

# 滚动优化 PSS 参数搜索小干扰稳定极限边界策略研究

盛逸标<sup>1</sup>, 林涛<sup>1</sup>, 陈汝斯<sup>1</sup>, 陈宝平<sup>1</sup>, 徐遐龄<sup>2</sup>

(1. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 华中电网调控分中心, 湖北 武汉 430077)

**摘要:** 当前电力系统具有大区域间弱互联并伴随同步发电机快速高放大倍数励磁系统大量使用等特征, 低频振荡问题多发。小干扰稳定域表征了参数空间中所有能够保持系统小扰动稳定性的平衡点的集合, 对于电网的安全稳定运行有重要意义。但现有对小干扰稳定域边界的研究总体处于不计及阻尼控制器参数影响或仅考虑固定阻尼控制器参数的影响的状态, 稳定域边界趋于保守。为拓展稳定域边界, 以常用的 PSS 为对象, 试图通过优化 PSS 参数达到拓展边界的目的, 对电网规划以及运行方式校核等离线分析提供了一定参考, 进一步提高了电网运行的安全性和经济性。为此, 首先基于系统平衡点建立了以最小阻尼比最大化为目标的多 PSS 参数协调优化模型, 并采用了改进的 PGSA 优化算法进行求解。在此基础上, 形成了一种基于滚动优化的思路, 通过逐步外拓来实现小干扰稳定极限边界点搜索策略。最后, 基于 4 机 2 区算例, 通过与常规方法的对比, 验证了所提策略拓展稳定域边界的有效性和优越性。

**关键词:** 低频振荡; 电力系统稳定器; 改进模拟植物生长优化算法; 滚动优化; 极限边界

## Research on rolling optimization of PSS parameters to search for small signal stability boundary strategy

SHENG Yibiao<sup>1</sup>, LIN Tao<sup>1</sup>, CHEN Rusi<sup>1</sup>, CHEN Baoping<sup>1</sup>, XU Xialing<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Central China Electric Power Dispatching and Communication Center, Wuhan 430077, China)

**Abstract:** Because power system exists the weak interconnection among large areas and the fast excitation system with high magnification is widely used, low-frequency oscillation is easy to happen. The small signal stability region represents the set of equilibrium points that can maintain the small signal stability of the system in the parameter space, which is important for the safe and stable operation of the power grid. However, the existing research on the boundary of small signal stability region is short of taking the influence of damping controller parameters into account so that the boundary tends to be conservative. In order to extend the stability region boundary and improve the security and economy of operation, which is valuable to the off-line analysis of power system planning and operation mode checking, this paper takes PSS as research objects and establishes a multi-PSS parameter coordination and optimization model with maximum damping ratio. And an improved PGSA optimization algorithm is used to solve the problem. On this basis, this paper proposes a searching strategy of the small signal stability extreme boundary points by rolling optimization of controllers' parameters. Finally, based on the 4-machine-2-area benchmark, the validity and superiority of the proposed strategy are verified by comparing with the conventional method.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFB0902600 and 2017YFB0902604).

**Key words:** low-frequency oscillations; power system stabilizer; improved PGSA; rolling optimization; extreme boundary

## 0 引言

由于我国跨区互联大电网工程的建设, 大系统

间弱互联并伴随快速高放大倍数励磁系统的大量投入使用, 低频振荡问题已逐渐成为限制电网传输能力的瓶颈<sup>[1-4]</sup>。小干扰稳定域表征了参数空间中所有能够保持系统小扰动稳定性的平衡点的集合, 对系统的安全稳定分析有重要意义<sup>[5]</sup>。

近年来, 对小干扰稳定域的研究逐步深入。文献[6-7]基于分岔理论, 主要从以状态矩阵特征根是

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2017YFB0902600, 2017YFB0902604); 国家电网公司总部科技项目“基于安全域的电网安全稳定评估及辅助决策技术研究”

否穿越虚轴为判断标准, 对小干扰稳定域边界组成及结构特点进行了研究探讨, 为对后续进一步深化研究小干扰稳定域微分拓扑学性质具有一定指导意义。考虑到电网为保证安全稳定运行应保有一定的阻尼, 文献[8-10]进行了基于阻尼比的小干扰稳定域研究, 通过临界阻尼的设置, 提高了小干扰稳定域对于实际电力系统的实用性, 对于有效预防系统小干扰失稳具有积极的指导意义。但上述研究主要集中在以发电机有功注入功率为研究对象, 没有计及阻尼控制器参数的影响。

实际上, 系统的小干扰稳定性不仅与发电机有功注入功率(线性化平衡点)有关, 阻尼控制器参数亦对其有着显著影响<sup>[11]</sup>。

以常用的阻尼控制器 PSS 为例, 其可以通过产生励磁附加控制提供附加阻尼力矩以抑制低频振荡<sup>[12-13]</sup>。因而, 阻尼控制器参数不可避免地将影响注入功率空间上的小干扰稳定域。文献[14]选取 PSS 放大倍数和复位环节时间常数作为可调参数, 通过设置几组典型值试探性地考察了 PSS 参数变化对注入功率空间上的小干扰稳定边界的影响。但上述研究仅限于简单的数值测试, 缺乏进一步深入的理论性研究。

为深入探索优化阻尼控制器参数对有功注入功率空间小干扰稳定域的外拓影响, 以 PSS 为对象, 以多 PSS 参数协调优化为基础, 本文提出一种基于滚动优化通过逐步外拓的小干扰稳定极限边界点搜索策略。

## 1 稳定边界定义及边界拓展思路

### 1.1 小干扰稳定域边界定义

在小干扰稳定分析中, 将线性化后所得系统状态矩阵  $A$  的  $k$  个特征值记为  $\lambda_i (i=1, \dots, k)$ , 并由特征值与阻尼比之间关系, 可得特征值对应的阻尼比, 记为  $Z_i$ 。在考虑系统的弱阻尼振荡问题时, 设置有临界阻尼比  $\xi$ , 根据阻尼比定义(设特征根  $\lambda = e + jf$ )

$$\xi = \frac{-e}{\sqrt{e^2 + f^2}} \quad (1)$$

变换后, 可得临界阻尼线斜率  $k$  为

$$k = \frac{f}{e} = \pm \sqrt{\frac{1 - \xi^2}{\xi^2}} \quad (2)$$

为了保证系统小干扰稳定, 需满足各阻尼比均大于或等于系统安全运行所要求的临界阻尼比  $\xi$ , 则系统小干扰稳定域边界定义为<sup>[10]</sup>(如图 1 所示)。

$$B_{\text{SSSR}} = \{u \mid \min z_i = \xi\} \quad (3)$$

式中:  $u$  为参数向量;  $z_i$  为关于参数向量  $u$  的函数。

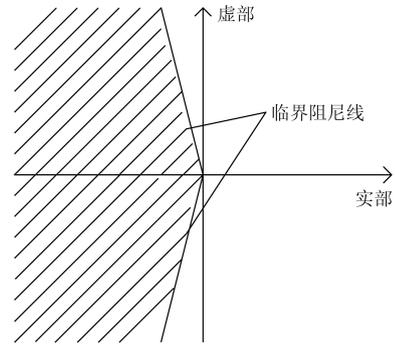


图 1 D-SSSR 临界阻尼线示意图

Fig. 1 Schematic diagram of critical damping ratio lines of D-SSSR

### 1.2 边界拓展思路

现有的小干扰稳定域研究着重于以注入有功功率为研究对象<sup>[15-16]</sup>, 常以超平面拟合或者是多项式近似的形式表示安全域边界, 如小扰动稳定域边界的超平面方程为<sup>[15]</sup>

$$\alpha_1 P_1 + \alpha_2 P_2 + \dots + \alpha_n P_n = 1 \quad (4)$$

式中:  $P_i$  表示各发电机节点有功功率;  $\alpha_i$  为待求超平面方程系数;  $n$  为注入节点维数。

但是, 系统的小干扰稳定性不仅与发电机有功注入功率(线性化平衡点)有关, 阻尼控制器参数的变化亦对其有着显著影响<sup>[11]</sup>。通过对阻尼控制器的恰当设计可以提高系统的阻尼水平、改善系统的小干扰稳定性; 进而不可避免地会影响注入功率空间上的小干扰稳定域。

为此, 本文后续针对常用的电力系统稳定器 (PSS), 以建立的多 PSS 参数协调优化为基础, 基于滚动优化思路, 探究通过逐步优化其参数对有功注入空间上的小干扰稳定域边界的影响。

## 2 多 PSS 参数协调优化模型

对于配备了多台 PSS 的系统, 如果各台 PSS 都仅依靠分散局部设计, 而不考虑 PSS 之间的相互影响, 则可能对系统的阻尼产生负面影响<sup>[11]</sup>。因此, 在涉及多 PSS 的情况下, 有必要进行多 PSS 参数协调优化, 以避免可能的不良相互作用、最大化 PSS 对系统阻尼的调节能力。

### 2.1 PSS 数学模型

图 2 为 PSS 的传递框图, 由放大环节、复位环节、相位校正环节组成, 其可选输入信号为  $\Delta\omega$ 、 $\Delta P_e$ , 输出  $\Delta U_{\text{PSS}}$  作为励磁附加信号。

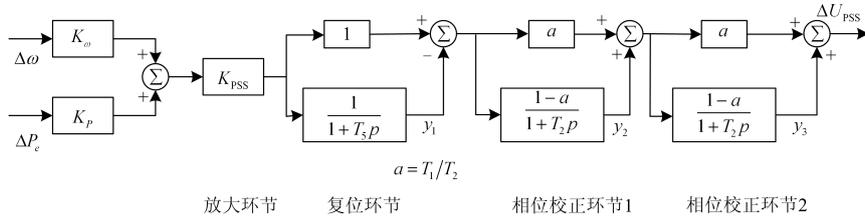


图 2 PSS 传递函数框图

Fig. 2 Transfer function of PSS

研究中相位校正环节时间常数  $T_2$ 、复位环节时间常数  $T_5$  取为定值, 以 PSS 放大倍数  $K_{PSS}$ 、相位校正环节时间常数  $T_1$  为优化变量。

## 2.2 多 PSS 参数协调优化模型及求解算法

为避免可能的不良相互作用、最大化 PSS 对系统阻尼的调节能力, 本文所建立的多 PSS 参数协调优化模型如下<sup>[17-18]</sup>。

### 1) 优化变量

若系统中 PSS 个数为  $n$ , 则待优化向量由各 PSS 的放大倍数  $K_{PSS}$  以及相位校正环节时间常数  $T_1$  组成, 如式(5)。

$$\mathbf{x} = (K_{PSS1}, K_{PSS2}, \dots, K_{PSSn}, T_{11}, T_{12}, \dots, T_{1n}) \quad (5)$$

### 2) 目标函数

为充分挖掘 PSS 的调节能力, 尽可能提高系统小干扰稳定性, 该模型以所有机电模式中的最小阻尼比最大化为目标, 如式(6)。

$$J = \max(\min(\varepsilon(\mathbf{x})_i, i \in S)) \quad (6)$$

式中:  $\varepsilon(\mathbf{x})_i$  受优化变量  $\mathbf{x}$  影响的第  $i$  个机电振荡模式的阻尼比;  $S$  为所有机电振荡模式的集合。

### 3) 约束条件

主要为各待优化参数可调范围。

$$\text{s.t.} \quad \begin{cases} K_{PSS\min} \leq K_{PSSi} \leq K_{PSS\max} \\ T_{1\min} \leq T_{1i} \leq T_{1\max} \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $K_{PSS\max}$ 、 $K_{PSS\min}$  和  $T_{1\max}$ 、 $T_{1\min}$  分别为  $K_{PSSi}$  与  $T_{1i}$  的上下限约束。

对于上述复杂非线性多连续变量优化模型, 本文采用改进的 PGSA 优化算法 (Improved Plant Growth Simulation Algorithm, IPGSA) 进行求解<sup>[17-18]</sup>。该算法将云模型应用于 PGSA 的生长点选取, 解决了生长点随迭代次数增加呈指数增长, 进而影响搜索效率和全局搜索能力的问题, 能够更好地约束搜索空间, 提高算法的搜索速度和收敛速度。

## 3 滚动优化搜索极限边界策略

现有注入功率空间上小干扰稳定域研究在搜索边界点时, 通常从初始工作点(搜索点)出发, 沿选

定射线方向以一定的步长改变发电机出力、不考虑控制器参数变化, 通过不断求解新的平衡点下系统状态矩阵特征值, 直至达到临界阻尼要求。

需要注意的是, 随着线性化平衡点的改变, 对应运行状态下的系统最优阻尼控制器参数亦可能随之改变。因而, 即使现有研究中基于的控制参数为初始工作处的最优控制器参数, 其对于其他平衡点、特别是现有研究的预想边界点而言不一定为最优参数, 即所得预想边界点可能因未充分挖掘系统的全部阻尼能力而趋于保守。换言之, 在预想边界点处可能可以通过控制器参数优化设计, 提升系统的小干扰稳定性, 进一步外拓小干扰稳定边界点。

基于上述分析, 本文基于滚动优化思路, 提出一种通过逐步外拓的小干扰稳定极限边界点搜索策略。其流程如图 3 所示, 主要包括以下步骤。

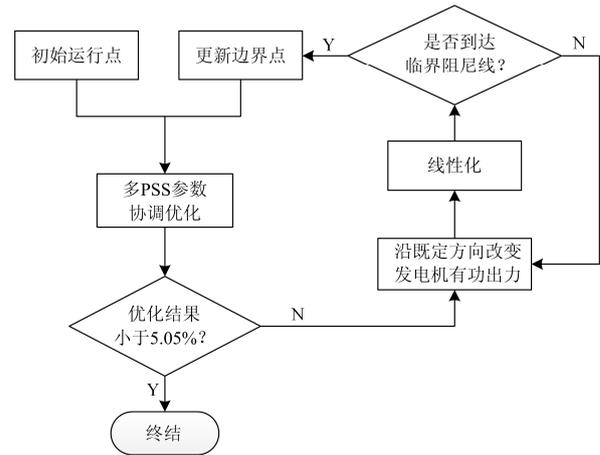


图 3 滚动优化逻辑框图

Fig. 3 Logic diagram of rolling optimization

1) 在初始运行点处, 通过求解所建立多 PSS 参数协调优化模型得到最优 PSS 参数组合。

2) 基于所得最优 PSS 参数组合, 沿一固定出力方向改变发电机出力, 不断计算相应的机电模式阻尼比直至其达临界阻尼线, 记此时的运行点为预想边界点。

3) 在预想边界点处, 基于所建立协调优化模型重新进行 PSS 参数寻优, 更新最优 PSS 参数组合。

4) 若新的最优 PSS 参数组合下, 系统的最小阻尼大于 5.05%(为保障系统动态性能, 系统临界阻尼比取为 5%, 并在此临界值基础上考虑 0.01 的误差为判断标准), 说明系统阻尼仍保有一定的阻尼能力, 未达极限边界点, 则跳转步骤 2), 继续外拓、改变发电机出力, 更新预想边界点。

5) 若新的最优 PSS 参数组合下, 系统的最小阻尼比低于 5.05%, 说明系统阻尼已经无法通过 PSS 优化继续提升或者可调空间已经很小, 认为已达该方向的极限边界点。

## 4 算例验证

### 4.1 算例验证

本文采用 4 机 2 区系统对所提策略进行验证, 系统拓扑结构如图 4 所示。

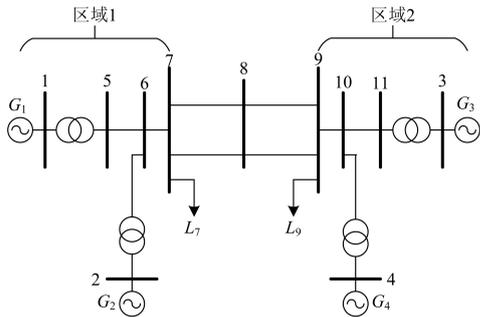


图 4 4 机 2 区域系统结构图

Fig. 4 4-machine-2-area benchmark

基于如下运行方式作为初始态进行分析<sup>[19]</sup>:

发电机 G1 有功出力为 700 MW, 发电机 G2 有功出力为 700 MW, 发电机 G3 有功出力为 718 MW, 发电机 G4 有功出力为 700 MW, 区域 1 中 BUS7 处有功负荷 L1 为 967 MW, 区域 2 中 BUS9 处有功负荷 L2 为 1 767 MW, 区域 1 向区域 2 输送的有功功率约为 400 MW。经模态分析可得机组 2、机组 3 为局部模式和区间模式共同的强相关机组, 所以选定在其上分别装设 PSS 进行研究。

为便于与所提方法进行比较, 本文首先计算了不含 PSS 情况下初始运行点的模式信息, 如表 1 所示( $P_{7-8}$  为节点 7、8 间联络线功率), 以及配置有未经参数优化的 PSS 情况下初始运行点的模式信息, 如表 2 所示, 对应的 PSS 参数如表 3 所示。

表 1 不含 PSS 情况下初始运行点基本信息

Table 1 Basic situation of initial point without PSS

模式	频率/Hz	阻尼比/%	$P_{G1}/p.u.$	$P_{G2}/p.u.$	$P_{7-8}/p.u.$
1	1.054	2.47			
2	1.018	2.46	0.777 8	0.777 8	0.445 3
3	0.550	2.92			

表 2 配置未经优化的 PSS 情况下初始运行点基本信息

Table 2 Basic situation of initial point without optimal settings of PSS

模式	阻尼比/%	$P_{G1}/p.u.$	$P_{G2}/p.u.$	$P_{7-8}/p.u.$
1	3.21			
2	2.91	0.777 8	0.777 8	0.445 3
3	3.93			

表 3 未经优化的 PSS 参数

Table 3 Parameter value of PSS without optimization

$K_{PSS1}$	$K_{PSS2}$	$T_{11}/s$	$T_{12}/s$
1.200 0	1.200 0	0.500 0	0.500 0

45°方向上滚动优化策略展示如下。

具体地, 以下选定 G1、G2 有功出力为可调变量构成二维空间, 基于所提滚动优化策略沿 1:1 射线(45°)增长方向进行小干扰稳定极限边界点的搜索。为方便理解, 记每轮外拓所得到的预想边界点为: 边界点 1, 边界点 2, ...。以下分步骤具体说明。

1) 为搜索边界点 1, 基于初始运行点通过建立的多 PSS 参数协调优化模型得一组最优 PSS 参数组合, 如表 4 所示。

表 4 初始优化参数取值情况

Table 4 Parameter value of initial optimization

$K_{PSS1}$	$K_{PSS2}$	$T_{11}/s$	$T_{12}/s$
2.081 0	2.500 0	0.884 6	1.000 0

2) 边界点 1 搜寻: 从初始运行点出发沿 1:1 射线增长方向增加发电机出力直至某一机电模式阻尼比下降到临界值以下时, 可得边界点 1(0.913 111 p.u., 0.913 111 p.u.), 在该状态下, 系统各机电模式基本信息如表 5 所示。

表 5 边界点 1 基本信息

Table 5 Basic situation of boundary point 1

模式	阻尼比/%	$P_{G1}/p.u.$	$P_{G2}/p.u.$	$P_{7-8}/p.u.$
1	5.85			
2	6.44	0.913 111	0.913 111	0.697 0
3	5.06			

3) 由表 5 中数据可见, 此时模式 3 阻尼比至临界值 5.06%。根据所提滚动优化策略, 在边界点 1(0.913 111p.u., 0.913 111 p.u.)处重新进行 PSS 参数寻优, 更新最优 PSS 参数组合, 如表 6 所示。

表 6 更新后优化参数取值情况

Table 6 Parameter value after updating

$K_{PSS1}$	$K_{PSS2}$	$T_{11}/s$	$T_{12}/s$
1.832 7	2.500 0	0.900 1	1.000 0

采取该 PSS 参数组合优化后, 此时系统各机电

模式信息如表 7 中所示。

表 7 新参数下优化效果

Table 7 Optimal effect with updating parameter

模式	阻尼比/%
1	5.48
2	6.44
3	5.48

显然可见, 经 IPGSA 优化后具有最小阻尼比的模式 3 的阻尼比由 5.06% 提升到了 5.48%。也说明了此时系统并未达到该方向(45°)上的极限边界。采用该 PSS 参数组合(1.832 7, 0.900 1, 2.5, 1.0), 从边界点 1 继续沿 45°方向增长发电机出力, 直至到新的边界点(0.918 556 p.u., 0.918 556 p.u.), 记为边界点 2, 具体各机电模式信息如表 8 所示。

表 8 边界点 2 基本信息

Table 8 Basic situation of boundary point 2

模式	阻尼比/%	$P_{G1}$ /p.u.	$P_{G2}$ /p.u.	$P_{7-s}$ /p.u.
1	5.43			
2	6.35	0.918 556	0.918 556	0.706 8
3	5.02			

根据所提策略, 继续在边界点 2(0.918 556 p.u., 0.918 556 p.u.)处进行 PSS 参数寻优, 更新最优 PSS 参数组合, 而后重复增长发电机出力寻找新的边界点的过程, 直至图 3 中所述的终止条件被满足, 则输出最终结果。

4) 根据所提策略, 在 PSS 参数(1.407 8, 1, 2.500 0, 1.000 0)下, 在 45°方向上系统到达边界点 5(0.928 667 p.u., 0.928 667 p.u.), 所对应各机电模式具体信息如表 9 所示。

表 9 边界点 5 信息

Table 9 Basic situation of boundary point 5

模式	阻尼比/%	$P_{G1}$ /p.u.	$P_{G2}$ /p.u.	$P_{7-s}$ /p.u.
1	5.13			
2	6.18	0.928 667	0.928 667	0.727 4
3	5.00			

而当根据所提策略继续在边界点 5(0.928 667 p.u., 0.928 667 p.u.)处进行搜寻最优 PSS 参数组合时, 所得最优参数结果见表 10, 相应振荡模式信息见表 11。

由表 9 和表 11 对比可得, 系统机电模式最小阻尼比仅从 5% 提升到 5.02%, 已满足图 3 所示的终止条件, 此时滚动优化停止, 系统达到 45°方向上满

表 10 更新后优化参数取值情况

Table 10 Parameter value after updating

$K_{PSS1}$	$K_{PSS2}$	$T_{11}/s$	$T_{12}/s$
1.361 8	2.500 0	1.000 0	0.976 9

1.361 8	2.500 0	1.000 0	0.976 9
---------	---------	---------	---------

表 11 新参数下优化效果

Table 11 Optimal effect with updating parameter

模式	阻尼比/%
1	5.02
2	5.99
3	5.02

足小干扰稳定的极限边界点, 对应的发电机出力为(0.928 667 p.u., 0.928 667 p.u.)。

为验证极限边界所对应的 PSS 参数可满足该方向上的极限边界点之内的运行点具有小干扰稳定能力, 将该组 PSS 参数代回前几轮的迭代边界点, 得到如图 5 所示的发电机有功出力—阻尼比曲线。

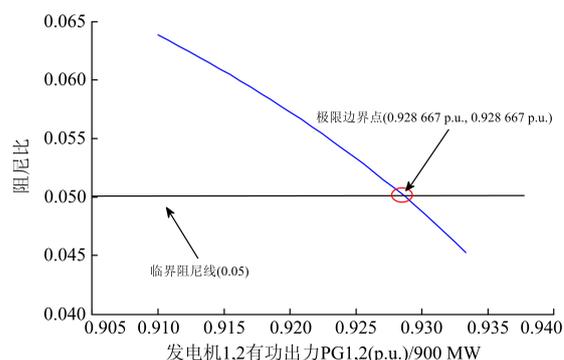


图 5 发电机有功出力—阻尼比曲线

Fig. 5 Curve of PG—damping ratio

另外, 为直观考察优化效果, 以图形方式进行结果展示。基于所提方法在 1:0.577(30°)、1:1(45°)增长方向以及 1:1.732(60°)增长方向上的边界搜索结果如图 6 所示。其中, 蓝色点代表初始边界点、红色点代表极限边界点。

类似地, 如取每 15°为一个间隔作为一个搜索方向, 那么搜索全平面 360°需要 24 个方向, 进而可确定全平面极限小干扰稳定域。

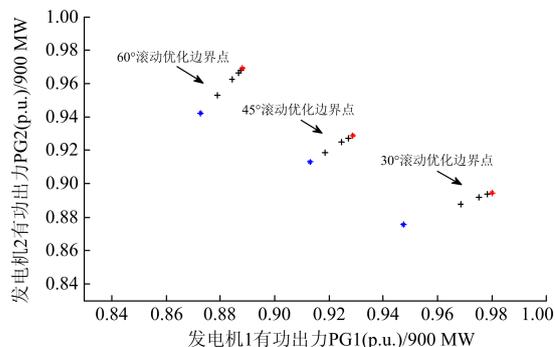


图 6 30°、45°和 60°滚动优化效果图

Fig. 6 Result of rolling optimization in the

direction of 30°, 45° and 60°

## 4.2 结果分析

1) 45°方向上, 四轮滚动优化情况具体如下: 边界点 1, 出力为 0.913 111 p.u.; 边界点 2, 出力为 0.918 556 p.u.; 边界点 3, 出力为 0.924 778 p.u.; 边界点 4, 出力为 0.927 111 p.u.; 边界点 5, 出力为 0.928 667 p.u.。由此可看出每轮优化都使得发电机出力有所增长, 对比初始边界点与极限边界点, 两者对应的出力极限从比例上看增加了 1.7%, 换算为出力功率值可增加 14 MW 的发电机出力; 而考虑极限边界点与不含 PSS 情况以及未经优化的 PSS 情况对比时, 由于上述两种情况其阻尼比均未达到 5%, 保守计算即以初始运行点与极限边界对比, 比例上增加了 19.4%, 出力功率值增加 135.8 MW, 而从联络线功率角度考虑, 区域间传输功率增加 63.4%, 即 253.9 MW。这表明了稳定边界点确实向外拓展了。

2) 观察图 5 可知, 在极限边界点出力以下, 都是可以满足 5% 的临界阻尼比的要求的, 这也就说明了经过滚动优化的最终轮次而得到的 PSS 参数是可以满足在临界出力以下至初始运行点间的所有发电机出力情况的。

以该滚动优化方法的思路进行其他方向极限边界点的搜寻, 同样可寻得其他方向的极限边界点, 进而确定更为精确的全平面小干扰稳定极限边界。

## 5 结论

本文为考察阻尼控制器参数变化对小干扰稳定域边界的影响, 以 PSS 为例, 建立了系统最小阻尼比最大化为目标的多 PSS 参数协调优化模型, 并对该模型采用 IPGSA 优化算法进行求解, 提出了基于滚动优化思路的极限边界搜索策略, 算例验证了该策略的有效性和优越性。通过这样不断更新优化参数组合, 进一步更新预想边界点的多轮滚动优化策略寻得的小干扰稳定域边界与通过常规方法获得的边界相比, 进一步向外拓展了。关于该方法的在线应用以及在大系统中应用效果都将是后续研究的努力方向。

## 参考文献

[1] 陈月辉, 张文朝, 徐遐龄, 等. 基于前 K 最短路径的电力系统低频振荡源定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(13): 117-123.  
CHEN Yuehui, ZHANG Wenchao, XU Xialing, et al. Locating method of low frequency oscillation source based on K shortest paths[J]. Power System Protection

and Control, 2017, 45(13): 117-123.  
[2] 徐伟, 刘建坤, 胡昊明, 等. 基于集群计算的特大型电网特征值搜索策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(2): 42-47.  
XU Wei, LIU Jiankun, HU Haoming, et al. Eigenvalue searching strategy for ultra large scale power grid based on cluster computing[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(2): 42-47.  
[3] 宋墩文, 温渤婴, 杨学涛, 等. 基于多信息源的大电网低频振荡预警及防控决策系统[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(21): 54-60.  
SONG Dunwen, WEN Boying, YANG Xuetao, et al. A multiple information sources based early warning and preventive control system for low-frequency oscillation in large-scale power system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(21): 54-60.  
[4] 雷强, 刘光晔, 朱永强, 等. 基于 EEMD 和矩阵束算法的低频振荡主导模式识别[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(12): 56-62.  
LEI Qiang, LIU Guangye, ZHU Yongqiang, et al. Identification of the dominant mode based on EEMD and matrix pencil algorithm for low frequency oscillations[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(12): 56-62.  
[5] 余贻鑫, 王成山. 电力系统稳定性的理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 1999.  
[6] 贾宏杰, 王伟, 余晓丹, 等. 小扰动稳定域微分拓扑学性质初探: (一)小扰动稳定域非凸边界和空洞现象示例[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(20): 20-23.  
JIA Hongjie, WANG Wei, YU Xiaodan, et al. Tentative study on differential topological characteristics of the small signal stability region: part one illustration of nonconvex boundary and instability region (hole) in small signal stability region[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(20): 20-23.  
[7] 贾宏杰, 余晓丹. 小扰动稳定域微分拓扑学性质初探: (二)小扰动稳定域内部空洞出现机理分析[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(21): 15-18.  
JIA Hongjie, YU Xiaodan. Tentative study on differential topological characteristics of the small signal stability region: part two theoretical analysis for the existing of instability region (hole) in small signal stability region[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(21): 15-18.  
[8] 吴熙, 蒋平. 采用阻尼水平定义边界的实用电力系统小扰动稳定域[J]. 电网技术, 2013, 37(8): 2173-2179.  
WU Xi, JIANG Ping. A practical power system small signal stability region using boundary defined by damping

- level[J]. Power System Technology, 2013, 37(8): 2173-2179.
- [9] 余晓丹, 韩瀛, 贾宏杰. 电力系统扩展小扰动稳定域及其研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(21): 22-28.  
YU Xiaodan, HAN Ying, JIA Hongjie. Study on extended small signal stability region of electrical power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(21): 22-28.
- [10] 杨素, 刘锋, 梅生伟, 等. 基于阻尼比的小干扰安全域多项式近似边界及其可信域[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(17): 8-13.  
YANG Su, LIU Feng, MEI Shengwei, et al. Polynomial approximation of damping-ratio-based small-signal security region boundaries and its credible region[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(17): 8-13.
- [11] 刘红超, 雷宪章, 李兴源, 等. 互联电力系统中 PSS 的全局协调优化[J]. 电网技术, 2006, 30(8): 1-6.  
LIU Hongchao, LEI Xianzhang, LI Xingyuan, et al. Global coordinated optimization of PSSs in interconnected power systems[J]. Power System Technology, 2006, 30(8): 1-6.
- [12] 倪以信. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [13] KUNDUR P, KLEIN M, ROGERS G J. Application of power system stabilizers for enhancement of overall system stability[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1989, 4(2): 614-626.
- [14] 孙强. 电力系统小扰动稳定域及低频振荡[D]. 天津: 天津大学, 2007.  
SUN Qiang. Power system small signal stability region and low-frequency oscillations[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007.
- [15] 孙强, 余贻鑫. 小扰动稳定域边界的超平面拟合及应用[J]. 天津大学学报, 2008, 41(6): 647-652.  
SUN Qiang, YU Yixin. Hyper-plane approximation of boundary of small signal stability region and its application[J]. Journal of Tianjin University, 2008, 41(6): 647-652.
- [16] YU Xiaodan, HAN Ying, JIA Hongjie. Power system extended small signal stability region[C] // MELECON 2006-2006 IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, May 16-19, 2006, Malaga, Spain: 998-1002.
- [17] 张健南, 林涛, 余光正, 等. 大规模电力系统阻尼控制器协调优化方法[J]. 电网技术, 2014, 38(9): 2466-2472.  
ZHANG Jiannan, LIN Tao, YU Guangzheng, et al. Coordinated optimization of damping controllers in large-scale power system[J]. Power System Technology, 2014, 38(9): 2466-2472.
- [18] 付红军, 潘励哲, 林涛, 等. 基于改进模拟植物生长算法的 PSS 与直流调制的协调优化[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(11): 75-80.  
FU Hongjun, PAN Lizhe, LIN Tao, et al. Coordinative optimization of PSS and DC-modulation based on improved PGSA[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(11): 75-80.
- [19] PAN Mingsen, LIN Tao, DING Guili, et al. A coordination scheme of FACTS-based WADC to improve small signal stability with transient stability constraints in multi-machine system[C] // Power & Energy Society General Meeting, July 26-30, 2015, Denver, USA: 1-5.

收稿日期: 2017-08-30; 修回日期: 2017-10-17

作者简介:

盛逸标(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制; E-mail: yibiaosheng@163.com

林涛(1969—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统运行与控制、电力系统继电保护、新能源发电与智能电网、电能质量分析与控制; E-mail: tlin@whu.edu.cn

陈汝斯(1991—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制。

(编辑 周金梅)