

基于多目标优化的时滞广域阻尼控制器设计

李岩, 胡志坚, 刘宇凯, 贺建波, 索江镭

(武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 提出一种考虑区间模式和本地模式协调的时滞广域阻尼控制器设计新方法。首先, 根据能控能观指标找出最佳反馈信号和输出控制量。然后, 计算超前滞后补偿的时间常数, 并构建区间和本地模式协调优化的多目标函数, 应用“教与学”优化算法确定最优增益序列。最后, 应用均衡降阶算法对系统进行降阶, 基于线性矩阵不等式(LMI)理论分析最优增益序列, 选出对时滞鲁棒性最好的值。新英格兰测试系统的仿真结果表明, 提出的基于多目标优化的时滞广域阻尼控制器设计方法, 在很好地抑制了区间振荡模式的同时, 保证本地振荡模式不被恶化, 并且对时滞具有很好的鲁棒性。

关键词: 广域阻尼控制器; 线性矩阵不等式(LMI); “教与学”优化算法; 多目标; 鲁棒性

Design of multi-objective optimization based time delay wide area damping controller

LI Yan, HU Zhijian, LIU Yukai, HE Jianbo, SUO Jianglei

(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: A new design method of the time delay wide area damping controller considering the coordination between inter-area mode and local mode is proposed. First, the best feedback signal and the output control signal are found out based on controllability and observability. Then, the time constant of a lead-lag compensation controller is calculated and the multi-objective optimization function is built considering coordination between inter-area mode and local mode, and the optimal gain sequence is determined by using the teaching learning based optimization (TLBO) algorithm. Finally, the order of the system is reduced using the balanced order reduction algorithm, the optimal sequence is analyzed based on linear matrix inequality (LMI) theory, and the best value with time delay robustness is selected. The simulation results of New England test system show that the multi-objective optimization based time delay wide area damping controller can damp the inter-area oscillation mode while ensure the local oscillation mode not deteriorate, and it has good robustness for time delay.

This work is supported by Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (No. 20110141110032).

Key words: wide area damping controller; linear matrix inequality (LMI); teaching learning based optimization (TLBO); multi-objective; robust

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)08-0094-08

0 引言

近年来, 基于相量测量单元(PMU)的广域量测系统(WAMS)在电力系统迅速发展, 它可以在全网范围内提供精度很高的测量点的状态量, 并将广域反馈信号用于励磁控制以抑制区间低频振荡^[1-3]。对

于利用广域反馈信号抑制区间振荡的控制器设计, 众多学者已经做了大量的研究^[4-8]。

设计广域阻尼控制器(WADC)存在两个重要的问题。首先, WADC在抑制区间振荡模式的同时, 很可能会恶化某些本地振荡模式, 如果参数设计不合理, 甚至会出现负阻尼的情况^[9], 这样就需要对WADC进行协调优化设计^[10-12]。

其次, 广域信号的传输过程中存在一定的通信时延。WAMS在各个通信传输系统中都存在一定的时延, 而且在不同传输介质和装置时滞特性各不相

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20110141110032), 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室资助(EIPE13205)

同^[13]。即使是很小的时滞也可能使性能优良的控制
器失效,造成灾难性事故。文献[14]提出了基于LMI
的时滞电力系统双层广域阻尼控制来克服时滞带来
的不良影响。文献[15]提出了计及反馈信号时滞影
响的广域FACTS阻尼控制,通过时滞稳定依赖条件
确定增益来使SVC附加反馈控制对时滞不敏感。文
献[16]采用自由权矩阵法方法推导得到时滞稳定性
判据,设计了时滞状态反馈控制器。

本文给出了广域阻尼控制器(WPSS)的设计步
骤,基于能控能观指标^[3]选择反馈信号和控制量。
广域阻尼控制器采用传统的PSS结构,补偿环节采
用二级超前滞后补偿。采用“教与学”优化算法进
行控制器增益选择,本文提出多目标函数进行区间
和本地模式的协调优化,确定最优增益序列。基于
线性矩阵不等式理论的时滞依赖稳定条件分析增益
序列,找出对时滞鲁棒性最好的值。最后在新英格
兰测试系统给出了WPSS的测试结果,验证了广域
阻尼控制器的有效性。

1 广域阻尼控制器设计

1.1 系统状态空间模型的能控和能观分析

电力系统是一个复杂的非线性系统,在分析电
力系统小干扰稳定时,通常在稳定平衡点附近将其
转化为如式(1)线性系统。

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu & x \in R^n, u \in R^m \\ y = Cx & y \in R^p \end{cases} \quad (1)$$

式中: A 为状态矩阵; B 为输入矩阵; C 为输出矩
阵。为了实现系统的解耦,考虑用新的状态变量 z ,
于是可得

$$\begin{cases} \dot{z} = Az + B'u \\ y = C'z \end{cases} \quad (2)$$

式中: $z = \Psi x$, $x = \Phi z$; $B' = \Psi B$; $C' = C\Psi$;
 Ψ 和 Φ 分别为状态矩阵的左右特征向量矩阵,表示
为 $\Phi = [\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n]$, $\Psi = [\psi_1^T, \psi_2^T, \dots, \psi_n^T]$, A 为特征
根对角矩阵,特征根为 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ 。

矩阵 C' 由右特征向量矩阵 Φ 经输出矩阵 C 加
权得到,能反映输出信号对模式的能观性。因此,
定义 $C' = C\Phi$ 为模式能观矩阵,其列向量 $C'_i = C\Phi_i$
为能观向量。 C' 中的各元素可表示如下:

$$c'_{ki} = C_k \Phi_i \quad C_k \in R^{1 \times p} \quad (3)$$

显然, c'_{ki} 的模式反映了输入量 u_k 对模式 i 的能
观度。若要观测模式 i 的活动,则应该通过比较模
式向量 C'_i 中元素的大小选择输入量。

矩阵 B' 由左特征向量矩阵 ϕ 经输入矩阵 B 加

权得到,能反映输入信号对模式的能控性,因此定
义 $B' = \phi B$ 为模式的能控矩阵,其行向量 $B'_i = \phi_i B$
为模式的能控向量。 B' 中的各元素可表示如下:

$$b'_{ik} = \phi_i B_k \quad B_k \in R^{n \times 1} \quad (4)$$

显然, b'_{ik} 的模式反映了输入量 u_k 对模式 i 的能
控度。若要对模式 i 进行控制,则应该通过比较模
式能控向量 B'_i 中元素大小选择控制量。

1.2 广域阻尼控制器模型

考虑如图 1 所示的广域闭环控制系统。

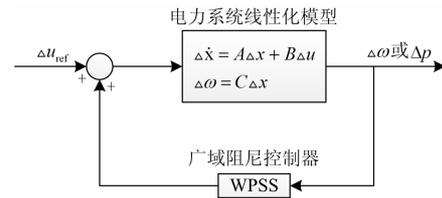


图 1 广域闭环控制系统

Fig. 1 Wide area closed-loop control system

广域PSS(WPSS)通常采用 Δp 或 $\Delta \omega$ 中的一个
或者两个信号作为附加反馈增加系统正阻尼,来抑
制区间低频振荡模式。WPSS的结构与经典的电力
系统稳定器(PSS)相似,如图 2 所示。

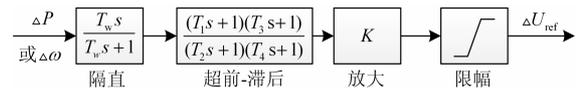


图 2 电力系统稳定器通用框图

Fig. 2 General block diagram of the power system stabilizer

WPSS由滤波、隔直、超前滞后补偿,放大、
和限幅几个环节组成。WPSS的输出加入到励磁系
统的电压叠加点。WPSS可用如下传递函数来表示。

$$H(s) = K_p \frac{T_w s}{T_w s + 1} \left(\frac{1 + T_1 s}{1 + T_2 s} \right)^n \quad n = 1, 2, 3 \quad (5)$$

$$H(j\omega) = |H(j\omega)| e^{j\varphi}$$

式中: K_p 为增益; T_w 为隔直时间常数,通常为5~10s;
 n 为补偿的级数; T_1 、 T_2 为超前滞后补偿的时间常
数; φ 为滞后角。

超前滞后时间常数可由如下公式计算出^[9]:

$$\alpha = \frac{1 - \sin(\varphi/n)}{1 + \sin(\varphi/n)} \quad (6)$$

$$T_2 = \frac{1}{\omega_n \sqrt{\alpha}}$$

$$T_1 = \alpha T_2$$

2 “教与学”优化算法

2.1 “教与学”优化算法

“教与学”(TLBO)优化算法模拟以班级为单位的学习方法,班级中的学员水平的提高需要教师的“教”引导,学员之间则需要相互“学习”来促进知识的吸收^[17]。具体定义如下:

空间中任意搜索点代表一个学员,表示为 $X = (x_1, x_2, \dots, x_d)$, x_i 表示学习的某一门科目, d 表示科目数,也就是决策变量的个数。搜索空间中所有点的集合就称为班级。学员的好坏通过成绩来评价,表示为优化问题的目标函数 $f(X)$ 。班级中成绩最好的学员 X_{best} 称之为教师,用 X_{teacher} 表示。可以将“教与学”算法、遗传算法(GA)和粒子群算法(PSO)进行对比理解,如表1所示。

表1 GA、PSO 和 TLBO 的对比

Table 1 Comparison of GA, PSO and TLBO			
优化过程	GA	PSO	TLBO
全局最优	适应能力最强的染色体	最优粒子	教师
目标函数变量	环境评价基因	位置评价粒子的位置	成绩评价所学科目
问题的解	染色体	个体	学员
寻优过程	进化	移动	学习
可行解集	种群	种群	班级

TLBO算法步骤如下:

(1) 初始化班级。定义学员数量 NP , 班级中每个学员 $X = (x_1, x_2, \dots, x_d)$ 在搜索空间中随机生成。

$$x_i = x_i^L + rand(0,1) \times (x_i^U - x_i^L) \quad (7)$$

其中, x_i^U 和 x_i^L 分别表示决策变量的上限和下限, 满足 $x_i^L < x_i < x_i^U$ 。

(2) “教”阶段。班级中每个学员根据 X_{teacher} 和学员平均值 $mean$ 之间的差异性进行学习。采用如下公式实现“教”的过程。

$$X_{\text{new}} = X_{\text{old}} + difference \quad (8)$$

$$difference = r \times (X_{\text{teacher}} - TF \times mean) \quad (9)$$

式中: X_{old} 和 X_{new} 分别表示第 i 个学员学习前和学习后的值; $mean = \frac{1}{NP} \sum_{i=1}^{NP} X_i$ 是所有学员的平均值; 还有两个关键的参数, 即教学因子 $TF = rand(1,2)$ 和学习步长 $r = rand(0,1)$ 。

“教”阶段完成后, 每个学员根据学习后的成绩和学习之前的成绩进行比较, 保留成绩好的学员。

(3) “学”阶段。每个学员 X^i 在班级中随机选取一个学习对象 $X^j (i \neq j)$, 学员 X^i 通过分析自己和学员 X^j 的成绩差异进行学习和调整。TLBO算法中的学习步长 r 对每个学员采用不同的学习因子。采用式(10)实现“学”的过程。

$$X_{\text{new}}^i = \begin{cases} X_{\text{old}}^i + r \times (X^j - X^i) & f(X^j) < f(X^i) \\ X_{\text{old}}^i + r \times (X^i - X^j) & f(X^i) < f(X^j) \end{cases} \quad (10)$$

其中, $r = rand(0,1)$ 。“学”阶段完成后需要比较学习前后的成绩, 根据成绩保留成绩好的学员。

TLBO算法中的“教”阶段与粒子群算法中的社会搜索部分类似, 每个个体都在向 X_{teacher} 学习, 这样群很容易向 X_{teacher} 靠拢聚集, 搜索速度很快。但是, 种群的多样性容易过早丢失, 进而陷入局部搜索。

在“学”阶段, 由于学员之间的学习交流, 使其不会过早向全局最优点方向聚集, 能够有效保持学员的多样性特征, 从而保证算法在搜索空间的全局搜索能力。

2.2 考虑本地振荡模式的多目标函数

WPSS旨在增大不同区间的弱阻尼, 而本地振荡模式中存在一些相对较弱的阻尼, 这些弱阻尼模式很可能在WPSS设计时被恶化。因此, WPSS的协调设计可以简化为一个多目标优化问题, 即抑制区间振荡的同时, 保证本地阻尼模式不被恶化。

系统的特征根向量 $\xi_v = \{\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n\}$, 其中 ξ_i 为区间振荡模式, 一共存在 p 个区间模式。可以定义多目标为

$$f_1 = \max \sum_{i=1}^p \xi_i \quad (11)$$

$$f_2 = \log_2(\min \xi_v) \quad (12)$$

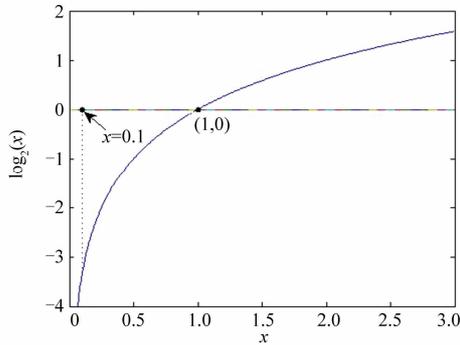
定义目标函数为

$$\max f = \omega \times f_1 + f_2 \quad (13)$$

式中: ω 为权重; f_1 确保了系统区间振荡模式的阻尼比增大; f_2 随着系统最小阻尼比变小而变小。根据对数函数 $\log_2 x$ 的特性, 如图3所示。

从图3中可以看出, 在 $x < 0.1$ 的范围内, 函数值对 x 变小十分的敏感, 当系统的本地振荡模式恶化时, 式(13)会迅速减小, 并且在目标函数中起主导作用, 使 f 值减小, 此时的增益 K_p 将作为非最优解舍弃, 因此 f_2 保证了本地振荡模式不被恶化。

定义增益序列 $K = [K_1, K_2, \dots, K_n]$, K 中存储着每次迭代出现过的最优值, 相等值只算一次。根据目标函数大小顺序排列, 其中 K_1 表示目标函数最大

图3 对数函数 $\log_2 x$ Fig. 3 The logarithmic function $\log_2 x$

的增益, 将增益序列的前 m 个值定义为最优增益序列。

3 基于线性矩阵不等式理论的时滞稳定分析

3.1 时滞依赖稳定性

考虑时滞系统

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + A_d x(t-d) \quad (14)$$

式中: $x(t) \in R^n$ 是系统的状态向量; $A, A_d \in R^{n \times n}$ 是已知的常数矩阵, $d > 0$ 是滞后时间。

在现有的时滞系统稳定性条件中, 根据是否依赖系统中时滞的大小, 可以将稳定性条件分为时滞独立和时滞依赖两类。

(1) 时滞独立的稳定性条件: 即在该条件下, 对所有的时滞 $d > 0$, 系统是渐进稳定的。

(2) 时滞依赖的稳定条件: 即在该条件下, 对滞后时间 d 的某些值, 系统是稳定的; 而对滞后时间 d 的另外一些值, 系统是不稳定的。因此, 系统的稳定性依赖于滞后时间。

一般来说, 时滞独立的稳定条件是比较保守的。因为, 若系统满足时滞独立的稳定条件, 则对任意的滞后时间, 系统都是稳定的。显然, 这样的要求过强而难以达到。在许多实际工程中, 由于时滞通常是可以估计其上限的。因此, 本文主要讨论时滞依赖稳定问题。

定理1^[18]: 如果存在标量 $\bar{d} > 0$, 对称正定矩阵 P 、 Q 、 W 和矩阵 V , 使得

$$\begin{bmatrix} S & -W^T A_d & A^T A_d V & \bar{d}(W+P) \\ -A^T W & -Q & A_d^T A_d^T V & 0 \\ V A_d^T A & V A_d^T A_d & -V & 0 \\ \bar{d}(W+P) & 0 & 0 & -V \end{bmatrix} < 0 \quad (15)$$

其中, $S = (A + A_d)^T P + P(A + A_d) + W^T A_d + A_d^T W + Q$, 则对于所有的滞后时间 $d \in [0, \bar{d}]$, 系统(14)都是渐

进稳定的。

式(15), 求得系统保持渐进稳定的最大允许滞后时间 \bar{d}_{\max} 是一个具有线性矩阵不等式约束的凸优化问题, 具有广义特征值问题的形式, 因此式(15)就可以转化为线性矩阵不等式的标准如下形式:

$$\begin{aligned} & \min -\bar{d} \quad (16) \\ & \text{s.t. } P > 0, Q > 0, V > 0, W > 0 \\ & \begin{bmatrix} S & -W^T A_d & A^T A_d V & 0 \\ -A_d^T W & -Q & A_d^T A_d^T V & 0 \\ V A_d^T A & V A_d^T A_d^T & -V & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -V \end{bmatrix} < \\ & -\bar{d} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & (W+P) \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ (W^T+P) & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

应用Matlab的Yalmip工具箱^[19]对线性矩阵不等式求解, 对比LMI工具箱, Yalmip工具箱的操作语句更加简单明了。

因为Yalmip工具箱所能求解的线性矩阵不等式问题的阶数最多不超过50~60阶, 而广域电力系统通常具有高维的特点, 因此必须对系统进行降阶处理。常用的降阶算法有Schur算法、Hankel算法和均衡实现模型的降阶算法等。本文采用均衡实现模型的降阶算法^[20]。

3.2 考虑时滞的广域阻尼控制器模型

考虑如图4所示的时滞广域闭环控制系统。

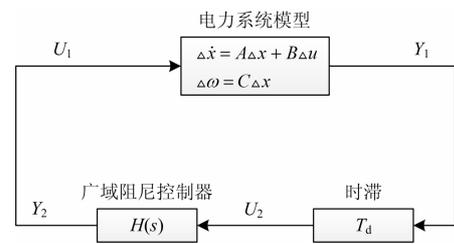


图4 时滞广域闭环控制系统

Fig. 4 Wide area closed-loop control system with time delay

降阶后的电力系统线性化模型如式(17)所示。

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = A_1 x_1 + B_1 u_1 \\ y_1 = C_1 x_1 \end{cases} \quad (17)$$

式中: $A_1 \in R^{n_1 \times n_1}$, $B_1 \in R^{n_1 \times 1}$, $C_1 \in R^{1 \times n_1}$ 分别为降阶后模型的状态空间矩阵、输入矩阵和输出矩阵。

式(5)所示的广域阻尼控制器模型的状态空间表达式为

$$\begin{cases} \dot{x}_2 = A_2 x + B_2 u_2 \\ y_2 = C_2 x + D_2 u_2 \end{cases} \quad (18)$$

式中： $A_2 \in R^{n_2 \times n_2}$ ， $B_2 \in R^{n_2 \times 1}$ ，分别为广域阻尼控制器的状态空间矩阵和输入矩阵； $C_2 \in R^{1 \times n_2}$ ， $D_1 \in R^{1 \times 1}$ 为输出矩阵。

设广域信号的变时滞为 d ，由图4所示的时滞广域闭环控制系统可得

$$\begin{cases} u_1 = y_2 \\ u_2 = y_1(t-d) \end{cases} \quad (19)$$

由式(17)、式(18)和式(19)推导，可以得到时滞系统的状态空间表达式为^[15]

$$\dot{x} = Ax + A_d x(t-d) \quad (20)$$

式中： $\dot{x} = (x_1, x_2)^T$ ， $A = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 C_1 \\ 0 & A_2 \end{bmatrix}$ ， $A_d = \begin{bmatrix} B_1 D_2 C_1 & 0 \\ B_2 C_1 & 0 \end{bmatrix}$ 。

4 广域阻尼控制器设计步骤

综上所述，基于多目标函数的时滞广域阻尼控制器的设计步骤如下：

(1) 找出弱阻尼的区间振荡模式，根据式(3)和(4)能控能观计算指标，找出最佳的能控机组和反映区间振荡模式的最佳观测信号。

(2) 确定超前之后补偿环节的时间参数。首先确定式(5)中的补偿级数和滞后角度。根据式(6)确定超前滞后的时间常数^[9]。

(3) 应用“教与学”算法对控制器的增益进行寻优，目标函数应用本文提出的考虑本地模式的多目标函数，如式(13)所示，将协调区间模式和本地模式看作多目标进行优化。将增益序列 K 前 m 个值作为最优增益序列。

(4) 根据均衡实现模型的降阶算法^[20]对系统进行降阶处理，根据频率响应图，确定降阶系统的阶数，以及式(17)、式(18)所示的降阶后系统状态空间矩阵。

(5) 确定式(20)中的矩阵 A 和 A_d ，根据定式(16)，应用Matlab的Yalmip工具箱对最优增益序列进行分析，计算出增益序列中每个值所对应的 $d_{i,max}$ ，然后找出其中的最大值，其对应 K_p 就是控制器的最终增益。

(6) 仿真验证所设计的WPSS的协调能力，以及时滞鲁棒性。

5 仿真研究

为了验证WPSS协调设计的合理性，本文应用PSAT^[21]对新英格兰测试电力系统(NETPS)进行分

析，设计了基于多目标优化的时滞WPSS来验证对区间模式和本地模式的协调特性，以及时滞鲁棒性。

NETPS是一个用于动态研究的经典系统，其接线图如图5所示。它包含10台发电机，39个节点和46条线路，其中第10台发电机等价于与该系统相连的其他电力系统，可以看作是低阻抗、高惯性时间常数的无穷大母线。发电机和励磁系统均采用四阶模型，调速系统采用三阶模型，第10台机作为参考机。

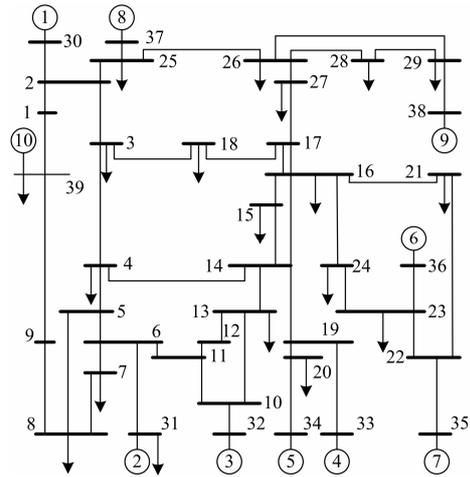


图5 新英格兰测试系统单线图

Fig. 5 Single-line diagram of NETPS

首先对系统的全状态矩阵进行线性化分析，计算出所有的振荡模式，其中阻尼比小于0.1的振荡模式如表2所示。

表2 新英格兰测试电力系统弱阻尼振荡模式

Table 2 Weak damping oscillation modes of NETPS

	特征值	阻尼比
模式 1	-0.3805±j8.6512	0.044
模式 2	-0.5038±j8.5557	0.059
模式 3	-0.6255±j8.5910	0.073
模式 4	-0.2206±j7.3008	0.030
模式 5	-0.2834±j7.3511	0.039
模式 6	-0.2883±j6.6403	0.043
模式 7	-0.2349±j6.0801	0.039
模式 8	-0.2404±j5.6738	0.042
模式 9	-0.1027±j3.4277	0.029

通过对特征值的分析，可以发现，模式1~模式8是本地振荡模式，模式9是区间振荡模式，是WPSS所要抑制的振荡模式。

选取线路的有功功率作为反馈信号，根据式(3)、式(4)进行能控、能观指标的计算，计算结果如图6、图7所示。

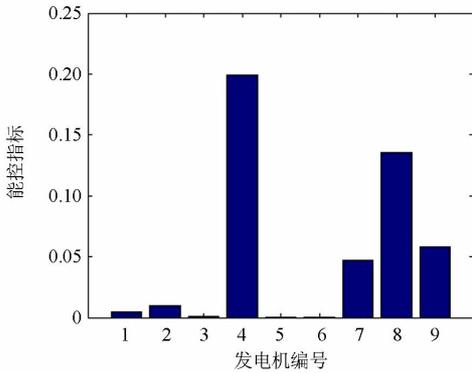


图6 能控指标计算结果
Fig. 6 Result of the COI

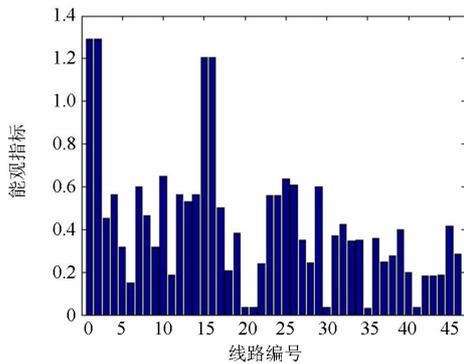


图7 能观指标计算结果
Fig. 7 Result of the OBI

通过计算结果可以看出, 抑制区间振荡模式的最大能控对象是4号发电机(G4), 而最佳的观测信号则选为2号线路(ΔP_{1-39})或者1号线路(ΔP_{1-2})的有功功率, 本文采用2号线路有功作为反馈信号。

从表2分析可得 $\omega_n = 3.4277$, WPSS采用2级补偿, 隔直时间常数设为 $T_w = 10$ 。根据式(5)、式(6)计算超前滞后补偿的时间常数, 得 $T_1 = 0.352$, $T_2 = 0.240$ 。对含有WPSS的广域闭环系统进行根轨迹分析, 根轨迹如图8所示。

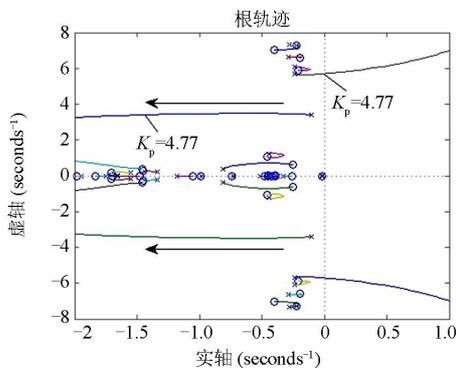


图8 广域闭环控制系统的根轨迹
Fig. 8 The root locus of the wide area closed-loop control system

通过图8的根轨迹可以看出, 区间振荡模式的阻尼比随着增益在一定范围内变化逐渐增大, 然而一些本地模式对WPSS的增益变化表现的十分敏感, 比如振荡模式 $-0.2404 \pm j5.6738$, 当增益增大到4.77左右的时候已经变成负阻尼。因此, 在设计广域阻尼控制器的时候, 必须考虑本地模式。

分别应用“教与学”算法、标准粒子群算法和二次插值粒子群算法(IPSO)^[22]进行多目标优化, 迭代次数设置为100, 根据图8的分析, 控制器增益搜索区间为: $K_p \in [0, 5]$, 目标函数权重 $\omega = 1$ 。粒子群和二次插值粒子群算法优化参数如表3所示。

表3 粒子群和二次插值粒子群算法优化参数

Table 3 Selection of PSO and IPSO optimization parameter

速度更新方程(t 为迭代次数)	
$v_{id}^{t+1} = \omega v_{id}^t + c_1 r_1 (p_{id}^t - x_{id}^t) + c_2 r_2 (p_{gd}^t - x_{id}^t)$	
参数 $c_1 = 0.01$ $c_2 = 0.01$	
选择	权重 $\omega = \omega_{start} - \frac{\omega_{start} - \omega_{end}}{t_{max}}$ $\omega_{start} = 0.9$ $\omega_{end} = 0.4$

图9给出了20次优化的平均值适应度变化趋势, 可以看出“教与学”优化算法的搜索速度和全局搜索能力性能良好。TLBO最终优化结果(平均值): $K_{TLBO} = 0.89$ 。图10给出了某一次应用“教与学”算法中 f_1 和 f_2 的在迭代过程中的变化趋势。从图9和图10的分析可以看出, f_2 限制了 K_p 的增加, 保证了本地模式没有持续恶化。

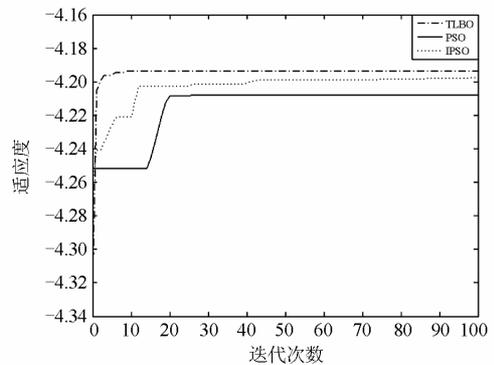


图9 TLBO、IPSO 和 PSO 算法的适应度曲线
Fig. 9 Fitness curve of TLBO IPSO and PSO algorithms

定义 $m = 7$, 根据“教与学”算法的优化结果选出最优增益序列 K 。应用均衡实现模型降阶算法对新英格兰测试系统进行降阶处理, 最终确定阶数为15, 如图11所示。根据式(20)确定矩阵 A 和 A_d , 根据线性矩阵不等式理论的时滞依赖条件对最优增益序列 K_{best} 进行分析, 选出其中 $d_{max} = \bar{d}_{i,max}$ 时的 K_p , 最终优化结果为 $K_p = 0.75$, $d_{max} = 360$ ms。

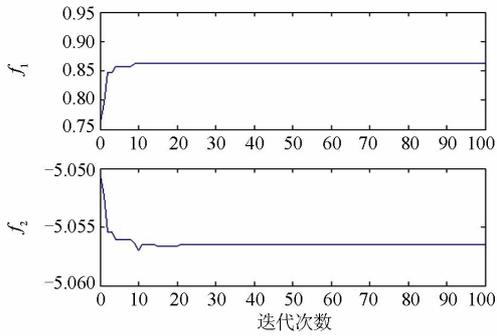


图 10 f_1 和 f_2 在迭代过程中的变化曲线

Fig. 10 Curve of f_1 and f_2 in the iteration process

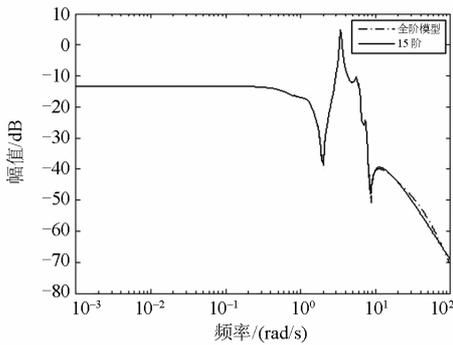


图 11 全阶模型和降阶模型频率响应

Fig. 11 Frequency responses of the reduced-order and full-order system

选择广域阻尼控制器增益 $K_p = 0.75$ ，在4号发电机励磁参考电压上加入小扰动，图12给出了时滞 $d = 0$ 时加入WPSS和未加WPSS的响应曲线。从图12中可以看出，广域阻尼控制器有效地增大了系统阻尼。图13给出了不同时滞下系统的响应曲线，可以看出，针对不同的时滞WPSS都能够有效的抑制区间功率振荡，但是随着时滞变大，系统稳定的时间也逐渐增加。

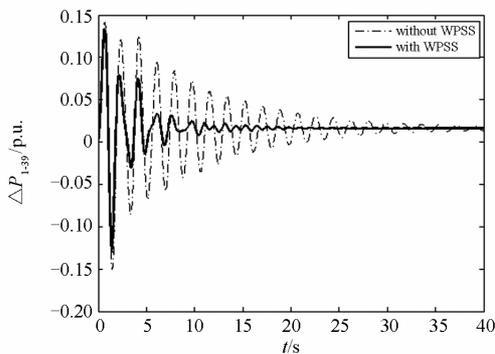


图 12 发电机#4 励磁加入小扰动后线路 ΔP_{1-39} 的功率振荡

Fig. 12 Power flow response of ΔP_{1-39} for small signal in AVR #4

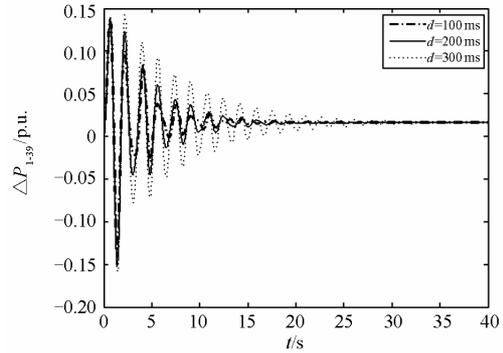


图 13 不同时滞下系统的功率响应

Fig. 13 Power response of the system with different time delay

6 结论

(1) 本文提出的基于多目标函数的时滞广域阻尼控制器设计新方法，能够有效的抑制区间振荡模式的同时，保证本地模式不被恶化，并且使系统对变时滞具有一定的鲁棒性。

(2) 本文在优化算法中采用一个多目标函数作为目标函数来协调区间和本地模式，根据对数函数 $\log_2(x)$ 对 x 变小时候的敏感性来保证本地模式不被恶化。

(3) “教与学”算法收敛速度快，具有良好的全局搜索能力。

(4) 本文基于线性矩阵不等式理论的时滞依赖稳定条件，从优化的最优增益序列中选取对时滞鲁棒性最好的值。Matlab 求解线性矩阵不等式目前尚有阶数限制，需要对系统进行降阶处理。随着 Matlab 的求解能力增强，LMI 理论在电力系统中的应用会更加广泛。

参考文献

- [1] 谢小荣, 李红军, 吴京涛, 等. 同步相量技术应用于电力系统暂态稳定性控制的可行性分析[J]. 电网技术, 2004, 28(1): 10-14.
XIE Xiaorong, LI Hongjun, WU Jingtao, et al. Feasibility study on using synchrophasor technology for power system transient stability control[J]. Power System Technology, 2004, 28(1): 10-14.
- [2] KAMWA I, GRONDIN R, HEBERT Y. Wide-area measurement based stabilizing control of large power systems-a decentralized/ hierarchical approach[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2001, 16(1): 136-153.
- [3] 李春艳, 孙元章, 彭晓涛. 大型电力系统中广域阻尼控制器的配置和反馈信号选择[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(2): 21-25.
LI Chunyan, SUN Yuanzhang, PENG Xiaotao. Allocation and feedback signal selection of wide-area damping

- controller in large scale power systems[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(2): 21-25.
- [4] 罗珂, 刘玉田, 叶华. 计及时滞影响的广域附加阻尼控制[J]. 电工技术学报, 2010, 25(11): 136-141.
LUO Ke, LIU Yutian, YE Hua. Wide area power system damping controller considering time-delay[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(11): 136-141.
- [5] 郭成, 李群湛. 基于改进 PSO 算法的 SSSC 广域阻尼控制器设计[J]. 电工技术学报, 2010, 25(1): 151-158.
GUO Cheng, LI Qunzhan. SSSC wide-area damping controller design based on improved particle swarm optimization[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(1): 151-158.
- [6] ZHANG J, CHUNG C Y, HAN Y. A novel modal decomposition control and its application to PSS design for damping interarea oscillations in power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(4): 2015-2025.
- [7] 卢旻, 吴华仁, 李晓慧. 运用细菌群体趋药性优化的电力系统广域阻尼控制[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(15): 7-11.
LU Min, WU Renhua, LI Xiaohui. Wide area damping control of power systems using bacterial colony chemotaxis[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(15): 7-11.
- [8] 陈中, 胡吕龙. 基于阻尼转矩分析法的广域阻尼控制器设计[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(7): 36-40.
CHEN Zhong, HU Lulong. The study of design of wide area damping controllers based on DTA method[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(7): 36-40.
- [9] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. New York: McGraw-hill, 1994.
- [10] CAI L J, ERLICH I. Simultaneous coordinated tuning of PSS and FACTS damping controllers in large power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(1): 294-300.
- [11] 陶向宇, 刘增煌, 赵红光. 多机电力系统广泛配置PSS的可行性研究[J]. 电网技术, 2008, 32(22): 29-34.
TAO Xiangyu, LIU Zenghuang, ZHAO Hongguang. Study on the feasibility of wide usage of PSS in multi-machine power system[J]. Power System Technology, 2008, 32(22): 29-34.
- [12] HANG 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.
- [13] NADUVATHUPARAMBIL B, VALENTI M, FELIACHI A. Communication delays in wide-area measurement systems[C] // Southeastern Symposium on System Theory, 2002, 34: 118-122.
- [14] 罗珂, 吕红丽, 霍春岭, 等. 基于LMI的时滞电力系统双层广域阻尼控制[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(24): 16-22.
LUO Ke, LÜ Hongli, HUO Chunling, et al. Two layer inter-area damping control of power system considering time-delay based on LMI[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(24): 16-22.
- [15] 姚伟, 文劲宇, 程时杰, 等. 考虑时滞影响的 SVC 广域附加阻尼控制器设计[J]. 电工技术学报, 2012, 27(3): 239-246.
YAO Wei, WEN Jinyu, CHENG Shijie, et al. Design of wide-area supplementary damping controller of SVC considering time delays[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(3): 239-246.
- [16] 张子泳, 胡志坚, 胡梦月, 等. 含风电的互联电力系统时滞相关稳定性分析与鲁棒阻尼控制[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(34): 8-16.
ZHANG Ziyong, HU Zhijian, HU Mengyue, et al. Delay-dependent stability analysis and robust damping control of power system with wind power integration[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(34): 8-16.
- [17] 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.
- [18] 俞立. 鲁棒控制: 线性矩阵不等式处理方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [19] LOFBERG J. YALMIP: a toolbox for modeling and optimization in MATLAB[C] // Computer Aided Control Systems Design, 2004 IEEE International Symposium on: IEEE, 2004: 284-289.
- [20] 薛定宇. 控制系统计算机辅助设计: MATLAB 语言与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [21] 钱伟懿, 卢静. 二次插值的粒子群优化算法[J]. 计算机工程与应用, 2013, 49(4): 35-38.
QIAN Weiyi, LU Jing. Quadratic interpolation particle swarm optimization algorithm[J]. Computer Engineering and Applications, 2013, 49(4): 35-38.

收稿日期: 2014-06-24; 修回日期: 2015-03-15

作者简介:

李岩(1990-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制; E-mail:a850677228@163.com

胡志坚(1969-), 男, 博士, 博士生导师, 研究方向为电力系统分析与控制、新能源接入与分布式发电。E-mail:zhijian_hu@163.com

(编辑 张爱琴)