

# 证据理论在短期负荷预测相似日选择中的应用

李如琦<sup>1</sup>, 唐卓贞<sup>1</sup>, 唐伍斌<sup>2</sup>, 郑贤<sup>2</sup>, 杨立成<sup>1</sup>

(1. 广西大学电气工程学院, 广西 南宁 530004; 2. 桂林市气象局, 广西 桂林 541002)

**摘要:** 合理选择预测相似日是提高综合负荷预测模型预测效果的有效途径。依据人工经验选相似日的传统方法并不具备最好的预测效果。选择相似日问题可以归结为一个判决问题, 即选择与待预测日气象等因素最相似的一天。影响电力系统短期负荷的因素有很多, 且常常难以定量表达, 针对电力系统短期负荷预测中存在的 uncertainty 问题, 将证据理论应用于短期负荷预测中的相似日选择上来。用广西某地方电网的实际数据验证表明, 将证据理论应用于相似日的选取, 能较准确选择相似日从而提高了预测精度。

**关键词:** 证据理论; 电力系统; 相似日; 短期负荷预测

## Application of evidence theory into select similar days for short-term load forecasting

LI Ru-qi<sup>1</sup>, TANG Zhuo-zhen<sup>1</sup>, TANG Wu-bin<sup>2</sup>, ZHENG Xian<sup>2</sup>, YANG Li-cheng<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China;

2. Guilin Weather Bureau, Guilin 541002, China)

**Abstract:** The reasonable choosing forecast similar days is an effective way to enhance the forecast results of the load forecast synthesis model. The traditional artificial experience-based similar days selecting certainly had not the best forecast effect. Choosing the similar days question can be summed up a decision question, namely selecting the day that the date meteorology is most similar with the forecasted day. There are many factors can influence electrical power system short-term load factor, and frequently with difficulty in the quota expression. The paper, facing to the uncertainty problems, applies the evidence theory in the similar date choosing. The test results with the of actual data Guangxi someplace electrical network show evidence theory has more accurate forecast precision.

**Key words:** evidence theory; power system; similar days; short-term load forecast

中图分类号: TM715 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2008)03-0034-04

## 0 引言

短期电力负荷预测是电力系统的一项基本工作, 是安全调度和经济运行的重要依据。短期负荷预测系统大多应用各种综合模型机制完成预测以提高预测准确度和适应性<sup>[1]</sup>, 相似日选取的好坏直接影响预测结果准确度, 是短期负荷预测研究中的热点问题<sup>[2,3]</sup>。

证据理论是由美国学者 A. P. Dempster 提出的不确定性推理方法。它将基于二值逻辑的经典概率论推广至更一般的情形, 将对命题的概率推断的基础建立在结论的幂集上而不是结论本身, 把对命题的推断转化为对集合的运算<sup>[4]</sup>。证据理论在各种预测和人工智能领域有着广泛的运用<sup>[5-8]</sup>, 近年来东南大学一名博士与导师将证据理论运用到中期负荷预测中<sup>[9]</sup>, 取

得了良好的预测效果。2000年又有学者对证据理论在电力系统规划中的应用进行研究<sup>[10]</sup>, 论证了其在电力系统规划中的应用前景。近两年, 还有学者将证据理论运用于多种短期负荷预测曲线的综合优化或其他预测模型相融合<sup>[11]</sup>, 亦提高了整体的预测精度。作为一种良好的决策工具, 证据理论在电力系统中有良好的应用前景。

本文探讨负荷预测中的预测相似日的选择方案, 首次将证据理论应用于判别相似日, 通过对不同信度函数的Dempster合成, 找出合理的相似日, 取得了比传统经验选相似日更好的预测效果。

## 1 证据理论方法简介<sup>[4]</sup>

### 1.1 证据理论的基本概念

1) 识别框架。对于一个判决问题, 用集合  $\Theta$

表示所能认识到的所有结果, 该集合就称为识别框架。研究的命题或问题则是由识别框架中的最小基本元素所组成的信团表示。若识别框架中有  $n$  个最小基本元素, 则信度可能有  $2^n$  种 (包括空集)。

2) 基本信度分配  $m$ 。设  $\Theta$  为识别框架。如果集函数  $m: 2^\Theta \rightarrow [0,1]$  ( $2^n$  为  $\Theta$  的幂集) 满足:

$$\begin{cases} m(\phi) = 0 & (1) \\ \sum_{A \subseteq \Theta} m(A) = 1 & (2) \end{cases}$$

则称  $m$  为框架  $\Theta$  基本信度分配 BPA (basic probability assignment);  $\forall A \subseteq \Theta$ ,  $m(A)$  称为  $A$  的基本信度值 BPN (basic probability number); 若  $m(A) > 0$ , 则称  $A$  为焦点元素 (focality)。

3) 信度函数  $Bel$ 。如果  $m$  是一个基本信度分配, 那么信度函数  $Bel$  的定义如下:

$$\forall A \subseteq \Theta, Bel(A) = \sum_{B \subseteq A} m(B) \quad (3)$$

$$\text{显见: } Bel(A) = \sum_{B \subseteq A} m(B) = 1$$

### 1.2 Dempster合成法则<sup>[4]</sup>

设  $Bel_1, Bel_2$ : 是同一识别框架上基于 2 个独立证据的信度函数,  $m_1$  和  $m_2$  分别是其对应的基本信度分配, 设焦点元素分别为  $A_1, A_2, \dots, A_k$  和  $B_1, B_2, \dots, B_k$ , 设  $\sum_{A_i \cap B_j = \phi} m_1(A_i)m_2(B_j) < 1$ , 则

$$m(A) = \begin{cases} 0, & A = \phi \\ \frac{\sum_{A_i \cap B_j = A} m_1(A_i)m_2(B_j)}{1 - \sum_{A_i \cap B_j = \phi} m_1(A_i)m_2(B_j)}, & A \neq \phi \end{cases} \quad (4)$$

由式 (4) 定义的函数  $m: 2^\Theta \rightarrow [0,1]$  是基本信度分配。

此即 2 个信度函数合成的 Dempster 合成法则, 记为  $Bel_1 \oplus Bel_2$  (符号  $\oplus$  称为直和)。若待合成的信度函数多于 2 个, 则可以用同样的算法将前一步的合成结果与下一个信度函数进行合成, 直到所有信度函数合成完毕。

Dempster 合成法则可用图 1 进行解释。图 1 中横坐标为  $m_1$ , 纵坐标为  $m_2$ , 每根竖条表示  $m_1$  分配到焦点元素  $A_1, A_2, \dots, A_k$  上的基本信度值, 每根横条表示  $m_2$  分配到焦点元素  $B_1, B_2, \dots, B_k$  上的基本信度值。横条和竖条交是一个矩形, 该矩形具有测度  $m_1(A_i)m_2(B_j)$ , 并同时分配到  $A_i$  和  $B_j$  上, 所以将

$Bel_1$  和  $Bel_2$  合成, 即将  $m_1(A_i)m_2(B_j)$  分配到  $A_i \cap B_j$  上。

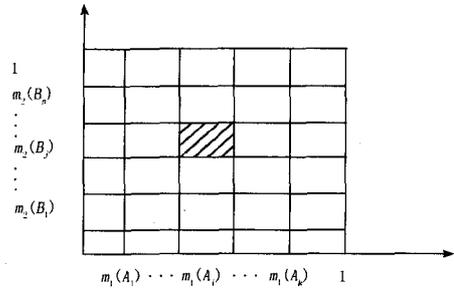


图 1 Dempster 合成法则的空间解释

Fig.1 Space explained for Dempster synthesis rules

## 2 证据理论在相似日选择中的应用

本文把影响相似日选择的因素大体分为两类: 历史负荷对待预测日负荷的影响遵循“近大远小”的原则, 即所寻找到的相似日与待预测日时间间隔越大, 对负荷的影响就越小, 反之亦然。本文把已知日与待预测日的时间间隔因素归为第一种证据; 温度、湿度、日照等天气因素为第二种证据; 在待预测日的前  $N$  天里寻找相似日, 其流程如图 2 所示。

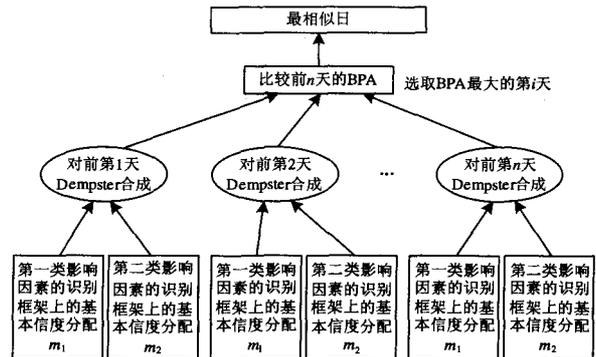


图 2 选取相似日流程

Fig.2 Process of selecting similar days

### 2.1 证据 1 的识别框架及其基本信度分配

我们把所选相似日的好坏分为优、中、差 3 个等级, 分别记为 F、M、S。文中识别框架的最小基本元素取为 {F, M, S}。

基本信度分配所应遵循的原则。

1) 所有的 BPN 之和等于 1, 这是由基本信度分配  $m$  的定义所决定的, 见式 (2)。

2) 分配在 F、M、S 上的 BPN 应是离待预测日越近, 即已知日与待预测日的时间间隔越小,  $m(F)$  越大,  $m(S)$  越小; 反之, 时间间隔越大,  $m(F)$  越小,  $m(S)$  越大。

本文在 16 天内寻找相似日, 具体的信度分配如式 (5):

$$\begin{cases} m_1(F) = \frac{0.9 - 0.01t_1}{2.1 - |1 - 0.06t_1|} \\ m_1(M) = \frac{1.2 - |1 - 0.06t_1|}{2.1 - |1 - 0.06t_1|} \\ m_1(S) = \frac{0.01t_1}{2.1 - |1 - 0.06t_1|} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $t_1$  表示已知日与待预测日的时间间隔长短。

根据基本信度分配公式, 对不同的已知日与待预测日之间的时间间隔, 有如下的基本信度分配情况, 见表 1。

表 1 证据 1 的基本信度分配

Tab.1 A list of BPA for evidence No.1

$t_1$	$m_1(F)$	$m_1(M)$	$m_1(S)$
16	0.359	0.563	0.077
10	0.470	0.470	0.058
6	0.575	0.383	0.041
3	0.679	0.296	0.023
2	0.721	0.262	0.016
1	0.767	0.224	0.008

由表 1 数据可以看出, 根据式 (5) 得出的基本信度值符合上述的基本信度分配应遵循的原则, 有一定的合理性。根据这一思想, 也可以构建与式 (5) 不同的基本信度分配公式, 不影响最后的精度择优。

### 2.2 证据 2 的识别框架及其基本信度分配

本文主要用到的气象因素有最高气温、最低气温和降雨量, 这些气象因素都要进行量化处理。

#### 2.2.1 温度的量化

温度在一定的范围内变化时, 对负荷的影响相似, 因此对温度可以进行分段处理: 根据对人体温度舒适度调查, 可认为人体舒适温度区间为 15~25℃, 所以当温度在 15~25℃ 区间时对负荷的影响较小, 可近似量化取值为 0; 而当温度低于 15℃ 或高于 25℃ 时对负荷的影响较大, 对温度进行如图 3 的分段和量化处理。

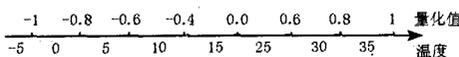


图 3 温度区间及其对应的量化取值

Fig.3 The temperature interval and the corresponding quantitative values

#### 2.2.2 降雨的量化

天气预报的降雨预报一般分为小雨、中雨、大雨、暴雨。根据桂林市气象局提供的标准, 天气预报中, 降雨量在 0.1~9.9 mm 为小雨, 10.0~24.9 mm 为中雨, 25.0~49.9 mm 为大雨, 50.0~99.9 mm 为暴雨。但按这一划分方法, 降雨量将是一离散变量。为使降雨量归一化为一个连续变量, 本文将气象局提供的降雨量  $r$  (单位: mm) 归一为  $r/100$ , 如图 4 所示。

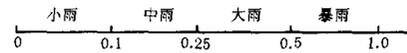


图 4 降雨指标及其对应的量化取值

Fig.4 Rainfall quantifiable indicators and the corresponding value

综合考虑各气象因素的值, 把待预测日各气象因子的值与已知日气象因子的差值  $t_2$  按式 (6) 进行信度分配。

$t_2 > 0.9$  时  $m_2(F) = 0.05, m_2(M) = 0.13, m_2(S) = 0.82$

当  $t_2 < 0.1$  时,

$m_2(F) = 0.82, m_2(M) = 0.13, m_2(S) = 0.13$

当  $0.1 \leq t_2 \leq 0.9$  时,

$$\begin{cases} m_2(F) = \frac{1 - t_2}{1.9 - |1 - 2t_2|} \\ m_2(M) = \frac{0.9 - |1 - 2t_2|}{1.9 - |1 - 2t_2|} \\ m_2(S) = \frac{t_2}{1.9 - |1 - 2t_2|} \end{cases} \quad (6)$$

根据基本信度分配公式 (6), 对不同的已知日与待预测日之间的气象差值, 有如下的基本信度分配情况, 见表 2。

表 2 证据 2 的基本信度分配

Tab.2 A list of BPA for evidence No.2

$t_2$	$m_2(F)$	$m_2(M)$	$m_2(S)$
0.9	0.090	0.090	0.818
0.8	0.153	0.230	0.615
0.6	0.235	0.411	0.352
0.4	0.352	0.296	0.235
0.2	0.615	0.230	0.153
0.1	0.818	0.090	0.090

从表 2 可见, 得出的基本信度值有一定的合理性, 即已知日与待预测日气象因子的差值越大,  $m_2(F)$  越小,  $m_2(S)$  越大, 反之已知日与待预测日

气象因子的差值越小,  $m_2(F)$  越大,  $m_2(S)$  越小。根据各个地方电网的不同情况, 也可以构建新的基本信度分配公式, 不影响最后的精度择优。

### 3 算例

根据广西某地区 2006 年 12 月的历史负荷数据预测待预测日的负荷, 本例中每天的负荷曲线取 96 点。应用了证据理论选相似日的方法选出的相似日与传统的相似日方法<sup>[3]</sup>其结果对比如表 3 及图 5。

表 3 本文所用方法与传统相似日方法结果对比

Tab.3 Forecasting results of different methods

待预测日	传统方法找出的相似日	传统方法的相对误差/(%)	应用证据理论找出的相似日	本文方法的相对误差/(%)
2006.12.17	2006.12.16	4.41	2006.12.14	3.82
2006.12.18	2006.12.17	3.82	2006.12.14	2.73
2006.12.19	2006.12.18	2.84	2006.12.18	2.84
2006.12.20	2006.12.18	3.00	2006.12.18	3.00
2006.12.21	2006.12.20	2.91	2006.12.18	2.25

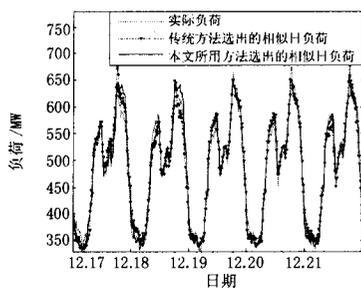


图 5 本文所用方法与传统相似日方法结果曲线对比

Fig.5 Comparison of forecasting results with historical data

### 4 结论

1) 证据理论从不确定推理的角度, 能将客观问题中的不确定知识形式化后进行推理和判断, 是进行决策和判断的良好工具, 非常适合运用于定量考察选取相似日。

2) 本文只考虑了最高气温、最低气温及降雨三个气象因子。各地方电网可根据当地不同气象因子对负荷的影响程度选择合适的气象因子进行信度分配。考虑的气象因子越全面, 理论上选择的相似日越可靠。

3) 本文只考虑了两种证据的信度合成, 根据各个电网的不同特性和各地区的不同情况, 还可展开考虑多种证据的信度合成。如本文主要是从气象上考虑选择相似日, 而对许多工业城市的电网, 工作日和休息日的负荷差异很大, 如果把这一因素考虑进去相似的程度更好。

### 参考文献

- [1] 徐进东, 丁晓群, 邓勇. 基于相似日的线性外推短期负荷预测[J]. 继电器, 2005, 34(7): 37-39.  
XU Jin-dong, DIN Xiao-qun, DENG Yong. Short-term Load Forecast Using Linear Extrapolation Based on

Similar Historical days[J]. Relay, 2005, 34(7): 37-39.

- [2] 杨正瓴, 田勇, 等. 相似日短期负荷预测的非线性理论基础与改进[J]. 电网技术, 2006, 30(6): 63-67.  
YANG Zheng-ling, TIAN Yong, et al. Nonlinear Theoretical Foundation and Improvement of Similar Days Method for Short Term Load Forecasting[J]. Power System Technology, 2006, 30(6): 63-67.
- [3] 莫维仁, 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, (1): 106-109.  
MO Wei-ren, et al. Method to Select Similar Days for Short-term Load Forecasting[J]. Tsinghua Univ (Sci & Tech), 2004, (1): 106-109.
- [4] 段新生. 证据理论与决策\人工智能[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 1993.  
DUAN Xin-sheng. Evidence Theory and Ecision-making, Artificial Intelligence[M]. Beijing: Renmin University of China Press, 1993.
- [5] 贾清泉, 杨奇逊, 杨以涵. 基于故障测度概念与证据理论的配电网单相接地故障多判据融合[J]. 中国电机工程学报, 2003, 26(12): 6-12.  
JIA Qing-quan, YANG Qi-xun, YANG Yi-han. Fusion Strategy for Single Phase to Groung Fault Detection Implemented through Fault Measures and Evidence Theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 26(12): 6-12.
- [6] Poroseva S V, Letschert J, Hussaini M Y, Application of Evidence Theory to Quantify Uncertainty in Hurricane/typhoon Track Forecasts[J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 2007, 26(3): 7-11.
- [7] Jfiring Kohlas, Hans Wolfgang Brachinger. Argumentation Systems and Evidence Theory[J]. Advances in Intelligent Computing, 2006, (7): 39-50.
- [8] Bae H R, Grandhi R V, Canfield R A. Sensitivity Analysis of Structural Response Uncertainty Ropagation Using Evidence Theory[J]. Struct Multidisc Optim, 2006, (31): 270-279.

(下转第 58 页 continued on page 58)

的直调机组在不同负荷水平和方式下测得的灵敏度情况。

表 2 直调机组对云南送出断面的灵敏度

Tab.2 The sensitivity coefficient between directly controlled generations and Yunnan tie line

机组	灵敏度范围	灵敏度性质
滇东	0.85~0.89	+
天一	-0.09~-0.11	o
天二	-0.09~-0.11	o
龙滩	-0.08~-0.10	o
鲁布革	-0.09~-0.11	o
盘南	-0.08~-0.10	o
贵港	-0.08~-0.10	o
鲤鱼江	-0.06~-0.09	o

当云南送出断面达 2350 MW 时, AGC 以最大步长减少云南直调机组出力, 并将减少的出力加上电网应有的处理需求分配给其他直调机组。滇东电厂 3 台机同时动作, 单机调节速率为 12 MW, 最大步长为 20 MW。经计算, 1.5 min 后云南断面回到安全状态。

## 5 结论

南方电网直调机组 AGC 应该发挥协调全网频率的作用, 采用 CFC 控制方式为最好的选择。为了协调直调 AGC 和各中调 AGC 的控制, 各中调 AGC 的联络线和用于 AGC 控制的频率特性系数有必要作的调整, 直调 AGC 的频率特性系数的选取则需要根据直调机组的调频功能定位来合理的选择。采用有功灵敏度分析原理的模糊灵敏度控制方法来对线路和断面过载进行安全校正控制, 用到的实时信息少, 原理简单, 可以克服现在国内其他方法的缺点, 是符合实际电网情况的可靠解决方法。

(上接第 37 页 continued from page 37)

- [9] 倪明, 高晓萍, 单渊达. 证据理论在中期负荷预测中的应用[J]. 中国电机工程学报, 1997, (5): 199-203.  
NI Ming, GAO Xiao-ping, SHAN Yuan-da. Application of Evidential Theory in Middle-term Load Forecasting [J]. Proceedings of the CSEE, 1997, (5): 199-203.
- [10] 叶在福, 单渊达. 基于信度的不确定性推理——证据理论及其在电力系统规划中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2000, 24(6): 5-8.  
YE Zai-fu, SHAN Yuan-da. Uncertainty Reasoning Based on Belief Degree——Evidential Theory and Applications in Power System Planning[J]. Proceedings of the EPSA, 2000, 24(6): 5-8.

## 参考文献

- [1] 张小白. 用 AGC 实现稳定断面越限的预防和校正控制[J]. 电网技术, 2005, 29(19): 56-59.  
ZHANG Xiao-bai. Implementation of Preventive and Remedial Control for Tie Line Overload by Use of Automatic Generation Control[J]. Power System Technology, 2005, 29(19): 56-59.
- [2] ZHAO Jin-quan, JIANG Xiao-dong, ZHANG Bo-ming. A Successive Linear Programming Based On-line Static Security Corrective Control Approach[J]. Power System Technology, 2005, 29(5): 25-30.
- [3] 魏 晖, 沈善德, 朱守真, 等. 系统自然频率特性系数的实测与计算[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(5): 49-51.  
WEI Hui, SHEN Shan-de, ZHU Shou-zhen, et al. Survey and Calculation of Frequency Character Quotient of Power System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(5): 49-51.
- [4] 唐跃中. AGC 按联络线偏差控制时频率偏差系数的确定[J]. 电网技术, 1997, 21(6): 5-7.  
TANG Yue-zhong. Principles of Getting a Rational Area Frequency Bias in AGC of Tie-line Bias Control Model[J]. Power System Technology, 1997, 21(6): 5-7.
- [5] 高宗和. 自动发电控制算法的几点改进[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(12): 5-9.  
GAO Zong-he. Some Algorithmic Improvement on AGC Software[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(12): 5-9.

收稿日期: 2007-08-24; 修回日期: 2007-09-23

作者简介:

赵旋宇(1974-), 男, 硕士, 工程师, 长期从事电力系统自动化工作。E-mail: zhaoxy@csg.cn

- [11] 陈静, 吴杰, 等. 多种负荷预测曲线的优化综合方法[J]. 江苏电机工程, 2006, (1): 38-41.  
CHEN Jing, WU Jie, et al. Optimal Synthesis Manifold Load Prediction Curve[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2006(1): 38-41.

收稿日期: 2007-06-29; 修回日期: 2007-09-28

作者简介:

李如琦(1959-), 女, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为电力系统规划、负荷预测、电力系统分析与计算;

唐卓贞(1984-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统负荷预测的理论、建模、算法。E-mail: tangzhuozhen2005@163.com