

区间不确定信息下的小干扰稳定分析方法

邢 洁, 陈 陈, 王 杰

(上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海市 200240)

摘要:研究了考虑发电和负荷不确定性的电力系统小干扰稳定问题,建立了区间不确定信息下求解振荡模式阻尼比上下限值的非线性优化模型。提出将连续线性规划法作为求解该问题的优化方法,通过计算可得到运行状态在给定区间内变化时振荡模式阻尼比的区间分布及其区间限值处对应的系统运行状态,据此可评估系统运行状态的不确定变化对振荡模式阻尼比的影响,并提供相关的稳定性信息。通过算例验证了所提出的方法的正确性和有效性。

关键词:低频振荡; 区间不确定信息; 区间阻尼比; 连续线性规划

0 引言

近年来,随着电力负荷的高速增长,快速、高增益励磁技术的引入以及大规模同步互联电力系统的出现,低频振荡现象频繁发生,小干扰稳定问题日益凸显。由弱阻尼模式引发的低频振荡已成为制约电网发电和功率传输的关键^[1]。

电力系统运行过程中,发电机有功出力、机端电压和负荷侧的功率需求都是影响电力系统潮流分布的重要因素。以上各种因素的不确定性波动对局部和区间振荡模式的阻尼都将产生重要影响。现有的考虑不确定性的小干扰稳定研究中,不确定信息的数学模型主要有概率模型和区间模型。文献[2-5]研究了随机不确定信息下系统概率特征值的计算方法。与概率模型相比,区间模型的优点是所需的统计学参数较少且容易获取,文献[6-7]研究了负荷模型参数的不确定性表示为区间模型时,系统阻尼比区间分布的求解方法,但是该文没有考虑系统运行状态的变化对系统小干扰稳定的影响。文献[8]对区间负荷下系统的小干扰稳定性进行了研究,然而该文仅考虑了负荷有功的不确定性,没有考虑发电机有功功率和机端电压的不确定变化对系统振荡模式的影响。

基于以上研究状况的分析,本文建立了区间不确定信息下求解系统振荡模式区间阻尼比分布的非线性优化模型,提出采用连续线性规划法作为模型的解算方法,通过求解该模型可得到运行状态不确

定变化区间内系统振荡模式阻尼比的变化区间及其限值处对应的系统运行状态,在运行参数波动的情况下也能较准确地评估系统的小干扰稳定情况,并可据此采取适当的调度措施以改善关键振荡模式的阻尼。

1 区间不确定信息下小干扰稳定优化模型

1.1 区间阻尼比的定义

电力系统是一个非线性系统,其线性化后状态方程的特征值取决于系统当前的运行状态。当系统运行状态在给定区间内变化时,系统振荡模式阻尼比的变化也服从区间分布。定义区间阻尼比如下:在系统运行状态的变化区间内,每个确定的运行状态都对应一组能够反映系统不同振荡模式的共轭特征值,其中任一特征值都随运行状态的变化而改变,并对应运行状态的变化区间,形成各自的阻尼比变化区间,定义为区间阻尼比,记为 $[\zeta_{kmin}, \zeta_{kmax}]$,其中, ζ_{kmin} 和 ζ_{kmax} 分别为第 k 个特征值的阻尼比区间下限值和上限值。

区间阻尼比给出了区间不确定信息下振荡模式的阻尼比分布,通过该分布可以了解区间不确定信息下系统的小干扰稳定情况。

1.2 区间阻尼比优化模型

根据区间阻尼比的定义可知,某一振荡模式的区间阻尼比上下限值能够反映该模式在运行状态变化区间内阻尼最大和最小的情况。通过求解区间阻尼比的上下限值,可得到系统阻尼比的区间分布。

求解特征值 λ_k 区间阻尼比上下限值的优化模型如下:

$$\max \zeta_k \text{ 或 } \min \zeta_k \quad (1)$$

收稿日期: 2009-11-09; 修回日期: 2010-01-25。

国家自然科学基金资助项目(60674035);“十一五”国家科技支撑计划重大项目(2006BAA02A17)。

s, t.

$$\begin{cases} P_{Gi} - P_{Li} = U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_{Gi} - Q_{Li} = U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (2)$$

$$\mathbf{A}\boldsymbol{\varphi}_k = \lambda_k \boldsymbol{\varphi}_k \quad (3)$$

$$\zeta_k = -\frac{\sigma_k}{\sqrt{\sigma_k^2 + \omega_k^2}} \quad (4)$$

$$\mathbf{P}_{Lmin} \leq \mathbf{P}_L \leq \mathbf{P}_{Lmax} \quad (5)$$

$$\mathbf{Q}_{Lmin} \leq \mathbf{Q}_L \leq \mathbf{Q}_{Lmax} \quad (6)$$

$$\mathbf{P}_{Gmin} \leq \mathbf{P}_G \leq \mathbf{P}_{Gmax} \quad (7)$$

$$\mathbf{U}_{Gmin} \leq \mathbf{U}_G \leq \mathbf{U}_{Gmax} \quad (8)$$

式中: $\mathbf{P}_G$ 和 $\mathbf{U}_G$ 分别为系统发电机的有功和端电压构成的空间向量; $\mathbf{P}_L$ 和 $\mathbf{Q}_L$ 分别为系统有功和无功负荷构成的空间向量, 它们的维数等于系统负荷的个数; $(\mathbf{P}_G, \mathbf{U}_G, \mathbf{P}_L, \mathbf{Q}_L)$ 作为优化问题的控制向量; $\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$; U_i 和 θ_i 分别为节点 i 的电压和相角; i 为不包括平衡节点的所有节点; n 为网络节点总数; ζ_k 为特征值 $\lambda_k = \sigma_k + j\omega_k$ 的阻尼比; $\boldsymbol{\varphi}_k$ 为相应的右特征向量; $\mathbf{A}$ 为小干扰稳定线性化模型降阶后的状态矩阵^[9], 其中元素除含状态变量外, 还有相关的运行变量; $\mathbf{P}_{Lmax}$ 和 $\mathbf{P}_{Lmin}$ 分别为区间负荷的有功上下限; $\mathbf{Q}_{Lmax}$ 和 $\mathbf{Q}_{Lmin}$ 分别为区间负荷的无功上下限; $\mathbf{P}_{Gmax}$ 和 $\mathbf{P}_{Gmin}$ 分别为发电机有功出力变化区间的上下限; $\mathbf{U}_{Gmax}$ 和 $\mathbf{U}_{Gmin}$ 分别为发电机机端电压变化区间的上下限。

式(1)为目标函数, 式(2)为潮流约束, 式(3)为特征关系方程约束, 式(4)为阻尼比计算公式。因为状态矩阵 $\mathbf{A}$ 中的元素可表示为系统运行变量的函数, 所以特征关系方程给出了系统控制变量和目标函数的关联。式(5)~式(8)分别为区间负荷的有功、无功区间限值约束和发电机有功出力、机端电压的区间限值约束。

2 求解区间阻尼比优化模型

2.1 连续线性规划法的基本原理

式(1)~式(8)的模型是一个非线性优化模型, 本文采用连续线性规划法求解该模型。连续线性规划法是一种常用的求解非线性规划问题的优化方法, 其基本原理是将原非线性规划问题线性化处理, 利用求解线性规划问题获得原问题控制变量的最优变化量; 将新的控制变量代入原问题的等式约束, 计算得到原问题的近似解; 每得到一个近似解, 重新形成线性规划模型, 重复以上步骤。这样通过求解一系列的线性规划模型, 产生一个由线性规划最优解

组成的序列, 这样的序列会收敛到原非线性规划问题的解^[10]。连续线性规划法实现简单并具有较好的收敛性, 已经被成功用于求解最优潮流等电力系统中的优化问题^[11-13]。

2.2 线性化的区间阻尼比优化模型

目标函数(式(1))的线性化表达式为:

$$\max \Delta \zeta_k \text{ 或 } \min \Delta \zeta_k \quad (9)$$

线性化潮流方程(式(2))的表达式如下:

$$\mathbf{J} \begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{\theta} \\ \Delta \mathbf{U} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{P}_G \\ \Delta \mathbf{Q}_G \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{P}_L \\ \Delta \mathbf{Q}_L \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: $\mathbf{J}$ 为雅可比矩阵。

特征关系方程(式(3))的线性化表达式如下:

$$\Delta \mathbf{A}\boldsymbol{\varphi}_0 + \mathbf{A}_0 \Delta \boldsymbol{\varphi} = \lambda_0 \Delta \boldsymbol{\varphi} + \Delta \lambda \boldsymbol{\varphi}_0$$

将上式等号两端同时乘以左特征向量 $\boldsymbol{\Psi}_0^T$, 注意到 $\boldsymbol{\Psi}_0^T \boldsymbol{\varphi}_0 = 1$ 且 $\boldsymbol{\Psi}_0^T \mathbf{A}_0 = \boldsymbol{\Psi}_0^T \lambda_0$, 有

$$\Delta \lambda = \boldsymbol{\Psi}_0^T \Delta \mathbf{A} \boldsymbol{\varphi}_0 \quad (11)$$

由于降阶后的状态矩阵 $\mathbf{A}$ 的稀疏性较差, 为了利用稀疏技术提高计算效率, 在求解时可采用增广状态矩阵 $\mathbf{A}_a$ 代替 $\mathbf{A}$ 。可以证明下式成立^[14]:

$$\boldsymbol{\Psi}_0^T \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial q} \boldsymbol{\varphi}_0 = \boldsymbol{\Psi}_{a0}^T \frac{\partial \mathbf{A}_a}{\partial q} \boldsymbol{\varphi}_{a0}$$

式中: q 为任一状态变量或运行变量; $\boldsymbol{\Psi}_{a0}^T$ 和 $\boldsymbol{\varphi}_{a0}$ 分别为增广左、右特征向量, 且 $\boldsymbol{\Psi}_{a0}^T \boldsymbol{\varphi}_{a0} = 1$; 矩阵 $\mathbf{A}_a$ 的详细元素构成及 $\partial \mathbf{A}_a / \partial q$ 中具体元素的计算公式可参见文献^[14-15]。

线性化阻尼比计算式如下:

$$\Delta \zeta = (\sigma_0^2 + \omega_0^2)^{-\frac{3}{2}} (-\omega_0^2 \Delta \sigma + \sigma_0 \omega_0 \Delta \omega) \quad (12)$$

线性化控制变量的区间限值约束如下:

$$\mathbf{P}_{Lmin} - \mathbf{P}_L^{(0)} \leq \Delta \mathbf{P}_L \leq \mathbf{P}_{Lmax} - \mathbf{P}_L^{(0)} \quad (13)$$

$$\mathbf{Q}_{Lmin} - \mathbf{Q}_L^{(0)} \leq \Delta \mathbf{Q}_L \leq \mathbf{Q}_{Lmax} - \mathbf{Q}_L^{(0)} \quad (14)$$

$$\mathbf{P}_{Gmin} - \mathbf{P}_G^{(0)} \leq \Delta \mathbf{P}_G \leq \mathbf{P}_{Gmax} - \mathbf{P}_G^{(0)} \quad (15)$$

$$\mathbf{U}_{Gmin} - \mathbf{U}_G^{(0)} \leq \Delta \mathbf{U}_G \leq \mathbf{U}_{Gmax} - \mathbf{U}_G^{(0)} \quad (16)$$

由于线性函数逼近非线性函数时, 一般只在展开点邻域内近似程度较好, 因此还需要对变量的取值范围进行限制, 限制控制变量的变化幅度。控制变量增长步长约束为:

$$-\boldsymbol{\eta}_P \leq \Delta \mathbf{P}_L \leq \boldsymbol{\eta}_P \quad (17)$$

$$-\boldsymbol{\eta}_Q \leq \Delta \mathbf{Q}_L \leq \boldsymbol{\eta}_Q \quad (18)$$

$$-\boldsymbol{\eta}_G \leq \Delta \mathbf{P}_G \leq \boldsymbol{\eta}_G \quad (19)$$

$$-\boldsymbol{\eta}_U \leq \Delta \mathbf{U}_G \leq \boldsymbol{\eta}_U \quad (20)$$

式中: $\boldsymbol{\eta}_P$ 和 $\boldsymbol{\eta}_Q$ 分别为优化过程中负荷有功、无功的增量限值; $\boldsymbol{\eta}_G$ 和 $\boldsymbol{\eta}_U$ 分别为优化过程中发电机有功出力、机端电压的增量限值。

式(9)~式(20)构成了区间阻尼比优化模型的线性形式。

2.3 基于连续线性规划法的模型解算方法

使用连续线性规划法求解区间阻尼比优化模型的基本步骤如下：

1)选取满足约束条件式(5)~式(8)的初始负荷状态 $\mathbf{P}_L^{(0)}$ 和 $\mathbf{Q}_L^{(0)}$ 、发电机状态 $\mathbf{P}_G^{(0)}$ 和 $\mathbf{U}_G^{(0)}$ 作为初始控制变量。根据式(2),求解初始控制变量下系统初始运行变量 $(\mathbf{U}^{(0)}, \boldsymbol{\theta}^{(0)})$ 的数值。然后在该运行状态下计算系统的特征值及其阻尼比。设控制变量增量的步长限制为 $\boldsymbol{\eta}_p, \boldsymbol{\eta}_q, \boldsymbol{\eta}_G, \boldsymbol{\eta}_U$, 控制变量步长调整的缩小系数为 $\beta, 0 < \beta < 1$, 最大允许误差为 ϵ 。

2)选取需要研究的第 k 个特征值 $\lambda_k^{(0)}$ 及其阻尼比 $\zeta_k^{(0)}$, 令迭代次数 $r=0$ 。

3)在当前的运行状态下,将区间阻尼比优化模型线性化,得到线性规划模型(式(9)~式(20))。

4)求解线性规划模型得到控制变量的增量: $\Delta \mathbf{P}_L^{(r)}, \Delta \mathbf{Q}_L^{(r)}, \Delta \mathbf{P}_G^{(r)}, \Delta \mathbf{U}_G^{(r)}$ 。更新控制变量: $\mathbf{P}_L^{(r+1)} = \mathbf{P}_L^{(r)} + \Delta \mathbf{P}_L^{(r)}, \mathbf{Q}_L^{(r+1)} = \mathbf{Q}_L^{(r)} + \Delta \mathbf{Q}_L^{(r)}, \mathbf{P}_G^{(r+1)} = \mathbf{P}_G^{(r)} + \Delta \mathbf{P}_G^{(r)}, \mathbf{U}_G^{(r+1)} = \mathbf{U}_G^{(r)} + \Delta \mathbf{U}_G^{(r)}$ 。

5)将新的运行变量 $\mathbf{P}_L^{(r+1)}, \mathbf{Q}_L^{(r+1)}, \mathbf{P}_G^{(r+1)}, \mathbf{U}_G^{(r+1)}$ 代入潮流方程(式(2))求解得到新的状态变量 $(\mathbf{U}^{(r+1)}, \boldsymbol{\theta}^{(r+1)})$ 。重新计算 $\lambda_k^{(r+1)}$ 和 $\zeta_k^{(r+1)}$ 。

6)若 $\zeta_k^{(r+1)} - \zeta_k^{(r)} < 0$, 令 $r = r + 1$, 转步骤3; 否则, 继续。

7) $\boldsymbol{\eta}_p^{(r+1)} = \beta \boldsymbol{\eta}_p^{(r)}, \boldsymbol{\eta}_q^{(r+1)} = \beta \boldsymbol{\eta}_q^{(r)}, \boldsymbol{\eta}_G^{(r+1)} = \beta \boldsymbol{\eta}_G^{(r)}, \boldsymbol{\eta}_U^{(r+1)} = \beta \boldsymbol{\eta}_U^{(r)}$ 。若 $|\boldsymbol{\eta}_p^{(r)}| < \epsilon, |\boldsymbol{\eta}_q^{(r)}| < \epsilon, |\boldsymbol{\eta}_G^{(r)}| < \epsilon, |\boldsymbol{\eta}_U^{(r)}| < \epsilon$, 算法结束; 否则, 转步骤3。

步骤中参数设定和收敛速度的说明见附录A。

3 算例分析

以4机2区互联系统为例,验证本文方法的有效性。在附录B图B1所示4机系统中,发电机采用6阶Park模型,励磁系统采用可控整流励磁。模型参数见文献[9]。不确定负荷的有功和无功区间分布分别为 $[0.95, 1.05] \mathbf{P}_L^{(0)}, [0.95, 1.05] \mathbf{Q}_L^{(0)}$; 发电机的有功功率和机端电压的不确定性区间分布分别为 $[0.95, 1.05] \mathbf{P}_G^{(0)}, [0.98, 1.02] \mathbf{U}_G^{(0)}$, 其中向量 $\mathbf{P}_L^{(0)}, \mathbf{Q}_L^{(0)}, \mathbf{P}_G^{(0)}, \mathbf{U}_G^{(0)}$ 的数值见附录B。

首先在初始运行状态下,建立区间阻尼比优化模型,并得到其线性化形式。利用连续线性规划法求解系统最弱的4对关键振荡模式的阻尼比区间分布,结果见表1。模式1为区间振荡模式,模式2和模式3为区内振荡模式,模式4为控制器模式。

为验证本文方法的正确性,采用蒙特卡洛模拟法求解所研究问题的计算结果也列于表1。蒙特卡洛模拟法是一种常用的分析不确定问题的方法,通

过在运行状态的变化区间内多次随机抽样,得到相应模式的阻尼比变化区间。本算例设置的抽样次数为5000次。

表1 区间阻尼比计算结果
Table 1 Results of interval damping ratio

模式	$[\zeta_{\min}, \zeta_{\max}]$	
	连续线性规划法	蒙特卡洛模拟法
1	$[0.027\ 596, 0.063\ 732]$	$[0.033\ 409, 0.054\ 694]$
2	$[0.100\ 641, 0.120\ 517]$	$[0.107\ 657, 0.115\ 250]$
3	$[0.116\ 531, 0.174\ 378]$	$[0.119\ 704, 0.166\ 468]$
4	$[0.596\ 289, 0.609\ 447]$	$[0.596\ 767, 0.606\ 183]$

对表1的结果进行分析可知,通过连续线性规划法计算得到的阻尼比区间包含了蒙特卡洛模拟法计算所得到的区间。该结果一方面证明了本文算法的有效性,同时也说明受抽样次数的限制,蒙特卡洛模拟法可能会由于遗漏一些重要的抽样状态而使模拟结果的精度降低。

以系统最弱的振荡模式1为例解释其阻尼比区间的求解过程,如图1所示。

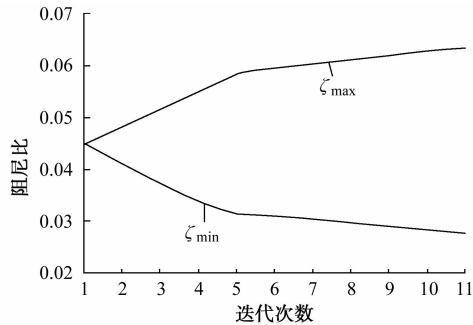


图1 区间阻尼比的搜索过程
Fig. 1 Searching procedure of the interval damping ratio of mode 1

对应模式1阻尼比变化的发电机有功和机端电压的变化曲线如图2、图3所示。为了清晰起见,仅画出机组2和机组3的相应曲线。

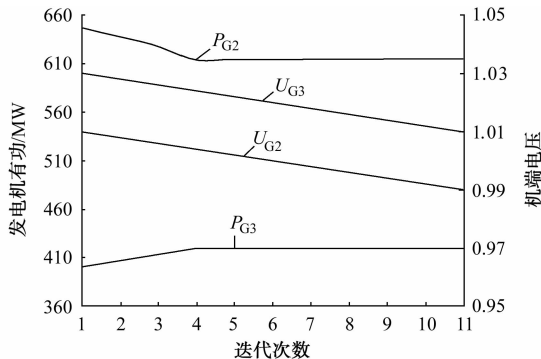


图2 求解 $\zeta_{\min}$ 的发电机有功、电压的变化过程
Fig. 2 Variation of generator power and voltage when solving $\zeta_{\min}$

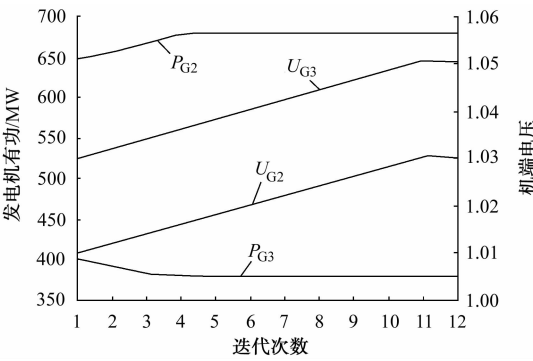


图3 求解 $\zeta_{\max}$ 的发电机有功、电压的变化过程
Fig.3 Variation of generator power and voltage when solving $\zeta_{\max}$

通过分析图2和图3可看出： P_{G2} 增加时，模式1

的阻尼增加； P_{G3} 增加时，模式1 的阻尼却减少。针对本例的基本运行状态，在发电机有功出力的变化区间内，模式1 的阻尼与 P_{G2} 是单调递增的关系，与 P_{G3} 是单调递减的关系。因此，不同发电机有功出力的增加未必一定会改善系统的弱阻尼模式。同理也可分析得到阻尼比随机端电压变化的趋势。

通过分析阻尼比随负荷有功和无功变化的曲线，可以得到类似的变化规律，具体见附录C。

表2所示为4个振荡模式的阻尼比上下限值对应的发电机和负荷状态。因为运行参数和振荡模式之间的关系是非线性的，所以对应模式阻尼比区间限值的运行状态并不是各项因素的简单组合，而应在建模时就要同时考虑它们的影响。

表2 阻尼比区间限值对应的发电机和负荷状态
Table 2 Operation states corresponding to the interval limits

模式	阻尼比限值	负荷有功功率/MW		负荷无功功率/Mvar		发电机有功/MW				发电机电压幅值				λ
		P_{L7}	P_{L9}	Q_{L7}	Q_{L9}	P_{G1}	P_{G2}	P_{G3}	P_{G4}	U_{G1}	U_{G2}	U_{G3}	U_{G4}	
1	$\zeta_{\min}$	915.6	1 093.1	105	105	284.4	614.7	420.0	720.3	1.051	0.990	1.009	0.990	$-0.095 \pm j3.346$
	$\zeta_{\max}$	828.4	989.0	95	95	127.7	679.4	380.0	651.7	1.009	1.030	1.051	1.030	$-0.229 \pm j3.582$
2	$\zeta_{\min}$	828.4	1 037.8	95	95	72.6	679.4	420.0	720.3	1.030	1.030	1.009	0.990	$-0.616 \pm j6.094$
	$\zeta_{\max}$	870.3	1 093.1	105	105	345.4	614.7	380.0	651.7	1.009	1.000	1.051	1.030	$-0.760 \pm j6.263$
3	$\zeta_{\min}$	915.6	1 089.2	95	95	379.4	614.7	389.5	651.7	1.046	1.000	1.014	1.006	$-0.715 \pm j6.096$
	$\zeta_{\max}$	828.4	989.0	95	105	89.1	614.7	420.0	720.3	1.009	1.030	1.024	0.990	$-1.051 \pm j5.936$
4	$\zeta_{\min}$	828.4	1 037.8	95	95	108.2	679.4	420.0	683.9	1.051	1.030	1.009	0.990	$-0.499 \pm j0.672$
	$\zeta_{\max}$	906.2	1 087.5	99	105	328.1	636.5	404.7	652.7	1.009	1.030	1.038	1.018	$-0.507 \pm j0.660$

通过分析表2中各模式阻尼比区间限值对应的运行参数数值可以得到当前运行状态下各模式的阻尼与这些主要运行参数的相互关系。比如，机组2和机组3的有功出力对模式1阻尼的作用相反； ζ_1-P_{G2} 的变化趋势与 ζ_2-P_{G2} 的变化趋势相反，但是 ζ_1-P_{G3} 与 ζ_2-P_{G3} 的变化趋势一致；当负荷9的有功和无功增加到其区间上限时，模式1的阻尼比最小，但模式2的阻尼比达到最大。此外，阻尼比与运行参数的变化关系并不总是单调的，此处不再赘述。

求解各振荡模式阻尼比区间上下限值所需的计算时间和迭代次数如表3所示。

表3 区间阻尼比的计算时间和迭代次数
Table 3 Computing time and iterative number of interval damping ratio

模式	计算时间/s			迭代次数		
	$\zeta_{\min}$	$\zeta_{\max}$	合计	$\zeta_{\min}$	$\zeta_{\max}$	合计
1	2.71	2.84	5.55	11	12	23
2	2.69	3.12	5.81	11	12	23
3	2.58	3.53	6.11	11	14	25
4	3.12	4.29	7.41	11	17	28

4 结语

本文建立了区间不确定信息下小干扰稳定的阻尼比优化模型，提出了使用连续线性规划法作为该非线性规划模型的求解算法，通过该算法可求得考虑负荷有功、无功需求和发电机有功出力、机端电压区间不确定性下系统振荡模式阻尼比的区间分布及其区间限值处对应的系统运行状态。算例的实现过程证明了本文方法的正确性和有效性。通过分析算例的结果可以看出，负荷和发电机的不确定性都会对系统低频振荡模式阻尼比产生重要的影响。系统区间阻尼比分布的求解可为运行人员提供更加全面的信息，以促进不确定信息下系统小干扰稳定性的改善。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

[1] 周双喜,苏小林. 电力系统小干扰稳定性研究的新进展. 电力系统及其自动化学报,2007,19(2):6-15.
ZHOU Shuangxi, SU Xiaolin. Advance of study on small

- disturbance stability of power systems. Proceedings of the CSU-EPSA, 2007, 19(2): 6-15.
- [2] WANG K W, TSE C T, TSANG K M. Algorithm for power system dynamic stability studies taking account of the variation of load power. Electric Power Systems Research, 1998, 46(3): 221-227.
- [3] 易海琼, 程时杰, 侯云鹤, 等. 基于点估计的电力系统小扰动稳定概率分析. 电力系统自动化, 2007, 31(23): 1-4.
YI Haiqiong, CHENG Shijie, HOU Yunhe, et al. An efficient point estimate method for probabilistic small signal stability analysis. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(23): 1-4.
- [4] RUEDA J L, COLOMÉ D G, ERLICH I. Assessment and enhancement of small signal stability considering uncertainties. IEEE Trans on Power Systems, 2009, 24(1): 198-207.
- [5] CHUNG C Y, WANG K W, TSE C T, et al. Power system stabilizer (PSS) design by probabilistic sensitivity indexes (PSIs). IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17(3): 688-693.
- [6] MAKAROV Y V, MASLENNIKOV V A, HILL D J. Revealing loads having the biggest influence on power system small disturbance stability. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(4): 2018-2023.
- [7] MASLENNIKOV V A, MILANOVIC J V, USTINOV S M. Robust ranking of loads by using sensitivity factors and limited number of points from a hyperspace of uncertain parameters. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17(3): 565-570.
- [8] 邢洁, 陈陈. 不确定负荷下小干扰稳定的区间分析方法. 电力系统自动化, 2009, 33(4): 6-10.
XING Jie, CHEN Chen. An interval analysis method of small-signal stability considering load uncertainty. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(4): 6-10.
- [9] KUNDUR P. Power system stability and control. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1994.
- [10] 何坚勇. 运筹学基础. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [11] ALSAC O, BRIGHT J, PRAIS M, et al. Further developments in LP-based optimal power flow. IEEE Trans on Power Systems, 1990, 5(3): 697-711.
- [12] LIU Shengsong, WANG Min, HOU Zhijian. Hybrid algorithm of chaos optimisation and SLP for optimal power flow problems with multimodal characteristic. IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution, 2003, 150(5): 543-547.
- [13] JAZAYERI P, SHOARINEJAD A, ROSEHART W. 电压稳定约束的最优潮流. 电力系统自动化, 2005, 29(16): 48-55.
JAZAYERI P, SHOARINEJAD A, ROSEHART W. Voltage stability constrained optimal power flow. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(16): 48-55.
- [14] 王锡凡, 方万良, 杜正春. 现代电力系统分析. 北京: 科学出版社, 2003.
- [15] WANG K W, CHEUNG C K, TSE C T, et al. Multimachine eigenvalue sensitivities of power system parameters. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(2): 741-747.

邢洁(1981—), 女, 通信作者, 博士研究生, 主要研究方向: 电力系统小干扰稳定. E-mail: xingjie@sjtu.edu.cn

陈陈(1938—), 女, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 电力系统稳定与控制、FACTS 新技术。

王杰(1960—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 自适应控制、复杂多机电力系统的控制和稳定性分析。

A Small-signal Stability Analysis Method Under Interval Uncertainty

XING Jie, CHEN Chen, WANG Jie

(Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The problem of small-signal stability in power system considering uncertainty of load and generation is investigated. Firstly, this paper builds a nonlinear optimization model for solving the upper and lower limits of oscillation mode's damping ratio under interval uncertainty. Then, an effective successive linear programming (SLP) method is proposed to solve this problem. By using this method, the interval damping ratio and the corresponding operation states at its interval limits can be obtained. Calculation results can be used to evaluate the influence of load and generation variations on a certain mode and give useful information for improvement. Finally, the proposed method is validated on two test systems.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 60674035) and National Mega-projects of Science Research for the 11th Five-year Plan (No. 2006BAA02A17).

Key words: low frequency oscillation; interval uncertainty; interval damping ratio; successive linear programming

附录 A 算法说明

对于 2.3 节的算法流程，有如下几点需要说明。

(1)算法参数设定

步骤 1 中控制变量初始状态取各区间分布的中间值。控制变量步长增量的限制 η 开始取较大数值,取为控制变量区间变化范围的 1/20；控制变量步长缩小系数 β 取 0.5。程序最大允许误差 ε 的取值为 1.0×10^{-4} 。

(2)目标函数的选择

本文方法理论上可以求解任意特征值的区间阻尼比，但小干扰稳定的研究往往侧重于阻尼比最弱的少数几个特征值。因此，在步骤 5，特征值计算结束后，按照阻尼比数值的降序排序并选出下步优化的目标。

(3)特征值和特征向量的计算

为避免漏掉特征值，利用 QR 算法来计算系统的特征值，对选定的特征值使用反幂法计算其特征向量。由于复共轭特征对的阻尼比是相同的，因此只需计算其中一个的阻尼比区间分布即可。

(4)算法收敛速度的改善

在求解线性规划模型(9)~(20)时，可通过线性化的潮流方程(10)和变量关系方程，将该模型中的所有相关变量(非发电机节点的节点电压、相角、线路潮流、阻尼比等)使用控制变量(发电机有功出力、机端电压和负荷的有功、无功功率)来线性表示，这样可以消去模型中所有相关变量和等式约束，仅包含控制变量和所有不等式约束，大大缩小线性规划模型的求解规模，有效提高算法的解算速度。

附录 B 4 机系统参数

图 B1 所示 4 机系统结构图，节点 1 是平衡节点，节点 7 和 9 为负荷节点。网络参数和发电机数据见文献[9]12.8 节。基本运行方式见表 B1。

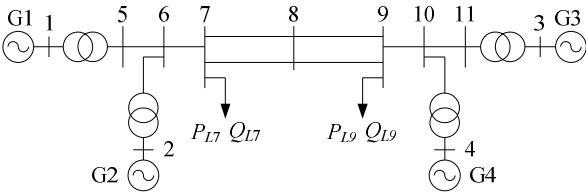


图 B1 4 机系统结构图
Fig. B1 4-machine system

表 B1 4 机系统基本运行方式
Table B1 Basic operation state of 4-machine system

节点	有功 (MW)	无功 (Mvar)	电压幅值 (p.u.)	角度 (°)
2	647	148.1	1.010	1.504
3	400	121.9	1.030	8.077
4	686	201.3	1.010	5.397
7	-872	-100	0.983	-1.215
9	-1041	-100	1.016	-1.876

附录 C 模式 1 阻尼比随负荷变化的规律

对应模式 1 区间阻尼比求解过程的负荷有功和无功变化如图 C1 和图 C2 所示。

通过分析图C1和图C2的曲线可以发现：在当前运行状态下，当负荷7和9的有功需求增加时，模式1的阻尼比变小。同样也可以分析得到模式1阻尼比随负荷无功变化的类似规律。

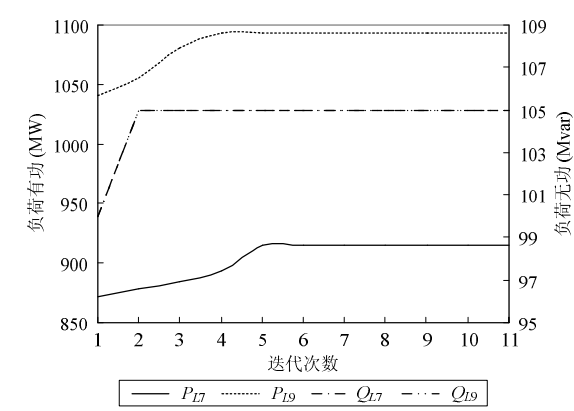


图 C1 求解 $\zeta_{\min}$ 的负荷有功、无功的变化过程
Fig. C1 Variation of load power when solving $\zeta_{\min}$

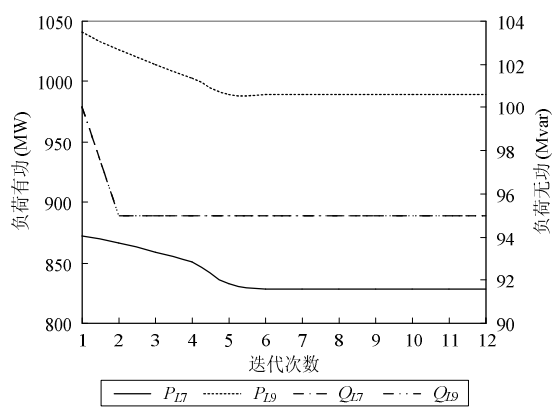


图 C2 求解 $\zeta_{\max}$ 的负荷有功、无功的变化过程
Fig. C2 Variation of load power when solving $\zeta_{\max}$