

基于聚类的多运行方式下电力系统稳定器设计

李静耘, 杜正春, 楚国莉, 方万良

(西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 将模式识别中的聚类算法用于电力系统多运行方式的分类, 提出了一种多运行方式下电力系统稳定器的设计方法. 选择所有节点注入功率或所有机电振荡阻尼比为表征系统运行方式的特征向量, 基于基本顺序聚类算法确定类的数目, 用层次聚类和C均值聚类算法得到每类的中心运行方式. 电力系统稳定器的参数设计仅针对各类的中心运行方式进行, 将此问题转化为一个非光滑优化问题, 用信赖域法加以求解, 求得的参数可用于该类别其余运行方式. 示例系统的仿真结果表明, 提出的方法可以显著降低多运行方式下控制器参数设计问题的规模, 从而大大减小计算量.

关键词: 电力系统稳定器; 参数设计; 多运行方式; 聚类

中图分类号: TM712 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)02-0204-05

Power System Stabilizers Design under Multi-Operation Conditions Based on Clustering

LI Jingyun, DU Zhengchun, CHU Guoli, FANG Wanliang

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The clustering algorithm in pattern recognition is applied to classify multi-operating conditions of power system, and a novel design method of power system stabilizers under multi-operating conditions is proposed. The feature vector to measure operating condition consists of the injected power of all nodes or damping ratio of all electromechanical modes. The class number is determined by the basic sequential algorithmic scheme. Hierarchical clustering and C-mean clustering algorithms are applied to obtain the central operating condition. The parameters of power system stabilizers are designed only for each central operating condition. By taking the design problem as a non-smooth optimization problem, the trust-region algorithm is adopted for solution, and the obtained parameters can be applied to the other operating conditions in the same cluster. The simulation results of test systems show that the proposed approach enables to lower the scale of parameter design under multi-operating conditions, remarkably reducing the computational tasks.

Keywords: power system stabilizer; parameter design; multi-operating conditions; clustering

大规模电力系统对振荡的阻尼薄弱, 极易引发各种增幅振荡^[1], 制约互联系统的功率传输极限. 电力系统稳定器(PSS)是目前广泛采用的抑制低频振荡的有效方法. 留数反映了相应机电振荡模态对控制器传递函数的灵敏度, 因而可用于 PSS 的选址^[2]. 线性最优控制理论和极点配置法^[3]曾用于确定 PSS 的参数, 这两种方法的缺点是需要测量系统

所有的状态变量, 这对于动态元件高度分散的电力系统来讲是不现实的.

将 PSS 的参数设计处理为参数优化问题已有很多研究成果. 一些传统优化方法和现代全局优化算法^[4]都曾用于 PSS 的参数设计. 这些方法的共同问题是当 PSS 数目较多时, 计算量巨大, 甚至得不到结果. 尤其是实际电力系统的运行方式经常发生

变化,这就需要控制器参数在多种运行方式下都能满足要求,而在优化问题中考虑过多的运行方式会更加重这个问题。

本文将模式识别中聚类的思想应用于电力系统多运行方式下 PSS 的参数设计. 对电力系统各运行方式进行特征提取后,在特征空间内进行聚类,并针对每类的中心运行方式进行控制器参数优化,该问题被转化为带不等式约束的非光滑优化问题,目标函数为最大化所有机电振荡模态中的最小阻尼比,用信赖域法加以求解. 对 3 机和 10 机系统在多运行方式下进行了 PSS 参数设计. 仿真结果表明,所得控制器参数基本能够使系统各运行方式都达到满意的阻尼比,并且大大节省了计算时间。

1 聚类思想概述

将一群物理的或抽象的对象,根据它们之间的相似程度分为若干组,这一过程称之为聚类. 一个类就是由彼此相似的一组对象所构成的集合,同一个类内的数据对象具有较高的相似度,而不同类中的数据对象通常是不相似的. 聚类分析就是从给定的数据集中搜索数据对象之间所存在的有价值联系,把没有标记的数据分为有意义的组,属于一个无监督的学习过程. 在许多应用中,一个聚类中的所有对象常常被当作一个对象来进行处理或分析。

聚类的典型方法有迭代的动态聚类算法和非迭代的层次聚类算法^[5]. 动态聚类算法的基本思想是首先找到一些较好的初始划分,然后调整每个样本所属类别,使得调整后的准则函数值得到改善. 考虑最常见的 C 均值算法. 设 $\mathbf{x}$ 表示样本, N_i 是第 i 类 Γ_i 中的样本数目, $\mathbf{m}_i$ 是这些样本的均值,即

$$\mathbf{m}_i = \frac{1}{N_i} \sum_{\mathbf{x} \in \Gamma_i} \mathbf{x} \quad (1)$$

把 Γ_i 中的各样本 $\mathbf{x}$ 与其均值 $\mathbf{m}_i$ 间的误差平方和对所有类相加,即

$$J_e = \sum_{i=1}^C \sum_{\mathbf{x} \in \Gamma_i} \|\mathbf{x} - \mathbf{m}_i\|^2 \quad (2)$$

式中: J_e 是误差平方和聚类准则. 算法寻优的结果是使误差平方和准则达到最小。

C 均值聚类算法的基本步骤如下^[5]:

- (1) 选取一个把 N 个样本分成 C 个聚类的初始划分,计算每个聚类的均值 $\mathbf{m}_i$ 和 J_e ;
- (2) 选择一个备选样本 $\mathbf{y}$,使得 $\mathbf{y}$ 在 Γ_i 中;
- (3) 若 $N_i=1$,则转(2),否则继续;

(4) 计算

$$\rho_j = \begin{cases} \frac{N_j}{N_j+1} \|\mathbf{y} - \mathbf{m}_j\|^2 & j \neq i \\ \frac{N_i}{N_i-1} \|\mathbf{y} - \mathbf{m}_i\|^2 & j = i \end{cases} \quad (3)$$

(5) 对于所有的 j ,若 $\rho_k \leq \rho_j$,则把 $\mathbf{y}$ 从 Γ_i 移到 Γ_k 中去;

(6) 重新计算 $\mathbf{m}_i$ 和 $\mathbf{m}_k$ 的值,并修改 J_e ;

(7) 若连续迭代 N 次 J_e 不改变,则停止,否则转到(2)。

C 均值聚类算法由于其简单性和很好的空间时间复杂度在处理大数据的领域得到广泛应用,算法的缺点是聚类结果严重依赖于初值。

层次聚类算法初始时将每个对象作为单独的一个类,然后相继地合并相近的类,直到所有的类合并成为一个(层次的最上层),或者达到一个终止条件。

初始时设置 $\Gamma_j = \mathbf{x}_j, \forall j \in I, I = \{j | j=1,2,\dots,N\}$,这里 Γ_j 是各个聚类集合, N 是样本数,即初始时每一个样本为一个类. 算法的具体步骤如下^[6]:

(1) 在集合 $\{\Gamma_j | j \in I\}$ 中找到一对满足条件

$$\Delta(\Gamma_i, \Gamma_k) = \min_{\forall j, l \in I} \Delta(\Gamma_j, \Gamma_l)$$

的聚类集合 Γ_i 和 Γ_k ,其中 $\Delta(\Gamma_i, \Gamma_k)$ 是 Γ_i 和 Γ_k 之间的相似性度量;

(2) 把 Γ_i 并入 Γ_k ,并去掉 Γ_i ;

(3) 把 i 从指标集 I 中除掉,若达到了终止条件或 I 的基数仅等于 2 时,则终止计算,否则转向(1)。

两个聚类 Γ_i 和 Γ_j 之间的相似性度量 $\Delta(\Gamma_i, \Gamma_j)$ 采用均值距离

$$\Delta(\Gamma_i, \Gamma_j) = \delta(\mathbf{m}_i, \mathbf{m}_j) \quad (4)$$

式中: $\mathbf{m}_i$ 和 $\mathbf{m}_j$ 分别是 Γ_i 和 Γ_j 的均值向量; $\delta(\cdot, \cdot)$ 可以是向量间任何一种距离度量。

该算法中,一旦一个合并步骤完成,就不能再被撤销,其好处是不用担心组合数目的不同选择,计算代价较小,但缺点是它不能更正错误的合并。

2 电力系统稳定器设计

本文仅考虑 PSS 的参数设计,其他的阻尼控制器可同样考虑. PSS 的传递函数框图如图 1 所示。

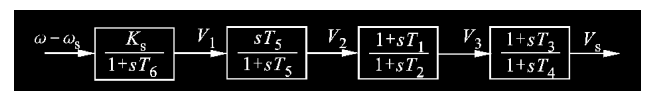


图1 PSS的传递函数框图

多方式下 PSS 的配置包含对多种运行方式的

分类和确定各类中心运行方式的控制器参数两个步骤.在对电力系统多运行方式的聚类中,一种运行方式作为一种模式,所有模式都表示成 L 维的特征向量.多运行方式的聚类包含着以下几方面的工作.

2.1 特征提取

选择表征各运行方式的特征量时,可以从两个角度考虑:①从系统的实际运行状态考虑,直接将系统中各个节点的注入功率(有功、无功)按顺序排列组成表征系统的特征向量,具有 n 个节点的系统在第 k 种方式下的特征向量为 $\mathbf{x}_k = [P_{k1}, Q_{k1}, \dots, P_{kn}, Q_{kn}]$,或将系统各支路的有功功率、无功功率按顺序排列组成表示系统运行方式的特征向量,具有 l 条支路的系统在第 k 种方式下的特征向量为 $\mathbf{x}_k = [P_{k1}, Q_{k1}, \dots, P_{kl}, Q_{kl}]$;②按模态分析的结果,将系统的各机电振荡阻尼比按序排列组成表征系统的特征向量, m 机电力系统在第 k 种方式下的特征向量为 $[\xi_{k1}, \dots, \xi_{k(m-1)}]$.聚类分析的任务是将 N 个特征向量分为 C 类 $\Gamma_p, p=1, 2, \dots, C$.

2.2 相似性度量

两个特征向量之间的距离是它们相似度的一种常见度量.有多种距离度量 $\delta(\mathbf{x}_k, \mathbf{x}_l)$,由于欧氏距离便于分析和计算,因而本文采用了欧氏距离来度量向量间的相似性程度,即

$$\delta_E(\mathbf{x}_k, \mathbf{x}_l) = \left[\sum_{j=1}^d (x_{kj} - x_{lj})^2 \right]^{1/2} = \left[(\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_l)^T (\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_l) \right]^{1/2} \quad (5)$$

2.3 聚类数目的确定

设 Θ 为基本顺序聚类算法(BSAS)^[7]中距离度量的阈值.对于 $\Theta=a$ 到 b ,步长为 c ,做如下循环.

运行 s 次 BSAS,每一次数据集都以不同的顺序给出,将 s 次运行中最经常出现的数目作为聚类数目 m_Θ 的估计值.

在以上循环中, a 与 b 分别表示所有向量中两两之间距离的最小值和最大值,步长 c 的大小根据 a 与 b 的值适当选取. s 的取值与计算结果密切相关, s 越大,统计样本越大,结果的准确度也就越高.最后,可以得到聚类数目 m_Θ 对 Θ 的曲线,最佳聚类数目应是对应于曲线最宽的平坦区域^[6].

2.4 中心运行方式选取

类中心运行方式 $m_c (m_c \in C)$ 定义为

$$\sum_{x \in C} d(m_c, x) \leq \sum_{x \in C} d(y, x) \quad \forall y \in C \quad (6)$$

其物理意义是,在一类中选取一种与其余运行方式差别都最小的方式作为整个类的中心运行方式.

2.5 聚类算法的选择

针对层次聚类和 C 均值聚类算法各自的优缺点,本文将这两种算法结合,在确定聚类数目后,先采用层次聚类算法对数据进行分类,再将所得分类结果作为初始值,采用 C 均值聚类算法进一步动态调整,直到平方误差和函数达到最小值.这样既避免了层次聚类算法一旦数据合并完成后就不能撤销的缺点,又为 C 均值聚类算法取得了较好的初值.

由聚类方法得到对多运行方式的分类结果后,选取每一类的中心运行方式, PSS 各参数的配置仅针对各中心运行方式进行,然后将所得参数应用于该类的其他方式进行校验,如果系统在所有方式下都能满足稳定性要求,则说明参数可以应用于多种运行方式,聚类结果是正确的.

在对中心运行方式配置 PSS 时,首先需要选择安装地点.根据留数计算出各台发电机的安装指标,该指标表征了在该位置安装发电机对阻尼机电振荡的效果.将安装指标由大到小顺序排列,可以满足阻尼比要求的最小集合即为安装 PSS 的发电机集合.在实际运算中,最初可选择较少数量发电机,经过参数优化后如果不能满足系统对阻尼比的要求,则按照顺序进一步选取发电机直至满足要求.

在确定 PSS 参数时,时间常数 T_{6i}, T_{5i}, T_{2i} 和 T_{4i} 事先确定,分别取为固定值 0.02、5、0.05 和 0.05^[7].每台 PSS 需要进行优化配置的参数为增益 K_s 、时间常数 T_{1i} 和 T_{3i} .增益 K_{si} 的典型取值范围为 $[0.01, 50]$,时间常数 T_{1i}, T_{3i} 的典型取值范围为 $[0.01, 1.0]$. m 机电力系统 l 个 PSS 的参数协调问题可归结为如下带约束的非光滑优化问题

$$\left. \begin{aligned} & \max \min \{ \xi_k \quad k=1, \dots, m-1 \} \\ & \text{s. t. } K_{si}^{\min} \leq K_{si} \leq K_{si}^{\max} \\ & T_{1i}^{\min} \leq T_{1i} \leq T_{1i}^{\max} \quad i=1, \dots, l \\ & T_{3i}^{\min} \leq T_{3i} \leq T_{3i}^{\max} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中:目标函数表示使得所有机电振荡模式中的最小阻尼比最大化; ξ_k 为第 k 个机电振荡模式的阻尼比.式(7)的最优解即为 PSS 的理想参数.

采用文献[8]提出的基于信赖域方法的 PSS 参数协调方法得到控制器的参数配置.由于这种方法本身就是针对非光滑优化问题所设计的,不会增加约束的数量,与一些全局优化算法相比,收敛速度快,并且能够得到足够满意的结果.

3 算例及分析

3 机系统数据见文献[9],发电机 1 采用经典模

型,发电机 2 和 3 采用双轴模型,并都装有自并励静止励磁系统,其参数 $T_R=0.01\text{ s}$, $K_A=200$, $T_A=0.01\text{ s}$, $T_B=10.0\text{ s}$, $T_C=1.0\text{ s}$.

考虑系统 12 种不同的运行方式,将各节点注入功率按顺序排列作为描述系统运行方式的特征向量,根据上文所述确定聚类数目的方法得到 m_Θ 对 Θ 的曲线.当聚类数目为 5 或者 4 时,对应于曲线有较宽的平坦区域,选聚类数目为 5.当由 5 个类聚合为 4 个类时,类间相似性度量由 1.148 6 跃变为 1.885 6,从而也验证了 5 是一个合理的聚类数目.

用 C 均值聚类算法对初始分类进行动态调整,得到误差平方和意义下的最佳分类见表 1.由留数法可计算出中心运行方式下各台发电机的安装指标,选择 G2 和 G3 发电机安装 PSS,采用信赖域方法优化得到各 PSS 参数如表 2 所示.将按中心运行

表 1 3 机系统最终聚类结果

类别	运行方式	中心运行方式
一	1,3,2	3
二	4,6,5	4
三	7,12	7
四	8,9	8
五	10,11	10

表 2 3 机系统各类的 PSS 参数

类别	台号	K	T_1	T_3
一	3	19.975 2	0.245 2	0.245 2
	2	19.935 2	0.139 9	0.139 9
二	3	20.012 4	0.296 0	0.296 0
	2	19.957 3	0.162 5	0.162 5
三	3	19.987 6	0.260 7	0.260 7
	2	19.957 5	0.162 5	0.162 5
四	2	20.026 3	0.234 2	0.234 2
五	2	19.961 9	0.181 0	0.181 0

方式优化得到的 PSS 用于所有运行方式,相应的机电振荡模态如表 3 所示.可以看出,其他各运行方式机电振荡阻尼比都达到了运行要求(>0.05).

对 New England 10 机 39 节点系统在 10 种运行方式下的 PSS 参数进行了配置,该系统的接线图及详细数据见文献[3].不加 PSS 时各种运行方式下阻尼比最小的机电振荡模态如表 4 所示,可见系统在 10 种运行方式下都是不稳定的.

经聚类分析可得到聚类数目为 3,表 5 为最终

的聚类结果.根据各发电机的安装指标确定发电机的安装地点后,再采用信赖域方法对各中心运行方式进行优化,求得 PSS 各项参数如表 6 所示.

将按中心运行方式优化得到的 PSS 用于所有运行方式,相应的机电振荡模态如表 7 所示.从表 7 可以看出,除方式 6 外,其他各方式下机电振荡阻尼比都达到了运行要求(>0.05).这说明了根据聚类后的中心运行方式设计的 PSS 对同类的其他方式大多具有鲁棒性,但并不能保证能够镇定所有其他运行方式,即不能指望一套 PSS 能适应系统运行方

表 3 3 机系统闭环机电振荡模态

类别	运行方式	最小阻尼比	振荡模态
一	1	0.320 9	$-5.145\ 2\pm j15.188\ 0$
	2	0.329 2	$-5.497\ 4\pm j15.768\ 7$
	3	0.326 1	$-6.316\ 8\pm j18.310\ 8$
	4	0.296 2	$-6.862\ 4\pm j22.131\ 5$
二	5	0.290 0	$-6.756\ 2\pm j22.292\ 1$
	6	0.290 8	$-5.024\ 4\pm j16.528\ 9$
三	7	0.327 6	$-6.938\ 4\pm j20.010\ 2$
	12	0.328 5	$-5.714\ 5\pm j16.430\ 3$
四	8	0.471 7	$-9.206\ 5\pm j17.208\ 0$
	9	0.485 7	$-9.366\ 6\pm j16.855\ 6$
五	10	0.273 0	$-5.053\ 0\pm j17.803\ 5$
	11	0.275 2	$-5.078\ 7\pm j17.742\ 3$

表 4 10 机系统开环机电振荡模态

运行方式	振荡模态	阻尼比
1	$0.169\ 3\pm j3.675\ 4$	$-0.046\ 0$
2	$0.165\ 9\pm j3.680\ 5$	$-0.045\ 0$
3	$0.225\ 7\pm j3.613\ 6$	$-0.062\ 3$
4	$0.271\ 9\pm j3.599\ 4$	$-0.075\ 3$
5	$0.263\ 3\pm j3.608\ 1$	$-0.072\ 8$
6	$0.266\ 0\pm j3.630\ 1$	$-0.073\ 1$
7	$0.246\ 5\pm j3.628\ 8$	$-0.067\ 8$
8	$0.970\ 5\pm j3.575\ 3$	$-0.261\ 9$
9	$0.496\ 5\pm j3.600\ 3$	$-0.136\ 6$
10	$0.237\ 8\pm j3.628\ 5$	$-0.065\ 4$

表 5 10 机系统最终聚类结果

类别	运行方式	中心运行方式
一	1,2,3	2
二	4,5,6,7,10	7
三	8,9	8

表6 10机系统各类的PSS参数

类别	台号	K	T_1	T_3
一	3	20.105 1	0.016 2	0.064 4
	4	44.442 5	0.541 2	0.342 6
	5	45.607 8	0.309 1	0.584 5
	6	16.695 6	0.025 5	0.200 8
	7	3.657 5	0.414 0	0.247 0
	8	4.150 9	0.276 1	0.275 1
	9	18.578 4	0.060 9	0.212 1
二	1	9.458 8	0.667 4	0.128 0
	2	43.964 4	0.284 4	0.702 5
	3	29.828 7	0.033 4	0.745 1
	4	27.903 8	0.628 9	0.362 5
	5	34.381 7	0.511 1	0.920 4
	6	5.465 8	0.792 1	0.611 7
	7	43.784 0	0.356 3	0.413 5
	8	32.928 4	0.493 9	0.018 0
	9	28.489 7	0.434 7	0.195 3
三	1	31.826 6	0.448 3	0.930 7
	2	33.951 0	0.442 1	0.402 7
	3	8.991 8	0.257 2	0.729 1
	6	49.950 6	0.537 6	0.123 9
	7	24.341 6	0.047 7	0.140 6

表7 10机系统闭环机电振荡模态

类别	运行方式	最小阻尼比	振荡模态
一	1	0.047 0	$-0.332\ 3+j7.065\ 7$
	2	0.058 8	$-0.426\ 6+j7.242\ 5$
	3	0.041 0	$-0.298\ 6+j7.268\ 7$
二	4	0.058 1	$-0.802\ 4+j13.786\ 2$
	5	0.070 6	$-0.977\ 6+j13.805\ 3$
	6	$-0.281\ 0$	$1.711\ 8+j5.846\ 9$
	7	0.071 4	$-0.978\ 8+j13.673\ 7$
三	10	0.050 6	$-0.308\ 9+j6.113\ 6$
	8	0.077 8	$-0.677\ 0+j8.675\ 4$
	9	0.083 9	$-0.657\ 8+j7.811\ 8$

式很大范围的变化。

对于10机系统,若直接将各运行方式下机电振荡模态最小阻尼比最大化作为目标函数进行优化,当运行方式为5种时,在pentium4,2.40 GHz的CPU上,采用信赖域法进行参数优化的时间达3 min之多。当运行方式为7种时,优化时间超过4 min,且每种方式的最小阻尼比仅达到0.015左右。当运行方式为8种时,算法已不能收敛。采用本文方法首先对运行方式分类再进行优化,对10种运行方式求得合适参数所需要的时间一共不到1 min。

4 结 论

将聚类的思想用于多运行方式下PSS参数设计。通过提取各运行方式的特征向量,并在特征空间内将多种运行方式聚类为各类的中心运行方式。只针对各中心运行方式进行PSS的参数设计,得到的参数可用于该类别的其余运行方式,从而大大减小了问题的规模,降低了计算量。3机和10机系统的仿真结果表明,本文提出的方法可以大大降低问题的规模,减少计算时间,求得合理的参数值。采用该方法来考虑电力系统多运行方式下的控制器参数配置是很有必要的。

参考文献:

- [1] ROGERS G. Power system oscillations[M]. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [2] PAGOLA F L, PEREZ-ARRIAGA I J, VERHESES G C. On sensitivities, residues and participations: applications to oscillatory stability analysis and control [J]. IEEE Transactions on Power System, 1989, 14(1): 178-185.
- [3] de ARAUJO B P, XANETTA L C Jr. Pole placement method using the system matrix transfer function and sparsity[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2001, 23(3): 173-178.
- [4] ABIDO M A. Parameter optimization of multimachine power system stabilizers using genetic local search[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2001, 23(8): 785-794.
- [5] 边肇祺, 张学工. 模式识别[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [6] THEODORIDIS S, KOUTROUMBAS K. Pattern recognition[M]. New York: Elsevier Science, 2003.
- [7] KLEIN M, ROGERS G J, MOORTY S, et al. Analytical investigation of factors influencing power system stabilizers performance[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1992, 17(3): 382-390.
- [8] 杜正春, 王秀菊, 方万良. 基于信赖域法的多运行方式下阻尼控制器参数协调[J]. 西安交通大学学报, 2005, 39(12): 1375-1379.
DU Zhengchun, WANG Xiuju, FANG Wanliang. Parameters coordination of damping controllers in multiple operating conditions using trust-region algorithm [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2005, 39(12): 1375-1379.
- [9] ANDERSON P M, FOUAD A A. Power system control and stability[M]. Ames, Iowa: The Iowa State University Press, 1977.

(编辑 杜秀杰)