

二次电压控制研究(一)

范 磊¹, 陈 珩²

(1. 国家电力公司电力自动化研究院, 南京 210003; 2. 东南大学电气工程系, 南京 210096)

摘要: 研究了一种新的提高系统电压稳定性的方法——二次电压控制。推导了二次电压控制的结构化模型, 该模型简洁, 具有清晰的物理意义。提出了一种确定二次电压控制区域的嵌套分解算法。该方法利用图论对系统进行分区, 不需进行特征值分析, 具有很快的计算速度。算法所具有的自然嵌套特性, 可进一步提高计算速度。通过与传统方法的比较, 证明该分区方法是有效的。

关键词: 电压稳定; 二次电压控制; 结构化模型; 系统分区

中图分类号: TM 712

0 引言

提高系统电压稳定水平, 防止电压崩溃事故的发生是电力系统安全运行必须考虑的问题。尽管电力系统电压稳定的研究已取得了很多成果, 但仍有很多问题待解决, 尤其是有关防止电压失稳措施的研究。其中, 由法国电力公司提出的二次电压控制^[1]是一种很有吸引力的方案。二次电压控制是一种分区控制, 每一分区都有相应的二次电压控制器。二次电压控制器通过监视主导节点的电压以及本分区的其他信息, 由主控计算机计算出每一受控机组应有的控制量, 将该控制量直接送至各控制机组, 改变控制机组励磁系统的电压设定值; 协调一个分区内所有控制机组的控制行为, 恢复主导节点的电压, 以改善这一分区的电压稳定性。二次电压控制是一种新型的电压控制方式, 有许多问题值得研究。这些问题包括: 如何建立二次电压控制系统的模型; 如何将系统进行分区; 如何选择主导节点; 如何进行控制才能有效地防止系统电压失稳等。本文将讨论二次电压控制的建模以及电压控制区的划分问题。

1 二次电压控制的结构化模型

实际上, 任何一个电力系统都可看做是由一组局部受控的发电机组、负荷以及连接它们的传输网络组成。当仅考虑系统的无功/电压特性时, 存在二次电压控制的电力系统基本结构可由图 1 表示。

由图 1 可见, 系统电压动态由 2 部分构成: 一级电压控制引起的一级电压动态和二级电压控制引起的二级电压动态。其中影响系统一级电压动态的主要系统部件包括发电机及其励磁系统、负荷和网络, 二级电压控制只在励磁系统中引入附加控制量。

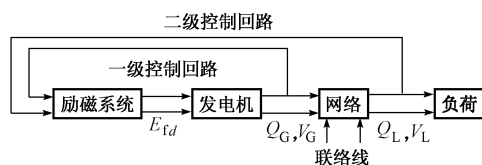


图 1 采取二次电压控制时电力系统的基本结构
Fig. 1 Basic structure of power system with secondary voltage control

用以表示发电机和励磁系统一级电压动态的模型很多。但不论采用何种模型, 发电机和励磁系统的电压动态总体上都是一样的。有关发电机和励磁系统模型的详细描述和推导参见文献[2]。

负荷模型始终是电压稳定研究中的一个非常重要的课题。本文所采用的负荷模型由图 2 表示。

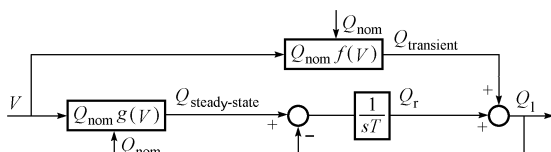


图 2 动态负荷模型框图
Fig. 2 Reduced dynamic load model

由图 2, 负荷的动态模型可以如下的方程表示:

$$\begin{cases} T_{pi} \frac{dP_{ri}}{dt} = -P_{ri} + P_{i0} \left(\frac{V_i}{V_{i0}} \right)^{n_{psi}} - P_{i0} \left(\frac{V_i}{V_{i0}} \right)^{n_{pti}} \\ T_{qi} \frac{dQ_{ri}}{dt} = -Q_{ri} + Q_{i0} \left(\frac{V_i}{V_{i0}} \right)^{n_{qsi}} - Q_{i0} \left(\frac{V_i}{V_{i0}} \right)^{n_{qti}} \end{cases} \quad (1)$$

其中 $i=m+1, \dots, n$; P_r, Q_r 为负荷的有功和无功恢复功率; T_p, T_q 为有功和无功负荷的恢复时间常数; $n_{ps}, n_{pt}, n_{qs}, n_{qt}$ 分别为有功和无功负荷的静态和暂态电压特性指数。

所有的发电机都通过网络互相联系, 因此网络方程就构成了一组约束发电机电压动态的方程。模

型化发电机的方法是用一组状态变量表示发电机的内部动态,而将发电机的输出功率作为发电机对外联系的关联变量。这样,网络模型可用潮流方程表示,而通过功率平衡方程式就可将发电机与负荷连接起来,进而构成全系统的动态模型。

当建立发电机、励磁系统、负荷和网络模型后,将这些方程线性化,经过化简,可推得二次电压控制模型如下:

$$\Delta V_1 = S_1 \Delta Q_1 + S_2 \Delta V_s \quad (2)$$

$$\Delta Q_g = S_3 \Delta Q_1 + S_4 \Delta V_s \quad (3)$$

式中 ΔV_1 为负荷节点电压的变化量; ΔQ_g 为发电机输出无功的变化量; ΔQ_1 为负荷节点无功的变化量; ΔV_s 为二次电压控制附加信号的变化量; S_1, S_2, S_3, S_4 为相应的系数矩阵。

方程(2)反映了负荷节点电压与负荷无功变化和二次电压控制附加控制量之间的关系。方程(3)则反映了发电机输出无功与负荷无功变化和二次电压控制附加控制量之间的关系。

2 α 嵌套分解算法

随着大系统理论的提出,人们开始使用图论研究大系统的结构建模问题^[3,4]。这种方法的基本思想是: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,各变量间的耦合强度用赋予每一条边的权重系数表示,从而可将一给定系统用图的形式表示。然后给定一个门槛值 α , 消去图中那些权重小于 α 的边,并对完成消去操作后图的节点进行重新安排,将其中不相连的各个子图区分出来,则这些子图实际上就表示相互间的耦合强度小于或等于门槛值 α 的子系统。这样,就可将一个系统分成若干个子系统。这种分解,文献[3]中将其称之为 α 分解,并进行了严格证明。这种分解方法在电力系统领域也得到了应用。

在使用 α 分解法确定系统分区时, α 的取值是个关键问题。通常采用的方案是对不同的 α 值进行计算,形成一个 α 表,从而获得对应于不同 α 值的各个系统分区方案。由于对各个不同 α 值都要重新计算, α 表的形成对大系统而言十分费时。为更有效地进行分区计算,以下给出一种 α 分解的嵌套算法。

考虑对一个 $n \times n$ 阶矩阵 $M = [m_{ij}]$ 进行分解。如将该矩阵用有向图 D 表示,则该图有 n 个节点,分别为 $\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$; 对图中每一条边定义一个权重,如 e 为节点 v_i 和 v_j 之间的边,则权重 $w(e)$ 为矩阵 M 中相应元素的绝对值 $|m_{ij}|$ 。对该图进行 α 分解,可观察到如下结论:

a. 当取 $\alpha = \max |m_{ij}|_{i \neq j}$ 时,该图将分成 n 个子

图,每个子图由 1 个节点组成;

b. 当取 $\alpha = 0$ 时,则子图数为 1,即子图就是全图;

c. 如取 $\alpha = \alpha_k$ 时, 2 个节点 v_i 和 v_j 在同一子图中,则取任意 $\alpha < \alpha_k$, 对图 D 进行分解时,这 2 个节点 v_i 和 v_j 仍在同一子图中;

d. α 的值并不连续,当取 $\alpha = \alpha_k$, 整个图的分解为 p_{α_k} , 取另一个 $\alpha = \alpha_{k+1}$, $\alpha_k < \alpha_{k+1}$, 整个图的分解为 $p_{\alpha_{k+1}}$, 且 p_{α_k} 不同于 $p_{\alpha_{k+1}}$, 则对任一 $\alpha \in [\alpha_k, \alpha_{k+1}]$, 所得到的子图将与 p_{α_k} 分解相同。换言之,只有 α 的取值从某一个临界值变成另一个临界值时,图的分解才会发生变化。

由上可见,对一个有 n 节点的图进行 α 分解时,必存在一个有限的 α 序列 $\max |m_{ij}|_{i \neq j} = \alpha_1 > \alpha_2 > \dots > \alpha_K = 0, K \leq n$; 任一 $\alpha \in [\alpha_k, \alpha_{k+1}]$, $k \in \{1, 2, \dots, K\}$, 都将获得相同的分解,该分解为 $\alpha = \alpha_k$ 时所得的分解 p_{α_k} ; 而且,这些分解所得的子图是嵌套的,即有 $p_{\alpha_1} \subset p_{\alpha_2} \subset \dots \subset p_{\alpha_K}$, 其中 p_{α_1} 将整个图分成 n 个子图,而 p_{α_K} 则将整个图归为同一个子图。图的分解嵌套决定了对矩阵 M 进行变换后所得的块对角阵也嵌套。

由于 α 分解的嵌套性,在进行分解时,第 $k+1$ 次分解可以从第 k 次分解获得,不必对整个图进行分解。对图 D 进行 α_k 分解后,可得图 D 的缩聚图 D_k 。这样,第 $k+1$ 次分解可从 (D_k, M_k, α_{k+1}) 中获得,而不必从 (D, M, α_{k+1}) 获得。其中 $M_k = [m_{pq}^k]$ 是相对于缩聚图 D_k 的 $M = [m_{ij}]$ 的缩聚矩阵。

总结以上分析结果,一个 $n \times n$ 阶矩阵 $M = [m_{ij}]$ 的嵌套分解算法如下:

a. 取 $k=1, N_k=n$,

定义节点集

$$V = \bigcup_{p=1}^{N_k} V_p^k, V_p^k = \{v_i\}, p \in \{1, 2, \dots, N_k\}$$

定义 $M_k = [m_{pq}^k]$

$$m_{pq}^k = \begin{cases} 0, & p = q \\ \max |m_{ij}|, & p \neq q, i \in V_p^{k-1}, j \in V_q^{k-1} \end{cases}$$

令 $\alpha_k = \max_{pq} \{m_{pq}^k\}$

b. 定义图 D_k , 该图与矩阵 $M_k = [m_{pq}^k]$ 相对应。

步骤 1: 输出 k, α_k, N_k 和 $V_p^k, p \in \{1, 2, \dots, N_k\}$; 步骤 2: 如 $\alpha_k = 0$ 或 $N_k = 1$, 则停止; 步骤 3: 令 $\alpha = \alpha_k - \epsilon$, 其中 ϵ 为任意小正数, 对图 D_k 进行分解; 步骤 4: 对图 D_k 进行分解后, 决定其分区数 N_k 以及相应的节点集合 $V_p^k, p \in \{1, 2, \dots, N_k\}$, 获得该图的缩聚图; 步骤 5: 由该缩聚图, 计算

$$m_{pq}^{k+1} = \begin{cases} 0, & p = q \\ \max |m_{ij}|, & p \neq q, i \in V_p^k, j \in V_q^k \end{cases}$$

获得缩聚矩阵。 V_p^k, V_q^k 分别为第 k 次分解所得的分区 p 和 q 的节点集合;步骤 6:令 $\alpha_{k+1}=\max_{pq}\{m_{pq}^{k+1}\}$;步骤 7:令 $k=k+1$,转步骤 1。

3 计算实例

以 New England 10 机 39 节点系统为例,验证上述分区算法。用于确定二次电压控制区的反映系统各节点间耦合强度的 M 矩阵可由方程(2)和方程(3)推导得出。表 1 给出了嵌套分区结果。

表 1 嵌套分区计算结果

Table 1 Calculation result of nested decomposition

k	α_k	分解结果
1	0.509 6	
2	0.362 8	{5,6}
3	0.327 9	{5,6},{10,11,13}
4	0.275 7	{5,6},{7,8},{10,11,13}
5	0.196 8	{5,6},{7,8},{10,11,13},{16,24}
6	0.181 7	{5,6,10,11,13},{7,8},{16,24},{17,18}
7	0.168 6	{5,6,10,11,13},{7,8},{16,17,18,24},{22,23}
8	0.153 9	{5,6,7,8,10,11,13},{16,17,18,24},{22,23}
9	0.120 9	{5,6,7,8,10,11,13,14},{15,16,17,18,24},{22,23}
10	0.110 7	{2,25},{3,15,16,17,18,21,22,23,24,35} {26,27},{4,5,6,7,8,10,11,13,14}
11	0.093 9	{2,3,15,16,17,18,21,22,23,24,25,35} {4,5,6,7,8,10,11,13,14},{19,20,33} {26,27},{28,29,38}
12	0.073 8	{2,3,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26, 27,30,33,34,35},{4,5,6,7,8,10,11,13,14}, {28,29,38}
13	0.061 8	{1,9,39},{28,29,38}
14	0.043 0	{2,3,4,5,6,7,8,10,11,13,14,15,16,17,18,19, 20,21,22,23,24,25,26,27,30,31,32,33,34,35, 36,37}
15	0.000 0	{1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17, 18,19,20,21,22,23,24,25,26,27,28,29,30,31, 32,33,34,35,36,37,38,39}

注:为简略起见,未列出仅包含单一节点的子区。

考虑二次电压控制的分区时,应满足以下几点要求:

- a. 为避免电压控制区之间存在较强的相互作用, α 的取值应小,但也不宜太小;
- b. 整个系统电压控制区的数目不宜过多,过多的电压控制区会影响系统整体的运行效率;
- c. 每个电压控制区的大小应适中,过大不易控制,过小则无实际意义,且会影响系统整体性能;
- d. 每个电压控制区都应包含发电机节点和负

荷节点,应尽可能使输入(发电机控制)在电压控制区内均衡分布。

对一个实际系统进行分区时,用上述算法所获得的分区结果往往需要调整,调整的方法一般是将某一子系统与另一子系统合并。虽该子系统可与任一子系统合并,但实践中这一合并通常是在考虑系统拓扑结构的基础上进行的,即只将 2 个相邻的子系统合并。这种合并不影响嵌套分区算法的有效性,因这种合并仍能使子系统间的耦合强度保持初始的耦合强度。实践中,有时还采用将某一子系统和与其耦合最强的子系统合并的策略,因这两个子系统之间的相互作用更明显。最严格的合并调整方法是力求两个子系统合并后所形成的系统具有某些特性,例如,合并后系统应足够稳定等。这当然需要较多的计算分析工作,但它更为严格。

第 12 次分解结果共分 11 个子区域,在这些子区域中,子区域 1,4,11 可以合并;子区域 3,5,7,8 可以合并;子区域 6 保持不变;其余的子区域合并。从而,当取 $\alpha=0.073\ 8$ 时,全部系统可划分为 4 个电压控制区。电压控制区 1 由 {1,9,39} 构成;电压控制区 2 由 {28,29,38} 构成;电压控制区 3 由 {4,5,6,7,8,10,11,12,13,14,31,32} 构成;电压控制区 4 由 {2,3,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27,30,33,34,35,36,37} 构成。图 3 为这种分区方案的示意图。

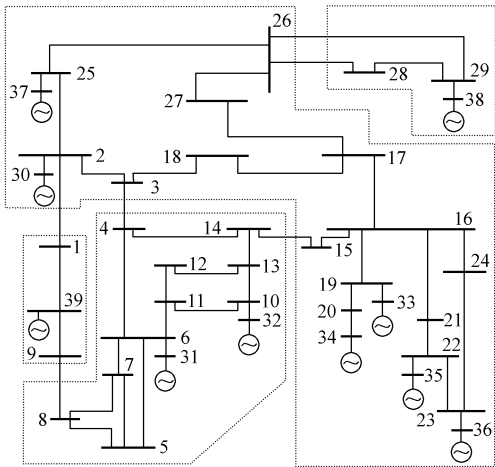


图 3 $\alpha=0.073\ 8$ 时系统分区方案示意图
Fig. 3 Sketch map of system decomposition
($\alpha=0.073\ 8$)

文献[5]中给出了一种用包括负荷节点在内的慢相关技术(slow coherency method)对同一系统进行分区的实例。使用该法将 New England 10 机 39 节点系统分为 6 区时的分区情况如图 4。

将图 3 与图 4 进行比较,可见两种方法所得结

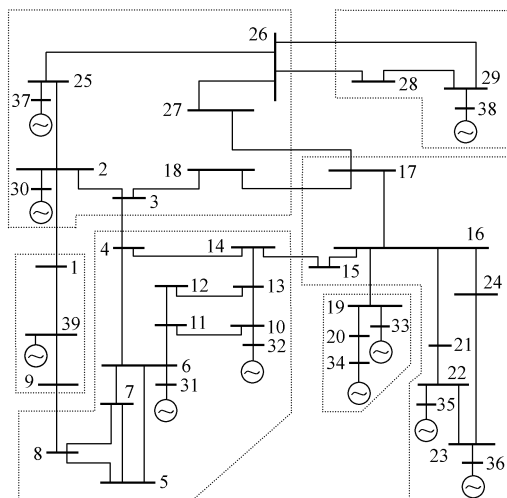


图4 基于慢相关技术的系统分区方案示意图
Fig. 4 Sketch map of system decomposition based on slow coherency method

果非常相近。基于慢相关技术的系统分区只是将图3中的最大分区又分成3个子区,其余部分2个方案都相同。基于慢相关技术的分区方法主要考虑功角稳定,从发电机的动态响应出发,而本文中的方法主要考虑的是电压稳定,两者有不同的侧重点,因而具体的分区结果略微不同。两种方法分区结果的相似从另一侧面证明文中提出的方法是有效的。

4 结语

本文提出的分区方法无需进行特征值分析,计算速度很快。对大系统,如采用嵌套分解技术,可更进一步加快计算速度。由这种方法所确定的系统各

分区之间是弱耦合的,从而保证对一个电压控制区的控制不会导致另一个电压控制区的电压失稳,这一特性可被充分利用以简化二次电压控制的分析和设计。

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. IEEE Trans on Power Systems, 1987, 2(2): 505~511
- 2 Sauer P W, Pai M A. Power System Steady-State Stability and the Load Flow Jacobian. IEEE Trans on Power Systems, 1990, 5(4): 1373~1383
- 3 Zaborszky J, Wang Ken-Wen, Huang G M, et al. A Clustered Dynamic Model for a Class of Linear Autonomous Systems Using Simple Enumerative Sorting. IEEE Trans on Circuits and Systems, 1982, CAS-29(11): 747~757
- 4 Sezer M E, Siljak D D. Nested ϵ -Decomposition and Clustering of Complex Systems. Automatica, 1986, 22(3): 321~331
- 5 Yusuf S B, Rogers G J, Alden R T H. Slow Coherency Based Network Partitioning Including Load Buses. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 8(3): 1375~1382

范磊,男,博士,主要研究方向为电压稳定、EMS等。

陈珩,男,博士生导师,主要研究方向为电力系统仿真、电力系统运行与控制及FACTS研究。

STUDY OF SECONDARY VOLTAGE CONTROL

Part One Structural Model and Nested Clustering Algorithm

Fan Lei¹, Chen Heng²

(1. Nanjing Automation Research Institute, Nanjing 210003, China)

(2. Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: This paper studies a new approach, secondary voltage control, to improve voltage stability. In this work, the structural model of secondary voltage control is derived. This model is very simple and has clear physical interpretation. A nested clustering algorithm to decide the partitioning of secondary voltage control areas is studied. This algorithm is based on graph theory and needs no eigenvalue analysis, hence it has very fast computational speed. Besides, the natural nesting characteristic of this method can further speed up the computation. The comparison of this algorithm with the conventional ones proves its validity.

Keywords: voltage stability; secondary voltage control; structural model; partition of system