

基于向量相似度的无功电压分区方法的研究

李昌超¹, 鲁宝春², 陈凤英³, 钟元振³, 张婧芝⁴, 李新晓⁵

(1.浪潮集团, 山东 济南 250000; 2.辽宁工业大学电气工程学院, 辽宁 锦州 121001; 3.济宁市技师学院, 山东 济宁 272000; 4.泰能天然气有限公司, 山东 青岛 266071; 5.国网山东莒县工供电公司, 山东 日照 276500)

摘要:以电力网络无功电压灵敏度为基础, 提出基于向量相似度理论的无功电压分区新方法。首先, 在分区前, 利用广义Tellegen定理计算出网络中每个节点相对于其他节点的无功电压灵敏度, 并形成电压无功灵敏度矩阵; 其次, 利用向量相似度数学方法计算灵敏度矩阵各列的相似度, 由此定义了新的电气距离, 形成电气距离矩阵; 最后, 建立模糊相似矩阵, 利用模糊聚类理论划分电压控制区域。IEEE-30系统和IEEE-118系统仿真结果表明所提分区方法的准确性和合理性。

关键词:灵敏度; 广义Tellegen定理; 向量相似度; 无功电压

Reactive power voltage control partitioning based on vector similarity

LI Chang-chao¹, LU Bao-chun², CHEN Feng-ying³, ZHONG Yuan-zhen³, ZHANG Jing-zhi⁴, LI Xin-xiao⁵

(1. Inspur Group Co., Ltd, Jinan 250000, China; 2. School of Electrical Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, China; 3. Jining Technician College, Jining 272000, China; 4. Taineng Natural Gas Co., Ltd, Qingdao 266071, China; 5. State Grid Shandong Juxian Power Supply Company, Rizhao 276500, China)

Abstract: Based on reactive voltage sensitivity of the power network, this paper proposes a new method about reactive power voltage control partitioning, which bases on vector similarity theory. Firstly, general Tellegen's theorem is used to calculate the reactive voltage sensitivity of each node corresponding to other nodes, and the reactive power voltage sensitivity matrix is formed. Secondly, mathematical methods of vector similarity are used to calculate similarity among columns of the matrix, and a new electric range is defined to form electrical distance matrix. Lastly, fuzzy similar matrix is established and fuzzy clustering theory is used to divide voltage control regions. IEEE-30 system and IEEE-118 system show that the method of partition is accuracy and reasonable.

Key words: sensitivity; general Tellegen's theorem; vector similarity; reactive power voltage

中图分类号: TM715 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)14-0014-05

0 引言

随着电力网络的不断发展, 现代电力系统已形成以大机组、大电网、高电压、远距离交直流输电为主要特征的超级大系统。但是这些特征给电力网络的安全稳定运行带来了隐患, 同时大系统也存在着电压稳定的潜在危险性。为此, 针对无功电压问题对大系统进行快速、合理分区, 并实施区内有效的无功电压控制, 具有十分重要的意义。

针对无功电压分区问题, 电力界提出了诸多分区法: J.Zaborszky等人提出Cluster方法^[1], 该方法以故障节点为中心, 根据无功电压灵敏度, 形成局部电压控制域。在此基础上, 文献[2]利用图论理论

把cluster方法中因耦合紧密、分域过大、不利于控制的缺点加以改进, 分裂成较小的区域。为了得到既符合电力网络实际又具有较小的局部无功电压控制域, 文献[3]提出一种基于广义特勒根定理计算灵敏度并且应用模糊聚类分析进行无功电压紧急分域的新方法。基于静态能量函数的数学模型, 文献[4]提出一种构建能量/电压灵敏度矩阵并利用模糊聚类分析进行电压控制分区的新方法。基于社区网挖掘的分区理论, 文献[5]提出一种采用最大线路介数法对加权拓扑网络进行电压划分区域的新方法。在划分出区域后, 应进行无功补偿^[6-7]和无功优化^[8], 使系统进入安全状态。

近年来, 电力界对电力系统电压正常状态下分区(事前分区)问题展开研究, 以备电压紧急状态下, 小时间尺度的电压稳定问题的应急控制之用。并以“电气距离”为指标, 形成了一系列无功电压分

基金项目: 辽宁省高等学校优秀科技人才支持计划 (LR2011016)

区方法。文献[9]基于电压幅值对无功功率的灵敏度定义了电力系统各节点间的电气距离。然后根据电气节点间电气距离的关系, 将电气节点映射到几何空间, 从而将电力系统分区问题转化为几何空间中点的聚类问题。文献[10]根据电压幅值对无功功率的灵敏度定义了电力系统各节点间的电气距离, 并将粒子群优化搜索方法用于已有的电压分区的优化模型。文献[11]基于区域无功与电压关系, 以无功电源节点为初始节点, 应用最大-最小电气距离法合并相邻节点形成了初始分区, 据已得到的初始分区, 再次应用最大-最小电气距离法合并或解裂各初始分区, 最终得到合理分区。文献[12]以电网节点为分类对象, 通过雅克比矩阵中的电压幅值与无功的关系, 定义灵敏度矩阵并形成电气距离矩阵, 以此建立模糊相似矩阵, 再利用模糊聚类分析的传递闭包法划分该矩阵的电压控制区域。

尽管以“电气距离”为指标给出的分区方法取得了可喜的研究成果, 但是, 存在着两种不足: 其一, 通过雅克比矩阵中无功功率与电压幅值的关系形成的灵敏度矩阵, 只是把 PQ 节点之间的关系用数字的形式表现出来, 而没有考虑 PV 节点的作用; 其二, 利用灵敏度矩阵中, 关于两个主对角线对称的数的平均值定义出节点间的电气距离, 并没有考虑节点间的隶属关系。因此, 为了能够准确地划分出无功电压控制区域, 本文从系统出发, 并考虑节点间的隶属关系, 给出基于向量相似度理论的无功电压分区新方法。

1 基于向量相似度的无功电压分区思想

向量相似度是指两个向量的相似程度。向量相似度法是按照样本之间的相似程度把未标明类别的样本集合划分成自然类的数学分类方法。

依据向量相似度法的定义, 首先, 对电力网络进行空间向量建模, 对 n 节点电力网络可以看作 n 维向量空间, 并把每一个节点本身所具有的信息组成一个向量。然后, 得到由这些向量组成一个 n 维矩阵。这个矩阵可以表示为

$$A = (a_1, a_2, a_3, a_4, \dots, a_n) \quad (1)$$

式中: a_j 为任一节点所具有的信息组成的列向量, $j = 1, 2, \dots, n$ 。

考虑电力系统节点性质不同, 且拥有信息量繁杂, 对计算向量相似度误差较大, 不利于标定出节点间合理的电气距离, 宜选取能够反映节点间合适的电气距离指标。为此, 本文选定无功电压灵敏度指标, 在利用广义 Tellegen 定理形成无功电压灵敏

度的基础上, 利用向量相似度法求其向量的相似度, 从所求的向量相似度的数值上, 给出节点间“电气距离”的大小。依据节点间“电气距离”, 对电力网络进行分域。

2 基于向量相似度的无功电压分区方法

2.1 广义 Tellegen 定理灵敏度计算

根据广义 Tellegen 定理^[13]计算其节点无功电压灵敏度的公式为

$$\Delta V_i = -N_i [\bar{V}^T(i) \Delta Y V(0)] + N_i \{\bar{V}^T(i) [\hat{V}(0)]^{-1} \Delta \hat{S}\} - N_i \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{2n+p-1} V_k(i) D_{kk} \Delta V_k \quad (2)$$

式中: $V(0)$ 为节点电压的初值; $[\hat{V}(0)]^{-1}$ 为由 $V(0)$ 共轭 $\hat{V}(0)$ 形成对角阵的逆; $\bar{V}^T(i)$ 为增广方程的伴随方程解 $\bar{V}(i)$ 的转置; D_{kk} 为第 k 节点的导纳矩阵块; ΔS 为视在功率的变化量; ΔY 为节点导纳的变化量; N_i 为修正系数; i 为节点号; p 为 PQ 节点个数。

利用公式 (2) 计算出电力网络中所有节点的无功电压灵敏度形成无功电压灵敏度矩阵 S 。

2.2 形成向量相似度矩阵

无功电压灵敏度矩阵 S 形成后, 利用向量相似度计算方法计算矩阵 S 各列之间的相似度, 形成向量相似度矩阵 E 。

计算向量相似度的方法有: 内积、Dice 系数、Jaccard 系数和余弦系数等方法。本文采用 Dice 系数法计算向量之间的相似度, 其计算方法如下。

$$\text{设向量 } C_i = (c_{1i}, c_{2i}, c_{3i}, \dots, c_{mi})^T$$

$i = 1, 2, 3, \dots, n$, $C_j = (c_{1j}, c_{2j}, c_{3j}, \dots, c_{mj})^T$, $j = 1, 2, 3, \dots, n$, 则 C_i 与 C_j 之间的相似度计算方法如下:

Dice 系数为

$$\text{Sim}(C_i, C_j) = \frac{2 \sum_{k=1}^m c_{ki} c_{kj}}{\sum_{k=1}^m c_{ki}^2 + \sum_{k=1}^m c_{kj}^2} \quad (3)$$

2.3 数据处理

利用向量相似度计算方法形成相似度矩阵 E 后, 为了使不同量纲的数据也可以进行比较, 应进行数据规格化形成矩阵 E^* 。

目前常用的数据规格化方法有: 数据标准化、均值规格化、中心规格化、最大值规格化、极差规

格化。本文先对数据标准化再利用极差规格化对数据进行规格化处理，其计算方法如下。

(1) 数据标准化

对矩阵 \mathbf{E} 的第 j 列，计算

$$\bar{e}_j = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} e_{ij} \quad (4)$$

$$\sigma_j^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} (e_{ij} - \bar{e}_j)^2 \quad (5)$$

然后做变换

$$e'_{ij} = \frac{e_{ij} - \bar{e}_j}{\sigma_j} \quad (6)$$

式中： $i=1,2,3,\dots,n-1$ ； $j=1,2,3,\dots,n-1$ 。

实行变换后形成新的矩阵 \mathbf{E}' ，然后再对矩阵 \mathbf{E}' 作极差规格化形成新的矩阵 \mathbf{E}^* 。

(2) 极差规格化

对矩阵 \mathbf{E}' 的第 j 列，计算

$$Y_j = \max(e'_{1j}, e'_{2j}, \dots, e'_{nj}) \quad j=1,2,3,\dots,n-1$$

$$y_j = \min(e'_{1j}, e'_{2j}, \dots, e'_{nj}) \quad j=1,2,3,\dots,n-1$$

然后作变换

$$e^*_{ij} = \frac{e'_{ij} - y_j}{Y_j - y_j} \quad (7)$$

式中： $i=1,2,3,\dots,n-1$ ； $j=1,2,3,\dots,n-1$ ； $e^* \in \mathbf{E}^*$ 。

通过灵敏度矩阵 \mathbf{S} 得出相似度矩阵 \mathbf{E} 再把它定义为电气距离矩阵，从而建立了各节点间的内在联系。因此，可作为模糊相似矩阵 \mathbf{R} 。通过以上方法所得到的模糊关系矩阵 \mathbf{R} ，一般只是一个模糊相似矩阵，而不一定具有传递性，从而未必是模糊等价矩阵。所以本文采用传递闭包的方法形成模糊等价矩阵，然后再取阈值进行划分无功电压控制区域。

3 基于向量相似度的无功电压分区步骤

(1) 利用公式 (2) 计算出无功电压灵敏度，形成无功电压灵敏度矩阵 \mathbf{S} 。

(2) 利用公式 (3) 形成相似度矩阵 \mathbf{E} 。

(3) 利用数据标准化和极差规格化对矩阵 \mathbf{E} 进行数据处理，形成矩阵 \mathbf{E}' 。

(4) 建立模糊等价矩阵 \mathbf{B} 。利用模糊相似矩阵 \mathbf{E}' ，求其传递闭包 $t(\mathbf{E}')$ ，得模糊等价矩阵 \mathbf{B} ，为了减少合成计算次数，可采用平方法计算矩阵

\mathbf{B} 。

(5) 根据 \mathbf{B} 选取阈值 θ 划分区域。布尔阵 \mathbf{B}_θ 中的元素 b'_{ij} 与选取阈值 θ 的关系。

$$b'_{ij} = \begin{cases} 1 & b_{ij} \geq \theta \\ 0 & b_{ij} \leq \theta \end{cases} \quad (8)$$

式中： b_{ij} 是模糊等价矩阵 \mathbf{B} 中的元素； $\theta \in [0,1]$ ， $i=1,2,3,\dots,n-1$ ； $j=1,2,3,\dots,n-1$ 。

4 算例分析

利用 Matlab 软件对系统 IEEE-30 进行仿真，验证本文方案的可行性。具体见图 1。

(1) 根据步骤 (1) 形成无功电压灵敏度矩阵 \mathbf{S} 。无功电压灵敏度矩阵 \mathbf{S} 的部分数据为

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 0.046979 & 0.029472 & 0.035719 & 0.046582 & \dots \\ 0.028715 & 0.090086 & 0.072001 & 0.048895 & \dots \\ 0.034487 & 0.071505 & 0.086656 & 0.058962 & \dots \\ 0.041894 & 0.045611 & 0.055273 & 0.163480 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}$$

(2) 利用公式 (3) 形成相似度矩阵 \mathbf{E} 。

矩阵 \mathbf{E} 的部分数据为

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} 1 & 0.845870 & 0.772860 & 0.772400 & \dots \\ 0.845870 & 1 & 0.981530 & 0.928870 & \dots \\ 0.772860 & 0.981530 & 1 & 0.946300 & \dots \\ 0.772400 & 0.928870 & 0.946300 & 1 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}$$

(3) 对矩阵 \mathbf{E} 数据处理后，利用传递闭包方法形成等价矩阵 \mathbf{B} 。

等价矩阵 \mathbf{B} 的部分数据为

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & 0.845870 & 0.845870 & 0.845870 & \dots \\ 0.845870 & 1 & 0.981530 & 0.974710 & \dots \\ 0.845870 & 0.981530 & 1 & 0.974710 & \dots \\ 0.845870 & 0.974710 & 0.974710 & 1 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}$$

(4) 取阈值 $\theta = 0.975000$ ，建立布尔矩阵 \mathbf{B}_θ 。

布尔矩阵 \mathbf{B}_θ 的部分数据为

$$\mathbf{B}_\theta = \begin{bmatrix} 1 & & & & \\ 0 & 1 & & & \\ 0 & 1 & 1 & & \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}$$

(5) 分区结果，见表 1。

表1 分区结果
Table 1 Partition result

区号	节点号
I	9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22, 23,24
II	25,26,27,29,30
III	1,2,3,4,5,6,7,8,28

(6) 分区结果的比较。

文献[12]以IEEE 30节点系统为例得出的分区结果和利用本文算法得出的分区结果进行比较, 见表2。

表2 分区结果比较
Table 2 Comparison of partition results

区号	文献[12]法	本文法
I	9,10,11,12,13,14,15,	9,10,11,12,13,14,15,
	16,17,18,19,20,21,22,	16,17,18,19,20,21,22,
	23,24	23,24
II	8,25,26,27,28,29,30	25,26,27,29,30
III	1,2,3,4,5,6,7	1,2,3,4,5,6,7,8,28

如图1所示, 采用本文法对IEEE-30节点系统分为三个区域, 表2给出了本文法与文献[8]法形成的三个区域所包含的节点个数。针对第I区域, 两种分域结果相同; 针对第II区域, 节点8和节点28与节点25、节点26、节点27、节点29、节点30的相似度低, 而这两个节点与节点1、节点2、节点3、节点4、节点5、节点6、节点7的相似度高, 所以节点8和节点28分到了区域III中。所以本文的分区结果也合理。

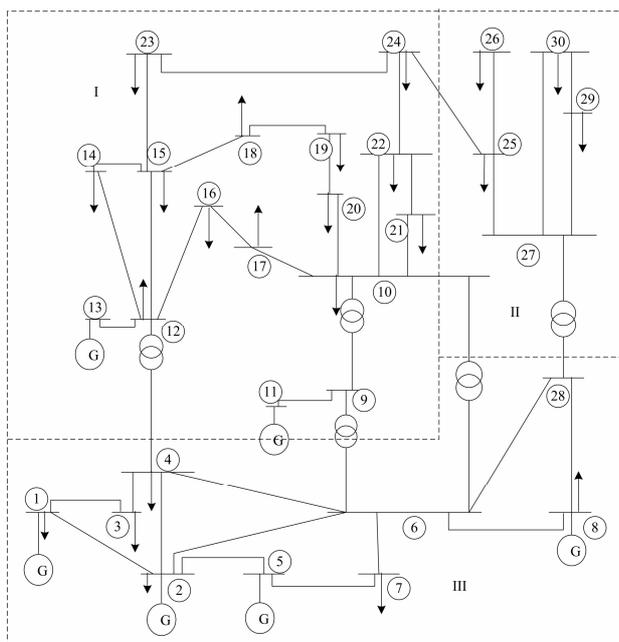


图1 IEEE-30节点系统分区结果

Fig. 1 Partition result of the IEEE-30 system

(7) 对IEEE-118节点分别采用本文法和文献[14]法分区。具体见表3。

表3 分区结果比较

Table 3 Comparison of partition results

分区号	本文法	文献[14]法
1	1~14,16,26~31,	1~14,27~29,31,
	117	117
2	15,17,18,33~46,	15~18,26,30,33~46,59,
	59,63,65,113	63~65,113
3	19~25,32,114,115	19~25,32,114,115
4	47~58,60~62,64,	47~58,60~62,
	66,67	66,67
5	68,69,74~87,	68,69,74~85,
	96~99,116,118	93~99,116,118
6	70~73	70~73
7	88~95,100~108	86~92,100~107
8	109~112	108~112

从表3得出: 节点16,26,30,64,86,87,93,94,95, 108的分区结果不同, 其余节点分区相同。这是由于本文以节点间相似度的大小为依据, 通过模糊聚类理论聚类, 把电力系统中相似度高的节点聚类到一起, 从而达到划分区域的目的。所以本文的分区结果是合理的。

5 总结

本文从电力网络节点间的隶属关系出发, 以广义Tellegen定理计算出的系统节点间的无功电压灵敏度为基础, 利用向量相似度计算方法形成向量相似度矩阵, 并定义了电气距离矩阵, 最后采用模糊聚类理论划分电压控制区域。IEEE-30系统的仿真表明: 本文分域法与常规分域法分区结果具有一致性, 验证了本文法的合理性与准确性。

参考文献

- [1] ZABORSZKY J, HUANG G, LIN S Y. Control of reactive power and voltage in emergency[J]. Automatica, 1985, 21(3): 237-246.
- [2] 孙锦鑫. 电力系统电压稳定分析与控制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学与华北电力学院, 1990.
SUN Jin-xin. Analysis and control of power system voltage stability[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology and North China Institute of Electric Power, 1990.
- [3] 鲁宝春, 郭志忠, 柳焯, 等. 电力系统局部电压紧急分域的新方法[J]. 中国电力, 1998, 31(1): 36-38.

- LU Bao-chun, GUO Zhi-zhong, LIU Zhuo, et al. Method of forming local voltage control regions on power system[J]. Electric Power, 1998, 31(1): 36-38.
- [4] 康勇, 李华强, 郑武, 等. 基于能量灵敏度矩阵和模糊聚类分析的电压控制分区[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(12): 69-73.
- KANG Yong, LI Hua-qiang, ZHENG Wu, et al. Voltage control partitioning based on energy sensitivity matrix and fuzzy clustering analysis[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(12): 69-73.
- [5] 白云, 李华强, 黄昭蒙, 等. 基于能量信息加权复杂网络的社区挖掘电压控制分区[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(16): 59-64.
- BAI Yun, LI Hua-qiang, HUANG Zhao-meng, et al. Community mining voltage control partition based on energy information weighted complex network[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(16): 59-64.
- [6] 陈瑶, 潘久平, 姚大伟. 厂用电系统协调无功控制策略[J]. 电工技术学报, 2011, 26(1): 188-184.
- CHEN Yao, PAN Jiu-ping, YAO Da-wei. Study of coordinated reactive power control strategy for power plant electrical auxiliary system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(1): 188-184.
- [7] 李勇汇, 吕艳萍, 彭辉. 一种基于分布式电源的串联补偿方式的设计[J]. 电工技术学报, 2010, 25(4): 158-164.
- LI Yong-hui, Lü Yan-ping, PENG Hui. Design of a series compensation scheme based on distributed generation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(4): 158-164.
- [8] 刘志文, 刘明波, 林舜江. REI 等值技术在多区域无功优化计算中的应用[J]. 电工技术学报, 2011, 26(11): 191-200.
- LIU Zhi-wen, LIU Ming-bo, LIN Shun-jiang. Research on application of REI equivalent technique into multi-area reactive power optimization computing[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(11): 191-200.
- [9] 刘大鹏, 唐国庆, 陈衍. 基于 Tabu 搜索的电压控制分区[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(6): 18-22.
- LIU Da-peng, TANG Guo-qing, CHEN Heng. Tabu search based network partitioning for voltage control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(6): 18-22.
- [10] 王春燕, 王倩倩, 马成飞, 等. 基于粒子群优化搜索的二级电压控制分区[J]. 南京师范大学学报: 工程技术版, 2010, 10(2): 1-5.
- WANG Chun-yan, WANG Qian-qian, MA Cheng-fei, et al. Searching for secondary voltage control area based on particle swarm optimization[J]. Journal of Nanjing Normal University: Engineering and Technology Edition, 2010, 10(2): 1-5.
- [11] 李磊, 黄彦全, 董家读, 等. 基于无功/电压控制的电网优化分区方法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(14): 88-92.
- LI Lei, HUANG Yan-quan, DONG Jia-du, et al. Optimization method of power network partitioning based on voltage/var control[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(14): 88-92.
- [12] 陈毓晖, 林韩, 蔡金锭, 等. 基于模糊聚类分析的电网分区研究[J]. 电力与电工, 2012, 32(3): 1-5.
- CHEN Yu-hui, LIN Han, CAI Jin-ding, et al. Grid partition based on fuzzy clustering analysis[J]. Electric Power and Electrical Engineering, 2012, 32(3): 1-5.
- [13] 鲁宝春, 刘毅, 马文阁, 等. 广义 Tellengen 定理及其在电力系统中的应用[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2003.
- LU Bao-chun, LIU Yi, MA Wen-ge, et al. General Tellengen's theorem and application in power system[M]. Shenyang: Northeastern University Press, 2003.
- [14] 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[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(10): 36-40.
- GUO Qing-lai, SUN Hong-bin, ZHANG Bo-ming, et al. Power network partitioning based on clustering analysis in MVAR control space[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(10): 36-40.

收稿日期: 2013-09-30; 修回日期: 2013-12-05

作者简介:

李昌超(1987-), 男, 研究生, 研究方向为电力系统电压稳定分析与控制; E-mail: 404602245@qq.com

鲁宝春(1964-), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统电压稳定分析与控制;

陈凤英(1975-), 女, 研究生, 研究方向为电力系统电压稳定。