

Voltage Control Partitioning on Critical point of Voltage Stability

Gefei Fang, Wei Li

Electrical Engineering Department, Zhejiang University, Hangzhou, China

Email:loveandsoul8657@126.com

Abstract: Power system partitioning is the key of voltage and reactive power control in the present large network. This paper analyses the shortage of electric distance and defines Euclidean-distance reflection function with consideration of the effect on electric distance by reactive power at other nodes. Different partitioning point leads to different results, and different effect on system stability as well. In view of this, the paper proposes that it is the best to partition at critical point of voltage stability, and support this viewpoint with the concept of set. Statistic F and method of perturbation are used respectively to evaluate the partitioning results, and both verify the feasibility and validity of the viewpoint of partitioning at critical point of voltage stability.

Keywords: partitioning in power system; critical point of voltage stability; Euclidean-distance; volt/var control;

电力系统电压稳定临界状态的电压控制分区

方鹤飞, 李 玮

浙江大学电气工程学院, 杭州, 中国, 310027

Email:loveandsoul8657@126.com

摘 要: 电力系统分区是针对现代复杂电网进行电压无功控制的关键。文中分析了电气距离的不足, 考虑了空间节点上无功变化对电气距离的影响, 以欧氏距离定义映射函数。分区点不同, 得到的分区结果和对系统稳定的影响也是不同的。鉴于该问题, 提出了在电压临界状态附近点进行分区效果最佳, 引入集合的概念对上述观点进行分析。采用 F 统计量和扰动法分别在 IEEE30 节点系统上计算并衡量分区效果的优劣, 均验证了在电压稳定临界状态点分区的可行性与正确性。

关键词: 电力系统分区; 电压稳定临界状态; 电压无功控制; 欧式距离

1 引言

电压无功控制是保证现代大电网稳定运行的重要手段。电网规模的不断扩大和复杂程度的日益提高, 使得控制策略无法应对实际系统出现的电压问题, 频频导致电压稳定崩溃乃至停电。随着智能电网建设的不断推进, 风电、太阳能发电等分布式电源将数以万计的并网运行。在实际的电压无功控制中, 庞大的系统网络和繁琐的影响因素都增加了系统控制的困难, 有可能无法得到最优的控制策略。

电力系统分区的思想是将复杂的电网划分成若干个具有相似性质且联系紧密的区域, 而区域间的相互影响不大, 这样有针对性地进行无功控制, 可以说是既减少了计算时间, 又从整体上提高了系统的电压稳

定性和安全性。因此, α 分解法^[1]、向上分级归类算法^[2]、模糊聚类算法^{[3][4]}等被重点研究并应用。在这些研究中, 大多数在从电气距离的角度出发, 但是基本上都未涉及分区初期需要考虑的关键点, 即分区点的确定, 使用不同的分区点, 得到的分区结果也不尽相同。先进的算法固然能提高分区计算的速度, 实现分区效果的最优, 可忽略了分区点的选择, 则所得的最优解是值得进一步研究的。

本文提出在电压稳定临界状态附近点进行分区, 从系统稳定的角度引入集合的概念分析了该观点的可行性, 并在 IEEE30 节点系统上进行验证, 将在系统运行正常状态点和在临界状态附近点得到的分区结果进行比较, 证实了本文提出观点的正确性。

2 电气距离的定义

电压控制分区除了按照地理位置进行简单划分，还有就是按照电网结构考虑节点间的电气特性进行分区，将耦合紧密且相互影响大的节点划分在一起。传统的方法是利用灵敏度矩阵 S ， S_{ij} 表示节点 i 的电压变化 ΔV 对节点 j 的无功功率变化 ΔQ 的影响程度，即

$$S_{ij} = \frac{\partial V_i}{\partial Q_j} \quad (1)$$

式中 S_{ij} 可由牛顿-拉夫逊法推导得出，潮流方程如下：

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ K & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (2)$$

为简化计算，假设各节点的注入有功功率不变，即 $\Delta P = 0$ ，则上式可化简为

$$\Delta V = (L - KH^{-1}N)^{-1} \Delta Q = S \Delta Q \quad (3)$$

式中， S 定义为电压无功灵敏度矩阵。若直接用 S 作为分区的依据，则当 $i \neq j$ 时 $S_{ij} \neq S_{ji}$ 的性质不满足两点间的距离对称性。再者， S_{ij} 反映的是节点 j 单位无功功率的变化所引起的节点 i 电压变化，现给出定义系统电压衰减矩阵^[3]：

$$\alpha_{ij} = \frac{S_{ij}}{S_{jj}} = \left[\frac{\partial V_i}{\partial Q_j} \right] / \left[\frac{\partial V_j}{\partial Q_j} \right] \quad (4)$$

从上式可以看出，当等式右边 ∂Q_j 被消掉后， α_{ij} 直接表示了节点 i 和节点 j 之间的电压影响关系，即节点 j 单位电压变化所引起的节点 i 电压变化，这样更能反映节点间的电气特性。但是， α_{ij} 具有与 S_{ij} 一样的不对称性。同时，为了能够表达出当系统中节点 k 发生电压变化时，对节点 i 、 j 之间电气距离的影响，现引入欧氏距离^[5]的空间概念，定义电气距离如下：

$$D_{ij} = [(\alpha_{i1} - \alpha_{j1})^2 + \dots + (\alpha_{ik} - \alpha_{jk})^2 + \dots + (\alpha_{in} - \alpha_{jn})^2]^{1/2} \quad (5)$$

值得提出的是，为简化计算，电压无功灵敏度矩阵是在将 PV 节点作为 PQ 节点的前提下得到的，若在计算时需要考虑到 PV 节点的存在，具体可参考文献^[6]，本文就不再赘述。

3 电压稳定分区点

3.1 分区点的定义

在电压控制分区的研究领域内，各种算法层出不穷，多数从电气距离的角度出发，而电气距离是随着网络运行状态的变化而变化的，但研究者们均未指出

分区计算所需的网络运行点，即分区点。这里给出分区点的定义，是指分区计算所需的某一电网运行状态，即某一状态下全网各节点的潮流值，它随负荷的变化而变化。分区点的取值范围应控制在正常状态到临界状态之间，保证分区是在系统稳定的状态下进行的，反映在图 1 的 $P_R - V_R$ 平面上^[7]，就是曲线 CA 段或 CD 段。图 1 中，曲线 $CA0$ 、 $CD0$ 表示在不同功率因数下的 $P_R - V_R$ 负荷曲线，其中曲线的上半部分为稳定运行段， A 点、 D 点分别为曲线 $CA0$ 、 $CD0$ 的鼻点，即临界状态点。曲线 AB 为不同功率因数下的临界状态点连接成的临界状态 $P_R - V_R$ 曲线。假设 CA 表示运行在最大负荷下的 $P_R - V_R$ 曲线，系统处于稳定运行的临界状态，则由 $A - B - C$ 围成的区域表示最大稳定域。

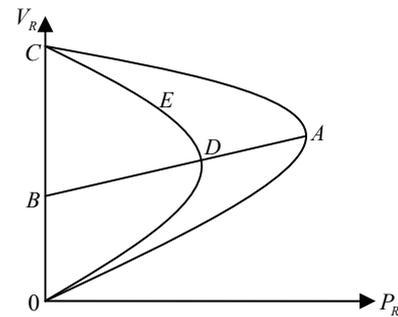


Figure 1. $P_R - V_R$ Plane

图 1 $P_R - V_R$ 平面

3.2 分区点的选择

在网络结构正常不变的情况下，分区点的选择是区分各个不同的电气距离矩阵的决定性因素。由电气距离矩阵的一系列推导公式可知，电气距离矩阵的关键是潮流计算所得的雅克比矩阵按照电压-无功的关系变化而来。所以，电气距离矩阵是与网络拓扑结构、线路参数和系统运行状态密切相关的。通常状况下，网络拓扑结构和线路参数均为常量（暂不考虑线路开路、机组退网等系统故障），那么唯一会随系统负荷变化的状态变量则决定了节点间电气距离的大小。因此，确定了分区点也就唯一确定了整个网络的电气距离矩阵。可是，实际节点间的耦合强弱是伴随系统运行变化的，当前表现得耦合紧密的节点可能就随着运行状态的变化而解耦。因此，如何选择分区点则成为决定分区效果好坏的关键，本文提出在临界状态附近确定分区点，既能够得到有效的分区结果，又可以保证系统在此分区下实施控制策略的稳定与经济。

针对实际系统中某一节点的 $P-V$ 曲线,图 1 中 A 点为系统处于最大负荷下的电压稳定临界状态点,为本文提出的临界状态分区点。首先分析当系统处于正常状态时,假设位于 E 点,系统的电压稳定裕度大。在该状态下分区进行电压无功控制,各种控制策略应该可以达到最优,实现电力系统各种指标的最优。然而,电网并非一直运行在这种“最优”状态,当负荷增加时,同一区域内节点间的耦合性可能会变弱,导致按照正常状态点分区进行的控制无法得到预期的效果;当负荷继续增加到临界状态,某一区域内的节点可能会与该区域解耦而与另一区域耦合紧密,如果再以同样的方式对该点进行补偿,将不可能解决系统面临崩溃的问题。所以,在正常状态点进行分区只能保证系统在分区点附近的稳定性,一旦负荷增大很多,该分区控制将使系统面临崩溃。而参照分岔理论,在临界点上,系统的定性特征往往发生改变,节点间的电气性质在临界状态转变的事实可以得到证明。引入集合分析的方法,本文将在某一状态点分区所能保证的系统稳定运行的点的集合定义为稳定状态集合。如图 2,稳定状态集合 A 代表在图 1 中按照 A 点进行分区时所能保证系统维持在稳定状态的集合,稳定状态集合 E 代表按照 E 点分区时所能保证系统维持在稳定状态的集合,显然集合 A 远大于集合 E ,集合 A 外均为不稳定状态集合,说明在临界状态点 A 进行分区控制效果最佳。

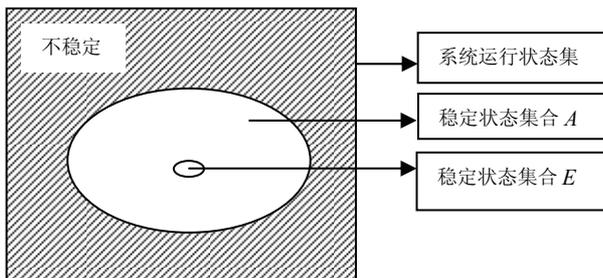


Figure 2. Running status set
图 2 系统运行状态集合

上述分析是从集合的角度来考虑,确定了在临界状态点分区的最优性。现引入 F 统计量,如下式:

$$F = \frac{\sum_{i=1}^r n_i \sum_{k=1}^n (\bar{D}_{ik} - \bar{D}_k)^2 / (r-1)}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (D_{jk} - \bar{D}_{ik})^2 / (n-r)} \sim F(r-1, n-r) \quad (6)$$

式中, r 为分区数; n_i 为某一分区所包含的节点数; n 为系统节点数; D_{jk} 为节点 j 、 k 间的电气距离; \bar{D}_{ik} 、 \bar{D}_k 的表达式分别如下:

$$\bar{D}_{ik} = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} D_{jk}, \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

$$\bar{D}_k = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n D_{jk}, \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

本文将利用 F 统计量比较在正常状态点和临界状态点确定分区的合理性。式(6)的分子项表示不同区域间的电气距离;分母项表示同一区域内元素间的电气距离。合理的分区应该是区域间处于弱耦合,电气距离小,而区域内处于强耦合,电气距离大。因此 F 值越大,则证明该分区越合理。

3.3 临界状态点的选择

本文提出的分区点是在临界状态附近点,具体地将其确定在电压崩溃临界点。由于对电压崩溃的理解不同,会导致对电压稳定指标的定义不同。文中采用文献^[10]对电压静态稳定性分析指标的定义,它是电力网的极限输送能力作为电压崩溃的临界点,是系统各负荷节点达到最大功率点,这与本文在图 1 中假设的临界状态点 A 相吻合。

求取电压崩溃点的方法主要分为两类:一是“逐点法”,即针对给定的注入和设置的故障进行潮流分析或特征值计算;二是“域”的方法,在 N 维功率空间中通过求解分岔点的集合最终形成的一个凸多面体。后者虽然能够很好的解决静态稳定性问题,且通过一定的空间转换^{[11][12]}可以实现电压稳定域的可视化,但是计算稳定域的过程过于复杂,而本文的重点并非研究电压崩溃点的求取,所以采用“逐点法”的思想,将文献^[10]中的负荷节点电压稳定性就地安全指标 A_{VM} 用于计算本文的电压崩溃临界点。

该指标利用系统的潮流结果,将其代入计算来判断电压稳定性,指标如下:

$$A_{VM} = [2(P_j r + Q_j x) - V_i^2] - 4[(P_j r + Q_j x)^2 + (P_j r - Q_j x)^2] \quad (9)$$

式中, i 、 j 为支路的首节点和末节点; r 、 x 为支路的电阻和电抗; V_i 为节点 i 的电压; P_j 、 Q_j 为节点 j 的输出有功和无功。

4 改进的动态 α 分区法

针对电压控制分区的算法很多,鉴于本文是为了比较同一算法下不同分区点所得到的分区结果,所以文中在动态 α 分区法^[9]的基础上,利用二分法取值的思想,减少了 α 的取值次数。具体分区步骤如下:

- (1)按照式(9)找出电压崩溃临界点,准备数据。
- (2)按照式(4)、式(5)计算电气距离矩阵,并根据

$D'_{ij} = D_{ij}/D_{\max}$ 对其进行格式化, 保证 D' 的所有元素都在 $(0,1]$ 范围内。

(3) 由于电气距离矩阵的对称性, 格式化矩阵 D' 仍保持对称性。为简化计算, 将 D' 的下三角元素置 0, 取出上三角非零元素按从小到大的顺序排列, 得到序列 d_1, d_2, \dots, d_k , 将其划分为 $k-1$ 个区间: $(d_1, d_2)(d_2, d_3) \dots (d_{k-1}, d_k)$, 令 $\alpha_i = (d_{i+1} + d_i)/2$ ($i=1, 2, \dots, k-1$)。

(4) 定义 $low=1$, $high=k-1$, 再定义与 D' 同规模的矩阵 M 。

(5) 令 $middle = (low + high) / 2$, 取 $\alpha = \alpha_{middle}$ 对 D' 进行 0-1 化简。若 $D'_{ij} \geq \alpha$, 则令 $M_{ij} = 1$, 否则取 0。

(6) 从第一个不为零的对角元素开始, 向右寻找第一个非零元素, 并以该元素继续向右向下寻找非零元素, 直到没有非零元素为止。记录下搜索到所有非零元素, 暂时归为一个节点簇。按照上述方法, 将整个系统划分为若干个节点簇, 最后将各个节点簇进行比较, 合并具有相同节点的节点簇为一个区域, 这样就得到系统的一个分区结果。

(7) 将所求得的分区数 m 与设定的分区数 m_r 进行比较, 若 $m > m_r$, 则令 $low=1, high=middle$, 回到步骤 (4) 依次往下进行; 若 $m < m_r$, 则令 $low=middle, high=k-1$, 同样回到步骤(4)继续分区计算, 直到分区数符合要求为止。

5 算例分析

5.1 算例结果

为了验证在临界状态附近点分区的可行性, 采用改进的动态 α 分区法在 IEEE30 节点系统上进行分区计算。分别得到在系统正常状态点和电压崩溃临界点的分区结果, 如表 1 和表 2。

5.2 结果分析

由表 1、表 2 可以看出, 随着负荷的增加, 全网各节点间的电气距离是在发生变化的, 节点间的耦合性在系统负荷达到最大时发生突变。第三分区和第四分区不仅区域内的节点数变化较大, 而且连中枢母线也改变了。所以如果按照正常状态点分区, 当系统随负荷增加运行到临界状态, 以第三分区为例, 因为中枢母线由节点 16 变为节点 18, 通过控制节点 16 的电压来调整第三分区的整体状态, 此时的无功补偿措施已经无法保证系统的稳定运行。

Table 1. Partitioning in normal state

表 1 正常状态点分区

分区号	中枢母线	节点号
1	3	1、2、3、4、5、7
2	28	6、8、28
3	16	12、13、16、17
4	19	9、10、11、18、19、20、21、22
5	30	14、15、23、24、25、26、27、29、30

Table 2. Partitioning in voltage collapse critical point

表 2 电压崩溃临界点分区

分区号	中枢母线	节点号
1	3	1、2、3、4、5、7
2	28	6、8、28
3	18	12、13、14、15、18、19、20、23、24、25、26
4	21	9、10、11、16、17、21、22
5	30	27、29、30

5.3 分区校验

5.3.1 F 值校验

针对已有的两种分区结果, 分别计算 F 值。给定上侧分位数 α (与动态 α 分区法中的 α 不是同一概念), 可查 F 分布上侧分位数表得 F_α 。通过比较 F 值与 F_α 的大小, 若 $F < F_\alpha$, 则该 F 值所对应的分区结果是不合理的; 若 $F > F_\alpha$, 则 $|F - F_\alpha|$ 值较大者所对应的分区结果更合理。

按照式 (6) 分别计算两种分区结果对应的 F 值, 在正常状态点分区的 F 值为 10.97, 在电压崩溃临界点分区的 F 值为 12.31。由于针对 IEEE30 节点系统, 且分区数均为 5, 则 F 值的第一自由度为 4, 第二自由度为 25, 给定 $\alpha = 0.01$, 查表得 $F_\alpha = 4.18$ 。虽然两种 F 值都大于 F_α , 但在电压崩溃临界点分区时 $|F - F_\alpha|$ 值更大, 故证明了在电压崩溃临界点分区的效果更佳。

5.3.2 扰动法校验

为了使上述分析更具说服力, 需要在 IEEE30 节点系统上加载一定的扰动输入。增加节点 14 的负荷, 在补偿相同容量的前提下, 针对两种分区结果分别进

行电压无功控制, 扰动前后节点电压标幺值的比较见表 3。其中, 第一种分区为在正常状态点分区, 第二种分区为在电压崩溃临界点分区。

Table 3. Per-unit voltage
表 3 电压标幺值

节点号	扰动前	扰动后	补偿差值
第一种分区控制结果			
14	1.0093	0.8990	-0.1103
15	1.0026	0.9881	-0.0145
23	0.9873	0.9855	-0.0018
30	0.9563	1.1411	0.1848
第二种分区控制结果			
14	1.0093	0.9205	-0.0888
15	1.0026	1.0097	0.0071
23	0.9873	0.9972	0.0099
30	0.9563	1.0780	0.1217

由表 3 可以看出, 相同扰动相同补偿容量下, 由于分区结果的不同, 各节点补偿后的电压标幺值相差很多。在选取的四个节点电压中, 只有节点 14 的补偿差值为负, 其余三个节点的电压在无功补偿后均有所上调。显而易见, 在电压崩溃临界点分区, 其控制效果更优, 更有利于系统运行的稳定性。

6 结语

本文以欧氏距离定义电气距离的映射函数, 采用动态 α 分区法进行分区计算。在此基础上, 本文重点分析了当前分区算法中对于分区点选择的这一盲点, 提出在电压稳定临界点分区的思想, 并在 IEEE30 节点系统上针对两种分区思想进行分区计算, 比较后得出本文观点的可行性与有效性。利用在电压稳定临界点的分区上进行电压无功控制, 能够很好地保证系统运行的稳定性与经济性, 有助于提高当前大电网分区控制的有效性。

References (参考文献)

[1] SCHLUETER R A, HU I, CHANG W M et al. Methods for Determining Proximity to Voltage Collapse. IEEE Trans on Power

- Systems, 1993, 8(3): 285-292.
- [2] Wang Yaoyu, Zhang Boming, Sun Hongbin, et al. A Method for Power System Partitioning of Optical Control on Voltage/Reactive Power Based on Expert Knowledge[J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18(3): 221-224.
王耀瑜, 张伯明, 孙宏斌, 等. 一种基于专家知识的电力系统电压/无功分级分布式优化控制分区方法. 中国电机工程学报, 1998, 18(3): 221-224.
- [3] Yang Xiuyuan, Dong Zheng, Tang Bao, et al. Reactive Power and Voltage Control Partitioning Based on Fuzzy Clustering Analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(22): 6-10.
杨秀媛, 董征, 唐宝, 等. 基于模糊聚类分析的无功电压控制分区. 中国电机工程学报, 2006, 26(22): 6-10.
- [4] Wang Ying, Peng Jianchun, He Yuqing, et al. Application of Fuzzy Clustering Algorithm to Secondary Voltage Control Partitioning[J]. Relay, 2008, 36(11): 28-32.
王颖, 彭建春, 何禹清, 等. 模糊聚类法在二级电压控制分区中的应用. 继电器, 2008, 36(11): 28-32.
- [5] Guo Qinglai, Sun Hongbin, Zhang Boming, et al. Reactive Power and Voltage Control Partitioning Based on Reactive Power Resource Space and Fuzzy Clustering Analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(10): 36-40.
郭庆来, 孙宏斌, 张伯明, 等. 基于无功源控制空间聚类分析的无功电压分区. 电力系统自动化, 2005, 29(10): 36-40.
- [6] Xiong Hugang, Cheng Haozhong, Kong Tao. Reactive Power and Voltage Control Partitioning Based on Immunity-medoids Clustering Analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(2): 22-26.
熊虎岗, 程浩忠, 孔涛. 基于免疫-中心点聚类算法的无功电压控制分区. 电力系统自动化, 2007, 31(2): 22-26.
- [7] Xu Zhiyou, Ji Yanchao, Mu Xianmin, et al. Critical Characteristics of Steady-state Voltage Stability and Determination of Minimum Stability Margin[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(6): 24-29.
徐志友, 纪延超, 牟宪民, 等. 静态电压稳定性的临界特性和最小稳定裕度的确定. 中国电机工程学报, 2006, 26(6): 24-29.
- [8] Lv Yanyan, Fang Gefei, Liu Junhua, et al. The Amelioration in the Course of Reactive Power and Voltage Control[J]. Electrical Engineering, 2006, 2: 39-41.
吕岩岩, 方鹤飞, 刘君华, 等. 电力系统电压与无功控制分区的改进[J]. 电工技术, 2006, 2: 39-41.
- [9] Ding Xiaqun, Huang Wei, Zhang Wenjuan, et al. A Pilot Bus Voltage Correction Method Based on Voltage Control Area[J]. Power System Technology, 2004, 28(14): 44-48.
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. 电网技术, 2004, 28(14): 44-48.
- [10] Zhou Shuangxi, Jiang Yong, Zhu Lingzhi. Review on Steady State Voltage Stability Indices of Power Systems[J]. Power System Technology, 2001, 25(1): 1-7.
周双喜, 姜勇, 朱凌志. 电力系统电压稳定性指标述评. 电网技术, 2001, 25(1): 1-7.
- [11] Wang Chengshan, Xu Xiaofei, Yu Yixin, et al. Visualization of Power System Static Voltage Stability Region in Cut-Set Space[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(9): 13-18.
王成山, 许晓菲, 余贻鑫, 等. 基于割集功率空间上的静态电压稳定域局部可视化方法. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 13-18.
- [12] Wang Chengshan, Fan Menghua, Wei Wei. Research on Voltage Stability Security Region in Area Total Load Space[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(28): 62-67.
王成山, 范孟华, 魏炜. 分区总负荷空间上电压稳定安全域的研究. 中国电机工程学报, 2009, 29(28): 62-67.