

DOI: 10.7667/PSPC170352

# 配电网降压节能装置中电容器组的选址定容问题研究

戴诗朦<sup>1</sup>, 孙鸣<sup>1</sup>, 刘俊勇<sup>2</sup>

(1. 合肥工业大学电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

**摘要:** 近年来国内电网在用电峰荷时期时常出现供电容量不足的情况, 降压节能技术能够有效解决该问题。对此提出一种针对配电网降压节能装置中并联电容器组的多目标选址定容方法。该方法以系统电压偏差以及有功网络损耗最小为目标, 考虑电容器组的安装成本, 通过带精英策略的快速非支配排序遗传算法(NEGA-II)与基于满意度的模糊聚类方法的有机结合, 寻求并联电容器组配置的最优解。仿真算例证明所提出的方法能够有效实现目标的优化, 为降压节能技术的实现提供良好的电压无功条件。

**关键词:** 降压节能; 多目标优化; 电容器选址定容; NEGA-II; 模糊聚类

## Research of the placement and capacity of capacitor bank of conservation reduction voltage device in distribution network

DAI Shimeng<sup>1</sup>, SUN Ming<sup>1</sup>, LIU Junyong<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. School of Information Engineering, Sichuan University of Technology, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** Recently, the supply capacity of domestic distribution network fails to meet the peak demand. Conservation Voltage Reduction (CVR) technique is an efficient way to solve the problem. On this basis, a multi-objective optimization method is proposed, which decides the placement and capacity of capacitor bank of CVR device in distribution network. This method targets on minimizing the system voltage deviation and active power losses and considers the installation cost of capacitor bank. Two algorithms, Non-Dominated Sorting in Genetic Algorithms II (NEGA-II) and satisfaction based fuzzy clustering method, are combined to seek the optimal solution of shunt capacitor bank configuration. Simulations results demonstrate that the proposed method can achieve the optimization of objective and provide a good VOL/VAR condition for CVR.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2014AA051901).

**Key words:** conservation voltage reduction (CVR); multi-objective optimization; placement and capacity of capacitor bank; NEGA-II; fuzzy clustering method

## 0 引言

近年来, 夏季的高温峰荷时期, 国内许多地区的电网都会出现供电容量不足的问题, 造成部分用户断电。如果单纯地通过扩大发电机组装机容量来解决问题, 投入较高, 并且在用电低谷时会出现发电机效率低下的问题。基于此, 需求侧管理的概念被提出, 即通过政策措施引导用户高峰时少用电, 低谷时多用电的方式来缓解供电压力<sup>[1-2]</sup>。该方法虽

然能够有效解决峰荷时期供电容量不足的问题, 但由于相关的政策条款不够成熟并且需要电力供需双方充分达成协议<sup>[3]</sup>, 目前在国内并没有被充分使用。与需求侧管理相比, 降压节能技术操作简便, 易于实现, 能够经济有效地解决峰荷时期供电容量不足的问题。

降压节能(Conservation Voltage Reduction, CVR)技术能够通过将电力用户电压降到标准电压范围下半区, 在保证不对用户电器造成伤害的同时达到降低负荷需求的目的, 是解决用电峰荷时期供电量不足问题经济有效的方法, 此外还能够降低系统的能量损耗, 对于能源节约有着重要意义。

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2014AA051901)

降压节能装置主要包括两部分:一部分是有载调压变压器,主要通过调节其分接头来实现电压的降低;另一部分则是并联电容器组,其主要目的是为系统提供足够的无功功率,有效提高电能质量并且降低系统损耗,为降压节能的有效实现提供良好的电压无功条件。而降压节能装置中并联电容器组的接入位置与容量影响着降压节能的最终效益。

传统配电网规划过程中所涉及的电容器组选址定容大多是进行无功补偿从而提高系统的功率因数,以达到提高系统电力传输的效率以及稳定性的目的。文献[4]提出一种基于负荷预测的动态规划方法来实现电容器组的优化选址定容,以达到减少系统损耗的目的。文献[5]通过一种混合整数规划法实现电容器的选址定容,达到减少变压器损耗进而减少系统损耗的目的。文献[6]则通过节点的损耗挑选出敏感节点,并使用启发式算法在这些敏感节点中进行电容器组的选址定容,以最大程度地减少系统的总损耗。文献[7]以降低系统损耗为目的,考虑电容器的装设成本,通过混合整数法来实现电容器组的选址定容。文献[8]则提出通过模糊逻辑法建立系统损耗以及电压偏差的隶属度函数来解决问题。文献[9-11]均以系统网络损耗以及电压偏差为目标,通过遗传算法进行优化选址定容。

本文以为降压节能的有效实现提供良好的电压无功条件为目的,针对降压节能装置中电容器组的选址定容问题进行讨论。首先对降压节能技术与其主要装置及相应作用进行概述;随后以最低节点电压值、系统网络损耗以及电容器总成本三者为优化目标建立多目标优化模型;然后对本文所采用的计算方法以及求解步骤进行说明;最后,建立所提到的两种优化算法以及潮流计算有机嵌套与结合的仿真模型,并以 IEEE33 节点配电系统为例进行算例分析。

## 1 降压节能技术与主要装置

### 1.1 降压节能技术的发展与定义

降压节能技术并不是一种新兴技术,早在 20 世纪 70 年代欧美国家就提出通过该技术来降低负荷需求与能量损耗,不过由于当时负荷需求负担小,能源充足,能源节约这一问题并没有引起人们的重视,并且 CVR 技术的能效并没有得到充分的试验证明,所以该技术并没有被充分运用。随着社会经济的发展,能源短缺问题日益严重,CVR 技术重新回到人们的视线,南加州爱迪生电力公司<sup>[12]</sup>、美国东北电力公司<sup>[13]</sup>、邦纳维尔电力局<sup>[14]</sup>以及卑诗水电公司<sup>[15]</sup>等欧美大型电力机构纷纷进行了自己的

CVR 测试试验,结果均证明 CVR 技术具有明显的节能功效。KP Schneider 等学者 2010 年通过 GridLAB-D 仿真系统对 24 种馈线进行 CVR 装置接入前后的负荷需求以及能源消耗数据的对比,最后得出结论:如果美国所有的馈线都接入 CVR 装置,则年能源消耗量可以减少 3.04%<sup>[16]</sup>。

降压节能技术通过调压措施将用户用电电压降到标准电压的下半区(即 0.95~1.0 p.u.),从而在保证不对用电设备造成伤害的同时,降低负荷需求,减少系统网络损耗,并且实现能源的节约,充分地提高了用户供电的可靠性并且也促进了电网整体的能源节约。而降压节能技术的效益是通过降压节能因子(Conservation Voltage Reduction Factor,  $CVR_f$ )来衡量的, $CVR_f$ 表示负荷需求下降百分比或者能源节约百分比与电压下降百分比的比值,表达如式(1)。

$$CVR_f = \frac{\text{Load reduction\% (Energy saving\%)}}{\text{voltage reduction\%}} \quad (1)$$

$CVR_f$ 的大小主要与负荷类型的组成有关,系统的损耗主要由负荷损耗和线路损耗两部分组成, $P_{\text{load}} = UI$ ,  $P_{\text{lines}} = I^2 R_{\text{lines}}$ 。从静态负荷模型的角度来看,当负荷为恒阻抗负荷(白炽灯)时,电压降低,电流也降低,负荷损耗和线路损耗均降低,使总损耗降低,并且其大小与电压大小成二次方关系;当负荷为诸如电脑、电视机等的恒功率负荷时,电压下降意味着电流上升,负荷损耗不变而线损增加,这样系统损耗反而增加;对于电热水器和电冰箱这一类带有温控回路的负荷,其损耗保持恒定;此外还有节能灯一类的恒电流负荷,电压下降使负荷损耗减少,而线损保持不变,故总损耗下降,且与电压大小成线性关系。文献[17]对该问题进行了详细的实验对比,发现恒功率负荷增加的损耗相对于恒阻抗负荷减少的只是很小的一部分,只要恒功率负荷消耗的能量不大于恒阻抗负荷的五十倍,那么系统在降低电压之后总体上的损耗是减少的。目前国内的系统负荷类型主要包括居民负荷、商业负荷以及工业负荷。其中,居民负荷以及商业负荷主要以恒阻抗负荷与恒电流负荷为主,在居民区以及商业区采用降压节能技术之后能够有效降低峰荷时期总负荷需求,实现能源的节约。而工业负荷中则以电机一类的恒功率负荷为主,因此在工业负荷区域不宜使用降压节能技术。此外,当负荷组成一定时,电压下降百分比越大,负荷需求下降百分比或者能源节约百分比则越大,负荷需求下降或者能源节约越多。

### 1.2 降压节能技术的主要装置

降压节能装置主要由有载调压变压器以及并联

电容器组两部分组成。以辐射型配电系统为例，离变电站接入节点越远的节点，其电压跌落越严重，这类节点的电压本身已经接近或者低于标准电压最低值，这就使得后续第二步降压操作时只能很小幅度地下调电压甚至根本无法调节电压。基于此情况，考虑在辐射型馈线沿线的适当位置并入电容器组，为系统提供充足的无功功率，抬高接入点的电压，使得降压较大节点的电压质量得到有效的改善，实现馈线沿线平滑的电压分布，保证电压能够充分下调，同时降低电能的网络损耗，为降压节能的有效实现提供良好的前提条件。其后再通过有载调压变压器的分抽头进行降压操作，并保证系统电压均在标准电压范围，最终实现降压节能。图 1 所示为单条辐射型馈线沿线选择适当位置接入并联电容器组前后以及有载调压变压器调压前后的电压分布情况。

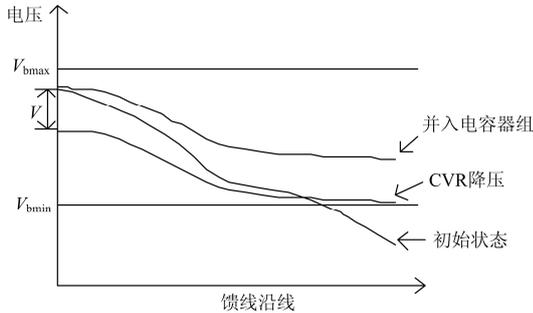


图 1 降压节能操作前后电压分布

Fig. 1 Voltage profile before and after CVR

图 1 中，初始状态时，最低母线节点电压与标准电压差值较大，电压分布不平滑，馈线后半部分节点电压均低于标准电压的最低限值，电能质量不满足要求，这使得降压节能的降压环节无法实施，因此必须并入电容器组来改善这种情况。沿馈线沿线选择节点并入电容器组后，电压分布情况有了明显的改善，最低母线电压亦高于标准电压范围的最低电压限值，此时能够充分进行降压操作。降压操作后馈线沿线电压大小均在标准电压范围内，顺利实现了降压节能，具体的节能降损效益可通过相关算式得到，本文暂不详述。

结合我国的供配电实际情况，应在 10 kV 配电侧根据系统实际电压无功分布情况来选择合适位置接入并联电容器组，实现电压无功的优化，再通过变电站有载调压变压器分抽头降低配电电压，从而实现用户用电电压的降低，以达到降压节能的目的，带降压节能装置的辐射型配电系统典型结构如图 2 所示，该系统共有  $n$  个并联电容器接入点 ( $m \in [1, n]$ )。

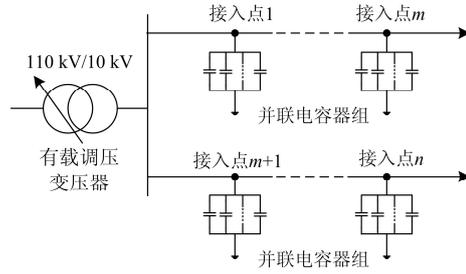


图 2 带降压节能装置的辐射型配电系统

Fig. 2 Radial distribution systems with CVR device

## 2 电容器选址定容优化模型

### 2.1 目标函数

进行电容器选址定容的目的是为系统提供充足的无功功率，充分实现系统电能质量优化的同时降低系统的网络损耗，为后续降压操作提供良好的电压无功条件，促进降压节能的效益，因此拟定目标函数如下。其中， $x$  表示决策向量， $u$  表示控制变量， $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$  表示三个目标函数。

1) 最低节点电压与标准电压的差值最小。由式 (1) 可知在负荷组成一定的情况下，电压在规定范围内下调得越多，则负荷需求下降或者能源节约越多，因此为了最大限度地促进能源的节约，需要保证电压能够拥有充足的下调空间。前文提到在辐射型馈线末端节点电压跌落严重，导致电压超出规定范围从而无法下调，最终影响降压节能的效益，因此将最低节点电压值作为目标，最低节点电压值与标准电压差值越小，则系统的电压分布情况越平滑，电压可下调空间越大，越有利于能源的节约，目标表达式如式(2)。

$$\text{Min } F_1(x, u) = |U_B - U_{\min}| \quad (2)$$

式中： $U_B$  为节点标准电压； $U_{\min}$  为最低节点电压。

2) 系统的网络有功损耗最小。使用降压节能技术的目的为降低峰荷需求、网络损耗并且节约能源，而并联电容器组的主要目标为改善系统的电能分布情况，为后续的降压操作提供良好的实现条件，此过程中，过多提升电压可能造成网络损耗的增加，导致最终降压节能技术的降损效果不明显，因此将并联电容器组后系统的有功网络损耗最小作为优化目标。目标表达式如式(3)。

$$\text{Min } F_2(x, u) = \sum_{(i,j) \in \alpha_N} I_{ij}^2 R_{ij} = \sum_{(i,j) \in \alpha_N} \Delta U_{ij}^2 \frac{R_{ij}}{Z_{ij}^2} \quad (3)$$

式中： $\alpha_N$  的元素为系统中相邻连接线段的两个节点； $I_{ij}$  为  $i$  与  $j$  两个节点之间的电流； $R_{ij}$  为线路  $ij$  的电阻； $\Delta U_{ij}$  为  $i$  与  $j$  两节点之间的压降。

3) 电容器组的总容量最小。在实现以上两个目标的同时, 应该注意控制电容器组的成本, 电容器组的单位容量价格固定的情况下, 电容器组总容量越小则总成本越低, 因此以电容器组的总容量最小为目标, 表达式如式(4)。

$$\text{Min } F_3(x, u) = \sum_{i=1}^m K_m C_0 \quad (4)$$

式中:  $m$  表示共有  $m$  处安装了电容器组;  $K_m$  表示第  $m$  处安装电容器的个数;  $C_0$  表示单个电容器的容量。

## 2.2 约束条件

### 1) 节点电压约束条件

$$U_{\min} \leq U_i \leq U_{\max} \quad (5)$$

式中:  $U_{\min}$ 、 $U_{\max}$  为节点电压下限和上限;  $U_i$  为节点  $i$  电压。

### 2) 潮流功率约束

$$\begin{cases} P_i = P_{Gi} - P_{Li} = U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i = Q_{Gi} + Q_{Ci} - Q_{Li} = U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $n$  为系统总节点数;  $P_i$ 、 $P_{Gi}$ 、 $P_{Li}$  分别为节点  $i$  的注入有功功率、发电机有功出力以及负荷消耗的有功功率;  $Q_i$ 、 $Q_{Gi}$ 、 $Q_{Ci}$ 、 $Q_{Li}$  分别为节点  $i$  的注入无功功率、发电机无功出力、并联电容器的无功功率以及负荷消耗的无功功率;  $G_{ij}$ 、 $B_{ij}$ 、 $\theta_{ij}$  分别为节点  $i$ 、 $j$  之间的电导、电纳以及电压相角差。

### 3) 功率传输容量约束

$$|S_l| \leq S_{l\max} \quad (7)$$

式中:  $S_l$  为线路的传输容量;  $S_{l\max}$  为线路的最大传输容量。

## 3 求解方法与步骤

在解决多目标优化问题时, 通常予以每一个优化目标相应的权重系数, 通过权重系数的线性加成将多目标优化问题转化成单目标优化问题, 再通过遗传算法、粒子群算法等传统优化算法予以解决。这种解决方式每一次计算只能得到一个解, 这就使得每一次得到的结果都是相互独立的, 可能产生不一致的情况, 并且权重系数不同, 结果也会明显不同。

在多目标优化问题中由于多个目标往往是互相冲突的, 很难找到使所有目标同时最优的解。多目标优化算法在传统算法上进行改进, 通过不同的协

调方案处理各目标函数之间的关系, 得出多个不同可行解构成的 Pareto 解集, 决策者可以根据自己的实际需求在该解集中选出最终决策, 该方案并不能使多个目标同时达到最优, 只是相对最能够满足决策者的需求。不过由于 Pareto 解集中可行解的数量较多, 往往无法直接做出决策, 需要通过模糊聚类等方法辅助。

本文采用 NEGA-II 进行多目标优化问题的初步计算, 得到一个包含多个可行解的 Pareto 解集, 然后通过模糊满意度对 Pareto 解集进行淘汰筛选得到 Pareto 优化解集, 最后利用 c 均值模糊聚类法对 Pareto 优化解集进行聚类, 得到典型解集, 决策者可根据实际需求在典型解集中选出最终决策方案。

### 3.1 带精英策略的快速非支配排序遗传算法 (NEGA-II)

NEGA-II 的实现流程图如图 3 所示, 其基本步骤如下: ① 建立一个随机的、大小为  $N$  的初始父代种群; ② 对该初始种群进行非支配排序; ③ 通过计算个体之间的拥挤距离确定虚拟适应度; ④ 选择、交叉与变异得到新的大小为  $N$  的子代群体; ⑤ 将父代与子代合成为一个大小为  $2N$  的群体, 并进行非支配排序; ⑥ 根据排序结果选取前  $N$  个个体组成新的种群。不停循环步骤②—⑥, 直到达到设定的遗传代数<sup>[18-19]</sup>。

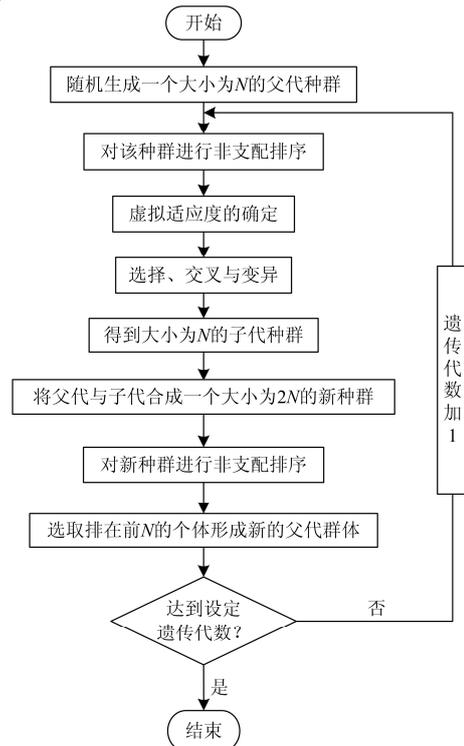


图 3 NEGA-II 流程图

Fig. 3 Flow chart of NEGA-II

### 3.2 基于目标满意度的模糊聚类法

NEGA-II 初步优化计算之后可以得到一个包含  $N$  个可行解的 Pareto 解集, 多个目标值之间的不可公度性使得在没有统一量纲的前提下无法对这  $N$  个方案进行直观的优劣判断, 因而无法做出决策, 此时可以借助基于满意度的模糊聚类方法来解决[20]。

根据实际情况给每一个目标函数定一个期望值, 建立实际目标函数值与期望值的隶属度函数, 函数值大小则代表决策者对于决策方案的满意度(隶属度函数值越接近 1 表示决策者的满意度越高)。

本文通过如图 4 所示的简单线性隶属度函数来表示目标函数的决策满意度, 其中  $f_i^*$  表示目标函数的期望值,  $f_i^{\max}$  表示目标函数的最大容许值。当  $\mu_{f_i}(x)=1$  时说明目标函数值完全满足要求; 当  $\mu_{f_i}(x)=0$  时说明目标函数值完全不满足要求; 而当  $\mu_{f_i}(x)$  值在  $(0,1)$  之间时, 其值越接近 1, 表示满意度越高。

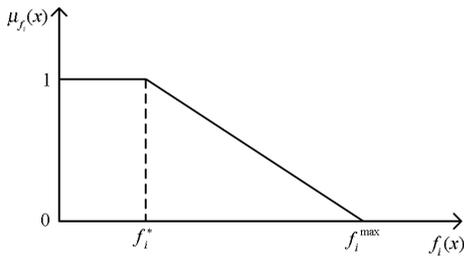


图 4 线性隶属度函数

Fig. 4 Linear membership functions

根据图 4 可知满意度的计算方法如式(8)。

$$\mu_{f_i}(x) = \begin{cases} 1 & f_i(x) \leq f_i^* \\ \frac{f_i^{\max} - f_i(x)}{f_i^{\max} - f_i^*} & f_i^* < f_i(x) < f_i^{\max} \\ 0 & f_i(x) \geq f_i^{\max} \end{cases} \quad (8)$$

在确定各决策方案各目标函数的对应满意度之后, 我们对每一个目标函数的满意度均设定一个最低限值, 对 NEGA-II 计算得到的 Pareto 解集进行过滤, 留下三个目标函数满意度均高于其对应最低满意度限值的可行解, 得到一个 Pareto 优化解集。

此时, 如果该优化解集所包含的可行解数量已经很少, 则可以直接根据实际需求选出最终决策方案; 如果此时依旧存在个数较多的可行解, 则可以通过聚类的方法将这些可行解进行分类, 最后从每一类中选出该类的代表解构成典型解集, 决策者从典型解集中根据需求选定最终决策。

模糊  $c$  均值聚类算法是应用最广泛且较成功的一种模糊聚类算法, 它通过计算每个样本点对所有类中心的隶属度确定该样本点的类属以达到自动对样本数据进行分类的目的[21]。对于给定的样本集  $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$ , 目标数量为  $k$ ,  $c_i (i=1, 2, 3, \dots, k)$  为各聚类中心,  $\mu_i(x_m)$  为第  $m$  个样本对第  $i$  类的隶属度函数。则可通过式(9)和式(10)确定聚类中心与隶属度函数, 其中  $\sum_{i=1}^k \mu_i(x_m) = 1$ ,  $a$  为加权指数, 通常取 2。

$$c_i = \frac{\sum_{m=1}^n [\mu_i(x_m)]^a x_m}{\sum_{m=1}^n [\mu_i(x_m)]^a} \quad (9)$$

$$\mu_i(x_m) = \frac{\|x_m - c_i\|^{-2/(b-1)}}{\sum_{s=1}^k \|x_m - c_s\|^{-2/(b-1)}} \quad (10)$$

FCM 具体迭代方法如下: ① 用值在  $[0,1]$  的矩阵来初始化隶属矩阵, 使其值满足  $\sum_{i=1}^k \mu_i(x_m) = 1$ , 给定收敛条件; ② 通过式(9)计算出聚类中心  $c_i (i=1, 2, 3, \dots, k)$ ; ③ 根据聚类中心利用式(10)计算隶属度函数; ④ 利用所得的新的隶属度函数根据式(9)重新计算聚类中心; ⑤ 一直循环步骤③、④, 直到满足收敛条件。这样就可以得到各聚类中心以及各个样本对于各类的隶属度值。

### 3.3 求解步骤

1) 整理计算所需要的初始数据, 包括线路参数、节点负荷数据和待安装并联电容器的功率数据。

2) 计算初始状态的系统潮流分布, 记录最低节点电压以及网络有功损耗情况。

3) 定义 NEGA-II 的优化目标函数以及决策变量范围, 设定种群大小、遗传代数以及变异与交叉操作的比例。

4) 初始化种群, 进行潮流计算, 根据潮流计算所得结果针对目标函数, 对种群数据进行优化, 随后再次进行潮流计算, 循环此过程, 直到遗传代数达到规定次数, 得到包含多个可行解的 Pareto 解集。

5) 根据实际情况给定各目标函数的期望值与最大容许值, 计算 Pareto 解集中各可行方案各目标函数的满意度。

6) 根据实际需求给定满意度最低限值, 对 Pareto 解集进行初步筛选, 得到 Pareto 优化解集。

7) 通过模糊  $c$  均值聚类法对 Pareto 优化解集进行聚类, 得到典型解集, 根据实际需求选定最终决策方案。

## 4 算例分析

### 4.1 算例介绍

本文选择 Matlab 作为仿真测试平台, NEGA-II、基于满意度的模糊聚类法以及配电网的潮流计算均通过该平台实现。测试系统采用 IEEE 33 节点标准配电系统(系统网络结构见图 5)。假设系统负荷组成保持恒定, 系统接入电容器的地址为 6 处, 电容器的单位大小为 0.1 Mvar, 每处接入电容器的最大个数为 15 个。NEGA-II 的种群大小设定为 500, 遗传代数为 100, 交叉操作以及变异操作的比例均为 20%。令各目标函数的最大容许值为(0.1, 0.35, 9.0), 期望值为(0.02, 0.14, 3.0), 满意度下限为(0.7, 0.8, 0.8)。

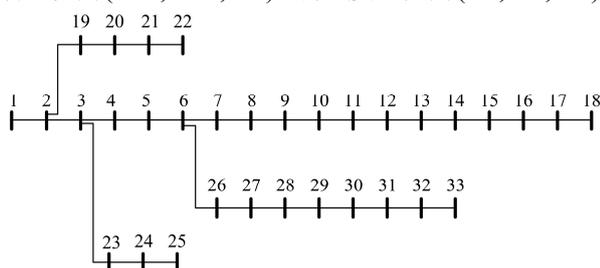


图 5 IEEE-33 节点标准测试系统

Fig. 5 IEEE-33 bus test system

该系统包含 33 个母线节点, 32 条支路, 系统基准容量为 10 MVA, 电压等级为 12.66 kV, 1 号节点为平衡节点, 总有功负荷 3.72 MW, 总无功负荷为 2.33 Mvar。

### 4.2 算例分析

#### 1) 算例计算

通过 NEGA-II 计算得到包含 500 个可行方案的 Pareto 解集, 再经过满意度下限对该解集进行筛选与淘汰, 得到包含 9 个满足满意度要求可行解的 Pareto 最优解集, 由于无法直接从这 9 个可行解中选出决策方案, 通过模糊 c 均值聚类法对这 9 个较优的可行解进行聚类, 聚类结果如图 6。

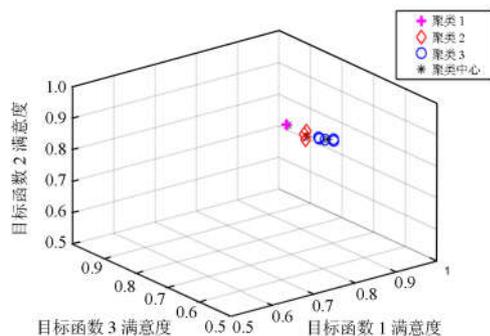


图 6 聚类结果

Fig. 6 Clustering results

聚类所得典型解以及其所对应的目标函数值如表 1、表 2。

表 1 聚类典型解满意度

Table 1 Satisfaction of representative solutions after clustering

	$\mu_1(x)$	$\mu_2(x)$	$\mu_3(x)$
聚类 1	0.744 7	0.822 4	0.883 3
聚类 2	0.773 6	0.887 7	0.816 7
聚类 3	0.743 0	0.899 1	0.816 7

表 2 代表解对应目标函数值

Table 2 Corresponding objective function

	value of representative solutions		
	最低母线电压与标准电压差值/p.u	系统网络有功损耗/MW	电容器总容量/Mvar
聚类 1	0.040 4	0.177 3	3.7
聚类 2	0.038 1	0.163 6	4.1
聚类 3	0.040 6	0.161 2	4.1

由表 1 进行纵向比较发现, 聚类 1 典型解的目标函数 3 具有三种聚类中最高的满意度值, 这说明聚类 1 在三个目标函数值同时满足相应满意度要求的同时侧重于对目标函数 3 的优化。同理, 聚类 2 典型解的目标函数 1 具有三种聚类中最高的满意度, 则聚类 2 在三个目标函数值同时满足相应满意度要求的同时侧重于实现目标函数 1 的优化, 而聚类 3 则侧重于优化目标函数 2。

#### 2) 结果分析

本文进行电容器组选址定容的主要目的是为后续降压节能的降压环节提供充分的电压下调空间以及良好的系统网络有功损耗情况。

由表 2 进行数据比较可以发现: 聚类 1 的网络有功损耗相对于聚类 2 与聚类 3 明显较高, 具有明显的劣势, 而聚类 2 与聚类 3 在网络有功损耗以及电容器组总容量基本持平的情况下, 聚类 2 的最低母线电压情况较聚类 3 更优。综合上述考虑, 选择聚类 2 作为最终决策方案, 其具体方案如表 3 所示。

表 3 决策方案

Table 3 Decision scheme

接入节点	3	7	13	23	29	33
接入个数	11	7	9	3	4	7
接入容量/Mvar	1.1	0.7	0.9	0.3	0.4	0.7

按照该方案并入电容器组前后线路的电压分布对比如图 7, 由图可知按照决策方案并入电容器组后线路电压分布情况有了明显改善, 系统最低母线电压由初始的 0.912 0 p.u. 上升到了 0.969 1 p.u., 所有节点电压均在标准电压范围内, 分布平滑, 且具有充足的下调空间。图 8 所示为并联电容器组前后

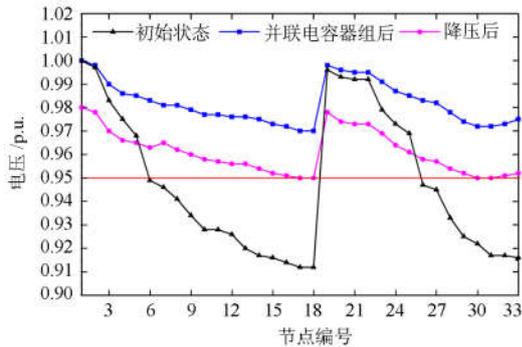


图 7 线路电压分布  
Fig. 7 Voltage profile

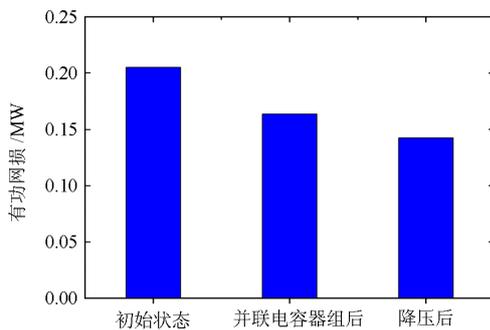


图 8 有功网损  
Fig. 8 Active power losses

以及降压之后的系统有功网损情况对比。由该图可知，按照决策方案并联电容器组后系统有功网损明显下降，由初始状态的 0.205 2 MW 降为 0.163 6 MW。此时，在此基础上将系统电压下调 0.02 p.u.，此时的电压分布如图 7 圆点标识所示，降压后所有节点电压均在标准电压范围内；有功网损如图 8 所示，由图 8 可知，进行降压操作后的有功网损在接入并联电容器组后的基础上进一步减少为 0.142 5 MW，此时，降压节能技术充分发挥了其降低系统网络损耗的作用。

综上所述，按照决策方案并联电容器组后，在有效改善节点电压的同时显著地减少了系统的网络有功损耗，为后续降压节能操作提供了良好的电压无功条件。此外，在实现前面两个目标的同时考虑了电容器组的总容量，有效控制了电容器组的成本。

### 5 结论

降压节能技术在解决峰荷时期供电容量不足问题以及实现能源节约方面拥有相当的潜力。并联电容器组作为降压节能装置的一部分，能够在改善电压分布情况的同时控制系统网络有功损耗以保证降压节能的有效实现。本文提出一种针对配电网降压

节能装置中并联电容器组的多目标选址定容方法，该方法考虑电容器组的成本，以系统电压偏差以及网络有功损耗最小为目标，将 NEGA-II、基于满意度的模糊聚类法与配电网潮流计算充分结合。算例分析验证该方法计算收敛良好，所得结果能够充分达到优化目标，为后续降压节能的降压环节提供了良好的电压无功条件，为进一步实现负荷需求和网络损耗的减少以及长远的能源节约提供了保证。本文并未考虑负荷变化以及新能源接入等动态情况，在下一步研究中可针对不同运行场景下，电容器组的投切问题进行探讨。

### 参考文献

- [1] 蔡德华, 陈柏熹, 程乐峰, 等. 实施需求侧管理对提高发电系统可靠性的影响探究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 51-56.  
CAI Dehua, CHEN Baixi, CHENG Lefeng, et al. Effective study about the implementation of demand side management on improving reliability of generation system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 51-56.
- [2] 范龙, 李献梅, 陈跃辉, 等. 激励 CCHP 参与需求侧管理双向峰谷定价模型[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(17): 45-51.  
FAN Long, LI Xianmei, CHEN Yuehui, et al. Pricing model of bidirectional peak-valley for motivating CCHP to participate in DSM[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(17): 45-51.
- [3] 白杨, 李昂, 夏清. 新形势下电力市场营销模式与新型电价体系[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 10-16.  
BAI Yang, LI Ang, XIA Qing. Electricity business marketing modes in the new environment and new electricity pricing systems[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 10-16.
- [4] HSU Y Y, KUO H C. Dispatch of capacitors on distribution system using dynamic programming[J]. IEEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, 1993, 140(6): 433-438.
- [5] XU Y, DONG Z Y, WONG K P, et al. Optimal capacitor placement to distribution transformers for power loss reduction in radial distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4): 4072-4079.
- [6] CHIS M, SALAMA M M A, JAYARAM S. Capacitor placement in distribution systems using heuristic search strategies[J]. IEEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, 1997, 144(3): 225-230.

- [7] BARAN M E, WU F F. Optimal capacitor placement on radial distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(1): 725-734.
- [8] NG H N, SALAMA M M A, CHIKHANI A Y. Capacitor allocation by approximate reasoning: fuzzy capacitor placement[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(1): 393-398.
- [9] MIU K N, CHIANG H D, DARLING G. Capacitor placement, replacement and control in large-scale distribution systems by a GA-based two-stage algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1997, 12(3): 1160-1166.
- [10] HAGHIFAM M R, MALIK O P. Genetic algorithm-based approach for fixed and switchable capacitors placement in distribution systems with uncertainty and time varying loads[J]. IEEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, 2007, 1(2): 244-252.
- [11] DAS D. Optimal placement of capacitors in radial distribution system using a fuzzy-GA method[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2008, 30(6-7): 361-367.
- [12] WILLIAMS B R. Distribution capacitor automation provides integrated control of customer voltage levels and distribution reactive power flow[C] // IEEE Power Industry Computer Application Conference, May 7-12, 1995, Salt Lake City, USA: 215-220.
- [13] LAURIA D M. Conservation voltage reduction (CVR) at Northeast utilities[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1987, 2(4): 1186-1191.
- [14] DE STEESE J G, ENGLIN J E, SANDS R D. Conservation voltage reduction potential in the pacific northwest[C] // Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, August 12-17, 1990, Reno, Nevada: 43-47.
- [15] DWYER A, NIELSEN R E, STANGL J, et al. Load to voltage dependency tests at BC hydro[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(2): 709-715.
- [16] SCHNEIDER K P, FULLER J C, TUFFNER F K, et al. Evaluation of conservation voltage reduction (CVR) on a national level[R]. U.S. Department of Energy: Pacific Northwest National Laboratory, 2010.
- [17] ELLENS W, BERRY A, WEST S. A quantification of the energy savings by conservation voltage reduction[C] // IEEE International Conference Power System Technology (POWERCON), October 30-November 2, 2012, Auckland, New Zealand: 1-6.
- [18] 冯士刚, 艾芊. 带精英策略的快速非支配排序遗传算法在多目标无功优化中的应用[J]. 电工技术学报, 2007, 22(12): 146-151.
- FENG Shigang, AI Qian. Application of fast and elitist non-dominated sorting generic algorithm in multi-objective reactive power optimization[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(12): 146-151.
- [19] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.
- [20] 胡超芳. 基于决策者满意度的多目标模糊优化算法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- HU Chaofang. Research on fuzzy multiple objective optimization based on decision maker's satisfying degree[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007.
- [21] 刘蕊洁, 张金波, 刘锐. 模糊 c 均值聚类算法[J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2008, 22(2): 139-141.
- LIU Ruijie, ZHANG Jinbo, LIU Rui. Fuzzy c-means clustering algorithm[J]. Journal of Chongqing Institute of Technology (Natural Science), 2008, 22(2): 139-141.

收稿日期: 2017-03-13; 修回日期: 2017-06-28

作者简介:

戴诗滕(1992—), 女, 硕士研究生, 研究方向为配电网电压无功; E-mail: annie578400321@qq.com

孙鸣(1957—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统继电保护及调度自动化;

刘俊勇(1963—), 男, 博士, 教授, 研究方向为配电网规划运行及电力市场研究。

(编辑 葛艳娜)