

基于气象实时数据的风电制氢控制策略

王爱玲, 梅一凡, 陈士超*

山东电力工程咨询院有限公司, 山东 济南

收稿日期: 2024年11月23日; 录用日期: 2024年12月15日; 发布日期: 2024年12月20日

摘要

目前新能源弃电消纳的问题突出, 风电制氢是解决该问题的重要技术手段, 但仍存在运行不稳定等问题, 未解决相关控制层面问题。本文提出一种基于气象实时数据的风电制氢控制方法, 通过气象数据分析预测风电制氢各种工况并对制氢系统、储能系统和发电侧进行系统调控, 提高制氢效率至50%以上, 降低制氢成本至1.5元/Nm³以下, 并且提高制氢系统的安全性和稳定性。

关键词

风电制氢, 实时气象数据, 调控策略

Wind Power Hydrogen Production Control Strategy Based on Meteorological Real-Time Data

Ailing Wang, Yifan Mei, Shichao Chen*

Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Corp., Ltd., Jinan Shandong

Received: Nov. 23rd, 2024; accepted: Dec. 15th, 2024; published: Dec. 20th, 2024

Abstract

At present, the problem of new energy abandonment and consumption is prominent, wind power hydrogen production is an important technical means to solve the problem, but there are still problems such as unstable operation. In order to solve the related control level problems, this paper proposes a wind power hydrogen production control method and system based on real-time meteorological data, which analyzes meteorological data to predict various working conditions of wind power hydrogen production and carries out systematic regulation and control of the hydrogen

*通讯作者。

production system, energy storage system, and power generation side, to improve the hydrogen production efficiency to more than 50%, to reduce the cost of hydrogen production to less than 1.5 CNY/Nm³, and to improve the safety and stability of the hydrogen production system.

Keywords

Wind Power Hydrogen Production, Real-Time Meteorological Data, Control Strategy

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

氢能作为可再生能源的典型代表，目前在全球受到前所未有的关注，氢能产业的发展已经成为各国寻求能源结构转型的重要途径[1]。需要注意的是，由煤气化、天然气重整所得的灰氢、蓝氢虽然有着价格上的优势[2] [3]，但仍会增加碳排放，不利于“3060”战略的深入发展。

风电制氢技术将具有瞬态特性的风能产生的能源通过电解水的方式在氢能中得以储存[4] [5]，同时一定程度上降低新能源发电并网波动性，维持电网频率稳定。但目前风电制氢技术仍然存在波动输出运行不稳定的问题，需要在控制层面进行问题解决。文献[6]构建了风电制氢微网网络结构，结合风电出力 and 制氢设备运行特性，提出了风电制氢微网能量调度策略，实现了平滑波动的目标；文献[7]根据碱性电解槽特性，提出了碱性电解槽阵列轮值协调优化控制策略，有效解决了波动工况下碱性电解槽阵列运行寿命及运行安全性问题；文献[8]提出了海上风电和氢气管理系统协调控制方案，并引入超级电容器机组进行短期瞬态补偿，降低了风力波动产生的不利影响。

但需要注意的是，目前风电制氢控制策略仍存在能量转化环节多、能量转化效率低、设备利用率低等问题[9] [10]。因此，本文提出一种基于气象实时数据的风电制氢控制方法及系统，旨在解决风电制氢技术相关问题。

2. 风电制氢技术基本原理

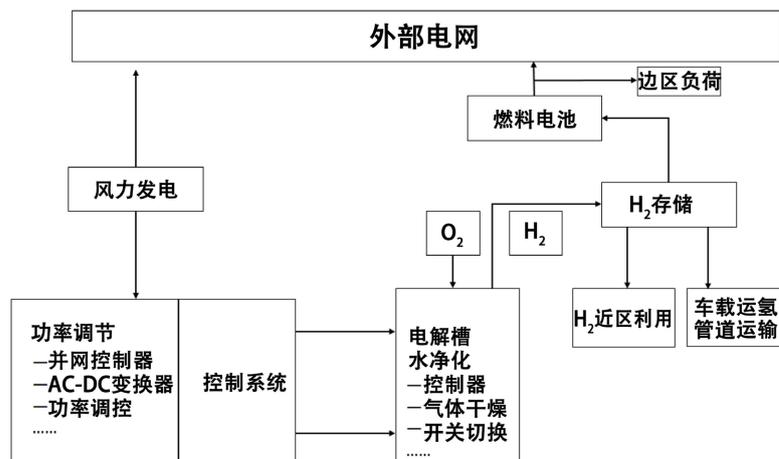


Figure 1. Basic structure of wind power hydrogen production system

图 1. 风电制氢系统基本结构

风电制氢技术是将风力发电产生的电能通过电解水设备制备氢能的新型制氢技术。其基本结构包括发电机组、电解水设备、储氢装置、电网、燃料电池等组成[11]，如图 1 所示[12]。

风电制氢技术运行的基本模式为将风力发电机组所发电量中超出电网需求的部分采用非并网模式用于电解水制氢，制得的氢气经纯化后应用于工业生产、燃料电池新能源汽车、发电等用途[13][14]。在该运行模式下，风电并网侧和制氢侧的功率可通过控制系统调节，在满足电网需求的前提下，可最大限度地吸纳弃风电量，进而实现风力资源的充分利用。

3. 基于气象实时数据的风电制氢控制策略

本文提出的基于气象实时数据的风电制氢控制方法可通过气象大数据提前预测到风力数据，输入制氢控制系统，实现对电解水制氢装置实时启停和变功率控制，解决风电制氢峰、谷、弃电无法投运、运行效率低、运行不安全等问题，进而提高制氢设备的利用率和制氢效率。同时，在该控制策略中，对储能系统和制氢系统进行匹配设计，协调控制，达到削峰填谷和稳定运行的目的。

该控制方法主要包括三部分：一、接受气象站或自设风力监测站的气象实时数据输入，结合当地历史风力数据，对输入数据进行分析鉴别并分级，用于系统控制；二、变功率制氢系统控制策略，该控制策略由支持变功率运行的 PEM/碱性水电解设备和变功率控制系统组成；三、储能、制氢以及发电三者的匹配耦合。其基本框架如图 2 所示。

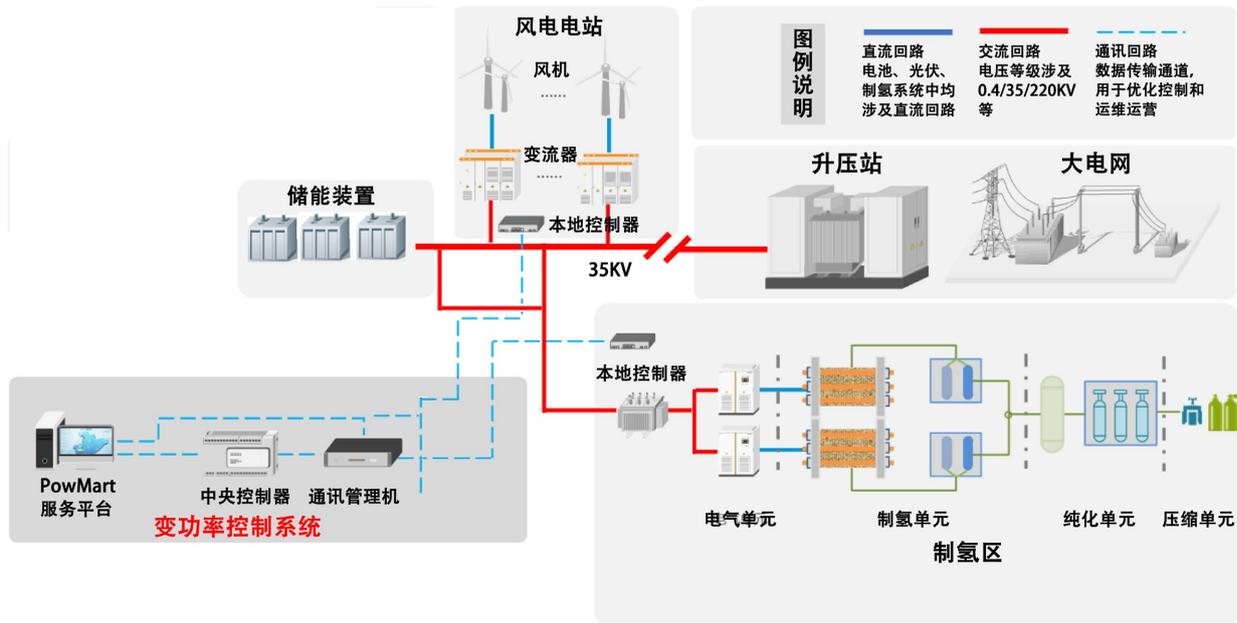


Figure 2. The control strategy framework based on meteorological real-time data
图 2. 基于气象实时数据的控制策略框架

3.1. 基于实时气象数据预测调控策略

该策略基于气象实时大数据输入，预测分析和挖掘电力潜力，按照预测分析控制电网、制氢、储能装置三者联动，削峰平谷。

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} = -\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_i} - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + F \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

其中, μ 表示动力粘度是常数, x_i, y_i 表示直角坐标系坐标点, u_i, u_j 分别表示速度矢量, 即风在 t 时刻在点 (x_i, y_i) 处的速度分量, F 表示重力, ρ 表示流体密度, P 表示压力, t 表示某时刻。

在运行过程中, 首先利用中微尺度耦合计算预测进行风电场功率预测, 结合电网调度预测, 形成预测差值曲线及拟合函数。

由于微尺度 CFD 原理是一组耦合的非线性偏微分方程, 遵循能量守恒和动量守恒, 因此流体的变化规律可以通过 Navier-Stokes (式 1) 方程和连续方程(式 2)进行数学描述, 进而利用上述中微尺度耦合计算对所在风场区进行风资源预测, 准确模拟每个机位点处的风资源情况, 并通过全风场风资源数据预测风机功率, 得出风场发电功率, 进而同电网需求功率进行分析比对, 得出差值, 形成差值预测曲线, 拟合差值同时间的函数曲线, 如式(3)~(5)所示。

$$P_{cy} = P_{fy} - P_{xy} \quad (3)$$

$$P_{cay} = \int_0^T P_{cy}(t) dt / T \quad (4)$$

$$P_{qe} = \frac{Q_e}{A} \quad (5)$$

其中, P_{qe} 为制氢装置额定电耗; Q_e 为制氢装置额定出力; A 为换算系数, 等于 $1 \text{ kW}\cdot\text{h}$ 电力制氢的能力, 目前工业基础下理想工况为 $0.2\sim 0.25 \text{ Nm}^3/\text{h}$; P_{ce} 为储能装置额定充电量; T_i 为对应按照 P_{ci} 运行的时长; T 为统计时段的总时长; P_{fy} 为预测的风场瞬时功率; P_{xy} 为预测的电网瞬时需求功率; P_{cy} 为预测瞬时功率差值; $P_{cy}(t)$ 为预测瞬时功率差值与时间的拟合函数; P_{cay} 为一段时间的平均功率差值。

上述方案形成一段时间(如周, 半月)的差值预测曲线(或表格), 研究期间差值 P_{cay} 的规律, 根据平均差值 P_{cay} 的规律调整制氢系统和储能装置运行工况。具体调控策略如下:

平均差值 P_{cay} 为正值时, 若 $P_{cay} = 0\%\sim 15\% P_{qe}$, 制氢装置运行, 储能装置满电工况下, 启动制氢装置制氢, 储能放电, 补充制氢运行的不足电量; 若 $P_{cay} = 15\%\sim 90\% P_{qe}$, 制氢系统变功率运行; 若 $P_{cay} \geq 90\% P_{qe}$, 制氢系统变功率运行, 储能装置运行充电; 若 $P_{cay} \geq 110\% (P_{qe} + P_{ce})$, 制氢系统满荷载运行, 储能装置充电, 停运部分风机直到满足 $P_{cay} = P_{qe} + P_{ce}$, 制氢和储能稳定运行。

平均差值 P_{cay} 为负值时, 若储能装置满电的工况下, 启动储能装置回馈电网和制氢系统; 若 $P_{cay} = -30\%\sim 0\% P_{qe}$, 结合二中制氢系统的动态管理调整制氢系统运行; 若 $P_{cay} \leq -30\% P_{qe}$, 制氢装置停运, 储能可放电的情况下, 运行储能放电回馈电网; 若 P_{cay} 太小, 电网弃电, 储能全部用于制氢, 直到储能装置电力用尽或者 P_{cay} 满足制氢运行条件。

通过预测数据可控制储能装置和制氢装置协调运行, 吸收峰值电力转换成谷电时高效制氢, 实现削峰平谷稳定运行的目的。同时制氢功率可随风力资源波动实时变化, 结合电储能系统实现制氢系统高效运行同时保证稳定发电量。

3.2. 基于制氢成本收益动态管理

在风电制氢系统中设置氢气流量计、储能供电至电网电表, 实现对各测点位置的氢气流量、储能供电至电网电量、储能供电至制氢系统电量的实时监控, 形成氢气流量和储能供电量(网侧)、(氢侧)曲线。依据所得曲线可形成氢气流量和储能供电量(网侧)与时间的函数, 进而根据式(6)~(11)测算制氢系统的成本和收益。

$$CP = \int_0^T \left[Q(t) \times A \times E - \frac{P_{ch}(t) \times D \times (1 - \eta_e)}{\eta_e} - P_{cw}(t) \times \frac{D}{\eta_e} \right] dt \quad (6)$$

$$Q_H = \int_0^T Q(t) dt \quad (7)$$

$$cp = \frac{CP}{Q_H} \quad (8)$$

$$D = E \times \eta e \quad (9)$$

其中, E 为电价(元/kW·h); D 为电价/储能效率; $Q(t)$ 表示制氢系统出力与时间的拟合函数; $P_{cw}(t)$ 表示储能装置供至电网功率(网侧)与时间的拟合函数; $P_{ch}(t)$ 表示储能装置供至制氢功率(氢侧)与时间的拟合函数; ηe 表示储能的转换效率; CP 表示统计时段制氢的总成本(元); cp 表示统计时段制氢的单位成本(元/Nm³)。

$$P = \sum Q_i \times A_i - CP \quad (10)$$

$$p = \frac{P}{Q_H} \quad (11)$$

其中, P 表示统计时间段氢气的利润(元); p 表示统计时间段氢气的单位利润(元/Nm³); Q_i , A_i 表示统计时间段氢气的分项流量和分项售价; CP 表示统计时段制氢的成本(元)。

定义项目基准收益率对应的氢气单位收益为 $p_{\text{标}}$, 那么根据即 p 、 cp 和 $p_{\text{标}}$ 的情况便可实现对制氢运行计划的动态管理, 具体调控策略如下:

若统计时段制氢的单位成本 cp 高于 2 元/Nm³, 且 $p \leq p_{\text{标}}$, P_{cay} 为负值期间, 不启动风电制氢; 若统计时段制氢的单位成本 cp 高于 2 元/Nm³, 且 $p \geq p_{\text{标}}$, P_{cay} 为负值期间, 风电制氢设备可适当运行用于减少启停频次; 若统计时段制氢的单位成本 $cp = 1.0 \sim 2$ 元/Nm³, 且 $p \leq p_{\text{标}}$, P_{cay} 为负值期间, 制氢设备可适当运行用于减少启停频次; 若统计时段制氢的单位成本 $cp \leq 1.0$ 元/Nm³ 时, P_{cay} 为负值期间, 在不影响电网运行的前提下, 制氢设备的运行容量可随意调整运行。

3.3. 极端天气风电制氢调控策略

此外, 在极端天气条件下, 风电场及配套制氢、储能系统机械、电控系统部件等易受损。

针对不同的极端天气, 对风电制氢控制策略进行调整, 具体包括: 对大风天气、暴雨天气、严寒暴雪天气以及高温天气时段进行预警, 提出预先防护措施, 同时对进一步防护措施不当的报警情况做出预警。此外, 还可在严寒天气以及高温天气下做出仪表校准措施和失灵误报警边界条件预警以及暴雪荷载对建构物和设备影响边界条件报警。

4. 结论

针对风电制氢存在波动输出以及运行不稳定的问题, 本文提出了一种基于实时气象数据的风电制氢控制方法。在该控制方法中, 储能和制氢配合在弃电弃风时投入运行, 吸收弃风弃电电力。通过对气象大数据的输入分析, 实时预测风电的出力状态, 调整制氢设备的功率。利用储能装置吸收极端天气的风电电力峰值, 保障制氢装置稳定高效运行的同时提供部分谷电电力, 避免制氢系统频繁起停。此外, 对风电制氢系统内的各种工况提前预测, 避免系统过载或低负荷造成的事故停机, 提高整体系统稳定性。总之, 本文提出的基于实时气象数据的风电制氢控制方法简单可行, 易于在工程实际中实施。

参考文献

- [1] Chatenet, M., Pollet, B.G., Dekel, D.R., Dionigi, F., Deseure, J., Millet, P., *et al.* (2022) Water Electrolysis: From Textbook Knowledge to the Latest Scientific Strategies and Industrial Developments. *Chemical Society Reviews*, **51**, 4583-4762. <https://doi.org/10.1039/d0cs01079k>

- [2] 李君, 陶丽楠, 张洪阳. 大规模光伏制氢光-氢协调控制研究[J]. 炼油技术与工程, 2023, 53(6): 1-4, 20.
- [3] 王恒伟, 杨雪晶, 杨军. 碱性水电解制氢装置大型化的研究进展[J]. 炼油技术与工程, 2023, 53(6): 31-35.
- [4] Rahmouni, S., Negrou, B., Settou, N., Dominguez, J. and Gouareh, A. (2017) Prospects of Hydrogen Production Potential from Renewable Resources in Algeria. *International Journal of Hydrogen Energy*, **42**, 1383-1395. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.07.214>
- [5] Fujii, K., Sugiyama, M. and Nakamura, S. (2015) Hydrogen Generation Using Electrochemical Water Splitting via Electricity Generated by Nature Energy (Hydrogen Production from Renewable Energy). *Journal of the Japan Institute of Energy*, **94**, 27-34.
- [6] 黎亚, 李晓霞, 邱慧鹤, 等. 风电制氢微网能量调度策略研究[J]. 能源与节能, 2024(6): 40-43.
- [7] 沈小军, 聂聪颖, 吕洪. 计及电热特性的离网型风电制氢碱性电解槽阵列优化控制策略[J]. 电工技术学报, 2021, 36(3): 463-472.
- [8] Recalde Melo, D.F. and Chang-Chien, L. (2014) Synergistic Control between Hydrogen Storage System and Offshore Wind Farm for Grid Operation. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, **5**, 18-27. <https://doi.org/10.1109/tste.2013.2272332>
- [9] 马亦耕, 张峰, 丁磊. 弃风参与电网调频的电转气-储气-燃气轮机容量优化配置[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(7): 79-86.
- [10] Sarrías-Mena, R., Fernández-Ramírez, L.M., García-Vázquez, C.A. and Jurado, F. (2015) Electrolyzer Models for Hydrogen Production from Wind Energy Systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, **40**, 2927-2938. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.12.125>
- [11] Valverde-Isorna, L., Ali, D., Hogg, D. and Abdel-Wahab, M. (2016) Modelling the Performance of Wind-Hydrogen Energy Systems: Case Study the Hydrogen Office in Scotland/UK. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **53**, 1313-1332. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.08.044>
- [12] 孙鹤旭, 李争, 陈爱兵, 等. 风电制氢技术现状及发展趋势[J]. 电工技术学报, 2019, 34(19): 4071-4083.
- [13] 袁铁江, 李国军, 张增强, 等. 风电-氢储能与煤化工多能耦合系统设备投资规划优化建模[J]. 电工技术学报, 2016, 31(14): 21-30.
- [14] 伊文婧, 梁琦, 裴庆冰. 氢能促进我国能源系统清洁低碳转型的应用及进展[J]. 环境保护, 2018, 46(2): 30-34.