

文章编号: 2095-2163(2019)04-0055-06

中图分类号: TM315

文献标志码: A

# 双馈风电系统的建模仿真研究与设计

王坤, 周克

(贵州大学电气工程学院, 贵阳 550025)

**摘要:** 双馈风电系统的建模仿真对其运行原理、故障诊断及预测等研究具有很大便利性。文中在对风电系统数学模型进行分析和理论阐述的基础上,在 Matlab/Simulink 中建立其正常动态下的仿真模型,并通过加入故障块实现转子短路故障的仿真;通过将模型整体进行 Mask 封装设计其 GUI 和代码生成的方式,提高模型的便捷性和可移植性,便于仿真不同参数的系统和实现结合嵌入式等系统进行研究使用。通过仿真结果表明,文中所建模型具有很好的合理性及适用性,能很好仿真双馈风电系统的实际运行情况,可为风电系统的研究提供一个良好的模型基础。

**关键词:** 双馈风电系统; Matlab/Simulink; 转子短路故障; GUI

## Research and design of modeling and simulation of doubly-fed wind power system

WANG Kun, ZHOU Ke

(The Electrical Engineering College, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

**[Abstract]** The modeling and simulation of the doubly-fed wind power system is very convenient for its operation principle, fault diagnosis and prediction. Based on the analysis and theoretical explanation of the mathematical model of wind power system, the simulation model under normal dynamics is established in Matlab/Simulink, and the simulation of rotor short-circuit fault is realized by adding fault block. By encapsulating the model as a whole with Mask and designing its GUI and code generation methods increase the convenience and portability of the model, and facilitate the simulation of systems with different parameters and implementations in conjunction with embedded systems. The simulation results show that the model built in this paper has good rationality and applicability, which could simulate the actual operation of the doubly-fed wind power system well. The research provides a good model foundation for the research of wind power system.

**[Key words]** doubly-fed wind power system; Matlab/Simulink; rotor short circuit fault; GUI

## 0 引言

双馈式风力发电由于其变速恒频的优越性能,成为目前中大型风电机场的主流系统。对其控制策略以及对轴承、风电机等部件的故障诊断与预测一直是研究的热点<sup>[1]</sup>。在许多情况下,实际的物理系统不便于直接进行研究使用,故而常常需要通过建模仿真的形式来对建立的算法理论进行验证和优化。

目前,对于风电系统的建模主要有基于 GH Bladed、Matlab/Simulink、Ansys 以及 PSCAD 等<sup>[2]</sup>。其中, GH Bladed 侧重的是风机的性能及载荷计算方面设计、Matlab/Simulink 偏向于控制算法的验证以及理论的研究、Ansys 主要便于电磁分析以及对电机内部的设计研究、PSCAD 则侧重于电磁暂态的仿真与计算。文中选用熟悉度广、可移植性强的 Matlab/Simulink 作为建模平台,其模块库中含有大量封装模块可直接进行调用,非常便于模型的搭建。

在大多数对风电系统研究的文献中,较多的是着重于控制策略的对比及优化研究,比如文献[3]和[4];对于系统的建模方面,如文献[5]、[6]等仅对 PWM 整流器部分的实现及控制策略展开了探讨,却并未考虑整个风电系统模型;文献[7]、[8]等虽对整个风电系统进行了分析研究,但对于模型仿真的便捷性和模型的可移植性未加考虑,对于模型的后续研究使用等较为不便。

由此,文中在保证模型合理性的前提下,最大程度上利用 Simulink 中相应的封装模块来调节参数、并构建双馈风电系统的整体模型,以降低建模过程的复杂性、提高建模效率;接下来,通过设计 GUI 的方式实现模型仿真的简便运行、参数的快速修改和仿真数据的直接保存;最后对模型进行仿真,验证了模型的合理性、正确性,同时也一并给出了模型的生成代码,提高模型的可移植性。对此拟做阐释详述如下。

**基金项目:** 贵州省科技计划项目(黔科合支撑[2018]2151)。

**作者简介:** 王坤(1994-),男,硕士研究生,主要研究方向:风力发电机故障诊断与预测;周克(1977-),男,博士,副教授,主要研究方向:通信信号处理、智能电网技术。

收稿日期: 2019-05-20

## 1 数学模型

### 1.1 风速及风轮方程

整个双馈风电系统可大致分为:风能转化为机械能部分、机械能转化为电能部分和控制转化过程部分,主要包括风轮、驱动链、发电机及控制器等。

风速带有很大的随机性,其变化受地区、天气、时间、季节以及地形等多种因素影响。常用的模型有:

(1) 采用紊流和平均风相结合来模拟的风速<sup>[9]</sup>。

(2) 采用阶跃风、平均风、随机风及阵风等进行组合模拟的风速。

根据研究侧重点的不同,可以得出相应的组合选择。文中将要仿真双馈电机的转子短路故障,故而简化风速模型,尽可能不考虑风速随机特性对故障的影响,这里就采用了阶跃风的形式,即:

$$v_{wind} = v_{step}, \quad (1)$$

其中,  $v_{wind}$  表示实际风速,  $v_{step}$  表示阶跃信号。

风轮是将风的动能转化为机械能的部件,是整个系统能量转化的开始,主要用于将风能转变为机械转矩  $T_m$  输出到双馈电机中。相应的参数方程为:

$$\begin{aligned} P_{wt} &= 0.5\rho\pi R_{wt}^2 C_p(\lambda, \beta) v_{wind}^3; \\ T_{wt} &= \frac{P_{wt}}{\Omega_{wt}}; \\ C_p(\lambda, \beta) &= 0.5176 \frac{16}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \frac{\beta}{\lambda_i} e^{-\frac{21}{\lambda_i}} + 0.0068\lambda; \\ \frac{1}{\lambda_i} &= \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}; \\ \lambda &= \frac{\Omega_{wt} R_{wt}}{v_{wind}}. \end{aligned} \quad (2)$$

其中,  $C_p$  为功率系数;  $\rho$  为空气密度;  $\lambda$  为叶尖速比;  $\Omega_{wt}$ 、 $\beta$ 、 $P_{wt}$  和  $T_{wt}$  分别为风轮机械角速度、桨叶节距角、功率和转矩。

在一般情况下,并不需要研究齿轮箱的机械性能及应力分布情况,所以通常可简化模型使其作用等效于其齿轮增速比  $k_{gear}$  的值。

### 1.2 双馈电机方程

风电机是将风轮所产生的机械能转化为电能的核心设备,可以通过输入的风轮转矩计算出相应的电参量。为便于系统的分析和模型搭建,通常对双馈电机做出如下假设<sup>[8]</sup>:

(1) 不计温度、频率对电机相应参数值的影响,

忽略空间谐波、磁饱和及铁芯损耗。

(2) 定、转子绕组对称分布,采用 Y 型连接且自感和互感为固定值。

(3) 转子侧皆折算至定子侧且折算后绕组匝数比为 1。

由于常规三相坐标下双馈发电机数学模型的非线性、多变量和强耦合性等特点<sup>[10]</sup>,在求解分析过程中非常繁琐,通常采用坐标变换的方式进行解耦处理,以简化参数方程便于系统的建模分析,同时实现对系统的矢量控制,文中采用 Park 变换(即 3s/2r 变换),经变换后的双馈电机电压方程为:

$$\begin{aligned} \dot{u}_{sd} &= R_s i_{sd} - \omega_1 \psi_{sq} + p \psi_{sd}; \\ \dot{u}_{sq} &= R_s i_{sq} + \omega_1 \psi_{sd} + p \psi_{sq}; \\ \dot{u}_{rd} &= R_r i_{rd} - \omega_s \psi_{rq} + p \psi_{rd}; \\ \dot{u}_{rq} &= R_r i_{rq} + \omega_s \psi_{rd} + p \psi_{rq}. \end{aligned} \quad (3)$$

磁链方程为:

$$\begin{aligned} \dot{\psi}_{sd} &= L_s i_{sd} + L_m i_{rd}; \\ \dot{\psi}_{sq} &= L_s i_{sq} + L_m i_{rq}; \\ \dot{\psi}_{rd} &= L_m i_{sd} + L_r i_{rd}; \\ \dot{\psi}_{rq} &= L_m i_{sq} + L_r i_{rq}. \end{aligned} \quad (4)$$

转矩和运动方程为:

$$\begin{cases} T_e = 1.5n_p L_m (i_{sq} i_{rd} - i_{sd} i_{rq}), \\ T_e - T_L = (J/n_p) p \omega_r. \end{cases} \quad (5)$$

其中,  $u_{sd}$ 、 $u_{sq}$ 、 $u_{rd}$ 、 $u_{rq}$ 、 $i_{sd}$ 、 $i_{sq}$ 、 $i_{rd}$ 、 $i_{rq}$  和  $\Psi_{sd}$ 、 $\Psi_{sq}$ 、 $\Psi_{rd}$ 、 $\Psi_{rq}$  分别表示定、转子电压、电流和磁链的  $d$ 、 $q$  轴分量;  $R_s$  和  $R_r$  为定、转子电阻;  $\omega_1$ 、 $\omega_r$  和  $\omega_s$  分别为同步角速度、转子角速度和转差角速度;  $T_e$ 、 $T_L$  表示电磁转矩和负载转矩;  $p$  为微分算子  $d/dt$ ;  $J$ 、 $n_p$  和  $L_m$  分别表示转动惯量、极对数和互感。

### 1.3 控制系统方程

功率变换器是实现双馈风电系统变速恒频的关键部件<sup>[11]</sup>,目前多是采用背靠背型双 PWM 的部分功率变换器,分为转子侧变换器(RSC)和网侧变换器(GSC)两部分。其中,RSC 主要完成变速恒频的控制方案,实现对有功功率  $P$  和无功功率  $Q$  的解耦以及为双馈电机提供励磁,GSC 主要保证直流母线 DC 的电压稳定和功率因数运行,以便有良好的电流输入性能。

文中采用三相电压型变换器,网侧 PWM 采用基于网侧电压定向的矢量控制方式,转子侧 PWM 采用基于定子磁链定向的矢量控制方式。定向后主要的参数方程为:

$$\begin{cases}
 \dot{u}_{gd} = -Ri_{gd} - Lp\dot{i}_{gd} + u_g + \omega_1 Li_{gq}; \\
 \dot{u}_{gq} = -Ri_{gq} - Lp\dot{i}_{gq} - \omega_1 Li_{gd}; \\
 \dot{u}_{rd} = (R_r + (L_r - L_m^2/L_s)p)i_{rd} - (L_r - L_m^2/L_s)\omega_s i_{rq}; \\
 \dot{u}_{rq} = (R_r + (L_r - L_m^2/L_s)p)i_{rq} + \\
 (-L_m/L_s)\omega_s \psi + (L_r - L_m^2/L_s)\omega_s i_{rd}.
 \end{cases} \quad (6)$$

其中,  $u_{gd}$ 、 $u_{gq}$ 、 $i_{gd}$ 、 $i_{gq}$  表示网侧变换器电压、电流  $d$ 、 $q$  轴分量;  $L_s$ 、 $L_r$  分别表示定、转子自感;  $u_g$  为定向电网电压;  $\psi$  为定向定子磁链。网侧内、外环分别采用电流环和电压环, 转子侧内、外环分别采用电流环和转速环。

空间矢量脉宽调制 (Space Vector PWM, SVPWM) 是根据变换器空间电压或电流矢量切换来操纵变换器各种功能作用的一种控制方式<sup>[9]</sup>。而与其它调制技术相比, 该技术有着电压利用率高、动态性能好以及谐波抑制能力强等一系列优点, 被广泛运用到电机的矢量控制中。

文中采用空间电压矢量调制的实现方式, 主要参数方程为:

$$\begin{cases}
 \dot{u}_\alpha = (T_1/T_p) |u_0| + (T_1/T_p) |u_{60}| \cos(60^\circ); \\
 \dot{u}_\beta = (T_2/T_p) |u_{60}| \sin(60^\circ); \\
 T_p = T_1 + T_2 + T_{0-7}; \\
 T_a = (T_p - T_1 - T_2)/4; \\
 T_b = T_a + T_1/2; \\
 T_c = T_b + T_2/2.
 \end{cases} \quad (7)$$

其中,  $T_{0-7}$ 、 $T_1$ 、 $T_2$  和  $T_p$  分别表示电压矢量作用时间和一个开关周期,  $T_a$ 、 $T_b$  和  $T_c$  为扇区矢量时间切换点。

对于直流侧电压  $u_{dc}$ 、储能电容  $C$  以及滤波  $RL$  电路参数的选取, 计算方程为<sup>[12-13]</sup>:

$$\begin{cases}
 \dot{u}_{dc} \geq \sqrt{6} u_m; \\
 \frac{(2u_{dc} - 3E_m) E_m T_p}{2u_{dc} \Delta i_{\max}} \leq L \leq \frac{2}{3} u_{dc}; \\
 \frac{v_{dc}}{2\Delta v_{\max} R_d} < C \leq \frac{t_r^*}{0.74R_d}.
 \end{cases} \quad (8)$$

其中,  $u_m$  表示输入端相电压的有效值;  $E_m$  表示电网相电压峰值;  $\Delta i_{\max}$  表示电感上电流最大脉动值;  $I_{\max}$  表示输入最大电流的幅值;  $\omega$  表示工频角速度  $314 \text{ rad/s}$ ;  $v_{dc}$  表示额定直流电压;  $\Delta v_{\max}$  表示电压

由满载到空载时的电压跌落;  $R_d$  表示直流侧负载;  $t_r^*$  为直流电压上升至  $v_{dc}$  时的时间限值。

## 2 建模及 GUI 设计

### 2.1 模型搭建

由上述分析, 根据式 (1) 和 (2) 可在 Matlab/Simlink 中建立风速及风轮部分仿真模型, 如图 1 所示。由式 (3) ~ (5) 可搭建出双馈风电机的仿真模型, 在 Simulink Library Browser 的 Simscape/Power Systems/Machines 中有相应的电机封装模块, 只需在其中合理设置仿真参数便可直接进行调用, 在很大程度上可以提高建模的效率。

文中为得到相应参数的实际变化值, 以利于后续的研究使用, 即在本次分析设计中采用了有名值, 从而选择调用 Asynchronous Machine SI Units 模块进行参数的设置。其中, 故障模型采用 3 个单相故障块分别通过 Switch 实现控制, 以便在 GUI 界面中进行选择, 故障参数的设置为: 故障电阻为  $0.005 \Omega$ , 接地电阻为  $0.01 \Omega$ , 切换时间为  $0.6 \text{ s}$  至  $0.7 \text{ s}$ , 建立仿真模型如图 2 所示。由式 (6) 和式 (7) 可建立控制器模型, 网、转子侧变换器的关键器件为三相变流桥, 在 Simulink Library Browse 的 Simscape/Power Systems 中有 Universal Bridge 模块, 将桥臂设置为 3, 电力电子设备选择 IGBT/Diodes 即可实现所需的变流桥模型, 建立模型如图 3 所示。鉴于论文篇幅, 文中不再逐一列出每部分的仿真设计模型。

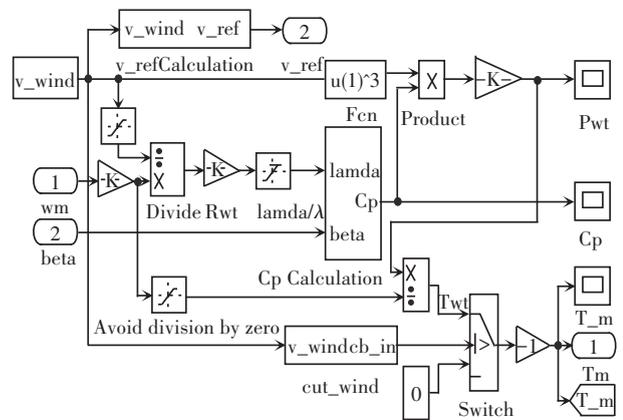


图 1 风速、风轮仿真模型

Fig. 1 Wind speed, wind turbine simulation model

### 2.2 GUI 设计

为提高本文研发模型的便利性及适用性, 将上述各模型连接起来构成整个双馈风电系统模型, 并进行 Mask 封装, 在此基础上设计其 GUI 界面, 方便模型仿真的简捷操作、数据保存和参数更改。上述子模型中所需的相应参数用对应的字符进行表示,

同时建立.m 文件用以存放,而后通过模型回调函数的形式加以调用。整个双馈风电系统模型如图4所示。

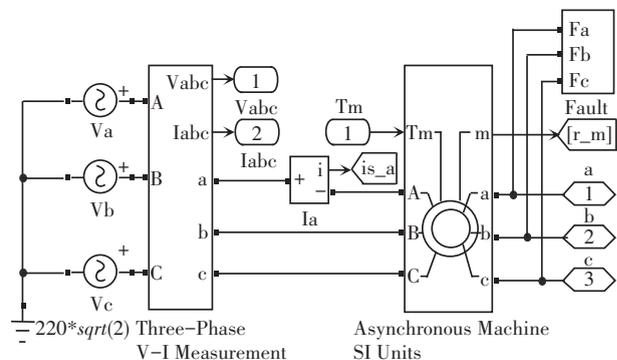


图2 双馈电机仿真模型

Fig. 2 Simulation model of doubly-fed machine

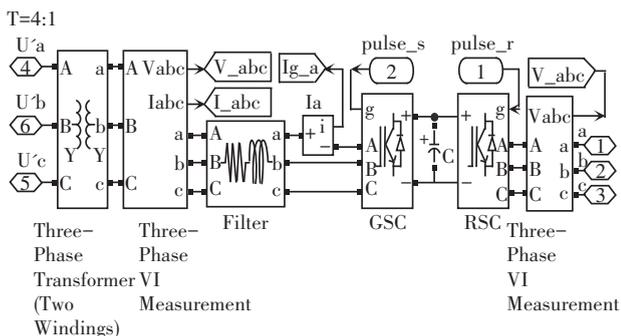


图3 直流母线及双PWM变换器模型

Fig. 3 DC bus and double PWM converter model

GUI 界面能简便地对风轮和电机的参数进行输入和修改,可便于不同参数系统的仿真。文中 GUI 界面主要考虑风轮、双馈电机和直流部分的调节参数以及故障相的选择,设计双馈风电系统的 GUI 界面如图5所示。

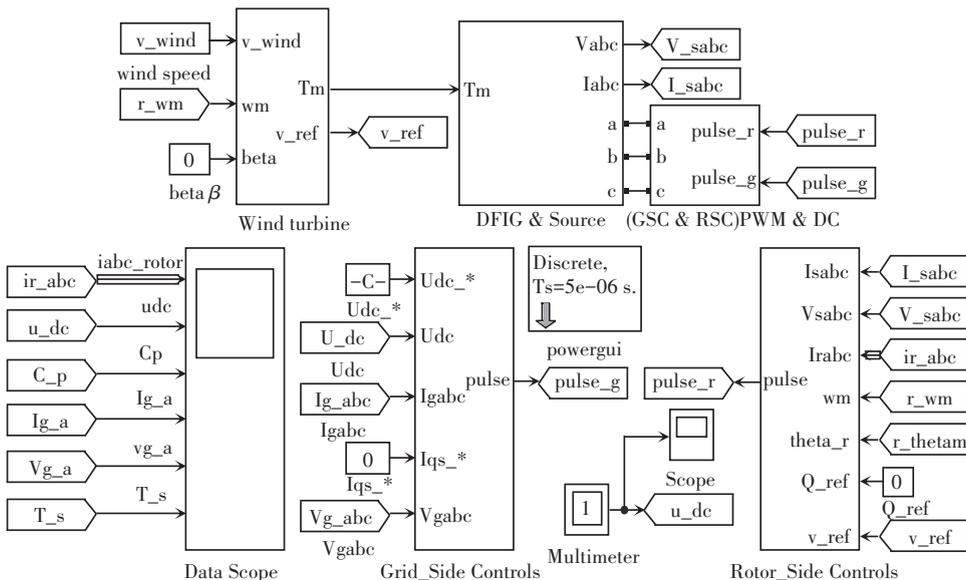


图4 双馈风电系统整体仿真模型

Fig. 4 Overall simulation model of doubly-fed wind power system



图5 双馈风电系统 GUI 界面

Fig. 5 GUI interface of doubly-fed wind power system

### 3 模型验证及代码生成

在前述设计基础上,下面拟将进行模型的仿真实验验证。在运算求得了直流侧参数等结果值后,将仿真参数输入到 GUI 界面中,点击启动仿真按钮,得到如图6所示相应参量的波形图。文中模型主要仿真参数为:风轮半径 2.15 m、最佳功率因数 0.48、齿轮箱增速比 6.254、最佳叶尖速比 8、空气密度  $\rho$  取  $1.223 \text{ kg/m}^3$ <sup>[14]</sup>,双馈电机额定功率 2.3 kw、定子额定电压 220 V、极对数为 2、转动惯量  $0.089 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 、额定频率 50 Hz、互感  $0.069 \text{ 31 H}$ 、定子电阻  $0.435 \text{ }\Omega$ 、转子电阻  $0.816 \text{ }\Omega$ 、定转子漏感  $0.002 \text{ H}$ <sup>[15]</sup>,实验仿真环境为:Windows7 64 位、8 GB、Matlab/Simulink 2016a、解算器为 od23tb。

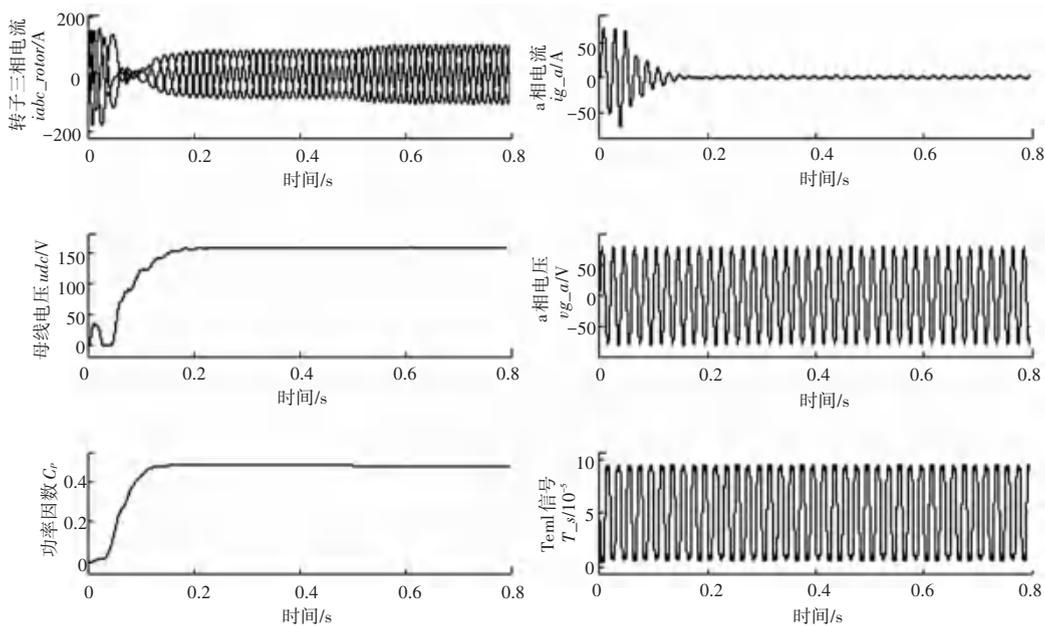


图 6 模型仿真结果图

Fig. 6 Simulation results of the model

由图 6 中,  $udc$  可以看出, 母线电压大约在 0.2 s 达到给定值 155 V 并逐渐保持稳定, 说明所建立的控制器模型是有效的; 观察桥臂开关信号  $T_s$  能够看到呈现明显的马鞍状, 由此可见 SVPWM 的有效作用; 当桨叶节距角  $\beta$  取 0 时, 由功率因数  $C_p$  曲线可以看出系统能保持最大功率因数 0.48 运行, 由转子电流和网侧电压、电流波形则可获知: 当风速在 0.5 s 发生阶跃时, 系统能很好地跟随风速变化, 保持单位功率因数和实现变速恒频运行。至此可得研究结论为: 文中所建模型是合理、可行的。当选择转子故障相为 A 相时, 得到如图 7 所示定转子电流图。由图 7 可以看出, 当发生转子短路故障时, 定转子电流出现明显的不对称, 并在故障切除后逐渐恢复到正常运行状态。整个双馈风电系统模型所包含的子模块和电力电子器件较多, 所需的仿真时间较长, 点击数据保存按钮, 即可将仿真所得数据保存起来, 便于后续的研究使用。

利用 Matlab 的代码生成功能对所建模型来进行代码生成, 以提高模型的可移植性, 便于结合其它系统进行研究使用。生成步骤为:

- (1) 在 Configuration Parameter 面板中设置解算器类型、系统目标文件和硬件实现规定。
- (2) 对模型进行编译, 在 Embedded Coder 面板中进行相应选择, 确定编译成功。
- (3) 进行代码生成和优化。限于篇幅, 文中代码生成略。

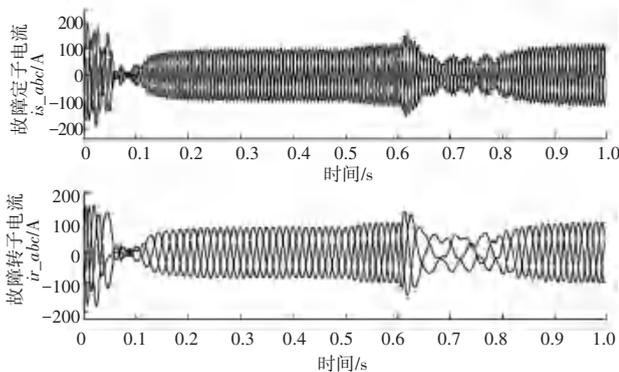


图 7 转子 A 相故障时定、转子电流图

Fig. 7 Stator and rotor current diagram in case of rotor phase A failure

## 4 结束语

文中针对目前主流的双馈式风电系统的模型实现问题, 在 Simulink 中搭建出其风轮、双馈电机和控制器等的动态模型, 实现了整个双馈风电系统的仿真。通过 Matlab 的 GUI 和代码生成功能, 对文中所建模型进行优化和扩展, 提高了模型的适用性及可移植性。最后经模型仿真实验验证, 文中所建模型能保持最佳功率因数运行, 实现变速恒频, 满足运行需要。

## 参考文献

[1] 金晓航, 孙毅, 单继宏, 等. 风力发电机组故障诊断与预测技术研究综述[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(5): 1041-1053.