

统计综合法负荷建模中的行业用户精选

李培强¹, 李欣然¹, 唐外文², 陈辉华², 刘艳阳¹

(1. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南省长沙市 410082; 2. 湖南电力调度通信中心, 湖南省长沙市 410007)

摘要: 统计综合法负荷建模必须以典型用户用电设备构成情况的调查统计为基础。结合电网实际建模经验, 提出了一套系统的调查方法。在此基础上, 应用等价关系聚类 and 模糊 C 均值聚类两种模糊聚类法对得到的调查数据进行分析 and 处理, 精选出行业典型用户, 从而为研究各行业的综合负荷特性提供了新的有效手段。给出了纺织行业用户精选实例, 验证了该方法的可行性和有效性。

关键词: 统计综合法; 负荷静态特性; 负荷建模; 模糊聚类

中图分类号: TM714

0 引言

电力系统中, 数字仿真已成为设计、规划、决策和运行控制的主要科学手段, 它以主要电气设备以及网络的数学模型作为基础, 包括发电机、励磁系统、调速系统、变压器、配电网络和负荷的模型。长期以来人们对发电系统、配电系统的行为机理进行了大量的现场实测和理论研究, 已经得出适应于不同仿真精度的数学模型。但是负荷模型却由于其自身的随机性、分散性、多样性和非连续性的特点, 其理论和模型的研究一直处于相对滞后的状态, 造成目前研究人员往往从基本概念出发, 采取理想化的模型, 即恒功率、恒阻抗、恒电流或三者的组合。这种粗糙的负荷模型与精确的发电机和网络模型的严重不协调使仿真的精度和可信度大大降低, 在临界情况下甚至会得出截然相反的结论。负荷模型不准确对电力系统的潮流计算、小扰动稳定计算、暂态稳定计算、电压稳定计算的结果都有一定程度的影响^[1,2]。因此, 对系统的实际负荷特性进行研究, 将尽可能反映实际负荷特性的负荷模型应用于电力系统的仿真, 无疑具有重要的理论和工程价值。

1 统计综合法负荷建模的基本思路

统计综合法负荷建模必须以典型用户用电设备构成情况的调查统计为基础^[3]。其基本思路是: 将综合负荷按行业特性进行合理分类; 在此前提下, 认为不同母线供电范围内的相同行业用户的负荷构成及负荷特性是相近或相似的, 所以负荷建模可从行

业的平均负荷特性建模展开, 最后回归到变电站母线的综合负荷模型。具体思路为: ①在全网范围内, 对所划分的每一类行业用户, 选取若干有代表性的用户进行调查, 确定其用电设备构成状况及各类电器的容量比例。②根据每类用电设备的平均特性(由实验或典型特性确定)确定每一行业用户的行业综合特性。③调查确定变电站(或母线)的行业组成及容量比例, 得出所需的综合负荷模型。

在建模过程中必须着重解决 3 个问题: ①实践表明, 在所选择的调查用户中不一定每个被调查对象都具有代表性, 但为了尽可能保证通过用户调查客观地反映行业的用电设备构成, 被调查对象不能太少, 这就需要从较多的调查对象中筛选出真正具有代表性的用户, 从而必须有适当的典型用户筛选方法; ②每一行业将含有多个经筛选后的典型用户, 其特性(电器构成及比例)只能相近或相似, 不可能完全相同, 因此必须有合理的方法能够从若干典型用户中, 提取出行业的综合特性, 以确定该行业的负荷结构(用电设备构成种类及相应比例); ③在行业综合特性基础上, 获得母线综合负荷特性, 这是决定最终建模结果的关键。

2 行业典型用户选取和模糊聚类分析

2.1 典型用户的精选

统计综合法负荷建模的基础是典型用户用电设备构成情况的调查统计。本文的选择方法是:

1) 按照行业分类, 根据实践经验在每个行业中选取若干个能够反映该行业生产特征的用户进行调查, 这是依据专家经验的典型用户初选。

2) 在初选被调查用户调查结果的基础上, 通过数学方法, 把实际并不典型的用户除去, 然后进行行

业特性的综合,这样使得利用典型用户所得的行业用户的综合负荷组成及比例更合理。

2.2 聚类分析

聚类分析在电力负荷的动态研究中有些相关的应用^[4~13],但大多针对负荷模型的动态参数展开,在静态建模中的应用很少有文献报道。本文应用模糊数学的方法,定量地确定待分类典型用户的亲疏关系,从而客观地分型聚类。

2.2.1 基于等价关系的模糊聚类法

该方法先对典型行业用户负荷特性构成参数进行标准化,使数据压缩在 $[0,1]$ 闭区间,然后标定相似系数,最后根据相似矩阵进行聚类。步骤如下:

1)建立典型行业用户的模糊相似关系。本文采用最大最小法计算相似性。

2)改造典型用户的相似关系为等价关系。

3)根据不同的 λ 截集水平进行聚类。当 λ 由1下降为0时,所得的分类由细变粗,逐渐归并,完成聚类分析的过程。

2.2.2 基于模糊C均值的负荷静特性聚类

模糊C均值聚类是用隶属度确定每个行业典型用户的综合负荷特性属于某个聚类程度的一种聚类算法。该方法把 n 个行业典型用户 $x_k(k=1,2,\dots,n)$ 分为 c 个模糊类,并求每类的聚类中心,使得类内加权误差平方和函数达到最小。与引入模糊划分相适应,隶属矩阵 U 允许取值在 $[0,1]$ 范围内。由于标准化规定,一个典型行业用户的隶属度之和总等于1。根据聚类准则构造拉格朗日函数,根据库恩-图克定理对所有输入参量求导得到目标函数为最小的必要条件,由此即可确定模糊C均值聚类的最佳模糊分类矩阵 U_i 和聚类中心 C_i ,由 U_i 可进行典型行业用户的分类。

3 行业用户的负荷特性调查

3.1 调查方法

按照本文第1节所述的具体思路,行业用户负荷特性调查方法如下:

1)对全网用户进行科学合理的行业分类,分类以国家有关用电行业分类标准为指导,结合电网实际,着重考虑同类综合负荷必须是负荷特性相同或相近这一负荷建模的特殊要求,保证在负荷建模时同类负荷在最大限度上具有共同的本质特征,这是统计综合法负荷建模的本质要求。基于上述基本原则,在负荷特性调研时将电力用户分为工业(包括重工业、轻工业和采掘业)、农业、第三产业和市政生活六大类,计39类小行业:①重工业包括黑色金属冶

炼及压延加工业、有色金属冶炼业、机械加工及制造业、能源工业、化学及化纤工业、石油加工业、建筑材料及其他非金属矿制品业、炼焦和煤气及煤制品业;②轻工业包括纺织工业、造纸工业、日用化工、食品加工、医药工业、电子工业、饮料工业、烟草工业、橡胶及塑料制品业;③采掘业包括矿业、木材及竹材采运业、自来水生产和供应业;④农业包括排灌、农副产品加工、农村照明、渔业、林业经营种植业、畜牧饲养放牧业、家禽饲养业;⑤第三产业包括电气化铁路、交通运输、邮电通信、建筑业、公共饮食业和物资供销及仓储业;⑥市政生活包括商业用电、街道照明、生活照明、家用电器、公共娱乐、自来水供应、机关用电。

2)对全电网范围内所有220 kV变电站开展负荷结构调查统计。调查内容包括:主变压器台数、容量、最大最小负荷、平均功率因数和集中无功功率补偿容量;所有供电用户的所属行业、配变容量、负荷装机容量、负荷构成(负荷种类——感应电动机类、电热类、办公类、家用类等及其构成比例)。

3)对每一用电行业,选取若干较有代表性的用户进行负荷特性调查,确定其用电设备构成状况及各类电器的容量比例。选定各行业的调查用户时,既要便于相应调查统计实施,又要尽可能不遗漏确具代表性的典型用户。因此,调查对象的确定必须以对调查范围内用户情况有全面了解为基础,并在调研过程中及时修正。负荷特性调查内容见图1。

4)根据典型用户的设备构成确定其综合负荷特性,并以此为基础确定相应行业的综合负荷特性。

5)统计变电站(或母线)的行业组成及其容量比例,根据其行业构成比例确定相应的综合负荷特性,最终确定所需要的综合负荷模型。

3.2 调查结果

按照3.1节所述步骤,完成了湖南电网(含14个地市电网)负荷特性的普查工作。调查对象包括全网六大行业、39个小行业、216家典型用户和194个变电站。调查结果表明,所制定的调查方案以及调查工作的实施是成功的,总体上保证了调查数据的客观、准确,为湖南电网负荷特性研究积累了完整的第一手资料。

本文以初选的11个纺织行业的典型用户静态负荷特性数据进行精选分析。具体数据见表1。待聚类对象 $u=\{u_1, u_2, \dots, u_{11}\}$ 为11个纺织行业初选典型用户;对象参数共 m 个: $u_i=\{u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{i8}\}=\{\text{异步电动机, 电阻炉, 通风设备, 中央空调, 家用空调, 车间照明, 行车, 车床}\}$ 。

用户负荷特性调查表

用户名称: _____

供电电压等级及变电站: _____

所属行业: 纺织行业

用户装机容量 (kVA): _____

设备类别	设备名称	电动机配置	台数	最大单机容量 (kW)	总容量 (kW)	负载特性	运行方式	备注
电动机设备	设备 1	同步电动机						
		大型感应电动机						
		中型感应电动机						
		小型感应电动机						
	⋮							
电热负载								
中央空调								
⋮								

图 1 用户负荷特性调查

Fig. 1 Investigation of consumer's load characteristic

表 1 纺织行业初选典型用户统计表

Table 1 Statistics of the preliminary chosen consumers of spinning industry

用电设备	典型用户负荷特性											kW
	邵纺	娄纺	银纺	桃纺	常纺	信纺	汨纺	冷纺	恒纺	益纺	湘纺	
异步电动机	4 100	2 050	6 568	4 777	2 297	3 600	2 435	2 000	1 200	1 040	6 050	
电阻炉	0	24	0	0	0	0	0	90	0	460	2 000	
通风设备	652	520	460	520	390	363	475	520	260	50	700	
中央空调	0	150	1 410	0	750	0	0	0	30	180	0	
家用空调	820	30	3	1 200	0	672	500	250	240	294	400	
车间照明	680	40	750	1 100	922	850	740	430	410	2 400	0	
行车	160	0	0	480	0	300	275	0	180	0	0	
车床	700	0	760	525	0	410	290	20	225	0	0	
总计	7 112	2 814	9 951	8 602	4 359	6 195	4 715	3 310	2 545	4 424	9 150	

4 聚类精选的实例分析

4.1 直接聚类的典型用户精选

1)用表 1 的行业负荷特性调查数据计算各用户的设备容量百分比,从而建立纺织行业的论域 F :

$F=$

57.6	0	9.2	0	11.5	9.6	2.2	9.8	邵纺
72.9	0.9	18.5	5.3	1.1	1.4	0	0	娄纺
66.0	0	4.6	14.2	0	7.5	0	7.6	银纺
55.5	0	6.0	0	14.0	12.8	5.6	6.1	桃纺
52.7	0	8.9	17.2	0	21.2	0	0	常纺
58.1	0	5.9	0	10.8	13.7	4.8	6.6	信纺
51.6	0	10.1	0	10.6	15.7	5.8	6.2	汨纺
60.4	2.7	15.7	0	7.6	13.0	0	0.6	冷纺
47.2	0	10.2	1.2	9.4	16.1	7.1	8.8	恒纺
23.5	10.4	1.1	4.1	6.6	54.2	0	0	益纺
66.1	21.9	7.7	0	4.4	0	0	0	湘纺

2)用基于等价关系的模糊聚类法精选典型用户。采用最大最小法计算相似性:

$$r_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^m \min(u_{ik}, u_{jk})}{\sum_{k=1}^m \max(u_{ik}, u_{jk})}$$

建立相似关系矩阵 R 为:

$$R=$$

1												
0.45	1											
0.62	0.68	1										
0.89	0.48	0.71	1									
0.60	0.44	0.46	0.62	1								
0.79	0.57	0.70	0.83	0.72	1							
0.82	0.48	0.70	0.88	0.62	0.81	1						
0.56	0.61	0.56	0.61	0.67	0.69	0.68	1					
0.83	0.67	0.75	0.85	0.73	0.88	0.85	0.63	1				
0.14	0.19	0.17	0.16	0.18	0.15	0.20	0.20	0.17	1			
0.94	0.47	0.72	0.91	0.61	0.79	0.83	0.56	0.83	0.14	1		

取 $\lambda=0.7$, 共分两类: $\{1, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 11\}$ 为包含元素最多的 I 类, 即为精选的典型用户; II 类为 $\{2, 8, 10\}$, 是剔除的一类。

用算术平均最小法计算相似性:

$$r_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^m \min(u_{ik}, u_{jk})}{0.5 \sum_{k=1}^m (u_{ik} + u_{jk})}$$

聚类后结果与最大最小法计算结果相同。

4.2 模糊 C 均值聚类的典型用户精选

按照模糊 C 均值聚类方法,对纺织行业典型用户静态负荷构成进行聚类分析,可以得到模糊分类矩阵 U 和聚类中心 C 。

典型用户隶属矩阵 U 是一个模糊分类矩阵,每一行表示一个典型用户属于某个类的隶属度向量,每一列表示每个典型用户对于该类的隶属度,这个矩阵表示的是每个样本点属于每个类的隶属度。本文分为两个聚类,计算得到:

$$U = \begin{bmatrix} 0.429 & 879 & 0.570 & 121 \\ 0.773 & 685 & 0.226 & 315 \\ 0.755 & 129 & 0.244 & 871 \\ 0.227 & 095 & 0.772 & 905 \\ 0.497 & 293 & 0.502 & 707 \\ 0.300 & 658 & 0.699 & 342 \\ 0.061 & 728 & 0.938 & 272 \\ 0.707 & 450 & 0.292 & 550 \\ 0.389 & 783 & 0.610 & 217 \\ 0.695 & 744 & 0.304 & 256 \end{bmatrix}$$

根据这个分类矩阵,按照模糊集合中的最大隶属原则即可确定每个典型用户的归属类别。根据模糊分类矩阵的聚类结果如下:Ⅰ类为{1,4,5,6,7,9,10};Ⅱ类为{2,3,8,11}。根据包含元素最多的原则,把Ⅰ类作为精选典型用户类,Ⅱ类为剔除类。

矩阵 C 表示聚类的中心矩阵,每一行表示一个聚类典型用户中心,每一列表示每个类在该用电设备所占比例。聚类中心表示的是每个聚类行业典型用户的综合负荷静态特征。文中矩阵 C 为:

$C =$

$$\begin{bmatrix} 60.094 & 4.866 & 10.484 & 5.587 & 3.990 & 10.017 & 0.419 & 2.577 \\ 51.028 & 1.532 & 8.1124 & 1.981 & 9.436 & 17.797 & 4.308 & 5.774 \end{bmatrix}$$

4.3 聚类结果分析

1)行业典型用户的精选是确保统计综合法负荷建模结果客观准确的关键因素,应用模糊聚类的方法进行行业典型用户的精选科学地保证了所选用户的合理性。它将待聚类对象中最为相像的一组元素提取出来作为该行业用户群体的代表和统计综合负荷建模的基础,最大限度地描绘了行业用户的共性。聚类结果中典型用户的负荷组成也印证了这一观点。

2)两种方法的聚类结果是相近的,证明两种方法在行业典型用户的筛选中都是可行的。基于模糊 C 均值聚类比基于等价关系聚类具有明显的优势,它不仅可以得到合理聚类结果,而且可以综合得出聚类中心矩阵,从而清晰地看出该聚类的综合负荷特性参数。因此,在综合负荷静特性聚类分析时,基于模糊 C 均值聚类法具有明显的推广应用价值,而基于等价关系的模糊聚类则稍逊一筹。

3)在典型用户的模糊聚类中,根据不同的截集水平,可以分成不同的聚类。作者认为,在合理的截集水平(0.6~0.7)下,通常把聚类结果分为两类,所包含元素最多的类为精选得到的用户,因为该类反映本行业多数用户的共性。具体应用中,可根据实际情况调整截集水平,得到较合理的精选用户群。

4)统计综合法负荷建模,其基础是负荷特性的调查。本文在调查行业典型用户的特性时考虑了用电设备的运行方式,即单班制、两班制和三班制的运行情况。本文忽略了配电网结构和线路参数对建模结果的影响,在今后的建模工作中配电网对建模结果的影响因素应引起足够的重视。

5 结语

本文提出了基于统计综合法负荷特性调查的系统方法。对统计综合法负荷建模中典型行业用户的精选进行了分析研究,算例分析表明模糊聚类在统计综合法负荷建模中对典型用户筛选的可行性和有效性,并提出优先采用基于模糊 C 均值聚类方法的观点。实践表明,只要在合理的行业分类与切实可行的实施方案的基础上,调查数据是客观、准确的,该方法是合理、可行的。

参考文献

- [1] 鞠平,马大强.电力系统负荷建模.北京:水利电力出版社,1995.
JU Ping, MA Da-qiang. Load Modeling in Power System. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1995.
- [2] 李欣然.考虑负荷特性的电压稳定及其负荷建模研究:[博士学位论文].北京:华北电力大学,1998.
LI Xin-ran. The Studies of Voltage Stability Accounting for Load Characteristics and Its Power Load Modeling, Doctoral Dissertation. Beijing: North China Electric Power University, 1998.
- [3] TAYLOR C W. Power System Voltage Stability. Beijing: China Electric Power Press, 2001.
- [4] 张伶俐,周文,章健,等.面向综合的电力负荷动态特性建模.中国电机工程学报,1999,19(9):36—45.
ZHANG Ling-li, ZHOU Wen, ZHANG Jian et al. The Synthesis of Dynamic Load Characteristics. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(9): 36—45.
- [5] 贺仁睦,周文.电力系统负荷模型的分类与综合.电力系统自动

- 化, 1999, 23(19): 12—16.
- HE Ren-mu, ZHOU Wen. The Cluster and Synthesis of Electric Power Load Models. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(19): 12—16.
- [6] 张红斌, 贺仁睦. 基于 KOHONEN 神经网络的电力系统负荷特性聚类与综合. 中国电机工程学报, 2003, 23(5): 1—5.
- ZHANG Hong-bin, HE Ren-mu. The Characteristics Clustering and Synthesis of Electric Dynamic Loads Based on KOHONEN Neural Network. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(5): 1—5.
- [7] 石景海, 贺仁睦. 基于量测的负荷建模——分类算法. 中国电机工程学报, 2004, 24(2): 78—82.
- SHI Jing-hai, HE Ren-mu. Measurement-based Load Modeling-sorting Algorithm. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(2): 78—82.
- [8] 鞠平, 戴棋, 黄永皓, 等. 我国电力负荷建模工作的若干建议. 电力系统自动化, 2004, 28(16): 8—11.
- JU Ping, DAI Qi, HUANG Yong-hao et al. The Advices of Chinese Load Modeling. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(16): 8—11.
- [9] 贺仁睦. 电力系统精确仿真与负荷模型实用化. 电力系统自动化, 2004, 28(16): 4—7.
- HE Ren-mu. Electric Accurate Simulation and Load Model Practicality. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(16): 4—7.
- [10] 石景海, 贺仁睦. 动态负荷模型多曲线拟合参数辨识. 电力系统自动化, 2003, 27(21): 18—22.
- SHI Jing-hai, HE Ren-mu. Parameter Identification of Dynamic Load Model Using Multi-curve Fitting Method. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(21): 18—22.
- [11] 鞠平, 金艳, 吴峰, 等. 综合负荷特性的分类综合方法及其应用. 电力系统自动化, 2004, 28(1): 64—68.
- JU Ping, JIN Yan, WU Feng et al. Studies on Classification and Synthesis of Composite Dynamic Loads. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(1): 64—68.
- [12] 杨华春, 贺仁睦, 王鹏, 等. 基于聚合理论的大区电网负荷建模. 电力系统自动化, 2005, 29(1): 49—52.
- YANG Hua-chun, HE Ren-mu, WANG Peng et al. Load-modeling in Large-scale Grid Based on the Aggregation Theory. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(1): 49—52.
- [13] 黄梅, 贺仁睦, 杨少兵, 等. 东北电网负荷建模的分类与应用. 电力系统自动化, 2005, 29(4): 85—87.
- HUANG Mei, HE Ren-mu, YANG Shao-bing et al. Application of Load Model Classification in Northeast Power Network. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(4): 85—87.

李培强(1975—), 男, 博士研究生, 讲师, 主要从事电力系统负荷建模的研究. E-mail: lpqcs@hotmail.com

李欣然(1957—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统运行与控制的研究和教学工作。

唐外文(1968—), 男, 高级工程师, 主要从事电力系统运行管理和电压稳定的研究。

Consumer Choice for an Industry in Statistical Synthesis Method Based Load Modeling

LI Pei-qiang¹, LI Xin-ran¹, TANG Wai-wen², CHEN Hui-hua², LIU Yan-yang¹

(1. Hunan University, Changsha 410082, China)

(2. Hunan Electric Power Dispatching & Communication Center, Changsha 410077, China)

Abstract: The statistical synthesis method based load modeling approach should take the investigation data of the typical consumer's load characteristics as its foundation. By combining the load modeling practice, a set of systematic investigation methods is put forward, based on which two fuzzy clustering methods, the fuzzy equivalent relation clustering and the fuzzy C means clustering, are applied to analyze and process the investigation data obtained. As a result, typical consumers of the industry are chosen, thus providing a new effective way to study the synthesized load characteristics of various industries. Finally, an example of the choice of the textile industry consumers is given to prove the feasibility and validity of the method proposed.

This project is jointly supported by Foundation for University Key Teacher by the Education Ministry of China (No. [2002]65) and the Key Project of Education Department of Hunan Province (No. [2001]197).

Key words: statistical synthesis method; load static characteristics; load modeling; fuzzy clustering