

# RIDS中同步电机模型特性研究

郑旭<sup>1</sup>, 孙海顺<sup>1</sup>, 黄立滨<sup>2</sup>, 庄良文<sup>2</sup>, 王学强<sup>2</sup>

(1. 华中科技大学电气学院, 湖北 武汉 430074; 2. 许继集团, 河南 许昌 461000)

**摘要:** 首先对 RIDS 中同步电机建模问题进行一般性的分析。然后在此基础上, 采用典型同步电机参数, 应用 RIDS 中的同步电机模型进行电机静态特性和动态特性实验, 包括空载和稳态短路实验, 以及突然三相短路实验。通过实验结果进行分析验证了 RIDS 中同步发电机模型的正确性。

**关键词:** 实时数字仿真器; RIDS; 同步电机; 特性实验

**中图分类号:** TM743 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2005)13-0064-04

## 0 引言

在 20 世纪 90 年代初, 随着数字信号处理器 (DSP) 的迅速发展, 加拿大 Manitoba 直流研究中心 RIDS 公司率先推出了国际上第一台电力系统全数字实时仿真系统 (RIDS)。其应用领域涵盖了系统规划及优化、可行性研究、新设备 (继电保护、HVDC、FACTS 等) 设计与测试、系统稳态及电磁暂态分析等等。

RIDS 是一套专门设计用以研究实时电磁暂态现象的特殊用途的并行计算机系统。RIDS 系统同时包括专门设计的硬件和软件。RIDS 硬件是基于数字信号处理器 (DSP) 并应用了先进的并行处理技术以维持连续的实时处理。

RIDS 软件包括了构成物理电力系统的许多复杂元件的精确的电力系统元件模型。RIDS 可以运行的电力系统元件主要有: 同步电机、异步电机及励磁机、调速器和多质量块; 单相和三相变压器; 单回输电线和双回输电线; 无源 RLC 支路、滤波器、单相和三相电源; 断路器和故障设置; 串联补偿 (TCSC 和 MOV); 高压直流阀组; CT, CVT 等。

上述单一元件及整个电力系统仿真的算法建立在与 EMTP 和 EMTDC 中采用的相同数学模型基础上。通过这些基本的元件, 用户可以建立需要进行研究的电力系统网络。

同时, RIDS 提供了基于 UNIX 操作系统的通用计算机工作站上的友好的图形化用户界面, 称为 PSCAD, 它可以使用户方便地建立被仿真的电力系统、控制仿真运行及分析仿真结果。

## 1 RIDS 中同步电机模型的基本理论

在 PSCAD/Draft 中的基于通用电机理论的同步

电机模型如图 1 所示<sup>[1]</sup>。它可以连接至用户自定义的电力系统网络。而且, 励磁系统 (AVR)、稳定器、调速器、汽轮机和多质量块模型都可以与同步电机模型接口。

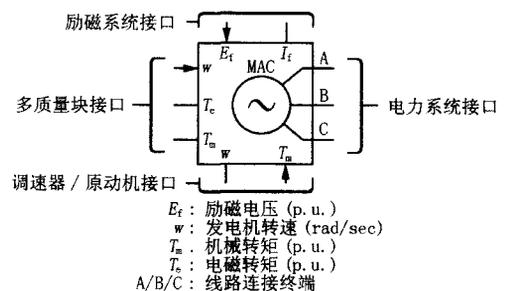


图 1 RIDS 中同步电机模型

Fig 1 Synchronous machine model in RIDS

应用 RIDS 同步电机模型, 用户可以进行电力系统的继电保护测试与分析、稳定性分析、控制器的设计等工作。

### 1.1 数学模型

同步电机的内部电磁暂态过程非常复杂, 为了建立同步电机的数学模型, 通常采用理想化的假设条件。

基于理想化假设条件, 带阻尼绕组的凸极同步电机由六个具有互感耦合关系的绕组组成, 这六个绕组分别为: 定子 a、b 和 c 三相绕组, 它们的空间位置互差 120 电角度, 在结构上完全相同, 它们均在气隙中产生正弦分布的磁动势; 转子励磁绕组 f, 产生直轴磁链; 转子纵轴阻尼绕组 D; 转子交轴阻尼绕组 Q。

与凸极机不同, 隐极式同步发电机由 7 个具有互感耦合关系的绕组组成, 它在 Q 轴方向还增加一个等效阻尼绕组 H, 用于模拟转子本体深处涡流产生的缓慢变化的磁链作用。

### 1.2 同步电机的参数

对同步电机原始方程中定子绕组的电势平衡方程和磁链方程进行 Park 变换就可以得到同步电机的 Park 方程式。同步电机 Park 方程中,除去零轴绕组有关方程式外,余下的方程将涉及到各绕组电阻、各绕组自感系数以及绕组间的互感系数等共 17 个原始参数,其中大部分难以直接得到。实际上同步电机的参数常用  $R_a, X_d, X_q, X_s, X_d', X_q', X_d'', X_q'', T_{d0}, T_{d0}', T_{q0}, T_{q0}'$  等 12 个稳态、暂态和次暂态参数表示。这些参数通常称为电机参数<sup>[2]</sup>,可以通过电机试验得到,在 RTDS 中称为 Generator 参数。

### 1.3 RTDS 中同步电机模型的等值电路

RTDS 中同步电机采用 d, q, 0 坐标系下的方程式作为数学模型。其 d, q 轴等值电路如图 2 所示。当选择同步发电机的转子类型为凸极时,转子 Q 轴将只考虑一个阻尼绕组,即 7 阶模型;当选择同步发电机的转子类型为隐极时,转子 Q 轴将考虑两个阻尼绕组,即 8 阶模型。

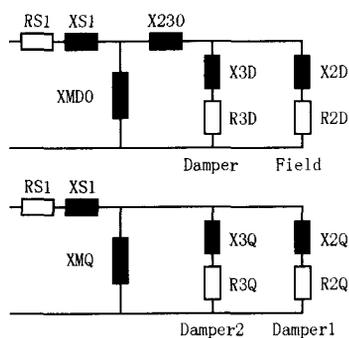


图 2 RTDS 中同步电机 d, q 轴等值电路

Fig 2 Equivalent circuit of the d, q shaft

其中, X230 (可选)代表 D 轴上阻尼绕组与励磁绕组的互感磁链通路。它模拟了 D 轴上只与阻尼线圈和励磁绕组之间交链而不与定子绕组交链的互感磁链。这样可以提高电机模型的精度。

## 2 RTDS 中同步电机特性实验

### 2.1 RTDS 中同步电机空载和稳态短路特性分析

发电机空载特性和短路特性代表了同步电机两种典型运行状态下的磁路工作状态,相应的数据可以通过发电机试验得到。并且,通过空载特性和短路特性还可以求出电机不饱和同步电抗的大小。

#### 1) 空载实验

发电机参数为:  $X_a = 0.20, X_d = 1.877, X_d' = 0.411, X_d'' = 0.334, X_q = 1.844, X_q' = 0.796, X_q'' = 0.334, R_a = 0.002, T_{d0} = 10.04, T_{d0}' = 0.0201, T_{q0} =$

$0.691, T_{q0}' = 0.0335$ 。以上阻抗为标么值,时间常数单位为秒。

使发电机保持为同步转速,空载运行。改变励磁电流  $I_f$  从零变到某值,记录下空载电势  $E_0$  与励磁电流  $I_f$  的关系曲线,即空载曲线,如图 3 所示。

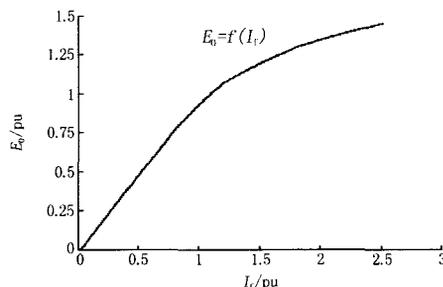


图 3 同步电机空载特性实验

Fig 3 No load characteristic experimentation of synchronous motor

#### 2) 短路实验

发电机参数同空载实验。使发电机保持稳态短路运行。改变励磁电流  $I_f$  从零变到某一值,记录下短路电流  $I_k$  与励磁电流  $I_f$  的关系曲线,即短路特性曲线,如图 4 所示。

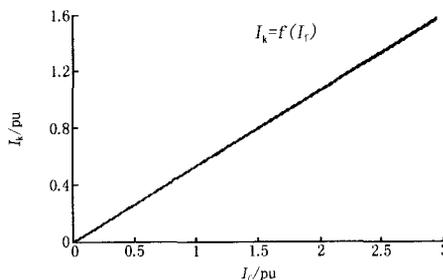


图 4 同步电机短路特性实验

Fig 4 Short circuit characteristics experimentation of synchronous motor

同步发电机发生三相稳态短路时,限制短路电流的仅是发电机内部的阻抗。由于同步发电机的电枢电阻远小于同步电抗,因此,短路电流可认为是纯感性的,于是电枢磁势基本上是一个纯去磁的直轴磁势,即  $F_a = F_{ad}$ ,各磁势矢量都在一条直线上,合成磁势是  $F = F_f - F_{ad}$ 。然后利用空载特性即可求出气隙合成电势  $E$ 。

由于  $U = 0$ ,所以

$$E = U + IR_a + jIX_d - jIX_q \quad (1)$$

可见,短路时合成磁势只等于漏抗压降,其对应的气隙合成磁通很小,电机的磁路处于不饱和状态。因此合成磁势  $F_f = F - E / I_f$ 。由于  $F_{ad} = K_{ad} F_{ad}$

也总是与  $I$  成正比,所以励磁磁势  $F_f = F + F_{ad}$  也必然与  $I$  成正比,故短路特性是一条直线<sup>[3]</sup>。

3) 计算不饱和同步电抗  $X_d$  的值<sup>[4]</sup>

如图 5 所示。首先作出空载特性的气隙线。在空载特性的不饱和部分也即直线部分找两个点,由这两个点就可以作出气隙线的直线方程。通过计算得出气隙线的直线方程为  $y = x_0$ 。

分别在气隙线和短路特性上找出对应纵坐标为 1 时的横坐标值,即励磁电流的标么值,分别记为  $I_1, I_2$ 。由方程  $y = x$  可得出  $I_1 = 1.0$ 。再利用十字叉丝可得  $I_2 = 1.88$ 。

计算  $X_d = I_2 / I_1 = 1.88$ 。而在同步发电机的菜单中输入的  $X_d = 1.877$ ,两者十分接近。

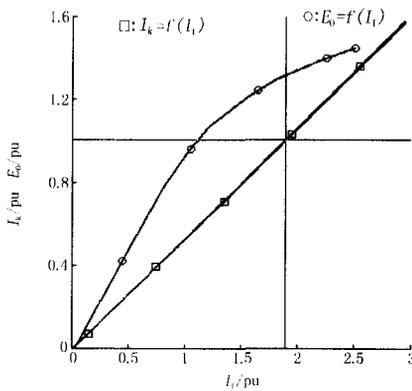


图 5 利用发电机特性曲线计算不饱和同步电抗

Fig 5 Calculating the unsaturation impedance with characteristic curve

2.2 RTDS中同步电机突然三相短路动态特性分析

同步电机发生短路后,定子及转子绕组将出现各种电流分量,这些电流分量共同作用,使定子及转子在短路瞬间的磁链保持不变。定子绕组中将同时出现三种电流:基频分量、直流分量、倍频分量;转子绕组中将出现两种电流:直流分量、基频分量。随着时间的推移,由于各绕组存在电阻,所有绕组的磁链都将发生变化,逐渐过渡到新的稳态值。所有为了维持磁链不变而出现的自由电流都将按着不同的时间常数衰减到零。

为了简化分析,一般将同步电机的电磁暂态过程分为次暂态过程、暂态过程和稳态过程三个阶段。相应地定义了次暂态短路时间常数 ( $T_{d'}、T_{q'}$ )、次暂态开路时间常数 ( $T_{d0}、T_{q0}$ )、暂态短路时间常数 ( $T_d、T_q$ )、暂态开路时间常数 ( $T_{d0}、T_{q0}$ )以及电枢时间常数 ( $T_a$ )。

本实验中,利用 Fourier分析方法提取短路电流的各种分量,通过波形分析求得暂态时间常数以及电枢时间常数。

空载突然短路实验中发电机参数为:  $X_a = 0.15, X_d = 1.0, X_d' = 0.3, X_d'' = 0.21, X_q = 0.6, X_q' = 0.31, R_a = 0.005, T_{d0} = 5.0, T_{d0}' = 0.52, T_{q0} = 1.4$ 。阻抗为标么值,时间常数单位为秒。

同步电机空载运行,控制发电机分别在  $0^\circ; 180^\circ; 90^\circ$  的合闸角下发生突然短路,记录下三相定子和励磁电流波形,如图 6、图 7 和图 8 所示。波形从上至下依次为励磁电流、A 相、B 相、C 相定子电流。

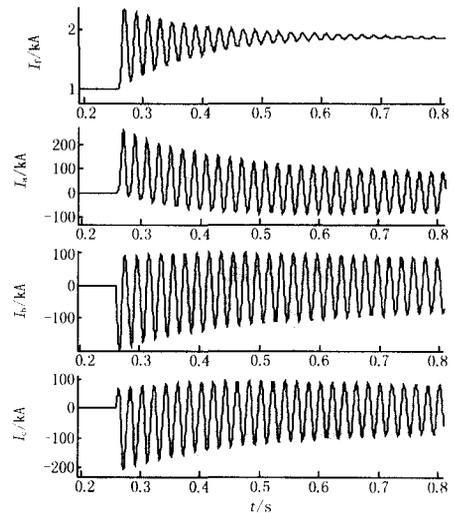


图 6 合闸角为 0 时波形

Fig 6 Waveforms when switch-on angle = 0°

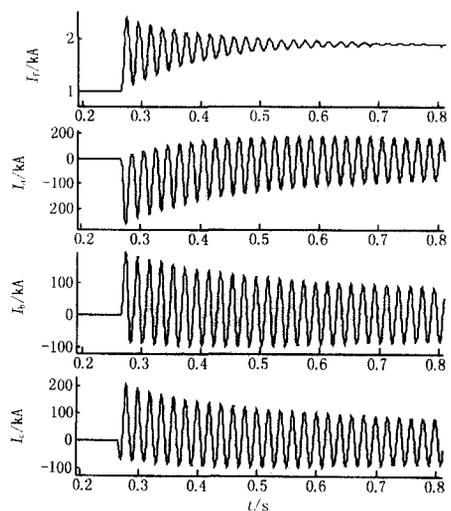


图 7 合闸角为 180 度波形

Fig 7 Waveforms when switch-on angle = 180°

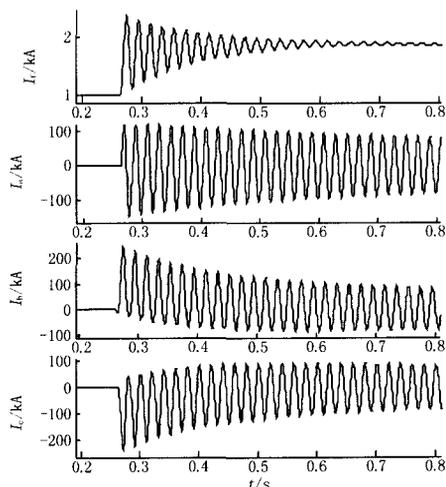


图8 合闸角为90°波形

Fig 8 Waveforms when switch on angle = 90°

当转子以同步转速旋转时,定子各相绕组的磁链将做正弦变化,且相位互差120°。

当合闸角为0°时,与定子A相绕组相交链的磁链初值最大,因此定子A相绕组中的直流分量最大。所以突然短路后,定子A相绕组的电流峰值最大。而定子B、C相绕组所交链的磁链与A相相反,且大小不及A相,所以定子B、C相绕组的电流峰值比A相的小,且方向与A相相反。

当合闸角为180°时,定子三相绕组所交链的磁链初值与合闸角为0°时方向相反,大小相等。故定子三相绕组的电流波形方向与合闸角为0°时完全相反。

当合闸角为90°时,定子A相绕组所交链的磁链初值为0,所以定子A相绕组中直流分量为0,因此其电流波形为对称波形;而B、C两相由于所交链的磁链初值方向相反,因此B、C两相电流波形方向相反。

对合闸角为90°时的RTDS录波波形利用Fourier分析方法可以求得暂态时间常数 $T_d$ 和电枢时间常数 $T_a$ 。

#### 1) 求取暂态时间常数 $T_d$

$T_d$ 的准确值可以由给定的模型参数 $X_d$ 、 $X_d'$ 、 $T_{d0}$ 、 $T_{d0}'$ 计算得出<sup>[5]</sup>。本例中,暂态时间常数 $T_d$ 的计算值为1.3713 s。

暂态时间常数还可以通过励磁电流的直流分量衰减曲线求得。由于次暂态时间常数比暂态时间常数小很多,因此通常近似地认为过渡过程的后段主要由暂态过程决定,可以根据励磁电流直流分量的后段波形确定暂态过程的衰减时间常数。

利用Fourier分析可得励磁电流直流分量如图9所示。取 $t_0 = 3$  s时刻为计算起始点,励磁电流直流分量为1.2258 kA,其中稳态电流分量为1 kA,自由直流分量为0.2258 kA,该自由分量按指数规律衰减63.2%时,对应自由直流分量的值应为0.083067 kA,即励磁电流直流分量应为1.083067,此时对应 $t_1 = 4.3645$  s。由时间常数定义可知衰减时间常数 $T_d$ 为 $t_1 - t_0 = 1.3645$ 。与理论计算所得的 $T_d$ (1.3713 s)值非常接近。

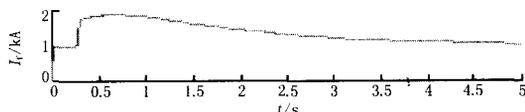


图9 励磁电流直流分量幅值衰减曲线

Fig 9 Attenuation of DC amplitude in field current

#### 2) 求取电枢时间常数 $T_a$

理论上电枢时间常数由下式计算<sup>[5]</sup>:

$$\frac{1}{T_a} = \frac{R_a}{2} \left( \frac{1}{X_d} + \frac{1}{X_q} \right) \quad (2)$$

在本试验中,按上式可得电机电枢时间常数

$$T_a = 0.1594 \text{ s}$$

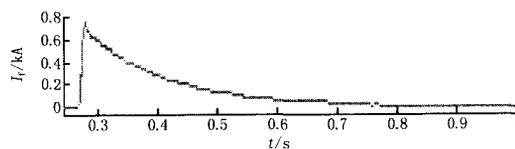


图10 励磁电流基频分量幅值衰减曲线

Fig 10 Attenuation of fundamental amplitude in field current

利用Fourier分析可得励磁电流基频分量衰减特性如图10所示。按照时间常数的定义,可以由这条曲线定量地确定电枢的时间常数,计算方法同上,得电枢时间常数为0.1533,与理论计算值(0.1594)很接近。

### 3 结论

本文对RTDS中同步电机模型进行了空载和短路特性实验以及空载状态下突然三相短路的动态过程进行了仿真计算,并进行了分析。分析结果表明RTDS中同步发电机模型较好地模拟了实际同步电机的动态特性。

#### 参考文献:

[1] RTDS Manual/User Set[Z].

(下转第81页 continued on page 81)

收稿日期: 2004-10-21

作者简介:

鲁 顺 (1971 - ),男,博士研究生,高级工程师,主要从事  
电网调度运行及电力市场研究与应用工作; E-mail: l\_shun0  
@163.com

高立群 (1949 - ),男,博士生导师,主要从事现代控制  
理论的研究与应用工作;

魏庆海 (1960 - ),男,博士,教授级高级工程师,主要  
从事电网调度运行管理工作。

### Dispatching record management system based web in Liaoning power system

LU Shun<sup>1</sup>, GAO Li-qun<sup>1</sup>, WEI Qing-hai<sup>2</sup>, LI Hui<sup>2</sup>, LU Da<sup>3</sup>

(1. School of Information Science and Engineering, Northeast University, Shenyang 110004, China;

2 Liaoning Provincial Electric Power Co., Ltd, Shenyang 110006, China;

3. Chinese Academy of Sciences Shenyang Compute Research Institute, Shenyang 110004, China )

**Abstract:** This paper introduces one set of dispatching record management systems exploited by Liaoning Electric Power Dispatching Center. This paper details the system in engineering philosophy, structural design, data base design, hardware and software environment and concrete function, looks forward to its future work. This system had been applied for one year in Liaoning Electric Power Dispatching Center. This system greatly reduces working burden of the dispatcher, improves working efficiency, regulates dispatching record management, and supplies a strong tool for the modern management of Liaoning Electric Power Dispatching.

**Key words:** power system dispatching; dispatching record management; J2EE application

(上接第 67 页 continued from page 67)

- [2] 夏道止. 电力系统分析 [M]. 西安:西安交通大学, 1995.  
XIA Dao-zhi Power System Analysis [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1995.
- [3] 许实章. 电机学 [M]. 武汉:华中理工大学, 1998.  
XU Shi-zhang Electrical Machinery [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1998.
- [4] 电机工程手册,第 4 册 [M]. 北京:机械工业出版社, 1997.  
The Manual of Machinery Engineering, Part Four [M]. Beijing: China Machine Press, 1997.

- [5] 何仰赞,等. 电力系统分析(上、下册) [M]. 武汉:华中理工大学出版社, 1995.  
HE Yang-zan, et al Power System Analysis, Part and [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1995.

收稿日期: 2004-09-22

作者简介:

郑 旭 (1979 - ),男,硕士研究生,研究方向为电力系统仿真和控制; E-mail: hustzx987@163.com  
孙海顺 (1971 - ),男,讲师,研究方向为电力系统仿真和柔性交流输电系统。

### Research on the synchronous machine model in RTDS

ZHENG Xu<sup>1</sup>, SUN Hai-shun<sup>1</sup>, HUANG Li-bing<sup>2</sup>, ZHUANG Liang-wen<sup>2</sup>, WANG Xue-qiang<sup>2</sup>

(1. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. XJ Group Corporation, Xuchang 461000, China)

**Abstract:** General problem is discussed on modeling of the synchronous machine in RTDS. Experimentations of the synchronous machine under the steady state and dynamic condition are applied with typical machine parameters. The results show that the synchronous machine in RTDS are correct and accurate.

**Key words:** real-time digital simulator; RTDS; synchronous machine; characteristic experimentation