



虚拟仿真实验中的断条故障异步电动机模型设计

王攀攀, 张 阳, 徐瑞东, 邓先明

(中国矿业大学 电气与动力工程学院, 徐州 221116)

摘要: 该文针对仿真软件中缺乏故障电机模型的问题, 设计出了转子断条故障下的异步电动机模型。首先利用绕组折合等效原理和断条故障主要引起转子电阻变化的特点, 推导出故障转子的电阻矩阵, 进而实现断条故障的数学建模; 然后借助 Simulink 软件和实际故障电机对该模型进行实现和验证。结果表明: 所提模型不但能够准确仿真断条故障下的电流、转速等物理量, 同时还可以模拟出电磁转矩和气隙磁通等较难检测的量。在此基础上, 结合原实物平台, 设计了相关实训课程的“虚实结合”教学流程。该故障电机模型的开发与应用为深入开展实践教学提供了便利。

关键词: 虚拟仿真实验; 异步电动机仿真模型; 转子断条故障; 新工科

中图分类号: G420

文献标志码: A

DOI: [10.12179/1672-4550.20190295](https://doi.org/10.12179/1672-4550.20190295)

Modeling of Broken Rotor Bar Fault of Induction Motor in Virtual Simulation Experiment

WANG Panpan, ZHANG Yang, XU Ruidong, DENG Xianming

(School of Electrical and Power Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: In response to the lack of faulty induction motor modeling in simulation software, an induction motor model with broken rotor bars (BRB) fault was designed for virtual simulation experiment. Based on the principle of rotor winding reduction, the resistance matrix of the fault rotor was derived given the characteristics that BRB fault mainly causes the variation of rotor winding resistance, and the mathematical model of the motor with BRB fault was built. Then the model was realized and verified by Simulink software and actual faulty motor. Results showed that the proposed model accurately simulated not only common physical quantities such as current and speed, but also physical quantities such as electromagnetic torque and air gap flux that are difficult to detect. On the basis of the model and the original object platform, the teaching process featuring ‘virtual and real combination’ of relevant practical training courses was designed. The development and application of the faulty motor modeling have facilitated practical teaching.

Key words: virtual experiment and simulation; simulation model of induction motor; broken rotor bar fault; new engineering education

随着“新工科”理念的逐步深化, 工程实践教学备受关注。课程实验和专业综合实训是开展实践教学、培养学生工程实践能力的主要支撑。但是实验学时的压缩、场地的限制, 以及实验资源的不足给实践教学带来了巨大挑战。为此, 许多高校开始研究和建立虚拟仿真实验平台^[1-3], 这无疑为教学条件的改善、教学方法的改革提供了有力支撑^[4-5]。与此同时, 为了进一步提高教学效

果, 增加实验的真实感, 许多学者将传统实验台和虚拟仿真技术相结合, 提出了“虚实结合”的实验系统和教学方法^[6-8]。虚拟仿真实验正在成为研究的热点和实践教学的发展趋势。

然而, 无论是纯虚拟仿真实验还是“虚实结合”实验, 其核心基础是仿真模型。异步电动机模型作为最常用的仿真模型, 被广泛应用于电机原理及拖动基础、电机控制技术、电力拖动自动

收稿日期: 2019-08-09; 修回日期: 2019-09-21

基金项目: 江苏高校品牌专业建设工程资助项目(PPZY2015B132); 江苏省高等教育教改研究课题(2019JSJG336); 中国矿业大学教学研究项目(2018YB41); 中国矿业大学电力学院教学研究项目(2017)。

作者简介: 王攀攀(1982-), 男, 博士, 副教授, 主要从事电气设备故障诊断与工业自动化方面的研究。

控制系统等课程的实验中。随着这些传统课程实践教学的逐步深入, 越来越多的实验和实训内容扩展到了更贴近工业实际的故障状态下的电机实验, 这就需要各种常见故障的电机模型。同时, 一些涉及设备运维、设备故障诊断的课程, 如电气设备故障诊断技术, 也急需故障电机模型开展相关虚拟仿真实验。但是目前常用仿真软件中却只有完好异步电动机模型, 无法满足现阶段的教学需求, 从而严重制约了虚拟仿真实验的应用范围和应用深度。

转子断条故障是异步电动机最常见的故障之一, 约占全部故障的 10%^[9], 因此在实践教学中断条故障电机和模型常被用于各种实验。目前, 转子断条故障的数学建模主要采用多回路法^[10-11]。该方法可以分析电机定转子绕组内外部所有回路的电流, 并可以计及定转子绕组的布局、空间位置等因素的影响。但是对于本科实验教学该方法过于复杂、难以理解、且不易掌握。鉴于此, 本文从断条故障的本质特征出发, 利用电机转子绕组的折合等效原理, 设计出一种简洁、易懂的断条故障电机 Simulink 仿真模型, 并应用于实践教学。

1 完好异步电动机数学模型

为了便于分析和研究异步电动机的数学模型, 常作如下 6 个假设和规定:

1) 忽略空间谐波和齿槽效应, 三相绕组对称且空间上互差 120°, 所产生的磁动势沿气隙周围按正弦规律分布;

2) 忽略铁芯损耗及磁饱和现象;

3) 各绕组自感和互感皆为线性;

4) 不考虑温度和频率对电机电阻的影响;

5) 为了便于理解, 无论异步电动机转子是绕线式还是鼠笼式, 都将它等效成绕线转子, 并折算到定子侧, 折算前后的每相匝数相等;

6) 规定各绕组电压、电流、磁链的方向符合电动机惯例和右手螺旋定则。

在上述假设和规定的基础上, 依据异步电机的物理模型, 容易构建出静止 abc 坐标下的数学模型^[12]。该动态模型主要由电压方程、磁链方程、转矩方程和运动方程组成, 且具有结构清晰、容易理解等特点。但是在这些方程中存在复杂、时变的电感矩阵, 给调速系统的特性分析和

控制器的设计增加了难度。为了简化异步电动机的数学模型, 常采用的方法是坐标变换, 其基本思路是将交流电动机的数学、物理模型等效变换成类似直流电动机的模型。下面以 abc 坐标系下的异步电动机模型为基础, 将其变换到任意转速坐标系 qd0 中。其中转换矩阵 $[T_{qd0}(\theta)]$ 如式(1)所示, 逆变换如式(2)所示。

$$[T_{qd0}(\theta)] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin \theta & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$[T_{qd0}(\theta)]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

在式(1)和式(2)中, θ 为 q 轴与 a 轴的夹角。通过变换矩阵, 将电机电压、电流、磁链等变量转换到 qd0 坐标系, 其相应的电压方程、磁链方程、转矩方程如下。

电压方程:

$$\begin{bmatrix} u_{qs} \\ u_{ds} \\ u_{0s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{0s} \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} \lambda_{ds} \\ -\lambda_{qs} \\ 0 \end{bmatrix} + P \begin{bmatrix} \lambda_{qs} \\ \lambda_{ds} \\ \lambda_{0s} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} u_{qr} \\ u_{dr} \\ u_{0r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_r & 0 & 0 \\ 0 & r_r & 0 \\ 0 & 0 & r_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qr} \\ i_{dr} \\ i_{0r} \end{bmatrix} + (\omega - \omega_r) \begin{bmatrix} \lambda_{dr} \\ -\lambda_{qr} \\ 0 \end{bmatrix} + P \begin{bmatrix} \lambda_{qr} \\ \lambda_{dr} \\ \lambda_{0r} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式(3)为定子电压方程, 其中 $[u_{qs} \ u_{ds} \ u_{0s}]^T$, $[i_{qs} \ i_{ds} \ i_{0s}]^T$ 和 $[\lambda_{qs} \ \lambda_{ds} \ \lambda_{0s}]^T$ 分别是定子绕组在 qd0 坐标系下的三相电压、电流和磁链; r_s 为定子绕组电阻; $\omega = d\theta/dt$ 为 qd0 坐标系的转速。式(4)是转子电压方程, 其中各变量的对应关系与式(3)类似, 其中 $\omega_r = d\theta_r/dt$ 为电动机转子的电角速度。

磁链方程:

$$\begin{bmatrix} \lambda_{qs} \\ \lambda_{ds} \\ \lambda_{0s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ls} + \frac{3}{2}L_{ss} & 0 & 0 \\ 0 & L_{ls} + \frac{3}{2}L_{ss} & 0 \\ 0 & 0 & L_{ls} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{0s} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{3}{2}L_{sr} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2}L_{sr} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qr} \\ i_{dr} \\ i_{0r} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} \lambda_{qr} \\ \lambda_{dr} \\ \lambda_{0r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{lr} + \frac{3}{2}L_{rr} & 0 & 0 \\ 0 & L_{lr} + \frac{3}{2}L_{rr} & 0 \\ 0 & 0 & L_{lr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qr} \\ i_{dr} \\ i_{0r} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{3}{2}L_{sr} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2}L_{sr} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{0s} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式(5)和式(6)分别是定转子的磁链方程。其中 L_{ls} 和 L_{lr} 分别是定子、转子的漏感； L_{ss} 和 L_{rr} 是定转子绕组的自感； L_{sr} 是定转子之间的最大互感值。

转矩方程：

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) \quad (7)$$

式中， P 为极对数。转矩方程表示电量与机械量的关系，即电动机内部通过气隙的机电能量转换关系。

运动方程：

$$T_e = T_L + \frac{J}{P} \frac{d\omega_r}{dt} \quad (8)$$

式中， T_L 为负载阻力转矩； J 为旋转机组的转动惯量。由运动方程可知，当负载不变，通过控制电磁转矩就可以控制电动机的速度变化。

式(3)~式(8)即为 qd0 坐标系下的完好异步电动机数学模型。与 abc 坐标下电机模型相比，该模型的电感矩阵系数为常数，并且许多项都等于 0，这表明了坐标变换消除了电感系数的时变性，减少了多变量之间的耦合，因此简化了电机数学模型。

2 转子断条故障建模

转子断条故障导致三相转子绕组不再平衡，进而使得转子绕组产生的磁势为椭圆形，并在定子绕组中感应出 $(1 \pm 2ks)f_1$ 频率的谐波分量^[13]，其中 $k=1, 2, 3 \dots$ 。虽然转子断条故障同时会引起转子绕组电阻和电感的变化，但是电阻的变化量要远大于电感的变化量^[14]。因此，为了简化故障电机模型，对于笼型异步电机，可以忽略断条故障对转子绕组电感的影响^[15]。

在 abc 静止坐标系下，断条故障转子电阻矩阵为：

$$\mathbf{r}_r^* = \begin{bmatrix} (r_r + \Delta r_{ra}) & 0 & 0 \\ 0 & (r_r + \Delta r_{rb}) & 0 \\ 0 & 0 & (r_r + \Delta r_{rc}) \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中， Δr_{ra} 、 Δr_{rb} 和 Δr_{rc} 分别为断条故障引起转子

三相绕组电阻的增量。对于一个完好电机，文献 [14] 给出了转子绕组电阻与导条的定量关系：

$$r_r = \frac{(2N_s)^2}{N_b/3} r_b \quad (10)$$

式中， r_b 为导条电阻， N_b 为导条总数， N_s 为等效的定子绕组匝数。当有 n_{bb} 根导条断裂时，转子绕组电阻的增量 $\Delta r_{ra,b,c}$ 为：

$$\Delta r_{ra,b,c} = \frac{(2N_s)^2}{N_b/3 - n_{bb}} r_b - \frac{(2N_s)^2}{N_b/3} r_b = \frac{3n_{bb}}{N_b - 3n_{bb}} r_r \quad (11)$$

将式(9)代替转子电压方程中的电阻矩阵，即可建立 abc 坐标系下的转子断条故障异步电机模型。如果要建立 qd0 坐标系下的故障电机模型，则需要将电阻增量矩阵变换为：

$$\Delta \mathbf{r}_{rqd0} = \begin{bmatrix} \Delta r_{r11} & \Delta r_{r12} & \Delta r_{r13} \\ \Delta r_{r21} & \Delta r_{r22} & \Delta r_{r23} \\ \Delta r_{r31} & \Delta r_{r32} & \Delta r_{r33} \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中：

$$\begin{aligned} \Delta r_{r11} &= (\Delta r_{ra} + \Delta r_{rb} + \Delta r_{rc})/3 + (2\Delta r_{ra} - \Delta r_{rb} - \Delta r_{rc})\cos(2\theta_r)/6 + \sqrt{3}(\Delta r_{rb} - \Delta r_{rc})\sin(2\theta_r)/6 \\ \Delta r_{r12} &= \Delta r_{r21} = -(2\Delta r_{ra} - \Delta r_{rb} - \Delta r_{rc})\sin(2\theta_r)/6 + \sqrt{3}(\Delta r_{rb} - \Delta r_{rc})\cos(2\theta_r)/6 \\ \Delta r_{r13} &= (2\Delta r_{ra} - \Delta r_{rb} - \Delta r_{rc})\cos(\theta_r)/3 - \sqrt{3}(\Delta r_{rb} - \Delta r_{rc})\sin(\theta_r)/3 \\ \Delta r_{r22} &= (\Delta r_{ra} + \Delta r_{rb} + \Delta r_{rc})/3 + (2\Delta r_{ra} - \Delta r_{rb} - \Delta r_{rc})\cos(2\theta_r)/6 - \sqrt{3}(\Delta r_{rb} + \Delta r_{rc})\sin(2\theta_r)/6 \\ \Delta r_{r23} &= -(2\Delta r_{ra} - \Delta r_{rb} - \Delta r_{rc})\sin(\theta_r)/3 - \sqrt{3}(\Delta r_{rb} - \Delta r_{rc})\cos(\theta_r)/3 \\ \Delta r_{r31} &= \frac{1}{2}\Delta r_{r13}, \Delta r_{r32} = \frac{1}{2}\Delta r_{r23} \\ \Delta r_{r33} &= (\Delta r_{ra} + \Delta r_{rb} + \Delta r_{rc})/3 \end{aligned}$$

3 故障电机模型的 Simulink 实现及其验证

3.1 故障电机模型的 Simulink 实现

在 Simulink 中由于模型库中已有完好异步电动机模块，因此只需从模型库中拖拽出相应电机模块，设置相关参数，即可实现相关电路的仿真。但是对于故障电机模型，则需要根据数学模型重新搭建。采用 Simulink 图形化编程实现的转子断条故障电机模型如图 1 所示，主要可分为 4 个部分。

1) 坐标变换，包括 abc 转 qd0 模块和 qd0 转 abc 模块。由于采用的是 qd0 坐标系的数学模型，因此需要变换矩阵式(1)和式(2)将输入电压和输

出电流进行坐标变换。

2) 将电压方程和磁链方程分别在 q 、 d 、 0 三个轴进行实现。这三个模块的内部结构是相似的, 因此下面以 q 轴计算模块为例加以说明。该模块可分为两部分: 一部分利用定子电压方程式(3)和定子磁链方程式(5)求解出定子 q 轴磁链和电流; 另一部分利用转子电压方程式(4)和转子磁链

方程式(6)计算出转子 q 轴磁链和电流。由于转子电压方程涉及转子电阻, 因此在利用式(4)计算转子磁链时, 需要借助转子故障模型式(12)对转子电阻矩阵进行相应修改。

3) 是转矩转速模块, 先利用转矩方程式(7)计算出电磁转矩, 然后利用运动方程式(8)求解出转速。

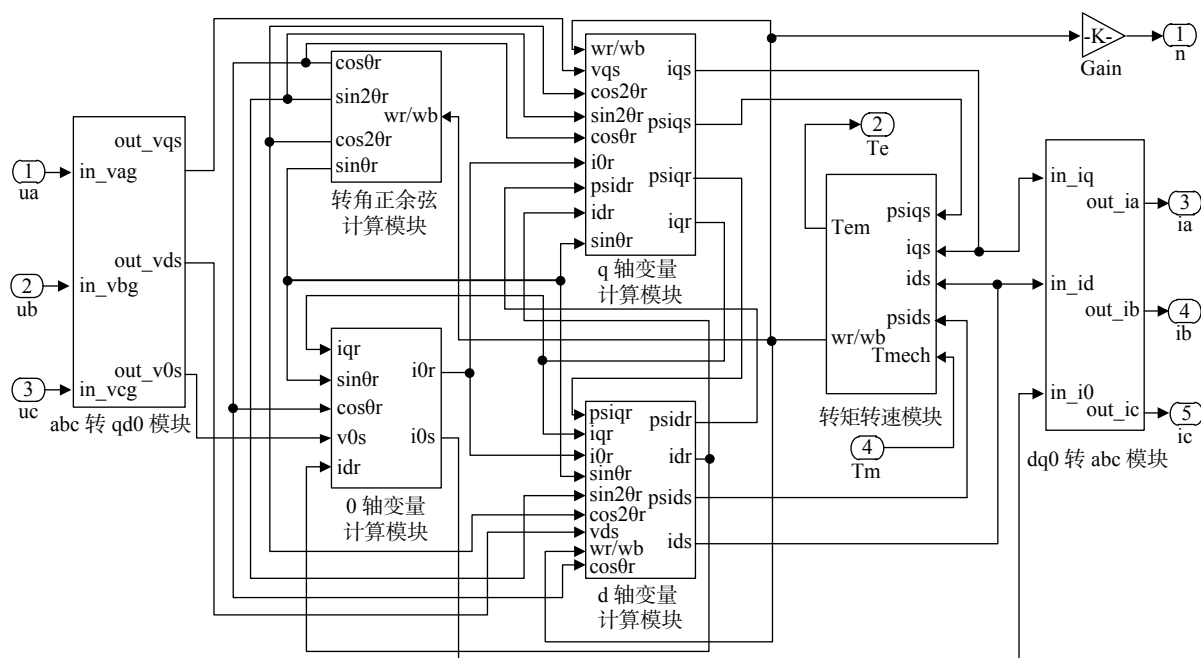


图1 转子断条故障电机 Simulink 模型

4) 第4部分是转角正余弦计算模块主要为转子断条故障模型式(12)提供所需的转角正余弦值。

3.2 故障电机模型的验证

为了验证所建模型的有效性, 选择一台型号为 Y90S-4 的异步电动机进行实验验证, 其实验平台和断条转子如图2所示。该电机功率为 1.1 kW, 转子导条数为 22; 负载为扭矩可调的磁粉制动器。



图2 实验台和断条转子

首先对完好电机进行堵转和空载实验, 获取模型中需要的电阻、电感参数; 然后, 换上 2 根断条故障转子, 采集电机在额定负载下的定子电压、定子电流和转速信号。

利用实际电机参数对模型进行设置, 并利用式(12)计算故障转子电阻的增量, 即可在 Simulink 中对转子断条故障电机模型进行仿真运行, 得到模型仿真的定子电压、定子电流和转速等信号。

实际电机与模型仿真的定子电压信号分别如图3(a)和图3(b)所示。对比图3(a)和图3(b), 实际电机与模型仿真的电压均为正弦电压且幅值几乎一致。

图4(a)和图4(b)分别是实际电机和模型仿真的定子电流信号。从图4(a)可见, 基波幅值出现了规律性的波动。这是由于断条故障使得定子电流中出现了频率为 $(1 \pm 2s)f_1$ 的谐波分量, 而该分量与基波的频率间隔又很小, 从而调制了基波的幅值^[9, 11]。但是在基波的调制成分中还含有偏心的故

障特征分量,这是因为在实验电机的安装过程中很难实现定转子的完全对中。

对比图 4(a)和图 4(b),实际电机的电流与模

型仿真电流不但在幅值上很接近,同时在断条故障特征上的表现也几乎完全一样(去除偏心鼓掌分量),这充分说明了所建电机模型的准确性和可行性。

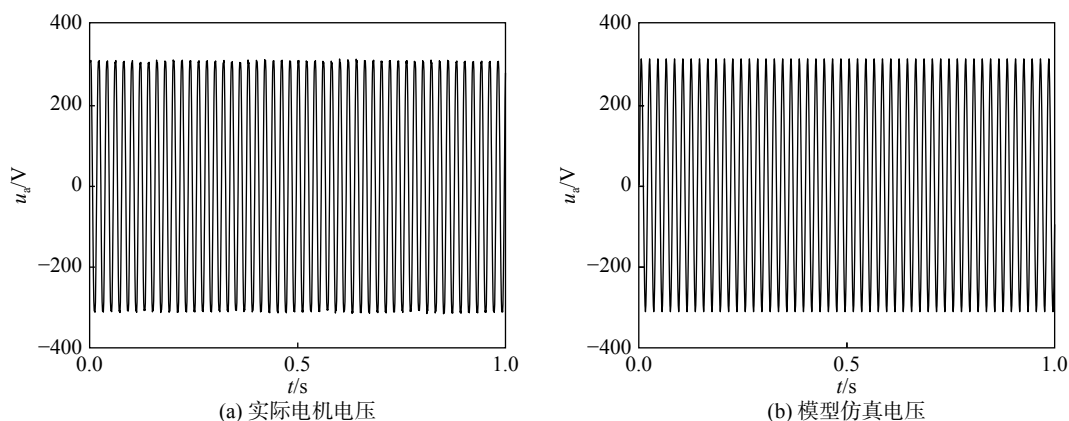


图 3 电机 a 相电压

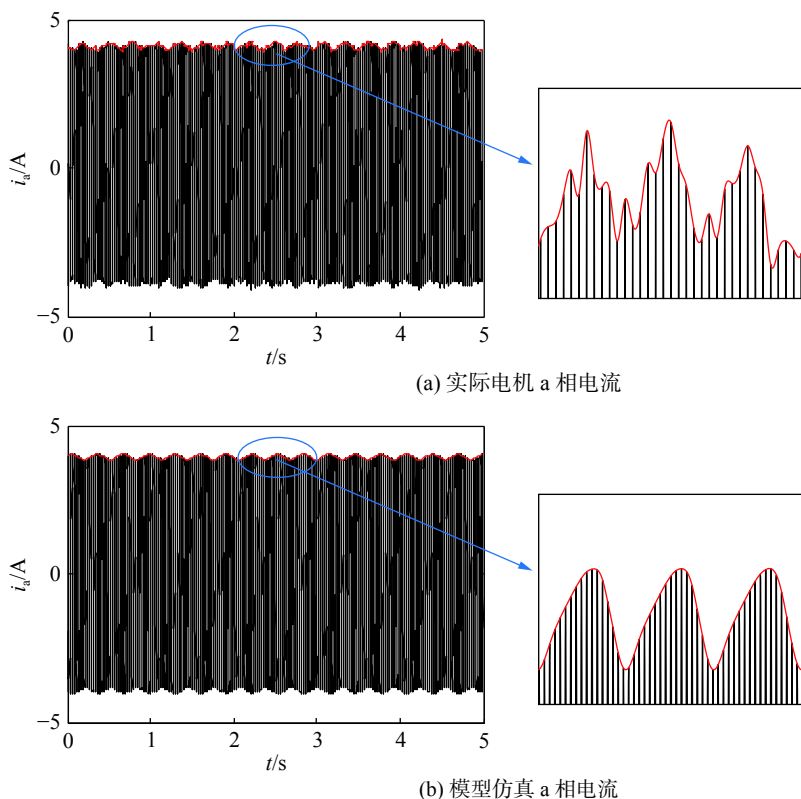


图 4 电机 a 相电流

图 5(a)和图 5(b)分别是实际电机与模型仿真的转速信号。对比图 5(a)和图 5(b),实际电机和仿真模型的转速波形也是非常相近的。如果仔细观察图 5(b),可以发现,仿真电机在升速过程中有明显的转速抖动现象,并且抖动频率为 $2sf_1$,这也是转子断条故障的显著特征。但是在稳速阶段,由于纵坐标的数值范围很大,转速波动又很小,导

致无法分辨鼓掌特征。对于实际电机的转速曲线,由于噪声较严重,使得无论在升速还是稳速阶段,都未能分辨出故障特征。

对于实际电机,电压、电流和转速是易于检测的,但是对于其它物理量,比如电磁转矩和气隙磁通等,则需要借助专门的、较昂贵的传感器或仪表才能进行分析。这给电机工作原理的理

解、断条故障机理的分析带来了不便,严重影响了教学效果。然而对于仿真模型,这些物理量都很容易获取,学生可以由内到外地分析所有的物理量,如转子电流、转子磁链、转速、转矩等,

大大提高了学习效率和学习效果,为电机性能和故障机理地深入分析和理解提供了便利。仿真故障电机刚启动 5 秒的定转子磁链和电磁转矩如图 6 所示。

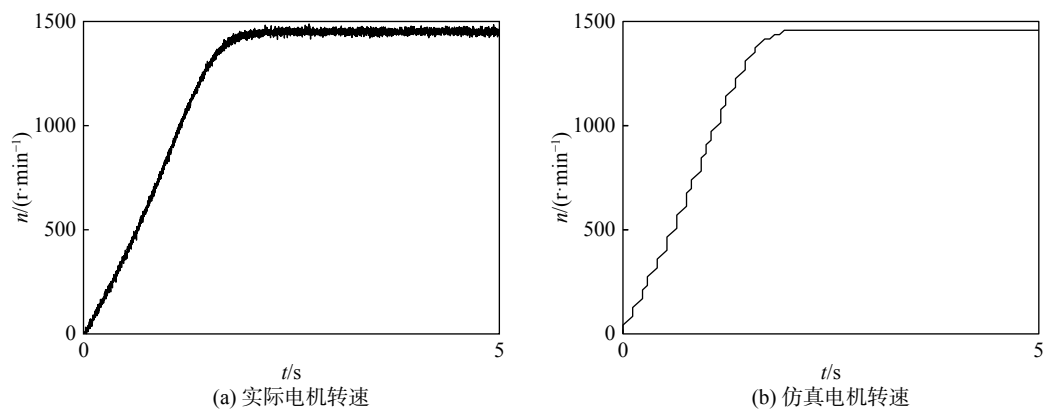


图 5 电机转速

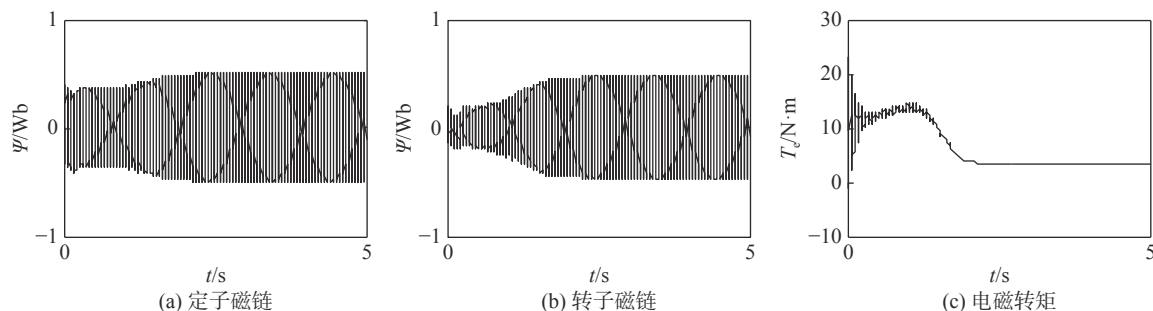


图 6 模型仿真电磁转矩和定转子磁链

4 故障电机模型的教学应用

基于仿真实验的优势,故障电机模型的建立一方面可以扩展传统课程的实验教学内容,如在电机原理及拖动基础和电力拖动自动控制系统等课程中开展一些更接近实际情况的故障电机实验;另一方面,也可以为一些新设课程,如电气设备故障诊断技术,开发一些具有一定理论深度的实验,为后续研究生教育作铺垫。

本节以电机原理及拖动基础和电气设备故障诊断技术课程的综合实训为例,设计基于所提故障电机模型的“虚实结合”教学流程,具体如图 7 所示。

1) 3 人一组(仅有 10 套传统电机实验台)开展实际完好电机空载、满载和堵转实验,获取电机参数,体验实际电机的各种运行状态。

2) 教师演示性实验(仅有 1 套故障电机实验台),拆装电机换入断条故障转子,作各种负载下

的实验。加深学生对电机结构、断条故障的感性认识,让学生认识到电机故障前后运行状态的差异。

3) 每个学生在计算机上利用实验所得电机参数,建立实验电机的仿真模型。体验实际电机与数学模型的关系。

4) 仿真分析电机电磁关系。加深理解电机工作原理、等效电路等理论知识,体验电机故障前后电磁关系的变化。

5) 仿真分析电机工作特性。加深理解电机功率、转速、转矩、电流等各个量间的关系,体验断条故障对电机性能的影响。

6) 故障机理分析,从定子电流、气隙磁链、电磁转矩,逐步到转子电流进行分析;深刻理解断条故障对定子电流、气隙磁链、电磁转矩等物理量的影响。

从第 3 步~第 6 步,可以在实验室中开展,也可以在课外其他地方进行,克服了实践教学在时

间和空间上的限制。上述实施过程不但能充分利用了原有实验台,同时还扩展了实验内容和实验深度,并且能够让每位学生都参与到实验中来,避免了许多学生对实验参与度不高的问题,大大提高了教学效果。

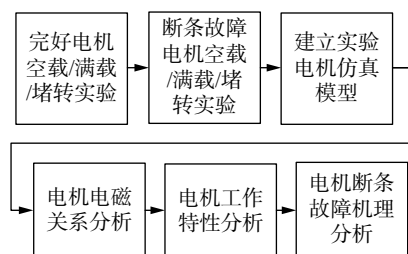


图7 “虚实结合”的实践教学流程

5 结束语

针对虚拟仿真实验的需求,设计了一种基于Simulink的转子断条故障电机模型,并将其应用于“虚实结合”的综合实训教学。通过与实际故障电机的对比验证,结果表明:该模型不但能够准确仿真断条故障下电机的各个物理量,同时具有结构简单、容易理解、方便实现等特点。故障模型的开发与应用扩展了实验教学的内容和深度,并降低了实验成本,同时也提高了学生的参与度与教学效果。此外,该模型虽是采用Simulink软件实现的,但是其设计思路可为其他仿真软件的电机建模提供参考。

参考文献

- [1] 朱礼亚, 闫茂德, 关丽敏. 基于虚拟仿真的电工电子实验教学改革与实践[J]. *实验科学与技术*, 2018, 16(2): 129-133.
- [2] 张立明, 唐海涛, 张仲明, 等. 无线通信信号衰减虚拟仿真实验平台[J]. *实验科学与技术*, 2018, 16(6): 68-70.
- [3] 段景山, 陈苹, 凌翔, 等. 智慧物联虚拟仿真实验教学中心设计与建设[J]. *实验科学与技术*, 2018, 16(5): 185-189.
- [4] 宗哲英, 张旭, 郝永强, 等. 基于MATLAB GUI的电力电子技术虚拟实验仿真平台的设计与构建[J]. *实验科学与技术*, 2018, 16(3): 146-149.
- [5] 张里, 汪波, 曾雯, 等. 基于自适应调节机制的网络虚拟实验平台[J]. *实验科学与技术*, 2016, 14(4): 94-97.
- [6] 何俊, 夏斌. 虚实结合的PLC实验系统开发[J]. *实验科学与技术*, 2018, 16(3): 162-166.
- [7] 陈美娟, 朱晓荣, 何爱龙. 虚实结合TD-LTE实验网络建设[J]. *实验科学与技术*, 2017, 15(6): 192-197.
- [8] 陈真, 王廷江, 王钊, 等. “虚实结合”交互平台在“信号与系统”案例教学中的应用[J]. *实验室研究与探索*, 2018, 37(5): 103-107.
- [9] 王攀攀, 史丽萍, 张勇, 等. 采用一种混合骨干微粒群优化算法的感应电机转子断条故障诊断[J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(30): 73-81.
- [10] 宁玉泉. 笼型感应电动机转子断条和开裂的故障诊断和在线监测[J]. *电工技术学报*, 2003, 18(1): 77-81.
- [11] 孙丽玲, 李和明, 许伯强. 基于多回路数学模型的异步电动机内部故障瞬变过程[J]. *电力系统自动化*, 2004, 28(23): 35-40.
- [12] CHANG X, COCQUEMPOT V, CHRISTOPHE C. A model of asynchronous machines for stator fault detection and isolation[J]. *IEEE Transactions on Industry Electronics*, 2003, 50(5): 578-584.
- [13] AYHAN B, TRUSSELL H J, CHOW M Y, et al. On the use of a lower sampling rate for broken rotor bar detection with DTFT and ar-based spectrum methods[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2008, 55(3): 1421-1434.
- [14] BELLINI A, FILIPPETTI F, FRANCESCHINI G, et al. Quantitative evaluation of induction motor broken bars by means of electrical signature analysis[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2001, 37(5): 1248-1255.
- [15] FILIPPETTI F, MATTELLI M, FRANCESCHINI G, et al. Development of expert system knowledge base to on-line diagnosis of rotor electrical faults of induction motors[C]// *IEEE Industry Applications Society Meeting*. Houston: IEEE, 1992.

编辑 钟晓