



# 同步发电机 PSS 与励磁系统的仿真研究

## 摘要

电力系统稳定器(PSS)是目前抑制电力系统低频振荡最有效的方法之一。在分析了同步发电机励磁控制系统及其模型的基础上,研究了以 PSS 为辅助控制的同步发电机励磁控制方式,基于 Matlab 构建了改进的 PSS 励磁控制系统的仿真模型。在三相短路以及断线故障情况下对单机无穷大系统进行仿真测试,结果表明:加装 PSS 的励磁控制系统的各方面性能优越于无 PSS 的励磁控制系统,为励磁系统的设计提供了依据。

## 关键词

电力系统;电力系统稳定器;同步发电机;励磁控制系统

中图分类号 TP391.9

文献标志码 A

收稿日期 2013-01-30

资助项目 国家自然科学基金(51207072);江苏省高校大学生实践创新训练计划(2012JSSPITP0852)

## 作者简介

张伟,女,博士生,讲师,主要研究方向为电力系统分析与控制,nuistzhangwei@163.com

1 南京信息工程大学 信息与控制学院,南京,210044

2 河海大学 可再生能源发电技术教育部工程研究中心,南京,210098

## 0 引言

目前,电力系统已经形成大系统、大电网、超高压、重负荷、大区联网和交直流联合输电的特点<sup>[1]</sup>。长距离大容量的输电和大机组高快励磁装置的使用,使得电力系统低频振荡现象时有发生,严重威胁到电力系统的安全运行<sup>[2]</sup>。常用的抑制电力系统低频振荡的措施有加装电力系统稳定器(Power System Stability, PSS),使用 HVDC(High Voltage DC)输电等,其中 PSS 通过附加信号控制励磁,产生一个同转子速度偏差同向的电气转矩分量,从而对振荡提供阻尼<sup>[3-4]</sup>。国内外对电力系统稳定器和励磁控制器共同作用可以提高同步发电机运行的稳定性和抗扰动的能力有一定的共识,但对于电力系统稳定器的研究主要还是在于其对电网低频振荡的抑制方面<sup>[5]</sup>。本文对电力系统稳定器能够提升安装了励磁控制器的同步发电机在大扰动下稳定运行能力进行了研究,通过 Matlab 仿真对比已安装和未安装 PSS 的 2 个系统在三相接地短路、交流双回线一条发生断线故障状况下系统的运行情况来证明电力系统稳定器的作用。仿真结果表明,安装 PSS 后同步发电机的一些内在特性会发生一些改变,但是加装了电力系统稳定器的系统中同步发电机在大扰动下的稳定性得到了明显的提升<sup>[2]</sup>。

## 1 同步发电机励磁控制系统

同步发电机的运行原理是电磁感应原理,对同步发电机的励磁进行控制,是对发电机的运行进行控制的重要内容之一。励磁系统是发电机的重要组成部分,它对电力系统及发电机本身的安全稳定运行有很大的影响。同步发电机的励磁系统主要由励磁功率单元、励磁调节器、测量比较单元和发电机本身构成,其中励磁功率单元是指向同步发电机转子绕组提供直流励磁电流的励磁电源部分,而励磁调节器则是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的装置。发电机励磁系统直接控制同步发电机磁场电流,从而控制同步发电机的电势、端电压、无功功率和电流等参量。本文采取简化的励磁控制系统结构,如图 1 所示<sup>[6]</sup>。

## 2 电力系统稳定器

电力系统稳定器的作用主要是抑制电力系统的低频振荡,低频振荡产生的原因是由于电力系统的负阻尼效应,常出现在联系弱、距

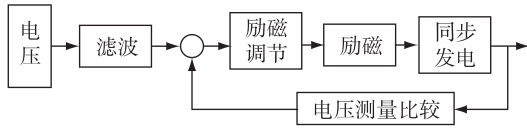


图1 同步发电机励磁控制系统示意  
Fig. 1 Diagram of synchronous excitation system

离远、负荷重的输电线路,在采用快速、高放大倍数励磁系统时尤其明显.系统欠阻尼甚至负阻尼,导致发电机转子间的相对摇摆,输电线路表现出来就是功率的波动<sup>[7]</sup>.稳定器接受这些振荡信号,按照要求传递给励磁电压调节器,通过电压调节器的自动控制作用,对发电机转子之间的相对振荡提供正阻尼,以此来实现对振荡的抑制<sup>[8]</sup>.电力系统稳定器是在自动电压调节 AVR (Automation Voltage Regulation) 的基础上,附以转速偏差  $\Delta\omega$ , 功率偏差  $\Delta P_e$ , 频率偏差  $\Delta f$ , 加速功率偏差 ( $\Delta P$ ) 中的一种或几种信号作为附加控制,产生与  $\Delta\omega$  同轴的附加力矩,增加系统的阻尼,以增强电力系统的动态稳定性<sup>[9]</sup>.

电力系统普遍采用在励磁调节器上附加 PSS 的附加励磁控制方案, PSS 接受这些振荡信号,按要求的传递给励磁电压调节器,通过电压调节器的自动控制作用,对发电机转子之间的相对振荡提供正阻尼,以此实现对振荡的抑制<sup>[10]</sup>, 本文在 Matlab/Simulink 仿真中采用的是相对简单的电力系统 PSS 模型,如图 2 所示.

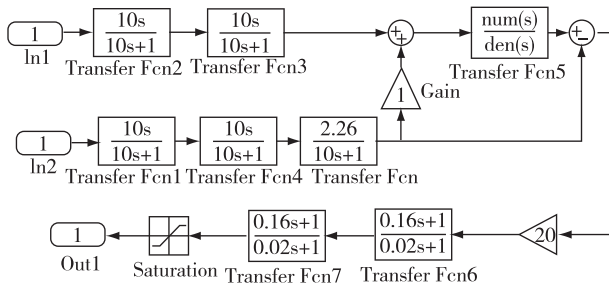


图2 简化的电力系统稳定器  
Fig. 2 Simplified power system stabilizer model

### 3 仿真算例

本文采用如图 3 所示的单机无穷大系统来进行仿真研究,该系统包含同步发电机、励磁控制器、变压器、交流双回输电线路、厂用电负荷以及无穷大系统.输电线路电压等级为 110 kV,线路参数(有名值)为 0.1  $\Omega$ 、0.01 H.无穷大系统由容量为 12 000 MVA

的电源和大小为 500 MVA 的系统负荷组成.线路以及变压器参数的标幺值计算结果如图 3 所示, PSS 使用图 2 所示的模型.

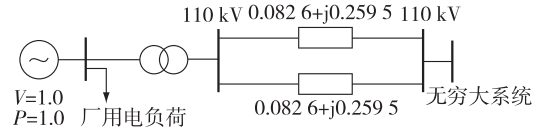


图3 单机无穷大系统  
Fig. 3 Single machine infinite system

仿真研究中将对包含 PSS 和不含 PSS 的励磁控制系统的单机无穷大系统进行测试,设置系统发生的故障为三相接地短路(持续时间为 0.1 s)以及断线故障.三相短路故障点设置在变压器出口 110 kV 母线处,断线故障设置如下:在系统断线故障中交流双回线的一条线路在 20 s 时发生了断线故障.仿真中将含有 PSS 和励磁控制系统的单机无穷大系统与只含有励磁控制系统的单机无穷大系统共同进行试验.只含有励磁控制系统的单机无穷大系统中励磁系统原本接入 PSS 的端子置零,有利于验证电力系统稳定器 PSS 的作用.主要参数仿真波形如图 4、5 所示.

三相接地短路故障发生在 15.0 s, 15.1 s 处故障消失,同步发电机的励磁电流波形如图 4a 所示,故障发生时发电机的励磁电流曲线发生明显的振荡变化,随着三相接地短路故障的消失,振荡过程呈现趋稳的状况,励磁电流曲线经过短暂的调整就恢复到了稳定状态.整个过程对系统产生的冲击不大.其调整经历 1 周,振荡即可平定.只含有励磁控制系统的同步发电机的励磁电流波形在故障处发生了明显的振荡变化,系统的励磁电流曲线第一摆的幅值远大于加装了 PSS 的系统,系统恢复时间也明显长于加装了 PSS 的曲线,经历 3 周,其振荡才能平稳.可见 PSS 可以显著地抑制三相接地短路故障中同步发电机的暂态失稳情况,显著减少冲击的幅度,与此同时电力系统稳定器还能显著提升系统的恢复稳定能力,减少系统恢复稳定所用的时间.三相短路电流各个统计值如表 1 所示,其中延迟时间为从谷值上升至终值一半的时间,上升时间为第一次到达稳态的时间,峰值时间为到达峰值的时间,调节时间是以稳态值的正负 1% 为误差.

同步发电机的 d 轴定子电压波形如图 4b 所示,从曲线可以看出未安装 PSS 的曲线振荡幅度以及时间都明显强于安装了 PSS 的系统,安装了 PSS 的同

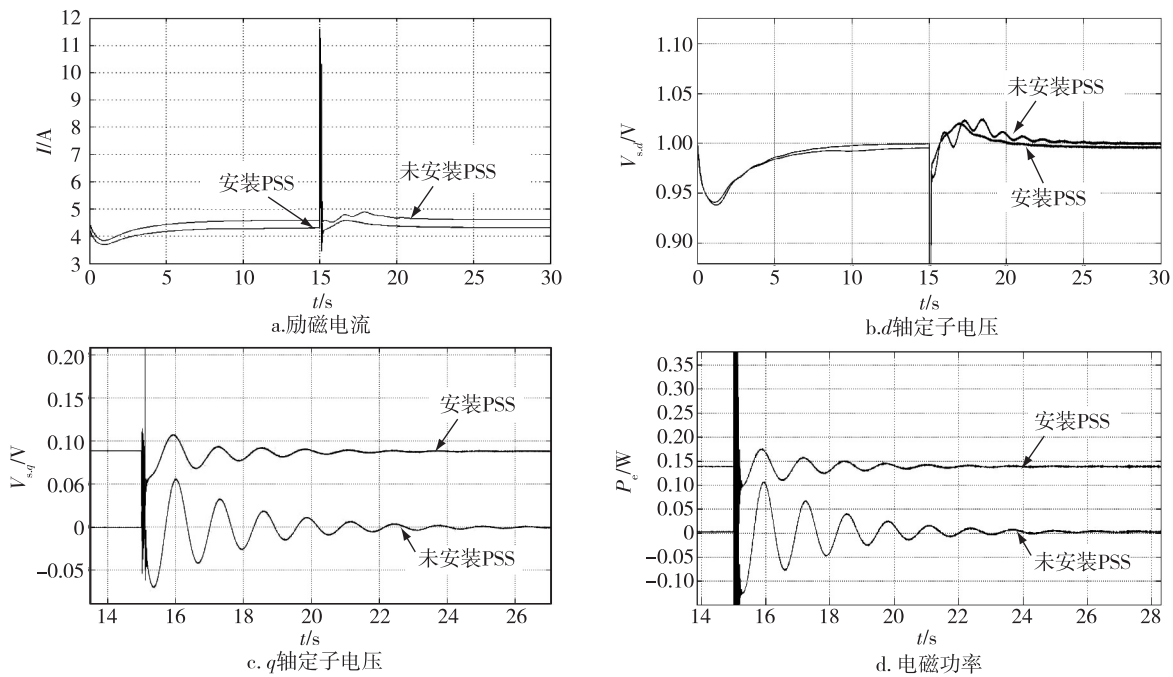


图4 三相短路仿真结果

Fig. 4 Simulation waves of three-phase short circuit fault for excitation control system with or without PSS, for excitation current, for  $d$ -axis stator voltage, for  $q$ -axis stator voltage, and for electromagnetic power

步发电机  $d$  轴定子电压曲线经过很短暂的调整就恢复到了稳定状态,没安装 PSS 的  $d$  轴定子电压波形发生了明显的振荡变化,三相短路  $d$  轴定子电压各值统计如表 2 所示.

同步发电机的  $q$  轴定子电压波形如图 4c 所示,从安装与不安装 PSS 的曲线可以看出:未安装 PSS 系统  $q$  轴定子电压波形第一摆的幅值远大于加装了 PSS 的系统,系统恢复时间也明显长于加装了 PSS

的曲线,调整经历 7 周,其振荡才能平定,而安装了 PSS 的系统可以显著地防止失压现象,并以更短的时间恢复系统的稳定运行,三相短路  $q$  轴定子电压各值统计如表 3 所示.

图 4d 为电磁功率  $P_e$  的波形,可见加载了 PSS 后波形的震荡幅度明显小于没有 PSS 的系统,系统的恢复稳定性能明显加强.

表 1 三相短路电流各值统计

Table 1 Simulated current values of three-phase short circuit fault for excitation control system with or without PSS

PSS	电流/A				延迟时间/s	上升时间/s	峰值时间/s	调节时间/s	超调量/%
	初值	谷值	峰值	终值					
未安装	4.59	4.51	4.89	4.60	1.04	1.05	2.9	7.0	6.3
安装	4.32	4.22	4.59	4.32	0.10	0.50	1.6	5.3	6.2

表 2 三相短路  $d$  轴定子电压各值统计

Table 2 Simulated  $d$ -axis stator voltage values of three-phase short circuit fault for excitation control system with or without PSS

PSS	电压/V				延迟时间/s	上升时间/s	峰值时间/s	调节时间/s	超调量/%
	初值	谷值	峰值	终值					
未安装	1	0.97	1.025	1	0.4	0.6	3.40	3.6	3
安装	1	0.98	1.02	1	0.2	0.6	1.69	0.2	2

表 3 三相短路  $q$  轴定子电压各值统计Table 3 Simulated  $q$ -axis stator voltage values of three-phase short circuit fault for excitation control system with or without PSS

PSS	电压/V				延迟时间/s	上升时间/s	峰值时间/s	调节时间/s	超调量/%
	初值	谷值	峰值	终值					
未安装	0	-0.07	0.06	0	0.48	0.6	1.0	3.0	31
安装	0.88	0.06	0.11	0.09	0.40	0.6	0.8	3.4	22

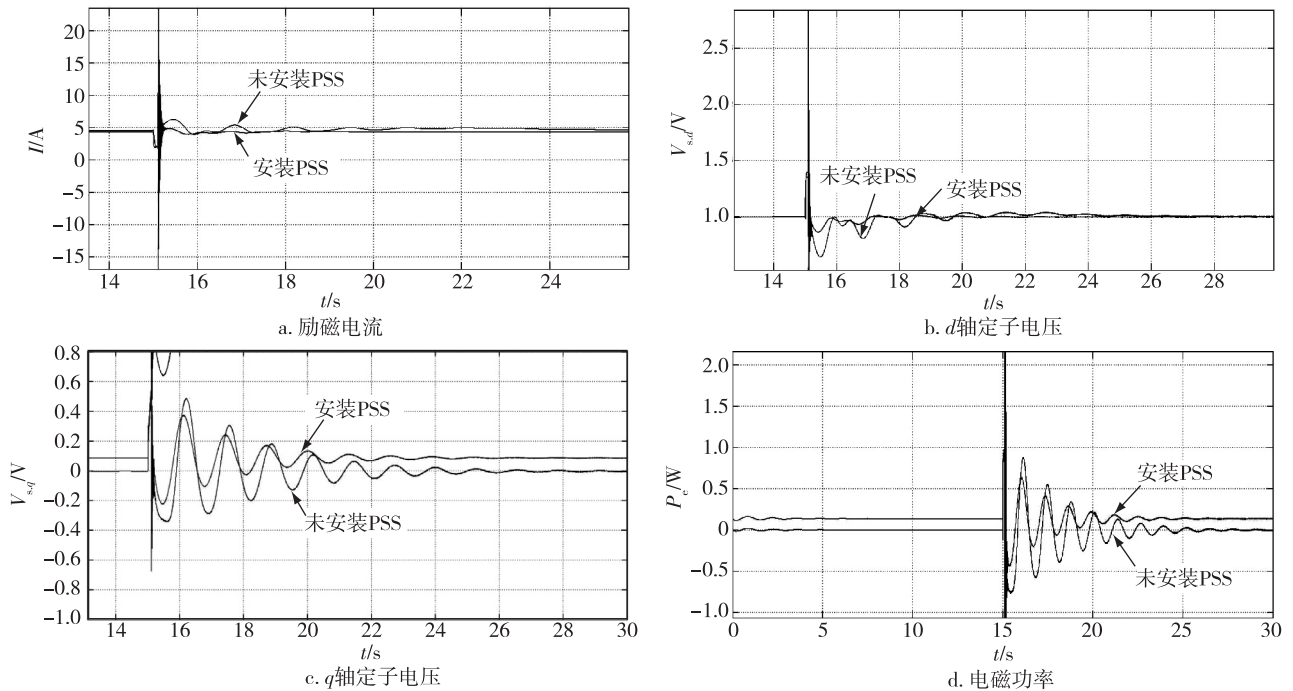


图 5 断线故障仿真结果

Fig. 5 Simulation waves of disconnection fault for excitation control system with or without PSS, for excitation current, for  $d$ -axis stator voltage, for  $q$ -axis stator voltage, and for electromagnetic power

断线故障仿真结果如图 5 所示,其结果表明:加装 PSS 的系统在断线故障时没有出现振荡失稳情况,系统也没有受到较大的冲击,而是平稳过渡到了一个新的稳定状态,而不含 PSS 的系统情况与此相反,在故障时波形振荡明显。

#### 4 结论

本文在分析同步发电机励磁控制系统模型的基础上,研究了辅以电力系统稳定器的同步发电机励磁控制系统的控制方式,利用 Matlab/Simulink 对包含 PSS 的励磁系统进行了不同故障情况下的仿真,仿真结果表明此模型的正确性和有效性,在发生大故障时可以起到降低冲击、维持系统暂态稳定性和增强系统在故障下恢复能力的作用,为励磁系统设计提供了依据。

#### 参考文献

##### References

- [1] 孙启云,宋顺一,陈田.提高发电机励磁系统可靠性的几点改进措施[J].电网技术,2002,26(4):77-80  
SUN Qiyun, SONG Shunyi, CHEN Tian. Some countermeasures to improve reliability of excitation system for generators[J]. Power System Technology, 2002, 26(4): 77-80
- [2] Kundur P. Power system stability and control [M]. New York: McGraw-Hill Inc, 1994: 14-20
- [3] 倪以信,陈寿孙,张宝霖.动态电力系统的理论和分析[M].北京:清华大学出版社,2002:287-291  
NI Yixin, CHEN Shousun, ZHANG Baolin. Theory and analysis of dynamic power system [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 287-291
- [4] 楚文斌,刘觉民,刘军志,等.具有新型 PSS 的励磁控制系统建模与仿真[J].电机与控制应用,2009,36(12):5-8  
CHU Wenbin, LIU Juemin, LIU Junzhi, et al. Modeling

- and simulation about included new PSS of excitation system[J]. Electric Machine & Control Application, 2009, 36(12): 5-8
- [ 5 ] 郭强. 电力系统稳定器整定方法的仿真研究[J]. 华东电力, 2009, 37(1): 135-137  
GUO Qiang. Simulation based study of setting method for power system stabilizer[J]. East China Electric Power, 2009, 37(1): 135-137
- [ 6 ] 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): 62-65  
ZHANG Wei, YU Li, LIU Yujuan, et al. Synchronous generator excitation system with PSS simulation based on MATLAB[J]. Computer and Digital Engineering, 2011, 39(8): 62-65
- [ 7 ] 蔺红, 晁勤. 基于 Matlab 电力系统稳定器参数优化仿真分析[J]. 水利发电, 2008, 34(6): 77-78  
LIN Hong, CHAO Qin. Simulation study on parameter optimum for PSS based on Matlab[J]. Water Power, 2008, 34(6): 77-78
- [ 8 ] 张璞. PSS 的自适应算法研究[D]. 北京: 华北电力大学电气与电子工程学院, 2011: 4-6  
ZHANG Pu. Research on self-tuning algorithm of PSS [D]. Beijing: School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, 2011: 4-6
- [ 9 ] 方思立, 朱方. 电力系统稳定器的原理及其应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 1996: 40-46  
FANG Sili, ZHU Fang. The principle and application of power system stabilizer [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1996: 40-46
- [ 10 ] 郑希云, 李兴源, 王渝红. 基于混沌优化算法的 PSS 和直流调制的协调优化[J]. 电工技术学报, 2010, 25(5): 170-171  
ZHENG Xiyun, LI Xingyuan, WANG Yuhong. Coordination and optimization of PSS and HVDC modulations using chaotic optimization algorithm [J]. Transactions of China Electrotechnological Society, 2010, 25(5): 170-171

## Study on simulation of synchronous generator excitation system with PSS

ZHANG Wei<sup>1,2</sup> CHEN Li<sup>1</sup> YU Li<sup>1</sup> LIU Yujuan<sup>1,2</sup>

1 School of Information and Control, Nanjing University of Information Sciences & Technology, Nanjing 210044

2 Research Center for Renewable Energy Generation Engineering, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098

**Abstract** Power system stabilizer(PSS) is one of the most effective methods to restrain low frequency oscillation in power system. The paper studies into the synchronous generator excitation control with the power system stabilizer as the auxiliary control unit on the base of the analysis of existing synchronous generator excitation control system models. Thereafter a simulation model of an improved excitation control system including PSS is established based on Matlab. A test is carried out on the single machine infinite system for the cases of faults of three phase short circuit or disconnection, and the result show that the performance of the excitation control with PSS is superior to that of the excitation control without PSS. This design provides reference for the improvement of excitation system.

**Key words** power system; power system stability; synchronous generators; excitation control system