

文章编号:1000-582X(2006)12-0052-04

基于阈值搜索和动态分散的电压/无功分区算法*

张忠静¹, 陈刚¹, 关仲¹, 吴迎霞², 张文哲², 谢松³

(1. 重庆大学电气工程学院高电压与电工新技术教育部重点实验室, 重庆 400030;
2. 重庆市电力公司电力调度(交易)中心, 重庆 400014; 3. 重庆市电力公司杨家坪供电局, 重庆 400050)

摘要:二级电压控制是一种新型的电压控制方式,它首先是将整个电力系统分成若干彼此电气距离较远且相互近似解耦的控制区域。为此,研究了二级电压控制模式下的分区方法,提出了一种结合阈值搜索和动态分散的电压/无功分区算法,即用阈值搜索的方法得到初始的分区后,用动态分散法对初始分区进行调整和改进。此方法基于系统的物理特征,不用修改网络模型,不需分析特征值,具有很快的计算速度。通过与传统方法的比较,证明该分区方法是合理可行的。

关键词:二级电压控制;阈值搜索;动态分散

中图分类号:TM761.12

文献标识码:A

电力系统电压/无功潮流的控制问题是一个多层次、多目标的大规模控制问题。为了实现电压/无功的有效控制,欧洲一些国家采用了三级控制模式^[1]。

一级控制层:由控制设备补偿快速和随机的电压扰动,以维持其输出变量在参考值附近。二级控制层:按照一定的控制规律,闭环设定一级电压控制器的整定值,用于平衡较慢、较大的无功变化和电压偏差;三级电压控制改变二级电压控制器的控制目标,目的是实现全系统电压无功的优化运行。

在电压分级控制方案中,二级电压控制(Secondary Voltage Control)是防止电压崩溃事故的一种较有效的方法,能提高系统电压稳定性和维持较好的无功储备^[2]。二级电压控制首先将整个电力系统分成若干控制区域(Control Zones),这些区域需要满足的3个条件是^[3]:1)各区域个数和大小要适中,要有利于控制策略的实施;2)区域间的电压相互近似解耦,彼此影响较小;3)区域内有足够的电压无功源维持本区域的电压水平。

目前,研究人员已经提出多种分区理论,文献[4]提出基于慢相关技术的分区,但需要先计算电力系统机电模型的慢特征矩阵,其分区过程的复杂度无疑会很大;文献[5]提出基于图论的分区,但对于门槛值值的选取是个难点,往往由于值选取的不同使得分区并不唯一;文献[6]提出基于Tabu搜索的分区,此方法

是一种启发式方法,没有基于网络的物理特征;文献[7]提出基于电气距离,并用了信息理论进行分区。笔者从电压控制的角度出发,同时考虑电网中的无功电压耦合及电气距离,提出了基于阈值和动态分散相结合的电压分区方法,并用新英格兰10机39节点系统验证了该方法的正确性与合理性。

1 基于阈值搜索的分区法

1.1 无功电压耦合函数

用牛拉法来计算潮流的模型为:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P\delta} & J_{PV} \\ J_{Q\delta} & J_{QV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta V \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中, ΔP 、 ΔQ 分别是节点注入有功、无功的变化量; $\Delta\delta$ 、 ΔV 分别是节点电压相角、幅值的变化量。

由式(1)可知,系统电压稳定性是受有功功率和无功功率影响的。电压崩溃主要考虑电压/无功的关系,因此可不计有功的影响,令 $\Delta P = 0$,就可从式(1)中推出:

$$\Delta Q = [J_{QV} - J_{Q\delta} J_{P\delta}^{-1} J_{PV}] \Delta V. \quad (2)$$

令 $S = [J_{QV} - J_{Q\delta} J_{P\delta}^{-1} J_{PV}]^{-1}$,可得无功电压的关系模型为:

$$\Delta V = S \Delta Q, \quad (3)$$

式中, S 称为灵敏度矩阵,它反映系统电压无功的动态特性,其元素 s_{ij} 表示节点 j 的无功功率变化一个单位

* 收稿日期:2006-08-11

作者简介:张忠静(1979-),女,苗族,贵州贵阳人,重庆大学硕士,主要从事电力系统运行控制研究。

时,节点*i*的电压变化量;且它的维数为系统的节点数,即既包含负荷节点也包含发电机节点. 一般情况下 $s_{ij} \neq s_{ji}$,但它们非常接近,并且考虑到两节点的电气耦合的对称性,定义无功电压耦合函数^[8]:

$$S' = [s'_{ji}] = \sqrt{s_{ij}^2 + s_{ji}^2}. \quad (4)$$

1.2 基于阈值搜索的分区法

基于阈值搜索的分区法是利用图论的方法来研究电力系统的建模^[9]:将系统的变量用图的节点表示,各变量间的相互关系用连接相应节点的边表示,各变量的耦合强度用赋予每一边的权重系统表示. 给定一个门槛值 a ,消去图中那些权重小于 a 的边,并对完成消去操作后图的节点进行重新配置,就可将相互间耦合强度小于或等于 a 的子系统区分出来. 这种方法的过程相对较简单,不需要进行复杂的计算,可直接根据灵敏度矩阵来分区.

文献[8]用多阈值的动态方法来分区,首先是确定每个子区域的节点数的上下限. 实际上,该限制是个不定数,很难确定,且子区域节点数上下限不同,则分区结果也不同,因此不能准确地对系统进行分区. 事实上,根据聚类思想,系统的最大分区数^[10] N_{\max} 在实验中取 $2\ln n$,最小分区数 N_{\min} 取2. 笔者借鉴文献[8]的方法,用基于阈值搜索的方法来确定划分区域的初值. 不同的是,首先确定所分区域个数 N 的上下限 $N_{\min} \sim N_{\max}$ 为 $2 \sim 2\ln n$,用此限制为条件来终止搜索过程,而不是用子区域节点数的上下限为条件来终止搜索过程.

对一 $n \times n$ 阶矩阵 $M = S'$ 进行阈值分解,该矩阵包括了系统中所有节点(PQ节点、PV节点和平衡节点),将该矩阵在图中表示出来,就可进行基于阈值的搜索,具体算法如下:

设系统规模为,由于 M 是对称阵,只需运算上三角阵. 搜索 M 最大的元素记为 $d, d = \max(m_{ij})$.

1) 归一化矩阵 M ,将 M 矩阵中所有元素除以 d ,得矩阵 M' .

2) 按从大到小的顺序排列 M' 矩阵的元素,得 $m_1 > m_2 > \dots > m_t, t \leq (n^*(n+1)/2)$.

3) 令 $k = 1$.

4) $a_k = m_k - \varepsilon$, ε 是任意小的正数,对图进行 a 分解. 分解后确定分区的个数 N_k ,如果 $N_k > N_{\max}$,则继续.

5) $k = k + 1$,转步骤4),直到分区个数 $N = N_{\min}$ 停止搜索.

值得注意的是,在阈值搜索过程中,如第 $k, k+1, k+p$ 次连续时,所得的分区个数可能会相同,都为 N_k ,在这 $p+1$ 次搜索过程中,有些节点“会移动”,即在

次搜索时属于某个子区域,而在下次搜索时属于另一个子区域,笔者称这些“会移动”的节点为临界节点,其余的节点称为非临界节点. 正是由于这些临界节点的存在,而使得当分区数为 N_k 时,分区方案并不是唯一的. 因为不能确定这些临界节点属于哪个区域,所以需要初始划分的区域进行改进,笔者就是利用动态分散法对初始区域进行调整的.

2 基于动态分散的改进分区法

2.1 电气距离函数

电力系统不同的物理量之间由以下的矩阵互相联系:

$$\begin{aligned} [\Delta I] &= [Y][\Delta U], \\ [\Delta Q] &= [\partial Q/\partial V][\Delta V], \end{aligned} \quad (5)$$

$$[\Delta U] = [Z][\Delta I],$$

$$[\Delta V] = [\partial V/\partial Q][\Delta Q], \quad (6)$$

其中 $[Y]$ 、 $[Z]$ 分别为节点导纳和节点阻抗矩阵; $[\partial Q/\partial V]$ 、 $[\partial V/\partial Q]$ 分别为式(3)中的 S^{-1} 、 S 矩阵. 这些式子可以用于潮流计算,因此可以用来模拟电力系统的动态行为.

系统中所有节点的衰减矩阵可由式(5)和式(6)得到,其元素为 σ_{ij} ,则

$$\Delta V_i = \sigma_{ij} \Delta V_j, \text{ 其中}$$

$$\sigma_{ij} = \left[\frac{\partial V_i}{\partial Q_j} \right] / \left[\frac{\partial V_j}{\partial Q_j} \right].$$

一般地,定义两节点间的电气距离为: $ED_{ij} = -\log(\sigma_{ij})$,其中, \log 是取自然对数.

在该文的计算中,为了满足电气距离间的对称性,定义并采用节点间的电气距离为:

$$ED_{ij} = ED_{ji} = -\log(\sigma_{ij} \cdot \sigma_{ji}). \quad (7)$$

电气距离表明大系统中不同节点间的耦合程度,且它只依赖于系统的结构.

2.2 动态分散法

动态分散法^[7]是基于电气距离的一种改进分区法,是先假定 N 个初始分区已经找到后,每个区域的中心可由下面介绍的方法计算出,第 i 节点就可分配给与它电气距离最近的中心以形成新的区域. 重复以上过程,直到形成稳定的分区.

动态分散法的主要问题是计算各区域内的中心节点,这个中心节点可以是一个区域内实际的或虚拟的节点. 对于初始分区后的第 K 个区域,实际的中心节点可以用以下3种方法来找到:

$$1) \min_i \left[\sum_j (D(i,j))^2 \right], i, j \in K \text{ 区域.}$$

这种最小平方的方法考虑了区域内节点的密度.

$$2) \min_i \left[\sum_j D(i,j) \right], i, j \in K \text{ 区域.}$$

这种方法得到的是该区域节点的质心.

3) $\min[\max D(i,j)], i,j \in K$ 区域.

这种方法搜索该区域中与其它节点的距离半径最小的节点为中心.

虚拟中心节点是把一个区域中各节点的电气距离记录在矩阵中,在该矩阵中找到该区域中两个电气距离最远的节点,这两个节点的中心就是该区域的虚拟中心节点.由于虚拟中心节点的算法简单高效,不需作大量复杂的计算,故在文中采用计算虚拟中心节点的方法来计算某区域的中心.

计算了各区域的虚拟中心后,确定某一节点到各区域中心的距离 d 可用以下方法求得:

假设 A,B 是某一区域内 2 个电气距离最远的节点(见图 1), X 是同一区域的另一节点, C 是该区域的中心节点.距离 $d(X,C)$ 用下式^[7]得到:

$$d(X,C) = \sqrt{\frac{d(A,X)^2}{2} + \frac{d(B,X)^2}{2} + \frac{d(A,B)^2}{4}} \quad (8)$$

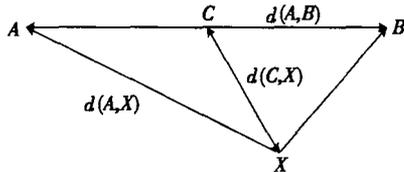


图 1 计算同一区域内任一点到中心节点的距离

3 算法流程

综合上面两节的内容可得,笔者提出的基于阈值搜索和动态分散电压/无功分区的算法主要由以下 4 步组成:

1) 用阈值搜索的方法找到初始的分区方案.

2) 计算各区域的虚拟中心节点.

3) 分别计算系统中每一节点与各个区域的虚拟中心节点的电气距离,如该节点与其中一个区域的中心节点的电气距离最近,则将该节点分配给此中心节点所在的区域,以形成新的区域.

4) 重复 3),直到所有节点合并完毕.

以上 2 种方法可以弥补对方的不足.阈值搜索比较简单,可以快速地得到初始分区方案,但各个区域中的节点分布不一定准确,动态分散法在此基础上可以寻求局部最优解,最终形成稳定合理的分区解.

4 算例分析

以 New England 10 机 39 节点系统为例,验证上述分区算法.确定系统的分区数限制为 2~7.当分区数为 4 时,由于篇幅的限制,选出其中一种方案如表 1 所示.

表 1 阈值搜索的系统初始分区方案

区域号	节点号	α 取值
1	1,9,39	0.106 8
2	4~8,10~15,31,32	
3	2,3,17,18,25~30,37,38	
4	16,19~24,33~36	

笔者采用动态分散法对所有节点(尤其是临界节点)所属的区域加以验证与修正.首先,计算节点到哪个区域中心节点的最小距离,则该节点就属于哪个区域.为简单起见,只列举几个临界节点的分布,如表 2 所示.经动态分散法计算后发现,非临界节点的归属和初始划分的相同,而临界节点最终能够确定其所属区域,因此动态调整只影响临界节点的分区.

表 2 节点到各区域中心节点的最小距离

节点号	到各个区域中心距离的最小值	所属区域
2	0.102 37	3
3	0.107 67	3
4	0.107 27	2
5	0.103 32	2
8	0.099 58	1
15	0.137 53	4
17	0.126 84	4
18	0.123 87	3

当分区数为 4 时,先经阈值搜索得到初始分区,用动态分散法对初始分区进行改进后的分区方案如图 2 所示.

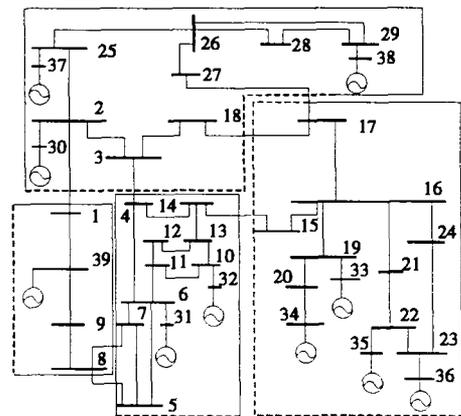


图 2 分区数为 4 时动态分散法改进后的分区方案

文献[5]采用 α 值嵌套分解算法对 New England 10 机 39 节点系统进行了分区研究,图 3 是用该法所得的当分区数为 4 时的分区结果.其缺点是算法复杂,计算量大,且容易产生孤立节点.基于 α 值嵌套法对分区结果进行调整时只是简单人为地将相邻的某 2 个节点

系统进行合并,对于孤立节点只是简单地把它归到其中一个区域,并无理论证明,而笔者提出的方法是在基于阈值搜索的基础上,用动态分散法对临界节点进行重新分区,一系列分区过程都有理论依据,因此所得结果更科学、可行和合理。

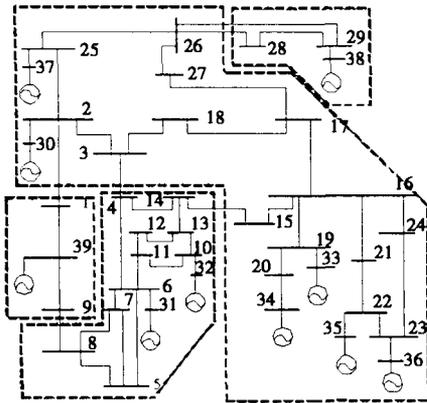


图3 分区数为4时基于嵌套分解的网络分区方案

5 结论

提出了基于阈值搜索和动态分散相结合的方法来进行二级电压控制的分区。此方法从系统电压稳定性的角度出发,基于系统的物理特征,不需要修改网络模型,不用分析特征值,执行起来比较容易,速度也较快,且保证了各区域间的弱耦合性质,从而满足分区的要求。

参考文献:

- [1] PAUL J P, LEOST J Y, TESSERON J M. Survey of the Secondary Voltage Control in France: Present Realization and Investigation[J]. IEEE Trans on Power System, 1987, 2(2): 505 - 511.
- [2] 周双喜,朱凌志,郭锡玖,等. 电力系统稳定性及其控制[M]. 北京:中国电力出版社,2004.
- [3] SCHLUETER R A, HU I, CHANG M W, et al. Methods for Determining Proximity to Voltage Collapse[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1991, 6(1):285 - 292.
- [4] YUSOF S B, ROGERS G J, ALDEN R T H. Slow Coherency Based Network Partitioning Including Load Buses[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 8(3): 1 375 - 1 382.
- [5] 范磊,阵珩. 二级电压控制研究(一)[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(12): 20 - 24.
- [6] 刘大鹏,唐国庆,阵珩. 基于Tabu搜索的电压控制分区[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(6):18 - 21.
- [7] LAGONOTTE P, SABONNADIÈRE J C, LEOST J Y, et al. Structural Analysis of the Electrical System: Application to Secondary Voltage Control in France[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1989, 4(2): 479 - 486.
- [8] 丁晓群,黄伟,章文俊,等. 基于电压控制区的主导节点电压校正方法[J]. 电网技术, 2004, 28(14): 44 - 48.
- [9] ZABORSZKY JOHN, WHANG KEN-WEN, HUANG GARNG, et al. A Clustered Dynamic Model for a Class of Linear Autonomous Systems Using Simple Enumerative Sorting[J]. IEEE Trans on Circuits and Systems, 1982, 29 (11):747 - 758.
- [10] PAL N R, BEZDEK J C. On Cluster Validity for the Fuzzy C-mean Model[J]. IEEE Trans Fuzzy Systems, 1995, 3: 370 - 379.

Network Partitioning Based on Threshold Search and Dynamic Scatter for Voltage/Var Control

ZHANG Zhong-jing¹, CHEN Gang¹, GUAN Zhong¹,
WU Ying-xia², ZHANG Wen-zhe², XIE Song³

(1. Key Laboratory of High Voltage Engineering and Electrical New Technology, Ministry of Education, Electric Engineering College of Chongqing University, Chongqing 400030, China;

2. Electric Power Dispatching(Dealing) Center, Chongqing Electric Power Corporation, Chongqing 400014, China;

3. Yangjiaping Power Supply Bureau, Chongqing Electric Power Corporation, Chongqing 400050, China)

Abstract: Secondary Voltage Control is a new way of voltage control, firstly the power system is divided into many control areas whose electric distance is remote. The partitioning method of secondary voltage control is studied and an algorithm that combination of the threshold search and dynamic scatter is presented. That is, the initial grouping scheme is obtained by searching the threshold value. The dynamic scatter method then is used to regulate and improve the initial results. The method is based on system's physical character, it's unnecessary to modify the network's model and analysis the eigenvalue, so the compute rate is fast. Through comparing the method and the traditional methods, this method is proved to be a reasonable and feasible partitioning scheme.

Key words: secondary voltage control; threshold search; dynamic scatter