

# 提高电力系统稳定性综合措施效能分析及 MATLAB 仿真

熊来红

(武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

**摘要:**从影响电力系统稳定性的各种因素出发,综合概述了提高电力系统稳定性的主要措施,利用 MATLAB 软件强大的计算和仿真能力,搭建了一个典型的双机系统,有针对性、类比性的对提高电力系统稳定性的各种措施进行了仿真类比分析,得出了各种提高稳定性措施的影响力,为实际运行中各种措施的综合有效应用提供了重要参考。

**关键词:** MATLAB; 稳定性; 功角

**Abstract:** As viewed from the various factors which affect the stability of power system, a comprehensive overview of the main measures to improve the stability of power system is described. Because of the powerful computing and simulation capabilities of MATLAB, a typical two-machine system is set up and an analogical simulation is carried out for various measures of improving the stability of power system. The influencing force of various measures is obtained, which would provide an important reference for the actual operation.

**Key words:** MATLAB; stability; power angle

**中图分类号:** TM743 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)03-0064-04

## 0 引言

电力系统稳定是指电力系统受到干扰后,不发生自发振荡或非周期性失步,自动恢复到初始运行状态的能力。实际中有很多种方法用于提高电力系统稳定性,如加装快速励磁系统、加装电力系统稳定器 PSS 串联电容调压、加大发电机励磁电压等措施,但是这些措施都有一定局限性,应用单一的措施只能对一定范围的扰动有效果,当扰动超出一定范围后,单纯靠一种调节措施很难保持系统的稳定,所以需要综合应用各种提高静态稳定性的措施,使电力系统能在较大范围内保持稳定,对此进行了仿真研究,证明了综合应用各种措施提高电力系统稳定性的有效性。

## 1 简单电力系统功率特性及提高稳定性的措施

对简单电力系统(图 1),设发电机向系统输送的有功功率  $P$  为  $P = UI \cos \varphi$ , 可得,  $P = \frac{EU}{X_{\Sigma}} \sin \sigma$  功角特性曲线  $P = f(\delta)$ , 如图 2 所示。

图中分析可知,系统稳态运行在不同的初始点

时,当受到一定小扰动后,系统将呈现出不同的功角特性曲线,如图中 1、2、3 便是在不同的初始状态时当受到小扰动后系统表现出的电磁特性曲线和功角特性曲线。

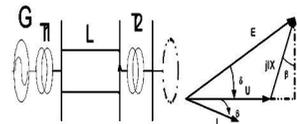


图 1 简单电力系统

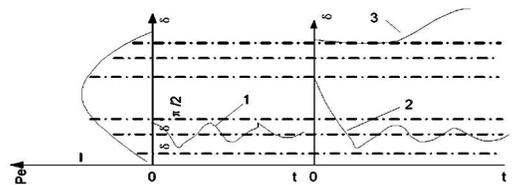


图 2 功角曲线

基于以上双机电力系统稳定性理论分析,可知为了提高电力系统稳定性,可以从提高电力系统电压  $E_1$ 、 $E_2$ ,降低系统间联系电抗  $X_{\Sigma}$  适当控制系统间功角  $\sigma$  方面入手,现代电力系统中提高稳定性的各种措施主要有:加装自动励磁系统(AVR)、加装电力系统稳定器(PSS)、提高励磁电压增益(Gain)、串联电容器(Series Capacitor)、在适当位置加装静止无功补偿器(SVC)、电气制动装置(SDR)、设置开关站、故障后进

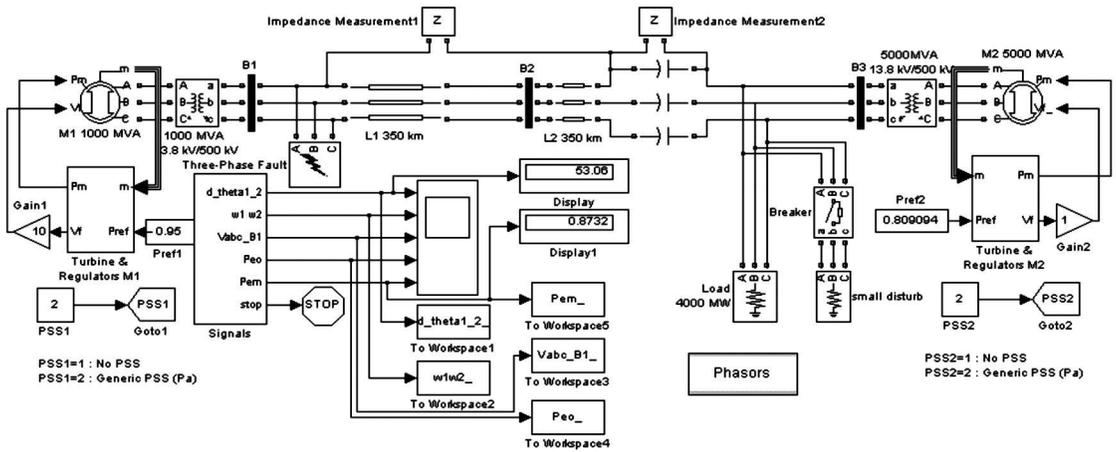


图 3 仿真系统主框图

行合理操作(如快速切除故障、自动重合闸等)、降低作用在发电机轴上的不平衡转矩、调整线路参数等;下面就建立 MATLAB 仿真模型来验证几种主要措施提高电力系统稳定性的效能。

## 2 系统仿真模型构建

本仿真模型基于 MATLAB 电力系统模块库 `sim-power-system` 和 `simulink` 模块库构建一双机系统,系统电压等级为 550 kV 网络,发电机输出机端电压为 20 kV。图 3 为仿真系统主框图。

本系统仿真模型构建过程中,采取了如下技巧。

(1)励磁系统采用水轮机模块输出机械功率,稳定器 PSS 输入采用水轮机输出机械功率和发电机输出有功功率之差,以更真实模拟发电机系统。并对整个励磁系统采取封装技术,图中还对每一个稳定器 `vstab` 输入端应用多端转换开关,可以方便改变标签中数字来使励磁系统能工作在 PSS 和无 PSS 两种工况。图 4 为 AVR 和 PSS 结构仿真图。

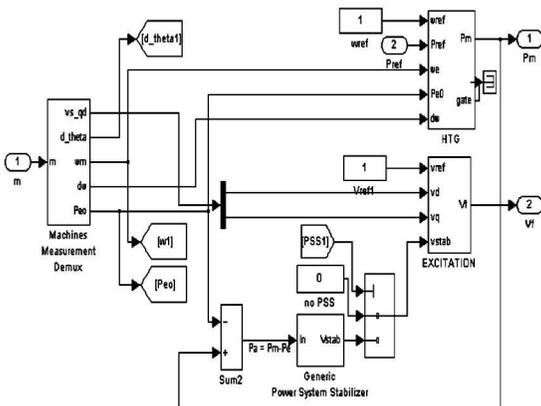


图 4 AVR 和 PSS 结构仿真图

(2)为避免失步后无谓的数值积分,图中设置了仿真的提前终止判据,如果发电机相角幅值超过规定,则认为系统已经失步从而停止仿真。

(3)将 M1、M2 励磁系统的 PSS 投入控制端用标签列出来,用常数模块控制,可以灵活控制两发电机的 PSS 投入情况。

(4)对母线电压系统进行了子系统封装,方便观测在各种运行条件下,系统母线电压变化情况

(5)通过一三相断路器,在额定负荷上并联一小负荷来模拟小干扰系统的小干扰,可以任意设置各种程度大小的负荷扰动、扰动发生时间。

(6)画图命令设计:为了使不同情况下的曲线在同一个坐标内能够形成对比,仿真过程中,将不同的仿真条件下的仿真数据用 `TO workspace` 模块传递到工作空间,并且不同数据分开存放,然后使用 MATLAB 的 `plot()`, `hold` 等命令画图命令就可以在同一张图中画出多条曲线。程序中要用到如下画图命令。

功角曲线画图命令: `plot(d_theta1_2, time d_theta1_2, signals values 'k;'), hold on`

`plot(d_theta1_2_., time d_theta1_2_., signals values 'r;'), hold on`

`plot(d_theta1_2_., time d_theta1_2_., signals values 'o;'), hold on`

转速曲线画图命令:

`plot(w1w2, time w1w2, signals values 'k;'), hold on`

`plot(w1w2_., time w1w2_., signals values 'r;'), hold on`

`plot(w1w2_., time w1w2_., signals values 'o;'), hold on`

母线电压画图命令:

```

plot(Vabc_B1_ . time Vabc_B1_ . signals values ' k
: '), hold on
plot(Vabc_B1_ . time Vabc_B1_ . signals values),
hold on
plot(Vabc_B1__ . time Vabc_B1__ . signals val
ues ' r o'), hold on
电磁功率画图命令:
plot(Pe_o time Pe_o signals values ' k: '), hold on
plot(Pe_o . time Pe_o . signals values), hold on
plot(Pe_o__ . time Pe_o__ . signals values ' r: '),
hold on

```

### 3 仿真结果分析

仿真中的小于 20% 小扰动用投切负荷来模拟, 对于大于 20% 的较大扰动则用故障设置器来模拟如单相、两相和三相短路扰动。

#### 3.1 自动励磁调节器 (AVR) 仿真分析

仿真参数设置: M1 的发电机稳定器 PSS1 退出, 即将常数模块 PSS1 中参数 constant=1; M1 仅有励磁调节器工作, 当系统没有扰动时, 系统能够经过一段过渡过程时间后保持稳定。但当扰动为 10% 时, 即在 20 s 时负荷突然增大 10%, 系统也能够经过一段过渡过程后稳定运行, 但当扰动继续增大到 20% 时, 系统虽然能够继续稳定运行一段时间, 但达到 50 s 左右便迅速失去稳定。同样对单相短路故障没有稳定能力。图 5 为 AVR 仿真结果。

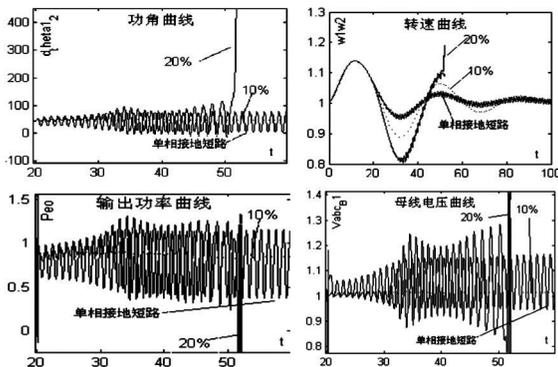


图 5 AVR 仿真结果

从以上分析可知, AVR 对小扰动有一定的稳定能力, 但当扰动较大时, 如单相短路扰动却能力显得不足。

#### 3.2 电力系统稳定器 (PSS) 效能仿真分析

设置小扰动为 10% 时, 投入 PSS 系统能在扰动

发生后几秒之内便使系统稳定下来, 显著提高系统的稳定性。当扰动增大为 20% 时, 稳定时间相对增大, 但也仅有不到 10 s 便稳定下来, 继续逐级仿真, 用电力系统中短路故障出现最多的单相接地短路模拟 20% 以上的较大扰动, 系统出现持续振荡, 当投入 PSS 后, 系统在几秒内立即稳定下来, 仿真效果见图 6。

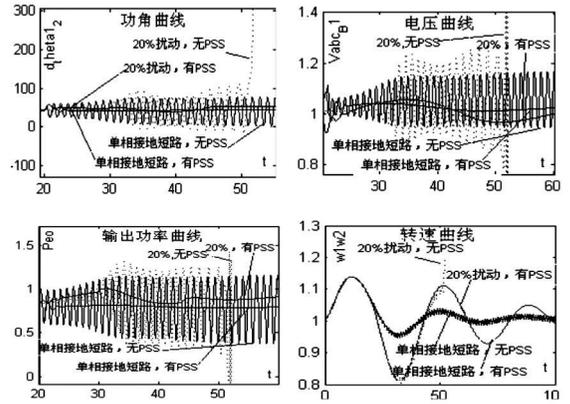


图 6 PSS 仿真结果

仿真分析可知, PSS 比 AVR 有更大范围的扰动稳定能力, 在 10% ~ 20% 范围扰动内, PSS 可以比 AVR 在更短时间内使系统稳定下来, 在 20% 以上的大扰动, 如单相短路故障这样的大扰动, PSS 也可以有效提高稳定性, 只不过时间稍长一些, 但当扰动更大时, 如单相接地短路故障持续时间超过 0.9 s 时, 即使 AVR 和 PSS 同时投入, 也难以改变系统失稳状态。因此必须采取其它措施。

#### 3.3 励磁电压增益仿真分析

AVR 和 PSS 虽然能在一定程度上提高静态稳定性, 但是也只有一定的稳定范围, 当 AVR 和 PSS 同时加装时, 也不能稳定超过 0.9 s 的单相短路这样的较大扰动, 此时可以考虑加装励磁电压增益 Gain, 仿真中, 设置了

$$20\% \text{ 扰动} + \text{AVR} + \text{Gain} = 1,$$

$$20\% \text{ 扰动} + \text{AVR} + \text{Gain} = 10,$$

$$0.9 \text{ s 的单相接地短路} + \text{PSS} + \text{Gain} = 1,$$

$$0.9 \text{ s 的单相接地短路} + \text{PSS} + \text{Gain} = 10$$

四种对比仿真条件, 仿真数据如图 7。

通过仿真分析, 可知, 在加装 AVR 和 PSS 都无法稳定系统时, 则可以适当加大励磁增益可以提高系统静态稳定性。但是励磁电压增益 Gain 的效能也有一定有效范围, 过大的励磁电压增益对扰动调节效果并不明显。

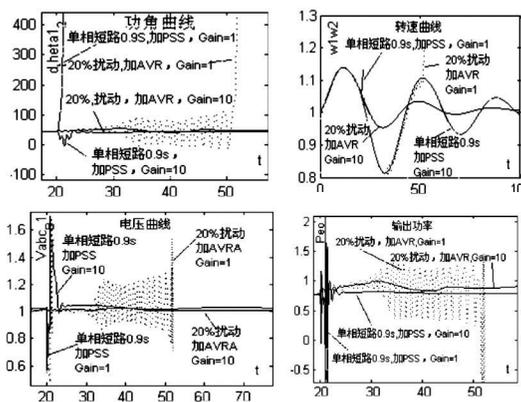


图 7 励磁电压增益仿真效果

### 3.4 线路容性补偿仿真分析

由公式可知,减小线路电抗,可以提高系统稳定极限功率,提高系统稳定性。在线路中串联电容可以达到此目的,现实中是用 TSCS 等装置来实现,本仿真中直接在线路中串联电容器来验证电容器补偿的效能。补偿度为  $\sigma = \frac{1/\omega C}{WL}$ ,仿真中用阻抗测量器分别测量补偿电容的阻抗和输电线路的阻抗,通过仿真测量得到如图 8 曲线。

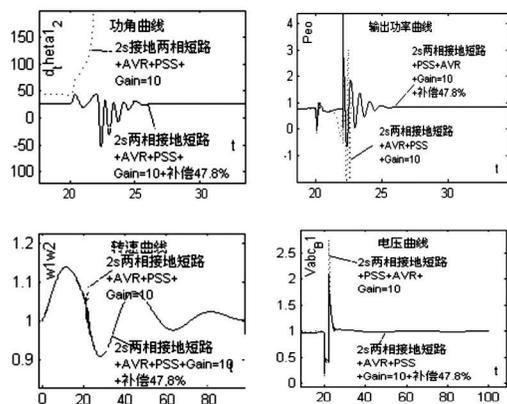


图 8 线路容性补偿仿真效果

可以看出,对 2 s 的两相接地短路这样的大扰动,即使同时加装 AVR、PSS 和 Gain=10 也不能稳定系统,当采用 47.8% 的容性补偿后,能够快速稳定系统,可见容性补偿能够大大提高系统功率极限,提高

了系统稳定性。

## 4 结 语

通过构建双机系统对励磁调节器 AVR、稳定器 PSS、励磁增益 Gain、串补电容等静态稳定性措施进行对比分析,观测系统稳定性参数功角曲线、电磁功率、母线电压、转速、极限功率等,得出了各种措施提高系统稳定性的影响力范围。励磁调节器虽然是现代发电系统必备设备,但是其稳定性能力较小,一般对 20% 范围内的小扰动有稳定能力;附加 PSS 后,稳定性大大提高,若扰动进一步增大,可适当提高发电机励磁电压增益 Gain;若扰动再增大,还可以采用线路串联电容进行容性补偿,以降低线路阻抗,提高系统稳定极限功率,提高抵抗扰动的能力。由此可见,实际中只要综合应用以上措施,可以大大提高系统稳定极限,抵抗更大的系统干扰,提高系统稳定性。

## 参考文献

- [1] 李光琦. 电力系统暂态分析 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1995.
- [2] 赵彩宏, 田立军, 邹贵彬, 等. FCL 对电力系统暂态稳定性影响的机理分析与仿真 [J]. 电力自动化设备, 2001, 21(2): 14-17.
- [3] 吴天明. MATLAB 电力系统设计与分析 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.
- [4] 袁宇春, 张保会. PSS 对电力系统动态及静态稳定性的影响 [J]. 中国电力, 1997, 30(12): 7-9.
- [5] 范影乐. MATLAB 仿真应用详解 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2001.
- [6] 毛钧鑫. 提高电力系统稳定运行的措施 [J]. 电气杂志 OHM, 1994, 2.
- [7] 周兆庆. MATLAB 电力系统工具箱在电力系统机电暂态仿真中的应用 [J]. 电力自动化设备, 2005, 25(4): 51-55.

(收稿日期: 2010-01-26)

(上接第 18 页)

- [12] S H. Ling, Frank H. F. Leung, H. K. Lam, Yin-Shu Lee, Peter K. S. Tam. A Novel Genetic-A Algorithm-Based Neural Network for Short-Term Load Forecasting [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2003, 50(4): 793-799.

- [13] 梅家斌, 谢春娣. 遗传算法在神经网络权值优化中的应用 [J]. 中南民族大学学报: 自然科学版, 2001(21): 1-3

- [14] 洪露, 马长山, 谢宗安. 基于遗传算法的神经网络权值优化 [J]. 贵州工业大学学报: 自然科学版, 2003, 32(6): 48-51.

### 作者简介:

刘 绚 (1985-), 男, 硕士研究生, 研究方向为人工智能及复杂网络在电力系统中的运用。

刘天琪 (1962-), 女, 博导, 教授, 研究方向为电力系统分析计算与稳定控制、高压直流输电、调度自动化。

(收稿日期: 2010-03-19)