

# 基于多负荷模糊最优模型的配电网无功优化

周 竞, 丁晓群, 蒋 丹, 刘苏云, 史 静

(河海大学能源与电气学院, 江苏南京 211100)

## Reactive Power Optimization in Distribution Network Based on Fuzzy Optimal Model of Multiple Loads

ZHOU Jing, DING Xiaoqun, JIANG Dan, LIU Suyun, SHI Jing

(College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

**摘 要:** 近年不少地区配电网的负荷变动较大, 仅考虑单一负荷状态下的无功规划方案有可能导致一些负荷模式的补偿效果极差。本文提出了兼顾多种负荷模式的配电网多负荷模糊最优模型, 并使用改进遍历算法优化。实际计算表明, 与常规优化方法相比, 此方法可兼顾多种负荷模式下网络损耗与电能质量, 能提高整体优化效果。

**关键词:** 无功优化; 配电网; 多负荷模糊最优; 模糊聚类; 模糊遍历法

**Abstract:** In recent years, loads of many urban distribution networks are changing greatly because of the development of industry. Reactive power optimization considering single invariable load may cause bad compensation effect for some load patterns. In this paper, a fuzzy optimal model of multiple loads in distributed network is proposed to meet the demand of all the load patterns, and it is optimized by improved fuzzy traversal algorithm. Actual computation shows that this method can improve the whole optimization effect as well as good network loss and power quality under multiple loads mode by comparing with the common method.

**Keywords:** reactive power optimization; distribution network; fuzzy optimal model of multiple loads; fuzzy clustering; fuzzy traversal algorithm

## 0 引 言

配电网是电力系统的重要组成部分, 是电力系统的主要负荷中心, 同时也是电力系统中直接面对用户的末端环节与服务窗口, 其供电的可靠性和输出的电能质量直接关系我国电力企业的经济效益和社会效应<sup>[1-2]</sup>。然而, 长期以来, 我国电力系统存在着“重发、轻供、不管用”的政策倾向, 配电网的建设未能得到应有的重视<sup>[3]</sup>。综合以上, 配电网

无功规划必须要考虑负荷发展中的不确定性<sup>[4]</sup>, 根据各地每个发展阶段的实际情况, 在满足技术要求的前提下, 从总体上综合考虑, 进行合理的无功补偿优化。而其中涉及到的问题主要有两类: 一是配电网潮流计算, 二是无功优化算法。

相关学者基于这两类问题对配网的调压、降损已经做了大量的研究, 主要包括变压器有载调压、线路的升级改造、配电网络重构及电容器无功优化补偿等。本文亦在此两方面研究的基础上, 增加了对配网负荷的中长期预测<sup>[5-6]</sup>, 提出了线路处于多种负荷状态下运行时无功规划综合满意度最好模型, 并针对模糊最优求解提出了模糊遍历算法, 生成了一套在负荷变动时期配电网全程经济安全运行的无功补偿方案, 解决了传统方式下简单地求平均负荷进行无功补偿时, 某些年份网损过大及电压越限的问题。

## 1 配网负荷处理

### 1.1 配电线路负荷预测

负荷预测需要根据样本负荷的实际变化情况, 制定相应的负荷增长模型, 本文主要采用的是多元线性回归模型及类比的方法进行预测, 且此次负荷预测以年为单位, 得到未来 5 年内配网负荷变化情况以供研究规划。

对于实际中少部分工业节点由于新报容量或者负荷迁移导致负荷变动较大, 从而影响线路的负荷中心, 则考虑及时在线性回归模型的基础上将这部分影响加入, 以保证预测负荷的实际准确度。同时, 为确保回归模型方程的实用价值, 须在其建立后进行历史数据的统计校验, 并对部分参数进行修

正,使得预测负荷与实际运行更加契合。

### 1.2 配电网负荷模糊聚类

根据回归预测模型可得到未来负荷的多种不同分布,需进行归类处理。而现实中事物类别边界大都是模糊的,所以本文应用模糊集中的等价关系对多种负荷分布情况进行模糊聚类分析<sup>[7]</sup>,得到  $N$  类负荷及其不确定性程度,这是把对象精确地划分为若干等价类的传统分类方法的推广。

### 1.3 补偿容量的确定

配电线路中的电流分为无功电流和有功电流两部分,本文根据减小配电线路中流过的无功电流原理来进行无功补偿,即减小无功电流产生的无功网损。本文根据工程实际情况采用多点补偿方式(例如 3 点),设  $m$  为电容器安装点数目,  $\mathbf{I}_c$  为这些补偿设备所提供的无功电流  $K$  维向量,  $\alpha_j (j=1, 2, \dots, k)$  为电源根节点到补偿安装点之间经过的支路集合。  $\mathbf{G}$  为  $m \times K$  维向量,其中元素满足:

$$G_{ij} = \begin{cases} 1, & i \in \alpha_j \\ 0, & i \notin \alpha_j \end{cases} \quad (1)$$

则安装电容后,支路无功电流为

$$\mathbf{I}_{r,\text{new}} = \mathbf{I}_r - \mathbf{G}\mathbf{I}_c \quad (2)$$

式中:  $\mathbf{I}_r$  为补偿前线路中流过的无功电流;  $\mathbf{I}_c$  为无功补偿装置产生的无功电流。

进行无功补偿后无功电流产生的损耗为

$$P_{rL,\text{new}} = \sum_{i=1}^m (I_{ri} - \sum_{j=1}^K G_{ij} I_{cj})^2 R \quad (3)$$

降低的网损为

$$\Delta P_{rL} = P_{rL} - P_{rL,\text{new}} = \sum_{i=1}^m (2I_{ri} \sum_{j=1}^K G_{ij} I_{cj} - (\sum_{j=1}^K G_{ij} I_{cj})^2) R \quad (4)$$

为了得到最优补偿容量,必须有

$$\begin{cases} \frac{\partial \Delta P_{rL}}{\partial I_{c1}} = 0 \\ \frac{\partial \Delta P_{rL}}{\partial I_{c2}} = 0 \\ \vdots \\ \frac{\partial \Delta P_{rL}}{\partial I_{cK}} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

从而求出  $\mathbf{I}_c$ , 则补偿容量为

$$\mathbf{Q}_c = U_K \mathbf{I}_c \quad (6)$$

式中:  $U_K$  为配网额定电压,规定为 10kV。因而求得最优无功补偿点,即可通过此式得到最优补偿容量,省去了以往算法兼顾两方面处理的大工作量。

### 1.4 考虑负荷接入点的支路简化

实际配网结构中,负荷亦是成聚集效应,配网支线同一片区多为同类负荷,如商业区、工业区等,其类型特点主要有两方面:一是负荷投入时间上有差别,如工业区白天负荷重,而晚上居民区与商业休闲区用电较多;二是负荷特性不同,工业区属重负荷,电压相对偏低、波动大、谐波多,而轻负荷区虽波动频繁,但相对电能质量要好。所以不同的负荷接入点对无功补偿点的设置会有所影响,在实际中确实是需要考虑的。但在本文中,主要讨论范围是某实际配网线路的无功优化问题,其负荷接入点都是已确定的,只需一种简单方便的方法来得到其最优无功配置。不同接入点对无功配置的影响还需深入研究,才能结合到配网无功优化当中。

由于本文研究的实际工程背景,其负荷分布的变动宏观上也只会体现在干线负荷的分布变化上,所以本文将支线简化,只讨论模糊无功补偿点在干线上的选取情况。但若补偿后支线电压不合格,则再讨论补偿点由支干线接入点向支路上移动问题。

## 2 多目标无功优化模糊数学模型

配电网变化通常经历一个长期发展过程,本文将该过程经过负荷预测、模糊聚类等方法处理后,可以将负荷变化分为几个具有明显差异的类别。配网无功优化的理想目标就是使得电网在所有分布情况下运行的网损均最小,而应用传统的针对单一目标情况的无功优化模型显然是达不到要求的,因此只能寻得一种无功补偿方式,在配网所有运行情况下都达到“极好”,那就必须构建多目标优化模糊数学模型。

本文中考虑多负荷变动过程中多目标无功优化问题可用以下模型表示:

$$\begin{aligned} & \max \begin{cases} P_{1\text{loss}} = P_{s1} - P_{L1} \\ P_{2\text{loss}} = P_{s2} - P_{L2} \\ \vdots \\ P_{n\text{loss}} = P_{sn} - P_{Ln} \end{cases} \quad (7) \\ & \text{s. t. } \begin{cases} g(x_i) = 0 \\ U_{\min} < U_i < U_{\max} \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \end{aligned}$$

式中:  $P_{n,\text{loss}}$  代表在第  $n$  种负荷方式下的系统网损下降值;  $P_{sn}$  代表第  $n$  种负荷下系统优化前网损;  $P_{Ln}$  代表第  $n$  种负荷下系统补偿后网损; 约束条件为潮流约束和电压约束,  $U_i$  为节点  $i$  的电压,

$U_{\max}$ 、 $U_{\min}$ 为电压上下界。因此要想使得上述所有负荷类网损下降都极大,关键是找到适当的隶属度函数,本文将模糊聚类后的每个负荷类分别构建一个隶属度,假设此发展过程包括 $n$ 个聚类,则构建 $n$ 个模糊隶属度函数<sup>[8-10]</sup>,设 $\mu_1$ 、 $\dots$ 、 $\mu_n$ 分别表示第1到 $n$ 种负荷隶属度函数;则 $\mu_n$ 表达式为

$$\mu_n = \begin{cases} 1, & P_{n,\text{loss}} \geq P_{n,\text{lossmax}} \\ 1 - \frac{1}{d_n} \times \frac{P_{n,\text{lossmax}} - P_{n,\text{loss}}}{P_{n,\text{lossmax}}}, & (P_{n,\text{lossmax}} - P_{n,\text{lossmax}}d_1) \leq P_{n,\text{loss}} < P_{n,\text{lossmax}} \\ 0, & P_{n,\text{loss}} < (P_{n,\text{lossmax}} - P_{n,\text{lossmax}}d_1) \end{cases} \quad (8)$$

式中: $P_{1,\text{lossmax}}$ 、 $\dots$ 、 $P_{n,\text{lossmax}}$ 分别表示第1至 $n$ 种负荷以网损最小为单目标时进行无功补偿得到的最大降损量; $P_{1,\text{loss}}$ 、 $\dots$ 、 $P_{n,\text{loss}}$ 分别表示第1至 $n$ 种负荷以当前方式补偿时的降损量。定义模糊伸缩度指标 $d_1$ 、 $\dots$ 、 $d_i$ 、 $\dots$ 、 $d_n$ ,分别体现各目标的重要性。若目标越重要, $d_i$ 取值宜越大,反之,则越小。控制 $d_i$ 取值可以改变总的满意度函数 $\lambda$ 的最优值,本文根据各种负荷状态下线路补偿前末端电压标么值的高低来确定 $d_i$ ,即标么值越低的线路,认为其无功缺额越大,越需要补偿,则 $d_i$ 取值越大。且有:

$$\begin{aligned} P_{\text{lossmax}} &= P_M - P_{\text{low}} \\ P_{\text{loss}} &= P_M - P_{\text{now}} \end{aligned} \quad (9)$$

式中: $P_M$ 为线路补偿前网损; $P_{\text{low}}$ 为线路进行无功补偿时可得到的最优网损; $P_{\text{now}}$ 为线路在当前补偿时的网损。代入(9)式得:

$$\mu_n(P_{n,\text{now}}) = \begin{cases} 1, & P_{n,\text{now}} \leq P_{n,\text{low}} \\ 1 - \frac{1}{d_n} \times \frac{P_{n,\text{now}} - P_{n,\text{low}}}{P_{n,M} - P_{n,\text{low}}}, & P_{n,\text{low}} < P_{n,\text{now}} \leq [(P_{n,M} - P_{n,\text{low}})d_n + P_{n,\text{low}}] \\ 0, & P_{n,\text{now}} > (P_{n,M} - P_{n,\text{low}})d_n + P_{n,\text{low}} \end{cases} \quad (10)$$

式(10)即为构建的 $n$ 种负荷的隶属度模型,其呈降半梯形分布,将此隶属度函数模型利用模糊数学中的最大最小法进行满意度综合,即有:

$$\begin{aligned} \max \quad & \lambda \\ \text{s. t.} \quad & \begin{cases} g(x) = 0 \\ \mu_i(P_{i,\text{now}}) \geq \lambda \\ 0 \leq \lambda \leq 1 \\ x \in X \\ i \in n \end{cases} \end{aligned} \quad (11)$$

即找到一个公共阈值 $\lambda$ ,使得所有负荷种类的满意度均大于这个阈值,且使得此阈值最大,这样我们便得到一个给定模糊集下的单目标非线性优化模型。

### 3 运用模糊遍历法的无功补偿位置确定

遍历法是无功线性规划方法中一种比较经典的方法<sup>[11]</sup>,其特点是原理简单、计算速度快、便于工程实际运用。而模糊遍历的核心就是在每一步遍历时,均考虑所有的负荷分布情况,用综合满意度最大的思想来确定每一步的动补偿点,其中每一种负荷的满意度大小则是根据式(11)确定的。这样随着补偿点的不断移动,便能使综合满意度不断上升,直到补偿点位置不再变化,综合满意度上升到极值。这样得到的最终无功配置,在所讨论的几种负荷分布下,都会有较好的效果。下面是本文对某线路做3点无功补偿时的模糊遍历流程:

① 输入线路参数,对各种负荷分布下的线路进行以网损最小为目标的3点补偿遍历搜索,共得到 $m$ 个最优补偿方案。

② 根据最优补偿方案及式(10)和(11)建立隶属度函数及满意度最大目标函数。

③ 将前两个补偿点分别定于负荷节点1和2,作为定补偿点,设为 $n_1$ 和 $n_2$ ,动补偿点 $n_3$ 由节点3遍历至末端节点 $N$ ,计算各负荷分布下的补偿容量及网损,找到此时综合满意度最大的点作为 $n_3$ 的新位置,记作 $n_3^{(1)}$ 。此时综合满意度记作 $\mu_1$ 。

④ 定补偿点于 $n_1$ 和 $n_3^{(1)}$ ,则第2个补偿点只能存在于第1个和第3个补偿点之间,由 $n_2$ 至 $n_3^{(1)}-1$ 之间遍历,同样将计算得到的各点网损值代入隶属度公式得到此时的满意度最大点,记作 $n_2^{(1)}$ ,此时的满意度上升为 $\mu_2$ ,易得 $\mu_2 \geq \mu_1$ 。

⑤ 将 $n_2^{(1)}$ 和 $n_3^{(1)}$ 记作定补偿点, $n_1$ 作为动补偿点由节点1遍历至 $n_2^{(1)}-1$ 点,同样会得到一个综合满意度上升最大的点,为 $n_1$ 的新位置,记作 $n_1^{(1)}$ ,此时的满意度记为 $\mu_3$ , $\mu_3 \geq \mu_2$ 。

⑥ 将定补偿点定为 $n_1^{(1)}$ 和 $n_2^{(1)}$ ,重复步骤③,循环直至3个补偿点的位置均不再发生变化,此时满意度也不会再上升,则这种补偿方案为综合满意度最优的方案,其综合满意度为 $\min\{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_m\}$ 。

### 4 算例分析

某实际 10kV 配电网线路如图 1 所示，其在未来 5 年的线路节点负荷变动情况如表 1 所示，线路阻抗如表 2 所示。

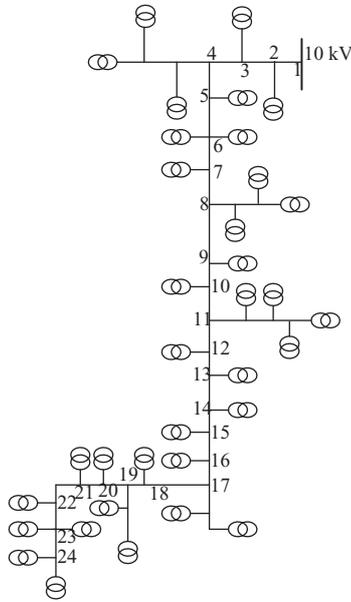


图 1 10kV 配电线路

运用模糊遍历法对上述线路进行为期 5a 的长期无功规划，本文选 3 点补偿时，得到最优模糊补偿节点为 6、11、24 号节点。其补偿容量随着负荷的不同，也发生着变化。表 3 是补偿方案，表 4 是对此线路进行模糊遍历补偿和普通平均负荷无功补偿的效果对比。

由表 4 易得：考虑负荷变化特性的模糊遍历算法比单纯求一个时期平均负荷下的一般算法更能捕捉负荷的变化特性，根据不同负荷寻找到一组公共最优补偿点，并给出了不同时期相应的容量配置，从而在配电网的长期规划中，无需变化补偿点，只需在不同时期调整相应的补偿容量即可。且由补偿结果知：同样是实行 3 点补偿，模糊遍历算法由于更准确地考虑到每个时期的负荷变化，在配电网变化的第 3 个阶段成功地将系统末端电压标么值由以平均负荷下作补偿 0.919 2，提升至 0.958 9，使得系统电压由不合格转为合格；而在整个 5 年规划中的网损值也合计下降了 16kW 左右，使得该配电线路在整个发展周期内的网损达到“极小”，从而实现了配电线路长期总体无功最优的目的。

表 1 5 年线路节点负荷(聚类后)

节点号	第 1~3 年		第 4 年		第 5 年	
	P/kW	Q/kvar	P/kW	Q/kvar	P/kW	Q/kvar
1	0	0	0	0	0	0
2	136.58	119.84	143.39	125.84	145.17	127.62
3	80.41	70.52	82.15	72.3	84.44	74.31
4	174.15	152.82	77.65	68.7	79.22	69.6
5	100.88	88.69	103.64	91.2	104.12	91.62
6	151.54	133.35	153.99	135.52	54.65	48.1
7	33.46	29.45	35.1	30.88	35.5	31.24
8	290.91	255.84	298.87	174.43	202.45	178.99
9	123.36	108.34	126.67	111.47	127.1	111.85
10	70	61.59	72	63.1	73.1	64.3
11	454.76	400.72	342.33	300.25	193.78	170.52
12	23.98	21.08	25.92	22.12	26.24	21.9481
13	12.82	11.16	13.69	12	13.91	12
14	67.51	59.48	69.12	60.82	69.55	61.2
15	105.49	92.9	109.42	96.29	109.96	96.76
16	102.37	90.15	104.43	91.89	104.95	92.35
17	130.62	114.94	132.47	116.97	133.09	117.21
18	9	7.92	9	7.92	9	7.92
19	12.89	11.31	15.26	13.53	118.66	104.64
20	25.37	22.42	26.92	23.68	27.53	24.22
21	12.93	11.38	12.93	11.38	12.93	11.38
22	55.43	48.77	70.23	61.8	96.98	85.34
23	73.18	64.39	85.35	75.1	93.88	82.61
24	47.85	42.1	54.36	47.83	254.7	224.57
25	73.43	64.74	201.68	176.44	649.13	571.35

注：1 号节点是馈线节点。

表 2 线路阻抗参数

线路号	电阻/ $\Omega$	电抗/ $\Omega$	线路号	电阻/ $\Omega$	电抗/ $\Omega$
1	0.310 3	0.225 7	13	0.079 8	0.060 1
2	0.190 4	0.142 9	14	0.018 6	0.014
3	0.168 2	0.125 9	15	0.151	0.113 7
4	0.219	0.164 6	16	0.083 7	0.063
5	0.076 2	0.057 4	17	0.1	0.0754
6	0.075 5	0.056 8	18	0.150 2	0.113 4
7	0.149 6	0.112 7	19	0.090 2	0.067 9
8	0.290 6	0.177 3	20	0.085 2	0.064 3
9	0.032 2	0.024 3	21	0.022 5	0.109 1
10	0.378 1	0.284 1	22	0.044 7	0.033
11	0.326 8	0.232 1	23	0.066 5	0.05
12	0.245 2	0.184 4	24	0.269 5	0.203

表3 补偿方案

节点号	平均负荷 补偿/kvar	模糊遍历补偿/kvar			
		节点号	第1~3年	第4年	第5年
6	650.65	6	711.13	598.82	520.34
11	710.84	11	806.75	693.23	594.86
22	727.96	24	484.76	645.06	1 418.5

表4 补偿效果对比

指标	平均负荷补偿 补偿前	模糊遍历补偿						
		6 节点	11 节点	22 节点	6 节点	11 节点	24 节点	
系统网 损/kW	第1~3年	123.27	68.76			67.66		
	第4年	131.01	74.22			73.75		
	第5年	278.05	158.21			146.32		
线路末 端电压 (标么值)	第1~3年	0.934 9	0.951 5			0.969 3		
	第4年	0.928 7	0.950 1			0.966 1		
	第5年	0.890 1	0.919 2			0.958 9		

## 5 结束语

本文给出了一种考虑配电网长期无功规划中负荷变动情况的模糊遍历算法,其运用模糊集理论有效地将各种负荷的影响考虑了进去,由分析结果表明:考虑负荷变化特性的模糊遍历算法比单纯求一个时期平均负荷下的一般算法更能捕捉负荷的变化特性,根据不同负荷寻找到一组公共最优补偿点,并给出了不同时期相应的容量配置,更好地考虑了线路发展过程中长期的无功平衡,给出的补偿方案也保证了配网供电安全性和经济性,具有一定的实用价值。

### 参 考 文 献

[1] 童钧. 智能电网背景下的现代城市电网规划研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.

- [2] 张丽君. 城市配电网规划及其技术评估方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
- [3] 杜润均. 关于新城市中心区配网及其配电自动化规划[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
- [4] Abdul-Rahman K H, Shahidehpour S M. Reactive power optimization using fuzzy load representation [J]. IEEE Trans. on Power System, 1994, (2): 898-905.
- [5] Gorenstin B G, Campodonico N M, Costa J P. Power system expansion planning under uncertainty [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1993, 8 (1): 129-136.
- [6] 张友泉. 一种基于灰色系统理论的中长期电量预测模型 [J]. 电网技术, 1999, 23(8): 47-50.
- [7] 高新波等. 模糊聚类分析及其应用 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004.
- [8] 谭建成, 王佩璋. 电力系统无功综合优化的模糊数学解法 [J]. 中国电机工程学报, 1990, 10(增刊): 66-72.
- [9] Ng H N, Salama M M A, Chikhani A Y. Capacitor placement in distribution systems using fuzzy technique [C] // Electrical and Computer Engineering, 1996. Canadian Conference on. IEEE, 1996, 2: 790-793.
- [10] Ng H N, Salama M M A. Fuzzy optimal capacitor sizing and placement [C] // Electrical and Computer Engineering, 1995. Canadian Conference on. IEEE, 1995, 2: 680-683.
- [11] 李禹生. 线性目标规划的解结构分析及遍历算法设计 [J]. 武汉食品工业学院学报, 1994(3): 76-81.

收稿日期: 2013-06-26

作者简介:

周 竞(1988—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统无功优化与电压控制, E-mail: zhojing881130@126.com;  
丁晓群(1956—), 男, 教授, 研究方向为人工智能在电力系统中的应用、电气设备故障诊断以及配电自动化。

(责任编辑: 杨秋霞)