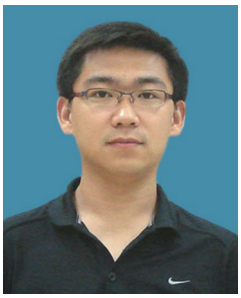
基于FAHP的超短期风电功率预测应用研究

将功率预测问题等价为多层次、多目标问题，并针对定性与定量综合分析计算的预测方法，提出一种多层次结构的预测方法来进行最优组合。同时，收集专家的判断与决策运用在超短期功率预测中作为依据。通过算例分析，提出的模糊层次分析法的预测准确度高于以往预测方法，预测结果表明其具有一定的可靠性与稳定性。

顾大可　王海旭／东北电力大学自动化工程学院
李春来／国网青海省电力公司电力科学研究院



顾大可／副教授

关键词／Keywords
组合预测·
模糊层次分析·
超短期预测·
风电功率·

对于有大规模风电接入的电网，可预测性是处理风电波动带来的不确定性的关键。风电功率的准确预测将有利于电网调度，并降低电力运行的难度。因此，对超短期风电功率进行准确预测和深入研究具有较为实际的意义。常见的预测方法一般有时间序列法、灰色预测法、神经网络法、模糊逻辑法、聚类分析法和专家系统法等。以上方法都是基于历史数据和调查统计数据来研究功率变化的规律性，由于各预测方法本身存在不同的优缺点，因此采用不同的方法往往得到不同的结果。

单个预测方法的基本思想是在统计学基础上建立模型进行预测从而得到预测结果的最优解，使其与实际数据相匹配，求解出功率预测的相对误差最小值，最终得出最优的预测满意值。但由于单个预测方法建模在很大程度上会导致预测结果的误差较大，为了实现更高的预测准确度并分散风险，J. M. Bates和C. W. J. Granger在1969年提出了组合预测方法。组合预测法在近年来已经成为预测领域中应用的一个主流研究方向，区别于以往的组合预测方法都只停留在依赖于历史统计数据，组合预测值的求取是通过对单个方法预测值的算术平均值进行加权，从而得出更为准确的预测结果。首先列举了几种不同的单个预测方法，其次将专家决策判断与建模方法相结合，最终进行风电功率超短期预测。此模型的主要特点是针对风电功率预测引入层次分析结构[1-2]，然后构造模糊层次分析处理以及相应的模糊互补判断矩阵[3-5]，最后给出实际算例进行验证。

青海省光伏发电并网技术重点实验室开放课题（SGQHDKY0DWJS1500061），国家自然科学基金资助项目（No.61321062），吉林省自然科学基金资助项目（No.20140520061JH），吉林市科技局青年基金资助项目（No.201464050）。

组合预测

假设在某一实际预测问题中，某一时段的实际值为$y_t(t=1,2,\cdots,n)$，针对问题存在m种预测方法，其中第i种方法对t时段的预测值可表示为f_{it}。此时可将各种单个预测方法的权重设为$W=(w_1,w_2,\cdots,w_m)^{\mathrm{T}}$，并满足$\sum_{i=1}^{m}w_i=1$。

组合预测模型可以表示为

$$y_t=\sum_{i=1}^{m}w_i f_{it}\quad t=1,2,\cdots,n \tag{1}$$

层次分析法

1. 层次分析法原理

层次分析法（Analytic Hierarchy Process，AHP）是20世纪70年代初由美国运筹学家Satty提出的一种多目标决策评价方法[6-7]，它将决策者对复杂问题

中国知网 https://www.cnki.net

的判断决策进行定量分析，并广泛应用于决策分析中。基本思想是决策者首先将复杂问题按照若干准则分解为不同层次和与之对应的若干待选方案，将各个备选方案通过简单地判断、比较和计算，从而获得各个备选方案和不同层次之间的权重，最终为最优方案的选择提供决策依据。

层次分析法具有系统、简洁和灵活的优点，其特点是具体问题的求解过程数字化、系统化，以便于决策，从而建立多层次、多因素的非结构问题模型。在使用这种方法时，虽然只需较少的定量信息，但要求专家决策者能够准确掌握决策问题的基本性能、分类因素及其各因素相互之间的层次结构关系。

2. 计算层次分析法的基本步骤

针对层次分析法进行建模来解决实际问题，具体可以分为以下几步。

步骤1：建立目标层次模型的多级递阶结构。

在层次分析法中最重要的部分是将所有问题都视为层次结构问题来进行处理，通过对风电系统的特性进行研究，逐层分析总目标与各影响因素之间的关系。

步骤2：将上一层级的因素作为准则，对相同目标层的因素进行两两比较，并建立判断矩阵，根据规则比例来比较确定其相对重要程度。

假定有m个标准/子目标：C_1'，…，C_m'。对于总目标G，如果其中一个专家认为C_i'比C_j'重要，则存在$c_{ij}=s_i/s_j$，s_i、$s_j\in S$，且$s_i>s_j$。由集合$S=\{1,2,3,\cdots,9\}$来确定比例的具体值，某个专家认为C_i'优于C_j'的程度由比例值c_{ij}表示。并且，对于所有的i和j，$c_{ii}=1$，$1\leqslant i\leqslant m$，存在$c_{ij}=1/c_{ji}$。方案之间的两两比较组成$m\times m$的判断矩阵$\boldsymbol{C}$，它是正的可逆矩阵并且它的输入为比例c_{ij}。同样，假定有n个备选方案：A_1'，…，A_n'，在另一层，对于每一个标准$C_k'(1\leqslant k\leqslant m)$，将各个备选方案之间进行成对比较组成$n\times n$的判断矩阵$A_k'(1\leqslant k\leqslant m)$（如表1所示），它是一个正的可逆矩阵，并且其输入为比例a_{ij}。

步骤3：通过计算，分析确定各方案的相对重要程度，即权重计算。

根据上一步给出的正的可逆矩阵$\boldsymbol{C}$，得到对应的一组特征值，令其为λ_1，…，λ_m。找到其中的λ_{max}，对应有唯一的特征向量$v^{\mathrm{T}}=(v_1,\cdots,v_m)$，并对于所有的$\lambda_i\neq\lambda_{max}$，有$|\lambda_i|<\lambda_{max}$，因此可得到$Cv=\lambda_{max}v$。对于所有$i$，$v_i>0$且$\sum_{i=1}^{m}v_i=1$，向量$v$是$C$的权重。即可求出每一个方案$A_k(1\leqslant k\leqslant m)$的$\lambda_{max}$所对应的特征向量$w_k^{\mathrm{T}}=(w_{1k},\cdots,w_{nk})$。

步骤4：通过对重要程度的综合评定，对各种替代方案进行优先排序。

层次分析的最终结果就是对所有准则的可选择程度进行先后排序。那么，假定可逆的$m\times m$矩阵$\boldsymbol{C}$，$n\times n$的矩阵$\boldsymbol{A}_k(1\leqslant k\leqslant m)$是一致存在的，因此可求出最终的可选择程度排序，即向量$\gamma^{\mathrm{T}}=(\gamma_1,\cdots,\gamma_j,\cdots,\gamma_n)$，其中$\gamma_j=\sum_{k=1}^{m}w_{jk}v_k$。备选方案$A_j'$的权重为$\gamma_j$，$1\leqslant j\leqslant n$。

表1为方案A_k'对于准则C_k'的判断矩阵。

表1 方案A_k'对于准则C_k'的判断矩阵

C_k'	A_j'	A_2'	…	A_i'	…	A_j'
A_j'	a_{11}	a_{12}	…	a_{1j}	…	a_{1n}
A_2'	a_{21}	a_{22}	…	a_{ij}	…	a_{2n}
…	…	…	…	…	…	…
A_i'	a_{i1}	a_{i2}	…	a_{ij}	…	a_{in}
…	…	…	…	…	…	…
A_j'	a_{n1}	a_{n2}	…	a_{nj}	…	a_{nn}

层次分析结构体系

层次分析法主要有3个层次结构体系：目标层G、标准层C和备选方案层A，如图1所示。

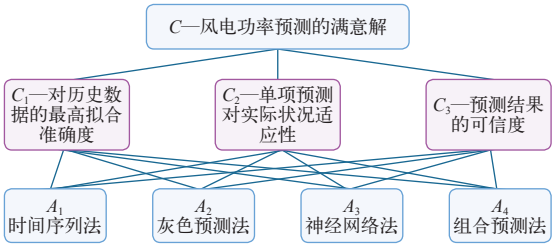


图1 风电功率超短期预测的层次分析结构

1. 目标层

目标层一般表示决策问题的预定目标或理想

中国知网 https://www.cnki.net

结果，该方法中将风电功率组合预测得到最优预测结果视为决策目标。

2. 标准层

标准层简称为中间层，也可将其看作是子目标层。这一层包括一些中间必须步骤来实现最终目标，它由若干个标准组成，每一个标准看作代表一个影响总目标的因素，但是具有不同的影响程度。另外，最底层中的每一种方案对上一层标准层的影响也不同。

3. 备选方案层

备选方案层由为实现目标可供选择的各种决策方案及其预测结果组成，当计算出每一个方案的权重结果时，就可以求出其相应的组合预测值。本文既采用了风电功率预测的常规方法，如时间序列法、灰色GM(1，1)，又采用了具有智能特征的方法（模糊理论、神经网络）。

改进层次分析法

将层次分析法原始方法进行一定的改进，在原有基础上使用模糊比例取代了原始比例来计算[8]。

1. 模糊互补判断矩阵和模糊一致判断矩阵

由于传统的层次分析法AHP是使用1～9比例来引发问题，其主要缺点是将互逆判断矩阵进行两两比较容易不一致。本文采用模糊互补判断矩阵，并引入了模糊比例（0.1～0.9）将其转换成模糊一致判断矩阵，其值和意义如表2所示。

表2 模糊互补矩阵比例（0.1～0.9）

a_{ij}	a_{ij}的含义	a_{ji}
0.5	A_i'等同于A_j'	0.5
0.6	A_i'略好于A_j'	0.4
0.7	A_i'明显好于A_j'	0.3
0.8	A_i'强烈好于A_j'	0.2
0.9	A_i'极端好于A_j'	0.1

模糊互补判断矩阵定义的相关描述如下。

1）在矩阵$\boldsymbol{A}=(a_{ij})_{n\times n}$中，若$0\leqslant a_{ij}\leqslant 1$，那么矩阵$\boldsymbol{A}$被称作模糊矩阵。

2）在模糊矩阵$\boldsymbol{A}=(a_{ij})_{n\times n}$中，若$a_{ij}+a_{ji}=1$，则矩阵$\boldsymbol{A}$被称作模糊互补矩阵。

3）在模糊互补矩阵$\boldsymbol{A}=(a_{ij})_{n\times n}$中，对于所有的$k$，存在$a_{ij}=a_{ik}-a_{jk}+0.5$，那么矩阵$\boldsymbol{A}$被称作模糊一致矩阵。

4）在模糊互补矩阵$\boldsymbol{A}=(a_{ij}^{(l)})_{n\times n}$，$l=1$，…，$S$中，定义$\overline{\boldsymbol{a}}_{ij}=\sum_{l=1}^{S}\lambda_l a_{ij}^{(l)}$，$\lambda_1>0$，$\sum_{l=1}^{S}\lambda_l a_{ij}^{(l)}\lambda_l=1$。那么$A_l$的复合矩阵定义为矩阵$\boldsymbol{A}=(a_{ij})_{n\times n}$，并记为：$\boldsymbol{A}=\lambda_1 A_1\oplus\lambda_2 A_2\oplus\cdots\oplus\lambda_S A_S$。

2. 计算模糊互补判断矩阵及其权重向量

根据权重向量及其单个预测方法的通用公式对于模糊互补矩阵$\boldsymbol{A}=(a_{ij})_{n\times n}$，每一行元素之和为

$$\gamma_i=\sum_{k=1}^{m}a_{ik}\quad i=1,2,\cdots,n \tag{2}$$

并将其转化为

$$\gamma_{ij}=\frac{\gamma_i-\gamma_j}{2(n-1)}+0.5 \tag{3}$$

由此得到一个模糊一致矩阵$\boldsymbol{R}=|\gamma_{ij}|_{n\times n}$，计算和标准化$\boldsymbol{R}$即可求得权重向量$W=[w_1，w_2，\cdots，w_n]^{\mathrm{T}}$，即

$$w_i=\frac{\sum_{j=1}^{n}a_{ij}+\frac{n}{2}-1}{n(n-1)}\quad i=1,2,\cdots,n \tag{4}$$

同理，根据权重向量及其群决策的通用公式得出，在一些情况下，需要有若干个专家参与决策，因此要求模糊互补判断矩阵、权重向量及通用公式能够应用于群决策。若存在S个专家，那么可给出的模糊互补判断矩阵个数为S个，$A_l=(a_{ij}^{(l)})_{n\times n}$，$l=1$，…，$S$，则矩阵$\boldsymbol{A}$的列元素之和可表示为

$\gamma_i^{(l)}=\sum_{k=1}^{m}a_{ik}^{(l)}$（$i=1,2,\cdots,n$；$l=1,2,\cdots,S$）。

并将其转化为

$$\gamma_{ij}^{(l)}=\frac{\gamma_i^{(l)}-\gamma_j^{(l)}}{2(n-1)}+0.5 \tag{5}$$

由此得出模糊一致判断矩阵$\boldsymbol{R}_l=[\gamma_{ij}^{(l)}]_{n\times n}$，$l=1$，…，$S$。

权重向量$W=[w_1，w_2，\cdots，w_n]^{\mathrm{T}}$是通过计算和标准化$\boldsymbol{R}'$求出，即

$$w_i=\frac{\sum_{l=1}^{S}\sum_{j=1}^{n}\lambda_l a_{ij}^{(l)}+\frac{n}{2}-1}{n(n-1)}\quad i=1,2,\cdots,n \tag{6}$$

权重的最终排序可由式（4）和式（6）进行

中国知网 https://www.cnki.net

求解。

实例分析

1. 备选方案及其预测结果

针对某风电场超短期的功率预测实测数据进行计算分析，引入模糊层次分析法。备选方案及预测结果如表3所示。

表3　备选方案及预测结果

分类 \ 时间	5 s 预测功率/kW	30 s 预测功率/kW	1 min 预测功率/kW
实际功率	85	87	93
时间序列法	69.336 8	71.724 9	71.374 7
灰色预测法	78.039 0	78.014 8	78.002 8
神经网络法	88.546 4	93.449 0	90.286 5

2. 模糊互补判断矩阵及其权重向量

将各标准相对于总目标进行两两比较，可得出模糊互补判断矩阵，由式（4）可求得每一个标准的权重，如表4所示。由式（6）可以计算群决策。

表4　各标准相对于总目标层的两两比较判断矩阵

准则	C_1'	C_2'	C_3'	权重
C_1'	0.5	0.8	0.4	0.366 67
C_2'	0.2	0.5	0.3	0.250 00
C_3'	0.6	0.7	0.5	0.466 67

针对每个标准，将各个备选方案进行两两比较，由式（4）可以计算相对每一标准各方案的权重，如表5所示。同理，由式（1）可以计算每个备选方案相对于总目标的权重，即

表5　各备选方案相对于准则层的两两比较判断矩阵

C_1'	A_1'	A_2'	A_3'	各标准权重
A_1'	0.5	0.4	0.2	0.266 67
A_2'	0.6	0.5	0.4	0.333 33
A_3'	0.8	0.6	0.5	0.400 00
C_2'	A_1'	A_2'	A_3'	各标准权重
A_1'	0.5	0.3	0.6	0.316 67
A_2'	0.7	0.5	0.4	0.350 00
A_3'	0.4	0.6	0.5	0.333 33
C_3'	A_1'	A_2'	A_3'	各标准权重
A_1'	0.5	0.2	0.6	0.300 00
A_2'	0.8	0.5	0.7	0.416 67
A_3'	0.4	0.3	0.5	0.283 33

$$W=\begin{pmatrix}0.267 & 0.317 & 0.300\\ 0.333 & 0.350 & 0.417\\ 0.400 & 0.333 & 0.283\end{pmatrix}\begin{pmatrix}0.367\\ 0.250\\ 0.467\end{pmatrix} \tag{7}$$

$$=[\ 0.317\,3\quad 0.404\,5\quad 0.362\,2\ ]^{\mathrm{T}}$$

预测结果如表6所示。

表6　各预测方法的预测结果对比

方法 \ 时间	5 s 预测功率/kW	30 s 预测功率/kW	1 min 预测功率/kW	权重
时间序列法	69.336 8	71.724 9	71.374 7	0.313 7
灰色预测法	78.039 0	78.014 8	78.002 8	0.404 5
神经网络法	88.546 4	93.449 0	90.286 5	0.362 2
组合预测	85.638 8	88.162 5	86.901 1	1

3. 仿真结果

图2为3种预测方法预测功率对比图。图3为3种预测方法及组合预测误差对比图。

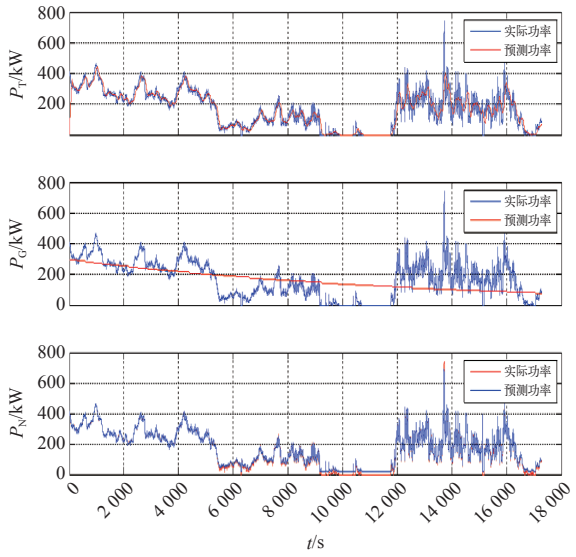


图2　3种预测方法预测功率对比图

结束语

所提出的基于模糊层次分析FAHP预测方法，将功率预测问题看作多层级决策问题，综合考虑了历史统计数据和若干不确定因素对预测值的影响程度强弱不同，同时引入专家经验判断。实例分析表明，该方法不仅可以将若干单个方法的优点进行结合，重要的是在预测结果中综合了专家的判断和决策。因此证实，其可应用于超短期的

中国知网　https://www.cnki.net

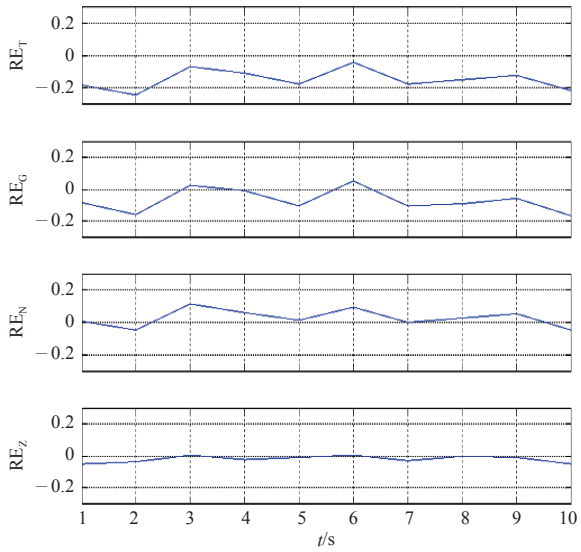


图3 3种预测方法及组合预测误差对比

功率预测中。

参考文献

[1] 郭金玉，张忠彬，孙庆云．层次分析法的研究与应用 [J]．中国安全科学学报，2008，18 (5)：148-153.

[2] 陈锦涛，李杰夫．基于层次分析法的电力负荷组合预测 [J]．现代计算机，2013，10 (28)：31-34.

[3] 吴丹，程浩忠，奚珣．基于模糊层次分析法的电力负荷组合预测 [J]．华东电力，2006，34 (4)：10-13.

[4] 刘赛，陈光东．层次分析法在电力负荷组合预测中的应用 [J]．长沙电力学院学报：自然科学版，2002，17 (4)：41-43.

[5] 赵云飞．层次分析法在电力负荷预测中的应用研究 [D]．武汉：华中科技大学，2005.

[6] Chow T W S，Leung C T．Neural network based short-term load forecasting using weather compensation [J]．IEEE Transactions on Power Systems，1996，11 (4)：1736-1742.

[7] Ji Aibing，Qiao Yanhua，Qiu Hongjie．Combination forecasting of fuzzy forecast [J]．Fuzzy Systems and Knowledge Discovery，2009，3 (1)：262-266.

[8] 耿光飞，郭喜庆．模糊线性回归法在负荷预测中的应用 [J]．电网技术，2002，26 (4)：19-21.

（收稿日期：2015－10－08）EA

(上接第31页)

1）当船舶电力系统工况确定后，根据电网电力参数可以建立相应的零序电压轨迹图。

2）零序电压轨迹法可以用来判别不同故障类型，利用零序电压轨迹图的起始扇区判别系统分布电容不平衡相，同时利用轨迹的趋势和落点判别单相接地故障相，若其符合某一轨迹曲线特征，还可以判别某相绝缘劣化即经过渡电阻接地故障的情况。

3）零序电压轨迹的起始扇区需在系统正常运行时确定，即系统未发生故障、绝缘电阻值很大时，此时认为系统仅存在电容引起的较小不平衡电压。

参考文献

[1] 张慧芬，潘贞存，田质广，等．一种中低压配电网单相接地故障选线新方法 [J]．电网技术，2005，29 (3)：76-80.

[2] 王兴国，黄少锋．过渡电阻对故障暂态分量的影响分析 [J]．电力系统保护与控制，2010，38 (2)：18-21.

[3] 陈禹任，查建平，高源，等．小电流接地系统单相接地故障分析 [J]．中国电力教育，2014 (15)：255-257.

[4] 王勇．船舶交流电力系统绝缘监测系统的研究 [D]．武汉：华中科技大学，2007.

[5] 郭清滔，吴田．小电流接地系统故障选线方法综述 [J]．电力系统保护与控制，2010，38 (2)：146-152.

[6] 李晓波，刘宝稳，王崇林．谐振接地系统零序电压轨迹及准确控制方法 [J]．电网技术，2013，37 (9)：2669-2674.

[7] 王玘，何正友，张姝．基于零序电荷－电压关系的谐振接地系统单相接地故障特征分析 [J]．电力系统保护与控制，2013，41 (11)：18-24.

（收稿日期：2015－02－10）EA

中国知网 https://www.cnki.net