

基于混合粒子群算法的 PSS4B 参数优化研究^{*}

郭思源[†], 刘海峰, 李理, 李辉, 朱维钧

(国网湖南省电力有限公司电力科学研究院 电网技术中心, 湖南长沙 410007)

摘要:针对电力系统稳定器 PSS4B 的结构特点, 将一种混合粒子群优化算法应用于 PSS4B 的参数整定. 通过 RTDS 的模拟量输入输出板卡与 NES6100 型励磁调节器构成半实物仿真系统, 在 RTDS 实时数字仿真平台上建立了单机无穷大模型. 在实测发电机励磁系统无补偿相频特性基础上, 经参数优化整定后依次进行了 PSS4B 临界增益试验、负载阶跃响应试验、短路扰动试验和反调验证试验, 试验结果表明经优化的 PSS4B 在不同频段上均能够较好地抑制功率振荡, 同时具有优良的抑制反调效果.

关键词:电力系统稳定器; PSS4B; 参数优化; RTDS

中图分类号:TM732

文献标志码:A

Research on Parameter Optimization of PSS4B Based on Hybrid Particle Swarm Algorithm

GUO Siyuan[†], LIU Haifeng, LI Li, LI Hui, ZHU Weijun

(Power System Technology Center, State Grid Hunan Electric Power Company Limited Research Institute, Changsha 410007, China)

Abstract: According to the structural features of power system stabilizer PSS4B, a hybrid PSO algorithm is applied to PSS4B parameter optimization in this paper. By connecting RTDS analog input/output interface card with NES6100 excitation regulator, the semi-physical simulation system is constituted, and the single machine infinite model is established on RTDS real-time digital simulation platform. Based on testing the phase frequency characteristic without compensation of generator excitation system and after parameter optimization, PSS4B critical gain experiment, step response test under load, short circuit disturbance test and inverse-regulation effect test are carried out in turn. The test results show that the optimized PSS4B can suppress power oscillation well in the different frequency bands, and have good inverse-regulation suppression effect.

Key words: power system stabilizer; PSS4B; parameters optimization; RTDS

随着我国交直流特高压工程的不断投运, 互联电网日趋复杂的系统结构和运行方式, 增加了电网的安全稳定风险^[1]. 文献[2]指出, 在水电机组比例较高的孤网和直流孤岛送出系统中, 可能出现振荡频率低于 0.1 Hz 的超低频振荡模式. 电力系统稳定

器(PSS)作为抑制低频振荡应用最为广泛的技术手段, 在当前电网形势下 PSS 覆盖频段有必要扩展至低频段.

由于 PSS2B 型电力系统稳定器不能较好地兼顾高频段和低频段的低频振荡抑制效果, 一种多频

^{*} 收稿日期: 2017-07-07

基金项目: 国网湖南省电力有限公司科技项目(XDKY-2015-015), Natural Science Foundation of State Grid Hunan Electric Power Company Limited (XDKY-2015-015)

作者简介: 郭思源(1986-), 男, 河南平顶山人, 国网湖南省电力有限公司电力科学研究院高级工程师, 工学博士

[†] 通讯联系人, E-mail: siyuanguo2001@163.com

段电力系统稳定器 PSS4B 引发了广泛关注^[3-13]。文献[7-9]分别在 Matlab/Simulink 仿真平台上建立了单机无穷大模型和多机模型,通过设置典型故障和扰动,来对比在无 PSS、加装 PSS1A/PSS2B 和 PSS4B 三种工况下抑制低频振荡的效果,其中 PSS4B 采用 IEEE 421.5-2005 标准^[6]中的典型参数。文献[10]指出 PSS4B 三个频段是相互耦合的,当不整定三个频段的超前一滞后相位补偿环节时间常数时,IEEE 421.5-2005 标准中的 PSS4B 典型参数在低频振荡段 0.1~2.0 Hz 范围内提供的相位超前角度有限,不具有普遍适应性。文献[11]提出一种相位和幅值协调整定的方法进行 PSS4B 参数整定和优化,但该方法下低频段的相位补偿效果仍有待加强;文献[12]针对三机励磁系统滞后特性较大的特点,以 IEEE 421.5-2005 标准提供的 PSS4B 典型参数为例,提出一种仅对高频段两阶超前一滞后相位补偿环节进行参数整定的新方法,但该方法较为依赖工程人员的经验。随着智能优化算法的发展,一些学者基于粒子群优化算法^[13-14]、遗传算法(GA)^[15]等开展 PSS 参数优化工作,取得了较好的

补偿效果。文献[16]则将 PSS4B 待优化参数划分为两类,基于粒子群优化(PSO)算法提出一种通过两次相位补偿进行各频段参数逐步优化整定的方法,但该方法计算量大,过程较为复杂。

本文将一种混合粒子群优化(HPSO)算法^[17]应用于 PSS4B 参数优化过程中,在实时数字仿真系统 RTDS 平台上^[18-19]与 NES6100 型励磁调节器构成数字-物理控制闭环。经 HPSO 算法一次性优化 PSS4B 所有待整定参数,并开展相关验证试验,试验结果表明经优化的 PSS4B 在整个低频振荡频率段 0.1~2.0 Hz 范围内均能够较好地发挥作用。

1 PSS4B 数学模型

PSS4B 是在 PSS2B 基础上改进而提出的新型电力系统稳定器,其主要特点是将输入信号处理后分为低、中、高三独立的输入通道,即多频段结构。PSS4B 以转速偏差 $\Delta\omega$ 和电功率偏差 ΔP_e 作为输入信号,如图 1 所示。

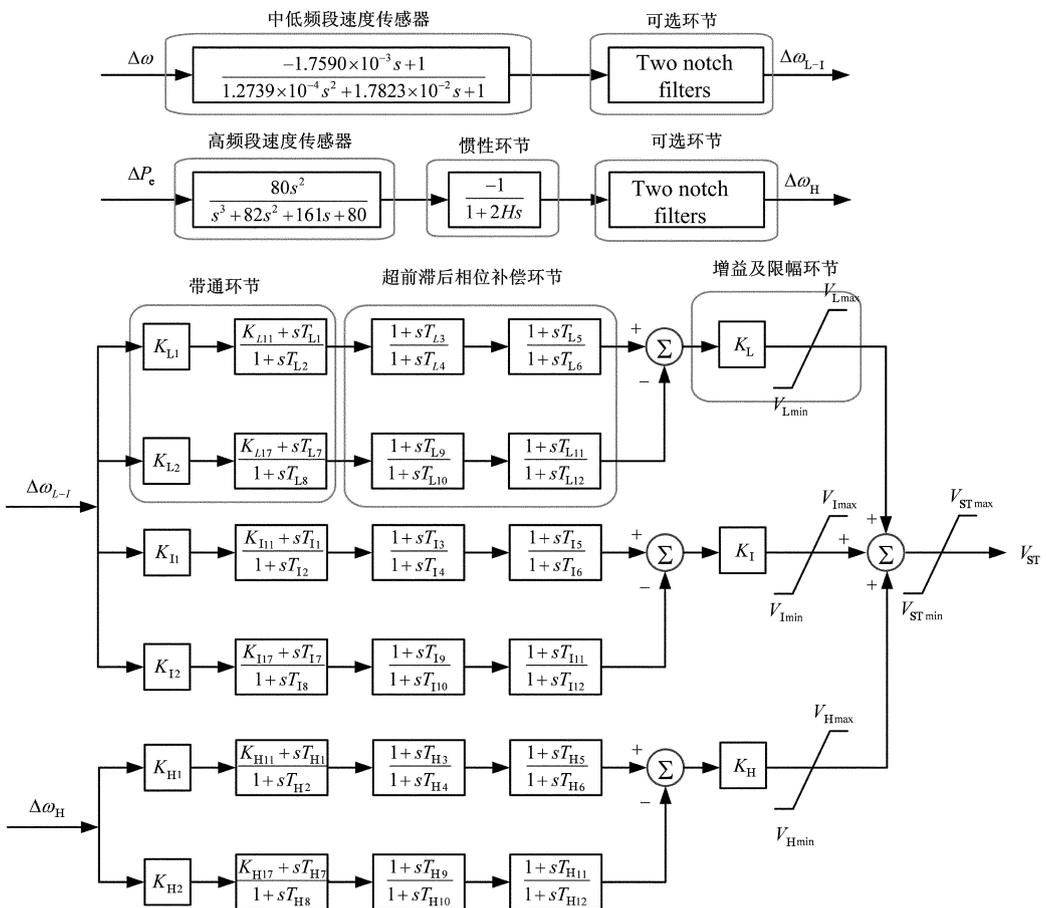


图 1 PSS4B 数学模型
Fig. 1 Mathematical model of PSS4B

当不考虑机械阻尼时,可得同步发电机转子运动方程如下:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{M}(T_m - T_e) \quad (1)$$

式中: T_m 为原动机机械转矩, T_e 为发电机电磁转矩, ω 为发电机轴旋转角速度, M 为转动惯量. 在标幺制系统中, 用功率 P 代替转矩 T , 式(1)可转化为:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{M}(P_m - P_e) \quad (2)$$

将 d/dt 用 s 代替, 并将式(2)改为偏差形式, 得出:

$$\Delta\omega = \frac{1}{Ms}(\Delta P_m - \Delta P_e) \quad (3)$$

当机械功率不变时, 式(3)可表示如下:

$$\Delta\omega = \frac{1}{Ms}(-\Delta P_e) \quad (4)$$

图 1 中 PSS4B 的高频段, 由于频率较高且转动惯量 M 一般较大, 因此可近似用一阶惯性环节 $1/(Ms+1)$ 代替 $1/Ms$, 即:

$$\Delta\omega \approx \frac{-1}{Ms+1}\Delta P_e \quad (5)$$

根据式(5), 将 PSS4B 双输入模式转化为 $\Delta\omega$ 单输入模式. 单输入模式下的中低频段、高频段速度传感器如图 2 所示.

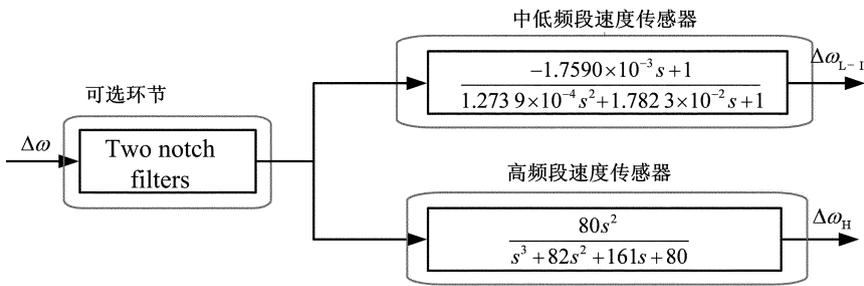


图 2 单输入模式下 PSS4B 速度传感器
Fig. 2 Speed transducers of single input PSS4B

根据中心频率法, PSS4B 的参数设置主要体现在低、中、高三个频段的中心频率 F_L 、 F_1 、 F_H 和相应的频段增益 K_L 、 K_1 、 K_H , 以及各频段的两阶超前一滞后相位补偿环节时间常数.

图 3 中, 三个频段的参数设置方法完全一致. 以高频段为例, 正、负两个分支的分支增益如下所示:

$$K_{H1} = K_{H2} = \frac{R^2 + R}{R^2 - 2R + 1} \quad (6)$$

同时 $K_{H11} = K_{H17} = 1$, $T_{H2} = T_{H7} = T_H$, $T_{H1} = T_H/R$, $T_{H8} = T_H * R$ (R 为决定带通宽度的常数), 其中:

$$T_H = \frac{1}{2\pi F_H \sqrt{R}} \quad (7)$$

最后, 正、负两个分支的超前-滞后相位补偿环节设置为相同的参数, 如图 3 中的优化变量.

2 混合粒子群优化算法

2.1 PSS4B 参数优化模型

以转速偏差 $\Delta\omega$ 作为输入的 PSS 传递函数, 其相位整定原理如图 4 所示. 假设需整定的 ΔT_{pss} 位于 $\Delta\omega$ 轴, 则在超前 ΔT_{pss} 相位为 $|\Phi_{\Delta E'q}|$ 的位置可以找

到 ΔU_{pss} , 其中 $\Phi_{\Delta E'q}$ 为励磁系统无补偿相频特性的滞后相角. 以 $\Delta\omega$ 为输入, 则经过 PSS 传递函数的作用后输出量应位于 ΔU_{pss} 处. 因此根据图 4 中数学关系可得出以 $\Delta\omega$ 为输入的 PSS 的相位整定关系为:

$$\Phi_{\Delta E'q} + \Phi_{PSS}(\Delta\omega) = 0^\circ \quad (8)$$

根据上述相位补偿法原理, PSS 产生的附加力矩与 $\Delta\omega$ 轴同相能够产生最大的正阻尼力矩 ΔT_{pss} . 假设励磁系统的无补偿相频特性为 φ_x , PSS4B 的相频特性为 φ_s , 励磁系统有补偿相频特性 $\varphi = \varphi_x + \varphi_s$, 则优化模型选取的目标函数如下:

$$\min J = \sum_{i=1}^I |\varphi_x(f_i) + \varphi_s(f_i)| \quad (9)$$

约束条件为:

$$\begin{cases} 0.1\text{Hz} < f_i < 2\text{Hz}, \varphi \in [-15^\circ, 15^\circ] \\ T_{L3}, T_{L4}, T_{L5}, T_{L6} \in [0.000 \ 1, 10] \\ T_{13}, T_{14}, T_{15}, T_{16} \in [0.000 \ 1, 10] \\ T_{H3}, T_{H4}, T_{H5}, T_{H6} \in [0.000 \ 1, 10] \end{cases} \quad (10)$$

其中 f_i 为低频振荡频率段 0.1~2.0 Hz 范围内的频率点, $I = 20$. $T_{L3} \sim T_{L6}$ 、 $T_{13} \sim T_{16}$ 、 $T_{H3} \sim T_{H6}$ 为 PSS4B 三个频段的两阶超前-滞后相位补偿环节时间常数, 即优化变量.

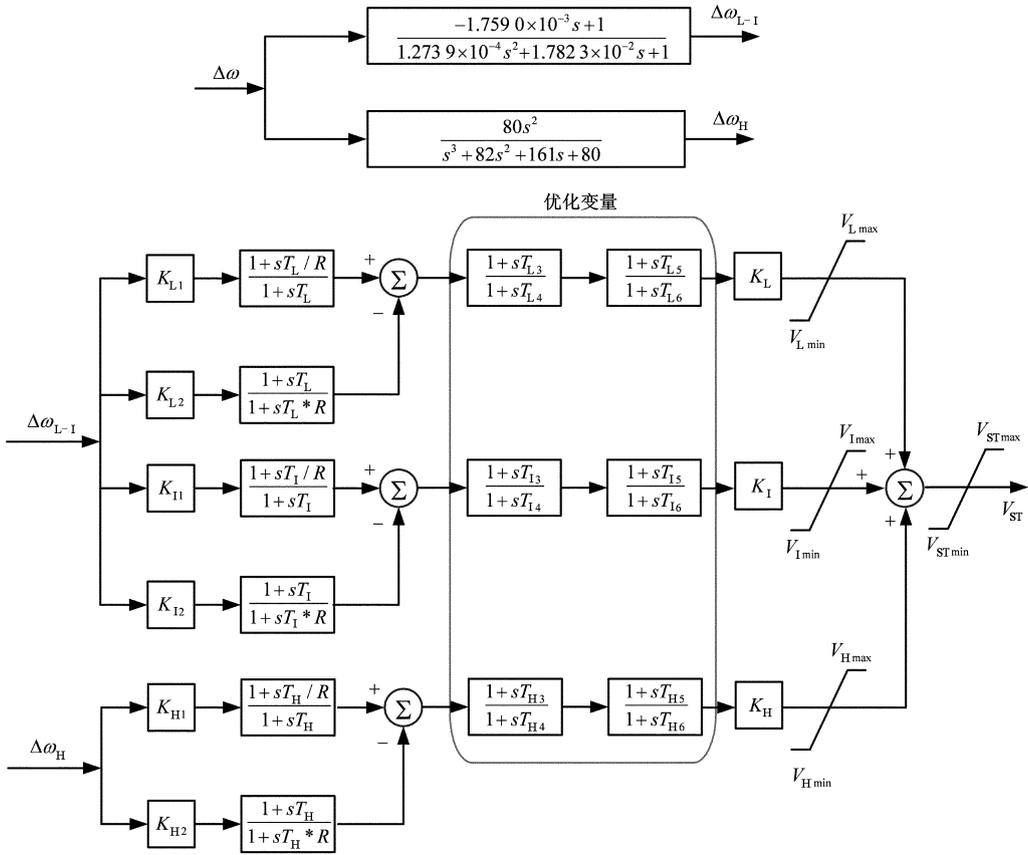


图 3 PSS4B 优化变量
Fig. 3 Optimization variables of PSS4B

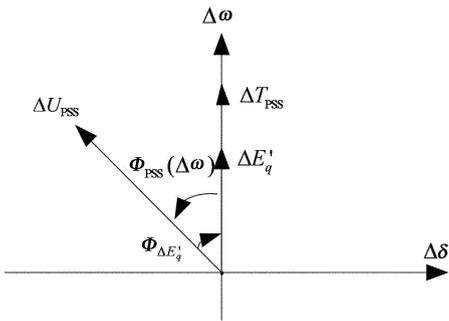


图 4 以 $\Delta\omega$ 为输入的相位补偿原理图
Fig. 4 Phase compensation schematic diagram when input is $\Delta\omega$

2.2 混合粒子群优化算法实现流程

借鉴遗传算法中的杂交操作,在粒子群优化算法每次迭代过程中根据杂交概率选取指定数量的粒子放入杂交池中,两两杂交产生同样数目的子代粒子,并用子代粒子替换亲代粒子,即混合粒子群算法.该优化算法的计算流程如下:

- ①随机初始化种群中各微粒的位置和速度,每个微粒代表一组优化变量,即 $T_{L3} \sim T_{L6}$ 、 $T_{I3} \sim T_{I6}$ 、 $T_{H3} \sim T_{H6}$;
- ②根据式(9)计算适应度函数值,当有一个频率

点处的相位超出式(10)中有补偿相频特性 φ ,则在适应度函数值上加一个惩罚值.将当前各微粒的位置和适应度函数值存储在各微粒的个体最优解 pbest 中,将所有 pbest 中适应度最优个体的位置和适应度函数值存储于种群最优解 gbest 中;

- ③更新粒子的速度和位置;
- ④根据粒子的取值范围限制各粒子的位置,如果粒子的某一维数值越过上限或下限,则用上限值或下限值替代之;
- ⑤对每个粒子,将其适应值与其经历过的最好位置对比,如果较好则更新 pbest,比较当前所有粒子的 pbest 和种群 gbest,更新 gbest;

⑥根据杂交概率选取指定数量的粒子放入杂交池内,池中的粒子随机两两杂交产生同样数目的子代粒子,并取代双亲粒子.子代粒子的位置和速度计算公式如下:

$$\begin{cases} \text{child}_1(x) = p \cdot \text{parent}_1(x) + (1-p) \cdot \text{parent}_2(x) \\ \text{child}_1(v) = \frac{\text{parent}_1(v) + \text{parent}_2(v)}{|\text{parent}_1(v) + \text{parent}_2(v)|} \cdot |\text{parent}_1(v)| \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \text{child}_2(x) = (1 - p) \cdot \text{parent}_1(x) + \\ p \cdot \text{parent}_2(x) \\ \text{child}_2(v) = \frac{\text{parent}_1(v) + \text{parent}_2(v)}{|\text{parent}_1(v) + \text{parent}_2(v)|} \cdot \\ |\text{parent}_2(v)| \end{cases} \quad (12)$$

其中, p 为 0 到 1 之间的随机数.

⑦若满足迭代次数, 则停止搜索, 将目标函数最小的适应值和相应的粒子输出, 否则返回②继续搜索.

3 仿真算例及验证

3.1 基于 RTDS 的励磁仿真模型建立

在 RTDS 数模仿真平台上建立的励磁仿真模型实物图和结构示意图, 分别见图 5 和图 6. 其中, 发电机机端电压 U_g 、整流桥触发脉冲同步电压 U_z 、机端电流 I_g 以及励磁电流 I_f 经 RTDS 的模拟量输出板卡 GTA0 引出, 并经功率放大器送至 NES6100 型励磁调节器; 励磁调节器将励磁控制电压 U_c 经模拟量输入板卡 GTAI 送至 RTDS 中的数字仿真模型, 从而与励磁调节器构成半物理控制闭环.

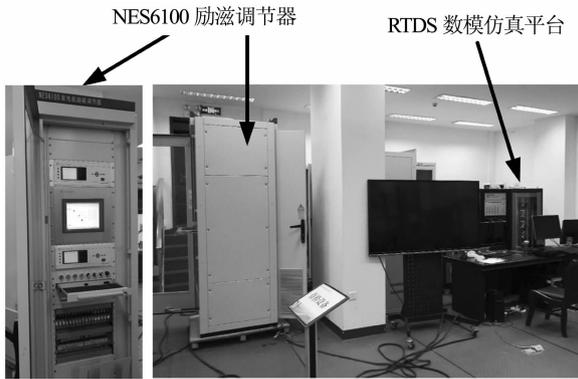


图 5 发电机励磁系统闭环仿真实物图
Fig. 5 Entity of generator excitation system closed-loop simulation model

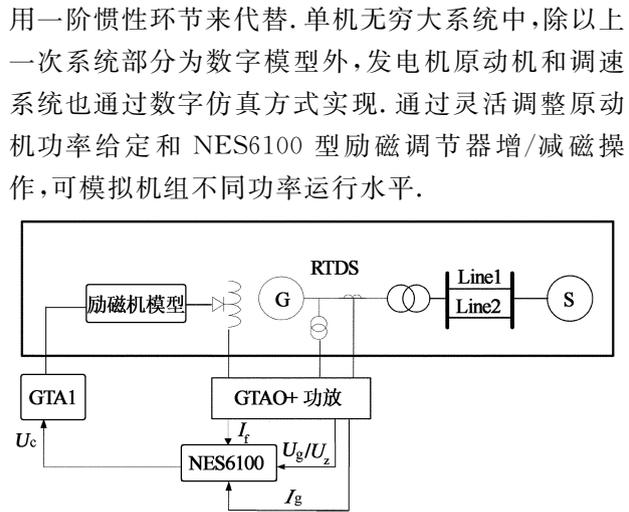


图 6 发电机励磁系统闭环仿真模型结构示意图
Fig. 6 Structure diagram of generator excitation system closed-loop simulation model

3.2 励磁系统无补偿相频特性测量

在 RTDS 数模仿真平台上, NES6100 型励磁调节器运行在自动方式. 设定有功功率 P 约为 288.3 MW, 无功功率 Q 约为 34.2 MVar, 在 PSS 功能退出的工况下进行发电机励磁系统无补偿相频特性测试, 测量方法如图 7.

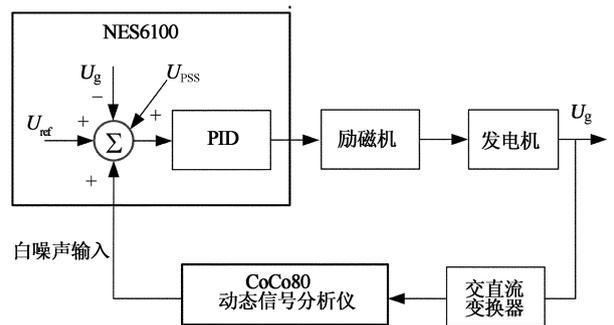


图 7 励磁系统无补偿频率特性测量
Fig. 7 Measuring of frequency characteristic of excitation system without compensation

图 6 单机无穷大系统中, 发电机参数: 额定视在功率 $S_N = 353 \text{ MVA}$, $P_N = 300 \text{ MW}$, $U_N = 20 \text{ kV}$, $X_d = 2.047$, $X'_d = 0.2688$, $X_q = 1.93$, $T_j = 8.3 \text{ s}$, $T'_{d0} = 6.2 \text{ s}$; 升压变参数: 额定容量 $T_N = 800 \text{ MVA}$, 一二次变比 $525 \text{ kV}/20 \text{ kV}$, 短路电抗 $X_1 = 0.12$; 两条线路 Line1 和 Line2 长度均为 $L = 200 \text{ km}$, 正序和零序参数: $R_1 = 0.02 \text{ } \Omega/\text{km}$, $L_1 = 0.28 \text{ } \Omega/\text{km}$, $C_1 = 0.24 \text{ M}\Omega/\text{km}$, $R_0 = 0.18 \text{ } \Omega/\text{km}$, $L_0 = 0.8 \text{ } \Omega/\text{km}$, $C_0 = 0.32 \text{ M}\Omega/\text{km}$; 无穷大系统电压为 525 kV . 由于该励磁系统为自并励方式, 励磁机模型为整流桥, 可

用 CoCo80 动态信号分析仪产生一个白噪声信号, 经 NES6100 励磁调节器的 A/D 转换后电压给定叠加点, 并将此信号接入 CoCo80 的分析通道 1. 将发电机机端二次侧三相电压 U_g 接入交直流变换器中, 调整变换器的调零旋钮, 使变换后的直流信号输出接近于 0, 然后将变换后的直流信号接入 CoCo80 的分析通道 2, 缓慢的增加白噪声信号的电平, 使发电机的机端电压波动不大于 1%, 测量输出的白噪声信号与发电机电压信号之间的相频特性即为励磁系统无补偿相频特性, 测量结果如表 1.

表 1 励磁系统无补偿相频特性
Tab.1 Phase frequency characteristic of generator excitation system without compensation

频率/Hz	角度/(°)	频率/Hz	角度/(°)
0.1	-18	1.1	-73
0.2	-34	1.2	-76
0.3	-45	1.3	-84
0.4	-51	1.4	-102
0.5	-56	1.5	-110
0.6	-59	1.6	-103
0.7	-61	1.7	-99
0.8	-64	1.8	-96
0.9	-66	1.9	-97
1.0	-69	2.0	-97

3.3 PSS4B 参数整定

选取 PSS4B 典型参数的中心频率和频段增益, 即 $F_L=0.07$ Hz、 $F_I=0.7$ Hz、 $F_H=8$ Hz 和 $K_L=7.5$ 、 $K_I=30$ 、 $K_H=120$. 根据表 1 实测励磁系统无补偿相频特性, 利用混合粒子群优化算法对 PSS4B 进行参数优化, 其控制参数设置如下: 粒子群规模 $N=60$, 粒子维度 $S=12$, 迭代次数 $t=100$, 杂交概率 $P_c=0.9$, 杂交池的大小比例 $S_p=0.1$, 从而获得混合粒子群算法适应度函数值随迭代次数分布图如图 8, 优化结果如表 2.

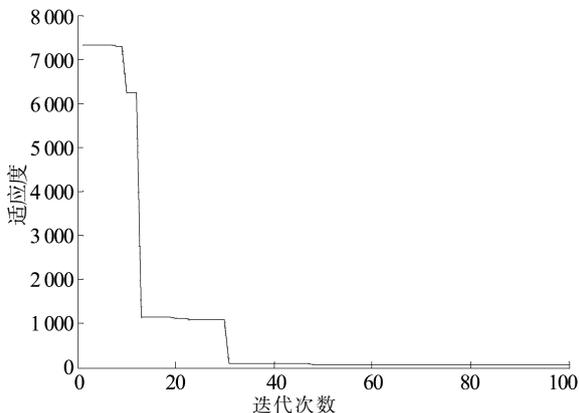


图 8 混合粒子群算法适应度函数值迭代图
Fig. 8 Iteration of objective function value in HPSO

表 2 PSS4B 参数优化结果
Tab.2 Parameters optimization result of PSS4B

低频段		中频段		高频段	
T_{L3}	0.186 3	T_{I3}	0.398 1	T_{H3}	0.155 4
T_{L4}	0.000 1	T_{I4}	0.063 7	T_{H4}	0.019 5
T_{L5}	0.000 1	T_{I5}	0.296 9	T_{H5}	0.646 2
T_{L6}	0.332 7	T_{I6}	1.132 9	T_{H6}	1.042 5

由表 2 中 PSS4B 优化参数可得, 低频振荡频率段 0.1~2.0 Hz 范围内, PSS4B 优化参数幅频特性和励磁系统有补偿相频特性分别如图 9 和图 10. 根据行业标准规定: PSS 附加力矩的相位在 0.3~2.0 Hz 范围内应落在 $\Delta\omega$ 轴 $-45^\circ\sim 20^\circ$ 之间; 当低于 0.2 Hz 时, 最大超前角不应大于 40° ; 在本机振荡频率处应落在 $\Delta\omega$ 轴 $-30^\circ\sim 0^\circ$ 之间. 可见 PSS4B 优化参数使得励磁系统有补偿相频特性较为靠近 $\Delta\omega$ 轴, 完全满足行业标准要求^[20].

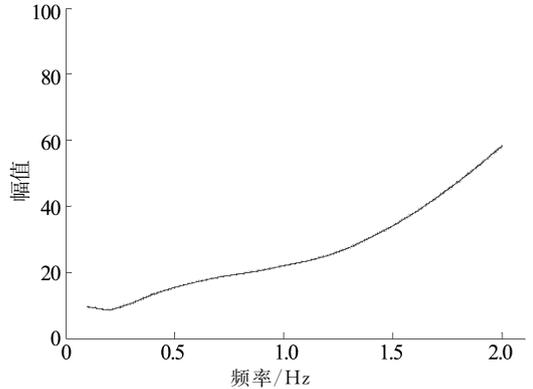


图 9 PSS4B 优化参数幅频特性
Fig. 9 Magnitude frequency characteristic of PSS4B optimized parameter

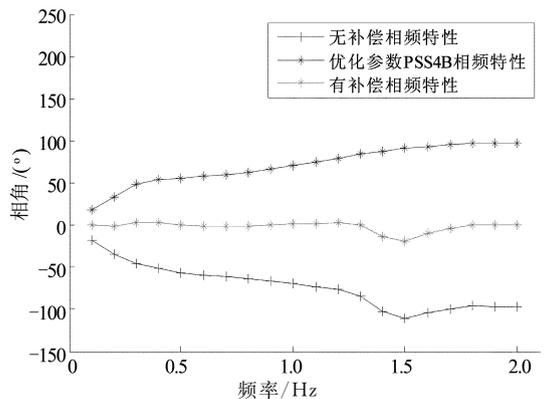


图 10 励磁系统有补偿相频特性
Fig. 10 Phase frequency characteristic with compensation of excitation system

3.4 临界增益试验

PSS 临界增益由发电机的负荷水平、PSS 在系统中的配置、系统运行方式等因素决定, 通常用现场试验的方法来确定.

由于 PSS4B 三支并行的结构, 在相位补偿环节时间常数整定完成之后, 需要同比例地缩放低、中、高三个频段增益 K_L 、 K_I 、 K_H 来确定临界增益. 本文中令 $K'_L=K * K_L$ 、 $K'_I=K * K_I$ 、 $K'_H=K * K_H$, 其中 $K_L=7.5$ 、 $K_I=30$ 、 $K_H=120$. 缓慢增大 K 直到临界增益, 并将临界增益的 $1/3\sim 1/5$ 作为最大

增益整定值。

图 11 为投入 PSS4B 下 $K=4$ 时临界增益试验录波图,可见有功功率出现了明显的增幅振荡,随后切除 PSS. 此时可认为已达到 PSS 临界增益值,取 $K=1$ 作为最大增益整定值,即最终整定的三个频段增益为 $K'_L=7.5$ 、 $K'_I=30$ 、 $K'_H=120$ 。

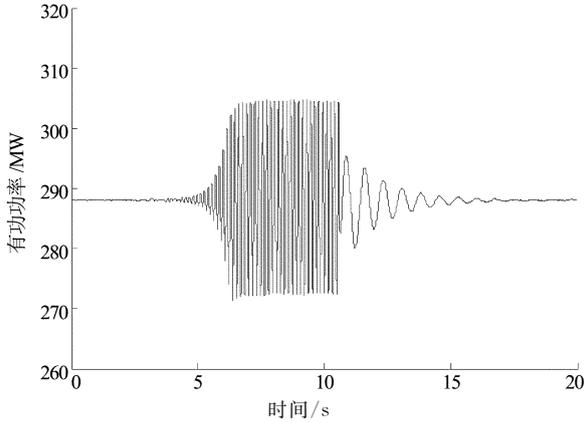


图 11 $K=4$ 时临界增益试验录波图

Fig. 11 Critical gain test waveform when $K=4$

3.5 小扰动下 PSS 投入效果校核试验

为了验证 PSS4B 的投入效果,在 NES6100 型励磁调节器上分别进行无 PSS、投入 PSS4B 两种工况下的电压阶跃试验. 根据发电机 Heffron-Philips 模型,支配机组振荡的频率是由发电机的机械惯性环节决定的,机械环节框图如图 12 所示。

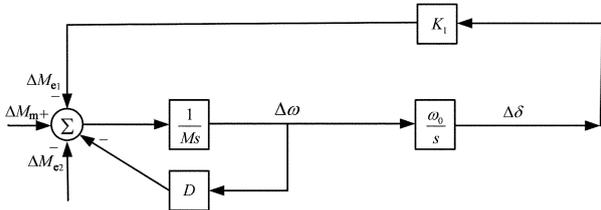


图 12 Heffron-Philips 模型机械环节框图

Fig. 12 Mechanical link diagram of Heffron-Philips model

由图 12,可得以下传递函数:

$$-\frac{\Delta\delta}{\Delta M_{e2}} = \frac{-\omega_0/M}{s^2 + \frac{D}{M}s + \frac{\omega_0 K_1}{M}} = \quad (13)$$

$$\frac{-\omega_0/M}{s^2 + 2\xi_n\omega_n s + \omega_n^2} \quad (14)$$

$$\omega_n = \sqrt{K_1\omega_0/M} \quad (14)$$

$$\xi_n = \frac{1}{2} \frac{D}{\sqrt{MK_1\omega_0}} \quad (15)$$

式中: ω_n 称为机械环节的无阻尼自然振荡频率, ξ_n 为阻尼比. 在欠阻尼情况下, ω_n 与支配机组振荡的频率有如下关系:

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \xi_n^2} \quad (0 < \xi_n < 1) \quad (16)$$

因此,依次修改发电机转动惯量模拟振荡频率分别为 1.39 Hz、0.74 Hz 和 0.42 Hz 时,电压阶跃为先上阶跃试验待功率振荡平息之后再行下阶跃试验. 由图 13~图 15 结果对比可知,加装优化参数 PSS4B 后,励磁系统均能有效地抑制振荡次数和振荡幅度。

由于 NES6100 型励磁调节器上阶跃试验与下阶跃试验之间的时间限制,当发电机转动惯量逐渐增大而振荡频率进一步降低时,上阶跃试验引发的功率振荡尚未平息装置即开始下阶跃试验. 因此,当振荡频率为 0.14 Hz 时,分别进行无 PSS 和投入优化参数 PSS4B 的短时间上、下阶跃试验,试验录波如图 16,可见优化参数 PSS4B 在低频段能够较好地抑制功率振荡,提高系统稳定性。

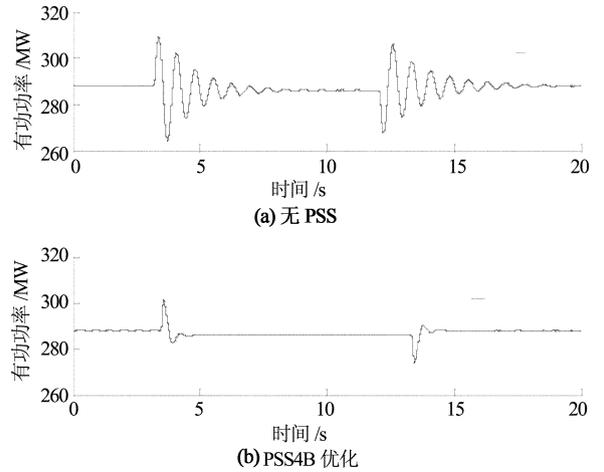


图 13 振荡频率为 1.39 Hz 的时域响应

Fig. 13 Dynamic response when oscillation frequency is 1.39 Hz

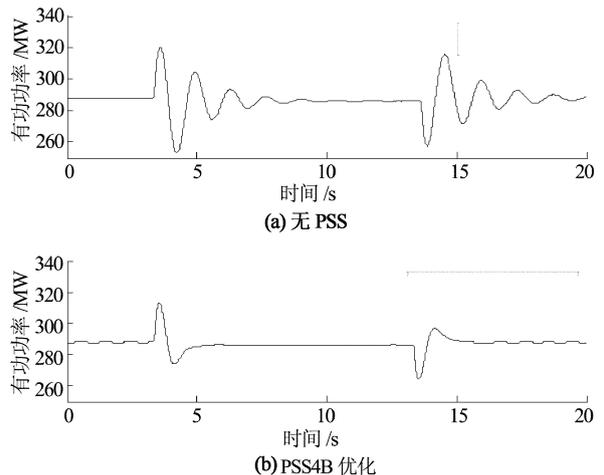


图 14 振荡频率为 0.74 Hz 的时域响应

Fig. 14 Dynamic response when oscillation frequency is 0.74 Hz

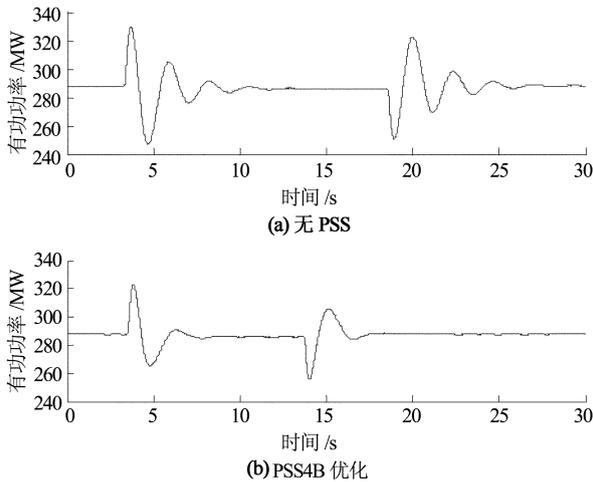


图 15 振荡频率为 0.42 Hz 的时域响应
Fig. 15 Dynamic response when oscillation frequency is 0.42 Hz

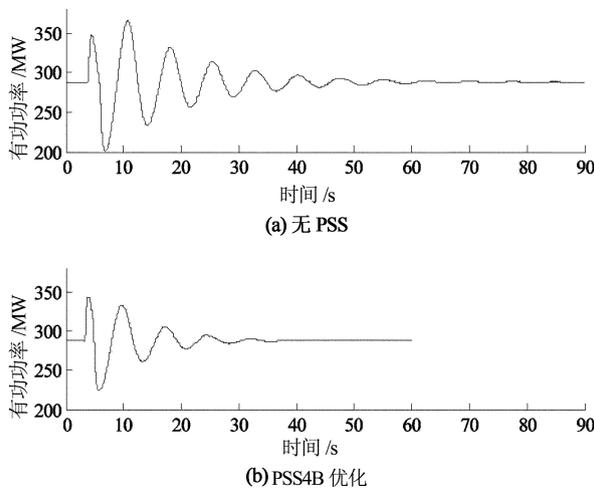


图 16 振荡频率为 0.14 Hz 的时域响应
Fig. 16 Dynamic response when oscillation frequency is 0.14 Hz

图 17 是模拟振荡频率为 0.095 Hz 超低频率振

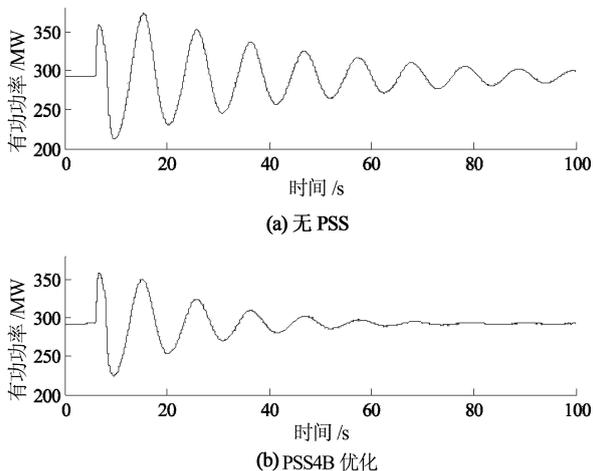


图 17 振荡频率为 0.095 Hz 的时域响应
Fig. 17 Dynamic response when oscillation frequency is 0.095 Hz

荡模式下的无 PSS 和投入优化 PSS4B 阶跃试验录波对比,可见在该振荡频率下投入优化 PSS4B 后功率振荡在前五个周波内幅度明显减小,并迅速平息.

3.6 大扰动下 PSS 投入效果校核试验

为了验证 PSS4B 在系统大扰动下的投入效果,在图 6 中 Line1 上设置三相接地短路故障,持续 50 ms 后切除线路 Line1. 图 18 为无 PSS 和投入优化 PSS4B 下的三相接地短路线路切除时域响应对比,可见投入优化 PSS4B 后功率扰动幅值和持续时间明显减小.

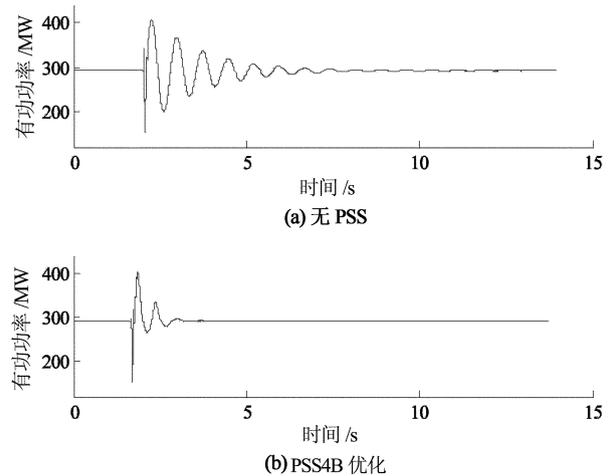


图 18 三相短路线路切除的时域响应
Fig. 18 Dynamic response when short circuit

3.7 PSS 反调验证试验

当发电机有功功率调整时,包含有功通道环节的 PSS 可能发生无功反调现象. 对于 PSS4B 型电力系统稳定器,高频段输入信号为有功功率, PSS4B 经参数优化后需验证反调效果.

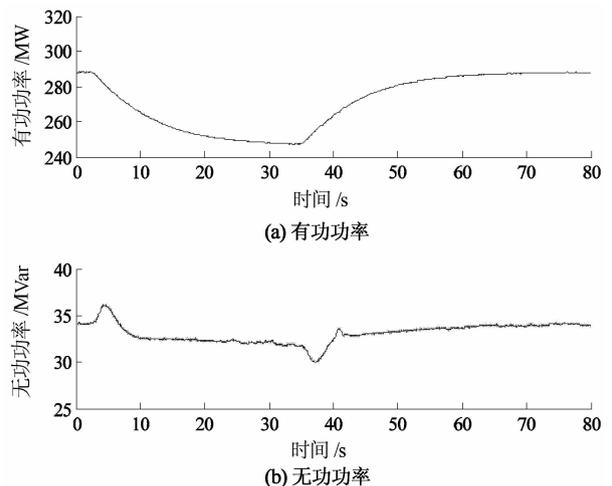


图 19 PSS4B 反调效果录波图
Fig. 19 PSS4B inverse-regulation effect waveform

将发电机转动惯量改回原始值,投入 PSS4B 功能,发电机组有功功率在 33 s 内由 288 MW 下降至 248 MW,之后在 40 s 内功率升回 288 MW,试验波形如图 19,无功功率变化量最大约 2.5 MVar,远远小于 DL/T 1231—2013 导则要求的“无功功率变化量小于 30% 额定无功功率”的要求(30% $Q_N = 55.8$ MVar). 可见在发电机有功功率快速调节时无功波

动较小,反调现象不明显.

由图 3 可知,经参数优化后 PSS4B 高频段传递函数如图 20 所示,其幅频特性如图 21 所示. 可知,优化参数后的 PSS4B 对于低频信号能够起到较好的截止作用. 当发电机快速调整有功功率时,有功波动频率较低,因此优化参数后的 PSS4B 能够有效抑制反调作用.

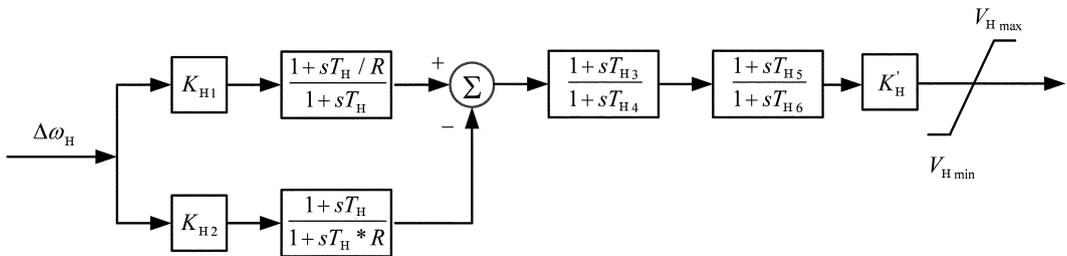


图 20 PSS4B 高频段传递函数

Fig. 20 PSS4B high frequency band function

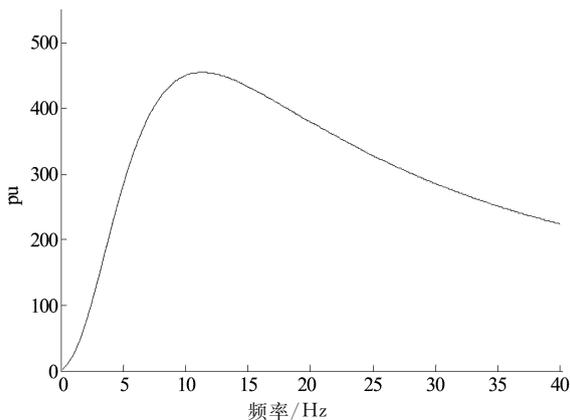


图 21 优化参数 PSS4B 高频段幅频特性

Fig. 21 High frequency band magnitude frequency characteristic of PSS4B optimized parameter

4 结 论

本文使用一种混合粒子群优化算法进行电力系统稳定器 PSS4B 的参数优化. 在 RTDS 实时数字仿真平台上建立励磁系统半实物仿真模型,通过实测发电机励磁系统无补偿相频特性,经参数优化整定后进行了 PSS4B 功能验证试验,归纳总结了 PSS4B 参数整定的方法和流程,主要得出以下结论:

1) 以 PSS4B 产生最大的正阻尼力矩为目标,将混合粒子群优化算法应用于智能寻优过程,实现在整个低频振荡频率段 0.1~2.0 Hz 范围内均具有优良的相位补偿效果,克服了 PSS4B 参数众多整定不便的困难,具有较好的工程应用价值.

2) 试验结果表明经优化的 PSS4B 在不同频段上均能够较好地抑制功率振荡,同时具有优良的抑制反调效果.

3) PSS4B 临界增益试验有其自身的特点,在各频段相位补偿环节时间常数整定完成之后,需要同比例地缩放低、中、高三个频段增益 K_L 、 K_I 、 K_H 来确定临界增益.

参 考 文 献

- [1] 朱方,赵红光,刘增煌,等. 大区电网互联对电力系统动态稳定性的影响[J]. 中国电机工程学报,2007,27(1):1-7.
ZHU Fang, ZHAO Hongguang, LIU Zenghuang, et al. The influence of large power grid interconnected on power system dynamic stability [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(1): 1-7. (In Chinese)
- [2] 王官宏,于钊,张怡,等. 电力系统超低频率振荡模式排查及分析[J]. 电网技术,2016,40(8):2324-2329.
WANG Guanhong, YU Zhao, ZHANG Yi, et al. Trouble shooting and analysis of ultra-low frequency oscillation mode in power system [J]. Power System Technology, 2016, 40(8): 2324-2329. (In Chinese)
- [3] GRONDIN R, KAMWA I. The multi-band PSS: A flexible technology designed to meet opening markets[C]// CIGRÉ Conference. Paris, 2000: 39-201.
- [4] GRONDIN R, KAMWA I. The multi-band PSS: modeling and closed-loop validation of a new PSS concept[C]// IEEE/PES General Meeting. Toronto, 2003: 1804-1809.
- [5] GRONDIN R, KAMWA I, TRUDEL G. IEEE PSS2B Versus PSS4B: The limits of performance of modern power system stabilizers[J]. IEEE Transactions on Power System, 2005, 20

- (2):903-915.
- [6] IEEE std 421.5TM-2005 IEEE recommended practice for excitation system models for power system stability studies[S]. New York:IEEE Power Engineering Society,2006:24-25.
- [7] 王家驹. 电力系统稳定器及其应用研究[D]. 成都:西南交通大学电气工程学院,2015:1-75.
WANG Jiaju. Study and application of power system stabilizer [D]. Chengdu: School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University,2015:1-75. (In Chinese)
- [8] 尚超,丁坚勇,马曦. 新型电力系统稳定器 PSS4B 的分析与仿真[J]. 华东电力,2013,41(3):575-578.
SHANG Chao, DING Jianyong, MA Xi, *et al.* Analysis and simulation of the new power system stabilizer PSS4B [J]. East China Electric Power,2013,41(3):575-578. (In Chinese)
- [9] 马曦,何旭,杜冰心,等. 电力系统稳定器 PSS4B 的仿真研究[J]. 电网与清洁能源,2014,30(2):33-42.
MA Xi, HE Xu, DU Bingxin, *et al.* Simulation research of power system stabilizer PSS4B [J]. Power System and Clean Energy,2014,30(2):33-42. (In Chinese)
- [10] 吴剑超. 抑制超低频振荡的电力系统稳定器的分析与研究[D]. 北京:中国电力科学研究院,2014:1-68.
WU Jianchao. Analysis and research on power system stabilizer for restraining ultra-low frequency oscillation[D]. Beijing:China Electric Power Research Institute,2014:1-68. (In Chinese)
- [11] 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):126-131.
YUAN Yazhou, XU Qipin, XU Rong, *et al.* Effect verification of multiband power system stabilizer based on RTDS[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(18):126-131. (In Chinese)
- [12] 赵晓伟,谢欢,吕思昕,等. 电力系统稳定器 PSS4B 的参数整定及现场试验[J]. 电网技术,2016,40(2):508-513.
ZHAO Xiaowei, XIE Huan, LÜ Sixin, *et al.* Parameter setting and on-site test of power system stabilizer-PSS4B[J]. Power System Technology,2016,40(2):508-513. (In Chinese)
- [13] 赵辉,刘鲁源,张更新. 基于微粒群优化算法的最优电力系统稳定器设计[J]. 电网技术,2006,30(37):32-35.
ZHAO Hui, LIU Luyuan, ZHANG Gengxin. Optimal design of power system stabilizer using particle swarm optimization [J]. Power System Technology,2006,30(37):32-35. (In Chinese)
- [14] 万源,段志远,陈子文,等. 基于自适应加速粒子群算法的 PSS 参数预整定[J]. 电力科学与工程,2013,29(10):19-25.
WAN Yuan, DUAN Zhiyuan, CHEN Ziwen, *et al.* Parameter pre-tune of new operational PSS based on SAPSO[J]. Electric Power Science and Engineering,2013,29(10):19-25. (In Chinese)
- [15] 王德意,阎伟,邱锦东,等. 基于遗传算法的电力系统稳定器参数优化[J]. 电力系统及其自动化报,2006,18(3):59-63.
WANG Deyi, YAN Wei, QIU Jindong, *et al.* Optimization of PSS parameters based on genetic algorithm[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2006,18(3):59-63. (In Chinese)
- [16] 朱良合,李文意,毛承雄,等. 新型电力系统稳定器模型分析及参数协调优化[J]. 水电能源科学,2014,32(6):171-175.
ZHU Lianghe, LI Wenyi, MAO Chengxiong, *et al.* Model analysis and parameter coordination optimization of new PSS[J]. Water Resources and Power,2014,32(6):171-175. (In Chinese)
- [17] LOVBJERG M, RASMUSSEN T K, KRINK T. Hybrid particle swarm optimiser with breeding and subpopulations[C]//2001 the Genetic and Evolutionary Computation Geconference. San Francisco,2001.
- [18] 吴涛,苏为. 基于电力系统实时数字仿真技术的自动励磁调节器性能检测实验[J]. 电网技术,2007,31(增刊2):107-110.
WU Tao, SU Weimin. Performance detection testing of automatic voltage regulator by use of power system real-time digital simulator in north china power grid [J]. Power System Technology,2007,31(S2):107-110. (In Chinese)
- [19] DL/T 1391-2014 数字式自动电压调节器涉网性能检测导则[S]. 北京:中国电力出版社,2014:5-16.
DL/T 1391-2014 Test guidelines of digital automatic voltage regulator performance related to power grid[S]. Beijing:China Electric Power Press,2014:5-16. (In Chinese)
- [20] DL/T 1231-2013 电力系统稳定器整定试验导则[S]. 北京:中国电力出版社,2013:2-9.
DL/T 1231-2013 Guide for setting test of power system stabilizer[S]. Beijing:China Electric Power Press,2013:2-9. (In Chinese)