

励磁系统仿真模型校正技术研究

李 灿, 朱宏超, 杨 玲

(国电南瑞科技股份有限公司电气控制分公司, 江苏 南京 211106)

摘 要: 励磁控制系统作为同步发电机的重要组成部分, 主要作用是向同步发电机的定子绕组提供一个可控的直流电流(电压), 维持机端电压恒定, 满足同步发电机的正常发电需要。通过发电机组控制系统模型, 及时校正机组仿真模型, 对异常响应进行预警排查, 能够有效提高系统运行的稳定性。在 MATLAB 中搭建了一种以外部仿真机作为励磁调节器的单机无穷大系统仿真模型, 模拟励磁系统 PID 主环异常以及电力系统稳定器(PSS)辅环异常时的输出, 与理论值进行对比分析, 能够及时确定故障原因和部位, 实现故障维修。

关键词: 同步发电机; 励磁系统; 故障诊断; MATLAB

中图分类号: TM 31 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2019)11-0064-05

Research on Calibration Technology of Excitation System Simulation Model

LI Can, ZHU Hongchao, YANG Ling

(Nanrui Technology Co., Ltd. Electrical Control Branch, Nanjing 211106, China)

Abstract: Excitation control system is an important part of the synchronous generator. Its main function is to provide a controllable DC current (voltage) to the stator winding of the synchronous generator to maintain the constant voltage of the terminal, which meets the needs of the synchronous generator. Through the genset control system model, the unit simulation model could be calibrated in time, and the abnormal response could be checked for early warning, so as to effectively improve the stability of the system operation. A simulation model of single-machine infinity system with external simulator as excitation regulator was built in MATLAB. The model simulated the output of the excitation system when the PID main loop and the power system stabilizer (PSS) auxiliary loop were anomalous. The output was compared with the theoretical value. Through comparison, it is confirmed that the proposed model can determine the cause and location of the fault in time and thus help to repair the faults.

Key words: synchronous generator; excitation system; fault diagnosis; MATLAB

0 引 言

随着国内电力事业的发展, 大电网、大机组、交直流混合远距离输电、跨区域联网的电力系统已成为新的研究方向之一^[1]。然而, 新的电力系统由于网络互联的特点, 安全可靠较低, 系统稳定性较差^[2]。励磁系统作为同步发电机的重要组成部分, 对电力系统的暂态稳定具有重要作用。励磁系统的基本功能是给同步发电机励磁绕组提供直流电流, 通过励磁电压控制转子磁势, 实现控制和保护功能^[3]。当电网出现故障时, 励磁系统能够迅速地对电网进行调

节, 使电网恢复到正常运行状态。随着现场检测和控制数据信息的增加, 对操作人员的要求也越来越高, 生产过程的实时监控和故障的判断也变得越来越困难。因此, 对励磁控制系统故障诊断技术展开研究, 对于电力系统应用有重要的参考价值^[4]。

由于电力系统仿真计算精度受励磁系统模型准确度的影响, 所以本文提出基于仿真模型的励磁系统故障诊断方法, 并利用 MATLAB 搭建励磁系统故障诊断模型, 通过对比实际输出的控制电压与仿真输出的控制电压, 检验励磁系统是否存在异常, 进而实现故障诊断。

作者简介: 李 灿(1995—), 男, 硕士, 研究方向为同步发电机励磁系统控制策略。

1 系统仿真模型

1.1 同步发电机励磁控制系统模型

同步发电机的运行原理是电磁感应原理,因此可通过对同步发电机的励磁进行控制,进而控制发电机的运行^[5]。同步发电机的励磁系统主要分为两部分:励磁功率单元和励磁调节器^[6]。励磁功率单元的作用是给同步发电机励磁绕组提供直流电流,建立直流磁场;励磁调节器则根据控制要求的输入信号和给定的调节准则控制励磁功率单元输出^[7]。因此励磁系统可以根据同步发电机负荷的变化来调节励磁电流和励磁电压,进而控制转子磁势,实现对发电机的控制和保护。励磁系统作为发电机的重要组成部分,对于电力系统的稳定运行有着很大的影响。本文采用的同步发电机励磁控制系统模型如图 1 所示,其中 AVR 表示自动励磁调节器, I_r 为励磁电流, I_g 为机端电流, U_c 为励磁电压, U_g 为机端电压。

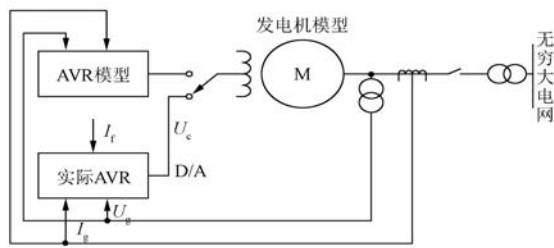


图 1 同步发电机励磁控制系统模型

1.2 基于实时仿真的故障诊断模型

电压给定值与机端电压差连同电力系统稳定器(PSS)输出一并送入 PID 主环仿真模型;仿真输出的控制电压 simu.UK 与实际控制电压 act.UK 比对,以检验励磁系统参数是否存在异常。基于实时仿真的故障诊断模型原理图实现原理如图 2 所示。

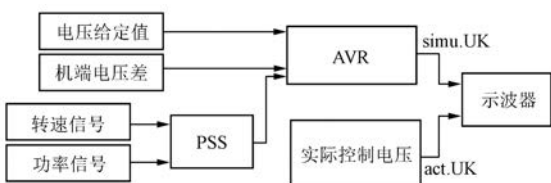


图 2 基于实时仿真的故障诊断模型原理图

2 励磁系统故障诊断方法

将模型系统与实际系统同步运行。该过程使用解析法分析,比较观测器的输出,诊断得到

故障,达到模型校正的目的^[8]。模型设计方法分为以下几个步骤:构造励磁系统各个部分的检测滤波器,将滤波器的输出与真实励磁系统观测输出相比较,产生一个残差信号,运用智能诊断的方法对残差进行分析,根据分析结果进行故障判别与诊断。基于仿真模型参考的故障检测及诊断原理如图 3 所示。

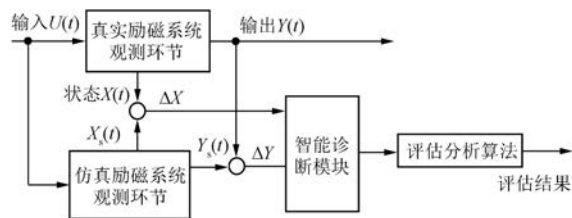


图 3 基于仿真模型参考的故障检测及诊断原理图

所构造的模型中励磁系统的输入与输出之间的关系可表示为

$$\begin{cases} X(t) = f[U(t), t] \\ Y(t) = g[X(t), U(t), t] \end{cases} \quad (1)$$

式中: $U(t)$ 、 $X(t)$ 、 $Y(t)$ ——输入量、状态量和输出量。

采用 MATLAB 软件构造励磁系统的仿真观测器(即实时仿真模型),将仿真观测器的输入作为实际励磁系统的输入,用 $X_s(t)$ 和 $Y_s(t)$ 代表状态量和输出量。若所构造的系统能够完全地反映实际系统的特性,则应该满足以下方程:

$$\begin{cases} X_s(t) = f[U(t), t] \\ Y_s(t) = g[X_s(t), u(t), t] \end{cases} \quad (2)$$

由式(1)和式(2)可知,若系统运行正常,则状态残差 $\Delta X(t) = X(t) - X_s(t)$ 和输出残差 $\Delta Y(t) = Y(t) - Y_s(t)$ 的值均应该为零。当励磁系统出现异常或者故障时,实际励磁系统的响应特性就会发生改变,实际励磁系统的输出、状态及输入量之间的关系就不会再满足式(1),因此由实际励磁系统和仿真励磁系统的状态量和输出量所产生的残差值将不再为零。利用智能诊断系统能够确定发生故障的原因和部位,实现励磁系统故障的及时诊断和维修。

3 励磁系统故障在 MATLAB 中的仿真

3.1 同步发电机励磁控制系统模型

本文采用图 3 所示的单机无穷大系统来进行

仿真研究。该系统包括同步发电机模块、励磁控制器模块、变压器模块、输电线路模块、厂用电负荷模块以及无穷大系统模块等。同步发电机额定电压为 $U_N=22\text{ kV}$, 机组容量 $S_N=817\text{ MVA}$, 以发电机机组容量为基准值, 其电抗 $X_d=1.66, X'_d=0.33, X''_d=0.24, X_q=1.43, X'_q=0.33, X''_q=0.24$ 。无穷大系统由容量 $1\,000\,000\text{ MVA}$ 的电源和大小为 10 MVA 的系统负荷组成, 系统结构如图 4 所示。

仿真研究中将图 5 所示单机无穷大系统进行测试。

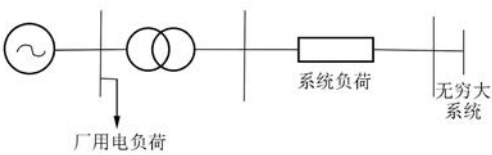


图 4 单机无穷大系统原理图

由于 MATLAB/Simulink 自带的励磁调节器比较简略, 无法有效模拟现场励磁调节器对机组的调节过程, 所以本文搭建了一种以外部仿真机作为励磁机来进行调节的单机无穷大系统仿真模型。无穷大系统仿真模型如图 6 所示。

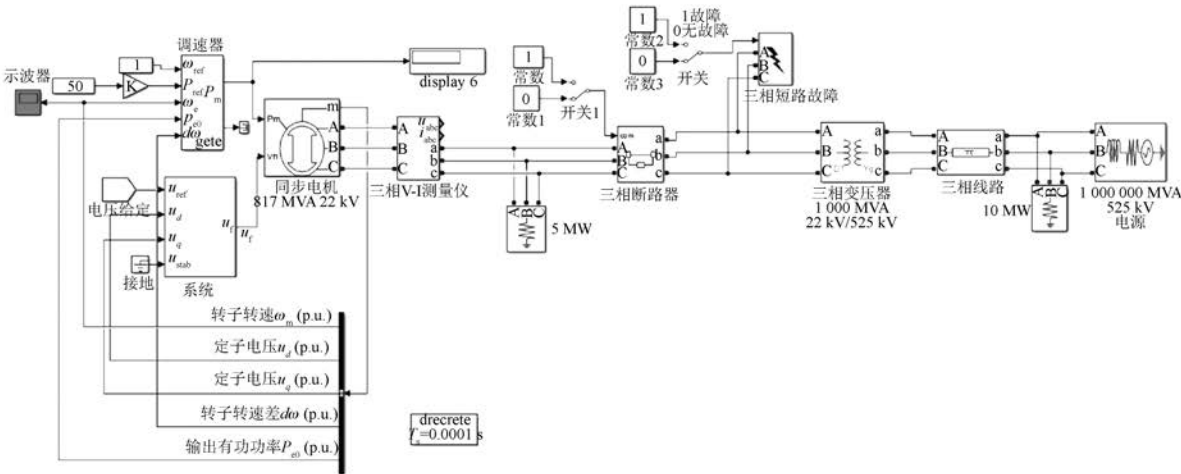


图 5 单机无穷大系统仿真图

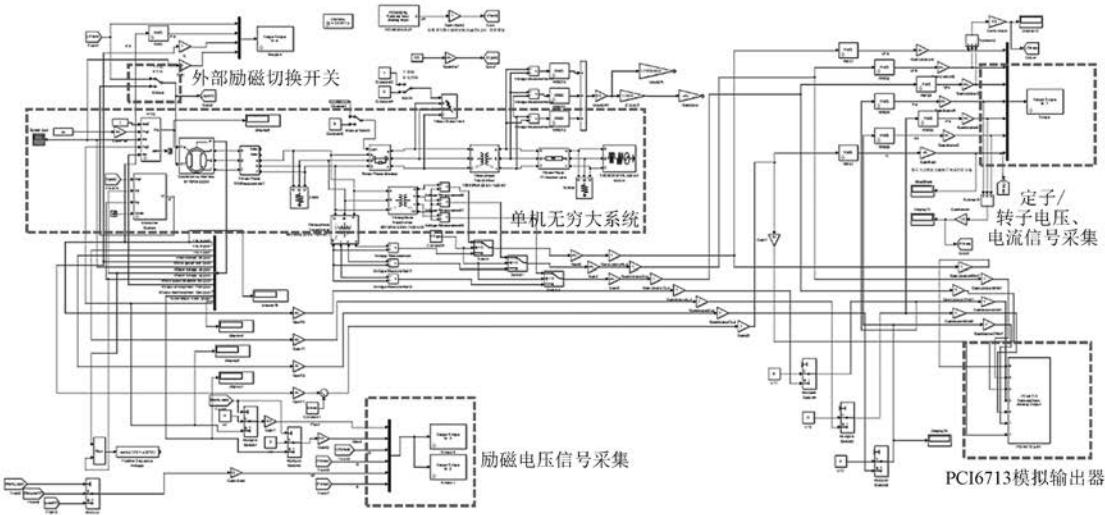


图 6 外部仿真机条件下的单机无穷大系统仿真图

该模型采用双主板架构的工控机, 一块主板运行仿真程序, 另一块主板运行人机界面程序。

开入开出涉及 2 块板卡: 一块将仿真机模型的定子电压、定子电流和转子电流信号采用电压输出;

另一块则用来采集励磁调节器的 UK 励磁电压信号。后续接口插件主要用来连接 RP1283 板的测试端口和 NI 板卡接口, 以便于信号的传输, 同时扩展了 2 个数字量输入、6 相脉冲输入和 4 个模数量输出的接口, 用来测量输入波形。

3.2 励磁系统故障诊断模型

根据上文所述基于仿真模型的励磁系统故障诊断方法, 利用 MATLAB 搭建图 7 所示励磁系统故障诊断模型。实际测量值 u_1 与电压给定值 u_3 连同 PSS 输出一并送入 PID 主环仿真模型, 仿真输出的控制电压 simu.UK 与实际控制电压 act.UK 比对, 以检验励磁系统参数是否存在异常。

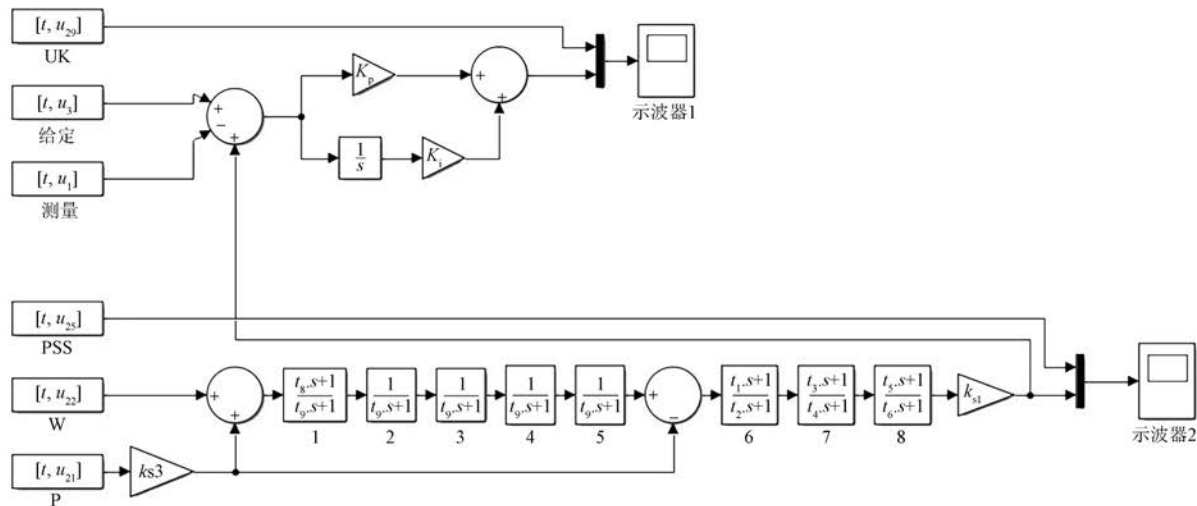


图 7 励磁系统故障诊断模型

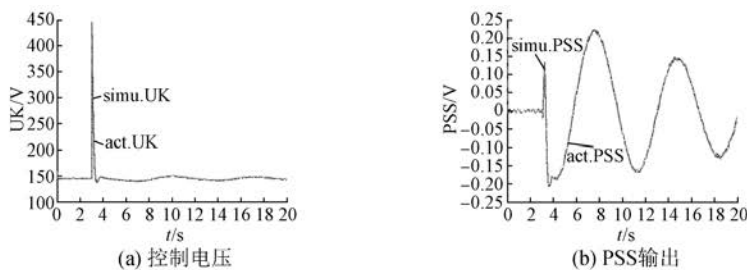


图 8 励磁系统正常运行仿真结果

当系统主环参数设置错误时, $K_p = 80$, 其他参数保持不变, 仿真结果如图 9 所示。实际控制电压与仿真输出电压存在明显误差, PSS 实际输出与仿真输出仍然保持一致。通过对波形的分析可以确认故障为励磁系统主环参数异常。

3.3 励磁系统故障仿真分析

当系统发生微小扰动时 (5% 阶跃), 通过对比实际输出的控制电压与仿真输出的控制电压, 检验励磁系统是否存在异常。通过临界增益法确定励磁系统主环参数: $K_p = 60$ 、 $K_i = 20$ 、 $K_d = 0$ 。由于给定的波形文件输出数据已经经过隔直, 所以励磁系统辅环参数为输出超前时间 $t_1 = 0.15$ s、输出滞后时间 $t_2 = 0.02$ s、输出超前时间 $t_3 = 0.15$ s、输出滞后时间 $t_4 = 0.02$ s、输出超前时间 $t_5 = 0$ s、输出滞后时间 $t_6 = 0$ s、斜坡超前时间 $t_8 = 0.2$ s、斜坡滞后时间 $t_9 = 0.1$ s、输出比例放大倍数 $k_{s1} = 5$ 、合成放大倍数 $k_{s3} = 1$ 。控制电压 UK 和 PSS 输出波形如图 8 所示, 实际输出与仿真输出基本一致。

当励磁系统辅环参数设置错误时, $k_{s3} = 2$, 其他参数保持不变, 其仿真结果如图 10 所示。控制电压波形与 PSS 输出波形均存在误差, 此时可以确认故障为励磁系统辅环参数异常, 需要对系统辅环参数进行检修。

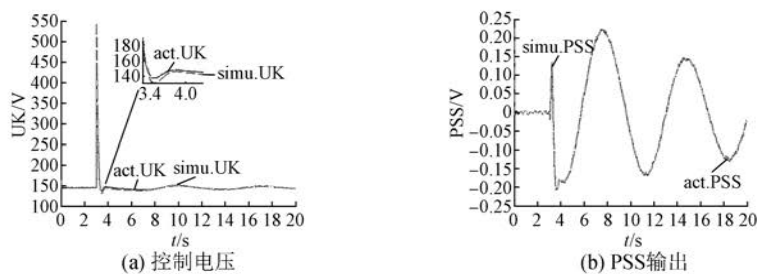


图9 励磁系统主环参数异常仿真结果

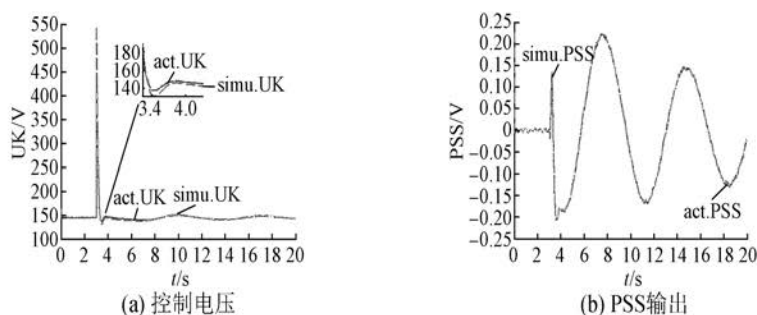


图10 励磁系统辅环参数异常仿真结果

4 结 语

本文在分析同步发电机励磁控制系统模型的基础上,研究了基于模型参考的励磁系统异常状态诊断方法,利用 MATLAB 对励磁系统异常状态进行仿真试验。仿真结果表明此方法的正确性和有效性。在系统异常时,可以及时发现故障的原因和部位,为励磁系统工作异常提供了一种有效的诊断方法。

【参考文献】

- [1] 韩英铎.电力系统最优分散协调控制[M].北京:清华大学出版社,1997: 3-12.
- [2] 熊玮,秦肖臻.基于 MATLAB 的电力系统中发电机稳定性控制的研究[J].计算机与数字工程,2015, 43(5): 831.

- [3] 王钊,黄翠艳,唐建惠.基于 MATLAB 的励磁系统仿真研究[J].科技风,2008(23): 29.
- [4] 李梧桐,李福兴,乔冠伦,等.同步发电机励磁系统建模技术分析[J].仪器仪表与分析监测,2017(1): 1.
- [5] 张伟,余莉,刘玉娟,等.基于 MATLAB 的同步发电机 PSS 与励磁系统仿真[J].计算机与数字工程,2011,39(8): 62.
- [6] 李静.同步发电机 PSS 辅助励磁控制及 MATLAB 仿真[J].广西轻工业,2011,27(2): 50.
- [7] 王姝,张国强.同步发电机励磁控制系统分析[J].中国机械,2013(13): 108.
- [8] 肖志怀,张诚.励磁功率单元模型参考故障诊断方法[J].水电自动化与大坝监测,2002(6): 10.

收稿日期: 2019-07-19