

# 计及 PSS 的电力系统时域仿真计算

焦艳杰<sup>1</sup>, 陈宇<sup>2</sup>, 陈枳州<sup>3</sup>, 吴曦<sup>4</sup>

(1. 德阳电业局, 四川 德阳 618000; 2. 宜宾电业局, 四川 宜宾 644000;

3. 绵阳电业局, 四川 绵阳 621000; 4. 成都电业局, 四川 成都 610021)

**摘要:**随着电网规模日益增大, 电力系统动态安全问题愈发受到重视, 其中, 时域仿真是研究电力系统动态特性的重要方法。综述了暂态稳定分析中时域仿真的方法, 并利用时域仿真对计入电力系统稳定器 (PSS) 的系统进行仿真计算与分析, 利用 Matlab 通过 IEEE 14 仿真算例定量研究了引入 PSS 对电力系统暂态稳定特性的影响。

**关键词:**电力系统; 暂态稳定; 时域仿真; 动态安全; 电力系统稳定器

**Abstract:** With the rapid increase of power grid, more attention is paid to the dynamic security of power system. In this aspect, time domain simulation is one of the most important methods to research the dynamic characteristics of power system. The time domain simulation used in transient stability analysis is reviewed, and the simulation calculation and analysis of the system including power system stabilizer (PSS) is carried out using time domain simulation. By using Matlab IEEE 14 simulation example is presented to quantitatively illustrate the effect of PSS on transient stability.

**Key words:** power system; transient stability; time domain simulation; dynamic security; PSS

**中图分类号:** TM743 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)04-0088-04

电力系统暂态稳定分析的主要目的是检查系统在出现如故障、切负荷、切机等大扰动时, 各发电机组间能否在可接受电压与频率水平下保持同步运行<sup>[1]</sup>。暂态稳定计算与系统的故障类型、运行状态、电网结构、元件模型选择、参数设定等方面有着紧密联系<sup>[2]</sup>。随着电网规模迅速增大, 暂态稳定特性分析愈发受到重视, 是系统动态安全评估的主要内容之一, 也是电网运行人员的重要任务。

电力系统暂态稳定分析方法主要有两种: 时域仿真法 (Time Simulation) 与暂态能量函数法 (Transient Energy Function)。前者通过系统拓扑关系建立基于联立微分与代数方程组的系统模型, 在给定扰动下利用数值积分法, 如隐式积分法、改进欧拉法、龙格-库塔法等, 逐步求取系统状态量和代数量随时间的变化曲线, 由此判断系统的暂态稳定性<sup>[3]</sup>。文献 [4] 采用泰勒级数法进行区间微分方程组求解, 实现了计及不确定性的时域仿真方法, 探讨了模型参数不确定性对仿真结果的影响。文献 [5] 对基于时域仿真法的暂态稳定裕度研究进行了综述。文献 [6] 较早地提出了结合时域仿真与能量函数两者优点的混合法 (Hybrid Method) 来获取系统稳定程度的定量信息。文献 [7] 利用 PEBS 思想改进了文献 [7] 对势能边界点的

线性搜索方法以适应更复杂的系统模型。下面利用时域仿真方法定量研究计及 PSS 时电力系统的暂态稳定特性。

## 1 PSS 建模

### 1.1 电力系统稳定器概述

电力系统稳定器 (Power System Stabilizer PSS) 的基本功能是通过产生与转子速度偏差同相的电气转矩分量, 从而生成附加稳定信号控制励磁对发电机转子振荡提供阻尼, 使得系统模式特征值实部向负方向系统。从当前技术经济条件来看, PSS 是抑制电力系统振荡、提高系统动态稳定性的最好方法之一。目前对 PSS 的研究主要集中在其参数的识别、优化与控制效果分析等方面<sup>[8,9]</sup>。

### 1.2 接入系统的 PSS 数学模型

根据计算要求与目的, 通过自动励磁调节器 AVR 接入系统的 PSS 随模型简化程度不同而具有差异。无论采取何种模型均应满足式 (1)~(2)。即

$$v_{ss} = g_s(x, y) \quad (1)$$

$$v_{ss} = v_{ref} - v_{ref0} \quad (2)$$

式 (1) 表示了决定 PSS 输入信号  $v_{ss}$  的控制量与状态

量,式(2)揭示了其提供阻尼分量的特性。这里选用的 PSS 数学模型如下。

$$\dot{v}_1 = -(K_{\omega} v_{s1} + v_1) / T_{\omega} \quad (3)$$

$$\dot{v}_2 = ((1 - \frac{T_1}{T_2})(K_{\omega} v_{s1} + v_1) - v_2) / T_2 \quad (4)$$

$$\dot{v}_3 = ((1 - \frac{T_3}{T_4})(v_2 + \frac{T_1}{T_2}(K_{\omega} v_{s1} + v_1)) - v_3) / T_4 \quad (5)$$

$$\dot{v}_4 = (v_3 + \frac{T_3}{T_4}(v_2 + \frac{T_1}{T_2}(K_{\omega} v_{s1} + v_1)) - v_4) / T_4 \quad (6)$$

$$v_{out} = \frac{sK}{1 + sT_{\omega}} \frac{(1 + sT_1)}{(1 + sT_2)} \frac{(1 + sT_3)}{(1 + sT_4)} \Delta \omega \quad (7)$$

文中 PSS 输入信号取发电机转子转速偏差,式(3)~(6)中变量为增益、信号过滤、相位补偿等环节的 PSS 参数,包括时间常数、稳定增益等,其传递函数如式(7)所示。

## 2 电力系统时域仿真方法

电力系统是复杂的高维非线性控制系统,因此非线性时域仿真最常用的分析手段,常见求解方法的是改进欧拉法和梯形隐式积分法这两种数值积分方法。这两种方法的共同点在于运用稳定规则和雅可比来判定每一步状态变量的变化方向。设  $t$  为当前时间,  $\Delta t$  为仿真时间步长,通过求解以下方程进行迭代<sup>[2]</sup>。

$$\begin{cases} f_i(x(t+\Delta t), y(t+\Delta t), f(t)) = 0 \\ g(x(t+\Delta t), y(t+\Delta t)) = 0 \end{cases} \quad (8)$$

式(8)中,  $f$  与  $g$  代表描述系统动态与静态过程的微分与代数方程,  $f_i$  是一个与所选数值积分方法有关的函数,具有非线性的式(8)通过牛顿-拉夫逊算法交替迭代计算状态变量和代数变量增量  $\Delta x^i$  和  $\Delta y^i$ , 同时通过式(9)~(10)不断更新当前实际变量值。

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} = - [A_c^i]^{-1} \begin{bmatrix} f \\ g \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} x^{i+1} \\ y^{i+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \quad (10)$$

式(9)中,  $A_c^i$  依赖于系统状态量与代数量的雅可比矩阵,式(10)为两类量迭代式,结束条件为达到最大迭代次数或增量满足指定精度  $\epsilon_0$ 。矩阵  $A_c^i$  和函数  $f_i$  一般可通过前向欧拉法或梯形法求取。

### 2.1 前向欧拉法

前向欧拉法是一阶分析法,与梯形法相比通常具有更快的运算速度,但计算精度稍差。当迭代到第  $i$

次,矩阵  $A_c^i$  和函数  $f_i$  由以下两式可求得。

$$A_c^i = \begin{bmatrix} I_n - \Delta t F_x^i & -\Delta t F_y^i \\ G_x^i & G_y^i \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$f_i = x^i - x(t) - \Delta t f^i \quad (12)$$

式中,  $I_n$  是单位矩阵,其他矩阵是代数微分方程的雅可比矩阵,如  $F_x = \nabla_x f$  等。

### 2.2 梯形法

与前向欧拉法相比,梯形法的计算结果更为准确可靠,在电力系统分析计算中用途更为广泛。梯形法求取矩阵  $A_c^i$  和函数  $f_i$  的一种较为简单的模型如以下两式所示,符号含义与式(11)~(12)相同。

$$A_c^i = \begin{bmatrix} I_n - 0.5\Delta t F_x^i & -0.5\Delta t F_y^i \\ G_x^i & J_{LFV}^i \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$f_i = x_i - x(t) - 0.5\Delta t (f^i + f(t)) \quad (14)$$

## 3 仿真算例

采用 IEEE 14 节点标准利用基于 Matlab 的 PSAT 程序包 [10] 进行计及 PSS 的系统时域仿真,接线图如图 1。算例中元件的具体参数可参见文献 [11]。将节点 1 设为松弛节点,发电机 1 和 2 为汽轮机,5 台发电机自动励磁调节装置(为保持简洁图中未标出)采用同一类模型,模型各参数见表 1,均为标么值。

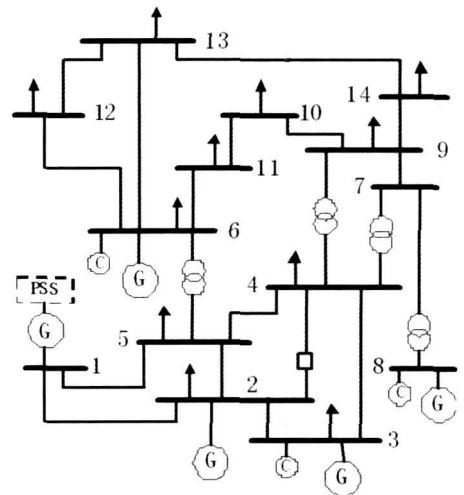


图 1 包含 PSS 的 IEEE 14 节点接线图

将发电机 1 的励磁系统中安装 PSS PSS 数学建模如式(3)~(7),选用转子转速偏差为 PSS 输入信号,模型参数如表 2 所示。将所有 PQ 节点设定为恒定阻抗模型,首先初始化所有线路与元件模型,并利用 Newton-Raphson 法进行潮流计算。选用梯形法进行系统时域仿真,仿真时间补偿设定为 0.125 s 仿

真时限为 20 s 扰动为在  $t=1$  s 时节点 2 和 4 之间的断路器被断开。

表 1 发电机中 AVR 模型参数

编号	$R_{un\_max}$	$K_a$	$T_a$	$K_f$	$T_f$	$T_d$	$T_r$
AVR1	7.32	200	0.02	0.002	1.0	0.2	0.001
AVR2	4.38	20	0.02	0.001	1.0	1.98	0.001
AVR3	4.38	20	0.02	0.001	1.0	1.98	0.001
AVR6	6.81	20	0.02	0.001	1.0	0.7	0.001
AVR8	6.81	20	0.02	0.001	1.0	0.7	0.001

表 2 仿真算例中 PSS 模型参数

参数	$Output_{max}$	$Output_{min}$	$K_w$	$T_w$
PSS	0.1	-0.1	5	10
	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$
	0.38	0.02	0.38	0.02

### 3.1 仿真结果

利用 PSAT 程序包调用 Matlab 中的 Simulink 画出系统接线图, 设置相关参数后加入扰动进行系统的时域仿真, 发电机用自动调压的二阶模型来表示。图 2 显示了 5 台发电机前 10 s 的转子角速度振荡形态。励磁系统安装有 PSS 的 G1 振荡较为平缓, G6 与 G8 振荡最为剧烈, 其中 G8 在  $t=1.125$  s 时其  $\omega$  下降到 0.998 26, 随后在  $t=3.375$  s 时上升到 1.000 63。图 3 显示了 5 台发电机接入母线在扰动后电压波动形态, 可以看出在  $t=5$  s 以后各节点电压达到一个新的平衡状态。图 4 显示了扰动后非基准转角机组的相对角位移变化, 曲线形态表明机组间相对角位保持基本稳定, 稳定性较好, 不会发生机组失步。

### 3.2 对比分析

为定量分析加装 PSS 对电力系统暂态稳定的影响, 本节对比在 G1 中加装 PSS 前后的暂态稳定性。图 5 显示了系统加装 PSS 前后 G2 与 G6 角速度振荡形态差异。其中 A、B 两图为系统加装 PSS 前后 G2 转子角速度在扰动后的暂态稳定过程, 从图中可

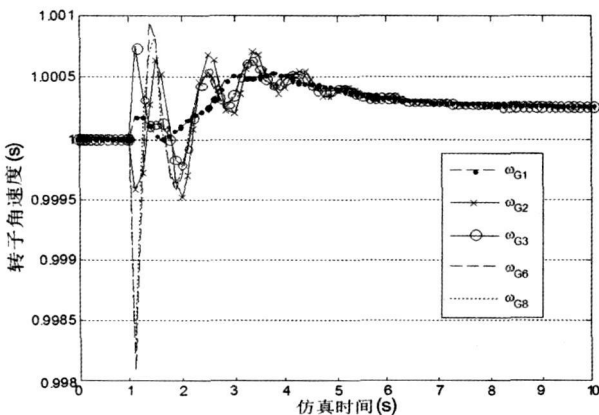


图 2 扰动后发电机转子角速度振荡形态

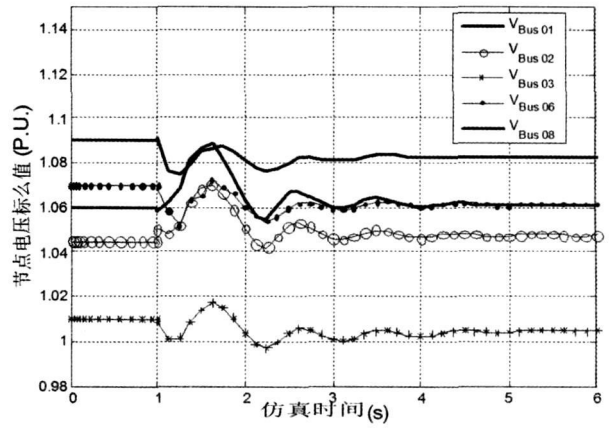


图 3 发电机接入母线电压波动形态

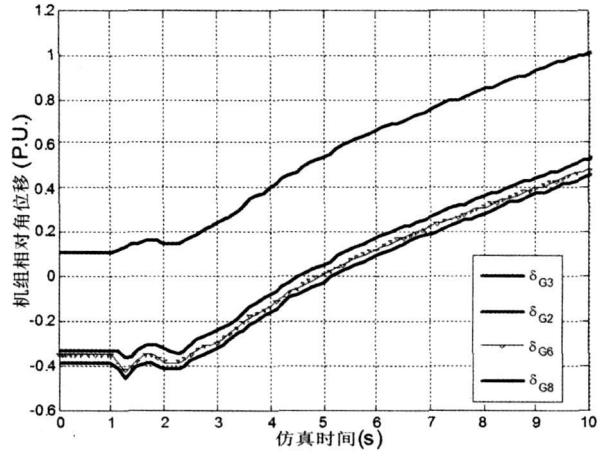


图 4 扰动后发电机 G2、G3、G6、G8 相对角位移变化

以看出, 加装 PSS 后 G2 转子角速度在扰动产生后经过 4 s 振荡在  $t=10$  s 时基本稳定, 与扰动前角速度之差仅为且 0.000 2, 而无 PSS 时, 虽然在 20 s 内也

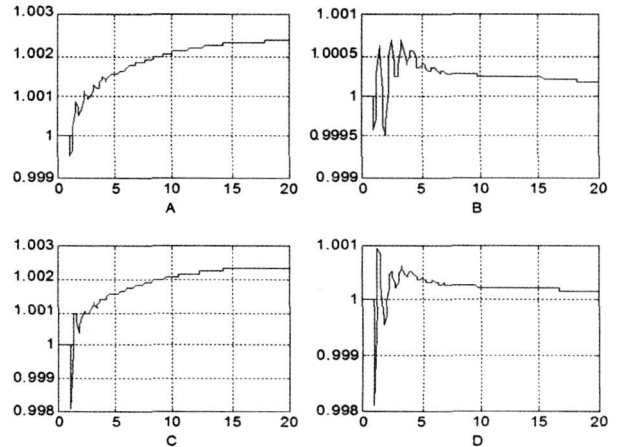


图 5 加装 PSS 前后 G2 与 G6 角速度振荡形态差异

表 3 加装 PSS 前后 G2、G6 转子角速度振荡比较

	初值	振荡峰值	振荡谷值	时间 (s)	稳定值
G2	前	1.002 3	0.999 6	20	1.002 3
	后	1.000 53	0.999 5	11	1.000 24
G6	前	1.002 3	0.998 3	20	1.002 3
	后	1.000 94	0.998 36	12	1.000 25

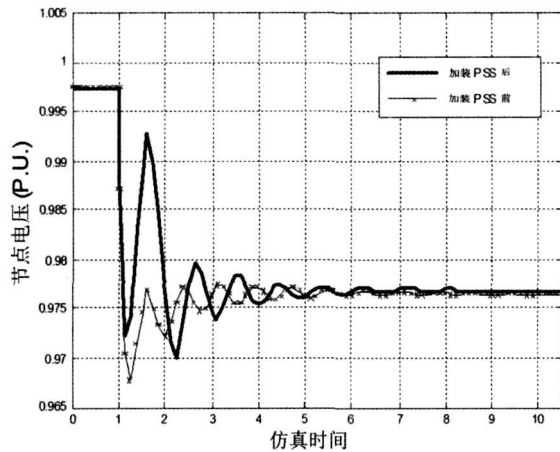


图 6 PSS对母线电压振荡的影响

基本过渡到稳定水平,但与初值之差已超过 0.02。具体比较数据参见表 3。

图 6 显示了系统在节点 1 加装 PSS 前后,当 2 和 4 节点间断路器发生开断时,节点 4 的电压振荡情况。可以看出,有 PSS 的情况下,节点 4 电压到达一个新的稳定水平时间较快,且振荡幅度也相对较小。

## 4 结束语

简述了时域仿真在电力系统暂态稳定计算中的应用,对其原理和 PSS 建模进行了介绍。采用 IEEE 14 标准算例,应用基于 Matlab 的电力系统分析与计算工具 PSAT 程序包对计入了 PSS 模型的电力系统进行了时域仿真计算,定量研究了 PSS 的引入对系统暂态稳定的影响,取得了较好效果。总体而言,加装 PSS 对系统内各元件到达新的稳定水平的振荡时间、稳定质量均有积极影响。此外,基于 Matlab 的 PSAT 程序包作为开源程序具有良好的用户接口,且模型相当丰富,尤其适合电力系统运行人员使用,有利于加

强其对系统各类稳定、故障的理解。

## 参考文献

[1] Kundur Prabhshanker Power system stability and control [M]. New York NY, USA: McGraw-Hill Companies Inc 1994.

[2] 倪以信,陈寿孙,张宝霖. 动态电力系统的理论和分析 [M]. 清华大学出版社, 2001.

[3] Kundur Prabhshanker Digital simulation and analysis of power system dynamic performance Ph.D thesis University of Toronto 1967.

[4] 王守相,郑志杰,王成山. 计及不确定性的电力系统时域仿真的区间算法 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(7): 40-44.

[5] 石恒初,严正. 基于时域仿真的暂态稳定裕度研究现状分析 [J]. 华东电力, 2008, 36(1): 76-80.

[6] Maria GA, Tang C K in J Hybrid Transient Stability Analysis [J]. IEEE Trans on Power Systems 1990, 5(2).

[7] Tang C K, Graham C E. Transient stability index from conventional time domain simulation [J]. IEEE Trans on Power Systems 1994, 9(3): 1524-1530.

[8] 张帆,徐政. 电力系统稳定器抑制次同步谐振的效果 [J]. 电工技术学报, 2007, 22(6): 121-127.

[9] 王成山,石颀. 考虑时间延迟影响的电力系统稳定器设计 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(10): 1-6.

[10] <http://www.ucm.es/area/gsee/Web/Federico/psath.htm>.

[11] <http://www.ee.washington.edu/research/psca/>.

### 作者简介:

焦艳杰 (1982-), 男, 从事 500kV 变电站运行与监控工作。

陈宇 (1983-), 男, 从事电力调度工作。

陈积州 (1982-), 男, 从事配电网调度工作。

吴曦 (1983-), 女, 从事配电网监控运行工作。

(收稿日期: 2009-02-06)

(上接第 27 页)

[8] 周彦. 基于 TPSC 技术的短路电流限制器 [J]. 华东电力, 2005, 33(5): 326-327.

[9] 吴荻. 限制大电网短路电流水平的措施的研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2005.

[10] 胡宏,周坚. 瓶窑 500 kV 母线短路电流限制措施的研究 [J]. 华东电力, 2005, 33(5): 300-303.

[11] 李瑞生,索南加乐. 750 kV 输电线路的特殊问题及其对线路保护的影响 [J]. 继电器, 2006, 34(3): 1-4.

[12] 殷可,高凯. 应用串联电抗器限制 500 kV 短路电流分析 [J]. 华东电力, 2004, 32(9): 567-570.

[13] 庄侃沁,胡宏,励刚,等. 控制和降低短路电流水平措施在华东电网的应用 [J]. 华东电力, 2005, 33(12): 917-919.

[14] 袁娟,刘文颖,董明齐,史可琴,范越. 西北电网短路电流的限制措施 [J]. 电网技术, 2007, 31(10): 42-45.

(收稿日期: 2009-05-12)