

应用层次聚类法和蚁群算法的配电网无功优化

王韶, 周鑫

(输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆市 沙坪坝区 400044)

Optimization of Reactive Power in Distribution Network With Hierarchical Clustering and Ant Colony Algorithm

WANG Shao, ZHOU Xin

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology (Chongqing University), Shapingba District, Chongqing 400044, China)

ABSTRACT: To determine the optimal position and capacity of the compensation device to be installed, an approach to reactive power optimization of distribution network is proposed based on hierarchical clustering and ant colony optimization algorithm (ACOA). The optimal incremental rule of network loss is brought into constraints of the model using minimum network active power loss as objective function. Utilizing hierarchical clustering algorithm, the clustering analysis on sensitivity is performed to determine the candidate compensation buses. The clustering can be effectively implemented by aggregation principle and separation principle presented in this paper and is not influenced by randomness and man-made interference. The optimal position and capacity of the compensation device to be installed is determined by improving ACOA. The sensitivity of candidate bus is chosen as the visibility factor to achieve the aim that the state transition probability can reflect the variation of compensation momentarily and more suitable search strategy is put forward to avoid unquestioning compensation. The effectiveness of the proposed method is verified by results of calculation example.

KEY WORDS: distribution network; reactive power optimization; sensitivity; hierarchical clustering algorithm; aggregation principle; separation principle; ant colony algorithm

摘要: 为确定无功补偿设备的最佳补偿位置和容量, 提出了基于层次聚类法和蚁群算法的配电网无功优化方法。该方法以有功网损最小建立目标函数, 在约束条件中引入了最优网损微增率准则。运用层次聚类法对灵敏度进行聚类分析, 以确定待补偿点范围, 聚合原则及拆分原则可有效实现聚类, 不受随机性和人为干扰影响。通过改进将蚁群算法确定补偿位置和容量, 能见度因子取为候选节点灵敏度, 使状态转移

概率能够随时反映补偿变化情况, 改进蚁群搜索策略可避免盲目补偿。算例结果验证了该方法的有效性。

关键词: 配电网; 无功优化; 灵敏度; 层次聚类法; 聚合原则; 拆分原则; 蚁群算法

0 引言

配电网直接与用户连接, 量大面广, 无功优化可有效降低网络损耗, 对提高系统运行的经济性 & 改善电压质量具有重要意义。如何有效确定无功补偿设备最佳补偿位置及容量是配电网无功优化研究的关键问题。

确定无功补偿设备最佳补偿位置的方法可分为灵敏度法^[1-3]、功率矩法^[4-5]和随机搜索法^[6-10]。

灵敏度方法在求得各节点灵敏度后选取较为敏感的节点作为补偿点, 对配电网来说, 敏感节点一般集中在馈线末端部分。文献[1]采用灵敏度方法确定补偿点位置, 减小了搜索空间, 但真正的高灵敏度节点并不容易找到^[2]。为避免虚假高灵敏度节点的影响, 文献[2-3]将能最大程度减小网损的候选补偿点作为补偿点。

文献[4]基于功率矩模型提出了辐射形配电网无功补偿精确矩法。在无功二次精确矩中, 待补偿点与电源节点之间的电阻越靠近馈线末端越大, 由此确定的补偿节点可能集中在馈线末端。文献[5]针对补偿点选点集中的问题, 提出了无功补偿选点的负荷功率阻抗矩法, 定义了表征补偿点供电范围的负荷功率阻抗矩, 进而按照平均分配阻抗矩的方法确定补偿点。

智能计算方法中常采用能够同时确定最优补偿点位置和容量的随机搜索法, 补偿情况具有随机

基金项目: 高等学校学科创新引智计划项目(B08036)。

Project Supported by the Programme of Introducing Talents of Discipline to Universities(B08036).

性。文献[6-7]的遗传算法中染色体编码包含了无功补偿点位置和容量信息；文献[8]在粒子群算法中用微粒表示无功补偿点的位置和容量；文献[9]采用免疫算法进行最大负荷水平下的优化计算得到补偿点位置和总补偿容量，用聚类分析思想处理和精简负荷数据；文献[10]采用蚁群算法求解电容器配置模型，求得无功补偿点的位置和容量。

此外，文献[11]把净节约费用最大的节点确定为电容器最佳安装位置；文献[12]基于交流支路电气剖分思想把路径阻抗最小的投切点作为无功补偿点；文献[13]采用模态分析法选择关键节点，将其作为无功规划的候选点。以上方法均需事先假定补偿点个数。

配电网无功优化问题为大规模非线性混合整数规划问题，本文将运用最优网损微增率准则^[14]和层次聚类法^[15]确定待补偿点范围，采用蚁群算法确定无功补偿最佳补偿位置和容量，以在满足经济性前提下保证所选补偿点分布均匀。

1 配电网无功规划的数学模型

本文以系统有功损耗最小为目标建立目标函数，以潮流方程为等式约束条件，以电源节点注入无功、负荷节点电压、补偿点无功补偿容量等为不等式约束条件。此外，由于系统某节点装设补偿设备的先决条件为因设置补偿设备节约的费用应大于因设置补偿设备所花费的费用^[14]，因而引入最优网损微增率准则以保证可行域由满足经济条件的待补偿点构成。配电网无功规划数学模型如下：

$$\begin{aligned} \min \quad & \Delta P_{\Sigma}(U_G, \mathbf{Q}_C) \\ \text{s.t.} \quad & \begin{cases} \mathbf{P}^s = P(U_G, \mathbf{Q}_C) \\ \mathbf{Q}^s = Q(U_G, \mathbf{Q}_C) \\ Q_{G\min} \leq Q_G(U_G, \mathbf{Q}_C) \leq Q_{G\max} \\ U_{D\min} \leq U_D(U_G, \mathbf{Q}_C) \leq U_{D\max} \\ \mathbf{0} \leq \mathbf{Q}_C \leq \mathbf{Q}_{C\max} \\ \frac{\partial \Delta P_{\Sigma}}{\partial Q_{Ci}} \leq -\frac{(\alpha + \gamma)K_c}{\beta \tau_{\max}} = \gamma_{\text{eq}} \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

式中： ΔP_{Σ} 为系统有功损耗； U_G 为电源节点电压； \mathbf{Q}_C 、 $\mathbf{Q}_{C\max}$ 分别为补偿节点的无功补偿容量及其上限向量； \mathbf{P}^s 、 \mathbf{Q}^s 分别为给定的节点注入有功(无功)功率向量； P 、 Q 分别为节点注入有功(无功)功率方程； \mathbf{P} 、 \mathbf{Q} 分别为节点注入有功功率和无功功率向量； Q_G 、 $Q_{G\max}$ 、 $Q_{G\min}$ 分别为电源节点注入无功功率及其上下限； U_D 、 $U_{D\max}$ 、 $U_{D\min}$ 分别为负荷节点

电压及其上下限向量； α 为折旧维修率； γ 为投资回报率； K_c 为单位容量补偿设备投资； Q_{Ci} 为节点 i 的无功补偿容量， $i \in N$ ， N 为节点集合； β 为电价； τ_{\max} 为最大负荷损耗时间； γ_{eq} 为最优网损微增率。由于节点 i 的注入无功 $Q_i = Q_{Ci} - Q_{Li}$ ， Q_{Li} 为无功负荷，若 Q_{Li} 不变，则 $\partial \Delta P_{\Sigma} / \partial Q_i = \partial \Delta P_{\Sigma} / \partial Q_{Ci}$ ，表明节点 i 的网损微增率可由该节点注入无功的灵敏度代替。

2 基于层次聚类法选择无功待补偿点

2.1 层次聚类法

聚类方法在模式识别、数据挖掘等领域中得到了广泛应用，将物理或抽象对象的数据集合分组多个类或簇的过程称为聚类，通过聚类划分到各簇中的数据应该满足同簇内的数据差异度最小、不同簇内的数据差异度最大的原则^[16]。层次聚类法为常用聚类方法^[15]，传统层次聚类算法通常只能处理特殊数据分布问题，为此文献[17]提出了一种能够处理一般数据分布问题的层次聚类法，其重新定义了簇间距离：

$$d(C_i, C_j) = d(m_i, m_j) - r(C_i) - r(C_j) \quad (3)$$

式中： C_i 、 C_j 分别为以 m_i 、 m_j 为中心的簇； $r(C_i)$ 、 $r(C_j)$ 分别为簇 C_i 、 C_j 的簇半径； $d(m_i, m_j)$ 为簇中心 m_i 与 m_j 之间的欧氏距离。

M 为簇中数据数量，簇 $C = \{x_k, 1 \leq k \leq M\}$ 的簇中心和簇半径分别为

$$m = \left(\sum_{k=1}^M x_k \right) / M \quad (4)$$

$$r(C) = \sqrt{\left[\sum_{k=1}^M d^2(x_k, m) \right] / M} \quad (5)$$

式中 $d(x_k, m)$ 为簇中数据 x_k 与簇中心 m 之间的欧氏距离。

由式(5)可知，簇半径与簇内数据到簇中心的距离有关。当簇内数据距簇中心均较近时，簇半径比较小；而当簇内有数据与簇中心的距离较大时，则簇半径增大。对于后者，若按式(3)计算簇间距离，并合并簇间最小距离小于0的2个簇，直到没有小于0的簇间距离为止^[17]，则以上操作可能将簇中心距离小而簇半径大的2个簇聚合，从而使簇内数据的差异度增大。此外，该文算法中需要随机选取 k 个数据点作样本集，这不仅使采样点个数需要人为确定，而且随机选择采样点将使每次聚类结果不同，即结果具有不确定性。

事实上, 2个簇是否能聚合取决于2个簇的数据合并后簇内数据的相似性是否满足要求。如果合并后簇内数据的相似性大, 则应该聚合, 否则不应该聚合。簇内数据的相似性也可用簇内数据的差异度表示, 据此本文提出了簇差异度和簇平均差异度概念, 并提出了与之相关的聚合原则和拆分原则。

以 m_j 为簇中心的簇 $C_j = \{x_{jk}, 1 \leq k \leq M_j\}$, 其簇差异度为

$$F_j = [\sum_{k=1}^{M_j} d(x_{jk}, m_j)] / M_j \quad (6)$$

式中 M_j 为簇 C_j 的数据总数。

若数据集可聚类成 G 个簇, 则簇平均差异度为

$$F_{av} = (\sum_{j=1}^G F_j) / G \quad (7)$$

簇差异度 F_j 实际上是簇内数据与簇中心距离的平均值, 表示簇中数据的差异程度, F_j 越大说明簇中数据的差异性越大或相似性越小。簇平均差异度表示各簇之间的差异程度。聚类结果中, 簇内数据的属性应当尽量相似, 但数据总存在一定差别, 当差别较大时, 簇差异度也较大, 表明该簇聚类结果质量较差, 反之亦然。

本文根据簇差异度和簇平均差异度提出了聚合原则: 若任意2个簇合并后的最小簇差异度小于合并前的系统簇平均差异度则将其合并, 即满足该原则的2个簇的数据差异程度较小应该将该2个簇合并。另外, 层次聚合算法存在将某个数据错误地聚合到一个簇后无法更改的缺点, 为此本文提出了一种拆分原则: 若最大簇差异度大于聚合结束时的系统簇平均差异度, 则将该簇中距簇中心最远的点拆分。通过聚合可将簇差异度较小的数据合并, 但可能存在合并后差异度较大的簇, 因此应该将造成差异度增大的数据进行拆分。

2.2 无功待补偿点选择

有功网损对节点注入无功的灵敏度反映了有功网损对无功补偿的敏感程度, 若只将灵敏度作为选择无功补偿位置的唯一依据, 将存在错误选择虚假的高灵敏度节点及补偿节点集中在线路末端的情况。由于聚类方法是从数据自身寻找事物内在联系, 具有较强的适应性, 本文将采用层次聚类法分析配电网各节点灵敏度之间的联系, 将灵敏度相似度高的节点合并为一个簇, 然后在簇中选择无功补偿位置, 以挖掘出较均匀且有效的补偿点, 减小搜索空间。

应用层次聚类法对灵敏度系数进行聚类分析, 确定无功待补偿节点的步骤如下:

1) 确定配电系统馈线。本文将从根节点到分支线路末端节点包含的所有支路的集合称为馈线。由于配电网中负荷无功功率由电源节点经馈线供给, 各节点灵敏度系数受馈线影响, 因此将以馈线为单位对其灵敏度进行聚类分析。

2) 确定馈线灵敏度矩阵 A 。运用前推回代法和转置雅可比矩阵法^[14]分别计算辐射形配电网潮流和灵敏度。馈线灵敏度矩阵 $A=[A_1, A_2]^T$, A_1 和 A_2 的元素分别为

$$A_{1n} = n, \quad n \in N \quad (8)$$

$$A_{2n} = \frac{\partial \Delta P_\Sigma}{\partial Q_n}, \quad \frac{\partial \Delta P_\Sigma}{\partial Q_n} \leq \gamma_{eq} \quad (9)$$

式中: n 为馈线节点序号; N 为馈线节点总数; $\frac{\partial \Delta P_\Sigma}{\partial Q_n}$ 为从馈线末端向根节点方向排列的节点灵敏度。

3) 形成聚类矩阵 D 的初始簇。矩阵 D 的每列表示一个簇, 在 D 的第1行(D_1)中按列依次放入各馈线的 A_2 。按馈线计算 D_1 中各元素之间的距离, 选取与每个元素距离最小的元素存入 D 的第2行对应列中, 然后合并由相同元素构成的簇。

4) 聚类计算。首先由式(6)(7)分别计算每个簇的簇差异度以及系统簇平均差异度, 按照聚合原则对初始簇进行聚合直到收敛; 然后修正聚合结果, 将出现在多个簇内的个别数据合并到与簇中心距离最近的簇中; 最后按照拆分原则对聚合后差异度较大的簇进行拆分直到收敛。

5) 选择无功待补偿点。

由于聚类到一个簇中的数据差异程度较小, 而分类到不同簇中的数据具有较大差异, 因此离簇中心最远的节点通常为灵敏度变化最大的节点, 应为真正的高灵敏度节点。本文选择距簇中心最远且灵敏度增大的节点作为该簇的待补偿节点, 以避免虚假高灵敏度节点的影响, 当簇内只有1个或者2个节点时, 将该节点或者无功负荷大的节点选为待补偿节点。

3 基于蚁群算法确定无功补偿位置及容量

3.1 信息素更新规则

蚁群算法为随机搜索优化算法, 配电网无功优化过程中, 每只蚂蚁每次搜索改变位置后, 会利用

其他蚂蚁留下的信息素对自身信息素进行更新。信息素更新规则为

$$\tau_{ij}^k(t+1) = \rho \tau_{ij}^k(t) + \Delta \tau_{ij}^k(t) \quad (10)$$

$$\Delta \tau_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{B}{\Delta P_{\Sigma(t)}^k}, & i \in S_C \\ 0, & i \notin S_C \end{cases} \quad (11)$$

式中: $\tau_{ij}^k(t+1)$ 为第 $t+1$ 次补偿时节点 i 的信息素, k 为蚂蚁编号, t 为补偿次数, i 为第 t 次补偿时所在节点, j 为第 $t+1$ 次补偿时将要选择的节点; ρ 为信息残留系数, 表示旧的信息素相对于新增加的信息素所占的比重; B 为与 $\tau_{ij}^k(0)$ 有关的常数; $\Delta P_{\Sigma(t)}^k$ 为节点 i 单独补偿时的总有功网损; S_C 为补偿候选点集合。

3.2 随机状态转移概率规则

转移概率为

$$P_{ij}^k(t+1) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}^k(t+1)]^a |\eta_i^k(t)|^b}{\sum_{i \in S_C} \{[\tau_{ij}^k(t+1)]^a |\eta_i^k(t)|^b\}}, & i \in S_C \\ 0, & i \notin S_C \end{cases} \quad (12)$$

式中: $P_{ij}^k(t+1)$ 为蚂蚁 k 第 $t+1$ 次补偿时由节点 i 转移到节点 j 的概率; $\eta_i^k(t)$ 为灵敏度; a 、 b 为常数。本文将能见度因子取为候选节点的灵敏度, 根据补偿变化情况动态修改能见度因子。由于能见度因子随灵敏度变化, 故转移概率不再只随信息素变化, 也随网络中补偿情况的不同而变化。

3.3 改进蚁群算法搜索策略

对于求解旅行商问题的基本蚁群算法, 其搜索时需要用 Tabu 表记录蚂蚁走过的城市, 蚂蚁在随后的搜索中不能再选择走过的城市。无功优化问题以补偿后系统的总有功网损最小为目标, 而对补偿点和容量的搜索过程并没有严格限制, 即并不一定要求每个节点均能成为补偿点, 而且每个补偿点可以多次调节补偿容量。针对这一特点, 本文对蚁群算法搜索策略进行了以下改进:

1) 选择补偿点时, 不要求蚂蚁遍历所有候选补偿点, 计算结果达到精度要求时即可结束计算;

2) 确定电容器容量时, 仅对某补偿点进行 1 次补偿不一定能达到要求, 所以 Tabu 表只用来记录蚂蚁搜索过的补偿点, 不限制转移路径。

改进搜索策略后, 蚂蚁每次都能在有效解空间中搜索, 提高了搜索最优解的能力, 同时搜索更加有针对性, 避免了补偿的盲目性。

4 算法流程

基于层次聚类法和蚁群算法的配电网无功优化算法流程如图 1 所示。

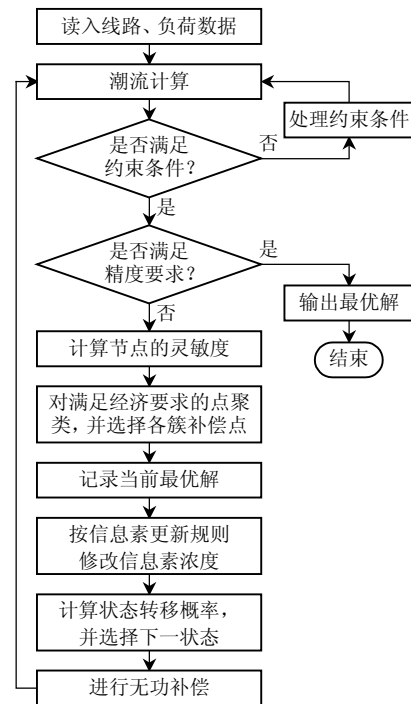


图 1 算法流程

Fig. 1 Flow chart of the proposed algorithm

5 算例分析

5.1 算例参数

本文以 IEEE 16、33 节点配电系统为例进行仿真计算, 其网络接线、参数和负荷数据分别参见文献[18-19]。本文方法中各参数分别为: $\alpha=0.1$, $\gamma=0.12$, $\beta=0.5$ 元/(kW·h), $K_c=45$ 元/kvar, $\tau_{\max}=3600$ h, 单组电容器容量为 6 kvar, 补偿比例为 0.6, $\rho=0.5$, $B=100$, $a=20$, $b=1$ 。

5.2 算例 1

算例 1 对 IEEE 33 节点配电系统进行计算, 首先应用本文方法(方法 1)、Matlab 聚类函数(方法 2)及文献[17]方法(方法 3)对该算例进行聚类分析。

由于方法 3 未说明如何确定样本集中数据个数 k 和邻域范围, 因此本文对满足式(2)最后一个约束的节点按以下方式确定方法 3 的样本集中数据个数 k 和邻域范围: 1) 采样点个数 k 为采样比例 $\sigma\%$ 与馈线节点数的乘积, $\sigma\%$ 通过仿真试验得到; 2) 将最大灵敏度与最小灵敏度之差除以 $\sigma\%$ 与满足式(2)最后一个约束的节点总数的乘积作为邻域范围。 k 个采样点确定后, 将与采样点的灵敏度距离小于邻域值的所有其他节点合并在一起作为初始

簇。若某节点到所有采样点的灵敏度距离均大于邻域值则将此点单独作为一个簇，聚类原则为把簇间距离小于0的2个簇合并，聚类结束后对出现在多个簇内的个别数据进行修正。

Matlab 聚类函数的簇中相邻节点最大灵敏度距离取为0.005155，方法3中 $\sigma\%$ 取60%，各方法聚类结果如表1所示。

表1 IEEE 33节点系统聚类结果
Tab. 1 Clustering results of IEEE 33 bus system

簇序号	簇中节点		
	方法1	方法2	方法3
1	3	3	3
2	4	4	4
3	5	5	5
4	6、7、8	6、7、8	6、7
5	—	9	8
6	9、10、11、12	10、11、12	9、10、11、12
7	13、14、15、16、17、18	13、14、15、16、17、18	13、14、15、16、17、18
8	20、21、22	20、21、22	20、21、22
9	23	23	23
10	24、25	24、25	24、25
11	26、27	26、27	26、27
12	28	28	28
13	29	29	29
14	30、31、32、33	30、31、32、33	30、31、32、33

由表1可知，3种方法的聚类结果中，除簇4~6外，其余的11个簇均相同。方法3将节点6、7与节点8分为2个簇，这是由于此时由设定的采样比例确定的邻域范围为0.006258，节点7与节点6、8之间的灵敏度距离分别为0.002106和0.005085，均小于邻域值。因此若随机选到节点7，则能够将其聚合为1个簇，而随机选到节点6或8时，其灵敏度距离(0.007191)大于邻域值，因而该3个点被分为2个簇，这表明随机选择采样点将造成聚类结果的不确定性。

表1中，方法2将节点9和节点10~12分为2个簇，这是由于节点9、10间的灵敏度差值为0.005677，大于设定值0.005155。当该设定值较小时，簇的划分会过细，反之亦然，如若设定值取为0.000515，聚类结果为27个簇，而取为0.515000时，聚类结果为4个簇，因此簇的数量取决于簇中相邻节点最大灵敏度距离的设定值。

由上分析可知，方法2、3的聚类结果均会受到人为设定值的影响，方法3的结果还具有不确定性；本文方法不仅不受随机性和人为干扰的影响，而且只需计算灵敏度系数，并将其作为聚类分析的数据样本集进行聚类即可，简单易行。

现采用5种优化方法对算例1配电系统进行优

化计算。前3种方法为3种聚类方法(本文方法、Matlab 聚类方法及文献[17]方法)与蚁群算法相结合的方法。方法4为蚁群优化算法，但未用聚类方法确定待补偿点。方法5为文献[3]方法。应用以上方法以有功网损不再降低为收敛条件进行100次优化计算，有功网损计算结果如表2所示。

表2 IEEE 33节点系统有功网损
Tab. 2 Active power loss of IEEE 33 bus system

方法	有功网损/kW			
	最大值	最小值	平均值	最优解
1	283.5917	281.5867	281.7801	281.7824
2	285.6889	282.5407	283.7682	283.7766
3	283.6709	281.5765	282.0750	282.0870
4	289.8997	288.2021	288.7675	288.7798
5	—	—	—	281.6802

由表2可知，方法5的有功网损最低，方法1最优解的有功网损小于方法2~4，最接近于方法5。但相对于方法5，本文方法在计算时不需人为设定补偿点个数，简化了计算过程，避免了人为因素的干扰。

5.3 算例2

算例2对IEEE 16节点3馈线配电系统重构后网络进行优化计算。该网络断开支路有17、19和26，原有补偿容量及位置见文献[18]，总补偿容量为11.4Mvar，总有功网损为466.1256kW，最低电压节点12的电压为0.9716pu。

应用本文方法对该配电网进行100次优化计算，总有功网损如表3所示，补偿点位置和容量如表4所示。其中，情况1计及原有无功补偿容量，但不考虑式(2)最后一个约束且以总补偿容量最接近17.4Mvar为收敛条件；情况2、3均计及式(2)最后一个约束且以总有功网损最小为收敛条件，但情况2包含原有无功补偿容量，情况3未计及原有无功补偿容量。

需要说明的是，表3、4中还列有文献[10]给出的优化结果(情况4)。但若按表4中情况4的补偿点位置和容量计算潮流，得到的最低点电压为0.9716pu，总有功网损为472.352kW，而非原文中的448.1kW，因此本文按472.352kW进行分析。

表3 IEEE 16节点系统有功网损
Tab. 3 Active power loss of IEEE 16 bus system

情况	有功网损/kW			
	最小值	最大值	平均值	最优解
1	447.8450	447.9812	447.9705	447.9642
2	450.9889	450.9889	450.9889	450.9889
3	450.7110	451.6336	451.5494	451.6299
4	448.1000	449.7000	448.5000	448.1000

表 4 IEEE 16 节点系统补偿结果
Tab. 4 Compensation results of IEEE 16 bus system

馈线	节点	补偿容量/Mvar			
		情况 1	情况 2	情况 3	情况 4
1	4	0.954	0.000	0.960	1.500
	5	1.334	1.100	1.338	2.900
	6	1.200	1.200	0.000	1.200
	7	1.026	0.720	1.200	0.000
	11	0.600	0.600	0.000	1.500
2	8	2.700	2.700	2.754	0.000
	9	1.200	1.200	3.000	1.200
	12	3.706	3.700	1.674	3.700
3	10	0.000	0.000	1.062	0.000
	13	1.080	0.000	0.000	0.900
	14	1.800	1.800	0.420	1.800
	15	0.000	0.000	0.000	0.000
	16	1.806	1.800	1.362	2.700
总容量/Mvar		17.406	14.820	13.770	17.400

由表 3、4 可知:

1) 情况 1 的有功网损最优值(447.964 2 kW)比情况 4 的总有功网损最优值(472.352 kW)减少了 24.387 8 kW, 而情况 1 总补偿容量(17.406 Mvar)仅比情况 4 的总补偿容量(17.4 Mvar)多 0.006 Mvar。这是由于情况 1 增加了补偿点 7、8。节点 7 在馈线 1 末端, 且无功负荷较大, 因而补偿效果较明显。馈线 2 的节点 9、12 已有较大容量的无功补偿, 因此在节点 8 补偿避免了无功的大量流动。

2) 情况 2、3 的有功网损最优值分别为 450.988 9、451.629 9 kW, 不仅少于情况 4 的有功网损最优值 472.352 0 kW, 而且比补偿前总有功网损(466.125 6 kW)分别减少了 15.136 7、14.495 7 kW。在总有功网损减小的情况下, 情况 2、3 的总补偿容量分别为 14.820、13.770 Mvar, 均比情况 4 的 17.4 Mvar 要少, 因而表明了本文方法的有效性。

3) 情况 2 比情况 3 的有功网损最优值仅少 0.641 kW, 但无功补偿容量却多 1.05 Mvar。这是由于情况 2 是在原有补偿方案基础上计算得到的, 系统原有补偿方案未考虑经济因素, 造成了总补偿容量的增加; 而情况 3 是在网络中没有任何补偿情况下考虑最优网损微增率准则计算得到的, 因此可使补偿结果更加合理。

6 结论

本文针对如何有效确定配电网无功补偿设备最佳补偿位置和容量的问题, 运用数据挖掘思想提出了层次聚类法和蚁群算法相结合的配电网无功优化方法。在无功规划模型中引入了最优网损微增率准则, 以考虑无功补偿的经济性。本文提出的聚

类原则使聚类方法不受随机性和人为干扰的影响, 而且简单易行。在蚁群算法中, 本文将能见度因子取为候选节点灵敏度, 使状态转移概率准则能够随时反映补偿情况变化, 并且改进了搜索策略, 使蚁群搜索更加有针对性。本文方法可为配电网无功补偿提供参考。

致谢

本文得到了输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室自主研究项目(2007DA105127 09212)的资助, 特此致谢!

参考文献

- [1] 余健明, 杜刚, 姚李孝. 结合灵敏度分析的遗传算法应用于配电网无功补偿优化规划[J]. 电网技术, 2002, 26(7): 46-49.
Yu Jianming, Du Gang, Yao Lixiao. Application of genetic algorithm combining sensitivity analysis to optimized planning of reactive power compensation for distribution networks[J]. Power System Technology, 2002, 26(7): 46-49(in Chinese).
- [2] 余健明, 张栋, 姚李孝. 基于一种新待补偿点定位法的配电网无功优化[J]. 电网技术, 2004, 28(1): 67-70.
Yu Jianming, Zhang Dong, Yao Lixiao. Reactive power optimization of distribution network based on a new location algorithm for nodes to be compensated[J]. Power System Technology, 2004, 28(1): 67-70(in Chinese).
- [3] Haque M H. Capacitor placement in radial distribution systems for loss reduction[J]. IEE Proceedings of Generation, Transmission and Distribution, 1999, 146(5): 501-505.
- [4] 矫志宏, 蔡中勤, 郭志忠. 辐射型配电网无功补偿的精确矩法[J]. 继电器, 2002, 30(9): 11-14.
Jiao Zhihong, Cai Zhongqin, Guo Zhizhong. Accurate moment method for optimization of capacitor in radial distribution systems[J]. Relay, 2002, 30(9): 11-14(in Chinese).
- [5] 颜伟, 徐郑. 10 kV 馈线无功补偿选点的负荷功率阻抗矩方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2005, 17(5): 29-33.
Yan Wei, Xu Zheng. Load power impedance moment method for optimal location of reactive power compensation on 10 kV feeder[J]. Proceedings of CSU-EPSSA, 2005, 17(5): 29-33(in Chinese).
- [6] Mendes A, Fran-ca P M, Lyra C, et al. Capacitor placement in large-sized radial distribution networks[J]. IEE Proceedings of Generation, Transmission and Distribution, 2005, 152(4): 496-502.
- [7] 江洁, 王主丁, 张宗益, 等. 基于有效生成初始种群的配电网无功规划优化遗传算法[J]. 电网技术, 2009, 33(8): 60-65.
Jiang Jie, Wang Zhuding, Zhang Zongyi, et al. Effective initial population generation based genetic algorithm for optimal capacitor placement in radial distribution networks[J]. Power System Technology, 2009, 33(8): 60-65(in Chinese).
- [8] 王星华, 余欣梅. 配电网电容器优化投切的改进模型及算法[J]. 电网技术, 2008, 32(14): 59-64.
Wang Xinghua, Yu Xinmei. Improved modeling and algorithm of optimal capacitor switching in distribution network[J]. Power System Technology, 2008, 32(14): 59-64(in Chinese).
- [9] 王佳贤, 程浩忠, 胡泽春. 多负荷水平下的配电网无功优化规划方法[J]. 电网技术, 2008, 32(19): 56-61, 83.

- Wang Jiaxian, Cheng Haozhong, Hu Zechun. Optimal reactive power planning for distribution systems considering multi-load levels[J]. Power System Technology, 2008, 32(19): 56-61, 83(in Chinese).
- [10] Chang C F. Reconfiguration and capacitor placement for loss reduction of distribution systems by ant colony search algorithm[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2008, 23(4): 1747-1755.
- [11] 刘健, 阎昆, 程红丽. 树状配电线路并联电容器无功优化规划[J]. 电网技术, 2006, 30(18): 81-84.
Liu Jian, Yan Kun, Cheng Hongli. Optimal planning of shunt capacitors based reactive power compensation for arborescent distribution feeders[J]. Power System Technology, 2006, 30(18): 81-84 (in Chinese).
- [12] 郝文波, 汤奕, 于继来. 基于交流支路电气剖分思想的配电网电容器优化投切方法[J]. 电网技术, 2007, 31(17): 41-46.
Hao Wenbo, Tang Yi, Yu Jilai. An optimal capacitor switching method of distribution network based on electrical dissection of AC branches[J]. Power System Technology, 2007, 31(17): 41-46(in Chinese).
- [13] 丁晓群, 王宽, 沈茂亚, 等. 结合模态分析的遗传算法在配电网无功规划中的应用[J]. 电网技术, 2006, 30(17): 47-50.
Ding Xiaoqun, Wang Kuan, Shen Maoya, et al. Application of genetic algorithm combining modal analysis in reactive power planning for distribution network[J]. Power System Technology, 2006, 30(17): 47-50(in Chinese).
- [14] 陈珩. 电力系统稳态分析[M]. 3版. 北京: 中国电力出版社, 2007: 227-236.
- [15] 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 Jigui, Liu Jie, Zhao Lianyu. Clustering algorithms research[J]. Journal of Software, 2008, 19(1): 48-61(in Chinese).
- [16] 胡可云, 田凤占, 黄厚宽. 数据挖掘理论与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008: 71.
- [17] 叶茂, 陈勇. 基于分布模型的层次聚类算法[J]. 电子科技大学学报, 2004, 33(2): 171-174.
Ye Mao, Chen Yong. Hierarchical clustering algorithm based on distribution model[J]. Journal of UEST of China, 2004, 33(2): 171-174(in Chinese).
- [18] Civanlar S, Grainger J J, Yin H, et al. Distribution feeder reconfiguration for loss reduction[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1988, 3(3): 1217-1223.
- [19] Baran M E, Wu F F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1989, 4(2): 1401-1407.



王韶

收稿日期: 2010-11-10。

作者简介:

王韶(1956), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统规划与可靠性、电力系统运行与控制等,
E-mail: wangshao100@163.com;

周鑫(1984), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统规划。

(编辑 徐梅)