

雅可比矩阵特征结构规律与二次电压控制的分区

杨朋朋, 韩学山

(山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061)

摘要: 通过潮流方程雅可比矩阵的特征结构规律分析, 发现雅可比矩阵最小特征值对应特征向量与无功分布有密切关系, 进而可以作为二次电压控制中区域划分的依据。通过简单系统分析说明上述规律的同时, 针对 39 节点系统, 在依据节点电气距离分区方法的基础上, 进一步研究了无功分布与最小特征值对应特征向量间关系, 以及与依据电气距离区域划分结果的关系, 发现它们的一致性, 且能揭示清楚的物理概念, 表明雅可比矩阵特征结构规律与二次电压控制的分区间的有机联系。

关键词: 系统分区; 二次电压控制; 特征值; 无功分布

中图分类号: TM714.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2005)12-0001-05

0 引言

在大电力系统实际运行调度、控制中, 由于实际工程的特点和需要, 常常根据实际工程问题发生的周期规律进行时域划分(如长期、短期、在线等); 根据地域间差异影响程度进行地域划分(如分区调度、分区控制等); 根据模型中物理量相互牵制程度进行物理性质的划分(如有功调度、控制, 无功优化、控制等)。通过这些划分来表达运行调度、控制的模型和求解方法, 以弱化问题的复杂性又不失去精度, 此研究在电力系统领域是热门课题。

就自动电压控制(AVC)研究与开发而言, 也离不开这种划分, 本文的研究仅限于二次电压控制的地域划分。常规 AVC 分三级进行控制^[1], 其中的二级电压控制就是基于负荷点无功扰动对系统各处电压影响程度的差异大小而将系统划分为若干近似解耦的区域来实现的, 当然划分区域的多少与划分要求的精度紧密相关。这种在 AVC 中将电力网络按照某种指标划分为近似相互解耦区域的思想, 只要满足工程精度要求, 在当今软件、硬件技术条件下, 就可以解决全局电压控制过于复杂、代价过于高昂的困难, 当然, 这种思想在系统分析中也得到广泛应用, 如, 将全局优化问题分解为区域优化问题, 简化约束条件; 分区潮流计算; 电力系统的规划设计, 例如电压控制设备的安装地点的选择, 等等。因此, 随着电力工业的不断发展, 电力系统规模的不断扩大, 寻找高效可靠的电力系统划分的理论和方法, 有一定的意义, 尤其对高度自动化的电网更有其迫切性。

在 AVC 三级控制方案中, 二级电压控制是在确定的区域内进行的, 该控制区域的划分应满足: 主控点对所辖区域内电压的变化应有灵敏的反映; 区域内应有一定的电压支撑能力; 区域间关联小。依据这些条件, 展开多种区域划分方法^[1,2], 如定义节点间的电气距离, 依据某种聚类原则, 进行划分; 基于潮流方程^[3-5], 在一定控制规则下依据某一目标, 寻找区域划分; 另外就是将这些方法联合使用^[6]; 文[7]基于潮流方程雅可比矩阵的特征结构分析, 提出确定大规模电力系统电压弱稳区计算方法。综合上述, 本文以潮流方程雅可比矩阵的特征结构分析为基础, 分析该雅可比矩阵特征结构规律与电压主控点、被控点之间的关系, 以及与无功分点之间的联系, 得出与依据电气距离吻合区域划分思想, 试图更清晰化表达二次电压控制中区域划分的物理概念。本文以 39 节点系统为例进行了区域划分的分析和比较, 表明雅可比矩阵特征结构规律与二次电压控制的分区间的有机联系。

1 潮流方程及其雅可比矩阵

设系统节点数为 n , 其中 PV (含平衡节点) 节点个数为 n_v , 则极坐标下系统节点 ($i = 1, 2, \dots, n$) 的注入功率方程可表示为:

$$P_i = V_i \sum_j V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (1)$$

$$Q_i = V_i \sum_j V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (2)$$

式中: P_i 、 Q_i 分别表示第 i 节点的注入有功、无功功率, V_i 、 θ_i 是相应节点的电压幅值与角度, $\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$, G_{ij} 和 B_{ij} 分别为节点导纳矩阵元素的实部和虚部, $j \neq i$ 表示节点 i 与 j 直接相连的节点且包括 $j =$

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50377021)

i 负荷按恒功率模型考虑。由此牛顿-拉夫逊法计算潮流的修正方程可表示为:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中: $J = \begin{bmatrix} J_P & J_{PV} \\ J_Q & J_{QV} \end{bmatrix}$ 为雅可比矩阵,各元素为注入功率对状态量的偏导数。

在研究电压控制问题时,一般认为有功与无功的弱耦合关系可以忽略,这样便有:

$$Q = J_{QV} V \quad (4)$$

式(4)中不包括 PV 节点,因而 J_{QV} 是维数为 $m = n - n_v$ 的方阵。

在正常运行方式下, J_{QV} 可逆,则式(4)可变为:

$$V = S_{QV} Q \quad (5)$$

其中: $S_{QV} = J_{QV}^{-1}$, 该阵是关于无功注入变化对电压变化的灵敏度,该阵的性质反映系统间无功、电压间联系的疏密程度,因此该阵是电压、无功控制区域划分的基础。

2 基于电气距离的区域划分

2.1 等效电气距离

由式(5)知, S_{QV} 阵就是节点无功注入变化引起各节点电压变化的灵敏度阵,以此为基础,可以定义系统中任意两节点之间联系的紧密程度,又通俗地称为电气距离,该距离的远近应反映任意两点之间联系的疏密程度。

设 S_{QV} 阵 i 行 j 列元素表示为 s_{ij} ($i=1, 2, \dots, m$; $j=1, 2, \dots, m$), 若定义:

$$d_{ij} = \left[\frac{V_i}{Q_j} \right] \left[\frac{V_j}{Q_i} \right] S_{ij} / S_{ij} \quad (6)$$

的物理含义在于: 节点 j 无功注入变化引起 i, j 二节点上的电压幅值变化比值,也就是 i, j 二节点上的电压幅值变化关系为:

$$U_i = d_{ij} U_j \quad (7)$$

一般情况下, $d_{ij} = d_{ji}$, 可以用 d_{ij} 表示节点 i 和 j 之间的疏密程度 (d_{ij} 的值越大,则电气距离越小,反之,越大),以满足距离的对称性。由于 $d_{ij} < 1$, 并且为了保证电气距离非负,一般把 i, j 两节点之间的等效电气距离表示为:

$$D_{ij} = -\lg(d_{ij}) \quad (8)$$

2.2 按等效电气距离的区域划分方法

依据式(8)的定义,可划分任意指定下区域数,划分区域数多少与设定的划分精度有直接关系。该法的流程如下:

1) M 个节点划分 m 个集合,令 $m = M$;
2) 在 m 个集合中,选出电气距离最近的两个集合,将之合并为一个集合,并令 $m \rightarrow M - 1$,并重新计算各集合间的距离;

3) 重复步骤(2),直到 $m = 1$;

多节点集合之间的电气距离的计算原则为: $D_{kl} = \max D_{kl}$, $k \in i$, $l \in j$ 。选择区域内引导节点的原则为: $\min[\max D(i, j) | i \in \text{class } k, j \in \text{class } k]$ 。

3 雅可比矩阵特征结构规律与区域划分

3.1 潮流雅可比阵的特征模式分析基础

对式(4)中雅可比矩阵 J_{QV} ,在正常的状态下,假设存在 m 个相异的特征模式(用 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$ 表示特征值)。对应每一特征值下,有相应的左右特征向量,经过规范化处理的左右特征向量分别为 x_1, x_2, \dots, x_m 和 y_1, y_2, \dots, y_m ,矩阵形式可以表达为:

$$J_{QV} X = X \lambda \quad (9)$$

$$J_{QV}^T Y = Y \lambda \quad (10)$$

$$y_i^T x_j = \begin{cases} 0 & i \neq j \\ 1 & i = j \end{cases} \quad (11)$$

上述中, X 为所有右特征向量构成的方阵; Y 为所有左特征向量构成的方阵; λ 为 m 个特征值构成的对角阵。

由此,雅可比矩阵 J_{QV} 也可以表示为:

$$J_{QV} = \sum_{i=1}^m x_i y_i^T \quad (12)$$

将上式代入式(4)可得:

$$Q = \sum_{i=1}^m x_i y_i^T V \quad (13)$$

在式(13)中,取无功扰动量为 $Q = e_k$,其中 e_k 是第 k 个元素为 1,其余元素均为 0 的列向量,则所引起状态变量的变化可推导为:

$$V = \sum_{i=1}^m \frac{x_i}{y_{k,i}} y_{k,i} \quad (14)$$

其中: $y_{k,i}$ 为左特征向量 y_i 的第 k 个元素,这样,第 k 个节点无功注入变化引起该节点电压变化的灵敏度可表示为:

$$\frac{dV_k}{dQ_k} = \sum_{i=1}^m \frac{1}{y_{k,i}} x_{k,i} y_{k,i} = \sum_{i=1}^m \frac{P_{k,i}}{y_{k,i}} \quad (15)$$

其中: $P_{k,i} = x_{k,i} y_{k,i}$ 为第 i 特征模式下对第 k 节点灵敏度的参与因子^[7]。式(15)在总体意义上与式(5)是一样的,但式(15)能细致反映每一特征模式下对灵敏度的贡献分布,在区域划分的深层次物理概念揭示上有积极意义。

3.2 最小特征值对应的参与因子与无功分布

在电压、无功控制中,主要依靠主控点(同步发电机、补偿设备等)对被控点(又称引导点)的控制,达到一定的电压水平,主控点越多、分布越合理,电压的水平就越好。可见在系统规划时这是一个矛盾的问题,即电压水平越好,投资就越多,所以现实运行的电力系统,主控点是有限的,这些主控点如何保证系统的电压水平就是AVC研究的核心。根据无功不能远距离传输的特点,主控点对被控点的支撑能力是有限的。一般来讲,主控点(具有电压支撑能力的节点集合)支撑力可以通过无功功率分点来观察。因此,从某种意义上讲,引导节点往往就是无功分点,决定一个区域电压水平的引导节点也可能不止一个,而是某一区域若干无功分点构成的集合,以鲁棒性最好且不影响邻近区域的,保证这一集合点的电压水平,就是一个自然的电压无功控制区域。实际上讲,绝对的二次电压控制分区是不存在的,因此二次电压控制分区是相对的。

分析发现,潮流雅可比矩阵特征结构中的最小特征模式 λ_{min} 对应的参与因子 P_{ki} 的值能够有一定规律的反映主控点到无功分点间的变化关系,以下以图1表示的10节点系统为例说明这一现象,该系统8、9、10为PV节点(包括平衡节点),线路($r=0.001, x=0.03$)与发电($P=0.2005, V=1.05$)参数都相同,负荷($P=0.6, Q=1.8$)处于节点1,表1为最小特征模式下的 P_{ki} 计算值。

表1 10节点系统最小特征模式下的 P_{ki} 值

Tab 1 Data of P_{ki} under the minimum eigenvalue mode of 10-bus system

节点号	P_{ki}
1	0.2507
2	0.18848
3	0.18848
4	0.18848
5	0.061286
6	0.061285
7	0.061285

由表1可以看出,参与因子 P_{ki} 的值以无功分点1为最大,以该分点为起点,参与因子 P_{ki} 在(1, 2, 5)、(1, 3, 6)、(1, 4, 7)三个放射路径上以递减的规律趋向主控点8、9、10;参与因子在同一割集(2, 3, 4)、(5, 6, 7)的两个层上以每层近似相等且向上层递减的规律趋向主控层(8, 9, 10),如图1,这表明在最小特征模式下对应的参与因子与实际的无功分布有显著的对应规律。

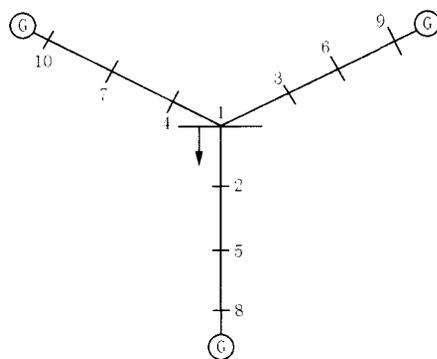


图1 10节点系统

Fig 1 10-bus system

由式(13)可得出,当无功扰动矢量模值一定时,系统电压变化矢量模值最大的方向恰好与最小特征值对应的特征相量方向一致。参与因子 P_{ki} 值的序列同此特征相量在数值上有很好的对应关系,因而,参与因子可以理解为在无功扰动一定的条件下,电压变化最大时各节点电压变化值的序列。该序列有沿以某一无功分点为起点,沿某一放射路径递减,沿某一割集同一层数值相当,沿同一割集向上层递减的规律,这一点在上述简单系统中得到证实。

上述规律,面临实际系统会有偏差,但至少和上述一样的变化趋势,下一节的算例分析可以深刻说明这一点。

4 算例

本文以IEEE新英格兰10机39节点系统为例对上述的依据电气距离划分和雅可比矩阵特征结构规律与区域划分之间的关系进行分析,原始数据取自文献[8],表2给出最小特征模式下参与因子 P_{ki} 的

表2 39节点系统最小特征模式下的 P_{ki} 值

Tab 2 Data of P_{ki} under the minimum eigenvalue mode of 39-bus system

节点号	P_{ki}	节点号	P_{ki}
12	0.1246	16	0.0250
7	0.0704	24	0.0229
8	0.0679	26	0.0161
14	0.0662	21	0.0153
13	0.0661	9	0.0139
4	0.0645	2	0.0071
5	0.0641	28	0.0066
11	0.0639	25	0.0055
6	0.0597	23	0.0051
10	0.0557	22	0.0047
15	0.0422	19	0.0036
18	0.0345	29	0.0030
17	0.0312	1	0.0014
3	0.0306	20	0.0013
27	0.0269		

计算结果,图 2 为该系统给定条件下的无功分布方向示意图。

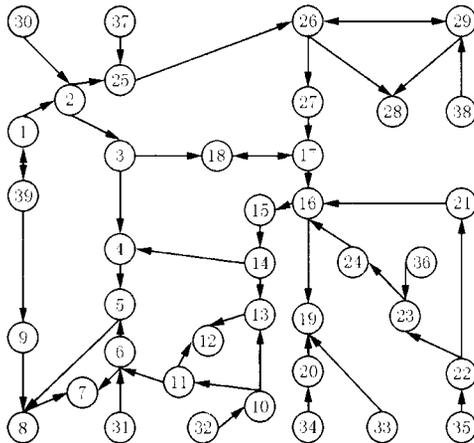


图 2 39 节点系统无功流动示意图
Fig 2 Diagram of reactive power flow of 39-bus system

结合表 2 和图 2 可见, 12、7、18、28 为四个明显的无功分点, 节点 16 也有较明显的无功汇集与分配的功能, 属于较关键的节点。由参与因子 P_{ki} 序列, 分别按这些分点为起点进行分析, 均有规律可循。具体表述如下:

以无功分点 12 为起点, 在 (12、13、10)、(12、11、10) 两个路径上以递减规律趋向主控点 32。

以无功分点 7 为起点, 在 (7、6)、(7、8、5、6) 两个路径上趋向主控点 31, 在 (7、6、11、10)、(7、8、5、6、11、10)、(7、8、5、4、14、13、10) 三个路径上趋向主控点 32, 在 (7、8、5、4、14、15、16、19) 上趋向主控点 33, 在 (7、8、5、4、14、15、16、19、20) 上趋向主控点 34, 在 (7、8、5、4、14、15、16、21、22) 趋向主控点 35, 在 (7、8、5、4、14、15、16、24、23) 上趋向主控点 36, 在 (7、8、5、4、3、2、1)、(7、8、9) 两条路径上趋向主控点 39, 在 (7、8、5、4、3、2) 上趋向主控点 30, 在 (7、8、5、4、3、2、25) 上趋向主控点 37。

以无功分点 18 为起点, 在 (18、3、2、1) 上趋向主控点 39, 在 (18、3、2) 上趋向主控点 30, 在 (18、3、2、25)、(18、17、27、26、25) 两条路径上趋向主控点 37, 在 (18、17、27、26、29) 上趋向主控点 38。

以无功分点 28 为起点, 在 (28、29) 上趋于主控点 38, 在 (28、26、25) 上趋于主控点 37。

同时也可以观测到, 参与因子 P_{ki} 的数值接近主控层时最小, 与分点越接近, 数值越大, 显现出明显的层次关系。

图 3 是基于电气距离的区域划分结果, 该结果

采用与文献 [9] 同样的原则。由该分区结果可以看出, 节点集合 (1, 39, 9) 构成的区域没有无功分点, 就是说没有明显的引导点, 而且由表 2 数值可见节点 1 和 9 都是电压支持能力较强节点, 仅控制住节点 1 和 9 难以与整体系统控制相协调, 这一划分是不合适的。其它三个区域的划分都有其合理性, 但若考虑节点 16 的特点, 是否可以将其作为引导点进一步增加一个区域 (该区域由节点 15、16、19、20、21、22、23、24、33、34、35、36 组成)。

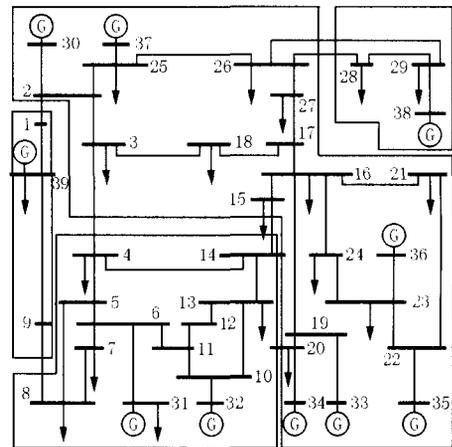


图 3 基于电气距离的 39 节点系统划分
Fig 3 39-bus system partition based on electrical distance

从电压控制效果来讲, 区域数划分的多少主要体现在区域间关联程度的处理上, 从本文的分析可见, 引导节点的数量, 也就是决定系统电压水平的节点数应该是区域划分的最大数量, 由于这些引导点不是绝对无关的, 因此实际划分数应该小于这个最大数量。

上述分析表明, P_{ki} 的数值变化规律, 也就是雅可比矩阵特征结构规律, 与二次电压控制的区域划分是有机联系的, 通过寻找无功分点与电源点间的关联强弱正体现区域划分的基本思想, 有较清楚的物理概念, 对区域划分起补充作用, 也可以依此直接进行区域划分。基于电气距离的区域划分, 需要提前确定划分区域的个数, 并且随着区域的增大, 区域之间的距离难以处理, 分区有其盲目性, 必须依据实践的检验, 若能与最小特征值对应的参与因子变化规律结合, 也许会有更好的区域划分效果。

5 结论

一定潮流状态下雅可比矩阵特征结构规律, 尤其是最小特征模式下对应的特征向量与系统的无功分

布有密切关系,体现在以无功分点为起点的参与因子 P_{ki} 以放射状递减达主控点,以该分点为割集核心的层间递减规律。依据此规律对二次电压控制分区有指导意义,达到分区物理概念清楚,目标准确的目的。

参考文献:

- [1] Lagonotte P, Sabonadiere J C, Leost J Y, et al. Structural Analysis of the Electrical System: Application to the Secondary Voltage Control in France [A]. IEEE PES SM. 1998.
- [2] Quintana V H, Muller N. Partitioning of Power Networks and Applications to Security Control [J]. IEE Proceedings on Gener, Transm and Distrib, 1991, 138(6): 535-545.
- [3] Stankovic A, Ilic M, Maratukulam D. Recent Results in Secondary Voltage Control of Power Systems [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1989, 6(2): 479-484.
- [4] Conejo A, de la Fuente J I, Goransson S. Comparison of Alternative Algorithms to Select Pilot Buses for Secondary Voltage Control in Electric Power Networks [A]. Proceedings of the IEEE MELECON 94 International Conference Antalya (Turkey): 1994. 940-943.
- [5] Conejo A, Aguilar M. A Nonlinear Approach to the Selection of Pilot Buses for Secondary Voltage Control [A]. Fourth International Conference on Power System Control and Management 1996. 191-195.
- [6] 许文超, 郭伟, 等. AVC应用于江苏电网的初步研究 [J]. 继电器, 2003, 31(5): 23-26.
- XU Wen-chao, GUO Wei, et al. Preliminary Study on Automatic Voltage Control of the Electrical Network in Jiangsu Province [J]. Relay, 2003, 31(5): 23-26.
- [7] 冯治鸿, 周双喜. 大规模电力系统电压失稳区的确定方法 [J]. 中国电机工程学报, 1997, 17(3): 152-156.
- FENG Zhi-hong, ZHOU Shuang-xi. Determination of Voltage Collapse Areas in Large Scale Power System [J]. Proceedings of the CSEE, 1997, 17(3): 152-156.
- [8] 周双喜. 电力系统电压稳定性及其控制 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- ZHOU Shuang-xi. Power System Voltage Stability and Control [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [9] 范磊, 陈珩. 二次电压控制研究(一)结构模型和蚁群算法 [J]. 电力系统自动化, 2000, 24(11): 18-21.
- FAN Lei, CHEN Heng. Study of Secondary Voltage Control, Part One: Structural Model and Nested Clustering Algorithm [J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(11): 18-21.

收稿日期: 2004-10-10; 修回日期: 2004-11-22

作者简介:

杨朋朋(1981-),男,博士研究生,研究方向为电力系统的运行与控制; E-mail: yangpeng_cn@263.net

韩学山(1959-),男,教授,博士生导师,从事电力系统优化调度、EMS、电力市场领域的研究和教学工作。E-mail: xshan@sdu.edu.cn

Jacobian matrix eigenstructure variation mode of the load flow and network partition in the secondary voltage control

YANG Peng-peng, HAN Xue-shan

(School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: Analyzing Jacobian matrix eigenstructure variation mode of the load flow, this paper finds that the eigenvector determined by the minimum eigenvalue is closely related to reactive power distribution, which is the basis of network partition in secondary voltage control. This phenomenon is showed by a simple system. For the 39-bus system, the relations are studied among the eigenvector and the reactive power distribution, as well as the partition result based on the electrical distance. And their consistency is found and the physical concept revealed clearly which indicates their close connection.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50377021).

Key words: system partition; secondary voltage control; eigenvalue; reactive power distribution

许继电气中标长江三峡电站发变组保护设备

5月30日,许继电气公司凭借强大的技术、质量和服务优势,在长江三峡右岸电站10台套发变组保护设备的招标中顺利中标,成为提供全套发变组继电保护产品及其附属设备的唯一供应厂家。中标产品为WF-800微机型发变组成套保护装置。

许继电气公司在电力系统主设备继电保护领域拥有领先的技术和丰富的工程经验。这次中标,许继将为我国家大型、特大型水力发电、火力发电、核能发电及燃气发电项目的建设继续提供优良的产品和服务,为国家电力建设做出更大贡献。