

基于相似日权重的电力系统扩展短期负荷预测

张芳明¹, 李俊周², 毛 弋³

(1. 中国南方电网调峰调频发电公司天生桥水力发电总厂, 贵州 兴义 562400;
2. 安阳供电公司, 河南 安阳 455000; 3. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 扩展短期负荷预测源于滚动发电计划的制定, 在原计划与实际负荷发生较大偏离(大于3%)时, 精确的扩展短期负荷预测有利于制定科学合理的滚动发电计划。在对当日已有电力负荷特性分析的基础上, 运用形系数决定权重的思想, 提出了基于相似日权重的扩展短期负荷预测方法。该方法克服了现有预测方法中对各相似日采用相同权重所导致的平滑效应对拐点负荷预测的影响。研究表明, 该方法在保证运算速度的同时, 提高了总体预测准确性和拐点处的预测准确性。

关键词: 电力系统; 负荷预测; 扩展短期; 权重; 形系数

Extended short-term load forecasting based on similar days weight

ZHANG Fang-ming¹, LI Jun-zhou², MAO Yi³

(1. Frequency and Amplitude Modulation Power Company, Tianshengqiao Hydropower Plant of China Southern Power Grid, Xingyi 562400, China; 2. Anyang Power Supply Company, Anyang 455000, China; 3. College of Electronic and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Extended short-term load forecasting is derived from the establishment of rolling generating schedule. When there is a relatively large deviation between the original plan and actual load (larger than 3%), accurate extended short-term forecasting is helpful to plan rolling generating schedule scientifically and properly. On the basis of the availability of the analysis of intraday load characteristics, one method of extended short-term forecasting based on similar days weight is proposed in this paper, using the idea that the weight is determined by the shape coefficient. The influence of smoothing effect on the inflexion point load forecasting caused by using homology weights is overcome by the proposed method. Study results show that the proposed method can improve the global forecasting accuracy including the inflexion point while keeping the calculation speed.

Key words: power system; load forecasting; extended short-term; weight; shape coefficient

中图分类号: TM715 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)20-0069-05

0 引言

在电力市场环境, 电力部门提前1天完成日短期负荷预测, 确定次日发电计划, 其后监视当日计划的执行情况, 在原计划与实际负荷发生较大偏离(大于3%)时, 及时进行该日剩余时段负荷的重新预测和计划调整, 称为滚动发电计划。然而, 电力市场下, 实时发电计划调整一般需要留2小时的时间裕度, 即, 电力部门最早只能调整当前时间现有的2小时后各时间段的负荷计划。而短期负荷预测注重1日至几日的负荷曲线预测, 超短期负荷预测完成1小时内的负荷预测。显然, 超短期负荷预测及日负荷预测并不能满足滚动修改发电计划的要求。

根据这个要求, 文献[1]提出了扩展短期负荷预

测的概念和方法, 其主要思路是: 利用当前可以获得最新信息(包括负荷信息、气象信息等), 预测当日当前时刻以后几小时的负荷。研究表明, 由于该方法利用了当日的已知信息进行当日剩余点的负荷预测, 其预测精度明显高于常规的日负荷预测。

随着我国各类信息的采集如气象信息采集及预报系统等的不断完善, 提供的信息不断细化, 实时性更高。扩展短期负荷预测可以进一步利用这些实时的信息, 采用更科学、更合理的预测方案, 实现短时间、高准确度的预测, 从而扩大该预测的适应性和适用面, 来充分满足滚动发电计划的制定要求。本文从实际出发, 通过分析当日已有负荷序列的特性, 定义当日已有负荷序列与相似日同时段负荷序列的形系数概念, 通过形系数决定权重的思想, 提出基于相似日权重的扩展短期负荷预测方法, 从

而克服了现有预测方法中对各相似日采用相同权重所导致的平滑效应对拐点负荷预测的影响。

1 从日特征量和趋势相似度综合角度选择趋势相似日

影响相似日选择的因素有：①日类型；②气象因素；③负荷曲线；④特别事件等^[2]。因此，在本文中，采用从日特征量和趋势相似度综合角度来选择相似日。

日特征量采用“日特征相似度”进行衡量，“日特征相似度”是指某两日的日特征量的相似程度。其定义公式如下：

假设每日考虑了 H 个负荷相关因素， i, j 两日的日特征量向量分别为 $(u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{iH})^T$ ， $(u_{j1}, u_{j2}, \dots, u_{jH})^T$ ，这些特征量都是指映射后的值（即，通过分析负荷随各个特征量的值变化而变化的灵敏度，将不同量纲的特征量的实际值转化为无量纲所得的相对值。详细方案请参考文献[3]）。

定义1 i, j 两日的“日特征相似度”为

$$O_{ij} = \frac{\sum_{h=1}^H u_{ih} u_{jh}}{\sqrt{\sum_{h=1}^H u_{ih}^2 \sum_{h=1}^H u_{jh}^2}} \quad (1)$$

式中： O_{ij} 表示日特征相似度，它是 H 维空间中两个日特征量向量之间的夹角余弦，反映了这两日的特征量在 H 维空间上的空间距离大小。

趋势相似度的量化公式如下^[4]：假设第 i, j 两日及它们附近几日（设 K 日）的负荷水平序列分别为 $\bar{X}_i = (\bar{x}_{i-K}, \dots, \bar{x}_{i-k}, \bar{x}_{i-1}, \bar{x}_i)$ ， $\bar{X}_j = (\bar{x}_{j-K}, \dots, \bar{x}_{j-k}, \bar{x}_{j-1}, \bar{x}_j)$ ，（ K 一般取值为 4~7）。 \bar{x}_i 为第 i 日的平均负荷（负荷水平）。

定义2 第 i, j 两日的“趋势相似度”为

$$F_{ij} = \frac{2[E(\bar{X}_i \bar{X}_j) - E(\bar{X}_i)E(\bar{X}_j)]}{D(\bar{X}_i) + D(\bar{X}_j)} \quad (2)$$

将 F_{ij} 和 O_{ij} 结合，可以采用

$$T_{ij} = \mu F_{ij} + \lambda O_{ij} \quad (3)$$

来描述 T_{ij} (i, j 两日的趋势相似度) 的大小。其中 F_{ij} 为 i, j 两日的趋势相似度，用式(2)求得； O_{ij} 为 i, j 两日的日特征相似度，用式(1)求得； μ, λ

为适当参数，可以通过历史日期与参照日间已知的趋势相似度及日特征相似度，应用最小二乘法来优化^[5]求得。

该方案在前趋势相似度的基础上引入了预测日的特征量，增加了趋势相似日的评估信息，因此，其选择结果较为理想。

2 当日已有负荷序列的特性分析

不同的相似日所包含的负荷信息和气象信息等影响负荷预测的因素是不同的，即不同的相似日包含不同的负荷信息和气象信息^[6]。因此，在负荷预测中，不同的相似日都包含了一定的有用信息，舍弃任何一个相似日都将造成有用信息的丢失，影响短期负荷预测的精度。气象等影响负荷的因素是一种缓慢的过程，因此不可能出现突变的情况，当一种天气或一种因素发生时，负荷曲线变化是平稳且缓慢的变化的，可以说是具有相同的变化趋势的。

因此，不同的相似日所包含的不同负荷信息，其必然存在不同的变化趋势，变化趋势反映的是曲线形状的变化。曲线形状的变化相似性可以通过两曲线的形系数（将在下文3介绍）来定义，同时，当日已有负荷序列和相似日具有同样的特性，即不同曲线的形状变化包含着不同的负荷信息和气象信息。因此可以得出结论：负荷曲线形状越接近，即形系数越小，负荷曲线所包含的负荷信息和气象信息就越相似，越相似则其在负荷预测中的作用就越大。因此可以利用当日已有负荷序列与相似日相同时刻负荷序列的形系数来衡量相似日在负荷预测中的权重。

3 当日已有负荷序列与相似日同时段负荷序列形系数的量化方法

常用的计算两个序列相似程度的指标包括欧氏距离、海明距离、相关系数、相似系数等。由以上对当日已知负荷序列特性的分析可知，研究能合理描述已知电力负荷曲线形状相似的指标，并引入到预测算法中，对提高预测的准确性是很关键的。

根据前文介绍的方法选取预测日 T 的 M 个趋势相似日，取预测时刻 $p+1$ 的前当天所有已知的负荷序列构成目标样本群 L_T^p ，取各相似日负荷序列中的同时段负荷作为预测样本 L_i^p 。

$$L_i^p = \{L_{i0}, \dots, L_{ik}, \dots, L_{ip}\} \quad (4)$$

其中： $i=1, 2, \dots, M$ ， M 为选取的相似日天数。

其中: L_i^p 为预测样本中的一个序列, L_T^p 为目标样本。当前时刻为 p 。

$$L_T^p = \{L_{T_{p-d+1}}, \dots, L_{T_k}, \dots, L_{T_p}\} \quad (5)$$

参考欧式距离和海明距离的定义, 定义目标样本 L_T^p 与预测样本 L_i^p 的形系数为:

$$S_{iT}^p = \alpha \cdot \frac{1}{p} \cdot \sum_{k=0}^p |x_{iT_k} - e_{iT}| \quad (6)$$

式中: $x_{iT_k} = L_{ik} - L_{Tk}$

$$e_{iT} = \frac{1}{p} \sum_{k=0}^p x_{iT_k}$$

$$\alpha = H^{(p-k)} \quad (0 < H \leq 1)$$

x_{iT_k} 表示目标样本 L_T^p 与预测样本 L_i^p 动态变化的差异, e_{iT} 为其均值。当一个序列是另一个序列沿垂直方向上下移动形成的, 即两个序列形状完全相同时 $x_{iT_k} = e_{iT}$, 形系数 $S_{iT}^p = 0$ 。当两个序列形状存在差异时, $x_{iT_k} \neq e_{iT}$, $S_{iT}^p \neq 0$ 且 x_{iT_k} 与 e_{iT} 间差异越远, S_{iT}^p 越大。因此, S_{iT}^p 能很好地反映两个序列形状的性质差异。 α 为时间权重, 反映了负荷预测中的“近大远小”原则。本文时间权重采用的是指数形式, 也可以根据负荷的特点研究选取其他形式^[9], 进一步提高预测精度。

4 线性外推法概述

线性外推法通常用于超短期负荷预测, 其基本原理是对过去确定时间段里具有随机特性的负荷用线性曲线或二次曲线拟合负荷变化曲线, 使得这条曲线能够反映负荷本身的变化趋势。然后按照这个增长趋势曲线, 对于要求的未来某一点从其外推曲线估计出负荷预测结果, 它能较好地预测基本负荷的变化。但是当天气出现较大变化时, 该方法无法适应这种变化, 会出现较大的误差; 另外它的权重选取一般靠经验。下面简要介绍线性外推法的计算公式:

不同类型的日, 其负荷变化规律差别较大, 根据我国目前五天工作制情况, 可以分为工作日和休息日两类, 工作日指星期一至星期五, 休息日指星期六、星期日及节假日, 若再细分可把星期一和星期五单独提取出来, 星期一上午负荷和其他工作日上午负荷变化规律差别稍大; 星期五下午负荷和其他工作日下午负荷变化规律差别稍大。

设当前时刻为 t_1 , 一步预测的时间间隔等于 Δt , 预测时刻为 $t_2 = t_1 + \Delta t$, 过去时刻为

$t_0 = t_1 - \Delta t$ 。记和预测日最近的五个同类型日中, 其第 i 天 t_1 时刻负荷值为 $y(i, t_1)$ ($i = 1, 2, 3, 4, 5$), 第 i 天 t_2 时刻负荷值为 $y(i, t_2)$ ($i = 1, 2, 3, 4, 5$), 第 i 天 t_0 时刻负荷值为 $y(i, t_0)$ ($i = 1, 2, 3, 4, 5$)。

假定在上述时间段内, 这五天负荷具有相近的变化趋势, 若有某一天不同, 需进行预处理。首先计算同一时刻, 上述五天负荷的平均值:

$$\bar{y}(t_0) = \sum_{i=1}^5 \frac{y(i, t_0)}{5} \quad (7)$$

$$\bar{y}(t_1) = \sum_{i=1}^5 \frac{y(i, t_1)}{5} \quad (8)$$

$$\bar{y}(t_2) = \sum_{i=1}^5 \frac{y(i, t_2)}{5} \quad (9)$$

由点 $(t_0, \bar{y}(t_0))$, $(t_1, \bar{y}(t_1))$ 和点 $(t_2, \bar{y}(t_2))$ 拟合直线, 设方程式相同。

由最小二乘法拟合:

$$\tilde{y}(t) = a + bt \quad (10)$$

$$P = \sum_{k=0}^{m-1} (y(t_k) - \tilde{y}(t_k))^2 \quad (11)$$

求解 P 的最小值, 则:

$$\frac{\partial P}{\partial a} = -\sum_{k=0}^{m-1} 2(y(t_k) - a - bt_k) = 0 \quad (12)$$

$$\frac{\partial P}{\partial b} = -\sum_{k=0}^{m-1} 2(y(t_k) - a - bt_k)t_k = 0 \quad (13)$$

将式(11)、(12)、(13)与(9)相结合, 得:

$$a = \frac{\sum_{t=0}^2 \tilde{y}(t_i) - b \sum_{t=0}^2 t_i}{3} \quad (14)$$

$$b = \frac{3 \sum_{i=0}^2 \bar{y}(t_i) t_i - \sum_{i=0}^2 \bar{y}(t_i) \sum_{i=0}^2 t_i}{3 \sum_{i=0}^2 t_i^2 - \left(\sum_{i=0}^2 t_i \right)^2} \quad (15)$$

则, 从 t_1 到 t_2 时刻负荷的变化值为:

$$\begin{aligned} \Delta y &= y(t_2) - y(t_1) = \\ &= (a + bt_2) - (a + bt_1) = \\ &= b \cdot (t_2 - t_1) = 5b \end{aligned} \quad (16)$$

则预测日的预测时刻负荷值为:

$$\begin{aligned} y(t_2) &= y(t_1) + \Delta y = \\ &= y(t_1) + b(t_2 - t_1) = \\ &= y(t_1) + 5b \end{aligned} \quad (17)$$

5 基于相似日权重的扩展短期负荷预测方法

基于相似日权重的扩展短期负荷预测方法的关键是：以当日预测时刻前已知的所有负荷序列与各相似日同时段的负荷序列的形系数作为各相似日对预测结果的影响权重，将该权重引入到现有的预测算法中。通过权重的引入，打破以往将各相似日分别预测，将预测结果取平均值作为最终预测结果的做法。以各预测样本时段与目标样本时段相似性的大小不同，来确定权重的大小。本文采用线性外推法为改造对象^[10]进行扩展短期负荷预测。

其预测步骤如下：

- (1) 根据当日已有负荷序列运用上文 2 中方法在历史数据中选择 M 个相似日；
- (2) 使用式 (6) 计算当日已知时刻各预测样本与目标样本的形系数 S_{it}^p ，其中： $i=1,2,\dots,M$ ；
- (3) 各相似日当前时刻负荷变化率计算
对于离散的负荷序列，按下式可以计算相似日当前时刻 p 负荷变化率：

$$\Delta L_i^p = \frac{L_i^{p+1} - L_i^p}{L_i^p} \quad (18)$$

式中： L_i^p 代表相似日当前时刻 p 的负荷值。

(4) 当前时刻负荷变化率计算

通过计算式 (18)，可以得到各相似日当前时刻的负荷变化率，以形系数 S_{it}^p 为权重，可以求得当前时刻负荷变化率为：

$$\Delta L_{av}^p = \sum_{i=1}^M \frac{1/S_{it}^p}{\sum_{i=1}^M 1/S_{it}^p} \times \Delta L_i^p \quad (19)$$

(5) 预测时刻负荷计算

在得到用于预测的当前时刻负荷变化率后，可求得预测时刻的负荷：

$$L_t^{p+1} = L_t^p \times (1 + \Delta L_{av}^p) \quad (20)$$

考虑到负荷变化的连续性，通过逐一对当天剩余时刻的负荷进行预测，便完成了扩展短期负荷预测。

6 实例分析

为了验证基于相似日权重的扩展短期负荷预测的效果，我们采用各种相似指标的改进方法进行比较。负荷预测历史数据为 2003 年湖南某市的 365 天的日负荷数据。

表 1 各方法预测结果比较

Tab. 1 Comparison of load forecasting results

预测方法	平均 误差/ (%)	误差 ≤ 1% 的点所 占的比例/ (%)	误差 ≤ 2% 的点所占 的比例/ (%)	误差 ≤ 3% 的点所 占的比例/ (%)	误差 ≤ 5% 的点所 占的比例/ (%)
线性外推法	0.874	88.53	92.03	95.08	97.51
采用形系数改进的线性外 推法	0.509	94.26	97.51	98.14	100
采用欧式距离改进的线性 外推法	0.753	89.95	93.35	96.81	98.15
采用相关系数改进的线性 外推法	1.782	76.32	81.22	83.25	90.19
采用相似系数改进的线性 外推法	0.701	90.36	91.57	97.12	98.78

表 1 为采用线性外推法、采用形系数改进的线性外推法及采用其他相似指标改进方法预测结果的比较。由表中结果可见，采用形系数改进的线性外推法可以明显降低预测的误差。而采用其它相似指标改进的预测方法不能明显地降低预测误差，有的甚至导致预测误差升高。这是由于欧氏距离对负荷数值上的差异较敏感，而且欧氏距离实质是“值”相似系数而非“形”相似系数。相似系数并非“形”相似系数，相似系数用的是负荷数值，所以相似系

数大小除了反映相关性外，还与负荷本身高、低的差异有关。相关系数和相似系数不同之处在于使用了距平值。因此能反映出两个序列对各自负荷均值的离散程度，可以认为它是一个较理想的形相似系数，但在扩展短期负荷预测实际使用中对预测准确性提高的效果不明显。因此，本文所定义的形系数就是一种很好的相似指标。

由于采用形系数改进的线性外推法在预测中对相似日的使用是采用权重法而不是平均法，避免了

平滑效应,提高了对拐点或突变点预测的准确性。

7 结论

考虑到预测时刻负荷和当日已知时刻负荷的内在规律,以及负荷曲线的总体相似发展趋势,本文提出了形相似的曲线逼近方法,通过定义描述负荷序列形状相似程度的指标—负荷曲线形系数,提出了一种基于相似日权重的扩展短期负荷预测方法。该方法强调基于形相似基础进行值预测,取预测时刻前已知点的负荷序列构成目标样本,取相似日同时段的负荷序列构成预测样本,通过形系数对各相似日的权重进行确定,克服了现有预测方法中对各相似日采用相同权重所导致的平滑效应对拐点负荷预测的影响。本文通过实际预测讨论了基于相似日的扩展短期负荷预测方法,并比较各种方法验证了该方法在保证运算速度的前提下,不仅提高了总体预测的准确率,而且提高了对拐点处负荷预测的准确性。

参考文献

- [1] 莫维任,张伯明,孙宏斌,等. 扩展短期负荷预测方法的原理和方法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(3): 1-3.
MO Wei-ren, ZHANG Bo-ming, SUN Hong-bin, et al. Extended Short-term Load Forecasting Principle and Method[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(3): 1-3.
- [2] 蔡佳宏, 刘俊勇. 超短期负荷预测中相似日的选择方法[J]. 华北电力大学学报, 2006, 33(1): 38-41.
CAI Jia-hong, LIU Jun-yong. Selecting Method for Similar Day in Super Short-term Load Forecasting[J]. Journal of North China Electric Power University, 2006, 33(1): 38-41.
- [3] 康重庆,程旭,夏清,等. 一种规范化的处理相关因素的短期负荷预测新策略[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(18): 32-35.
KANG Chong-qing, CHENG Xu, XIA Qing, et al. A New Unified Approach to Short-term Load Forecasting Considering Correlated Factors [J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(18): 32-35.
- [4] 莫维仁,张伯明,孙宏,等. 短期负荷预测中选择相似日的探讨[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2004, 44(1): 107-108.
MO Wei-ren, ZHANG Bo-ming, SUN Hong-bin, et al. Method to Select Similar Days for Short-term Load Forecasting[J]. J Tsinghua Univ (Sci & Tech), 2004, 44(1): 107-108.
- [5] 陈宝林. 最优化方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 1989.
CHEN Bao-lin. Method of Optimization[M]. Beijing : Tsinghua University Press, 1989.
- [6] 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.
KONG Chong-qing, XIA Qing, LIU Mei. Power System Load Forecasting[M]. Beijing : China Electric Power Press, 2007.
- [7] 盛骤, 谢式千. 概率论与数理统计[M]. 北京: 高等教育出版社, 1996.
SHENG Ju, XIE Shi-qian. Probability Theory and Mathematical Statistics[M]. Beijing: Higher Education Press, 1996.
- [8] Kim K H, Your H S, Kang Y C. Short-term Load Forecasting for Special Days in Anomalous Load Conditions Using Neural Networks and Fuzzy Inference Method[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(2): 559-565.
- [9] 朱常青, 土秀和, 张鑫, 等. 基于灰关联加权组合模型的电力负荷预测研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 2006, 18(2): 79-81.
ZHU Chang-qing, TU Xiu-he, ZHANG Xin, et al. A Novel Load Forecasting Method Based on Grey Relational Weighing Combination Model[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2006, 18(2): 79-81.
- [10] 罗滇生, 李伟伟, 何洪英. 基于局部形相似的超短期负荷预测方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2008, 20(1): 75-79.
LUO Dian-sheng, LI Wei-wei, HE Hong-ying. Very Short-term Load Forecasting Method Based on Local Shape Similarity[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2008, 20(1): 75-79.

收稿日期: 2009-04-14; 修回日期: 2009-06-11

作者简介:

张芳明(1983-), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统规划、电力市场及其技术支持系统等方面的科研工作;
E-mail: zhangfangming654@sina.com

李俊周(1973-), 男, 高级工程师, 主要从事电力系统生产技术管理工作;

毛弋(1965-), 男, 副教授, 博士, 主要从事电力系统规划、配电网安全分析和电力市场等方面的教学和研究。