

doi:10.13301/j.cnki.ct.2015.07.101

基于定子电流的转子轴承系统故障诊断*

侯捷, 丁华, 杨兆建

(太原理工大学机械工程学院, 太原 030024)

摘要: 转子轴承系统作为综采设备的动力提供端, 该系统发生故障会影响整个设备的运行, 为了研究转子轴承系统的故障对电动机定子电流的影响, 利用 MATLAB/Simulink 软件建立了以电磁转矩为纽带的异步电动机与机械转子系统机电耦合模型, 模拟系统发生不对中、不平衡等故障并分析定子电流信号的特征。研究表明: 建立的机电耦合模型可以研究转子轴承系统在故障激励下定子电流的特性, 通过激励频率的不同能够辨别转子轴承系统的故障。该模型的建立为改进转子系统动力学和故障诊断提供了新的理论依据。

关键词: 转子轴承系统; 故障激励; 机电耦合; 信号分析

中图分类号: TH133.3; TM343 文献标志码: A 文章编号: 1008-8725(2015)07-0268-04

Fault Diagnosis of Rotor Bearing System Based on Stator Current

HOU Jie, DING Hua, YANG Zhao-jian

(College of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Rotor bearing system as the power of fully mechanized mining equipment. Fault will affect the whole operation of system, in order to study the relationship between current and fult. Simulation modeling using MATLAB/Simulink software, analog when the failure happen on the rotor bearing system and observe the change of the stator current signal in the event of misalignment, imbalance, bearing raceway wear. Research shows that, the electromechanical coupling model can find the characteristics of rotor bearing system under the excitation of the stator current in the fault, through the different excitation frequency to identify failure of rotor bearing system. The model provides a new theoretical basis for fault diagnosis and improvement of the rotor system dynamics.

Key words: rotor bearing system; fault excitation; electromechanical coupling; signal analysis

0 引言

转子轴承系统被广泛应用在矿山机械中, 是该类机械的核心部分。转子轴承系统发生故障时, 会影响到整个设备的运行。故障会激励系统产生突发扭矩和负载, 导致电磁间隙的波动, 从而电磁转矩发生变化, 导致电动机的定子电流也会发生波动。

李运红在 2009 年通过对轴承表面损伤故障造成的转子轴颈运动的分析, 得到了新的定子电流谐波表达式。杨江天在 2013 年提出了一种基于定子电流小波分析的机车牵引电机轴承在线故障诊断方法。魏云冰在 2007 年提出了基于定子启动电流局域波分析的异步电动机转子故障特征提取新方法并应用到电机故障特征提取中。

近期, 国内外的专家学者在研究电动机本身特性的基础上扩展到电动机的传动系统等方面, 对电动机的拖动系统故障开始研究, 因为电流测量的方便性, 越来越多的人开始注重这一方面的研究。

本文是从能量角度出发, 电磁转矩为纽带, 应用拉格朗日方程和经典电机理论建立了故障引起扭矩和负载变化, 建立机电耦合模型, 研究在故障激励下电动机定子电流的变化特性。目前该领域还在探索

阶段。

1 模型建立

转子轴承系统可以简化为电磁部分和机械部分 2 部分, 电磁转矩将 2 部分联系在一起。

1.1 机械系统模型

按照试验台的实际情况简化转子轴承系统, 将转子简化成刚性转盘, 联轴器简化成无质量但有弹性和阻尼的弹性连接, 利用拉格朗日方程建立机械转子部分的模型。机械系统的动能

$$T = \frac{1}{2} J_e \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} J_m \dot{\varphi}^2 + \frac{1}{2} J_k \dot{\varphi}^2 \quad (1)$$

式中 J_e ——电动机转子转动惯量;

$\dot{\theta}$ ——电动机角速度;

J_m ——机械部分的转子转动惯量;

$\dot{\varphi}$ ——机械部分转子运转角速度;

J_k ——转子发生故障时等效的转动惯量变化量。

在不对中故障发生时关于时间的函数

$$f(t) = \frac{1}{2} Dk(t)(\theta - \varphi)^2 \quad (2)$$

机械系统势能

$$V = \frac{1}{2} C(\theta - \varphi)^2 + f(t) \quad (3)$$

* 国家自然科学基金项目(51075292; E050302)

式中 C ——机械转子轴系的弹性扭转系数;
 D ——转子转盘直径;
 $k(t)$ ——周期是 $2/n$ 的函数;
 n ——联轴器弹性元件数。

根据式(1)、式(2)、式(3)可求得拉格朗日函数

$$L=T-V=\frac{1}{2}J_e\dot{\theta}^2+\frac{1}{2}J_m\dot{\varphi}^2+\frac{1}{2}J_k\dot{\varphi}^2-\frac{1}{2}C(\theta-\varphi)^2-\frac{1}{2}Dk(t)(\theta-\varphi)^2 \quad (4)$$

损耗函数

$$F=\frac{1}{2}k_c(\dot{\theta}-\dot{\varphi})^2 \quad (5)$$

式中 k_c ——机械转子的阻尼系数。

$$\text{广义力} \begin{cases} Q_1=T_e \\ Q_2=T_{\text{mech}}-T_z \end{cases} \quad (6)$$

式中 T_z ——外力的载荷;

T_{mech} ——加载的载荷。

将式(4)、式(5)、式(6)带入非保守力动力系统的拉格朗日方程

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}_k}\right)-\frac{\partial L}{\partial x_k}+\frac{\partial F}{\partial \dot{x}_k}=Q_i \text{ 中, 得到下方方程}$$

$$\begin{cases} J_e\ddot{\theta}+C(\theta-\varphi)+Dk(t)(\theta-\varphi)+k_c(\dot{\theta}-\dot{\varphi})+J_k\ddot{\varphi}=T_e \\ J_m\ddot{\theta}-C(\theta-\varphi)-Dk(t)(\theta-\varphi)-k_c(\dot{\theta}-\dot{\varphi})+J_k\ddot{\varphi}=T_z-T_{\text{mech}} \end{cases} \quad (7)$$

1.2 电磁系统模型

拖动转子系统的异步电动机一般是多变量系统,并且电动机的磁通、电感、频率、电流、转速之间都存在相互的联系,因此,电动机的动态数学模型是一个多变量的系统。为了方便建模,这里采用了常用的三相电流变两相电流的电机电流解耦方法。通过变化之后,可以得到下面的数学模型

$$\begin{bmatrix} U_{sd} \\ U_{s\beta} \\ U_{rd} \\ U_{r\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s+L_p & 0 & L_m p & 0 \\ 0 & R_s+L_p & 0 & L_m p \\ L_m p & \omega_r L_m & R_r+L_r p & \omega_r L_r \\ -\omega_r L_m & L_m p & -\omega_r L_r & R_r+L_r p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \end{bmatrix} \quad (8)$$

电磁转矩方程

$$T_e=n_p L_m (i_{s\beta} i_{r\alpha} - i_{s\alpha} i_{r\beta}) \quad (9)$$

式中 $I_{ra}、I_{rb}、I_{sa}、I_{sb}$ ——定子和转子的两相电流;
 L_m ——变换后两相坐标系下定子与转子的等效互感;
 L_s ——变换后两相坐标系下两相定子的等效自感;
 L_r ——变换后两相坐标系下两相转子的等效自感;
 R_s ——定子的等效电阻;
 R_r ——转子的等效电阻;
 n_p ——电动机的极对数;

ω_r ——电动机转子的角速度。

综合式(7)、式(8)、式(9)得到转子轴承系统的机电耦合数学模型。模型的建立是在 MATLAB 软件下完成的。

2 MATLAB 仿真模型的建立

利用 Simulink 模块进行转子轴承系统的机电耦合模型的仿真。根据上述的数学方程在 Simulink 建立相应的模块,其中重点是电流的解耦模块、电磁转矩模块、二质体机械电流枢纽模块等。仿真模型利用 Goto 模块进行数据传输,使最终的系统模型更加简明,操作性更强,也方便了模型的修改和研究。

如图1、图2、图3所示。

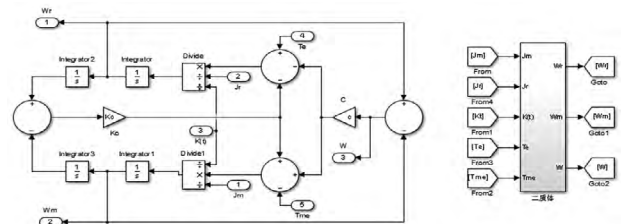


图1 二质体子系统模块建模

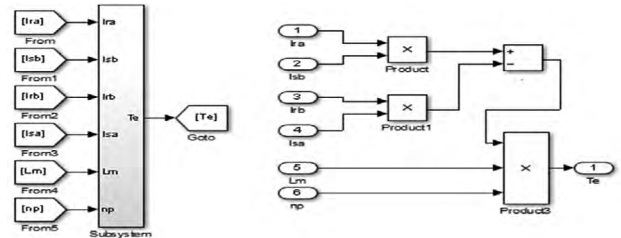


图2 电磁转矩子系统模块建模

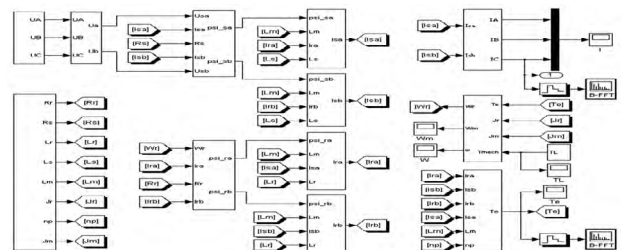


图3 转子系统的机电耦合仿真模型

W_m 机械转子转速 w 电动机转子和机械转子的转速差

T_L 故障下扭矩 T_e 电磁转矩

3 仿真分析

3.1 验证模型的正确性

正常启动模型,前3 s是启动阶段,机械转子的转动惯量比较大,启动时转差率也比较大,这里取转差率为1,故而电动机转子与磁场的相对运动速度达到最大值,表现为电流达到了最大值,从图4中看到近似于稳定状态的5倍,3 s之后,达到稳定状态,在启动之后电磁转矩随着时间开始变大,达到相应的稳定状态时因为没有负载,骤降为0,如图5所示;3 s时是无负载的平稳运行阶段,这时的转子轴承系统只受到模型中较小恒定摩擦力的作用,定子电流比较小而且幅值变化不大;电磁转矩几乎为0。

仿真结果与理论分析相符合,说明建立的机电耦合模型具有实用性。

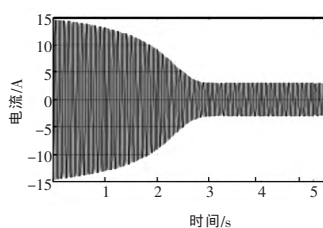


图4 启动到稳定状态电流变化图

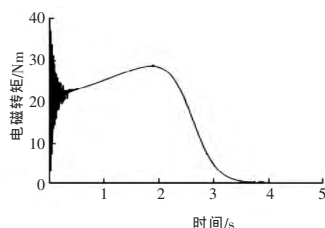


图5 启动到稳定状态电磁转矩变化图

3.2 故障下电流的特性

研究表明,电机电流的波形是以电网信号为载波信号,电磁转矩信号为调制信号的已调制波。

载波信号 $u = U_m \cos 2\pi f_{ut}$

不平衡故障时,典型特征是转子部件的质量偏心,简化式(7)中转动惯量 J_k 和 T_z 的变化;不对中故障时,不对中会引起轴系之间存在一定的夹角,会造成轴系转动惯量的变化和相对位置的变化,简化式(7)中机械系统的转动惯量 J_k 和势能 $f(t)$ 的变化;轴承在磨损时,轨道和滚子接触面上出现了不均匀的凹坑所会引起轴系在运转过程中受到周期性的外加负载,简化式(7)中 T_z 的变化。

以下是参数谐波的输入量。

不平衡:

离轴系距离 $J_k=10$ cm,质量=20 g 的质体, $T_z=20$ Nm, 频率=20 Hz 时, $T_z=20\sin(20\pi t)+20$ 的信号;

不对中:

离轴系距离 $J_k=10$ cm,质量=20 g 的质体, $k(t)=25$ Hz 时, $T_z=10\cos t+10$ 的信号;

轴承故障:

$T_z=10$ Nm, 频率=30 Hz 时, $T_z=10 \sin(10\pi t)+10$ 的信号。

转子轴承系统在故障激励情况下,电流频谱图在没有经过多次处理之前几乎看不到什么特点,对信号进行多次的 FFT 处理,得到了以下结论:在不对中情况下,载波信号是 50 Hz 的电网信号,调制波信号是附加扭矩,频率是 25 Hz,按照理论分析,电流频谱图中,应该有 1 个主频和 4 个边频,在扭矩激励下,调制波会产生 2 倍于本身的激励频率,所以在定子电流频谱图中,存在 50 Hz, (50 ± 25) Hz, $(50\pm 25\times 2)$ Hz 的波峰,如图 6 所示。仿真效果和理论推断

的结果相符合。

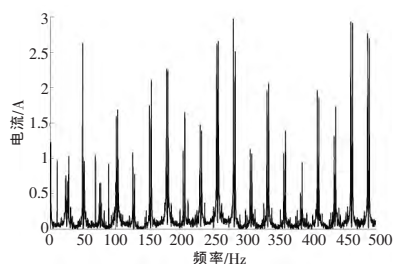


图6 不对中情况下电流的频谱图

在不平衡情况下,调制波信号是附加扭矩,频率是 20 Hz,按照理论分析,电流频谱图中,应该有 1 个主频和 4 个边频,在扭矩激励下,调制波会产生 2 倍于本身的激励频率,所以在定子电流频谱图中存在 50 Hz, (50 ± 20) Hz, $(50\pm 20\times 2)$ Hz 的波峰,如图 7 所示。仿真效果和理论推断的结果相符合。

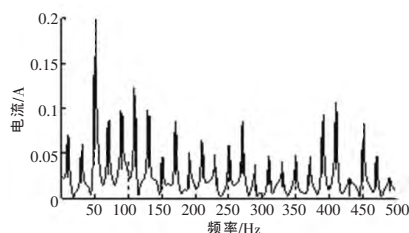


图7 不平衡情况下电流的频谱图

在轴承故障时情况下,载调制波信号是附加扭矩,频率是 30 Hz,按照理论分析,在定子电流的频谱图中,应该有 1 个主频和 4 个边频,在扭矩激励下,调制波会产生 2 倍于本身的激励频率,所以在定子电流频谱图中存在 50 Hz, (50 ± 30) Hz, $(50\pm 30\times 2)$ Hz 的波峰,如图 8 所示。仿真效果和理论推断的结果相符合。

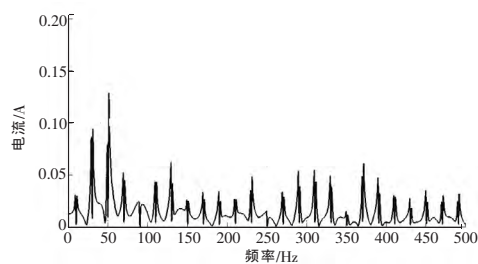


图8 轴承故障频谱图

4 结语

在异步电动机两相静止坐标系上建立以拉格朗日方程为基础的机械电流二质体转子轴承系统模型,综合了机械能量方程和电动机电力方程,仿真结果表明,该模型具备实际的应用价值,理论体系可以作为研究转子动力学的参考。

通过对信号的处理之后,得到了以下结论:转子系统在发生故障时,故障表现出了一定的周期性,在电流中能够观察到故障激励所引发的电流频率成

doi:10.13301/j.cnki.ct.2015.07.102

基于继电保护电流速断装置的应用和思考

周理, 范甄

(上海第二工业大学 工程训练中心, 上海 201209)

摘要:介绍了继电保护电流速断装置在电气系统中的重要地位,并且还叙述了在电气系统中的作用和安全运行,比较详细地阐述了继电保护—电流速断装置的运行要点。并对2种常用的电流速断保护装置原理和接线方式的分析;瞬时电流速断保护和带时限电流速断保护工作过程进行了探讨,这对以后在供电系统工作中会得到一些帮助。

关键词: 电流速断保护;故障;瞬时;继电保护

中图分类号: TM588 文献标志码: B 文章编号: 1008-8725(2015)07-0271-03

Appliance and Deliberate of Relay Protection Electricity Breaking Device

ZHOU Li, FAN Zhen

(Experiment and Training Centre, Shanghai Second Polytechnic University, Shanghai 201209, China)

Abstract: Introduce important place of relay protection—electricity breaking device in electrical system, and action in electrical system, safety run of insure, detailedly expound running main of relay protection—electricity breaking device. both in common use electricity breaking protection device method are analysed; electricity instantaneous breaking protection device and definite time electricity breaking protection device working analysis. From this time forth, have certain direction meaning in electric power transformer function job.

Key words: electricity breaking protection; failure; instantaneous; relay protection

0 引言

电力电网系统的安全运行,是各大企业安全生产的根本保证,特别在煤炭行业中,用电的电气设备多,电气设备的容量大,电力系统的安全运行尤为突出,绝不能有丝毫的麻痹。然而,在长期运行的各个电气设备中,或多或少地都会发生一些故障,甚至还会发生一些短路故障。由于电气设备内部绝缘的老化,或者由于外界突发情况的发生,都可以引起意想不到的各种电气短路故障,短路电流要大于额定电流的几十倍,这样大的短路电流,如不及时切断故障电源,必定会产生电弧、烧毁电气设备,严重时还会发生火灾,危及国家财产和人身安全。

碰到这种严重的电气系统短路故障,必须要在非常短的时间内、甚至要短到几个微秒,迅速地将故障电源切除,在那么短的时间内,由变电所的值班运

行人员来发现故障,接着将故障电源切除是根本不可能办到的,因此必须要由继电保护装置来完成,快速地切断故障电源,这样才能保证电气设备的安全运行。传统的继电保护装置已经被大家所熟悉,比较直观,容易理解,运行起来也很安全可靠。在电力系统中继电保护装置是确保运行安全的最主要措施之一,电流速断保护就是继电保护装置的一种形式。

1 继电保护的运行要点

继电保护装置有着各种不同的运行方式。被测试的物理量不同,保护装置的性质也就不一样。根据测试不同的物理量,保护装置可以是反映电气量的保护,也可以是反映非电气量的保护。通常的继电保护装置一般由测量部分、逻辑部分和执行部分3个部分组成,选择性、快速性、灵敏性和可靠性是继电保护装置必须要满足的4个最基本的要求。

分,在定子电流的频谱图中变化比较明显,这样根据不同的成分分析就能推出故障的类型,实现故障诊断。

参考文献:

- [1] 李全坤, 廖明夫, 蒋云帆. 双转子不对中故障振动特性分析[J]. 机械科学与技术, 2014, 33(12): 1916-1920.
- [2] 张娅, 王维民, 杨佳丽, 等. 不同轴承支撑下碰摩转子系统的动力学特性[J]. 振动、测试与诊断, 2014, 34(6): 1115-1119, 1174.
- [3] 钟志贤, 祝长生. 横向裂纹多盘柔性转子系统动力学特性[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2012, 46(10): 1839-1845, 1886.

- [4] 赵永成. 浅析燃气发电机组故障诊断的原则、步骤和方法[J]. 煤炭技术, 2013, 32(6): 44-45.
 - [5] 李振平, 罗跃纲, 姚红良, 等. 转子系统支承松动的非线性动力学及故障特征[J]. 东北大学学报, 2002, 23(11): 1048-1051.
 - [6] 顾卫东, 王永亮, 方勃, 等. 轴承-转子系统稳定性实验研究[J]. 汽轮机技术, 2011, 53(6): 444-446, 454.
 - [7] 杨江天, 赵明元, 张志强, 等. 基于电机电流小波包分析的牵引电机轴承故障诊断[J]. 铁道学报, 2013, 35(2): 32-36.
- 作者简介: 侯捷(1978-), 山西忻州人, 在读研究生, 主要从事故障诊断研究, 电子信箱: 416072537@qq.com.

责任编辑: 郑万才 收稿日期: 2015-03-03