

DOI: 10.7667/PSPC201834

广域电力系统稳定器参数的两阶段协调优化方法

王鹏达^{1,2}, 陈玉蛟³, 周斌^{1,2}, 黎灿兵^{1,2}, 杨斌⁴, 曹相阳⁴

(1. 能源互联网智能信息分析与综合优化湖南省重点实验室(湖南大学), 湖南 长沙 410082;
2. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082; 3. 国网郑州供电公司, 河南 郑州 450000;
4. 国网山东省电力公司经济技术研究院, 山东 济南 250001)

摘要: 广域电力系统稳定器(Wide Area Power System Stabilizer, WAPSS)对电力系统的区间低频振荡能够起到良好的阻尼作用。同时, WAPSS 参数的协调优化设计能够避免因增大某一振荡模式的阻尼而造成其他模式阻尼恶化的问题, 提出一种两阶段设计的 WAPSS 参数协调优化方法。第一阶段基于留数相位补偿原理设计 WAPSS 超前滞后环节的参数。第二阶段, 将整定后的超前滞后环节参数代入 WAPSS 传递函数以减少决策变量, 再以提高低频振荡模式和近虚轴模式的阻尼为多优化目标, 利用基于精英替换策略的改进教与学算法(Teaching-Learning-Based Optimization, TLBO)对 WAPSS 的增益参数进行优化。通过将超前滞后环节参数和增益参数两阶段协调优化, 不仅减少了每次迭代计算时间, 而且达到了提高电力系统阻尼的目的。最后通过两区四机的仿真算例验证了该方法的有效性。

关键词: 低频振荡; 广域电力系统稳定器; 改进的教与学算法; 留数

A two-stage coordinated optimization method of WAPSS parameters

WANG Pengda^{1,2}, CHEN Yujiao³, ZHOU Bin^{1,2}, LI Canbing^{1,2}, YANG Bin⁴, CAO Xiangyang⁴

(1. Hunan Key Laboratory of Intelligent Information Analysis and Integrated Optimization for Energy Internet, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 3. State Grid Zhengzhou Power Supply Company, Zhengzhou 450000, China; 4. Economic & Technology Research Institute, State Grid Shandong Electric Power Company, Jinan 250001, China)

Abstract: Wide Area Power System Stabilizer (WAPSS) plays good damping effect on low frequency oscillation of power system. Meanwhile, coordinated optimization method of WAPSS parameters can avoid weakening damping of other oscillation modes when improving damping of one mode. In this paper, a two-stage coordination optimization method of WAPSS parameters is proposed. At the first stage, WAPSS lead-lag link parameters are designed based on the residual phase compensation principle. At the second stage, the optimized lead-lag link parameters are substituted into the WAPSS transfer function to reduce the decision variables, and then WAPSS gain parameter is optimized by improved Teaching-Learning-Based Optimization (TLBO) algorithm based on elitist strategy to improve the damping of the low frequency oscillation and near-imaginary axis modes which are multi-objective optimization. A two-stage coordinated optimization method of WAPSS lead-lag link and gain parameters can improve the system damping while reducing the optimization time. Finally, the simulation results show that the proposed method is correct and effective.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51722701 and No. 51507056).

Key words: low frequency oscillation; wide area power system stabilizer; TLBO; residual

0 引言

随着互联电网规模的日益扩大, 电力系统的稳

定问题也变得愈加复杂^[1-2]。其中, 低频振荡是影响系统安全稳定运行的常见问题之一。电力系统稳定器(Power System Stabilizer, PSS)能够有效提高电力系统阻尼, 起到抑制局部低频振荡的效果。但是, 采用本地反馈信号的 PSS 不能很好地反映区间振荡

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51722701, 51507056)

的模式信息,对区间振荡的阻尼效果不佳^[3-5]。

近年来,以相量测量装置为基本单元的广域测量系统在电力系统得到迅速发展,为 WAPSS 的实现提供了可能^[6-8]。目前,已有很多学者利用广域信号设计阻尼控制器来抑制区间低频振荡。文献[3]和[9]中采用双通道控制结构设计了本地和广域两级 PSS,改善了本地和区间振荡的阻尼效果;文献[10]中设计了自适应的 WAPSS,能够为不同的工况提供正阻尼。文献[11-13]中根据信号的可观性和可控性选取了广域控制器的反馈信号和安装位置,对 WAPSS 的安装设计起到了指导作用。文献[14-16]分析了反馈信号时滞对广域控制器阻尼效果的影响,提出了分段补偿、基于预测的时滞补偿和考虑变时滞及丢包处理的补偿手段,从而提高了系统的稳定性和鲁棒性。

从上述文献可知,WAPSS 能够提高系统对区间振荡模式的鲁棒性。但在多机系统中,为了提高主导振荡模式的阻尼而配置 PSS 的措施,很有可能降低其他振荡模式阻尼比^[17-19]。因此需要对 WAPSS 进行协调优化设计。文献[19]利用多信号的 Prony 辨识结果得到机组的综合可观性和可控性指标,并利用极点配置的原理设计 PSS 的参数,为实现 WAPSS 的协调设计提供了研究基础。文献[20-21]中设置了不同的优化目标,利用粒子群算法对广域和本地 PSS 参数进行了全局优化,起到了提高系统稳定性的作用。文献[22]采用差分优化算法对 WAPSS 参数进行了整定,抑制了接入风机后系统的区间低频振荡。

上述文献分别对 WAPSS 配置和参数的全局优化进行了协调设计,并验证了 WAPSS 的协调优化能够提高电力系统稳定性。但全局优化的方法并未考虑 PSS 相位补偿的特性,有可能造成过补偿或欠补偿^[9]。此外,互联电网的规模越大 PSS 个数越多,使得参数协调存在以下问题:一方面,多机系统的模型阶数升高。以发电机模型(含励磁、调速系统以及 PSS)为例,系统每增加一台机组,状态变量将增加 12 个,模型升高 12 阶^[23]。另一方面,决策变量增多。以 N 个 PSS 的系统为例,如果每个 PSS 有 M 个待优化参数,决策变量的搜索范围是一个 $M \times N \times O$ 的高维空间(O 是种群规模)。传统优化方法在解决上述带约束的高维、非线性、多峰值优化问题时容易陷入局部最优问题^[24-25]。智能优化算法的发展虽然为解决此类问题提供了新的思路,但是决策变量增多后,为了满足系统阻尼需求,导致种群规模和迭代次数增加,大大增加了算法的求解时间,降低了智能算法的工程实用性。因此,在提高

振荡模式阻尼的前提下,兼顾 PSS 的相位补偿特性并且减少优化问题求解时间的 WAPSS 参数协调优化方法还有待进一步研究。

为此本文提出了一种 WAPSS 参数分步协调优化方法。首先考虑 PSS 的相位补偿特性,根据留数矩阵整定 PSS 超前滞后环节的参数。此时,WAPSS 的参数优化问题转变为仅对增益的协调优化问题,决策变量的数目也从 $M \times N$ 个减小至 N 个。其次,为了避免提高主导振荡模式阻尼的同时造成其他模式的阻尼恶化,本文以提高低频振荡模式和近虚轴模式的阻尼为多优化目标,利用改进的 TLBO 算法优化 WAPSS 的增益参数。最终通过分步设计的方案减少决策变量、节省迭代计算时间,并结合 WAPSS 参数协调实现提高电力系统阻尼的目的。

1 系统模型及 WAPSS 分步设计方法

1.1 多机系统的线性化模型

本文中,WAPSS 采用双通道结构,远端机组 g 和本地机组 l 的反馈信号通过 PSS 的放大、隔直和相位补偿环节后共同作用于本地机组的励磁电压调节器,构成控制回路,其控制原理框图如图 1 所示。其中 K_p , T_w , T_1 和 T_2 分别是 PSS 增益、滤波和相位补偿环节的参数,取值范围分别为 $[1, 100]$, $[0.5, 20]$, $[0.01, 1]$ ^[25]; K_A , T_A 是励磁电压调节器参数。

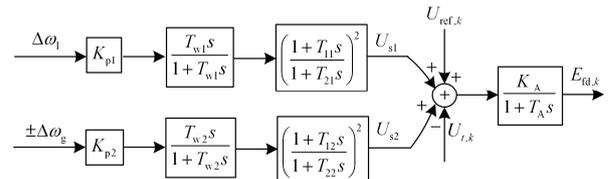


图 1 双通道 WAPSS 及励磁系统框图

Fig. 1 Block diagram of excitation system with two-channel WAPSS

对上述系统在稳定运行点处进行线性化,其状态空间方程如式(1)所示。

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} \end{cases} \quad (1)$$

式中: \mathbf{x} 为 n 维状态向量; \mathbf{u} 为 p 维输入向量; \mathbf{y} 为 q 维输出向量; \mathbf{A} 为 $n \times n$ 阶状态矩阵; \mathbf{B} 为 $n \times p$ 阶输入矩阵; \mathbf{C} 为 $q \times n$ 阶输出矩阵。对 \mathbf{A} 进行特征分析,可以得到该系统的 n 个特征值。每个特征根对应了一个振荡模式,相关因子大于 1,且振荡频率在 $[0.1, 2.5]$ 范围内的模式为低频振荡模式,其中本地和区间振荡模式的频率范围分别是 $[0.8, 2.5]$ 和 $[0.1, 0.8]$ 。协调优化 WAPSS 参数的目的在于提高这些模式的阻尼比,进而提高系统的稳定性。

1.2 WAPSS 的参数优化方法

对于多机系统, 增大某一机组上 PSS 的增益, 可能使得其他机组的阻尼恶化。此外, 由励磁系统框图可知, 广域控制器和本地控制器共同作用于励磁电压调节器, 并不是解耦关系, 所以在设计 WAPSS 的参数时需要考虑各个机组间的协调。

WAPSS 需要整定的参数包括两类, 一类是增益参数 K_{p1} 、 K_{p2} , 另一类是超前滞后环节的时间常数 T_{11} 、 T_{21} 、 T_{12} 和 T_{22} 。显然, 随着互联系统规模的扩大, PSS 的个数增多, 除了系统模型的阶数升高, 待优化的参数也随之增多。而 PSS 的参数优化又是一个高维非线性优化问题, 决策变量的增多, 导致种群规模随之扩大, 求解难度增大。为此, 本文提出 WAPSS 参数分步协调优化的方法, 流程如图 2 所示, 具体步骤如下。

1) 模型线性化。在稳定运行点处对多机系统进行线性化, 得到系统的状态矩阵 A 和输入、输出矩阵 B 、 C , 如公式(1)所示。

2) 模式分析。对矩阵 A 进行特征根分析, 根据相关因子筛选出低频振荡模式 λ_q ($\lambda_q = \sigma_q \pm j\omega_q$, 是系统的第 q 个特征根, $q \in [1, n]$) 及其对应的留数矩阵 R_q 。各振荡模式的振荡频率和阻尼比为

$$\begin{aligned} f_q &= \frac{\omega_q}{2\pi} \\ \zeta_q &= -\frac{\sigma_q}{\sqrt{\sigma_q^2 + \omega_q^2}} \end{aligned} \quad (2)$$

3) WAPSS 控制回路设计。针对区间振荡模式, 根据输入、输出信号的可控性和可观性指标选择 WAPSS 的安装位置以及反馈信号的所在机组。

4) 时间常数整定。根据留数矩阵和模式振荡频率 f_q 求出待补偿相位, 进一步求出双通道 WAPSS 相位补偿环节参数的值 T_{11} 、 T_{21} 、 T_{12} 和 T_{22} 。

5) 减少决策变量。将步骤(4)所求的相位补偿参数的值 T_{11} 、 T_{21} 、 T_{12} 和 T_{22} 代入 WAPSS 的传递函数, 此时 WAPSS 待优化的参数仅剩增益 K_{p1} 、 K_{p2} 。跟全局优化相比, 分步优化的方法使决策变量的个数从 $3 \times N$ 个减小至 N 个。此外, 在优化过程中仅需处理增益参数, 节省单次迭代的计算时间。

6) 选择多目标优化函数。在 WAPSS 的参数协调优化中, 既要考虑改善区间低频振荡模式的阻尼, 又不能对本地模式造成恶化。此外, 如果靠近虚轴的模式阻尼较小, 同样会影响系统的稳定性^[26]。为了避免优化过程中低频振荡模式向这部分模式“借”阻尼, 所以本文将靠近虚轴的非低频振荡模式纳入优化目标, 形成多目标优化函数。

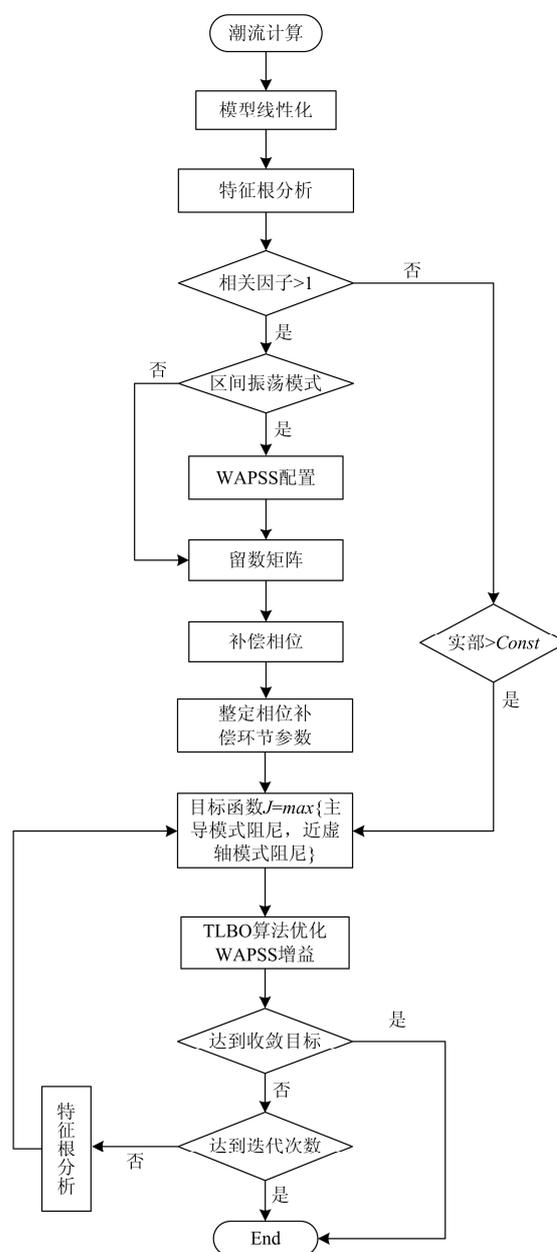


图 2 WAPSS 两阶段协调优化流程图

Fig. 2 Two-stage optimization flow chart of WAPSS parameters

7) 参数协调优化。Rao 等人提出的 TLBO 算法在机器学习问题上具有易理解、参数少、收敛快等优点^[27]。为进一步提高算法的效率和稳定性, 本文采用一种精英替换策略提高 TLBO 算法的搜索能力和收敛能力。因此本文选择改进的 TLBO 算法协调优化 WAPSS 的增益参数。根据步骤 1)–6) 确定决策变量和目标函数后, 设置迭代次数和收敛目标, 利用改进的 TLBO 算法多次迭代求解 WAPSS 的优化增益。同时, 目标函数不仅包含区间振荡模式阻尼, 而且考虑了由于 WAPSS 优化造成的本地振荡

模式阻尼恶化的情况,做到区间和本地两种振荡模式的协调优化。

另外,本文同文献[12, 14, 19]一样,假设信号的采集和处理是在同一时间完成的,不考虑广域系统延时的相位补偿设计。但在实际工程中,需要注意到系统的输入和输出回路均存在不同程度的延时。时滞问题使得广域控制变得更加复杂,如果不采取适当的补偿方式可能会削弱广域控制器的阻尼效果,严重时甚至起到反作用^[8,14-16]。

2 WAPSS 参数设计

2.1 WAPSS 配置原则

WAPSS 的安装地点以及反馈信号的选取是影响 WAPSS 阻尼效果的重要因素之一。WAPSS 的反馈输入信号类型有发电机转速、功角、电磁或联络线功率。本文采用发电机转速作为 WAPSS 的反馈信号,并利用文献[12]中的可观性和可控性指标来指导 WAPSS 的配置。振荡模式 i 的综合可观性和可控性指标如式(3)所示。

$$H_{\text{coi}}(j, k) = h_{\text{oj}}(i) h_{\text{ck}}(i) \quad (3)$$

式中: $H_{\text{coi}}(j, k)$ 是振荡模式 i 的综合可观性和可控性指标; $h_{\text{oj}}(i)$ 是输出信号 $j(j \in [1, p])$ 对振荡模式 i 的可观性指标; $h_{\text{ck}}(i)$ 是输入信号 $k(k \in [1, q])$ 对振荡模式 i 的可控性指标,如式(4)所示。

$$h_{\text{oj}}(i) = \frac{|C_i \phi_i|}{\|\phi_i\| \|C_j\|} \quad (4)$$

$$h_{\text{ck}}(i) = \frac{|B_k \psi_i^T|}{\|\psi_i\| \|B_k\|}$$

式中: ϕ_i 、 ψ_i 分别是特征值 λ_i 对应的左、右特征向量; C_j 是 C 矩阵的第 j 行; B_k 是 B 矩阵的第 k 列。假设 H_{max} 是 $H_{\text{coi}}(j, k)$ 中的最大值,根据式(5)对 $H_{\text{coi}}(j, k)$ 进行标么化。一般取最大标么值对应的机组安装 WAPSS,同时取其对应的输出信号作为 WAPSS 的反馈输入信号。

$$I_{\text{coi}}(j, k) = \frac{H_{\text{coi}}(j, k)}{H_{\text{max}}} \quad (5)$$

2.2 基于留数矩阵的相位补偿参数设计

式(1)对应的传递函数可以用留数矩阵表示:

$$G(s) = \sum_{i=1}^n \frac{R_i}{s - \lambda_i} \quad (6)$$

R_i 是模式 i 的留数矩阵:

$$R_i = C \phi_i \psi_i^T B \quad (7)$$

则第 j 个输出和第 k 个输入的留数则可记为

$$R_{i,j,k} = C_j \phi_i \psi_i^T B_k \quad (8)$$

对于机组 g ,本地和广域的 PSS 分别反馈机组 g 和 l 的输出信号,通过控制环节作用于机组 g 的励磁电压调节器的输入。因此,根据式(8)可以分别求出本地和广域的 PSS 对应的留数。PSS 在模式 i 处的需要补偿的相位:

$$\theta = 180^\circ - \arg R_{i,j,k} \quad (9)$$

根据待补偿的相位不难求出 PSS 的参数 T_1 、 T_2 ,本文不做赘述。

2.3 基于 TLBO 算法的增益参数协调优化设计

阻尼比是衡量系统稳定性的重要指标,WAPSS 旨在增大区间振荡模式的弱阻尼,而本地振荡模式中较弱的阻尼则有可能在 WAPSS 优化设计时被恶化,因此为了避免在改善某一振荡模式阻尼的同时恶化其他模式的阻尼,WAPSS 的协调设计需要同时考虑本地和区间振荡模式。此外,本文考虑了靠近虚轴的非主导振荡模式的阻尼。可以取多目标为

$$\begin{cases} F_1 = \frac{1}{\sqrt[4]{\prod_{m=1}^4 \sqrt{\sum |\sigma_m| \cdot \sum \zeta_m \cdot r}}} \\ F_2 = -\log_2(\min \lambda_i) \end{cases} \quad (10)$$

定义目标函数为

$$\begin{aligned} J &= \min(F_1 + F_2) \\ \text{s.t. } &K_{\min} \leq K \leq K_{\max} \\ &\sigma_m < \sigma_{m0} < 0 \\ &\zeta_m > \zeta_{m0} \end{aligned} \quad (11)$$

其中:函数 F_1 中的 σ_m 、 ζ_m 分别是振荡模式的实部和阻尼比;函数 F_2 考虑非主导振荡模式的阻尼; λ_i 是系统的特征根向量; σ_{m0} 、 ζ_{m0} 是对应模式的初始实部和阻尼比, r 是目标函数的惩罚因子,如果 $\sigma_m < \sigma_{m0}$, $r=1$,否则 $\lambda=0.001$; K_{\min} 、 K_{\max} 是增益 K 的下限和上限; m 代表不同类型的振荡模式,定义如下:

$$m = \begin{cases} 1, & 2.5 \geq f \geq 0.8, \text{本地振荡模式} \\ 2, & 0.8 > f \geq 0.2, \text{区间振荡模式} \\ 3, & 2.5 \geq f \geq 0.2, \text{全部低频振荡模式} \end{cases} \left. \vphantom{m} \right\} \text{相关因子} > 1$$

采用改进的 TLBO 算法对 WAPSS 的增益参数进行优化的过程中需要注意,首先初始化种群的个体除了由随机函数生成以外,还包括由机组放大增益组成的个体。其次,计算初始种群适应度时,选取最好个体的同时还要选取若干个精英解以替换最差个体等。

3 算例分析

为验证本文方案的有效性, 以图 3 中两区四机系统为例进行算例分析; 每个区域各有两台 6 阶模型的发电机, $K_A=200$, $T_A=0.02$, 系统参数详见文献[28]。

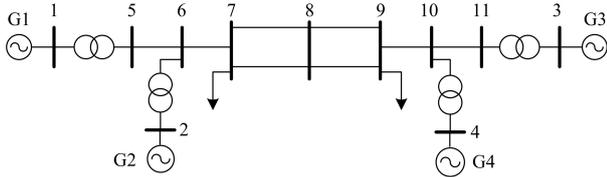


图 3 两区四机电力系统

Fig. 3 Two-area and four-machine power system

对上述系统进行特征根分析, 未安装 PSS 时系统的振荡模式如表 1 所示。由表 1 可知, 系统低频振荡模式由两个本地模式和一个区间振荡模式组成。

表 1 两区四机系统振荡模式

Table 1 Oscillation modes of the two-area and four-machine system

振荡模式	振型	振荡频率	阻尼比
模式 1	$-0.881 \pm 6.291i$	1.001	0.139
模式 2	$-0.995 \pm 6.525i$	1.038	0.151
模式 3	$-0.241 \pm 3.477i$	0.553	0.069

根据式(3)一式(5)计算系统内各机组对于区间振荡模式的综合控制指标, 如表 2 所示。

表 2 两区四机系统的综合控制指标

Table 2 Control indexes of the two-area and four-machine system

转速	ω_1	ω_2	ω_3	ω_4
G1	0.411 0	0.287 7	0.739 7	0.684 9
G2	0.191 8	0.397 3	1	0.931 5
G3	0.383 6	0.260 3	0.671 2	0.616 4
G4	0.506 8	0.356 2	0.890 4	0.835 6

由表 2 可知, 对于区间振荡模式 G2 机组最可控, 而 G3、G4 机组的可观性较强。因此, 本系统中 WAPSS 的安装位置为 G2 机组, 反馈信号为 G3 机组的转速差。文献[11]的留数法, 文献[29]的杜鹃鸟优化方法(Cuckoo Search, CS)以及本文的留数法和 TLBO 算法相结合的 RTLBO(Residual and TLBO)优化算法所设计的增益如表 3 所示。

表 3 PSS 增益参数

Table 3 Gain parameters of PSS

机组	G1	G2	G3	G4	广域 G2
留数法	20	20	20	20	20
CS	29.039	25.431	38.145	15.383	24.764
RTLBO	42.387	10.216	43.255	10.715	26.809

3.1 系统稳定性分析

为了验证所提方法对 WAPSS 参数协调的有效性, 本文比较了系统在无 WAPSS, 留数法, CS 优化方法和本文设计方法下的各模式阻尼比, 如表 4 所示。

表 4 不同控制方式下系统振荡模式

Table 4 Oscillation modes of the power system under different control methods

振荡模式	无广域	留数法	CS	RTLBO	
1	σ_1	-3.143	-3.420	-3.769	-3.726
	f_1/Hz	1.264	1.334	1.380	1.345
	ζ_1	0.368	0.378	0.399	0.403
2	σ_2	-2.932	-2.941	-4.127	-3.999
	f_2/Hz	1.193	1.189	1.276	1.297
	ζ_2	0.364	0.366	0.458	0.440
3	σ_3	-0.579	-1.237	-1.365	-1.586
	f_3/Hz	0.555	0.529	0.511	0.489
	ζ_3	0.164	0.350	0.391	0.459

由表 4 可知, 加入 PSS 后本地振荡模式的阻尼比明显得到了改善, 但区间振荡模式的阻尼比仍然较小。加入 WAPSS 后, 区间振荡模式的阻尼比得到了改善, 但是由于未考虑参数间的协调, 两个本地振荡模式的阻尼比分别仅增加 2.7%和 0.5%, 并未得到明显改善。采用文献[29]的优化方法后, 三个振荡模式的阻尼比的增幅分别是 8.4%、25.8%和 38.4%, 较优化前提高了低频振荡模式的阻尼比; 采用本文的优化方案后, 本地和区间振荡模式的阻尼比分别增加了 9.5%、20.8%和 79.88%, 均得到了明显改善。

为了对比系统在不同控制方式下的暂态特性, 设置母线 7 在时间 $t=1\text{ s}$ 时三相短路故障, 故障持续时间 0.1 s。在不同控制方案下联络线 7-8 的功率曲线如图 4 所示。采用本文两阶段协调优化方法能够明显提高系统阻尼, 最短时间内平息振荡并恢复其稳定运行状态。

3.2 系统适应性分析

为了对比系统在不同控制方案下的适应性, 改变运行工况, 使节点 7 负荷增大 30%。不同控制方式下系统的振荡模式如表 5 所示。

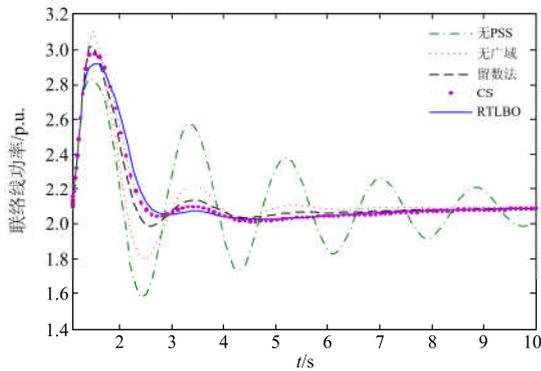


图 4 故障后联络线功率振荡曲线

Fig. 4 Oscillation curve of tie line power

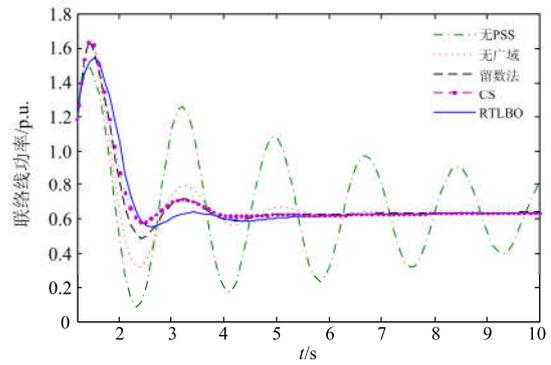


图 5 故障后联络线功率振荡曲线(负荷增大)

Fig. 5 Oscillation curve of tie line power

(increase the load)

表 5 不同控制方式下系统振荡模式(负荷增大)

Table 5 Oscillation modes of the power system under different control methods (increase the load)

振荡模式	无广域	留数法	CS	RTLBO	
1	σ_1	-2.857	-3.032	-3.544	-4.002
	f_1/Hz	1.311	1.354	1.420	1.323
	ζ_1	0.328	0.336	0.369	0.432
2	σ_2	-3.057	-2.908	-3.667	-3.452
	f_2/Hz	1.243	1.225	1.313	1.372
	ζ_2	0.364	0.353	0.406	0.372
3	σ_3	-0.93	-1.146	-1.296	-1.496
	f_3/Hz	0.561	0.563	0.544	0.527
	ζ_3	0.255	0.308	0.354	0.412

由表 5 可知, 系统运行点变化后, 各模式的阻尼比也发生明显变化。其中: 加入未优化的 WAPSS 之后, 区间振荡模式的阻尼比得到改善, 但本地模式 2 的阻尼比有所下降; 与之相反, 采用协调优化的 PSS 参数, 本地和区间振荡模式的阻尼比均有所提高, 其中文献[29]方法和本文方法对应的系统低频振荡模式的总阻尼比分别为 1.129 和 1.216。

设置相同的故障, 对比运行点变化后系统在不同控制方案下的暂态特性如图 5 所示。可以看出, 运行点变化后, 采用协调优化的 PSS 参数后系统能在较短时间内平息联络线功率的振荡。结合表 5 和 3.1 节的分析进一步验证了本文所提方法能够有效提高系统稳定性。

利用 Friedman 检验比较不同控制方案下系统各模式阻尼比的差异。如果 Friedman 检验结果(P 值)小于 0.05, 说明两种控制方案存在明显差异。与留数法相比, CS 全局优化和本文优化方法的 P 值均为 0.014 3, 说明两种优化方案均明显改善了系统的阻尼; CS 全局优化与本文优化方案的差异性检验结果为 0.414 2, 说明分步协调优化方法能够和全局优化一样达到改善阻尼和提高系统稳定性的目的。

3.3 分步设计和全局优化方法对比分析

为了验证分步设计方法的有效性, 本文对比了在初始条件、目标函数和优化算法相同的情况下, 分步设计和全局优化时的适应度随迭代次数的变化曲线, 如图 6 所示。由图可知, 采用 WAPSS 分步协调方法时, 目标函数的收敛速度较快, 迭代次数相对较少。另外, 在相同的运行环境下迭代收敛时, 文献[29]和本文方法所需运算时间分别为 554.6 s 和 82.1 s, 进一步验证了本文方法能有效减少优化问题的求解时间。

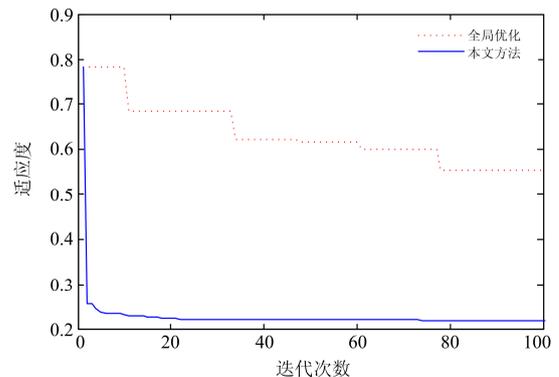


图 6 两阶段设计和全局优化适应度对比

Fig. 6 Comparison of fitness between two-stage design and global optimization methods

4 结语

WAPSS 采用广域信息作为阻尼控制器的输入信号, 能明显改善系统区间振荡模式的阻尼效果。而在多机系统中, 提高某一振荡模式的阻尼可能造成其他模式的阻尼恶化, 因此需要协调优化 WAPSS 的参数。本文提出两阶段设计的方法, 用留数法和改进的 TLBO 算法分别设计 WAPSS 的相位补偿环节和增益环节的参数, 达到减少决策变量和提高系

统阻尼的效果。通过两区四机系统的仿真算例, 本文对比了在不同控制方案下系统各振荡模式的阻尼比以及故障后联络线功率的振荡曲线, 验证了 WAPSS 参数分步协调优化能够提高系统稳定性, 并且在运行点改变后系统仍有较好的适应性; 对比全局优化的适应度迭代曲线, 分步设计方法收敛速度较快, 迭代次数较少, 进一步验证了本文方法的时效性。本文选取的两区四机系统具备广域电力系统发生区间低频振荡的基本条件和特征, 为本文方法在实际大规模电力系统的应用提供了理论基础和初步实践, 但需要注意本文方法在仿真时未计及广域通道中的延时, 而在实际工程中时滞的影响不可忽略, 这是未来具有意义的研究课题。

参考文献

- [1] 周孝信, 鲁宗相, 刘应梅, 等. 中国未来电网的发展模式和关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 4999-5008.
ZHOU Xiaoxin, LU Zongxiang, LIU Yingmei, et al. Development models and key technologies of future grid in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 4999-5008.
- [2] 赵红生, 刘源, 陈伟彪, 等. 互联电力系统联络线功率波动机理及其扰动概率分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(14): 1-9.
ZHAO Hongsheng, LIU Yuan, CHEN Weibiao, et al. Fluctuation mechanism of tie-line active power of interconnected power system and its oscillation probability analysis[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(14): 1-9.
- [3] ABOUL-ELAME, SALLAM A A, MCCALLEY J D, et al. Damping controller design for power system oscillations using global signals[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1996, 11(2): 767-773.
- [4] CHOW J H, SANCHEZ-GASCA J J, REN H, et al. Power system damping controller design-using multiple input signals[J]. IEEE Control Systems, 2000, 20(4): 82-90.
- [5] 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.
- [6] 赵晋泉, 邓晖, 吴小辰, 等. 基于广域响应的电力系统暂态稳定控制技术评述[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 1-9.
ZHAO Jinqun, DENG Hui, WU Xiaochen, et al. Review on power system transient stability control technologies based on PMU/WAMS[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 1-9.
- [7] 刘新东, 江全元, 曹一家. 基于广域测量数据的快速暂态仿真技术[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(1): 46-49.
LIU Xindong, JIANG Quanyuan, CAO Yijia. Fast transient stability simulation based on PMU[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(1): 50-53.
- [8] HOU Kaiyuan, SHAO Guanghui, WANG Haiming, et al. Research on practical power system stability analysis algorithm based on modified SVM[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 119-125. DOI: 10.1186/s41601-018-0086-0.
- [9] 李春艳, 孙元章, 彭晓涛, 等. 采用广域测量信息反馈的广域 PSS 参数设计[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(18): 6-11.
LI Chunyan, SUN Yuanzhang, PENG Xiaotao, et al. Parameter design for wide-area PSS using global signals[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(18): 6-11.
- [10] ZHANG J, CHUNG C Y, LU C, et al. A novel adaptive wide area PSS based on output-only modal analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(5): 2633-2642.
- [11] 赵艺, 陆超, 柳勇军, 等. 基于辨识和留数的发电机广域附加阻尼控制器设计[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(19): 1-6.
ZHAO Yi, LU Chao, LIU Yongjun, et al. Wide-area generator supplementary damping controller design based on residue and identification methods[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(19): 1-6.
- [12] 陈刚, 程林, 孙元章, 等. 基于综合几何指标的广域电力系统稳定器设计[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(2): 18-22.
CHEN Gang, CHENG Lin, SUN Yuanzhang, et al. Wide-area power system stabilizer design based on joint geometric index[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(2): 18-22.
- [13] HENICHE A, KAMWA I. Assessment of two methods to select wide-area signals for power system damping control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(2): 572-581.
- [14] 关琳燕, 周洪, 胡文山. 基于 Hamilton 理论的广域非线性时滞多机电力系统的稳定与控制[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(19): 17-24.
GUAN Linyan, ZHOU Hong, HU Wenshan. Nonlinear wide-area time-delay stabilization and control of

multi-machine power system based on Hamilton theory[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(19): 17-24.

[15] 刘志雄, 黎雄, 孙元章, 等. 广域 PSS 闭环控制工程中可变时滞及其处理[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(10): 54-59.
LIU Zhixiong, LI Xiong, SUN Yuanzhang, et al. Variable delay and its treatment in wide-area PSS closed-loop control engineering[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(10): 54-59.

[16] PADHY B P, SRIVASTAVA S C, VERMA N K. A Wide-area damping controller considering network input and output delays and packet drop[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(1): 166-176.

[17] ZHANG P, COONICK A H. Coordinated synthesis of PSS parameters in multi-machine power systems using the method of inequalities applied to genetic algorithms[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(2): 811-816.

[18] 赵书强, 常鲜戎, 贺仁睦, 等. PSS 控制过程中的借阻尼现象与负阻尼效应[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(5): 11-15.
ZHAO Shuqiang, CHANG Xianrong, HE Renmu, et al. Borrow damping phenomena and negative damping effect of PSS control[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(5): 7-11.

[19] 袁野, 孙元章, 程林. 基于多信号在线辨识的广域 PSS 协调设计[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(8): 14-19.
YUAN Ye, SUN Yuanzhang, CHENG Lin. Wide area PSS coordinated design based on multi-signal online identification[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(8): 14-19.

[20] MOLINA D, VENAYAGAMOORTHY G K, HARLEY R G. Coordinated design of local and wide-area damping controllers for power systems using particle swarm optimization[C] // Power and Energy Society General Meeting, July 21-25, 2013, Vancouver, Canada: 1-5.

[21] CHEN Xiangyi, LI Chunyan, MA Zhanjun, et al. Wide-area PSS design considering the time-delay of feedback signals[C] // 2010 International Conference on Power System Technology (POWERCON), October 24-28, 2010, Hangzhou, China: 1-5.

[22] KE D, CHUNG C Y. Design of probabilistically-robust wide-area power system stabilizers to suppress inter-area oscillations of wind integrated power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(6): 4297-4309.

[23] 倪以信, 陈寿孙, 张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.

[24] ABD-ELAZIM S M, ALI E S. A hybrid particle swarm optimization and bacterial foraging for optimal power system stabilizers design[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2013, 46: 334-341.

[25] ALI E S. Optimization of power system stabilizers using BAT search algorithm[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 61: 683-690.

[26] NGUYEN H D, TURITSYN K. Robust stability assessment in the presence of load dynamics uncertainty[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 31(2): 1579-1594.

[27] RAO R V, SAVSANI V J, VAKHARIA D P. Teaching-learning-based optimization: a novel method for constrained mechanical design optimization problems[J]. Computer-Aided Design, 2011, 43(3): 303-315.

[28] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. McGraw-Hill Education, 1994.

[29] ELAZIM S M A, ALI E S. Optimal power system stabilizers design via Cuckoo Search algorithm[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2016, 75: 99-107.

收稿日期: 2018-01-17; 修回日期: 2018-06-26

作者简介:

王鹏达(1991—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制; E-mail: wangpengda@mail.tsinghua.edu.cn

陈玉蛟(1992—), 女, 硕士, 研究方向为电力系统稳定与控制; E-mail: chenYujiao3235@126.com

周斌(1984—), 男, 副教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统优化运行与控制、智能电网调度与规划、可再生能源发电。E-mail: binzhou@hnu.edu.cn

(编辑 葛艳娜)