

# 西门子 PSS3B 电力系统稳定器参数整定

李 理, 洪 权, 郭思源, 蔡昱华, 吴晋波

(国网湖南省电力有限公司电力科学研究院, 湖南 长沙 410007)

**摘 要:**针对西门子公司 PSS3B 型电力系统稳定器参数难以整定的问题,提出一种参数整定方法。首先,通过分析电力系统稳定器的传递函数结构,将 PSS3B 反馈型传递函数结构等效转换为串联型传递函数结构,然后,基于相位补偿原理对传递函数相位补偿环节参数进行整定,最后,通过校核闭环传递函数主导特征根对应的阻尼比及振荡频率整定电力系统稳定器的增益系数。基于单机一无穷大系统模型的阶跃仿真表明,经过整定后的 PSS3B 型电力系统稳定器对有功功率低频振荡有较好的抑制作用,验证了整定方法的有效性。

**关 键 词:**电力系统稳定器;PSS3B;参数整定

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.06.021 中图分类号:TM712; TM733 文章编号:1673-9140(2020)06-0157-06

## Research on parameters setting of Siemens PSS3B power system stabilizer

LI Li, HONG Quan, GUO Siyuan, CAI Yuhua, WU Jinbo

(Electric Power Science Research Institute, State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd., Changsha 410007, China)

**Abstract:** The parameters of Siemens PSS3B power system stabilizer are difficult to tune, therefore, a parameter tuning method is proposed in this paper. Firstly, the PSS3B feedback transfer function structure is equivalently converted into a series transfer function structure by analyzing the transfer function structure of the power system stabilizer. Then the phase compensation parameters of transfer function is adjusted based on the phase compensation principle. Finally, the gain coefficient of the power system stabilizer is adjusted by checking the damping ratio corresponding to the dominant characteristic root of the closed-loop transfer function and the oscillation frequency. After the adjustment, the PSS3B power system stabilizer has a good suppression effect on the low-frequency oscillation of active power, which verifies the effectiveness of the method.

**Key words:** power system stabilizer (PSS); PSS3B; parameters setting

电力系统稳定器(power system stabilizer, PSS)是一种主要用于抑制电网低频振荡的控制设备,在保障电网安全稳定运行方面起到了巨大的作用,当前全国各大中型发电机组均按照运行管理规定配置了 PSS。

国内常见的 PSS 类型是 PSS1、PSS2 型,另外还有部分抽水蓄能机组使用的  $\alpha_P$  型以及小型燃汽轮机使用的 PSS3B 型。PSS 均应按照国内标准要求进行参数整定<sup>[1-3]</sup>。由于  $\alpha_P$ 、PSS3B 型 PSS 的传递函数并非串联结构<sup>[4]</sup>,厂家整定参数时采用的方

收稿日期:2017-07-03;修回日期:2017-12-15

基金项目:国网湖南省电力有限公司科技项目(XDKY-2015-016)

通信作者:李 理(1987-),男,硕士,工程师,主要从事电力系统试验建模、电力系统稳定与控制等研究;E-mail:fly1057@foxmail.com

法与国内标准要求的不同,导致厂家整定的 PSS 参数无法满足国内标准要求。

如西门子公司的 PSS3B 型模型为反馈型传递函数结构,原采用  $H_\infty$  控制理论进行参数整定,其优点在于能解决建模误差、参数不确定的控制问题,使 PSS 具有很好的鲁棒性。但其方法存在局限性:①  $H_\infty$  控制理论整定<sup>[5-7]</sup> PSS 性能较大程度上依赖于加权矩阵的选择,而选取加权矩阵的原则存在一定任意性,并且多个加权矩阵之间的协调问题是难点;②  $H_\infty$  控制理论并非基于相位补偿原理,难以按国内标准要求<sup>[2]</sup>对现场参数整定结果进行评判。

该文对 PSS3B 型电力系统稳定器进行研究,针对其参数难以整定的问题,提出一种整定方法。通过对 PSS3B 型结构进行变换,使其易于使用相位补偿原理对相位环节参数进行整定;通过校核闭环传递函数主导特征根对应的阻尼比及振荡频率整定增益参数;最后,通过单机一无穷大系统模型阶跃仿真校验整定方法的有效性。

## 1 PSS 相位补偿原理

当发电机运行在重载、远距离、弱联系情况下,根据 Philips-Heffron 理论,励磁系统将产生位于  $\Delta\omega$  轴负方向的负阻尼转矩  $\Delta T_D$ 。当加入 PSS 后,其产生的正阻尼转矩  $\Delta T_{PSS}$  可用于抵消负阻尼转矩  $\Delta T_D$ ,进而可抑制低频振荡。PSS 原理如图 1 所示。

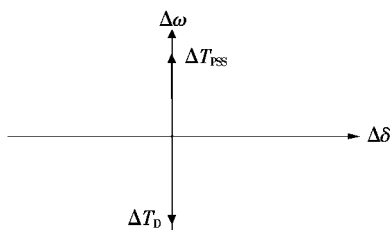


图 1 PSS 原理

Figure 1 PSS schematic diagram

基于 Philips-Heffron 模型,通常 PSS 装置的输出  $\Delta U_{PSS}$  经由励磁控制叠加接入系统。相频特性  $\theta_{\Delta T_{PSS}/\Delta U_{PSS}}$  等于  $\theta_{\Delta E_q/\Delta U_{PSS}}$ ,此即为励磁系统无补偿相频特性。PSS 相位参数整定的目的是使  $\Delta T_{PSS}$  提供  $\Delta\omega$  方向上的分量。根据 PSS 装置输入物理量的不同,实际存在 2 种相位补偿整定方案<sup>[7-8]</sup>。

1) 当 PSS 装置的输入为  $\Delta\omega$  时,相位整定原理如图 2 所示。输入的  $\Delta\omega$  经过 PSS 及励磁系统的相

位滞后,生成的  $\Delta T_{PSS}$  位于  $\Delta\omega$  方向。因此可得图 2 中的相位关系:

$$\theta_{\Delta E_q/\Delta U_{PSS}} + \theta_{PSS} \approx 0 \quad (1)$$

2) 考察相量偏差转矩方程:

$$j\omega M \Delta\omega = \Delta P_m - \Delta P_e \quad (2)$$

当发生低频振荡时,如机械功率尚未变化,式(2)变形为

$$\Delta\omega = \frac{-\Delta P_e}{jM\omega} \quad (3)$$

此时,  $\Delta\omega$  滞后  $-\Delta P_e$  相位  $90^\circ$ 。基于式(3),当 PSS 装置的输入为  $-\Delta P_e$  时,相位整定原理如图 3 所示。输入的  $-\Delta P_e$  经过 PSS 的相位补偿及励磁系统的相位滞后达到  $\Delta\omega$  方向,角度旋转方向顺时针为负。因此可得图 3 中相位关系:

$$\theta_{\Delta E_q/\Delta U_{PSS}} + \theta_{PSS} \approx -90^\circ \quad (4)$$

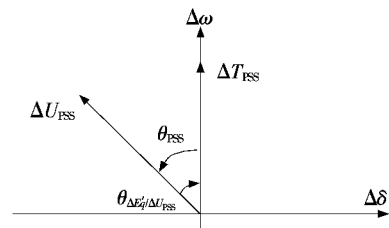


图 2 输入为  $\Delta\omega$  的相位补偿原理

Figure 2 Phase compensation schematic diagram with the input  $\Delta\omega$

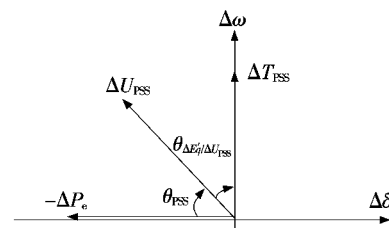


图 3 输入为  $-\Delta P_e$  的相位补偿原理

Figure 3 Phase compensation schematic diagram with the input  $-\Delta P_e$

理论分析表明,在整定频段内  $\Delta U_t$  相对于  $\Delta U_{PSS}$  的传递函数相位  $\theta_{\Delta U_t/\Delta U_{PSS}}$  与  $\theta_{\Delta E_q/\Delta U_{PSS}}$  相差小<sup>[3]</sup>,工程上常采用易于测量的  $\theta_{\Delta U_t/\Delta U_{PSS}}$  代替不易测量的  $\theta_{\Delta E_q/\Delta U_{PSS}}$ ,即采用关系式:

$$\theta_{\Delta U_t/\Delta U_{PSS}} + \theta_{PSS} \approx -90^\circ \quad (5)$$

## 2 西门子 PSS3B 数学模型及参数整定

### 2.1 PSS3B 模型结构

PSS3B 型传递函数的反馈型模型如图 4 所示,

其中,电功率偏差量为  $\Delta P_e$ , 隔直时间常数为  $T_D$ , 移相时间常数为  $T_1 \sim T_4$ , 放大倍数为  $K, K_0 \sim K_4$ , 输出为  $U_{PSS}$ , 其上、下限幅值分别为  $U_{PSSmax}$ 、 $U_{PSSmin}$ 。

分析 PSS3B 的模型结构,其输入电功率偏差量  $-\Delta P_e$  通过隔直环节、多个前馈通路及反馈回路,比例增益后,经过限幅环节输出。图 4 中反馈型传递函数难以直接使用相位补偿原理进行参数整定,因此,需要对反馈型传递函数模型进行变换。

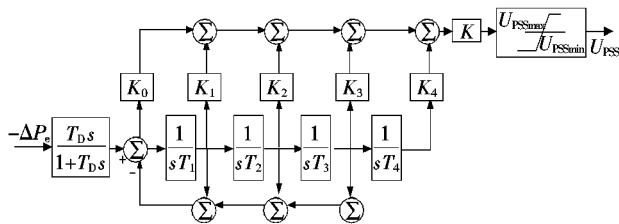


图 4 西门子 PSS3B 模型  
Figure 4 Siemens PSS3B model

## 2.2 PSS3B 相位参数整定

### 2.2.1 PSS3B 传递函数变换

首先忽略非线性限幅环节,其结果不影响参数整定,图 4 中模型传递函数为

$$H(s) = K \frac{sT_D}{1+sT_D} \cdot \frac{s^4 K_0 + s^3 \frac{K_1}{T_1} + s^2 \frac{K_2}{T_1 T_2} + s \frac{K_3}{T_1 T_2 T_3} + \frac{K_4}{T_1 T_2 T_3 T_4}}{s^4 + s^3 \frac{1}{T_1} + s^2 \frac{1}{T_1 T_2} + s \frac{1}{T_1 T_2 T_3} + \frac{1}{T_1 T_2 T_3 T_4}} \quad (6)$$

式(6)传递函数需要转化为串联结构以使用相位补偿原理。为简化计算,可假设  $H(s)$  转化为

$$H'(s) = K' \frac{sT_D}{1+sT_D} \left( \frac{1+sT'_1}{1+sT'_2} \right)^2 \left( \frac{1+sT'_3}{1+sT'_4} \right)^2 \quad (7)$$

式中  $T'_1 \sim T'_4$  为等效时间常数。

假设式(7)展开为

$$H'(s) = K' \frac{sT_D}{1+sT_D} \cdot \left( \frac{T'_1 T'_3}{T'_2 T'_4} \right)^2 \frac{s^4 + s^3 A_1 + s^2 A_2 + s A_3 + A_4}{s^4 + s^3 B_1 + s^2 B_2 + s B_3 + B_4} \quad (8)$$

使用待定系数法对应式(6)、(8)中系数。

若满足关系式:

$$\begin{cases} A_1 = \frac{2}{T'_1} + \frac{2}{T'_3}, & B_1 = \frac{2}{T'_2} + \frac{2}{T'_4} \\ A_2 = \frac{1}{T'^2_1} + \frac{1}{T'^2_3} + \frac{4}{T'_1 T'_3}, & B_2 = \frac{1}{T'^2_2} + \frac{1}{T'^2_4} + \frac{4}{T'_2 T'_4} \\ A_3 = \frac{2}{T'_1 T'_3} + \frac{2}{T'_3 T'^2_1}, & B_3 = \frac{2}{T'_2 T'_4} + \frac{2}{T'_4 T'^2_2} \\ A_4 = \frac{1}{T'_1 T'_3}, & B_4 = \frac{1}{T'^2_2 T'^2_4} \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} K' = K \left( \frac{T'_2 T'_4}{T'_1 T'_3} \right)^2, & K_0 = 1 \\ T_1 = \frac{1}{B_1}, & K_1 = \frac{A_1}{B_1} \\ T_2 = \frac{B_1}{B_2}, & K_2 = \frac{A_2}{B_2} \\ T_3 = \frac{B_2}{B_3}, & K_3 = \frac{A_3}{B_3} \\ T_4 = \frac{B_3}{B_4}, & K_4 = \frac{A_4}{B_4} \end{cases} \quad (10)$$

则式(6)~(8)等效。式(7)结构易于应用相位补偿原理进行相位环节参数整定。

### 2.2.2 曲线拟合整定相频参数

当基于式(5)采用有功功率作为输入时,PSS 环节传递函数  $H'$  应补偿相位为  $(-90^\circ - \theta_{\Delta U_i / \Delta U_{PSS}})$ 。

构造单机一无穷大系统,某一工况下系统的线性化 Philips-Heffron 模型(传递函数框图)<sup>[3]</sup>如图 5 所示,计算闭环传递函数的前馈通路和反馈回路,可得到整个闭环系统中各信号的相互作用关系。根据自动控制原理可得到系统的反馈回路为  $L_1 \sim L_6$ , 其中,虚线回路  $L_6$  为考虑 PSS 时将新增回路。从图 5 可知,PSS 对整个闭环系统的影响对应着  $L_6$  回路对整个系统闭环传递函数拓扑结构的影响。

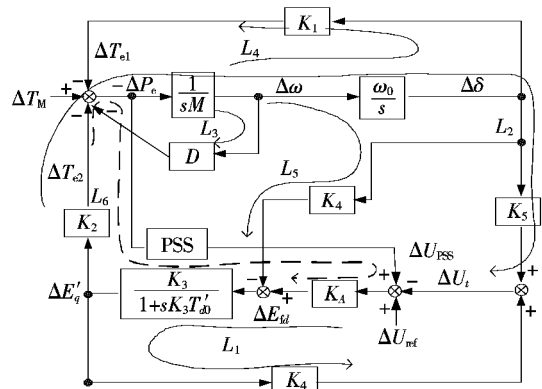


图 5 Philips-Heffron 模型

Figure 5 Philips-Heffron model

图 5 中的反馈回路为

$$\begin{cases} L_1 = K_A \frac{K_3}{1 + sT'_{d0}K_3} K_6 (-1) \\ L_2 = K_A \frac{K_3}{1 + sT'_{d0}K_3} K_2 (-1) \frac{1}{sM} \frac{\omega_0}{s} K_5 (-1) \\ L_3 = \frac{1}{sM} D (-1) \\ L_4 = \frac{1}{sM} \frac{\omega_0}{s} K_1 (-1) \\ L_5 = \frac{K_3}{1 + sT'_{d0}K_3} K_2 (-1) \frac{1}{sM} \frac{\omega_0}{s} K_4 (-1) \\ L_6 = PSS \frac{K_3}{1 + sT'_{d0}K_3} K_2 (-1) K_A \end{cases} \quad (11)$$

励磁系统无补偿相频特性可使用无  $L_6$  回路时的传递函数  $\Delta U_t / \Delta U_{ref}$  的相频特性替代。当无 PSS 时,  $\Delta U_{ref}$  至  $\Delta U_t$  的前向通路及系统特征方程为

$$\begin{cases} F_1 = K_A \frac{K_3}{1 + sT'_{d0}K_3} K_6 \\ F_2 = K_A \frac{K_3}{1 + sT'_{d0}K_3} K_2 (-1) \frac{1}{sM} \frac{\omega_0}{s} K_5 \\ \Delta' = 1 - L_1 - L_2 - L_3 - L_4 - L_5 + L_1L_3 + L_1L_4 \end{cases} \quad (12)$$

因此,  $\Delta U_t / \Delta U_{ref}$  的传递函数为

$$G_1 = \frac{F_1(1 - L_3 - L_4) + F_2}{\Delta'} \quad (13)$$

通过计算  $G_1$  在指定频段相频特性得到  $\theta_{\Delta U_t / \Delta U_{PSS}}$ 。

根据式(7),可求得其相频函数<sup>[8]</sup>为

$$\begin{aligned} Arg(H') = 90^\circ - \arctan(\omega T_D) + 2[\arctan(\omega T'_1) - \\ \arctan(\omega T'_2) + \arctan(\omega T'_3) - \arctan(\omega T'_4)] \end{aligned} \quad (14)$$

将式(14)作为应补偿相位的待定系数式,通过对计算得到的应补偿相位进行曲线拟合,即可完成相位参数整定。

通常参数拟合方法包括常规的最小二乘法、生物智能优化算法等。该文使用带边界约束的非线性最小二乘法,即信赖域反射算法(Trust Region Reflective)<sup>[9]</sup>。算法过程:以  $T_D, T'_1 \sim T'_4$  作为变量,计算在 0.1~2 Hz 频段内式(14)相位与应补偿实际相位的误差,根据误差修正变量值变化的步长,修正变量后进行下一步迭代,多次迭代后得到一组稳定的变量值,即为满足式(7)的  $T_D, T'_1 \sim T'_4$ 。

因此,西门子 PSS3B 相位参数的整定流程:首先,根据式(13)得到励磁系统无补偿滞后相位  $\theta_{\Delta U_t / \Delta U_{PSS}}$ ,依据式(5)、(14)对式(7)的相位环节参数  $T_D, T'_1 \sim T'_4$  进行整定,然后,通过式(9)、(10)得到式(6)相位整定部分参数。

### 2.3 PSS3B 模型增益参数整定

在开环状态下(断开 PSS 环节)进行相位补偿环节参数的整定,当加入 PSS 后,需要在系统闭环情况下对增益参数进行整定。系统闭环下的特征方程  $\Delta$  较系统开环下的特征方程  $\Delta'$  新增了  $L_6$  回路,系统闭环下的特征方程为

$$\begin{aligned} \Delta = 1 - L_1 - L_2 - L_3 - L_4 - L_5 - \\ L_6 + L_1L_3 + L_1L_4 \end{aligned} \quad (15)$$

以  $K'$  为变量时,计算系统闭环下的特征方程  $\Delta = 0$  的主导特征根,可得阻尼比及振荡频率。标准<sup>[2]</sup>中要求:有 PSS 的振荡频率为无 PSS 的振荡频率的 80%~120%。调整  $K'$  使主导特征根对应的阻尼比及振荡频率满足标准要求,再根据已整定的  $T'_1 \sim T'_4$ ,即可按式(10)转化得到相应的  $K$ 。

## 3 算例分析

### 3.1 无补偿相频特性计算

以单机一无穷大系统为例,某一工况下的参数:有功功率  $P_e = 0.85$ 、无功功率  $Q_e = 0.1$ 、机端电压  $U_{t0} = 1$ 、直轴同步电抗  $X_d = 2.383$ 、直轴暂态电抗  $X'_d = 0.3187$ 、交轴同步电抗  $X_q = 2.319$ 、系统联系电抗  $X_l = 0.25$ 、阻尼系数  $D = 0$ 、惯性时间常数  $M = 8.2$  s、直轴定子开路转子绕组时间常数  $T'_{d0} = 9.1$  s,调节器动态增益  $K_A = 90$ (除时间常数单位为秒外,其余量均为标么值)。根据以上参数可计算得到 Philips-Heffron 模型<sup>[3]</sup>系数  $K_1 \sim K_6$ ,如表 1 所示。

由表 1 中  $K_5$  系数小于零可知,在此工况下中励磁系统提供了负阻尼转矩,削弱了整个系统的阻尼转矩,不利于系统稳定。由表 1 数据及式(13)进行无补偿相频特性计算,对本征点附近大幅变化的

相位进行“人工平滑”<sup>[10]</sup>,得到无补偿相频特性,如表 2 所示。

表 1 某一发电机出力下的 K 系数

Table 1 K coefficients at one operation point of the generator

参数	数值	参数	数值
$K_1$	1.512 798 584	$K_4$	3.410 002 767
$K_2$	1.651 893 023	$K_5$	-0.021 404 683
$K_3$	0.215 989 366	$K_6$	0.232 977 700

表 2 无补偿相频特性

Table 2 The phase-frequency characteristic of the uncompensated excitation system

$f/\text{Hz}$	$\theta_{\Delta U_t/\Delta U_{\text{PSS}}}/(^{\circ})$	$f/\text{Hz}$	$\theta_{\Delta U_t/\Delta U_{\text{PSS}}}/(^{\circ})$
0.1	-13	1.1	-68
0.2	-24	1.2	-70
0.3	-34	1.3	-71
0.4	-42	1.4	-72
0.5	-48	1.5	-73
0.6	-53	1.6	-74
0.7	-57	1.7	-75
0.8	-61	1.8	-76
0.9	-64	1.9	-77
1.0	-66	2.0	-77

### 3.2 PSS 相位环节参数计算验证

根据式(14)、表 2 可先求得式(7)中  $T_D$ 、 $T'_1 \sim T'_4$  参数,利用式(9)、(10)可得全部相位参数,如表 3 所示。3 种相频特性曲线如图 6 所示,显示无补偿相频特性  $\theta_{\Delta U_t/\Delta U_{\text{PSS}}}$  与整定的 PSS 相频特性  $\theta_{\text{PSS}}$  之和位于  $-90^{\circ}$  附近,表明整定关系满足式(5)。

表 3 相位整定参数

Table 3 Phase set parameters

参数	单位	数值	参数	单位	数值
$T'_1$	s	1.245 900 00	$T_4$	s	16.852 000 00
$T'_2$	s	7.804 300 00	$K_0$	—	1.000 000 00
$T'_3$	s	0.409 500 00	$K_1$	—	1.868 354 26
$T'_4$	s	0.621 700 00	$K_2$	—	4.214 520 36
$T_1$	s	0.287 914 39	$K_3$	—	17.767 935 00
$T_2$	s	1.013 177 44	$K_4$	—	90.438 939 60
$T_3$	s	4.788 828 78	$T_D$	s	5.000 000 00

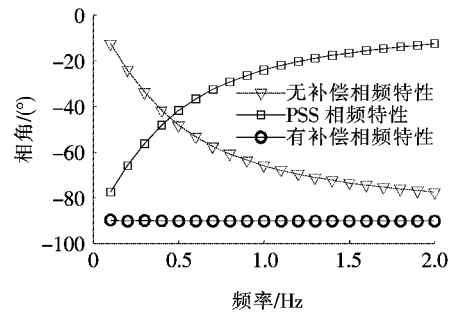


图 6 3 种相频特性曲线

Figure 6 Three phase-frequency characteristic curves

### 3.3 PSS 增益参数计算验证

加入 PSS 后,求以  $K'$  为变量的系统特征方程  $\Delta=0$  的根。改变  $K'$ ,方程主导特征根如表 4 所示,可以看出:

当  $K'=0$  时,主导特征根为  $-0.079 \pm j7.585$ ,振荡频率约为 1.21 Hz,虽然此时特征根实部为负,但绝对值很小,接近弱阻尼状态。

当  $K'=52$  时,主导特征根为  $-4.825 \pm j6.042$ ,阻尼比为 0.624,阻尼比符合标准要求,振荡频率约为 0.96 Hz,为无 PSS 时振荡频率的 0.8,振荡频率处于标准允许范围的边界。

当  $K'=8$  时,电气振荡特征根为  $-0.807 \pm j7.557$ ,阻尼比约为 0.100,处于标准允许范围边界,振荡频率 1.20 Hz,振荡频率符合标准要求。

因此,当  $K'$  处于  $[8,52]$  时,系统阻尼比和主导特征根频率均符合标准<sup>[2]</sup>要求。现可取  $K'=25$ ,此时主导特征根为  $-2.357 \pm j7.267$ ,阻尼比为 0.308,振荡频率为 1.16 Hz,均较好地满足了标准要求。取  $K'=25$ ,将  $K'$  转化为  $K$  得 0.276,至此 PSS3B 模型所有参数均整定完毕。

表 4 改变  $K'$  后主导特征根的变化

Table 4 The change of dominant characteristic root after the alteration of  $K'$

$K'$	阻尼比	频率/Hz	实部	虚部
0	0.010	1.21	-0.079	$\pm 7.585$
8	0.100	1.20	-0.807	$\pm 7.557$
25	0.308	1.16	-2.357	$\pm 7.267$
52	0.624	0.96	-4.825	$\pm 6.042$

### 3.4 阶跃响应校核

阶跃响应可直观地检验各参数整定的效果。对应于现场实际情况,可考虑在图 5 中参考电压叠加点处施加一标么值为 2% 的参考电压阶跃,其时域

响应可由  $\Delta U_{\text{ref}}$  至  $-\Delta P_e$  的传递函数与阶跃传递函数乘积的拉普拉斯逆变换给出。设信号  $\Delta U_{\text{ref}}$  至  $-\Delta P_e$  的前向通路为  $F_3$ , 总传递函数在无 PSS 时 2% 的参考电压阶跃响应为  $G_2$ , 有 PSS 时 2% 的参考电压阶跃响应为  $G_3$ , 则

$$\begin{cases} F_3 = K_A \frac{K_3}{1 + sT_{d0}'K_3} K_2 (-1) \\ G_2 = \frac{0.02}{s} \cdot \frac{F_3}{\Delta'} \\ G_3 = \frac{0.02}{s} \cdot \frac{F_3}{\Delta} \end{cases} \quad (16)$$

求  $G_2$ 、 $G_3$  阶跃响应的时域解, 则有、无 PSS 电压阶跃波形如图 7 所示, 可以看出, 无 PSS 时系统属于弱阻尼模式, 需多次衰减才能平息振荡, 加入 PSS 后, 仅一次振荡即平息。表明 PSS 确实起到了增加正阻尼、抑制低频振荡的作用。

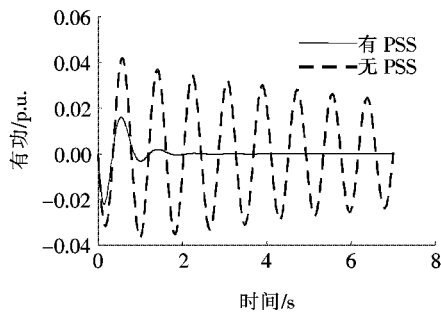


图 7 有、无 PSS 有功功率阶跃响应曲线

Figure 7 Active power step response curves with or without PSS

## 4 结语

该文基于单机一无穷大系统的 Philips-Heffron 理论, 研究了西门子公司 PSS3B 型电力系统稳定器参数的一种整定方法, 研究表明:

1) 西门子公司 PSS3B 反馈型传递函数结构可等效转换为串联型传递函数结构, 串联型传递函数结构易于利用相位补偿原理进行参数整定;

2) 利用相位补偿原理及曲线拟合法可对 PSS3B 相位环节参数整定;

3) 结合标准中对阻尼比及加入 PSS 后阶跃振荡频率的要求, 利用主导特征根与阻尼比及振荡频率的关系可对 PSS3B 增益参数整定;

4) 阶跃仿真表明, 该文所提出的参数整定法对单机一无穷大系统中的有功功率低频振荡有较好的抑制作用。该参数整定法可应用于现场实践。

## 参考文献:

- [1] DL/T 1167—2012. 同步发电机励磁系统建模导则[S].
- [2] DL/T 1231—2013. 电力系统稳定器整定试验导则[S].
- [3] 刘取. 电力系统稳定性及发电机励磁控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [4] 方思立, 苏为民. 电力系统稳定器配置、构成、参数计算及投运试验[J]. 中国电力, 2004, 37(10): 8-13.  
FANG Sili, SU Weimin. Disposition, configuration, parameter calculation and commissioning of PSS[J]. Electric Power, 2004, 37(10): 8-13.
- [5] 田立军, 郭雷, 陈珩.  $H_\infty$  电力系统稳定器的设计[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(3): 59-62.  
TIAN Lijun, GUO Lei, CHEN Heng. Design of  $H_\infty$  power system stabilizer[J]. Proceeding of the CSEE, 1999, 19(3): 59-62.
- [6] 蔡超豪, 王奇. 基于  $H_\infty$  控制理论的电力系统稳定器[J]. 电网技术, 2000, 24(10): 11-14.  
CAI Chaohao, WANG Qi. A power system stabilizer based on  $H_\infty$  control theory[J]. Power System Technology, 2000, 24(10): 11-14.
- [7] 杨琳, 赵书强.  $H_\infty$  电力系统稳定器的设计及其降阶[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(3): 36-39.  
YANG Lin, ZHAO Shuqiang. Design of  $H_\infty$  PSS and its order reducing[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(3): 36-39.
- [8] 许其品, 邵宜祥, 邓小君, 等. 一种 PSS 相位补偿环节时间常数计算方法[P]. 中国专利: 102801175A, 2012-11-28.
- [9] Coleman T F, Li Y. An interior trust region approach for nonlinear minimization subject to bounds[J]. SIAM Journal on Optimization, 1996, 6(2): 418-445.
- [10] 霍承祥, 刘增煌, 朱方. 运用电力系统稳定器对励磁系统进行相位补偿的理论与实践[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(12): 2989-2997.  
HUO Chengxiang, LIU Zenghuang, ZHU Fang. Theory and field practice of phase compensation on generator excitation system by utilizing power system stabilizer[J]. Proceeding of the CSEE, 2015, 35(12): 2989-2997.