

基于用电模式数的大用户负荷短期预测技术研究

栾开宁¹, 鲍敏², 易永仙², 赵双双²

(1. 国网江苏省电力有限公司, 江苏 南京 210024;

2. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

摘要:针对传统负荷预测方法适用性差问题,文中通过月均负荷率和负荷标准差与月均负荷率的比值对大用户进行划分,明确大用户的负荷特性分类。在此基础上,对分类用户的典型负荷曲线、波动曲线、连续负荷曲线进行分析,得出各类用户的用电模式数,再分别根据模式数制定针对性预测方法,提高可调度容量预测的精确度,为电力营销需求响应业务的快速发展提供技术支撑。

关键词:工业大用户;负荷预测;用电模式;需求响应

中图分类号: TM715

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2018)03-0033-05

0 引言

近年来,我国电力高峰负荷的持续增长以及间歇性能源的迅猛发展增加了电网调度运行的难度,对电网运行调节提出新的重大挑战^[1-3]。需求侧管理成为削峰填谷、平衡电网缺口的重要措施。而提高负荷容量预测的准确性对于激励用户参与需求侧管理及提高需求侧管理质量是非常必要的^[4]。

负荷预测主要分为居民用电,商业用电以及工业用电三大类^[5]。其中工业用户整体的电能消耗在电能总消耗中所占比例较大,存在巨大的节能潜力,是需求响应实施的良好对象。工业用户负荷曲线特性含有非常丰富的用电信息。同一行业的不同企业也会由于生产计划、用电设备以及公司的管理水平等不同导致负荷特性的差异^[6]。因此,只按照行业进行分类是粗糙且不严谨的。短期负荷预测方法有回归分析法、相似日法、小波分析法以及支持向量机(support vector machines, SVM)等方法^[7-8]。但由于用电负荷的复杂多样性,以上方法往往只对某一类负荷具有良好的效果,并不具有较强的广泛适用性^[9-12]。

由于传统负荷预测方法适用性差,故本文通过月均负荷率和负荷标准差与月均负荷率的比值划分大用户,明确其负荷特性分类^[13-15]。基于此,文中提出一种基于负荷决策预测树的用电模式数预测方法,根据不同类型的大用户制定针对性的预测方法,提高可调度容量的预测精确度,为电力营销需求响应业务的快速发展提供技术支撑。

收稿日期:2018-01-13;修回日期:2018-02-24

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFB0901102);

国家重点研发计划资助项目(2016YFB0901104)

1 工业用户负荷特性分析

选取华东某市50个大用户,对其进行分类,再深入负荷曲线分析、波动曲线分析以及连续负荷分析等得出其用电模式和规律,提高预测的准确性。文中选取时间段为2013年6月1日~28日。

1.1 负荷率分析及用户分类

文中通过月均负荷率和负荷标准差与月均负荷率的比值划分大用户,以月均负荷率0.4、0.6、0.8为界对50个大用户进行划分,可分为4类用户,再以“负荷率标准差/月均负荷率=0.1”为界,可进一步划分为7类大用户,分类结果见图1。可以看到,A、C、D、F 4类用户数较多,B、E、G 3类用户数较少。为便于分析,从上述各类用户中抽取典型代表,作进一步的分析,见表1。

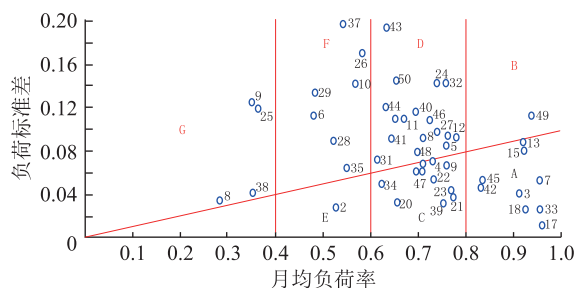


图1 50名用户分类

Fig.1 50 users classification

1.2 典型负荷曲线、波动曲线分析

根据上述的大用户分类,作出7类典型用户的负荷曲线(图2)以及波动曲线(图3)。图2反映了大用户一天内的负荷变化,由图可见A、B类大用户负荷的波动极小;C类大用户波动较大,但波动特性接近系统负荷,有早高峰和晚高峰现象;D、E、F、G 4类大用户负荷的波动较大,且波动特性各不相同。

表 1 各类别用户特性分析

Tab.1 Analysis of different kinds user characteristics

类别	数量	特征	典型用户代表名称
A	9	以纺织/高科技为代表	某纺织公司
B	1	电子科技为代表	某电子公司
C	11	以钢铁/材料/冶金为代表	某冶金公司
D	17	以水泥/钢铁/冶金为代表	某钢铁公司
E	1	船用板有限公司	某船用板公司
F	7	以水泥/机械制造为代表	某机械公司
G	4	以钢铁/机械制造为代表	某铸造公司

图 3 反映了用户负荷曲线在各个时段的波动性大小,值越大,对应大用户负荷在该时段上不同日之间的负荷差异越大。A、C、E 类用户的值较小且稳定,说明这 3 类大用户有较强的用电规律,利于预测。B 类呈现阶梯波动,除了突变点,其他时段都很稳定,也较利于预测。D、F、G 类大用户的波动值较高,说明用电模式较多,规律性差,难以准确预测。

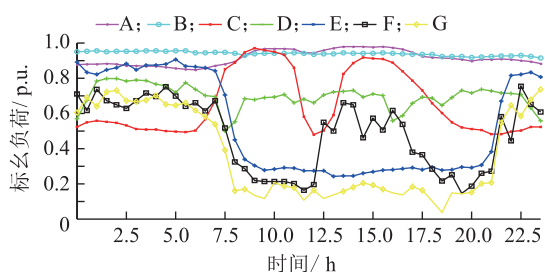


图 2 典型用户负荷曲线

Fig.2 Typical user load curve

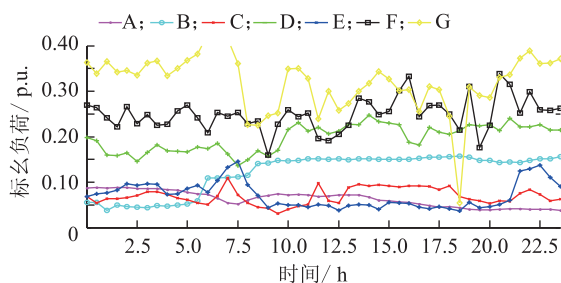


图 3 典型用户波动曲线

Fig.3 Typical user fluctuation curve

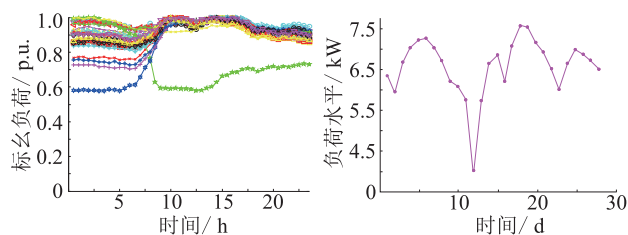
1.3 连续负荷曲线分析

分别对 7 种类别中的典型大用户进行 28 d 连续负荷曲线分析。分别以各类典型代表企业为例,由图 4 整体分析可知,A、B、C、E 类呈现重复用电模式,说明用电模式比较固定,可预测性高。D、F、G 类负荷波动都十分剧烈,不存在显著的重复性模式,预测难度比较大。从图 4 的细节分析可知:

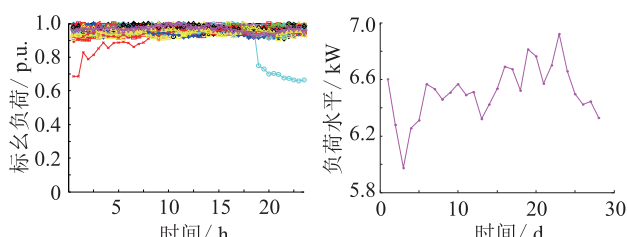
(1) A 类重叠负荷曲线呈现重复式的用电模式,用电模式为 4 种(忽略只出现一次的异常模式),在时段 20(早上 10 点)前有较小的波动差异。

因此,对此用户采用基于用电模式的预测方法。

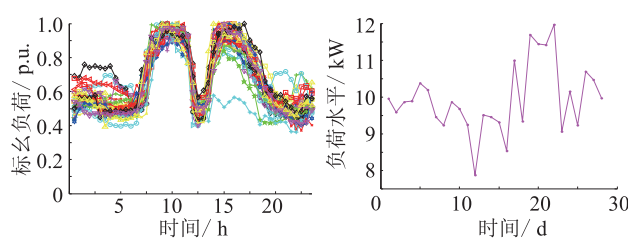
(2) B 类典型大用户整体呈现整天负荷率比较高的单一用电模式(忽略只出现一次的异常模式),即使是低谷负荷标么值也在 0.9 之上。结合 B 类连续负荷曲线不难发现,B 类典型用户负荷水平在 6.2~6.8 kW 之间波动,波动差小于 10%。这种模式对负



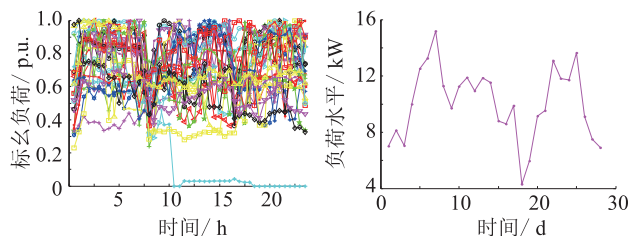
(a) A类用户



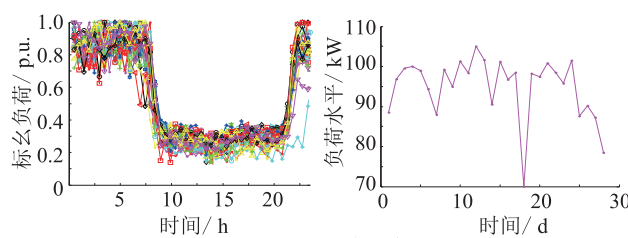
(b) B类用户



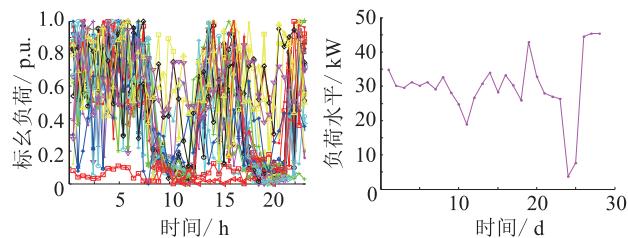
(c) C类用户



(d) D类用户



(e) E类用户



(f) F类用户

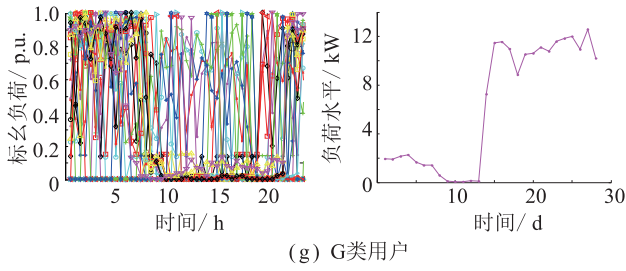


图4 7种类型的负荷曲线
(左边:重叠绘制;右边:连续绘制)

Fig.4 7 types of load curves
(left: overlap drawing; right: continuous drawing)

荷预测工作是十分有利的。

(3) C类用电模式整体上为单一的双峰双谷用电模式(早高峰+下午高峰,中午低谷+晚低谷)。结合C类连续负荷曲线,发现其负荷波动区间为7.8~12.0 kW左右,负荷水平变化较大,但从单日来看规律性较强,总体而言具有一定的用电规律。

(4) D、F、G类负荷波动都十分剧烈,用电模式(大于7种)不存在显著的重复性模式,变化错综复杂,预测难度比较大,此类用户与最近日的负荷有着较强的相关性,因此可以采用最近日负荷预测法^[9]。用户负荷特性差异如此之大,一是因为用户所属行业千差万别,二是即使属于同一行业,不同用户所属行业上下游差异、生产计划的差异都会导致负荷特性不尽相同^[10]。

2 需求侧资源可调度容量预测方法

通过大用户负荷的特性分析,为了进一步提高大用户短期负荷预测的准确度,文中提出基于决策树的个性化用户负荷预测思路。通过上述分析提取典型用电模式,根据模式数多少选择预测方法。如对于用电模式单一的情况,可以采用聚类还原法;对于用电模式适中(2~6种)的情况,采用基于用电模式挖掘的用户侧短期负荷预测法;对于模式较多(大于7种)的情况,采用最近日负荷预测法。对于用电模式变化较大的D、F、G类钢铁等行业大用户负荷,由于其负荷呈现锯齿形波动特征,采用小波包分解法^[12],先通过频域处理将锯齿形波动分量剔除,再基于剩余的稳定分量进行预测。

方案一:聚类预测还原法。适用于用电模式单一的大用户,将这一类型的所有用户聚类形成聚类负荷,其中每个用户占整个聚类负荷的配比因子也较为稳定。通过预测出整个聚类负荷再乘以配比因子即可快速预测得到每个用户负荷。算法步骤如下:

将所有用电模式数为1的大用户加总形成聚类负荷;基于聚类负荷,采用对照方案二的方法进行预测;维护“聚类负荷——用户负荷”配比模型,根据聚类负荷预测结果,得到每个用户负荷的预测值^[15]。配比因子可通过平滑近日配比因子得到。对于系统短期负荷而言,其负荷预测评价指标一般采用绝对百分比误差(mean absolute percent error, MAPE)值,以日负荷曲线 y_t 为例,其MAPE指标值计算公式如下:

$$d_{\text{MAPE}} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \left| \frac{\bar{y}_t - y_t}{y_t} \right| \quad (1)$$

MAPE指标具有相对误差的性质,有效避免了负荷水平对预测结果评价的影响。但当负荷水平较低甚至为0时,预测精度指标发散,此时MAPE指标数值巨大,不具有可比性,难以据其判断预测结果的好坏。因此,MAPE指标难以应用在负荷水平较低的用户负荷上。

大用户都拥有自己的报装容量,报装容量一般是固定的,但也会随着用户安装新的电气设备而增加。可以采用报装容量值 Y 代替 d_{MAPE} 中分母 y_t ,从而避免精度指标发散的情况。这样设计的精度指标称为客户的绝对百分比误差(customer mean absolute percent error, CMAPE),表达式如下:

$$d_{\text{CMAPE}} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \left| \frac{\bar{y}_t - y_t}{Y} \right| \quad (2)$$

式中:CMAPE值为预测误差占用户报装容量的平均比例,CMAPE值越大,平均预测误差越大。用1减去CMAPE值,即为用户负荷预测的百分比精度。

方案二:基于用电模式挖掘的大用户短期负荷预测法。适用于模式适中的大用户,通过统计其历史用电模式出现顺序,采用统计决策方法得到其模式的状态转移矩阵,依据此矩阵决策出待预测日用户的用电模式,再对历史日中同一模式的负荷曲线进行指数平滑,得到待预测日负荷。算法步骤如下:

采用聚类分析法(无监督聚类)对历史负荷进行聚类,生成典型用电模式集合 $A = \{1, 2, \dots, i, \dots, N\}$,并得到每一个历史日的生产模式。

根据用户历史日生产模式的辨识结果,生成状态转移矩阵 M ,该矩阵记录了基准日用电模式固定为 i 的条件下,待预测日用电模式服从各典型生产模式 $j(j=1, 2, \dots, N)$ 的概率 M_{ij} 。依据基准日 u_0 生产模式 i 和这一矩阵,决策出转移概率最大的生产模式 $M_{ik} = \max(M_{i1}, M_{i2}, \dots, M_{iN})$,即待预测日 r_0 最有可能出现的生产模式。

从历史日中筛选出用电模式为 k 的历史日 r_1 ,

r_2, \dots, r_n , 其下标越小, 表示离待预测日 r_0 越近, r_1 最近, r_n 最远。按照历史日负荷与待预测日 r_0 的远近取指数平滑权重, 离待预测日越近, 权重越大。权重 w_l 如下:

$$w_l = \alpha(1 - \alpha)^{l-1} \quad l = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

将历史日 r_l 负荷曲线按 w_l 加权求和, 得到待预测日负荷曲线 P_{r_0} , 其中 P_{r_l} 为历史 r_l 负荷曲线。

$$P_{r_0} = \sum_{l=1}^n W_l P_{r_l} \quad (4)$$

方案三: 最近日负荷预测法。适用于用电模式较多的用户, 最近日负荷对其未来负荷的影响较大, 因此可直接采用最近日负荷作为预测结果^[16]。

3 某省级电网算例分析

为了考察用电模式挖掘预测法的性能, 将其与最近日预测法、最近三日预测法、向量机 (support vector machine, SVM) 预测法进行对比分析^[17]。对本文选取的 50 个大用户的数据进行分析, 可以看到, 对于大多数大用户负荷, 采用模式挖掘预测法的精度是最高的, 尤其对于其中一部分用户, 例如用户 35~38, 预测精度有显著提升。

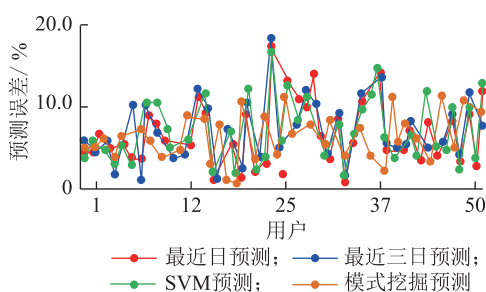


图5 用户短期负荷预测误差

Fig.5 Users short-term load forecasting error

对每个用户, 对 4 种方法的预测精度进行排序, 找到各自最优的预测方法。统计每种预测方法为最优预测的比例, 如表 2 所示, 不难发现, 模式预测法的占比高达 52.00%。同时统计 4 种方法的平均精度, 由表 2 可见, 模式数预测法的精度高达 93.51%, 比其他方法平均提高了 0.49%。结果表明模式挖掘预测法的效果是最好的。

表 2 4 种预测模式对比

Tab.2 Comparison of four forecasting models %

方法	最佳预测占比	平均预测精度 (1-d _{CMAPE})
最近日预测	10.00	93.01
最近三日预测	20.00	93.14
SVM 预测	18.00	92.91
模式预测	52.00	93.51

4 结语

文中通过对 7 种典型的大用户负荷分析, 可以得出以下结论: (1) 不同大用户的负荷特性个性不一, 差异十分之大, 部分呈现规律的用电模式, 部分用户负荷呈现出与越近历史负荷日的相关性越强, 并无明显的周期。(2) 针对不同的大用户类型, 文中采用基于用电模式数的预测方法, 对于用电模式单一的情况采用聚类还原法; 对于用电模式适中 (2~6 种) 的情况, 采用基于用电模式挖掘的用户侧短期负荷预测法; 对于模式较多 (大于 7 种) 的情况, 采用最近日负荷预测法。(3) 对比模式数预测方法与最近日预测法、最近三日预测法、SVM 预测法可知, 模式数预测法的精度高达 93.51%, 比其他方法平均提高 0.49%。事实证明模式数预测法可有效提高负荷预测的准确性。

参考文献:

[1] 王珂, 姚建国, 姚良忠, 等. 电力柔性负荷调度研究综述 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38(20): 127-135.
WANG Ke, YAO Jianguo, YAO Liangzhong, et al. Survey of research on flexible loads scheduling technologies [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(20): 127-135.

[2] 牛东晓, 陈志强. 电力市场下的需求响应研究 [J]. 华东电力, 2008(9): 5-9.
NIU Dongxiao, CHEN Zhiqiang. Demand response in electricity markets [J]. East China Electric Power, 2008(9): 5-9.

[3] 马燕军, 陈嘉曦, 华亮亮, 等. 电力需求侧的超短期负荷预测分析 [J]. 机电信息, 2015(21): 122-123, 125.
MA Yanjun, CHEN Jiayi, HUA Liangliang, et al. Study on short-term forecasting of power demand-side [J]. Mechanical and Electrical Information, 2015(21): 122-123, 125.

[4] 马朝, 王莹, 史雷. 基于组合模型的制造业用电量预测 [J]. 管理观察, 2017(9): 34-36.
MA Chao, WANG Ying, SHI lei. Prediction of electricity consumption in manufacturing industry based on combination model [J]. Management Observer, 2017(9): 34-36.

[5] 包哲静. 支持向量机在智能建模和模型预测控制中的应用 [D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
BAO Zhejing. Applications of support vector machine in intelligent modeling and model predictive control [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.

[6] 张素香, 赵丙镇, 王风雨, 等. 海量数据下的电力负荷短期预测 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(1): 37-42.
ZHANG Suxiang, ZHAO Bingzhen, WANG Fengyu, et al. Short-term power load forecasting based on big data [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(1): 37-42.

[7] 张钦, 王锡凡, 王建学, 等. 电力市场下需求响应研究综述 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32(3): 97-106.
ZHANG Qin, WANG Xifan, WANG Jianxue, et al. Survey of

- demand response research in deregulated electricity markets [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(3): 97-106.
- [8] 陈明照,毛坚,杜宗林,等. 基于聚类法的工业用户需求侧管理(DSM)方案分析与研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(7): 84-89.
CHEN Mingzhao, MAO Jian, DU Zonglin, et al. Analysis on demand side management scheme of industrial enterprise based on clustering method[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(7): 84-89.
- [9] 孙海斌,李扬,卢毅,等. 电力系统短期负荷预测方法综述[J]. 江苏电机工程, 2000(2): 9-13, 17.
Sun Haibin, Li Yang, Lu Yi, et al. Synthesis of the short-term load forecast method of power system[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2000(2): 9-13, 17.
- [10] 王德文,孙志伟. 电力用户侧大数据分析并行负荷预测[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(3): 527-537.
WANG Dewen, SUN Zhiwei. Big data analysis and parallel load forecasting of electric power user side[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(3): 527-537.
- [11] 曾鸣,李娜,王涛,等. 兼容需求侧资源的负荷预测新方法[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(10): 59-62, 73.
ZENG Ming, LI Na, WANG Tao, et al. Load forecasting compatible with demand-side resources[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(10): 59-62, 73.
- [12] 程建东,杜积贵. 组合预测方法在电力负荷预测中的应用[J]. 江苏电机工程, 2011, 30(6): 38-40, 44.
Cheng Jiandong, Du Jigui. Application of combined method in power load forecasting[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2011, 30(6): 38-40, 44.
- [13] 沈沉,秦建,盛万兴,等. 基于小波聚类的配变短期负荷预测方法研究[J]. 电网技术, 2016, 40(2): 521-526.
SHEN Chen, QIN Jian, SHENG Wanxing, et al. Study on short-term forecasting of distribution transformer load using wavelet and clustering method[J]. Power System Technology, 2016, 40(2): 521-526.
- [14] 林启开,王珂,余坤,等. 峰谷电价下居民用电聚合响应特性分析[J]. 电力工程技术, 2017, 36(3): 88-93.
Lin Qikai, Wang Ke, Yu Kun, et al. Analysis on the polymeric response characteristics of residents under the peak and valley electricity price[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(3): 88-93.
- [15] 宗柳,李扬,王蓓蓓. 计及需求响应的多维度用电特征精细挖掘[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(20): 54-58.
ZONG Liu, LI Yang, WANG Beibei. Fine-mining of multi-dimension electrical characteristics considering demand response[J]. Automation of electric power system, 2012, 36(20): 54-58.
- [16] 陶小马,周雯. 电力需求响应的研究进展及文献述评[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2014, 16(1): 32-40.
TAO Xiaoma, ZHOU Wen. A review of the research on electricity demand response[J]. Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition), 2014, 16(1): 32-40.
- [17] 马小慧,阳育德,龚利武. 基于Kohonen聚类和SVM组合算法的电网日最大负荷预测[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(2): 7-11.
MA Xiaohui, YANG Yude, GONG Liwu. Forecasting of the daily maximum load based on a combined model of Kohonen clustering and SVM[J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(2): 7-11.

作者简介:



栾开宁

栾开宁(1973—),男,博士,高级工程师,从事电力负荷预测与调控、智能用电等工作(E-mail: luankn@js.sgcc.com.cn);

鲍敏(1990—),女,硕士,从事需求侧管理,电力负荷柔性调控等工作;

易永仙(1988—),男,硕士,工程师,从事需求响应,负荷预测等工作。

Study on Short-term Forecasting of Large Users Load based on Power Consumption Model Numbers

LUAN Kaining¹, BAO Min², YI Yongxian², ZHAO Shuangshuang²

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210024, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: In view of the poor applicability of the traditional load forecasting methods, this paper divides the large users by two parameters, namely monthly load rate and the ratio of load standard deviation to monthly load rate, in order to clear the classification of load characteristics of large consumers. On this basis, the typical load curve, fluctuation curve and continuous load curve of the classified users are analyzed to obtain the power mode numbers. Then, the paper formulates the targeted prediction methods according to model numbers to improve the accuracy of the prediction of schedulability capacity and to provide technical support for the rapid development of power market demand response business.

Key words: industrial large users; load forecasting; power consumption model; demand response

(编辑 方晶)