui-ming, LI Wen-peng. Overview of the Condition Monitoring Method for Doubly-Fed Induction Wind Power Generation Systems[J]. Power System and Clean Energy, 2012, 28(3): 68-73, 78.
- [12] Dhaval Shah, Subhasis Nandi, Prabhakar Neti. Stator-interturn-fault Detection of Doubly-fed Induction Generators Using Rotor-current and Search-coil-voltage Signature Analysis[J]. IEEE Transactions on Industry Applications(S0093-9994), 2009, 45(5): 1831-1842.
- [13] Mohammad Yousefi kia, Mostafa Khedri, Hamid Reza Najafi, et al. Hybrid Modeling of Doubly Fed Induction Generators with Inter-turn Stator Fault and Its Detection Method Using Wavelet Analysis[J]. IET Generation, Transmission & Distribution(S1751-8687), 2013, 7(9): 982-990.
- [14] Sottile J, Kohler J L. An On-line Method to Detect Incipient Failure of Turn Insulation in Random-wound Motors[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion (S0885-8969), 1993, 8(4): 762-768.
- [15] Kliman G B, Premerlani W J, Koegl R A, et al. Sensitive, On-line Turn-to-turn Fault Detection in AC Motors[J]. Electric Machines and Power Systems (S1532-5008), 2000, 28: 915-927.
- [16] 孔祥东, 艾超, 娄霄翔. 液压型风力发电机组并网冲击仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2012, 24(9): 2012-2018.
KONG Xiang-dong, AI Chao, LOU Xiao-xiang. Impact of Grid-connecting Simulation Research of Hybrid Wind Turbine[J]. Journal of System Simulation, 2012, 24(9): 2012-2018.
- [17] 张莹, 黄科元, 黄守道, 等. 基于瞬时无功功率的感应电机矢量控制仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2012, 24(10): 2141-2145.
ZHANG Ying, HUANG Ke-yuan, HUANG Shou-dao, et al. MRAS Method for Sensorless Vector Control of Induction Motor Based on Instantaneous Reactive Power[J]. Journal of System Simulation, 2012, 24(10): 2141-2145.
- [18] Huang Jiakai, Cui Lei, Shi Xinxin. Simulink/QuaRC Based Real Time Simulation for Fractional Order Sliding Mode Control of PMSM[J]. Journal of System Simulation(S1747-7778), 2014, 26(12): 2957-2963.
- [19] 张树峰, 徐利梅, 张鸿, 等. 小型分布式发电系统中的风光建模与仿真分析[J]. 系统仿真学报, 2014, 26(2): 399-405.
ZHANG Shu-feng, XU Li-mei, ZHANG Hong, et al. Modeling and Simulation of Wind-Solar Power for Small Scale Distributed Power Generation System[J]. Journal of System Simulation, 2014, 26(2): 399-405.
- [20] MathWorks. MatlabR2012a product help, 2012.
- [21] 高景德, 王祥珩, 李发海. 交流电机及其系统的分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1993.
GAO Jing-de, WANG Xiang-heng, Li Fa-hai. Analysis of Alternating Current Electric Machine and Its System[M]. Beijing, Tsinghua University Press, 1993.
- [22] 汤蕴璆, 张奕黄, 范瑜. 交流电机动态分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
TANG Yun-qiu, ZHANG Yi-huang, FAN Yu. Dynamic Analysis of Alternating Current Electric Machines[M]. Beijing, Machine Press, 2004.
- [23] 姚兴佳, 宋俊. 风力发电机组原理与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
YAO Xing-jia, SONG Jun. Theory and Application of Wind Power Generation Systems[M]. Beijing: Machine Press, 2009.
- [24] 李进泽. 大兆瓦级双馈风力发电机关键技术[R]. 北京: 中国南车株洲电机有限公司, 2012.
LI Jin-ze. Key Technology of Large MW-ratings Doubly-fed Wind Power Generators[R]. Beijing: CSR Zhuzhou Electric Motor Co., Ltd., 2012.
- [25] Rangarajan M. Tallam, Thomas G. Habetler, Ronald G. Harley. Transient Model for Induction Machines with Stator Winding Turn Faults[J]. IEEE Transactions on Industry Applications(S0093-9994), 2002, 38(3): 632-637.
- [26] 耿华, 杨耕. 控制系统仿真的代数环问题及其消除方法[J]. 电机与控制学报, 2006, 10(6): 632-635, 64.
GENG Hua, Yang Geng. Algebraic Loop Problems in Simulations of Control Systems and the Methods to Avoid It[J]. Electric Machines and Control, 2006, 10(6): 632-635, 64.
- [27] 于强, 孙华东, 汤涌, 等. 双馈风电机组接入对电力系统功角稳定性的影响[J]. 电网技术, 2013, 37(12): 3399-3405.
YU Qiang, SUN Hua-dong, TANG Yong, et al. Impact on Angle Stability of Power System with Doubly Fed Induction Generators Connected to Grid[J]. Power System Technology, 2013, 37(12): 3399-3405.