

基于曲线分段-聚类法的变电站并联补偿容量 不等分组问题研究

曹 珊¹, 耿光飞¹, 彭 宏²

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 国网天津城东供电公司, 天津 300250)

摘要: 针对变电站并联补偿不等容优化分组问题, 提出一种基于曲线分段-聚类法的优化分组算法。首先利用变压器参数与负荷曲线计算变电站总的无功需求曲线, 将曲线最大值作为电容器总补偿量。然后利用曲线快速分段法和K-均值聚类法进行分段、聚类, 使聚类数等于电容器分组数, 并对聚类结果进行改进以满足各组容量之和等于总容量的约束, 则各类间差值为分组容量。为得到稳定的聚类结果, 以波动系数为指标研究分段数与分组容量结果之间的对应变化规律, 给出选择分段个数的经验性结论。分组方案确定后, 以九区图控制策略确定变压器分接头和电容器的投退。最后用算例验证了该方法的有效性 & 可行性, 当电容器分组数相同时与等分组法结果比较, 在动作次数相差不大的情况下, 本方法可有效减小电能损耗。

关键词: 无功规划; 无功补偿; 补偿容量分组; 曲线快速分段; 聚类

Research on unequal grouping of parallel compensation capacity in substation based on curve segmentation and clustering method

CAO Shan¹, GENG Guang-fei¹, PENG Hong²

(1. School of Information & Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;
2. State Grid Tianjin Electric Power Supply Company, Tianjin 300250, China)

Abstract: For the problem of unequal grouping of parallel compensation capacity in substation, a new optimization method based on curve segmentation and clustering is proposed. Firstly, this paper calculates compensation capacity curve by transformer parameters and load curve and takes the maximal value as the sum of compensation capacity. Then it partitions this curve into several segments and clusters these segmentation results into K clusters, in which the number of cluster is equal to the number of capacitor groups, further modifies the clustering results in order to meet the condition of constraint, and takes the difference between two adjacent cluster results as the capacity of each group. In order to get the steady grouping results, it studies the relationship between segment number and grouping results. After the grouping plan is determined, taking the nine-area figure as control strategy. Finally, simulating with an equivalent practical power grid and load profile, the results show both the availability and rationality of this method that power loss is less than the method of equal capacity when capacitor is divided into 3 groups.

Key words: reactive power planning; reactive power compensation; compensation capacity grouping; fast curve partitioning; clustering

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)20-0086-06

0 引言

电力系统无功补偿与系统的电能质量、网络损耗等有着密切的联系。在众多补偿手段中, 电容器因其造价低、运行维护检修简单等优点被广泛应用。在无功规划中, 首先需要确定补偿容量和补偿地点^[1-4], 然后根据需要对电容器等补偿设备进行分组^[5-11]。

如果电容器配置不合理就会影响无功补偿设备技术与经济效益的发挥。比如, 规划设计时补偿容量和分组不合理, 可能造成电容器投入率不高或无法投入运行的情况。配置电容器补偿容量及优化分组, 不仅可以提高电能质量, 还可以降低网损, 提高运行经济性^[12]。

在电容器分组方式中, 等分组法简单易行, 但由于未精细地考虑负荷变化的特性, 分组数较少时

易出现投入一组过补偿, 切去一组欠补偿的问题^[1], 这也正是电容器投入率不高的原因所在。不等分组法容量更精细, 各组电容器有效组合能够更好地适应不同的负荷水平, 提高投入率。

不等分组法在现有文献中的研究较少。文献[9]提出电容器总补偿量及等分组容量确定方法, 假定无功负荷曲线为补偿容量曲线, 则最大、最小无功负荷之差为总补偿量, 将其等分后即为单组容量; 该方法的缺点在于未考虑负荷曲线的波动特性及变压器的无功损耗。文献[10]提出采用波动系数指标来反映负荷变化的剧烈程度, 并指出该指标与电容器分组数及开关动作次数之间的变化规律。文献[11]采用最优覆盖法来实现变电站的无功优化配置, 对负荷概率分布曲线进行最优覆盖, 能够较合理地得到电容器不等分组方案, 该方法的缺点在于只考虑了负荷的波动性没有考虑到负荷的时序性, 且求解过程较复杂。

针对目前电容器优化配置中存在的问题, 本文提出一种新的优化分组算法——分段-聚类法。该方法综合考虑无功需求的波动性和时序性, 求解过程简单, 采用某实际电网模型进行验证, 将仿真结果与等分组法进行比较, 分别从降损效果、电压合格率和开关动作次数等几方面对该方法进行评价。

1 分段-聚类法基本原理

分段-聚类法示意图如图 1 所示。首先根据变电站的负荷曲线和变压器参数计算得出变电站无功需求曲线(图 1(a)), 然后用阶梯状曲线近似逼近(图 1(b)), 每段阶梯值看作该段需投入的无功补偿量, 相邻两段差值为电容器单组容量。由于分段数较多, 电容器组数也随之增多, 故采用聚类法将数值接近的若干段聚为一类, 使聚类数等于电容器分组数(图 1(c)), 在实际工程中分组数一般为 2~4 组。接着本文又将聚类结果进行了修正, 以无功需求曲线最大值代替聚类最大值(如图 1(d)所示), 这是由于聚类算法的聚类中心是对相关数据对象求平均值所得, 这样会使各聚类中心的最大值小于数据对象的最大值, 继而导致在重负荷时可能出现欠补偿的问题, 故本文对上述方法作进一步改进。

1.1 无功需求曲线及电容器总补偿量的确定

变电站无功补偿容量主要用来补偿无功负荷与变压器无功损耗。对于电容器优化分组问题, 无功负荷曲线可根据典型日负荷曲线得到^[5], 而变压器的无功损耗又可根据负荷来估算。

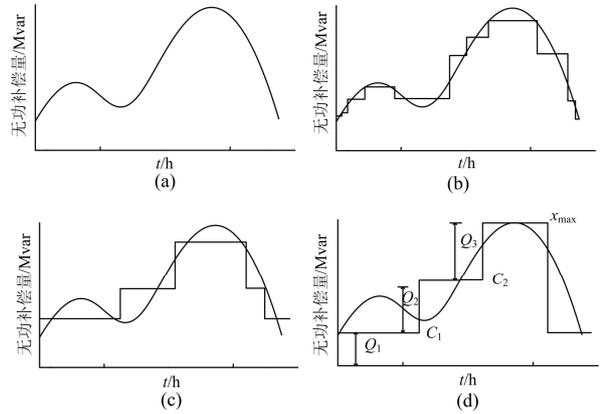


图 1 分段-聚类法示意图

Fig. 1 Schematic of segmentation and clustering method

$$Q_B = Q_0 + Q_K \cdot \left(\frac{S}{S_N}\right)^2 = Q_0 + \left(\frac{S}{U_N}\right)^2 \cdot X_T \quad (1)$$

式中: Q_B 、 Q_0 、 Q_K 分别为变压器的总无功损耗、空载无功损耗和短路无功损耗; S 、 S_N 分别为变压器视在功率和额定容量; U_N 为变压器额定电压; X_T 为变压器的短路电抗。

若无功负荷被就地完全补偿, 则变压器无功损耗近似为

$$Q_B \approx Q_0 + \left(\frac{P_{\text{load}}}{U_N}\right)^2 \cdot X_T \quad (2)$$

式中, P_{load} 为流经变压器的有功负荷。

由此变电站无功补偿容量为无功负荷与变压器无功损耗之和, 电容器总补偿量即为无功补偿容量最大值。

1.2 曲线快速分段法

曲线快速分段法^[13]基本原理是, 针对一时间序列, 依次取采样点, 计算该点与之前所有数据的均值之差, 通过与设定的某参数 d_0 比较大小来决定该点的归段情况, 重复直至所有采样点归段结束, 并通过改变初始值 d_0 来调整分段个数。

假设某补偿容量曲线时间序列如下

$$\mathbf{X} = [x_{11}x_{12} \cdots x_{1L_1} \cdots x_{S1}x_{S2} \cdots x_{SL_S}] \quad (3)$$

式中: S 为分段数; x_{ij} 表示第 i 段上的第 j 个采样点; L_1 表示第一个分段上包含的采样点个数; L_S 表示第 S 个分段上包含的采样点个数。

进一步将 \mathbf{X} 标准化

$$\mathbf{Y} = \mathbf{X} / x_{\text{max}} \quad (4)$$

其中: \mathbf{Y} 为标准化后的补偿容量时间序列; x_{max} 为向量 \mathbf{X} 中最大的元素。

利用曲线快速分段法对 Y 序列分段的流程图如图 2 所示。

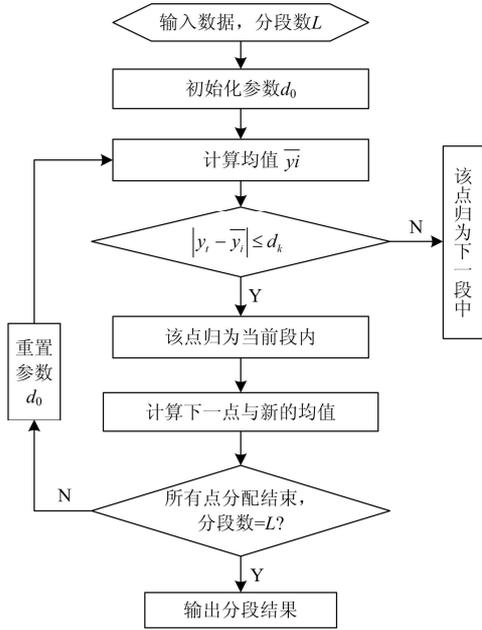


图 2 曲线快速分段法流程图

Fig. 2 Flowchart of fast load curve partitioning method

具体步骤如下。

1) 输入值: 补偿容量曲线数据 Y , 分段数 S , 采样点总数 L , 初始值 d_0 。

2) 变量初始化: 令 $d_k=d_0, k=0, i=1, t=1, j=1, L_{jk}=0, S_k=1$ 。其中: k 为迭代次数; i, t 分别指向各自采样点; S_k 表示当前所分段数; L_{jk} 表示第 j 段内包含采样点个数。

3) 计算当前段的均值 \bar{y}_i , 令时间 t 进入下一个值 $t+1$, 如果 $|y_t - \bar{y}_i| \leq d_k$, 则将 $t+1$ 点添加到当前段, $L_{jk}=L_{jk}+1$, 否则 y_t 为下一段的起始点, $S_k=S_k+1, j=j+1, L_{jk}=L_{jk}+1$; 令 $i=i+1$, 计算当新的 \bar{y}_i 。

4) 重复步骤 3), 直到 $t>L$ 时停止。如果 $S_k \neq S$, 令 $d_{k+1}=d_k \cdot S_k / S, k=k+1$, 重复步骤 2)。若 $S_k=S$, 那么 $L_{1k}, L_{2k}, \dots, L_{S_k}$ 就是每段中采样点个数。

5) 输出值: 分段数 S , 各段内采样点个数 $L_{1k}, L_{2k}, \dots, L_{S_k}$ 及各段数值 z_1, z_2, \dots, z_S 。

1.3 K-均值聚类法确定分组容量

聚类的目的是将分段结果 (z_1, z_2, \dots, z_S) 归为 K 类, 使得类内各数值接近, 类间关系不大, 其中 K 为电容器分组数。

K-均值聚类法^[14]目标函数为: 每一个数据点 z_i 与其最近的聚类中心的距离平方和最小(该平方和称为方差 D)。

$$\min D = \sum_{i=1}^L [\min_{r=1,2,\dots,k} d^2(z_i, c_r)] \quad (5)$$

式中: c_r 表示第 r 个聚类中心; K 为聚类数; $d(z_i, c_r)$ 表示数据点 z_i 到聚类中心 c_r 的距离。

K-均值聚类算法步骤如下。

- 1) 输入: 聚类个数 K , S 个数据值;
- 2) 初始化: 随机指定 K 个聚类中心 (c_1, c_2, \dots, c_k) ;
- 3) 分配 z_i : 计算每个数据点 z_i 与各聚类中心 $c_i (i=1,2,\dots,K)$ 的距离, 找到离它最近的聚类中心 c_v , 并将其分配到 c_v 所标明类中;
- 4) 修正 c_v : 重新计算每个类的均值作为新的聚类中心;
- 5) 循环 3) 到 4) 直到每个聚类中心不再发生变化;
- 6) 输出: 满足目标函数的 K 个聚类中心, 并升序排列为 (c_1, c_2, \dots, c_k) 。

将聚类结果进行改进, 用无功需求曲线最大值 x_{\max} 代替 c_k , 以满足各组容量之和等于总补偿量的约束条件, 则分组容量为相邻两聚类中心差值 $Q_i (i=1,2,\dots,K)$, 如图 1(d) 所示。

1.4 确定最佳分段数

分段-聚类法存在一定的不确定性——分段个数的变化对聚类结果有一定影响。针对此问题, 本文以波动系数^[9]作为指标反映曲线波动的剧烈程度, 对波动系数与分段数、分组结果之间的变化规律进行研究。波动系数的定义为

$$F = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^{S-1} |x_{i+1} - x_i| \quad (6)$$

其中: S 为采样点个数; x_i 为第 i 个采样点数值, $i=(1,2,\dots,S-1)$ 。

图 3 为一典型日 24 时无功需求曲线, 以此为例计算不同分段数所对应的分组容量值。图 4 为电容器分 3 组时的计算结果, 可见, 当分段数在 $[7, 16]$ 时, 分组结果稳定(由于分段数过多会失去分段的意义, 故不考虑 20 以上的分段数)。

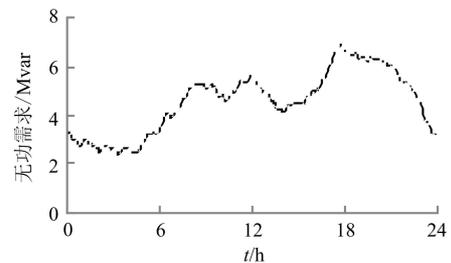


图 3 典型日 24 时无功需求曲线

Fig. 3 Curve of typical 24-hour reactive power compensation capacity

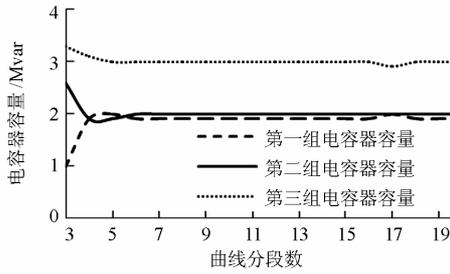


图 4 分段数与分组容量的关系

Fig. 4 Relationship between segment number and grouping results

然后改变图3曲线的频率与峰值, 形成不同波动系数的曲线, 采用与上例相同的方法, 得到统计结果(见表1)。表1中的波动系数是以原曲线为基准的标幺值, 分段数范围是指保证分组结果稳定的分段数。

表 1 波动系数与分段数、分组结果的关系

Table 1 Relationship of fluctuation coefficient and segment number and grouping results

补偿容量 曲线波形	波动系数	分段数范围	
		电容器分 3 组	电容器分 2 组
减小峰谷值	0.7	[5, 16]	[4, 17]
原曲线	1	[7, 16]	[4, 17]
增大峰谷值	1.4	[7, 16]	[4, 17]
2 倍频	2	[9, 16]	[6, 16]
3 倍频	2.9	[10, 14]	[7, 16]

由表1可知, 随着波动系数的增大, 分段数范围减小; 当电容器分2、3组时, 分段数在[10, 14]可保证在一定波动系数范围内分组结果稳定, 也就是说, 当分组数为2、3组时, 曲线波动系数在[0.7, 2.9]时, 分段数可选为分组数的4倍。若波动系数过高, 普通的并联电容器组补偿或不能满足要求, 此时可采用SVC等动态无功补偿装置。

2 无功控制策略

电容器分组方案确定后, 根据实时采集的变压器高压侧无功功率 Q_{th} 和低压侧母线电压 V 数据, 采用九区图控制策略^[15], 确定变压器分接头位置或投切电容器, 保证电压合格和无功基本平衡。其中, 当需要投入电容器时, 最佳补偿量为使系统运行状态转移到正常运行状态时的最小补偿量, 选择与之最接近的电容器组合投入。

变压器高压侧无功功率 Q_{th} 、功率因数 $\cos\varphi_l$ 和低压侧母线电压 V_l 约束为

$$\begin{cases} Q_{th} \geq 0 \\ V_{lmin} \leq V_l \leq V_{lmax} \\ \cos\varphi_{lmin} \leq \cos\varphi_l \leq \cos\varphi_{lmax} \end{cases} \quad (7)$$

式中: V_{lmax} 、 V_{lmin} 分别为变压器低压侧母线电压上下限; $\cos\varphi_{lmax}$ 、 $\cos\varphi_{lmin}$ 分别为变压器高压侧功率因数上下限。

3 算例分析

3.1 算例描述

图5为某110 kV变电站实际电网的等效电网模型。

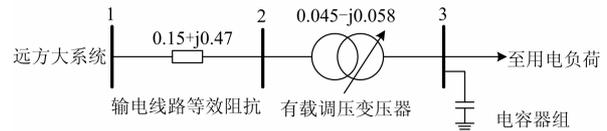


图 5 简化电网模型

Fig. 5 Simplified grid model

取功率基准值为 100 MVA, 电压约束设定为 $V_l \in [0.90, 1.05]$, 功率因数约束设定为 $\cos\varphi_l \in [0.95, 1.0]$ 。

3.2 无功需求曲线的合成

无功需求曲线应以能代表变电站一年所需无功大致情况为最佳。在未知年无功需求曲线, 只知道一年内每天的无功历史数据的情况下, 可将数条日无功负荷曲线按季度分类, 分别对每类中的曲线按一定原则进行归并, 得到四条不同季节内的典型日负荷曲线, 这四条曲线可基本上代表各季度内的无功波动特点, 包括最大、最小值时间, 峰谷个数, 峰谷时间段等; 若将这四条曲线首尾相接来模拟一年内的无功波动情况, 那么把这条曲线作为变电站的年无功需求曲线是合理的。

已知该变电站每日的无功负荷曲线, 类同于图3, 均为采样间隔为 5 min 共 288 个采样点的曲线。对每季度的数条曲线以曲线之间距离最小进行归

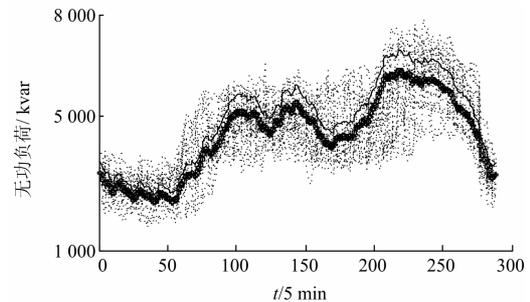


图 6 冬季无功负荷曲线归并结果

Fig. 6 Merge result of reactive power load curve in winter

并^[16]为原则, 得到季典型日无功负荷曲线。图6为冬季(12月~2月)无功负荷曲线的归并结果, 其中粗线是经过归并后得到的冬季典型日负荷曲线。以此类推, 分别计算四个季度内的典型日无功负荷曲线。

将四条曲线首尾相接, 如图7所示, 作为变电站无功需求曲线。

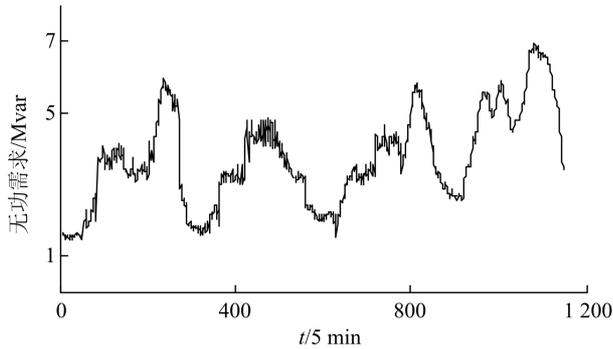


图7 无功曲线合成

Fig. 7 Composition of reactive power compensation curve

3.3 仿真结果及分析

分别利用方法一(分段-聚类法)与方法二(等分组法)对无功需求曲线进行电容器优化分组计算, 此处以电容器分3组为例, 结果见表2。

表2 电容器分组结果

Table 2 Results of capacitor grouping

电容器总容量/Mvar	电容器分组容量/Mvar	
	方法一	方法二
6.9	1.6+2.3+3.0	2.3+2.3+2.3

将两种分组结果分别在不同的典型日负荷曲线(春、夏、秋、冬)上加以验证, 仿真结果均无电压越限情况出现, 变压器分接头动作次数都在2次左右, 故不作赘述, 其余计算结果见表3。

表3 两种电容器分组方法比较

Table 3 Comparison of two methods of capacitor grouping

算例	分组方法	电能损耗/kWh	投切次数	方法一比方法二减小的电能损耗百分比/%
春	方法一	3 813.2	6	3.1
	方法二	3 936.5	6	
夏	方法一	2 963.3	4	5.5
	方法二	3 136.1	5	
秋	方法一	3 595.4	6	4.0
	方法二	3 745.5	4	
冬	方法一	4 476.2	6	2.5
	方法二	4 593.7	5	

由表3可见, 两种分组结果在投切次数相差不大的情况下, 方法一有效地减小了电能损耗, 其中以夏季最为明显, 这是由于夏季最高无功需求较低, 大部分情况下无功需求不足4.6 Mvar。所以方法二的第二组2.3 Mvar电容器无法投入, 而前者的不等分组容量可以选择恰当的容量搭配, 如投入3 Mvar的电容器组, 很好地跟随负荷波动的变化进行补偿, 从而有效降低电能损耗。

以春季负荷曲线为例详细说明电容器组投切过程, 表4为两种方法电容器组在一天内的具体投切情况。

表4 电容器投切过程

Table 4 Capacitor switching process

分组方法	容量投切过程	投切总次数
方法一	1.6→3.0→4.6→3.0→1.6	6
方法二	0→2.3→0→2.3→4.6→2.3→0	6

在表4中, 前者补偿容量在由1.6 Mvar变为3.0 Mvar时, 计为动作2次, 这是因为在切掉1.6 Mvar的同时投入了3.0 Mvar的电容器, 其余同理。虽然两种方法的总投切次数均为6次, 但从投切过程中可看出, 后者出现了0补偿的情况, 这是由于等分组法机械的分组方式使得在低谷负荷时段投入最小容量的电容器也出现过补偿现象, 因而造成设备闲置, 这样不但不能有效进行补偿, 反而增加了动作次数, 而前者很好地解决了此问题。

4 结语

本文提出的分段-聚类优化分组方法, 综合考虑了负荷曲线的波动性与时序性, 利用曲线快速分段法和K-均值聚类法确定电容器分组方案并采用九区图法控制策略; 通过算例分析, 与等分组法进行比较, 验证了本文方法的有效性和可行性。

参考文献

- [1] 卢勇, 李盛林, 卢志强. 电力系统无功补偿点的确定及其补偿方法[J]. 电力电容器, 2006, 2(2): 8-11.
LU Yong, LI Sheng-lin, LU Zhi-qiang. Confirming of reactive power compensation node of system and compensation method[J]. Power Capacitor, 2006, 2(2): 8-11.
- [2] 文明, 何禹清, 蒋海波, 等. 计及无功经济价值的配电网电容器优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(9): 59-64.
WEN Ming, HE Yu-qing, JIANG Hai-bo, et al. optimal planning of capacitor in distribution systems considering the reactive power value[J]. Power System Protection and

- Control, 2011, 39(9): 59-64.
- [3] 刘传铨, 张焰. 电力系统无功补偿点及其补偿容量的确定[J]. 电网技术, 2007, 31(12): 78-81.
LIU Chuan-quan, ZHANG Yan. Confirmation of reactive power compensation node and its optimal compensation capacity[J]. Power System Technology, 2007, 31(12): 78-81.
- [4] 胡泽春, 钟明明, 王佳贤, 等. 考虑多负荷水平的中低压配电网无功补偿优化规划[J]. 电工技术学报, 2010, 25(8): 167-173.
HU Ze-chun, ZHONG Ming-ming, WANG Jia-xian, et al. Optimal reactive power compensation for medium and low voltage distribution network considering multiple load levels[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(8): 167-173.
- [5] 茅晓蕾, 祁晓枫, 辛昊, 等. 配电网无功电压集中分布控制模式下的容量匹配方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(3): 61-66, 72.
MAO Xiao-lei, QI Xiao-feng, XIN Hao, et al. A capacity matching method based on centralization-distribution control mode of reactive power and voltage in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(3): 61-66, 72.
- [6] 马建广, 徐贤, 万秋兰. 无功补偿电容器分组方案的探讨[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(6): 91-92.
MA Jian-guang, XU Xian, WAN Qiu-lan. Discussion on division of compensation capacitor banks[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(6): 91-92.
- [7] 熊筠华. 地区电网变电站并联补偿电容器分组研究[D]. 成都: 四川大学, 2005.
XIONG Jun-hua. Research for shunt capacitor for reactive compensation in the substation in regional power system[D]. Chengdu: Sichuan University, 2005.
- [8] 李妍红, 陈荃, 刘明波, 等. 配电网低压无功装置的补偿度及电容器分组方式研究[J]. 继电器, 2006, 34(23): 29-34, 43.
LI Yan-hong, CHEN Quan, LIU Ming-bo, et al. Studies on compensatory degree and grouping of low voltage dynamic reactive-power compensator in distribution[J]. Relay, 2006, 34(23): 29-34, 43.
- [9] 刘莉, 王承民, 侯响, 等. 配网并联电容器的优化分组问题研究[J]. 电气应用, 2005, 24(12): 39-42.
LIU Li, WANG Cheng-min, HOU Yun, et al. The research on optimal parallel shunt capacitor banks in the distribution network[J]. Electrotechnical Application, 2005, 24(12): 39-42.
- [10] 耿光飞, 张庭场. 并联补偿容量优化分组问题研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2012, 43(5): 581-585.
GENG Guang-fei, ZHANG Ting-chang. Research on optimal grouping of parallel compensation capacity[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2012, 43(5): 581-585.
- [11] 王一杰, 赵舫, 丁颖, 等. 基于最优覆盖法的变电站无功补偿容量优化配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(15): 38-42.
WANG Yi-jie, ZHAO Hang, DING Ying, et al. Research on the optimal allocation of reactive power compensation capacity based on optimal cover method[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(15): 38-42.
- [12] 张勇军, 任震. 电力系统动态无功优化调度的调节代价[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(2): 34-38, 60.
ZHANG Yong-jun, REN Zhen. Readjusting cost of dynamic optimal reactive power dispatch of power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(2): 34-38, 60.
- [13] GENG Guang-fei, LIANG Jia-qi, HARLEY R G, et al. Load profile partitioning and dynamic reactive power optimization[C] // Proceedings of 2010 International Conference on Power System Technology, Hangzhou, China, Oct 24-28, 2010.
- [14] 孙吉贵, 刘杰, 赵连宇. 聚类算法研究[J]. 软件学报, 2008, 19(1): 48-61.
SUN Ji-gui, LIU Jie, ZHAO Lian-yu. Clustering algorithm research[J]. Journal of software, 2008, 19(1): 48-61.
- [15] 庄侃沁, 李兴源. 变电站电压无功控制策略和实现方式[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(15): 47-50.
ZHUANG Kan-qin, LI Xing-yuan. Strategies and implementation modes of voltage and reactive power control for substations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(15): 47-50.
- [16] 周小波, 张俊敏, 汤晓伟, 等. 基于典型日负荷曲线的变电站无功补偿优化系统[J]. 供用电, 2007, 24(3): 4-6.
ZHANG Xiao-bo, ZHANG Jun-min, TANG Xiao-wei, et al. Optimization system for substation reactive power compensation based on typical day's load curve[J]. Distribution & Utilization, 2007, 24(3): 4-6.

收稿日期: 2014-01-08; 修回日期: 2014-04-29
作者简介:

曹 珊(1990-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统无功优化; E-mail: caoshan0921@126.com

耿光飞(1970-), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统无功优化、经济运行。E-mail: guangfei@cau.edu.cn