

间歇性风电并网能源调度综合模糊评价系统设计

刘皓玉

(南京理工大学, 南京 210000)

摘要: 针对传统风电并网能源调度评价系统设计评估准确率低、系统响应时间慢的不足, 提出基于综合模糊理论的能源调度评价系统设计; 给出了模糊评价系统的硬件架构与软件实现流程, 依托于数据输入管理模块、编辑查询模块、模糊评价模块与数据输入模块构建了可变模糊评价模型, 并分别确定出两级的指标评价体系、权重指标和模糊隶属度矩阵; 基于模糊算子和模型参数确定出综合评价向量矩阵, 实现对并网能源调度方案的精确评价; 算例分析结果表明, 提出评价系统的平均偏差率可以控制到 0.131%, 显著优于传统能源调度评价系统。

关键词: 风电并网; 能源调度; 模糊评价; 模糊算子

Design of Integrated Fuzzy Evaluation System for Intermittent Wind Power Integration

Liu Haoyu

(Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210000, China)

Abstract: Aiming at the shortcomings of low accuracy and slow response time of traditional wind power Grid-connected energy dispatching evaluation system, a design of energy dispatching evaluation system based on comprehensive fuzzy theory is proposed. The hardware architecture and software implementation flow of the fuzzy evaluation system are given. Based on data input management module, edit and query module, fuzzy evaluation module and data input module, a variable fuzzy evaluation model is constructed, and two-level index evaluation system, weight index and fuzzy membership matrix are determined respectively. The fuzzy operator and model parameters determine the comprehensive evaluation vector matrix to realize the accurate evaluation of the energy dispatching scheme. The result of the example analysis shows that the average deviation rate of the proposed evaluation system can reach 0.131%, which is significantly better than the traditional evaluation system design.

Keywords: wind power integration; energy dispatching; fuzzy evaluation; fuzzy operator

0 引言

由于煤炭、石油、天然气等非可再生能源储量的持续减少, 全球面临着严重的能源短缺和能源危机, 世界各国都将目光投向了可再生的清洁能源。风能是一种优质的新能源、储量丰富、潜力巨大, 逐渐成为了世界能源领域的研究重点。但风能发电具有间歇性和不确定性的缺点^[1-2], 一旦断电会给电网造成难以估量的损失, 为了克服风能发电的不足, 越来越多的电网系统都采用了并网发电的方式, 并在传统发电模式与新能源发电模式之间进行调度和切换, 既节省了非可再生能源的使用量又保证了电网的安全与稳定。风机的单机容量与电网的并网规模成正比, 越是大规模的电网系统就越要重视风电并网的能源调度问题, 并定期对调度模式的执行结果与运行效果进行评价。为了保证电网系统的稳定, 电力需求与供给需要时刻保持均衡, 由于风能的间歇性给能源调度带来一定的难度, 因此对于能源调度效果的评价体系就会发挥重要的作用。

风电并网能源调度评价系统, 能够准确地预测出稳定性较差的风电部分的发电功率、控制时间等要素, 以最大限度地减少系统资源的占用、减轻调度任务、避免停电事故的发生, 并保证电网系统以最经济的方式运行。传统风电并网能源调度评价系统设计在功能性、成本控制及实用性方面有待提高, 如基于神经网络的评价系统^[3]设计需要较为完善的基础数据、评价成本较高; 而基于遗传算法的风电并网调度系统设计^[4], 容易在局部陷入最优解, 综合评价的误差较高与真实的能源调度情况偏差较大。为此本文设计了一种基于模糊综合评价方法的风电并网调度评价系统设计, 旨在提高风能在并网发电中的供电比例, 降低发电成本损耗。

1 风能并网发电模糊调度评价模型

发展风能等清洁能源是未来能源产业的主要发展趋势之一, 合理地规避风能间歇性特性, 有效地实现风能发电与火力发电之间的无缝衔接, 对于风能产业未来的发展具有重要的意义。为了保证电力系统供电的稳定性, 我国已对并网发电提出了相关规定, 需要建立完善的调度机制与评价系统。鉴于风能发电的不可靠性, 要强化对风能间歇性的预测, 并实时风能发电的并网管理和评价管理, 可以

收稿日期: 2018-09-05; 修回日期: 2018-10-09。

作者简介: 刘皓玉(1981-), 男, 辽宁锦州人, 硕士研究生, 高级工程师, 主要从事基于模糊层次分析法的企业绩效评价方向的研究。

有效降低电网故障的概率。此外风能资源调度模糊评价系统，还能够对网络的故障实时监控，提高设备的稳定率及风场能源的利用效率。在提高风电并网能源调度的基础上，能源调度模糊评价系统设计使电力系统的调度计划执行的依据更为可靠，保证了电力能源的平稳输出，也最大限度地利用了风能这种可再生的清洁能源。由于风能发电具有较大的不稳定性 and 不确定性，影响风能稳定输出的因素也较多，因此风能并网发电的过程调度与分解适用于模糊评价方法，模糊评价基于模糊数学理论^[5]中的模糊隶属度相关^[6-7]概念，将具体的评价过程量化处理。在风能发电并网能源调度过程中，为满足新能源优先使用的原则，先确定调度模型的目标函数：

$$\min \left(\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^k p^t \right) \quad (1)$$

其中： p^t 为风能供电场在 t 时刻的供电功率、 T 为调度周期的总时段数、 k 为风能场站的数量。基于模糊调度方法构建模糊评价模型，对能源调度的具体情况进行评价，需要首先确定影响模糊评定系统设计的相关因素，构建风电并网调度模糊评价系统模型主要步骤，如图 1 所示。

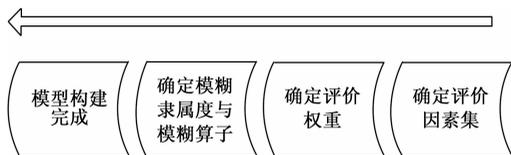


图 1 风能发电并网调度模糊评价模型的构建

本文设计的模糊评价系统设计因素集分为两级指标，第一级指标集合为：

$$U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\} \quad (2)$$

对上述的一级指标体系进行细分，从确定二级评价指标体系：

$$\begin{cases} u_1 = \{u_{11}, u_{12}, \dots, u_{1n}\} \\ u_2 = \{u_{21}, u_{22}, \dots, u_{2n}\} \\ \dots \\ u_m = \{u_{m1}, u_{m2}, \dots, u_{mn}\} \end{cases} \quad (3)$$

对评价因素集进行分析，并得到权重分配及评价及的而模糊隶属度，将全部评价指标放置于模糊评价矩阵之中进行综合评定，模糊矩阵 U_{mm} 可以表示为：

$$U_{mm} = \begin{bmatrix} U_{11} & U_{12} & \dots & U_{1n} \\ U_{21} & U_{22} & \dots & U_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ U_{m1} & U_{m2} & \dots & U_{mn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

在基于模糊综合评价方法的风能并网发电评价系统中，各评价指标的权重比例较为均衡，故可以选用加权评价算子来确定各个影响因素所占的权重比例，从而评价出调度方案性能的优劣。本文设定的评价因素集为二级评价集，需要先给出各种二级评价因素的综合模糊隶属度与模糊评价矩阵，之后在结合一级评价因素进行综合的评定。该种模糊评价系统设计可以准确地确定出各种调度方案及影响

因素的实际运行效果，协助电网管理人员逐步完善电力系统的调度方案，提高风力发电的安全性及在发电总量中所占的比例。而基于模糊评价系统的风力发电能源调度系统设计，能够对风能发电做出较为准确的预测，并在此基础上优化风能新能源发电与活力发电之间的能源调度水平，合理调整电能备用容量解决电网系统运行的经济性问题。

2 风电并网能源调度模糊评价系统硬件设计

间歇性风电并网能源综合模糊评价系统设计，采用 ARCGIS 数据结构作为标准的数据来源，建立了多维的评价指标体系和数据库体系，基于专门开发的风力资源调度数据访问接口和专业的数据搜索与查询引擎，对各种调度方式的性能进行综合的评价与比较，评价结果较为客观、真实。模糊综合评价系统设计基于可变模糊数学原理和空间集成分析手段，提高了对电能分配结果评价的真实性和准确性。能源调度综合评价信息系统设计的总体目标，是实现对风力能源调度信息的可视化和一体化管理，进而能够将能源调度的结果以报表的形式输出，满足电网管理层监控与决策的需要。综合模糊评价系统的硬件部分主要由 4 大模块构成，即风能调度数据的输入输出管理模块、数据的编辑及查询模块、模糊分析与评价模块及结果输出模块，该能源调度评价系统的硬件结构设计，如图 2 所示。

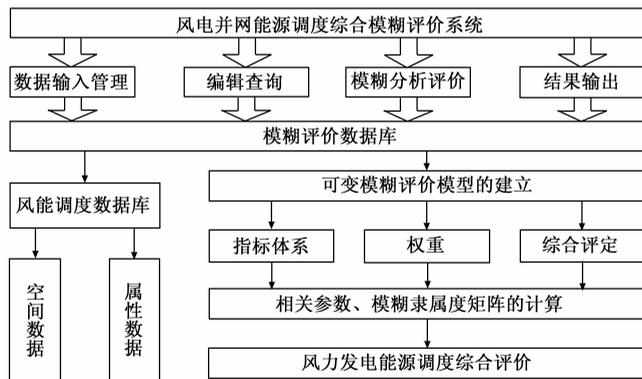


图 2 风电并网能源调度评价系统硬件结构设计

风电并网能源调度数据的输入与管理模块主要负责调度数据的采集和分析，并将预处理后的数据输入模糊评价管理系统。该模块还具有原始数据的查询、分析、插入及删除功能，能够将风电并网能源调度的实际情况完整地呈现出来，并将初始的数据分析结果输入模糊控制系统，进行更为完整的平均和分析。采集到的风电并网数据通常具有一定的周期性，以便将综合地评价调度算法的合理性。风电调度数据既包括基础性的原始数据，也包括各种监测参数。数据输入管理模块获取原始风电并网能源调度数据后，还要基于评价系统的编辑和查询模块对原始数据进行分析和预处理，该模块的基本功能是实现评价系统的 GIS 功能，包括各种调度数据的测量、引用和编辑。其中数据的查询和选择功能依据能源调度结果确定和调整，而数据定位和编辑功能的实现，可以依据数据库中的原始数据重

新的写入。

间歇性风电并网能源调度评价系统设计中的综合模糊评价模块，是整个硬件系统中的核心模块，具体可以通过人机交互的方式，对风电并网能源调度的实际效果做出综合评价。在保证电网稳定供电的前提下，如果使用风能清洁能源发电所占的比例越大，则证明调度系统更有效；在同等的条件下，如果风能供电比例没有得到相应的提高，则表明整个调度机制的评价效果不理想，仍需要进行改进。综合模糊评价模块具有评价指标体系的管理、指标标准值的确定、模型的构建及评价结果分析等功能。在一级评价指标、二级评价指标和指标权重的选择与确定方面，主要基于不同风电场的特点来进行模糊计算与叠加，并充分考虑到指标体系之间、指标之间的相关性，确保指标体系具有更好的覆盖性。在评价方式上侧重于人机交互方式的选择，选取的评价指标要具有代表性，综合模糊评价模块可以基于用户的具体需求而进行平均指标的替换和指标权重之间的调整，模块的源程序与执行程序都能够作为评价系统设计的依据，评价参数的选择及参数调整都可以基于具体调度方案执行。评价系统设计的结果输出模块的基本功能是将模糊评价后的结果直观地显示出现，风电并网能源调度系统的管理人员，可以基于得到的模糊评价结果来判定所选择的调度方案是否可行。结果的属性形式可以自行选择，包括文字形式、符号形式、及图形形式等，显著结果更为直观和便捷。

间歇性风电并网能源调度综合模糊评价系统设计硬件模块之间并不是孤立存在的，各个模块之间通过人机交互系统进行连接，如图 3 所示。

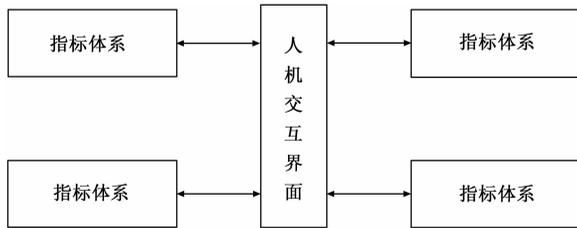


图 3 模糊评价系统硬件模块之间的功能衔接

人机交互界面的使用既使硬件部分的各个功能之间的衔接更为紧密，也便于操作者的使用。由于模块之间的功能性相对独立，加入人机交互界面后，将这些模块有机地连接与一体，是调度数据的分析、处理和调用的过程更为便捷和高效。此外人机交互界面的加入，也为后续评价系统的完整与优化提供了更大的空间，便于后续的维修与升级。

3 风电并网能源调度评价流程与评价算法的实现

鉴于间歇性风电并网能源调度的数据量庞大，对系统数据处理速度要求较高，系统硬件的性能与模块参数要不断地进行调整与改善，同时与之相匹配的软件流程与评价算法也要持续地做出更新与调整。风电并网能源调度综合

模糊评价系统设计的软件实现环境，主要包括各种软件协议，数据库的分类与部署，客户端与模糊评价模块之间的信息传递等。同时模糊评价系统设计的软件操作系统兼容性需要达到一定的标准，这样才能够满足调度方式精确评价的要求，具体的评价流程如图 4 所示。

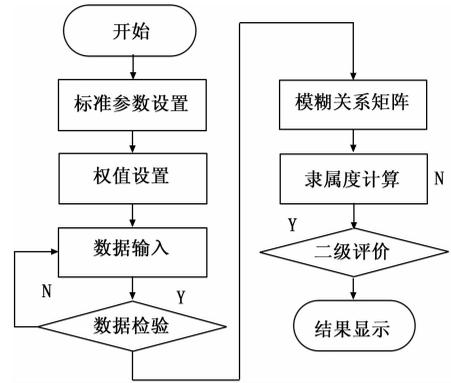


图 4 风电并网能源调度模糊综合评价流程

开始模糊评价后先确定系统的二级评价指标体系和各项标准参数，确定完各项指标体系后将数据输入管理模块进行检验。若符合检验的标准将这些评价指标数据输入模糊关系矩阵，并进行模糊隶属度的计算；调度数据没有通过检验，则需要重新输入。风电并网能源调度的模糊评价过程由系统自动完成，模糊关系矩阵的设定基于各类评价对象的模糊等级隶属度，如果模糊隶属度不同那么得到的关系矩阵也不同。本文采用检测值与标准值之间距离的判定方式，来建立评价指标间的模糊隶属关系。

如果用指标 u_{ij} 表示第 i 项指标与第 j 项风电并网能源调度方案之间的模糊隶属度关系，则 u_{ij} 可以表示为：

$$u_{ij} = \begin{cases} 1, & x_i \leq \tau_{i(j-1)} \\ d_{ij}(x_i - \tau_{i(j-1)}), & \tau_{i(j-1)} < x_i < \tau_{ij} \\ d_{ij}(x_i - \tau_{i(j+1)}), & \tau_{ij} \leq x_i \leq \tau_{i(j+1)} \\ 0, & x_i > \tau_{i(j+1)} \end{cases} \quad (5)$$

其中： x_i 为第 i 个指标的检测值， τ_{ij} 表示为第 i 项指标与第 j 项风电并网能源调度方案之间的权限值， d_{ij} 为两项权限值指标距离的倒数，可以描述为：

$$d_{ij} = \frac{1}{|\tau_{ij} - \tau_{i(j-1)}|} \quad (6)$$

并网调度方案所属的权限值不同，在计算中也需要做出相应的调整。在模糊隶属度的计算中，需要选择合适的算子对权值与模糊矩阵进行合成运算，模糊算子 $\xi(\cdot)$ 表示为：

$$\xi(\cdot) = (1, \sum_{i=1}^k u_{ij} r_{mi}) \quad (7)$$

其中： r_{mi} 表示模糊关系矩阵中的每一项评价指标，这时得到了评价调度方案运行效果的综合评价向量矩阵 E ，可以表示为：

$$E = U_{nm} \cdot R_{nm} \quad (8)$$

利用综合模糊系统设计的合成运算方法，就可以在在

界面上显示出综合评价向量 E 。该评价向量能够准确地出综合样本评价数据的模糊隶属度，并以此来判定间歇性风电并网能源调度评价方向的效率和效果。为了得到更为真实、准确的评价结果还要对二级评价指标的模糊隶属度进行评价，这样得出的评价结果更为完整。本文提出了一种基于模糊综合评价方法的风电并网能源调度评价系统设计，采用两级指标评价体系模式针对不同的调度方案做出效果评价。样本点的权值分布和相关参数也可以得到实时的布局和调整，该种评价方法可以克服传统评价方法客观性不足、成本过高及评价结果也实际偏差过大的不足，并能够基于评价结果识别出最为重要的影响因素，以便有针对性地及时做出合适的调整方案。基于模糊综合评价方法而构建的风能并网能源调度评价系统设计，考虑到了多个层次指标对评价系统产生的影响，而采用模糊数学理论和模糊算子对两个层次的指标都做出了准确的评估，而使得到的结果较为均衡、全面。

4 算例分析

以 H 风力发电站风电并网调度的实际数据为研究样本，采样周期为 2017 年 1 月—12 月，一级评价指标体系为 u_1 调度效率、 u_2 调度成本；二级评价指标设定为 u_{11} 系统响应时间、 u_{12} 电力网络切换时间、 u_{21} 风力供电时长、 u_{22} 电力网络成本、 u_{23} 停机总成本。确定评价指标体系后采用专家赋权法确定指标权重，并基于 9 标度方法判断指标之间的重要性比较矩阵 C ：

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 5 & 7 & 5 & 5 \\ 1/7 & 1 & 1/3 & 1/3 & 1/3 \\ 1/5 & 5 & 1 & 1 & 1 \\ 1/5 & 5 & 5 & 1 & 1 \\ 1/5 & 1 & 3 & 5 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

基于模糊评价算子获取评价指标体系的权重比例 $[0.536, 0.048, 0.125, 0.141, 0.145]$ ，此时得到了风电并网能源调度综合评价的模糊矩阵 E ，表示为：

$$E = \begin{bmatrix} 1 & 5 & 7 & 5 & 5 \\ 1/7 & 1 & 1/3 & 1/3 & 1/3 \\ 1/5 & 5 & 1 & 1 & 1 \\ 1/5 & 5 & 5 & 1 & 1 \\ 1/5 & 1 & 3 & 5 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0.536 \\ 0.048 \\ 0.125 \\ 0.141 \\ 0.145 \end{bmatrix} \quad (10)$$

得出综合模糊评价矩阵的评价值后，需要验证文中提出评价系统的有效性，即比较不同评价系统的评价精度与理论值的差距，比较结果如图 5 所示。

图 5 中的由虚线构成的面为最优的理论调度值集合，即在理论条件下实现风能电网和火电网的无缝衔接，此时的网络切换成本最低，但在实际的网络调度中无法实现。基于各种不同风电并网调度评价方法的目的就是在保证组网安全的条件下，最大限度的降低能源消耗成本，使风力网络发电的市场控制到最大。如图中的数据变化所示，分别采用本文提出的模糊综合评价系统设计与传统的神经网络评价系统设计的评价结果进行比较，结果显示文中系统设计提取的 15 个数

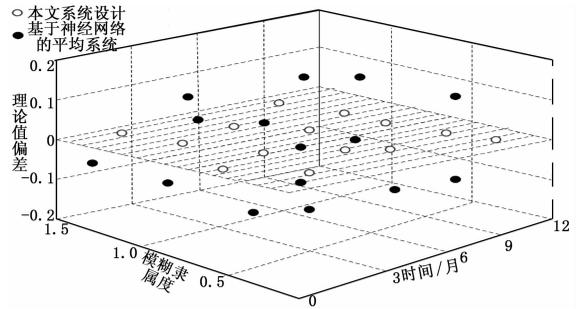


图 5 不同评价系统设计条件下的结果比较

据点的评价值都接近与理论值，平均偏差率为 0.131%；而传统的基于神经网络的平均方法，平均偏差率为 0.896%，由此可见模糊评价方法在评价准确率方面更接近与理论值，因此也能够选出最优的风险并网调度方案。

文中又对比了两种评价系统设计环境下不同电力网络之间进行切换的成本，如果能够根据评价指标提前预测出电力网络系统的稳定性，就可以更低成本实现电力组网的切换，具体采集到的数据如表 1 所示。

表 1 电力网络切换成本及响应时间对比

记录时间	组网切换成本/万元		系统响应时间/min	
	综合模糊评价系统设计	基于神经网络方法系统设计	综合模糊评价系统设计	基于神经网络方法系统设计
17.1.5	2.51	5.64	15.2	35.6
17.1.31	2.15	4.56	14.5	30.2
17.2.6	1.96	5.32	10.3	28.2
17.2.15	2.36	4.14	11.3	27.4
17.6.3	2.14	3.65	9.9	20.6
17.6.5	1.56	4.65	10.3	30.9
17.11.30	1.65	5.12	12.5	31.2
17.12.6	2.64	5.32	13.6	30.1

实际的分析数据结果表明，模糊评价系统设计在评价准确性和经济性方面优于传统的评价体系，能够在保证风电占组网安全的条件下，获得最低的运营成本。

5 结论

风能作为一种高效的清洁能源，受到了越来越多国家的青睐，由于我国的地形地势较为复杂，部分地区特别是西部地区的风能储备十分丰富，这对于缓解目前我国的能源危机具有重要的意义。但风能发电具有一定的间歇性和不稳定性，需要在风能电网与传统火力发电网络之间进行自由切换。由于传统火力发电方式的成本较高，因此对并网能源调度时机的选择与调度系统评价至关重要。为提高能源调度评价的准确性，本文基于模糊评价理论设计了一种评价系统，分别介绍了系统的硬件构成与软件算法，通过指标系统的评估可以准确地对调度方案进行评价，实际的算例分析表明提出的评价系统设计在准确性方面更接近与理论值。