

RTDS 在发电机失步保护动模测试中的应用

黄立滨¹, 程时杰¹, 陈大鹏², 孙海顺¹, 王学强³, 庄良文³

(1. 华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 许继日立电气有限公司, 河南 许昌 461000;
3. 国家继电器检测中心数字仿真室, 河南 许昌 461000)

摘要: 介绍了 RTDS 在发电机失步保护动态模拟测试中的应用, 阐述了基于 RTDS 建立发电机失步保护动态模拟测试仿真模型的方法, 并通过一套成熟的发电机失步保护装置验证了 RTDS 在考察发电机失步保护上的有效性。

关键词: RTDS; 发电机失步保护; 动模实验

中图分类号: TM772 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)18-0038-05

0 引言

RTDS 公司提供的电力系统仿真技术可用于复杂的高压交直流网络的快速、可靠、精确和经济的研究。RTDS 仿真装置是一个全数字化的电力系统电磁暂态 (EMTP) 模拟装置, 它可用于控制和保护设备的闭环试验, 系统分析研究, 以及运行人员、技术工程师和学生的培训。RTDS 是一种可以取代暂态网络分析 (TNA) 和模拟式或数模混合式模拟装置的经济而高效的方案。随着计算机技术的不断发展以及数字仿真技术在电力系统中的应用的日臻成熟与完善, RTDS 必将取代模拟式或数模混合式模拟装置而成为电力系统实时仿真的主流。

目前, 国内 RTDS 的应用大多局限于交流常规线路保护的动模测试试验。很少涉及发电机保护方面的应用研究。本文将主要介绍利用 RTDS 建立发电机失步保护动模测试平台的方法, 并利用成熟发电机失步保护以及利用 RTDS 内部控件根据失步保护原理构成的保护对该平台的有效性进行了相互校核。

1 RTDS 中的同步电机模型

1.1 RTDS 中的同步电机模型电气部分

RTDS 中的同步电机模型是基于通用电机理论的, 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 (MultiMass) 都可以与同步电机模型接口 (如图 1 所示)。应用 RTDS 同步电机模型, 用户可以进行电力系统相关的继电保护测试与分析、稳定分析、控制器设计等工作。但是不能进行发电机内部故障的模拟, 因此与发电机内部故障相关的问题需要寻求其他解决办法。有文献报道利用 RTDS

的发电机模型外接阻抗模拟内部故障, 但对其适用性需要进一步研究。

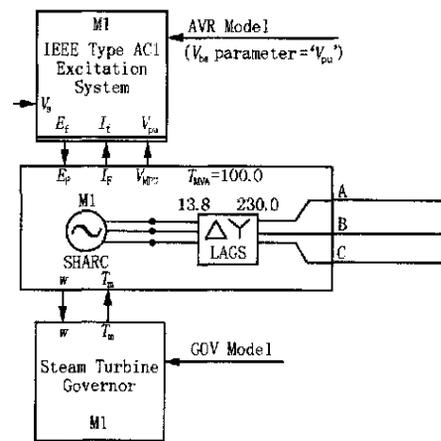


图 1 RTDS 中的同步电机模型

Fig. 1 Model of synchronous machine in RTDS

RTDS 中同步电机采用 $d, q, 0$ 坐标系统下的方程式作为数学模型。RTDS 中的电机模型对转子绕组基准电流和电压的选取方法是: 当电机以额定转速空载稳态运行时, 转子绕组 (励磁绕组或者 d 轴阻尼绕组) 通过基准电流, 定子相电压不饱和值为额定相电压 (基准电压)。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。该电机模型可以模拟以下两种情况。

第一种情况采用如下假设: 假定 d 轴方向只有同时与定子等效绕组、励磁绕组、阻尼绕组都交链的公共互感磁通, 不存在两两之间交链的局部互感磁通。 q 轴方向也作同样的假设。这样, 基于前面提到的基准值的选取, 同一轴下各绕组间的互感抗相

等。可得同步电机的 dq 轴等值电路如图 2(a)和(c)所示。

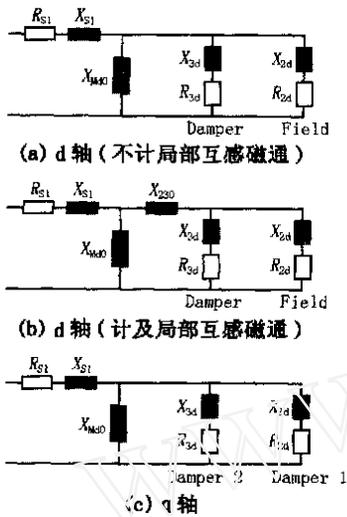


图 2 同步电机 dq 轴等值电路

Fig. 2 dq-axis equivalent circuits of synchronous machine

第二种情况还对 d 轴方向转子励磁绕组和阻尼绕组之间存在局部互感漏磁通进行模拟,因此 d 轴方向等值电路与第一种情况有所不同,如图 2(b)所示。

由图 2(b)可以看到,d 轴方向等值电路增加了一个支路 X_{230} 。它代表 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。当选择知道 d 轴转移导纳时,则需要考虑这条附加的互感磁链通路,这样可以提高电机模型的精度。d 轴转移导纳 ($G_{fld} + jB_{fld}$)是在定子 d 轴等效绕组与励磁绕组之间的端口转移导纳,其数值通过在 d 轴上的试验获得。试验过程中电机转子固定不动,励磁绕组短接。在定子绕组上施加幅值逐渐减小的基频电压,产生幅值逐渐减小的定子电压 d 轴分量 e_d ,定子电压 q 轴分量 e_q 则为零。转移导纳由图 3 所示方程式定义:

其中: i_f 是励磁电流; e_d 是发电机电抗后电势。

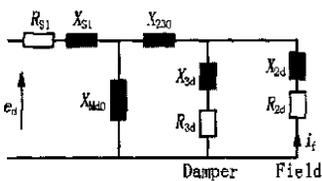


图 3 D 轴转移导纳

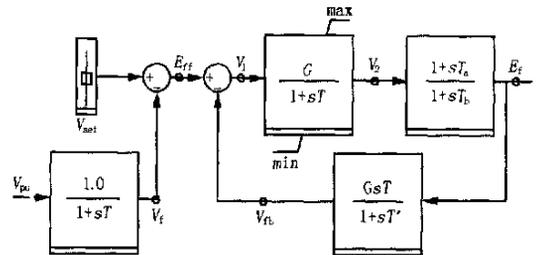
Fig. 3 D-axis transfer admittance

$$G_{fld} + jB_{fld} = \frac{-i_f}{e_d}$$

RTDS 中电机参数可以有两种形式输入,一种是采用与以上等值电路完全对应的参数形式,一般称之为原始参数,在 RTDS 中定义为 Motor 格式。另一种称之为电机参数形式,在 RTDS 中定义为 Generator 格式,也就是前面提到的电机试验参数。根据 RTDS 电机模型的假设,这两种参数格式可以互相转换。

1.2 RTDS 中的同步电机励磁调节器模型(AVR)

RTDS 标准库中提供的励磁调节器元件模型(AVR)是以 Excitation System Models for Power System Stability Studies 文件中描述的 ST1A 模型为标准的,可以在同步机模型上联接一个静止励磁系统(或自动电压调节器 Automatic Voltage Regulator AVR)模型。RTDS 还提供了多种 IEEE 标准 AVR 模型,图 4 只是其中 RTDS 比较常用的典型 AVR 的传递函数方框示意图。



注 E_f : 初始励磁电压(已知量); V_m : 初始机端电压(已知量); V_{fb} : 稳态时为 0.0; V_f : 稳态时等于 E_f ; V_i : 稳态时等于 V_f/G ; E_{ff} : 稳态时等于 $V_i + V_{fb}$; V_r : 稳态时等于 V_m ; V_{net} : 等于 $E_{ff} + V_r$ 以满足初始状态

图 4 RTDS 中典型励磁调节器的传递

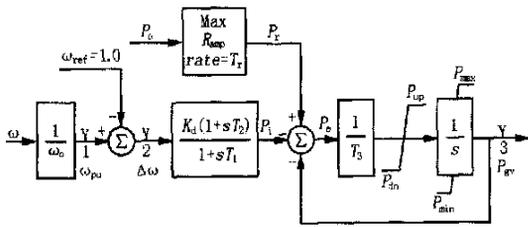
Fig. 4 Transfer function of typical excitation system (AVR) in RTDS

1.3 RTDS 中的同步电机调速器模型(Turbine)

RTDS 标准库中提供的调速器元件模型(Governor/Turbine)是以 Hydraulic Turbine and Turbine Control Models for System Dynamic Studies 文件中描述的 Hydro Turbine Governor 模型为标准的,RTDS 还提供了多种 IEEE 标准 Governor/Turbine 模型,图 5 只是其中 RTDS 比较常用的典型 Governor/Turbine 的传递函数方框示意图。

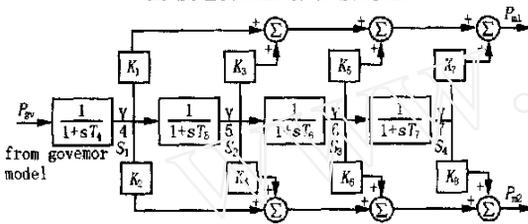
1.4 RTDS 中的同步电机模型的饱和特性

RTDS 输入的原始参数或者电机参数都是不计饱和时候的数值。当需要考虑饱和的时候,RTDS 中要求输入饱和特性曲线,也就是发电机空载特性曲线。这实际上是用 d 轴方向的磁路饱和来近似地表示电机的饱和。具体的方法如图 6 所示。即用机端电压为 1.0 时在不饱和以及饱和情况下所需励磁电流的偏差 SE(1.0);机端电压为 1.2 时在不饱和以及饱和情况下所需励磁电流的偏差 SE(1.2)来描



注: P_r 为用户通过 PSCAD/RTime 滑块定义的功率设定值;
 ω 为电机转速, 单位是 弧度/秒;
 ω_0 为电机的额定转速, 典型值为 376.9 或 314.2 弧度/秒;
 K_d 为与 $1/\text{droop}$ 相对应;
 P_{\min} , P_{\max} 为功率变化的上下限

(a) 发电机 IEEE 标准电机模型



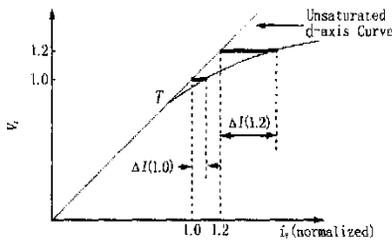
注: P_{gv} 来自电机模块的信号
 $K_1+K_2+K_3+K_7$ 必须等于 1.0
 $K_4+K_5+K_6+K_9$ 必须等于 1.0

(b) 发电机 IEEE 标准调速器模型

图 5 发电机 IEEE 标准电机模型

Fig. 5 IEEE governor model of generator

述 RTDS 电机的不饱和特性。SE(1.0) 和 SE(1.2) 这两个参数, 用户可以根据实际电机的情况, 在 RTDS 电机模型的相应参数菜单中加以定义。



SE = $\Delta I/V$ SE(1.0) = $\Delta I(1.0)/1.0$ SE(1.2) = $\Delta I(1.2)/1.2$

图 6 RTDS 中同步电机饱和特性的实现

Fig. 6 Realization of saturated characteristics of synchronous machine in RTDS

2 发电机失步保护基本原理

目前常用发电机失步保护的方案有: 多阻抗元件的失步保护; 测量振荡中心电压及其变化率; 测量视在电阻及其变化率; 采用李雅普诺夫直接法; 暂态失稳; 以系统两点间相位差为依据的失步预测保护等多种方案; 其中被广泛应用的是基于定子视在阻抗变化轨迹的保护方案。在本文中使用的 WFB-106 型发电机保护, 其基本原理采用的是基于定子视在阻抗变化轨迹的保护方案。其动作特性如图 7

所示, 它由三个阻抗元件构成, 即:

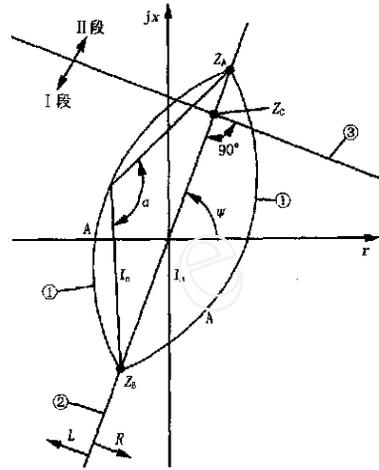


图 7 失步保护阻抗元件特性

Fig. 7 Characteristics of impedance component

in out-of-step relay

1) 特性的阻抗元件, 将阻抗平面分为透镜内动作区 I_n 和透镜外不动作区 A 。其内角为 α , 代表动态稳定极限角, 可整定。若机端视在阻抗 Z 的终端进入透镜区域内, 则表明发电机电势与系统等效电势间的功角 δ 已大于动稳极限角。机端测量阻抗 Z 的轨迹, 每穿过一次透镜, 表示失步发电机的转子磁极相对系统同步旋转磁场的磁极运动了 360 电角度, 称为一次滑极。

2) 阻挡器直线阻抗元件, 即透镜的主轴。它将阻抗平面分为左半部分 L 和右半部分 R 。机端视在阻抗 Z 的终端落在此直线上, 代表功角 δ 为 180°。若出现无法保持动态稳定的不稳定振荡, Z 的终端将进入透镜并越过该直线, 功角 δ 逐渐大于 180°, 意味着发电机失步。

3) 电抗线阻抗元件, 垂直于透镜的主轴, 其位置由 Z_c 决定。该元件将保护分为 I 段 (电抗线以下) 跳闸区和 II 段 (电抗线以上) 跳闸区。当振荡中心位于发-变组的内部时, 属 I 段跳闸区, 一般要求在第一次滑极 (失步) (本保护整定为两次滑极) 后立即将机组跳闸解列。如果振荡中心位于发-变组之外的系统中, 属 II 段跳闸区, 保护不应使机组立即跳闸, 以便系统保护有时间处理, 只是在预定的滑极次数之后 (本保护采取两次滑极后延时出口的办法), 系统保护仍未能妥善处理时, 才使发电机跳闸。

透镜阻抗特性的动作范围由 Z_A 、 Z_B 和 Z_c , 它们的整定将在后面提到。文中所提保护中的 Z_A 为系统阻抗, Z_B 为发电机阻抗。

当发生振荡并失步后, 如果振荡中心在发变组内, 则机端视在阻抗的轨迹在图 7 中将自右至左、从

阻抗平面的区域 A 和 R 进入透镜区内 I_n ,随后越过阻挡器直线到区域 I_n 和 L,最终逸出透镜到区域 A 和 L。发生失步后阻抗轨迹的变化比短路时慢得多,因此可以根据阻抗轨迹穿越透镜的时间来区分短路与失步,所以本文中提及的保护只有在穿越时间大于 50 ms 时,才判断为一次滑极。

3 基于 RTDS 的发电机失步保护动模实验模型的建立

3.1 仿真模型的建立

根据实际工程的情况,将电站以外的系统简化为无穷大系统,在 RTDS 中建立了如图 8 所示的系统。

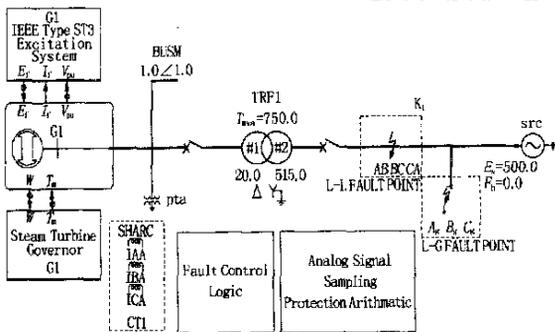


图 8 RTDS 中的发电机失步保护实验系统接线图
Fig. 8 Power system wiring diagram of out-of-step protection in RTDS

发电机:

$$S_N = 650 \text{ MVA} \quad U_N = 20 \text{ kV} \quad I_N = 20 \ 849 \text{ A}$$

$$\cos \phi = 0.9 \quad X_d = 2.327 \ 9 \quad X_d' = 0.322 \ 55$$

$$X_d'' = 0.219 \ 9$$

变压器:

$$S_N = 750 \text{ MVA} \quad U_N / U_n =$$

$$(515 / \sqrt{3} \pm 2.5\%) / 20 \text{ kV}$$

$$X_1 = X_0 = 0.135 \quad \text{接线方式: } Y_N - D11$$

$$\text{等值系统: } Z_1 = Z_0 = (1.1398 + j6.4628)$$

$$\text{电压互感器变比: } 20 / \sqrt{3} / (0.1 / \sqrt{3}) \text{ kV}$$

$$\text{电流互感器变比: } 25 \ 000 / 5 \text{ A}$$

3.2 保护的整定值

$$Z_A = 2.04 \quad Z_B = 4.51 \quad Z_C = 1.89$$

$$= 120^\circ$$

滑极时间

$$t = 2 \times 200 \times (180 - 120) / 360 = 66.6 \text{ (ms)}$$

最大灵敏角: 80°

滑极次数: 2

其阻抗元件特性如图 9 所示。

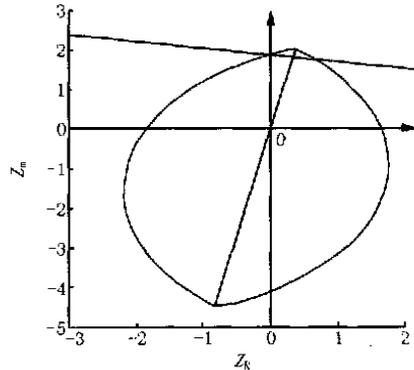


图 9 WFB-106 型发电机保护阻抗特性
Fig. 9 WFB-106 impedance component characteristics of out-of-step protection

4 数模实验及结果分析

在图 8 所示系统中的变压器高压侧出口处 (K_1 点) 发生三相突然短路,在 RTDS 的 Run Time 中控制故障时间和调节发电机的出力情况以及励磁情况,制造各种系统失步情况,如图 10 所示。通过功率放大器将机端的二次侧电压电流送给保护。在 RTDS 软件中我们设计了一个阻抗测量元件,该元件根据发电机机端二次测电压电流对机端的视在阻抗进行测量。根据 WFB-106 的原理,我们利用 RTDS 中的各种控件在 RTDS 中构造了一个发电机失步保护元件。试验中对 RTDS 中的机端测量阻抗以及保护动作行为进行了录波,图 11 就是其中的一次录波图。借助 Matlab 中的图形处理功能对录波数据处理,将能清晰地判断机端视在阻抗轨迹穿越透镜的情况,从而可以据此判断保护在该情况下是否该动作。同时也可以,将失步保护的动作为跟 RTDS 中构造的保护元件的动作行为进行比较,从而相互校核。

图 10 给出了实验中得到的 5 种振荡阻抗轨迹:

发电机工作在发电机状态,失步后阻抗轨迹自右向左穿越透镜,穿越前后半个透镜的时间分别为 27.4 ms 和 11.1 ms。

整个穿越时间小于整定时间(66.6 ms),不判为失步,保护也未动作。

发电机工作在发电机状态,失步后阻抗轨迹自右向左穿越透镜,穿越前后半个透镜的时间分别为 81.4 ms 和 89.9 ms。整个穿越时间大于整定时间(66.6 ms),判为振荡,保护一段出口动作。

发电机工作在发电机状态,机端阻抗轨迹逗留在右半透镜的时间长达 189.1 ms,但未穿越阻挡器直线,判为不失步,保护只是启动,未出口动作。

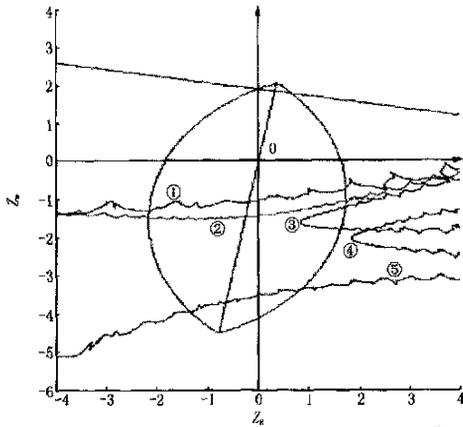


图 10 机端振荡阻抗轨迹

Fig. 10 Terminal impedance surge track of synchronous machine

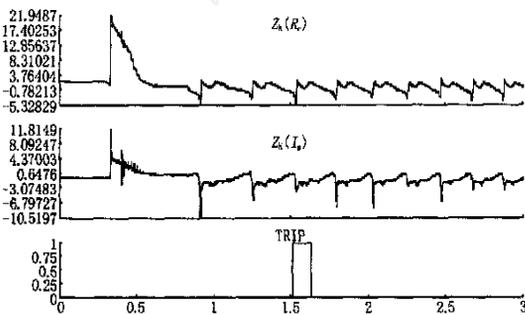


图 11 机端测量阻抗虚实部轨迹及保护动作作为

Fig. 11 Measured terminal impedance track and relay action

发电机工作在发电机状态,机端阻抗未进入透镜,不判为失步,保护不起动,也不出口动作。

电机工作在电动机状态,失步后阻抗轨迹自左向右穿越透镜,穿越前后半个透镜的时间分别为 21.3 ms 和 19.8 ms。整个穿越时间小于整定值,不判为失步,保护不出口动作。

Application of RTDS in dynamic simulation of generator out-of-step protection

HUANG Li-bin¹, CHEN Shi-jie¹, CHEN Da-peng², SUN Hai-shun¹, WANG Xue-qiang³, ZHUANG Liang-wen³

(1. College of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. XI Hitachi Electric Co., Ltd, Xuchang 461000, China; 3. National Center for Quality Supervision

Testing of Relay and Protection Equipment, Xuchang 461000, China)

Abstract: The application of RTDS in dynamic simulation of generator out-of-step protection is introduced in this paper. A method of building dynamic simulation model of generator out-of-step protection based on RTDS is expounded, and a widely-used product has confirmed its validity.

Key words: RTDS; generator out-of-step protection; dynamic simulation

5 结论

电力系统数字模拟由于相对传统的物理模拟方式有占地少、投资低、建立和更改模型快捷方便等特点,必将在电力系统研究和保护产品的检验上占有越来越重要的地位,而目前在保护产品检验方面,RTDS的主要应用范围还在线路保护装置,变压器和发电机保护的相关检验技术还没有得到广泛应用。通过本文所述内容可以看出,在发电机失步保护方面,使用 RTDS 对保护的检验是有效的。

参考文献:

- [1] 王维俭 (WANG Wei-jian). 电气主设备继电保护原理与应用(第二版) (Protective Relays Theory and Applications of Main Electrical Equipment, Second Edition) [M]. 北京:中国电力出版社 (Beijing: China Electric Power Press), 1998.
- [2] 电机工程手册—电机卷 (Electrical Engineering Handbook—Electric Machines) [M]. 北京:机械工业出版社 (Beijing: China Machine Press), 1997.
- [3] 电力系统设计手册 (Design Manual of Power System) [M]. 北京:中国电力出版社 (Beijing: China Electric Power Press), 1998.
- [4] 陈祎娟 (CHEN Yi-juan). 微型型发电机失步保护的研究 (Study of Computer Type Out-step Protection of Generators) [J]. 湖南电力 (Hunan Power), 2002, 22 (4): 9-11.

收稿日期: 2003-11-05; 修回日期: 2004-07-12

作者简介:

黄立滨 (1974 -), 男, 硕士研究生, 从事电力系统仿真研究工作; E-mail: libinh@ncqtr.com

程时杰 (1956 -), 男, 教授, 博导, 主要从事人工智能在电力系统中的应用研究及非线性控制研究等;

陈大鹏 (1970 -), 男, 在职硕士, 高工, 主要从事电力系统综合自动化和工业配电自动化的研发和应用工作。