文章编号：1008－8857(2022)02－0088－06　**DOI**: 10.13259/j.cnki.eri.2022.02.004

应用于平抑风功率的燃氢燃气轮机储能系统控制策略研究

王阳璨旭[1]，高　进[1]，吴　柯[1]，马榕谷[2]，李　瑾[1]
（1. 新疆工程学院 能源工程学院，新疆 乌鲁木齐 830000；2. 国网乌鲁木齐供电公司，新疆 乌鲁木齐 830000）

摘　要：储能技术可用于提高风电并网能力，因此其储能系统及控制策略成为研究热点。提出将燃氢燃气轮机作为储能系统主要部分，低通滤波器结合模糊控制作为其平抑风功率的控制策略。通过设定储氢罐容量，对 15 台 1.5 MW 风机的历史风功率数据进行了处理。结果表明：低通滤波器结合模糊控制能有效平抑风功率至限制值，实现平抑指标，并得到储氢罐容量的设置限制；可实现储能时燃气轮机不工作，耗能时燃气轮机工作，当储氢罐容量为 0.017 m^3 时，燃气轮机输出功率为 0.1 MW。在将燃气轮机作为平抑风功率的储能系统时，需将燃气轮机的启停控制作为今后的研究重点。

关键词：风电平抑；燃氢燃气轮机；储能；控制策略
中图分类号：TK919　　**文献标志码**：A

Research on control strategy of the application of hydrogen gas turbine energy storage system to smooth wind power

WANG Yangliangxu[1]，GAO Jin[1]，WU Ke[1]，MA Ronggu[2]，LI Jin[1]
(1. College of Energy Engineering, Xinjiang Institute of Engineering, Urumqi 830000, China;
2. State Grid Urumqi Power Supply Company, Urumqi 830000, China)

Abstract: Energy storage system and control strategy are the main research directions for the application of energy storage technology to improve the connection ability of wind power to grid. hydrogen gas turbine as the main component of the energy storage system was proposed with the combination of low-pass filter and fuzzy control as its main strategy to smooth wind power. Historical data including 15 of 1.5 MW wind turbines was processed via setting the capacity of hydrogen storage tank. Results show that the combination of low-pass filter and fuzzy control could effectively deal with the wind power to the limited value to achieve its smoothing. The setting limitation of hydrogen storage tank capacity could be obtained. The gas turbine stopped during energy storage process while it worked during energy consumption process. When the hydrogen

收稿日期：2021－02－01
基金项目：新疆工程学院校级项目(2018xgy152105)
第一作者：王阳璨旭(1992—)，女，讲师，硕士。研究方向：新能源储能。E-mail：sammywylx@sina.com

storage tank capacity was 0.017 m^3, the output power of gas turbine was achieved at 0.1 MW. When the gas turbine was adopted as an energy storage system to smooth wind power, its start and stop control was required in future study.

Keywords: wind power smoothing; hydrogen gas turbine; energy storage; control strategy

随着风力发电的输出电能在电力系统中所占比重的增加，其输出功率的波动性给电网运行带来的不利影响日趋严重[1–5]。为了提高风电场并网运行能力，越来越多的研究人员采用储能技术对风机机组输出功率进行调控，使风电场效益最大化[6–13]。综合储能系统容量、寿命、成本等因素，储能系统应具备存储密度高、使用寿命长的特点。

目前关于储能系统用于平抑风功率的研究重心主要在：储能系统的选择、储能功率和容量配置、平抑波动控制算法和能量管理方法[14]。储能系统有平抑短时波动和平抑长时波动两种常用分类，常用的平抑短时波动的储能系统有超级电容，平抑长时波动的储能系统有电池储能、抽水蓄能、压缩空气储能等。基于储能系统需要能量密度大、充放电次数多、使用寿命长、环境限制较少等特点[14]，本文提出一种微型燃气轮机储能系统，其运行稳定，在风电领域中常用作联合发电[15–16]。国内外有学者在研究氢储能消纳多余风能时多采用氢燃料电池等[17]。基于氢的热值高、无污染等优势[18]，近年来，不少学者选择氢作为燃气轮机工质[19]。

在满足储能系统容量等目标时，除了需要考虑除储能系统自身的影响外，还要考虑风功率波动时用以平抑波动所用控制策略的影响[20]。常用的平抑波动控制策略有一阶滤波控制算法、卡尔曼滤波和模型预测控制等[11, 14, 21–22]，以及从基础控制算法、滤波算法中衍生出的联合控制算法，如滑动滤波和模糊控制[23]、预测模型和模糊控制[24]等。考虑到储能系统的不确定性和并网风功率的限制条件，本文选择低通滤波器结合模糊控制的平抑控制策略。

2　储能系统结构

燃氢燃气轮机储能系统主要由电解槽、储氢罐、燃气轮机、控制系统组成。

风电输出功率会受到并网功率的限制，高于或低于限制值的风电输出功率均无法直接并入电网。高于限制值的风电输出功率可通过电解槽储存在储氢罐中；当风电输出功率低于限制值时，储氢罐释放氢能，燃氢燃气轮机开始工作，输出的电能接入电网。通过此途径实现“削峰填谷”。

在风电输出功率后加入判断策略，以确定输出功率是否在并网所要求的功率限制范围内；“削峰填谷”时需用到平抑控制策略，平抑控制策略采用低通波器结合模糊控制；储氢罐容量未确定时，以设定值作为暂定值，结合控制策略结果和风功率变化情况求得储氢罐容量的确定值。

图 1 为系统结构图。

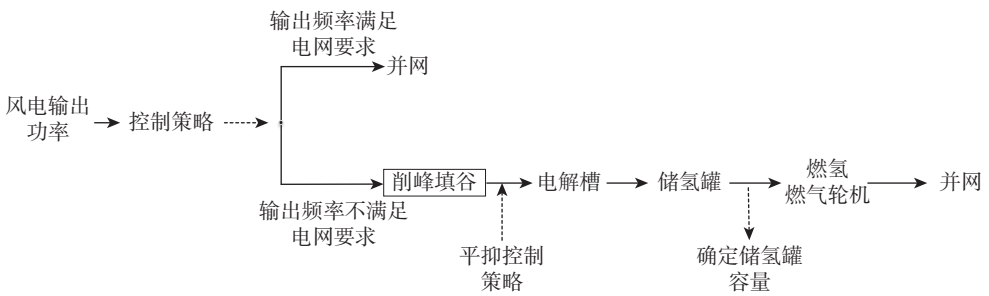

图 1　系统结构图

Fig. 1　System structure

3 仿真系统建模

3.1 数学模型和控制策略

燃氢燃气轮机输出功率 P_{MT} 为

$$P_{MT}=\frac{Q_M}{\mu}\cdot\eta_{MT} \tag{1}$$

式中：P_{MT} 为输出功率；η_{MT} 为燃氢燃气轮机系统效率，燃氢燃气轮机系统包括燃气轮机压气机、燃烧室、燃气轮机；μ 为生产每 kW·h 电所需要的氢气量；Q_M 为输入燃氢燃气轮机的氢气量。

仿真计算时风功率采用历史风功率数据。对电解槽、储氢罐及燃气轮机进行数学建模。

电解槽产生的氢气量 Q_{ele} 为

$$Q_{ele}=P_{ele}\eta_{ele}\rho \tag{2}$$

式中：P_{ele} 为输入电解槽的功率；η_{ele} 为电解槽效率；ρ 为每 kW·h 电能够制取的氢气量。

储氢罐存储的氢气能 Q_{tan} 可表示为

$$Q_{tan}(t)=Q_{tan}(t-\Delta t)+Q_{ele}(t)\Delta t-\frac{a}{b} \tag{3}$$

式中：η_{tan} 为储氢罐存储效率；t 为时间；Δt 为时间间隔。

在风电不足时燃氢燃气轮机消耗储氢罐中的氢气来输出功率以弥补所缺少的功率。

本文中燃氢燃气轮机储能系统主要由电解槽、储氢罐、燃氢燃气轮机系统三部分组成。电解槽效率、储氢罐存储效率、燃气轮机系统效率的计算方法已在上述公式中分别表述，储能系统效率则为这三部分效率的乘积。

3.2 仿真参数

为了验证低通滤波结合模糊控制的控制策略用于平抑风功率的效果，首先在 simulink 软件中搭建主要由燃烧工质是氢气的燃气轮机所构成的储能系统整体模型，然后采用历史风功率数据作为输入数据进行仿真。其中，所用的仿真数据为某风电场 15 台 1.5 MW 风机的历史风功率数据。

在 24 h 内按分钟级处理数据，选取共计 1 440 个数据点。选取风功率的中间值，并将该值波动 10% 作为平抑后的目标功率。基于确定的目标功率对滤波器的通过频率和截止频率进行定义，经低通滤波器得到平抑后的风功率、储氢罐容量和燃气轮机输出功率曲线。

已知条件是历史风功率，根据本文的平抑要求，得到平抑后可直接并入电网的风功率以及冗余风功率，冗余风功率被电解槽、储氢罐、燃气轮机系统存储作为备用电能使用。通过低通滤波器结合模糊控制对风功率进行平抑，在获得理想平抑后风功率时得到储氢罐应设置的容量、电解槽输入电能（即冗余风功率）、电解槽输出氢气量（即储氢罐输入氢气量，以储氢罐容量表示）、燃气轮机参数。

仿真的限制条件：①取风电场一天中每 min 风功率中间值波动 10% 作为平滑效果的平抑指标；②储能系统在满足储能时燃气轮机不工作，耗能时燃气轮机工作，在满足控制要求的同时，提高储能系统自身利用率，即提高系统稳定性。

求解流程如图 2 所示。

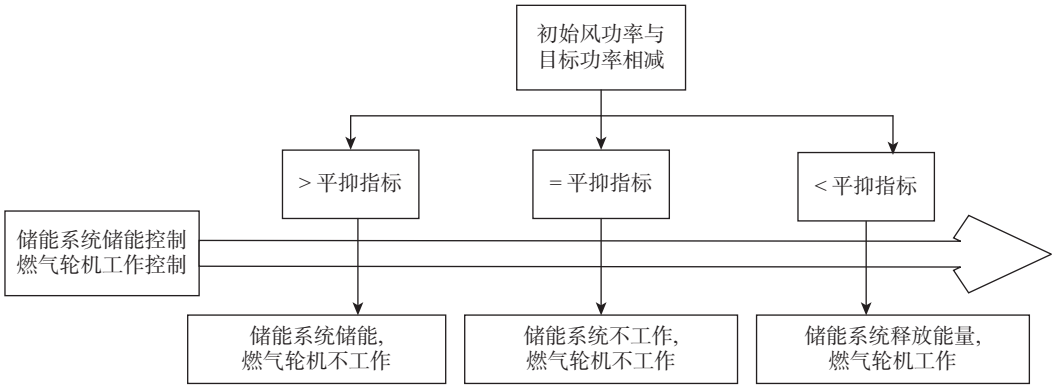

图 2 求解流程

Fig. 2 Flow chart of solution

3.3　仿真分析

3.3.1　控制策略仿真对比

分别在仅采用低通滤波器、采用低通滤波器结合模糊控制的两种不同控制策略下，对风电场输出功率作平抑，其仿真结果对比如图 3 所示。

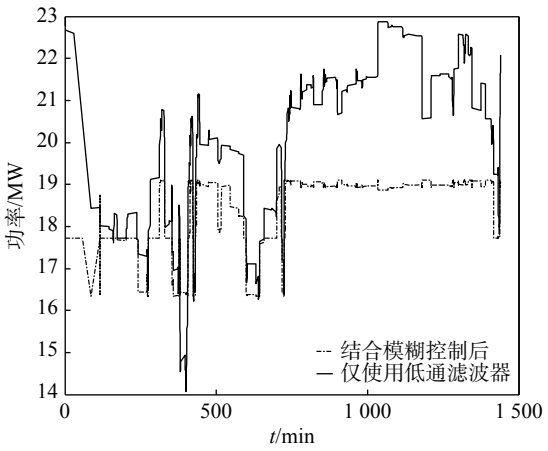

图 3　在仅采用低通滤波器、采用低通滤波器结合模糊控制的控制策略下平抑风功率对比

Fig. 3　Comparison of wind power smoothing between low-pass filter and combined fuzzy control and low-pass filter

对比两种控制策略的平抑结果可知：在仅采用低通滤波器平抑风功率时会出现时延现象，当加入模糊控制协同低通滤波器平抑风功率时能够取得较好的平抑效果，可满足仿真限制条件。

根据所得到的整体系统特点，设定模糊控制下的控制器输入及输出值，即输入及输出的隶属度函数。按照本文中的要求，经过分析得到平抑后风功率的功率状态值的模糊论域为{−2, −1, 0, 1, 2}，其对应的模糊语言变量 P 为{PB, PS, ZO, NS, NB}。仅在模糊控制下的低通滤波这一个模型时，将风功率作为输入量，调整平抑后风功率的功率状态值的模糊规则表如表 1 所示。

表 1　调整平抑后风功率的功率状态值的模糊规则表

Tab. 1　Fuzzy rule of state of power after smoothing wind power

状态值	PB	PS	ZO	NS
P	−2	−1	0	1

原始风功率与平抑后风功率相减得到的仿真结果如图 4 所示。

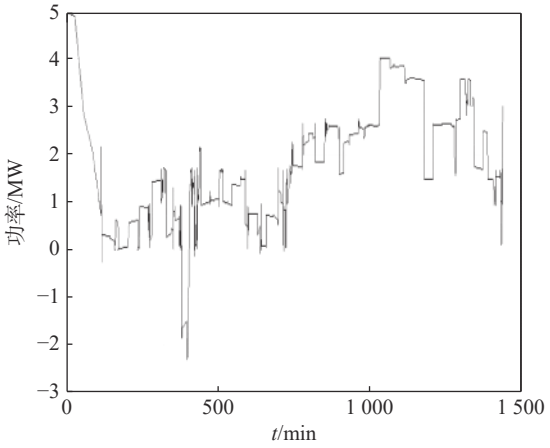

图 4　原始风功率减去平抑后风功率

Fig. 4　Difference between original and smoothed wind power

3.3.2　储能系统仿真参数确定

本文中储氢罐参数未确定，燃气轮机的类型未选定。在仿真中暂时将储氢罐定义为压力确定，容量未定；将燃气轮机暂定为微型燃气轮机，且输入氢气量暂定为 0.017 m^3（通过微型燃气轮机输出功率范围大致确定微型燃气轮机的输入氢气量）。在储能系统中加入对储氢罐容量的模糊自适应控制，储氢罐初始容量通过模糊控制后，容量参数作自适应调整，以保证获得稳定的储氢罐容量范围，从而确定储氢罐容量

其中储能系统的输入功率状态值的模糊论域为{−1, 0, 1}，其对应的模糊语言变量ΔP为{PS, ZO, NS}。同样，仅采用低通滤波器控制策略时，将风功率作为输入，调整储能系统输入功率的模糊规则表，如表 2 所示。

表 2　调整储能系统输入功率的模糊规则表

Tab. 2　Fuzzy rule for adjusting input power of energy storage system

状态值	PS	ZO	NS
ΔP	−1	0	1

此时，经过仿真，储氢罐容量对比如图 5 所示。

在前文已经提到，燃气轮机的输出功率暂定为 0.1 MW，即所需要的燃气轮机的氢气量暂定为 0.017 m^3。为了保持燃气轮机输出功率的稳定，需要在原始风功率与平抑风功率差值为负

时，储氢罐恒定输出 0.017 m^3 的氢气量以供燃气轮机运行。图 6 为储氢罐在存储及供给燃气轮机恒定氢气量后的仿真结果。

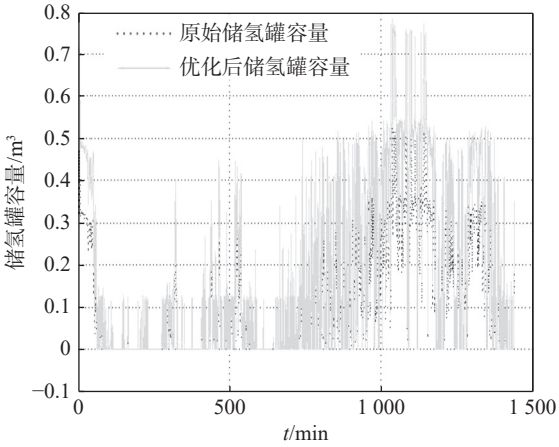

图 5 储氢罐容量对比

Fig. 5 Comparison of hydrogen storage tank capacity

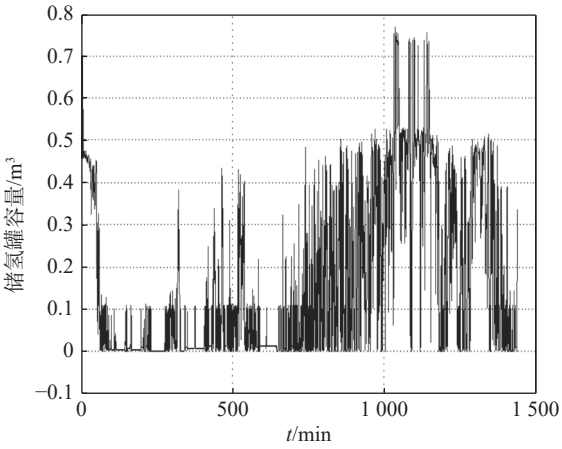

图 6 储氢罐在存储及供给燃气轮机后的容量变化

Fig. 6 Capacity fluctuation between hydrogen storage and supply to gas turbine

当原始风功率与平抑风功率差值为负值，且储氢罐容量≤0.017 m^3 时，燃气轮机将停止工作，不再产生输出功率。

4 结论与展望

本文中将低通滤波器与模糊控制相结合用于实现预期风功率的目标功率具有较大的实用价值。加入模糊控制后，低通滤波器出现的时延现象在仿真结果中未出现，低通滤波器结合模糊控制下的目标功率满足仿真限制条件一，且效果较好；将燃气轮机的类型初步定为微型燃气轮机，当输出功率为 0.1 MW 时，加入模糊控制后储能系统输入功率所得到的储氢罐容量较原始储氢罐容量高，储氢罐容量超过 0.017 m^3有更大空间，且整体仿真结果表明（即将储氢罐在整个时间过程内储存氢气及供以氢气后的容量变化）储氢罐容量可以在一定范围内得到确定，这进一步体现了该方法对燃氢燃气轮机储能系统平抑风功率的准确性，也为对燃气轮机储能系统用以平抑风功率的实现提供了理论支持。

上述两种情况均未考虑燃气轮机的启停时间以及储氢罐容量的预估值变化对燃气轮机运行的影响。在进一步实现风功率平抑利用时，可将风功率预测与储氢罐容量变化预测相结合，并加入对燃气轮机启停时间的预判，提高建模的准确性，进而提高仿真结果的准确性和实用价值。

参考文献：

[1] 吴昊, 张焰, 刘波. 考虑风电场影响的发输电系统可靠性评估 [J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(4): 36 – 42.

[2] 于芃, 赵瑜, 周玮, 等. 基于混合储能系统的平抑风电波动功率方法的研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 35 – 40.

[3] 肖创英, 汪宁渤, 丁坤, 等. 甘肃酒泉风电功率调节方式的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(10): 1 – 7.

[4] 蒋东方. 氢氧联合循环与风能耦合发电系统可行性分析 [D]. 北京: 华北电力大学, 2012.

[5] 赵巧娥, 郭敏, 贾新春, 等. 基于预测控制储能系统平抑风电场并网波动功率 [J]. 电测与仪表, 2019, 56(5): 94 – 100.

[6] 于芃, 周玮, 孙辉, 等. 用于风电功率平抑的混合储能系统及其控制系统设计 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(17): 127 – 133.

[7] 章竹耀, 郭晓丽, 张新松, 等. 储能电池平抑风功率波动策略 [J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(3): 62 – 68.

[8] 蒋平, 熊华川. 混合储能系统平抑风力发电输出功率波动控制方法设计 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 122 – 127.

[9] 孔飞飞, 晁勤, 袁铁江, 等. 用于短期电网调度的风电场储能容量估算法 [J]. 电力自动化设备, 2012, 32(7):

21 – 24.
[10] 任永峰, 薛宇, 云平平, 等. 马尔可夫预测的多目标优化储能系统平抑风电场功率波动 [J]. 电力系统自动化, 2020, 44(6): 67 – 74.
[11] 鹿婷, 贾继超, 彭晓涛. 一种考虑经济调度的风电场储能控制策略 [J]. 分布式能源, 2019, 4(3): 40 – 49.
[12] 刘春燕, 晁勤, 魏丽丽. 基于实证数据和模糊控制的多时间尺度风储耦合实时滚动平抑波动 [J]. 电力自动化设备, 2015, 35(2): 35 – 41.
[13] 章伟, 谭伦农, 阚红军. 考虑运行经济成本的风电场储能容量优化 [J]. 能源研究与信息, 2017, 33(4): 200 – 204.
[14] 汪海蛟, 江全元. 应用于平抑风电功率波动的储能系统控制与配置综述 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38(19): 126 – 135.
[15] CHO H, LUCK R, CHAMRA L M. Dynamic simulation of a micro-CHP facility: a case study[C]// ASME 2007 Energy Sustainability Conference. Long Beach, California, USA: ASME, 2007: 247-254.
[16] AL-MANSOUR F, KOŽUH M. Risk analysis for CHP decision making within the conditions of an open electricity market[J]. Energy, 2007, 32(10): 1905 – 1916.
[17] 李争, 张丽平, 薛增涛, 等. 基于氢储能的双馈风力发电系统功率控制策略 [J]. 电测与仪表, 2020, 57(13): 76 – 83.
[18] BECCALI M, BRUNONE S, FINOCCHIARO P, et al. Method for size optimisation of large wind-hydrogen systems with high penetration on power grids[J]. Applied Energy, 2013, 102: 534 – 544.
[19] 蒋东方, 高丹, 武珍, 等. 基于智能微网的氢氧联合循环与风能耦合发电系统 [J]. 电力科学与工程, 2011, 27(6): 1 – 5.
[20] 王晓东, 张磊, 姚兴佳, 等. 基于模糊自适应卡尔曼滤波的风电场储能系统功率控制 [J]. 电网技术, 2014, 38(6): 1465 – 1470.
[21] 侯力枫. 风电功率波动平抑下储能出力与平滑能力的动态优化控制策略 [J]. 热力发电, 2020, 49(8): 134 – 142.
[22] 魏远, 张欢畅, 周爽, 等. 并网型风储联合发电站有功出力控制与仿真 [J]. 热力发电, 2020, 49(8): 143 – 149.
[23] 杨蒙, 陈洁, 闫亚玲, 等. 基于滑动滤波和模糊控制的风电储能能量管理 [J]. 电力电容器与无功补偿, 2019, 40(6): 196 – 201.
[24] 刘颖明, 王维, 王晓东, 等. 结合风功率预测及储能能量状态的模糊控制策略平滑风电出力 [J]. 电网技术, 2019, 43(7): 2535 – 2543.

信息

南非推出世界上最大的氢燃料卡车

5 月 6 日，矿业巨头英美资源集团（Anglo American）在南非北部的一个铂矿推出了世界上最大的氢动力卡车，重达 220 t。作为取代柴油动力卡车队的第一辆样板车，该车使用 2 MW 氢燃料电池，一次可运输多达 290 t 矿石。英美资源集团表示，其目标是到 2040 年实现碳中和，利用太阳能将水分解生产氢燃料。如果试点成功，该技术将在其全球车队推广，可消除高达 80% 的露天矿山柴油碳排放。

国内单套规模最大炼化一体化项目投产

5 月 16 日，国家石化产业规划布局重点推进项目——盛虹炼化一体化项目在江苏连云港投料开车成功，标志着我国单套规模最大的炼化一体化项目正式投产，将把我国部分基础化工原料进口量降低 10% 左右。该项目总投资达 677 亿元，年加工原油能力 1 600 万 t，核心设备国产化率达到 90% 以上，刷新了国内同类型项目最大直径塔器、单体最重固定床反应器、最大规模常减压蒸馏装置以及裂解炉等多项纪录。

（王　波）