

基于 MATLAB 仿真的 PSS 参数配置方法*

朱应峰, 张维超

(国网山东省电力公司电力科学研究院, 山东 济南 250003)

摘要: 电力系统稳定器(PSS)是增加阻尼抑制低频振荡的重要措施。电网运行准则(GB/T 31464—2015)明确规定 100 MW 及以上的火电、核电及燃气机组的励磁系统应具备 PSS 功能。PSS 试验中需要配置超前滞后环节的时间常数,针对配置参数时存在效率低下及不能最优化的问题,提出了基于 MATLAB 最优化函数进行参数自动配置的方法,通过设置各个频率点的相位期望值和构建相位方差和的目标函数,实现了在各频率点特定相位要求下的 PSS 参数自动计算。给出了该方法的详细步骤,最后在某 1 000 MW 的火电机组 PSS 试验中进行了验证。

关键词: 电力系统稳定器; 参数自动配置; 最优化; MATLAB 仿真

中图分类号: TM 712 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)02-0095-05

doi: 10.12177/emca.2019.154

Configuration Method for PSS Parameters Based on MATLAB Simulation*

ZHU Yingfeng, ZHANG Weichao

(Research Institute of State Grid Shandong Electric Power Company, Jinan 250003, China)

Abstract: Power system stabilizer (PSS) is an important equipment to increase damping and suppress low frequency oscillations of power system. According to the grid operation code (GB/T 31464—2015), the excitation system of thermal-, nuclear-and gas-power generating units (100 MW and above) must have PSS ability. The time constant of lead-lag compensator needs to be configured during PSS test. At present, configuration methods for parameters are inefficient and need to be optimized. In order to solve this problem, automatic configuration method for PSS parameters based on MATLAB simulation is proposed. By setting the expected phase value at each frequency and constructing the objective function with the sum of squares of phase differences, the automatic calculation of PSS parameters under specific phase requirements at each frequency can be realized. The steps of this method are given in detail, and the method is verified on an 1 000 MW thermal-power generating unit during the PSS test.

Key words: power system stabilizer (PSS); automatic parameter configuration; optimization; MATLAB simulation

0 引言

低频振荡是影响电力系统稳定运行的重要问题之一。对于电力系统低频振荡发生的原因主要有负阻尼机理^[1]、强迫振荡机理^[2]、非线性机理^[3]以及强共振机理^[4],其中负阻尼机理是系统阻尼转矩不足,系统受到小的干扰后会产生振荡,是研究

低频振荡的经典理论。电力系统负阻尼产生的重要原因^[5]是励磁调节器、励磁系统及发电机励磁绕组的相位滞后特性,使电压调节器产生了相位滞后于功角并与转速变化反相位的负阻尼转矩。为此,通常在励磁调节器中叠加电力系统稳定器(PSS)的控制。PSS 是一种借助自动电压调节器调节同步发电机的励磁输出,以达到阻尼系统功率等振荡

收稿日期: 2019-11-15; 收到修改稿日期: 2019-12-26

* 基金项目: 山东省电力公司科技项目(2018A-004)

作者简介: 朱应峰(1992—),男,硕士,工程师,研究方向为发电机励磁控制。

张维超(1968—),男,硕士,高级工程师,研究方向为发电机励磁控制。

目的的附加控制装置^[6]。

美国电气和电子工程师协会对 PSS 类型进行了较为权威的分类: PSS1A (单输入)、PSS2B (双输入)、PSS3B (双输入)、PSS4B (多频段) 4 种模型。PSS1A 模型会存在反调现象; PSS3B 模型与 PSS2B 模型类似, 但是没有重新组合构成过剩功率, 使用较少; PSS4B 模型针对各个信号的各个频段分别进行抑制, 参数配置复杂, 目前基本受限于理论的研究^[7]。国内大部分机组正在使用的是 PSS2B 模型^[8]。

PSS2B 模型有两路输入转速和电功率信号, 分别对两路输入信号进行隔直滤波等处理最终合成加速功率, 经过三阶超前滞后补偿输出抑制功率振荡增加系统阻尼的 PSS 信号。只有正确配置 PSS2B 模型的超前滞后环节时间常数, PSS 才能起到应有的作用效果。目前试验人员在试验时, 通常利用 EXCEL 表格结合现场扫频获得的无补偿励磁系统相位滞后角度不断调整时间常数以达到期望的补偿效果, 耗时长且不能达到最佳效

果。为此, 本文提出了基于 MATLAB 的自动计算方法, 并在试验中对所提的计算方法进行了验证, 试验效果良好。

1 PSS2B 模型简介

1.1 PSS2B 模型传递函数

PSS2B 模型传递函数如图 1 所示。图 1 中, ω 是转速信号, P_e 是电功率信号, $T_{\omega 1} \sim T_{\omega 4}$ 是隔直环节时间常数, $T_1 \sim T_5$ 、 T_{10} 是 PSS 超前滞后环节的时间常数(根据现场需要可以使用两阶或三阶补偿环节), T_6 、 T_7 是惯性环节时间常数, T_8 、 T_9 是扭振滤波环节的时间常数, $T_{11} \sim T_{14}$ 是自动电压调节器超前滞后时间常数, M 、 N 是扭振滤波环节的阶数, P_M 是机械功率, P_a 是加速功率, K_{s1} 是 PSS 增益, K_{s2} 是惯性环节增益, K_{s3} 是功率合成放大倍数, K 是自动电压调节器放大倍数, K_A 是励磁系统功率放大倍数, K_C 是发电机放大倍数, T_A 是功率放大环节时间常数, T_d 是发电机时间常数, T_i 是机组轴系的惯性时间常数, T_r 是机端电压采样时间常数。

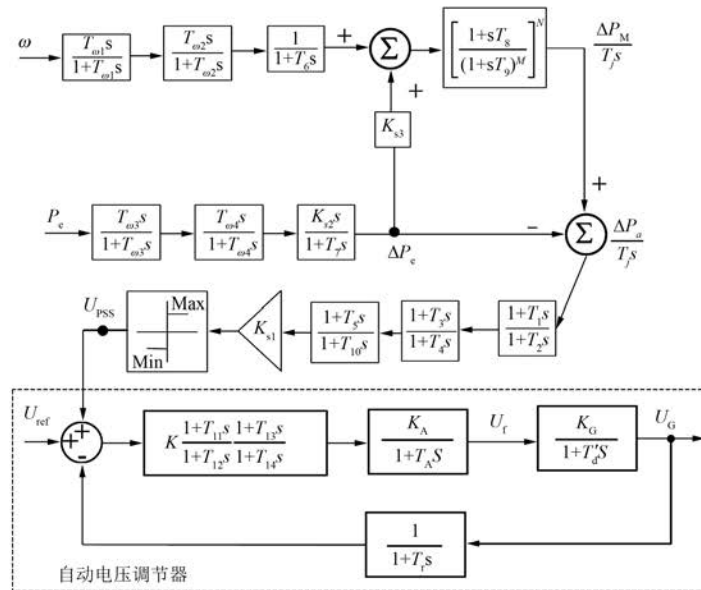


图 1 PSS2B 传递函数

采用电功率偏差 ΔP_e 和转速偏差 $\Delta \omega$ 两路信号, 合成过剩功率信号 ΔP_a , 后经过三阶超前滞后环节补偿, 输出 PSS 信号 U_{pss} , 叠加到自动电压控制环路的电压参考值处。PSS2B 模型物理概念清晰, 采用三阶超前滞后环节, 具有强大的相位校正能力^[9] 和较强的实用性。

1.2 PSS2B 模型的相位补偿原理

PSS2B 模型中各物理量的相位关系如图 2 所示。在无补偿的自动电压调节器控制下, 电磁转矩 ΔT_{e2} 滞后于有功功率 $\Delta \delta$ 角度 φ'_{ex} , 该转矩在 $\Delta \omega$ 轴方向的分量为负, 即提供负阻尼。PSS 的作用在于通过采集输入信号经过处理计算输出

ΔU_{PSS} 信号叠加到自动电压控制器的参考电压输入点。该 ΔU_{PSS} 信号经过励磁系统自身的滞后产生的电磁转矩 ΔT_{PSS} 在 $\Delta\omega$ 轴方向的分量为正, 以提供正阻尼。

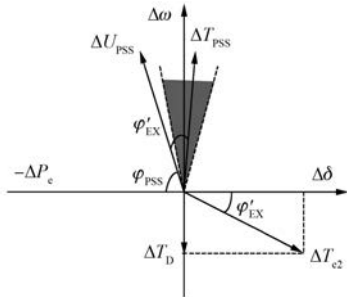


图2 PSS2B模型的相位示意图

从图2可以看到, ΔT_{PSS} 滞后于 $-\Delta P_e$ 方向的角度 φ_ω 包含 PSS 自身的滞后角度 φ_{PSS} 和励磁系统无补偿固有的滞后角度 φ'_{EX} [10]。PSS 整定试验时, φ'_{EX} 为通过现场扫频获得, 通过配置 PSS 超前滞后环节的时间常数使 φ_ω 符合要求 [11]。

2 PSS2B 模型的参数配置方法

图1的 PSS2B 传递函数中, ω 输入支路是为了抑制 PSS 的反调作用, 在有功振荡时 ΔP_m 为零, 且考虑到 PSS 参数配置时以 $-P_e$ 轴为基准, 故 PSS 自身滞后角度 φ_{PSS} 可表示为

$$\varphi_{PSS} = \varphi\left(\frac{T_{\omega 3}s}{1+T_{\omega 3}s}\right) + \varphi\left(\frac{T_{\omega 4}s}{1+T_{\omega 4}s}\right) + \varphi\left(\frac{K_{s2}s}{1+T_7s}\right) + \varphi\left(\frac{1+T_1s}{1+T_2s}\right) + \varphi\left(\frac{1+T_3s}{1+T_4s}\right) + \varphi\left(\frac{1+T_5s}{1+T_6s}\right) \quad (1)$$

其中: $\varphi\left(\frac{K_{s2}s}{1+T_7s}\right) = 90^\circ - \arctan T_7s; \varphi\left(\frac{as}{1+as}\right) =$

$$90^\circ - \arctan as; \varphi\left(\frac{1+cs}{1+ds}\right) = \arctan cs - \arctan ds;$$

$a = T_{\omega 3}, T_{\omega 4}; c = T_1, T_3, T_5; d = T_2, T_4, T_6。$

$T_{\omega 1} \sim T_{\omega 4}, T_7$ 按经验默认取值 6, K_{s2} 的取值由轴系的转动惯量和 T_7 值计算得出。DLT 1231—2018《电力系统稳定器整定试验导则》对补偿后相频特性值 φ_ω 作了明确规定, 试验人员需要配置超前滞后环节时间常数 $T_1 \sim T_6$ 的值使 φ_ω 满足要求。因此, 如何快速有效地配置该时间常数是需研究解决的问题。

2.1 约束条件下的多变量优化函数

MATLAB 的 fmincon 函数能够解决有约束的多变量最优化求解问题。fmincon 函数结构形式为 fmincon(FUN, X0, A, B, Aeq, Beq, LB, UB), 其中 FUN 是目标函数, X0 是待求解变量的初始值, A、B 是变量需满足的不等式约束条件 ($AX < B$), Aeq、Beq 是变量需满足的等式约束条件 ($AeqX = Beq$), LB、UB 是变量需满足的边界条件 ($LB < X < UB$)。

目标函数的形式直接影响最优化求解结果。本文采用各个频率点的相位期望值与实际值差的平方和为最优化函数。首先设置 0.1~2.0 Hz 之间 20 个离散的频率点处 ΔT_{PSS} 滞后于 $-\Delta P_e$ 角度的期望值 $\varphi_{\omega 0}$, 目标函数 myfun() 定义为各频率点处 φ_ω 实际值与期望值 $\varphi_{\omega 0}$ 差的平方和:

$$\text{myfun} = \sum_{f=0.1}^{2.0} [\varphi'_{EX}(2\pi f) + \varphi_{PSS}(2\pi f) - \varphi_{\omega 0}(2\pi f)]^2 \quad (2)$$

2.2 PSS2B 超前滞后环节时间常数配置方法

PSS2B 超前滞后补偿环节时间常数参数配置方法如图3所示。第一步设置各频率点处的期望角度 $\varphi_{\omega 0}$; 第二步由现场扫频得到的励磁系统无补偿相频值 φ'_{EX} 根据式(2)构建目标函数 myfun(); 第三步根据 2.1 节的方法利用 MATLAB 的 fmincon 函数求取时间常数的最优化值; 第四步代入上一步求取的时间常数计算各个频率点的实际 φ_ω 值; 第五步判断实际 φ_ω 值是否符合要求, 若符合要求则将该时间常数值作为 PSS 整定值, 否则返回第二步修改不符合要求的频率点处的角度期望值 $\varphi_{\omega 0}$ 。

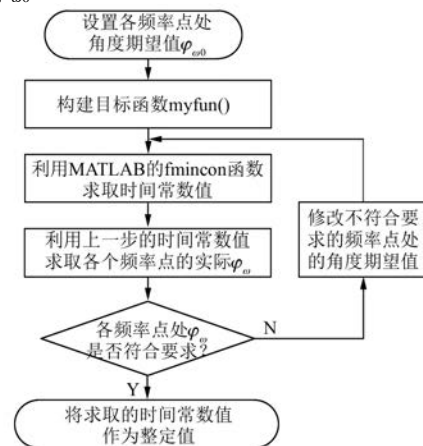


图3 PSS2B超前滞后环节时间常数配置方法

3 试验验证

为了验证所提 PSS 超前滞后环节时间常数配置方法的实用性,在某 1 000 MW 机组的 PSS 试验中进行了验证。该机组的主要参数如表 1 所示。励磁系统的无补偿相频特性实测结果如表 2 所示。

表 1 某 1 000 MW 机组参数表

参数名称	参数值
额定容量 S_N/MVA	1 111
功率因数 $\cos\varphi$	0.9
机端电压 U_G/kV	27
额定转速 $n/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	3 000
发电机飞轮转矩 $GD^2/(\text{t}\cdot\text{m}^2)$	68
汽轮机转动惯量 $GD^2/(\text{t}\cdot\text{m}^2)$	373.8

表 2 某 1 000 MW 机组 PSS 补偿后相频特性

频率/Hz	无补偿角度 $\varphi'_{E_s}/(^{\circ})$	PSS 角度 $\varphi_{\text{PSS}}/(^{\circ})$	补偿后角度 $\varphi_{\omega}/(^{\circ})$
0.1	26.7	46.7	73.4
0.2	50.4	48.5	98.9
0.3	63.2	41.9	105.1
0.4	64.7	34.2	98.9
0.5	70.3	26.8	97.1
0.6	81.2	20.1	101.3
0.7	82.1	14.1	96.2
0.8	86.8	8.8	95.6
0.9	85.5	4.1	89.6
1.0	93.2	0	93.2
1.1	113.5	-3.8	109.7
1.2	114.6	-7.1	107.5
1.3	115.7	-10.0	105.7
1.4	116.8	-12.7	104.1
1.5	118.3	-15.1	103.2
1.6	108.8	-17.2	91.6
1.7	115.6	-19.1	96.5
1.8	117.4	-20.9	96.5
1.9	121.4	-22.4	99.0
2.0	115.2	-23.8	91.4

文献[11]规定补偿后 φ_{ω} 在 0.1~0.2 Hz 处不

低于 60° ,故期望角度设置为 80° ;规定在 0.3~2.0 Hz 范围内 φ_{ω} 处于 $70^{\circ}\sim 135^{\circ}$ 范围内,故 0.3~2.0 Hz 各个频率点 φ_{ω} 期望值均设为 100° 。根据第 2 节方法,计算得到 $T_1=0.10, T_2=0.01, T_3=0.30, T_4=0.02$ (选用两阶超前滞后环节进行补偿),计算补偿后的实际 φ_{ω} 值。振荡频率约为 1.2 Hz,经验证各个频率点的相位滞后角度均满足要求,可以作为 PSS 超前滞后环节的时间常数定值。

PSS 的其他参数取值如下: $T_{\omega_1}=T_{\omega_2}=T_{\omega_3}=T_7=6, T_{\omega_4}=T_5=T_6=0, T_8=0.5, T_9=0.1, M=5, N=1, K_{s3}=1$,均为经验默认值。根据文献[5, 12], $K_{s2}=\frac{1\ 000\times T_7 S_N}{2.74\times GD^2 n^2}$,结合表 1 计算可得 $K_{s2}=0.61$ 。

图 4 所示为 $K_{s1}=32$ 投退 PSS 时转子电压现场录波图。从图 4 可以看出,转子电压出现一定发散,故 K_{s1} 的临界增益取值 32,通常将临界增益的 $1/3\sim 1/5$ 作 K_{s1} 值^[11],故 $K_{s1}=8$ 。

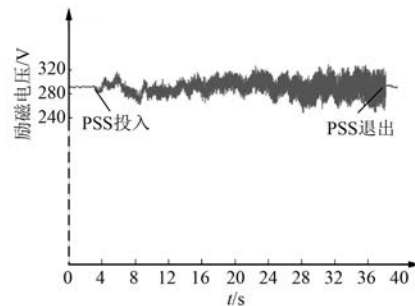


图 4 $K_{s1}=32$ 时励磁电压录波图

在机组相同工况下,本文对比了 PSS 退出与投入 2 种情况下相同机端电压变化引起的有功功率振荡情况,如图 5 和图 6 所示。

从图 5 和图 6 可以看出,在机端电压变化量相同时,PSS 投入后由机端电压变化引起的有功功率振荡的幅度和次数均大幅减小,说明本文提

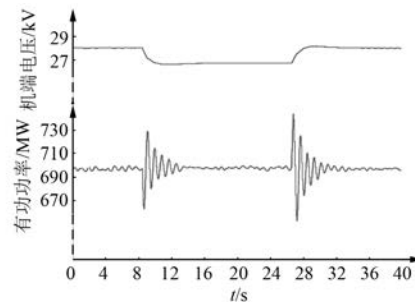


图 5 PSS 退出时机端电压阶跃试验

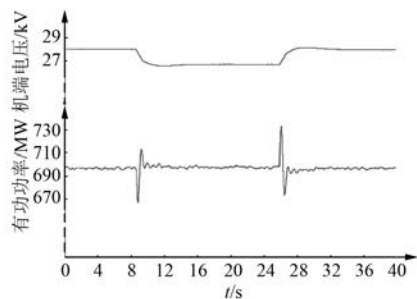


图6 PSS投入时机端电压阶跃试验

出的 PSS 超前滞后环节时间常数配置方法是有效的。

4 结 语

针对当前 PSS 试验中配置超前滞后环节时间常数存在效率低且不能最优化的问题,本文提出了基于 MATLAB 的参数配置方法,主要创新性体现在:(1)利用 MATLAB 的 `fmincon()` 函数自动配置 PSS 超前滞后环节时间常数;(2)能够根据现场需要设置或修改各个频率点的相位值。本文详细给出了根据扫频获得励磁系统无补偿相频特性进行参数最优化配置的具体步骤,最后在 1 000 MW 的机组 PSS 试验中进行了验证。试验结果表明所提参数配置方法能够在 PSS 试验中快速有效地对超前滞后环节的时间常数进行配置,可以作为现场试验人员的 PSS 参数配置辅助计算工具。

【参 考 文 献】

[1] 余贻鑫,李鹏.大区电网弱互联对互联系统阻尼和

动态稳定性的影响[J].中国电机工程学报,2005, 25(11): 6.

[2] 刘辉,杨寅平,田云峰,等.电力系统强迫功率振荡实例及机理分析[J].电力系统自动化,2012, 36(10): 113.

[3] 贾宏杰,余贻鑫,王成山.考虑励磁顶值与 PSS 的混沌的分岔现象[J].电力系统自动化,2001, 25(1): 11.

[4] DOBSON I, ZHANG J, GREENE S, et al. Is strong modal resonance a precursor to power system oscillations? [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, 2001, 48(3): 340.

[5] 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.

[6] 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.

[7] 王家驹.电力系统稳定器及其应用研究[D].成都:西南交通大学,2015.

[8] 袁亚洲,许其品,徐蓉,等.基于 RTDS 的多频段电力系统稳定器效果验证[J].电力系统自动化, 2013, 37(18): 126.

[9] 吴跨宇,卢岑岑,吴龙,等.一种新型双信号电力系统稳定器及其仿真研究[J].电网技术, 2016, 40(5): 1462.

[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.

[11] 国家能源局.电力系统稳定器整定试验导则:DL/T 1231—2018[S].北京:中国电力出版社,2018.

[12] 房大中,贾宏杰.电力系统分析[M].北京:科学出版社,2010.

声 明

本刊已许可万方数据、重庆维普、中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、北京世纪超星信息技术发展有限责任公司在其网站及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网

络传播本刊全文。该社著作权使用费与本刊相关费用抵消。如作者不同意文章被收录,请在来稿时向本刊声明,本刊将做适当处理。

《电机与控制应用》编辑部