

基于灰色关联度的紧急无功电压分域方法的研究

李昌超¹, 鲁宝春¹, 钟元振², 苏刘军¹, 李兴进¹

(1. 辽宁工业大学电气工程学院, 辽宁 锦州 121001; 2. 济宁市技师学院, 山东 济宁 272000)

摘要: 针对电力系统电压紧急状态, 提出了基于灰色关联度的紧急电压分域方法。该方法以广义 Tellegen 定理形成的灵敏度矩阵为基础, 将系统快速形成以故障电压节点为中心的无功电压控制域。利用灰色关联度方法对已划分无功电压控制域的边缘控制节点进行取舍处理, 搜寻与划分区域相连的控制节点, 并计算出每一个控制节点与之相连节点的灰色关联度, 按照灰色关联度的取值判定控制节点的取舍, 从而克服了阈值选取的不合理性引起的分域不准确。IEEE-30 系统算例表明: 该方法形成的紧急无功电压域具有简捷性与快速性, 符合电力系统实际。

关键词: 阈值; 广义 Tellegen 定理; 灵敏度; 灰色关联度; 无功电压分域

Emergency reactive power voltage control partitioning based on grey correlation

LI Chang-chao¹, LU Bao-chun¹, ZHONG Yuan-zhen², SU Liu-jun¹, LI Xing-jin¹

(1. Department of Electrical Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, China;

2. Jining Technician College, Jining 272000, China)

Abstract: According to the power system voltage state of emergency, a reactive power voltage control partitioning based on grey correlation is proposed. Firstly, the sensitivity matrix is formed by the general Tellegen's theorem, and then the reactive power voltage control region taking fault voltage node as the center is founded quickly. Secondly, the method of grey correlation is used to decide whether the divided region's edge control nodes are remained or abandoned. The control nodes connected with the divided region are searched to calculate the grey correlation between every control node and the nodes which connect with it. According to the value of grey correlation to decide whether the control nodes are remained or abandoned. In this way, the reactive power voltage control partitioning is getting more right. IEEE-30 test system shows that the emergency reactive power region formed by the proposed method is simple, fast, and practical.

Key words: threshold; general Tellegen's theorem; sensitivity; grey correlation; reactive power voltage control partitioning

中图分类号: TM744 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)08-0059-06

0 引言

伴随大系统互联, 电力网络逐渐加大, 如何形成以电压故障节点为中心的合理区域, 使其更具有针对性地控制, 具有十分重要的意义。目前, 电力系统无功电压紧急分域方法有: J.Zaborszky等人提出的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。为使电压紧急状态下分域合理, 且符合电力系统实际, 文献[3]基于遗传算法, 将电

压越限情况的无功电压控制分域问题归结为控制节点的组合优化问题进行电压分域。针对电力系统无功网络具有强区域解耦性的特点, 利用复杂网络理论中的社区网络挖掘方法, 即发现复杂网络中的抱团特性, 文献[4]提出了一种电网无功快速分区方法。

近年来, 基于模糊聚类理论对电力系统无功电压分域方法研究具有长足进展。模糊聚类理论应用到电力网络分域最早由文献[5]开始提出。后来经过发展, 许多学者在其基础之上提出了众多的分域新方法, 例如: 根据距离近的节点其耦合性强的特点, 文献[6-8]提出了“电气距离”的概念并将其用于电网分域。根据无功电压控制分区的特点, 并借鉴聚类算法思想, 文献[9]提出一种基于改进混合蛙跳—K均值聚类算法的无功电压控制分区。以先电源节点

基金项目: 辽宁省高等学校优秀科技人才支持计划 (LR2011016)

分区后负荷节点映射分区的思想为基础,文献[10]提出了一种基于电源分区与短路阻抗距离的电压无功分区方法。针对现有电压无功控制分区方法中缺乏定量评判分区结果优劣的问题,文献[11]提出了以节点电压无功耦合度为基础的区域耦合度指标以及用于选择区域主导节点的节点区域耦合度指标。同时通过对节点进行模糊聚类,建立了一套集分区、评价、控制于一体的电压无功 VQ 耦合度分区控制方法。基于谱系数平均距离法和模糊 C 均值聚类算法(FCM),文献[12]提出了一种电压控制区域的综合划分方法。

以上分域方法主要依赖于所选取的阈值,阈值的选取合理与否直接影响区域划分的准确性,因此,本文为解决阈值的选取问题,利用广义Tellegen定理计算的灵敏度,选定较大阈值进行快速划分电压控制区域,并利用灰色关联度方法对已划区域的边缘控制节点进行计算分析,判定该节点取舍。为此,即能快速分域,又减小了因阈值选取过大而造成区域过小的问题。

1 灰色关联度定义及其计算方法

1.1 灰色关联度定义

对于两个系统之间的因素,其随时间或不同对象而变化的关联性大小的量度,称为关联度。灰色关联度分析的意义是指在系统发展过程中,如果两个因素变化的态势是一致的,即同步变化程度较高,则可以认为两者关联度较大;反之,则两者关联度较小。因此,灰色关联度分析对于一个系统发展变化态势提供了量化的度量^[13]。

灰色关联度可分成“局部性灰色关联度”与“整体性灰色关联度”两类。主要的差别在于局部性灰色关联度有一个参考序列,而整体性灰色关联度是任一序列均可作为参考序列。

1.2 灰色关联度计算方法

设一个 $n \times l$ 的矩阵 $A = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_l)$, x_0 是一个 $n \times 1$ 的列向量,求矩阵 A 每一列和 x_0 的灰色关联度其计算公式为

$$Y(x_0, x_j) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{\Delta_{\min} + \xi \Delta_{\max}}{|x_0(k) - x_j(k)| + \xi \Delta_{\max}} \quad (1)$$

式中: $x_j \in A$, $j = 1, 2, 3, \dots, l$; $|x_0(k) - x_j(k)|$ 是 $(x_0(k), x_j(k))$ 两列在第 k 个元素处的绝对差;

$\Delta_{\min} = \min \min |x_0(k) - x_j(k)|$ 为两级最小差,第一级最小差 $\min |x_0(k) - x_j(k)|$ 表示在 x_0 与 x_j 对应

点的最小差,第二级最小差 $\min \min |x_0(k) - x_j(k)|$ 表示为所有第一级最小差中的最小值;
 $\Delta_{\max} = \max \max |x_0(k) - x_j(k)|$ 的意义与 Δ_{\min} 相同;分辨系数 $\xi \in [0, 1]$ 用来减小极值对计算的影响,以提高分辨率, ξ 可调节关联 $Y(x_0, x_j)$ 的大小和变化区间。

2 紧急电压分域基本思想

为快速形成紧急无功电压区域,本文采用两个阶段,即先粗分,然后再细分。

在粗分域时,利用广义Tellegen定理计算出故障节点相对于其他节点的无功电压灵敏度形成灵敏度矩阵。灵敏度矩阵形成后,根据模糊聚类理论进行区域划分,首先建立相似模糊矩阵并采用传递闭包方法建立模糊等价矩阵,然后对电网进行分域。在划分区域时为了快速得到一个以故障节点为中心的区域,本文选取一个较大的域值。

在粗分出以故障节点为中心的控制区域后,引入了灰色关联度的概念。对所划分区域的边缘节点进行分析,从理论上讨论其取舍,即细分区域。从而减小因阈值选取过大而造成的分域不准确。

为了解决灰色关联度计算量大的问题,在利用灰色关联度细化区域时,根据两直接相连的节点之间的灰色关联度最大这个特点。本文采用粗分区域边缘节点和与粗分区域边缘节点直接相连的节点之间的灰色关联度来决定区域边缘节点的取舍。这样既减小了计算量,又能体现该方法细化区域的实用性。

3 紧急无功电压分域步骤

(1) 利用广义 Tellegen 定理^[14]求故障对其他节点的电压无功的灵敏度,以此作为控制对象的特征指标。

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

式中: $V(0)$ 为节点电压的初值; $[\hat{V}(0)]^{-1}$ 为 $V(0)$ 的共轭 $\hat{V}(0)$ 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。

(2) 归一化。

(3) 采用距离法^[15], 建立模糊相似矩阵。

$$\mathbf{A} = (a_{ij})_{n \times g} \quad (3)$$

式中, 元素 a_{ij} 求法见式 (4)。

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & i = j \\ 1 - \sqrt{\frac{1}{h} \sum_{y=1}^h (a_{iy} - a_{jy})^2} & i \neq j \end{cases} \quad (4)$$

式中, h 为特征指标个数。

(4) 建立模糊等价矩阵 \mathbf{B} 。利用模糊相似矩阵 \mathbf{A} , 求其传递闭包 $t(\mathbf{A})$, 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) 根据矩阵 \mathbf{B} 选取一个较大的阈值 θ 划分出故障区域。布尔阵 \mathbf{B}_θ 中的元素 b_{ij} 与选取阈值 θ 的关系为

$$b_{ij} = \begin{cases} 1 & b_{ij} \geq \theta \\ 0 & b_{ij} < \theta \end{cases} \quad (5)$$

式中, b_{ij} 是模糊等价矩阵中的元素, $\theta \in [0, 1]$ 。

(6) 给出与步骤 (5) 所划分区域的边缘节点直接相连的节点。

(7) 给出与步骤 (6) 节点直接相连的节点, 孤立节点除外, 形成以步骤 (6) 节点为中心的多个区域。

(8) 利用公式 (1) 计算步骤 (7) 区域内节点对步骤 (6) 节点的灰色关联度。若步骤 (5) 所划分区域的边缘节点对步骤 (6) 节点的灰色关联度最大, 则步骤 (6) 的节点纳入步骤 (5) 所划分的区域。否则计算结束。

基于灰色关联度的无功电压分域流程图如图 1 所示。

4 算例分析

利用 Matlab 软件对 IEEE-30 节点系统 (如图 2 所示) 进行仿真。在第 10 节点增加负荷, 使该节点电压处于紧急状态, 同时在 2, 8, 16, 18, 20, 21, 24, 29 负荷节点施加无功电压控制设备。

(1) 利用步骤 (1) 计算故障节点对其他节点的电压无功灵敏度。

特征指标灵敏度的部分数据:

$$\mathbf{X} = (0.041919, 0.071161, 0.085831, 0.070925, 0.099242, \dots)^T$$

(2) 根据步骤 (2)、(3) 形成模糊相似矩阵 \mathbf{A} 。模糊相似矩阵 \mathbf{A} 的部分数据为

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0.155370 & 0.233310 & 0.154110 & \dots \\ 0.155370 & 1 & 0.077944 & 0.001254 & \dots \\ 0.233310 & 0.077944 & 1 & 0.079198 & \dots \\ 0.154110 & 0.001254 & 0.079198 & 1 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}$$

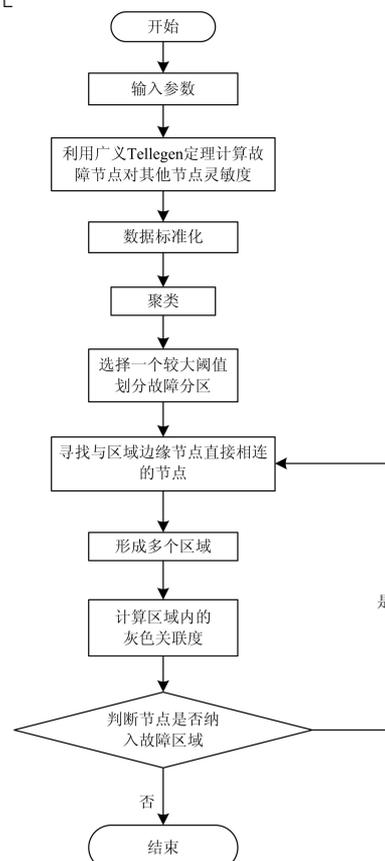


图 1 无功电压分域流程图

Fig. 1 Reactive power voltage control partitioning flow chart

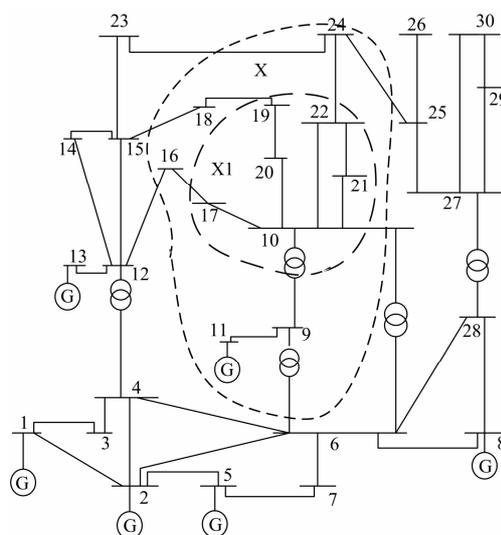


图 2 IEEE-30 节点系统分区结果

Fig. 2 Partition result of the IEEE-30 system

(3) 根据步骤(4)、(5)可形成模糊等价矩阵 B 和布尔矩阵 B_θ 。

模糊等价矩阵 B 部分数据为

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0.844630 & 0.766690 & 0.845890 & 0.695430 & \dots \\ 0.844630 & 1 & 0.766690 & 0.844630 & 0.695430 & \dots \\ 0.766690 & 0.766690 & 1 & 0.766690 & 0.695430 & \dots \\ 0.845890 & 0.844630 & 0.766690 & 1 & 0.695430 & \dots \\ 0.695430 & 0.695430 & 0.695430 & 0.695430 & 1 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}$$

取阈值 $\theta = 0.917430$ ，得到布尔矩阵 B_θ 。布尔矩阵 B_θ 的部分数据为

$$B_\theta = \begin{bmatrix} 1 & & & & & & \\ 0 & 1 & & & & & \\ 0 & 0 & 1 & & & & \\ 0 & 0 & 0 & 1 & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & & \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}$$

因此，通过以上数据可得到以故障节点为中心的区域为： $X_1 = \{10, 17, 19, 20, 21, 22\}$ 。

(4) 从图2中可以看出，与 X_1 区域边缘节点直接相连的节点为：18, 16, 9, 6, 24。利用步骤(6)、(7)形成的区域为： $\{9, 10, 6\}$ ， $\{6, 9, 10, 4, 2, 7, 8, 28\}$ ， $\{16, 12, 17\}$ ， $\{23, 24, 25, 22\}$ ， $\{18, 15, 19\}$ 。利用公式(1)计算这些区域内节点之间的灰色关联度。

(5) 利用步骤(8)进行节点的取舍。具体数据见表1。

表1 灰色关联度的计算结果
Table 1 Results of grey correlation

区域内节点	中心节点	灰色关联度
10	9	0.553 100
6		0.431 090
9		0.403 270
10		0.354 340
4		0.728 320
2	6	0.227 080
7		0.522 240
8		0.896 680
28	16	0.716 670
12		0.655 880
17		0.666 560
22		0.662 410
25		0.513 160
23	24	0.628 180
15		0.689 690
19		0.764 560

从表1可以看出，在区域 $\{9, 10, 6\}$ 中，第10节点与第9节点的灰色关联度最大，所以第9节点应纳入区域 X_1 。在区域 $\{16, 12, 17\}$ 中，第17节点和第16节点的灰色关联度最大，所以第16节点应纳入区域 X_1 。在区域 $\{23, 24, 25, 22\}$ 中，第22节点和第24节点的灰色关联度最大，所以第24节点应纳入区域 X_1 。对形成新的 X_1 再从步骤(6)开始计算。

(6) 最后得到以故障节点为中心的区域为 $X = \{9, 11, 10, 16, 17, 18, 20, 21, 22, 19, 24\}$ 。

(7) 对采用本文方法分区结果和采用文献[8]分区结果进行比较。具体见表2。

表2 分区结果对比
Table 2 Comparison of the results of grey correlation

文献[8]分区结果	本文分区结果
9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16,	9, 10, 11, 16, 17, 18, 19, 20,
17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24	21, 22, 24

从表2可以看出：分区结果中，只有几个节点的分区结果不一样，其余节点的分区结果相同。因为这些节点都是分区的临界节点，并且不是本文假设的控制节点。由于非控制节点可不在控制区域内，所以本文的分区方法是合理的。

(8) 对IEEE-118系统，分别采用本文分区方法和文献[7]分区方法进行分区，并对分区结果进行比较。

在利用本文方法进行分区前，应对 IEEE-118 系统进行补充假设条件。假设：在第12节点增加负荷，使该节点电压处于紧急状态，同时在4, 7, 15, 21, 26, 29, 34, 46, 52, 62, 67, 78, 82, 98, 106, 117 负荷节点施加无功电压控制设备。对比分区结果具体见表3。

表3 分区结果对比
Table 3 Comparison of the results of grey correlation

文献[7]分区结果	本文分区结果
1~14, 27~29, 31, 117	1~15, 26~29, 31, 117

从表3可以看出：利用本文方法所划分的区域比利用文献[7]划分的区域多出节点15和节点26，而且这两个节点都是本文假设的控制节点。这是因为本文重点是在粗分域后，利用灰色关联度寻找与故障节点强相关的控制节点。通过对IEEE-118系统进行分区，突出了本文这一特点。

在划分出以故障节点为中心的区域后，应在区域内控制节点上进行无功补偿，使系统恢复安全状态。具体的补偿方法可参见文献[16-18]，在这里就不具体详述了。

5 结论

本文在利用广义 Tellegen 定理计算灵敏度后, 根据模糊聚类理论快速地选定一个较大的阈值, 划分出一个以故障节点为中心的区域即粗分域。在划分的区域里可得到一些与故障节点耦合性较强的控制节点, 对这些节点加以控制使故障节点对系统的影响有所缓解。然后通过计算已划分区域的边缘控制节点与区域边缘节点的灰色关联度, 根据其值的大小细分区域。这样既可以弥补由于阈值选取较大而造成的区域划分过小, 又增加划分区域的正确性。本文通过对 IEEE-30 系统的仿真证明了此分域方法的简洁快速, 并且此方法还有益于运行人员在紧急状态下能够快速得到以故障点为中心的控制区域, 因而本文方法在电力系统中具有实用价值。

参考文献

- [1] ZABORSZKY, HNUANG G, LU S Y. Control of reactive power and voltage in emergency[J]. Automatic, 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] 赵彩虹, 马晓光. 基于遗传算法的局部电压分域新方法[J]. 电网技术, 2002, 26(9): 47-50.
ZHAO Cai-hong, MA Xiao-guang. A novel method to form partial voltage regions based on genetic algorithm[J]. Power System Technology, 2002, 26(9): 47-50.
- [4] 魏震波, 刘俊勇, 程飞, 等. 利用社区挖掘的快速无功电压分区方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(31): 166-172.
WEI Zhen-bo, LIU Jun-yong, CHENG Fei, et al. Fast power network partition method in mvar control space oncommunity wining[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(31): 166-172.
- [5] 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.
- [6] LAGONNOTTE P, SABONNADIÈRE J C, LEOST J Y, et al. Structural analysis of the electrical system: application to secondary voltage control in France[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1989, 4(2): 479-486.
- [7] 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, 54.
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, 54.
- [8] 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.
- [9] 王联国, 韩晓慧, 宋磊. 基于改进混合蛙跳—K 均值聚类算法的无功电压控制分区[J]. 传感器与微系统, 2013, 32(6): 18-21.
WANG Lian-guo, HAN Xiao-hui, SONG Lei. Reactive power voltage control partitioning based on modified shuffled frog-leaping-K-means clustering algorithm[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2013, 32(6): 18-21.
- [10] 颜伟, 王芳, 唐文左, 等. 基于电源分区与短路阻抗距离的电压无功分区方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(7): 109-115.
YAN Wei, WANG Fang, TANG Wen-zuo, et al. Network partitioning for reactive power/voltage control based on power sources clustering and short-circuit impedance distance[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(7): 109-115.
- [11] 陈霞, 孙海顺, 隋先超, 等. 一种区域耦合度指标及其在电压无功分区控制中的应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(7): 83-88.
CHEN Xia, SUN Hai-shun, SUI Xian-chao, et al. Area coupling index and its application in voltage and reactive power hierarchical control[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(7): 83-88.
- [12] 代飞, 黄磊, 徐箭, 等. 基于二级电压控制的河南电网分区和主导节点选择[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 101-105.
DAI Fei, HUANG Lei, XU Jian, et al. Voltage partitioning and pilot nodes selecting of Henan power grid based on secondary voltage control[J]. Power

- System Protection and Control, 2011, 39(24): 101-105.
- [13] 周静, 陈允平, 梁劲, 等. 灰色向量关联度在故障定位中的判相[J]. 高压电技术, 2005, 31(3): 12-14.
ZHOU Jing, CHEN Yun-ping, LIANG Jin, et al. Application of gray vector relational analysis to location of the fault-phase on transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(3): 12-14.
- [14] 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.
- [15] 陈水利, 李敬功, 王向公. 模糊集理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
CHEN Shui-li, LI Jing-gong, WANG Xiang-gong. Fuzzy theory and application[M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [16] 帅智康, 罗安, 吴传平. 一种低成本动态无功补偿装置及两级协同优化运行方法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(12): 162-170.
SHUAI Zhi-kang, LUO An, WU Chuan-ping. A novel low-cost dynamic var compensator and two-level collaborative optimization method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(12): 162-170.
- [17] 刘其辉, 蔚芳, 康长路. 基于电网电压定向矢量变换的 SVC 平衡化补偿策略[J]. 电工技术学报, 2009, 24(8): 147-153.
LIU Qi-hui, WEI Fang, KANG Chang-lu. Balancing compensation strategy of SVC based on grid-voltage-oriented vector transformation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(8): 147-153.
- [18] 丁仁杰, 刘健, 张隽, 等. 一种基于瞬时无功功率理论的 SVC 控制方法[J]. 电工技术学报, 2006, 21(5): 47-51.
DING Ren-jie, LIU Jian, ZHANG Juan, et al. New control method of SVC based on instantaneous reactive power theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(5): 47-51.

收稿日期: 2013-07-26; 修回日期: 2013-09-17

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;

钟元振 (1976-), 男, 研究生, 研究方向为电力系统自动控制。