

短期负荷预测中考虑积温效应的 温度修正模型研究

高赐威¹ 李倩玉¹ 苏卫华² 李 扬¹

(1. 东南大学江苏省智能电网技术与装备重点实验室 南京 210096

2. 上海市电力公司松江供电公司 上海 201600)

摘要 由于夏季负荷受温度因素影响较大,持续高温天气会造成积温效应,导致负荷出现一定程度的非常规增长,传统的短期负荷预测方法难以满足实际需求。因此,为了反映积温效应的影响程度,本文提出了温度修正模型,通过拟合温升曲线、求解负荷温度弹性系数来确定高温日的界限温度,同时给出了利用相关系数求解最大累计天数和累积效应系数的方法。算例分析表明,所提出的方法能够准确地反映积温效应的影响,提高短期负荷预测的精度。

关键词 :短期负荷预测 积温效应 负荷温度弹性系数 最大累积天数 累积效应系数 相关系数

中图分类号: TM714

Temperature Correction Model Research Considering Temperature Cumulative Effect in Short-Term Load Forecasting

Gao Ciwei¹ Li Qianyu¹ Su Weihua² Li Yang¹

(1. Jiangsu Provincial Key Laboratory of Smart Grid Technology & Equipment

Southeast University Nanjing 210096 China

2. Songjiang Power Supply Company, SMEPC Shanghai 201600 China)

Abstract Because of the significant impact of temperature factors on load in summer, sustained hot weather will cause the temperature cumulative effect, resulting in a certain degree of abnormal growth of load. The traditional short-term load forecasting method is difficult to meet the actual demand. Therefore, temperature modifying formula is proposed in order to reflect the influence of temperature cumulative effect. Through fitting temperature-load curve and solving load temperature elastic coefficient, the limit temperature of scorching weather day is determined. Meanwhile, a new method is proposed to solve maximum cumulative days and cumulative effect coefficient using correlation coefficient. It is proved by a case study that the method proposed can accurately reflect the impact of the temperature cumulative effect and improve the accuracy of short-term load forecasting.

Keywords : Short-term load forecasting, temperature cumulative effect, load temperature elastic coefficient, maximum cumulative days, cumulative effect coefficient, correlation coefficient

1 引言

短期负荷预测是针对未来一天到数天各时段负荷预测的研究^[1,2],主要影响因素有地区经济发展水

平、能源供应方式、电价水平、气候因素、需求侧管理政策等^[3],负荷预测精度的提高有利于提升能源利用效率、保证电网安全运行。随着经济发展水平的提高,电力终端设备中的温度敏感性负荷比重也逐年增长,夏季负荷受温度因素影响很大。短期负荷预测中考虑温度因素的研究很多,也有关于夏季持续高温所造成的积温效应对短期负荷预测影响

国家自然科学基金(51277028)和上海市电力公司科技(SGSHSJ-002SJS1302046)资助项目。

收稿日期 2013-03-07 改稿日期 2013-07-13

的研究,分别采取了不同的方法。

文献[4]提出了有效积温的概念,凡是大于界限温度的日平均气温值分别减去界限温度的差值总和,即为有效积温,采用五日滑动平均法计算。文献[5,6]分别提出了考虑累积效应的温度修正公式,对待预测日气温进行修正,用离散的累积效应系数反映积温效应的强弱,但是界限温度通过经验给出。文献[7]提出了日内积温效应和多日积温效应,对气象敏感性负荷的影响分为两部分进行修正,比较完善,但没有给出累积效应系数的求解方法。文献[8]构建了温度热累积效应——负荷模型,并运用分析结果对夏季持续高温期的负荷预测结果进行修正。文献[9]提出了累积天数辨识的方法,不断试探不同的累计天数,将训练和拟合最好的情形作为最佳的累计天数辨识结果。文献[10]考虑持续高温天气和日最高气温的积温效应,采用曲线拟合的方法得到积温系数的量化公式,并将积温系数作为负荷预测模型的输入变量。

以往的研究文献中给出了积温效应的量化公式,但对于部分系数的选取没有给出明确的方法,存在一定的缺陷。特别地,对于界限温度和最大累积天数的选取大多根据实际经验,没有给出具有说服力的理论依据;对于累积效应系数的求解方法不够全面,不能够充分反映积温效应的强度。

基于上述考虑,本文分析了积温效应的具体表现形式,构建了考虑积温效应的温度修正模型,重点研究界限温度、最大累积天数和累积效应系数的确定方法。本文提出了通过温升曲线和负荷温度弹性系数确定高温日的界限温度,并给出了利用相关系数求解最大累计天数和累积效应系数的方法。最后,通过算例分析,证明了修正后的温度与负荷具有更强的相关性,所提出的方法能够提高负荷预测的精度。

2 短期负荷预测中的积温效应

积温效应定义为:连续多日的高温或低温天气导致日最大负荷出现一定程度的反常增长,即在同等温度水平下,温度没有明显的升高或降低,但日最高负荷仍然大于某一高温或低温天气的日最大负荷^[4,5]。积温效应的产生是由于人体感官对于温度变化有一个适应的过程^[5],累积效应直接影响人体的舒适程度,从而间接影响着温度敏感性负荷的使用情况^[11]。短期负荷预测中,夏季持续高温天气会导致负荷非常规增长^[6],运用传统负荷预测的方法

难以达到预测精度要求,因此,研究积温效应对负荷的影响是短期负荷预测中一个重要的部分。

通过相关系数的分析可知,夏季最高温度和最高负荷之间的相关程度最高^[5,12],华东某研究地区2012年8月份最高负荷和最高温度的变化曲线,如图1所示。

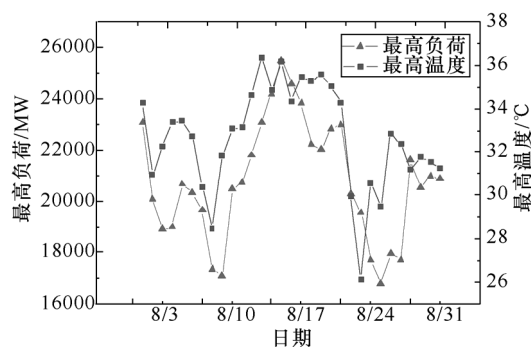


图1 研究地区2012年8月最高负荷与最高温度的变化曲线

Fig.1 The highest load and maximum temperature change curve of study area in August 2011

通过分析夏季最高负荷和最高温度曲线可以看出,两者具有相同的变化趋势,其曲线形状也较为相似,温度对于最高负荷的影响具有突出的规律,当温度升高时,将有大量降温负荷投入运行,导致负荷升高。特别地,8月12~15日是持续高温天气,最高负荷持续增长,即使14日温度有小幅下降,负荷仍为增长趋势,这就是积温效应的体现。

3 考虑积温效应的温度修正模型

由于热存储效应的存在^[11],积温效应将导致负荷非常规增长,负荷预测不仅要考虑待预测日的温度,还要考虑预测日前几日的积温效应的影响。本文提出了考虑积温效应的影响,对待预测日的温度进行修正,利用修正后的温度进行常规的负荷预测。

3.1 待预测日温度修正模型

为了量化积温效应的影响,改进文献[5,6]中的温度修正公式,全面考虑界限温度、最大累积天数以及累积效应系数等因素,建立考虑积温效应的温度修正模型,对第*i*天的最高温度进行修正

$$T'_i = T_i + \sum_{j=1}^p k_{ij} (T_{i-j} - T_{\min}) \quad (1)$$

式中, T_i 为待预测日*i*的最高温度; $T_i - T_{\min}$; T_{i-j} 为待预测日前第*j*天的最高温度; T_{\min} 为高温日的

界限温度； $k_{ij} \in [0,1]$ 为累积效应系数，且根据“近大远小”^[13]的原则满足条件 $k_{i1} > k_{i2} > \dots > k_{ip}$ ； $p = \min(n, d_{\max})$ ，第 i 天前 n 天的日最高温度连续高于界限温度， d_{\max} 为最大累积天数。

修正模型中的三个参数：界限温度 T_{\min} 、最大累积天数 d_{\max} 和累积效应系数 k_{ij} 是彼此相关的，界限温度和最大累积天数均为独立求解，而累积效应系数的求解结果与界限温度和最大累积天数的取值相关，因此求解参数时要按照先后顺序求解。在对预测年的最高温度进行修正时，所用的数据为前一年的温度、负荷数据。三个参数的求解方法和求解顺序详见以下分析。

3.2 界限温度的确定

高温日是指最高温度高于某一界限温度的天气情况^[6]，以往文献中确定高温日的界限温度是根据统计规律或研究经验给出的，并没有给出明确的理论依据。本文定义界限温度为负荷受温度影响最大，负荷对于温度变化的敏感程度最大的温度点；并提出一种通过温升曲线和负荷弹性系数来确定界限温度的方法。

3.2.1 温升曲线

夏季最高负荷与温度之间也存在着一定的关系，定义为温升曲线，表示为 $L=f(T)$ ，可以通过历史数据拟合出温升曲线的函数表达式。

拟合函数的选取方法：首先利用历史数据在直角坐标系中画出最高负荷和最高温度的散点图，再根据曲线的形状选择用于拟合的函数，如不同次数的多项式函数、指数函数、对数函数等，可利用最小二乘法求出拟合系数，从而得到温升曲线的函数表达式。

3.2.2 负荷温度弹性系数

温升曲线中每一点负荷随温度变化的趋势与幅度不同，因此，可以根据 $L=f(T)$ 分析最高负荷对最高温度的敏感程度。参照负荷价格弹性系数^[14-17]的定义，本文定义的负荷温度弹性系数指最高温度变动所引起的最高负荷变动，其公式为

$$e(T_i) = \frac{\partial L}{\partial T} \bigg|_{T=T_i} \quad (2)$$

3.2.3 界限温度求解

负荷温度弹性系数可以衡量负荷对于温度变化的反应程度，弹性越大则负荷对于温度的变动越敏感。求负荷温度弹性系数的极大值，对应极值点的温度即为界限温度，计算公式为

$$\max e(T_{\min}) = \frac{\partial L}{\partial T} \bigg|_{T=T_{\min}} \quad (3)$$

3.3 最大累积天数的确定

高温持续天数对累积效应的强度也有一定的影响^[5]，因此，温度修正模型中累积天数的选取也会影响负荷预测的准确程度。考虑的累积天数过多，则累积效应的强度对于高温持续天数不再敏感；考虑的累积天数过少，则不足够反映累积效应的强度。

电力系统负荷预测的研究通常与相关因素的分析相配合，选取与待测量相关系数更高的影响因素^[18]、挖掘主要相关因素有助于提高负荷预测的精度^[5,13]。因此，本文采用相关系数，描述温度与负荷的线性相关程度，计算公式为^[12,19]

$$R = \frac{\text{cov}(T, L)}{\sqrt{D(T)}\sqrt{D(L)}} = \frac{\sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})(L_i - \bar{L})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (L_i - \bar{L})^2}} \quad (4)$$

式中， R 为相关系数； T 、 L 分别为最高温度向量和最高负荷向量； $\text{cov}(T, L)$ 为 T 和 L 的协方差； $\sqrt{D(T)}$ 、 $\sqrt{D(L)}$ 分别为 T 和 L 的方均差； $\bar{T} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i$ ， $\bar{L} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L_i$ 。

本文采用试探的方法，计算考虑不同累积天数时最高负荷与最高温度的相关程度，求取使相关程度最高的最大累积天数 d_{\max} 。选取某年夏季 7 月份或 8 月份为样本，将相邻 $d_{\max}+1$ 天的最高负荷和最高温度数据作为一组，共有 $(31-d_{\max})$ 组数据，分别计算每组最高负荷和最高温度的相关系数，并求 $(31-d_{\max})$ 个相关系数的平均值，平均值最大的 d_{\max} 确定为最大累积天数，计算公式为

$$\max_{d_{\max}} \text{ave}_- R = \frac{1}{31-d_{\max}} \times \sum_{i=1}^{31-d_{\max}} \frac{\sum_{j=0}^{d_{\max}} (T_{i+j} - \bar{T})(L_{i+j} - \bar{L})}{\sqrt{\sum_{j=0}^{d_{\max}} (T_{i+j} - \bar{T})^2} \sqrt{\sum_{j=0}^{d_{\max}} (L_{i+j} - \bar{L})^2}} \quad (5)$$

式中， T_{i+j} 为第 $i+j$ 天的最高温度； L_{i+j} 为第 $i+j$ 天的最高负荷。

3.4 累积效应系数的求解方法

对待预测日最高温度进行修正的目的是提高修正后的最高温度对负荷预测精度的影响程度，即提

高其与最高负荷实际值的线性相关性,使得修正后的温度更能反应温度对实际负荷的影响情况,满足负荷预测的精度要求。

待预测日最高温度不同,积温效应的影响程度不同,即 k_{ij} 与待预测日最高温度 T_i 有关;日前各天的温度对待预测日的影响也不同,因此本文采用离散化^[5]的累积效应系数序列。最高温度小于界限温度时,负荷随温度常规变化,不考虑积温效应;最高温度超过 T_{\max} 时,无论前几日温度如何,降温负荷基本处于饱和状态,也不考虑积温效应。

选取样本数据:可采用历史年 5~9 月份工作日的最高温度和最高负荷数据(实际预测中可进行滚动修正),筛选出日最高温度大于界限温度的数据,通过分析求解不同温度下的累积效应系数,具体步骤如下:

(1) 对 k 进行离散化处理,结果如下表所示。修正温度时,根据待预测日的原始最高温度所处的温度区间选择对应的累积效应系数序列。表 1 中 $p=\min(n, d_{\max})$, 即所需考虑的累积天数取决于最大累积天数的取值 d_{\max} 和实际连续高温天数 n 。

表 1 累积效应系数 k 的离散化

Tab.1 Discretization of cumulative effect coefficient k				
$T_i/$	k_{i1}	k_{i2}	...	k_{ip}
$< T_{\min}$	0	0	0	0
$[T_{\min}, T_{\min}+1)$	k_{11}	k_{12}		k_{1p}
$[T_{\min}+1, T_{\min}+2)$	k_{21}	k_{22}		k_{2p}
$[T_{\min}+2, T_{\min}+3)$	k_{31}	k_{32}	...	k_{3p}
$[T_{\min}+3, T_{\min}+4)$	k_{41}	k_{42}		k_{4p}
...
T_{\max}	0	0	0	0

(2) 按照上表中的温度区间分类整理历史数据,包括待预测日最高温度及对应的最高负荷、待预测日前 $p=\min(n, d_{\max})$ 天的最高温度数据。整理历史数据时可能会出现部分温度区间数据缺失或者数据较少的情况,例如没有最高温度在 $[37, 38)$ 区间内的天数,无法计算该区间的累积效应系数。这种情况下,可以调用前几年的最高温度和最高负荷数据,但考虑到负荷增长的自然规律,需要对最高负荷数据进行归一化处理。

(3) 运用式(1)对待测日的最高温度 T_i 进行修正,修正所用的累积效应系数为表 1 中待预测日最高温度对应的值,修正后的最高温度向量为 T'_i , 对应的最高负荷向量为 L_i , 其中 T'_i 为 k_{ij} 的函数。为

了使修正后的温度与最高负荷之间有更强的相关性, k_{ij} 的求解公式为

$$\max_{i,j=1,2,\dots,p} R = \frac{\text{cov}(T'_i, L_i)}{\sqrt{D(T'_i)}\sqrt{D(L_i)}} = f(k_{ij}) \quad (6)$$

$$\text{s.t. } 0 \leq k_{ij} \leq 1 \quad (7)$$

$$k_{i1} > k_{i2} > \dots > k_{ip} \quad (8)$$

通过上述方法,可以求得离散累积效应系数序列的值,每个值仅适用于对相应温度区间的待预测日最高温度进行修正。

4 算例分析

将本文提出的考虑积温效应的温度修正模型应用于华东某地区。分析该地区的最高负荷和最高温度之间的关系可知,节假日的负荷变化存在一定特殊性,因此算例只考虑工作日的负荷;另外,由于采取有序用电措施而削减的负荷为正常用电需求,反映最高负荷随温度变化的真实情况,故在分析时采用不考虑有序用电措施的最高负荷数据。研究地区 2011 年 5~9 月份的温度、负荷数据作为修正模型参数辨识的样本数据;2012 年 7、8 月份工作日的温度、负荷数据作为修正模型的测试数据。2012 年 7、8 月份工作日最高负荷曲线和修正前的最高温度曲线如图 2 所示。

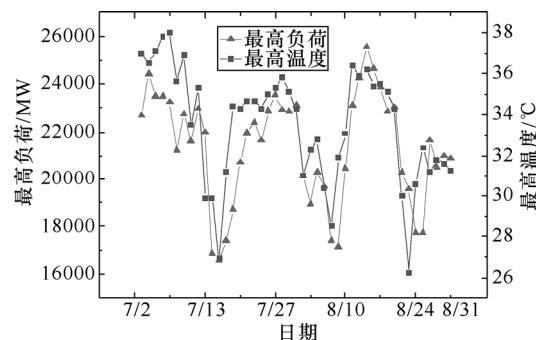


图 2 研究地区 2012 年 7、8 月份最高负荷和最高温度曲线
Fig.2 The highest load and maximum temperature curve of study area in July and August 2012

根据相关性分析可知,最高负荷和最高温度之间的相关系数为 0.771 2,由于积温效应的影响,修正前的最高温度用于短期负荷预测中无法准确反映温度对于负荷变化的影响。利用温度修正模型对最高温度进行修正,步骤如下:

4.1 界限温度的确定

对该地区的历史数据进行分析,最高负荷和最

高温度的关系如图 3 所示。

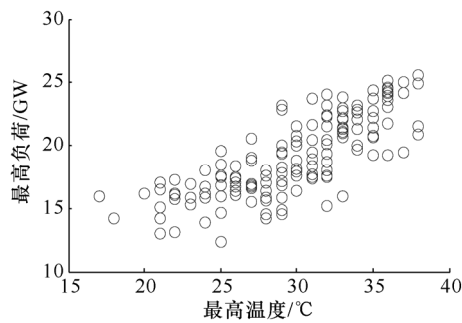


图 3 研究地区 2011 年 5 ~ 9 月份最高负荷和最高温度散点图

Fig.3 The highest load and maximum temperature scatter diagram of study area from May to September 2011

利用最小二乘法对图 3 中的样本数据进行拟合, 比较不同次数多项式的拟合结果见表 2。一般次数较高时, 该曲线的表达能力更强。当次数大于 3 时, 界限温度的取值趋向一个稳定值, 改变次数对界限温度的求取结果影响很小, 本文采用 7 次多项式进行拟合, 如图 4 所示。

表 2 各次多项式的拟合结果

Tab.2 Fitting results of polynomials

多项式次数	2 次	3 次	4 次	5 次	6 次	7 次
界限温度/	无法获得	33	32	33	33	33

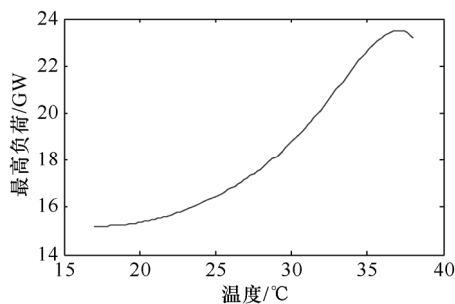


图 4 最高负荷和最高温度的拟合曲线

Fig.4 The highest load and maximum temperature fitting curve

拟合得到的温升曲线函数公式为

$$L = -2.85 \times 10^{-5} T^7 + 0.004 T^6 - 0.232 T^5 + 6.803 T^4 - 104.06 T^3 + 697.28 T^2 \quad (9)$$

求解负荷温度弹性系数公式, 将式 (9) 代入式 (2) 得

$$e(T) = -1.995 \times 10^{-4} T^6 + 0.024 T^5 - 1.16 T^4 + 27.212 T^3 - 312.18 T^2 + 1394.56 T \quad (10)$$

可以求得, 负荷温度弹性系数的最大值为 837.639 9, 其对应的温度为 33.38, 则确定 33 为界限温度。

4.2 最大累积天数的确定

根据研究地区的历史数据求解最大累计天数, d_{\max} 取不同值时平均相关系数见表 3。

表 3 最大累积天数求解

Tab.3 Solution of maximum cumulative days

最大累积天数	2	3	4	5	6
平均相关系数	0.742 2	0.654 1	0.610 6	0.524 9	0.531 2

由表 2 可知, 最大累计天数确定为 2, 最能反映最高负荷与最高温度的线性相关程度。

4.3 累积效应系数的求解

通过对该研究地区的温度和负荷据进行整理和分析, 运用求解式 (6) ~ 式 (8) 可以求得不同待预测日温度区间对应的累积效应系数序列见表 4。

表 4 累积效应系数

Tab.4 Cumulative effect coefficient

$T_0/$	k_{i1}	k_{i2}
< 33	0	0
[33, 34)	0.72	0.26
[34, 35)	0.92	0.41
[35, 36)	1	0.77
[36, 37)	0.97	0.64
[37, 38)	0.27	0
38	0	0

由上表可以看出, 积温效应的影响符合一定的变化规律, 35 时其强度最大, 变化趋势是先大再小。另外, 最高温度最大值 T_{\max} 为 38, 此时累积效应系数均为 0, 降温负荷基本饱和, 不存在累积效应的影响。

4.4 温度修正

根据温度修正式 (1) 对研究地区 2012 年夏季 7、8 月份高温日 (工作日) 进行修正, 修正结果见表 5。

表 5 研究地区温度修正结果

Tab.5 Modified temperature of study area

日期	最高负荷/MW	最高温度/度/	修正温度/度/	日期	最高负荷/MW	最高温度/度/	修正温度/度/
7/2	22 694	37	37.864	8/1	23 116	34.3	37.38
7/3	24 427	36.5	40.508	8/2	20 111	31	31
7/4	23 473	37.1	38.045	8/3	18 936	32.3	32.3
7/5	23 496	37.8	38.907	8/6	20 331	32.8	32.8

(续)							
日期	最高负 荷/MW	最高温 度/	修正温 度/	日期	最高负 荷/MW	最高温 度/	修正温 度/
7/6	23 240	38	38	8/7	19 673	30.4	30.4
7/9	21 262	35.6	36.054	8/8	17 384	28.5	28.5
7/10	22 743	36.9	39.55	8/9	17 144	31.9	31.9
7/11	21 627	33.5	36.984	8/10	20 488	33.1	33.1
7/12	22 970	35.3	38.803	8/13	23 098	36.4	40.419
7/13	21 977	29.9	29.9	8/14	24 236	35.9	40.763
7/16	16 850	29.9	29.9	8/15	25 544	36.2	41.189
7/17	16 559	26.9	26.9	8/16	24 627	35.4	40.833
7/18	17 407	31.2	31.2	8/17	23 857	35.5	40.354
7/19	18 717	34.4	34.4	8/20	22 859	35.1	38.993
7/20	20 722	34.3	35.588	8/21	23 027	34.3	37.544
7/23	21 948	34.7	36.756	8/22	20 308	30	30
7/24	22 417	34.7	36.961	8/23	19 569	26.2	26.2
7/25	21 652	34.3	36.561	8/24	17 718	30.6	30.6
7/26	22 872	35	37.609	8/27	17 744	32.4	32.4
7/27	23 534	35.3	38.301	8/28	21 651	31.2	31.2
7/30	22 917	35.8	38.67	8/29	20 547	31.8	31.8
7/31	22 865	35.1	38.131	8/30	20 996	31.6	31.6
				8/31	20 893	31.3	31.3

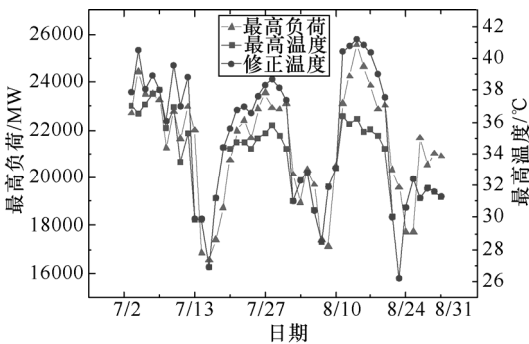


图 5 考虑积温效应的负荷和温度曲线
Fig.5 The highest load and modified temperature fitting curve

由图表可以看出，考虑积温效应后，最高负荷与修正温度之间的相关程度得到较大的提高，其相关系数提高到 0.851 8。因此，用修正温度代替原始温度进行负荷预测有利于提高负荷预测的精度。

5 结论

温度因素是夏季短期负荷预测中的主导因素，持续高温天气的累积效应会影响电力负荷预测的结果。为了在传统短期负荷预测的方法中考虑积温效

应，本文建立考虑积温效应的温度修正模型，通过对待预测日的最高温度进行修正来量化积温效应的影响，并根据灵敏度分析和相关性分析提出了温度修正模型中界限温度、最大累计天数、累积效应系数等关键参数的求解方法。通过实际算例，证明了本文所提出的方法能够在一定程度上反映积温效应对于负荷的影响，为提高夏季短期负荷预测的精度提供了有效的方法。在后续研究工作中，还需要进一步分析节假日及冬季温度累积效应的影响，深入研究积温效应的有效处理方法。

参考文献

[1] 祝燕萍, 方鸽飞. 基于动态自适应神经网络和人体舒适度的短期负荷预测[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(1): 56-61.
Zhu Yanping, Fang Gefei. Short-term load forecasting based on dynamic adaptive artificial neural network and human body amenity indicator[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(1): 56-61.

[2] 杜松怀, 文福拴, 李扬, 等编译. 电力系统的市场化运营——预测、计划与风险管理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.

[3] 刘旭, 罗滇生, 姚建刚, 等. 基于负荷分解和实时气象因素的短期负荷预测[J]. 电网技术, 2009, 3(12): 94-100.
Liu Xu, Luo Diansheng, Yao Jiangang, et al. Short-term load forecasting based on load decomposition and hourly weather factors[J]. Power System Technology, 2009, 3(12): 94-100.

[4] 肖伟, 罗滇生, 董雪. 积温效应分析及日最大负荷预测中的应用[J]. 微计算机信息, 2009, 25(1-1): 262-264.
Xiao Wei, Luo Diansheng, Dong Xue. Analysis of accumulated temperature effect and application in forecasting[J]. Microcomputer Information, 2009, 25(1-1): 262-264.

[5] 黎灿兵, 杨朋, 刘玮, 等. 短期负荷预测中考虑夏季气温累积效应的方法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(9): 96-99.
Li Canbing, Yang Peng, Liu Wei, et al. An analysis of accumulative effect of temperature in short-term load forecasting[J]. Automation of Electric Power System, 2009, 33(9): 96-99.

[6] 黄永高. 电力负荷预测方法的研究[D]. 南京: 东南

- 大学, 2010.
- [7] 方鸽飞, 胡长洪, 郑奕辉, 等. 考虑夏季气象因素的短期负荷预测方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(22): 100-104.
Fang Gefei, Hu Changhong, Zheng Yihui, et al. Study on the method of short-term load forecasting considering summer weather factors[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(22): 100-104.
- [8] 张凯, 姚建刚, 李伟, 等. 负荷预测中的温度热累积效应分析模型和处理方法[J]. 电网技术, 2008, 32(4): 67-71.
Zhang Kai, Yao Jiangang, Li Wei, et al. Analysis model and processing approach for thermal cumulative effect of temperature in load forecasting[J]. Power System Technology, 2008, 32(4): 67-71.
- [9] 彭远方, 黄晓峰. 基于时差辨识原理分析气象累积效应对电力负荷的影响[J]. 中国电力, 2009, 42(8): 6-9.
Peng Yuanfang, Huang Xiaofeng. Analysis of cumulative effect of weather factors on electric load based on time difference identification[J]. Electric Power, 2009, 42(8): 6-9.
- [10] 蒋建东, 程志豪, 朱明嘉. 考虑积温效应的短期负荷组合预测方法[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(10): 28-31.
Jiang Jiandong, Cheng Zhihao, Zhu Mingjia. Combined short-term load forecast with accumulated temperature effect[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(10): 28-31.
- [11] 李扬, 王治华, 卢毅, 等. 南京市夏季气温-日峰荷特性分析[J]. 电网技术, 2001, 25(7): 63-66, 71.
Li Yang, Wang Zhihua, Lu Yi, et al. Characteristic analysis of summer air temperature—daily peak load in nanjing[J]. Power System Technology, 2001, 25(7): 63-66, 71.
- [12] 陈健, 刘明波, 樊亚亮, 等. 广州电网负荷特性分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2009, 21(6): 78-83.
Chen Jian, Liu Mingbo, Fan Yaliang, et al. Studies on load characteristics of guangzhou power network[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2009, 21(6): 78-83.
- [13] 康重庆, 夏清, 刘梅. 电力系统负荷预测[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [14] 黄永皓, 康重庆, 李晖, 等. 用电需求曲线建模及其应用[J]. 电工电能新技术, 2004, 23(1): 29-33.
Huang Yonghao, Kang Chongqing, Li Hui. The model of electricity demand curve and its applications[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2004, 23(1): 29-33.
- [15] 潘敬东, 谢开, 华科. 计及用户响应的实时电价模型及其内点法实现[J]. 电力系统自动化, 2005, 12(10): 8-14.
Pan Jingdong, Xie Kai, Hua Ke. Supplier-customer interaction modeling in an integrated optimal spot pricing framework by nonlinear interior point methods[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 12(10): 8-14.
- [16] 李晖, 康重庆, 夏清. 考虑用户满意度的需求侧管理价格决策模型[J]. 电网技术, 2004, 28(23): 1-6.
Li Hui, Kang Chongqing, Xia Qing. Price based decision making for demand side management considering customer satisfaction index[J]. Power System Technology, 2004, 28(23): 1-6.
- [17] 雷霞, 刘俊勇, 都亮. 电力零售市场中分时零售电价的确定[J]. 电力系统及其自动化学报, 2008, 20(1): 28-32.
Lei Xia, Liu Junyong, Du Liang. Determination of time-of-use retail price in the retail market[J]. Proceedings of the Chinese Society of Universities for Electric Power System and its Automation, 2008, 20(1): 28-32.
- [18] 张显, 王锡凡, 陈芳华, 等. 分时段短期电价预测[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(15): 1-6.
Zhang Xian, Wang Xifan, Chen Fanghua, et al. Short-term electricity price forecasting based on period-decoupled price sequence[J]. Proceeding of the CSEE, 2005, 25(15): 1-6.
- [19] 贺春光. 夏季电网最大负荷与气温的相关性分析[J]. 河北电力技术, 2011, 30(5): 15-17.
He Chunguang. Correlation analysis on system peak load and temperature[J]. Hebei Electric Power, 2011, 30(5): 15-17.

作者简介

高赐威 男, 1977 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力规划、电力市场、需求侧管理、电力安全等。

李倩玉 女, 1989 年生, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制。