

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.07.004

基于自适应虚拟同步机提升频率支撑能力的风氢耦合系统

王佳乐¹, 任永峰^{1,2,3}, 赵凤伟⁴, 王伟⁴, 贺彬¹

(1. 内蒙古工业大学能源与动力工程学院, 呼和浩特 010080; 2. 风能太阳能利用技术教育部重点实验室, 呼和浩特 010080; 3. 内蒙古自治区新能源与储能技术重点实验室, 呼和浩特 010080; 4. 华能新能源股份有限公司蒙西分公司, 呼和浩特 010000)

摘要: 针对高比例可再生能源电力系统频率稳定性不足的问题,在含有储氢环节的系统中提出了一种基于自适应惯量—阻尼调节的电网侧柔性制氢负荷协同控制方法。首先,分析了质子交换膜(proton exchange membrane, PEM)电解制氢负荷的动态响应特性及其功率调节能力,并基于其工作特性构建PEM电解槽柔性负荷参与频率调节的等效数学模型。在此基础上,结合系统频率变化率与频率偏差的动态特性,设计了一种基于Sigmoid函数的自适应虚拟同步机(adaptive virtual synchronous machine, AVSM)控制策略,在弱电网场景下将这种策略应用在PEM电解槽柔性负荷上,利用其功率大范围灵活可调节的优势,为系统提供惯性和阻尼,抑制了制氢负荷投切瞬间及典型风速波动下系统频率的扰动幅度。最后,在MATLAB/Simulink仿真平台上对所提方法进行了验证。仿真结果表明,所提出的控制策略在系统频率扰动恢复过程中具有更优的动态性能和稳定性。

关键词: 自适应; 虚拟同步机; PEM电解槽; 柔性负荷; 频率调节

Wind-hydrogen Coupling System for Enhancing Frequency Support Capability Based on Adaptive Virtual Synchronous Machine

WANG Jiale¹, REN Yongfeng^{1,2,3}, ZHAO Fengwei⁴, WANG Wei⁴, HE Bin¹

(1. College of Energy and Power Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010080, China; 2. Key Laboratory of Wind and Solar Energy Utilization Technology of Ministry of Education, Hohhot 010080, China; 3. Inner Mongolia Key Laboratory of New Energy and Energy Storage Technology, Hohhot 010080, China; 4. Huaneng New Energy Co., Ltd., Mengxi Branch, Hohhot 010000, China)

Abstract: To address the issue of insufficient frequency stability in power system with a high proportion of renewable energy, in this paper a collaborative control method for grid-side flexible hydrogen loads based on adaptive inertia-damping regulation in a system incorporating a hydrogen storage link is proposed. First, the dynamic response characteristics and power regulation capability of proton exchange membrane (PEM) electrolytic hydrogen production loads are analyzed, and an equivalent mathematic model for the participation of PEM electrolyzer flexible loads in frequency regulation participation is constructed based on their operating characteristics. On this basis, combined with the dynamic characteristics of the system frequency change rate and frequency deviation, an adaptive virtual synchronous machine (AVSM) control strategy based on the Sigmoid function is designed. This strategy is applied to the PEM electrolyzer flexible load in a weak grid scenario. By leveraging the advantage of its wide-range and flexible power regulation capability, the proposed strategy provides inertia and damping for the system, suppressing the amplitude of frequency disturbances during the switching moments of the hydrogen production load and under typical wind speed fluctuations. Finally, the proposed method is verified on the MATLAB/Simulink simulation platform. The simulation result shows that the proposed control strategy exhibits more superior dynamic performance and stability during the recovery of system frequency fluctuation.

Key words: adaptive; virtual synchronous machine (VSM); PEM electrolyzer; flexible load; frequency regulation

收稿日期: 2026-01-16; 修回日期: 2026-04-21

基金项目: 内蒙古自治区重点研发和成果转化项目(2023YFHH0077); 国家自然科学基金(52367022); 中国华能集团有限公司科技项目(HNKJ24-H117)。

Project Supported by Key R & D and Achievement Transformation Projects in Inner Mongolia Autonomous Region(2023YF-HH0077), National Natural Science Foundation of China(52367022), Science and Technology Project of China Huaneng Corporation Ltd.(HNKJ24-H117).

0 引言

随着全球能源转型的不断深入推进,发展绿色可再生能源已成为世界各国能源战略的共同目标^[1]。风能作为清洁能源的重要组成部分,近年来得到快速发展^[2-4];与此同时,“绿氢”技术产业规模迅速扩大,尤其是质子交换膜电解槽,正逐步成为大规模可再生能源消纳与储能的核心路径之一^[5-12]。风电制氢系统可以将风能转化为化学能并以氢气存储,从而促进能源的高效利用,缓解风电波动带来的调节压力,为能源的高效利用提供有效解决方案^[13-19]。中国近些年出台了一系列关于可再生能源制氢的相关政策和技术标准^[20],为推动氢电耦合发展、提升新能源利用效率提供了重要支撑,对实现“双碳”目标具有重要意义。

随着相关政策的不断推进,可再生能源的装机规模持续扩大,利用可再生能源进行电解水制氢的应用规模也不断增长。然而,大规模新能源连带着大规模电力电子变换器接入电网,这给电力系统的安全运行带来了挑战。与传统同步发电机组相比,此类电力电子设备缺乏惯量和阻尼支撑能力。风光出力具有不确定性和波动性,易导致系统频率调节能力和电压支撑能力下降,进而影响电网安全性与可靠性^[20]。因此,在高比例新能源并网背景下,研究如何充分利用制氢负荷快速可调特性参与系统频率调节与稳定支撑,已成为当前风—氢耦合领域的重要研究方向之一^[21]。

为实现风—氢耦合系统的稳定协同运行,国内外学者一般围绕着能量管理,功率协调控制以及频率稳定支撑控制等方面展开研究。文[22]提出改进型非支配遗传算法的优化求解方法,在保证PEM电解槽在消纳可再生能源的同时,提高可再生能源制氢系统的经济性。为延长电解槽使用寿命,文[23]针对大规模可再生能源制氢系统,提出了电解槽两阶段运行策略,使其越过最小功率运行区间,从而提升风电利用率并降低制氢设备运行损耗。文[24]基于拉格朗日函数构建电解槽阵列的效率模型与约束条件,实现了电解槽功率的自适应分配,在最优工况下完成电解槽的轮值优化。文[25]构建风—氢系统的技术经济优化模型,系统分析了碱性和PEM电解槽的启停策略,以期寻找在风电波动条件下电解槽最优运行方案与系统配置。此外,针对电解槽运行过程中的动态特性与功率分配问题,文[26-27]分别从功率模糊分段和启停特性建模角度出发,提出了混合电解槽分组轮换与精细化功率分配策略,

实现了从粗粒度功率调节到考虑运行约束的精细化调控,有效提升了系统运行效率与经济性。

上述研究主要侧重于通过优化算法提升风—氢系统的运行效率与经济性,但普遍默认系统运行在强电网下,未充分考虑弱电网环境下系统稳定性问题,且所提出的方法本身也不具备直接增强电网稳定性的控制能力。相比之下,虚拟同步发电机控制策略(virtual synchronous generator, VSG)能从机理上提升系统的动态支撑能力。文[28]提出了一种基于匹配控制的“车—氢”负荷协同构网控制策略,通过电动汽车负荷与PEM电解槽制氢负荷的功率协同调节,降低系统频率偏差。文[29]针对风电占优的电—氢耦合系利用频率—功率下垂方程使电解槽在频率暂态和稳态过程中均能提供支撑。文[30]针对弱电网下风电制氢系统支撑能力不足的问题,提出了基于构网型储能的双虚拟同步机控制策略,显著提升了系统频率与电压支撑能力。文[31]首次在PEM电解槽的逆变器中运用了虚拟同步电动机(virtual synchronous motor, VSM)的控制策略,较于传统的双闭环控制,其具备主动调节制氢功率,抑制电网频率波动的能力。

然而,现有的控制策略多基于单一场景,尚未充分挖掘柔性负荷的功率可调节潜力,也未充分考虑实际工程中偏远地区远距离输电条件下,由大量电力电子设备接入导电系统短路容量降低呈现的弱电网特性的情况。在此环境下,系统普遍缺乏主动支撑的能力,亟需进一步研究更加鲁棒、高效的协同控制策略。

因此文中提出了一种基于自适应虚拟同步机控制的风氢耦合系统,使PEM电解槽能主动响应系统频率来调节自身负荷功率。首先分析了PEM电解槽的功率响应及调节特性。在此基础上利用Sigmoid函数设计了一套转动惯量和阻尼自适应来抑制系统频率超调及振荡,使PEM电解槽能够更好地参与系统调频。

1 风电制氢系统模型构建

1.1 风电制氢系统主拓扑图

文中构建的风电制氢系统见图1。其主要是由两台额定功率为2.5 MW的质子交换膜制氢电解槽、5 MW直驱式永磁同步机组(permanent magnet synchronous generator, PMSG)、变流器、变压器等构成。制氢单元的逆变器采用自适应虚拟同步电动机的控制策略。直驱风电机组耦合于690 V交流母线处,通过升压变压器升压至110 kV接入电网,经由

两个降压变压器降压至380 V与制氢单元相连接,制氢单元的直流环节采用电流电压双闭环的控制方式。

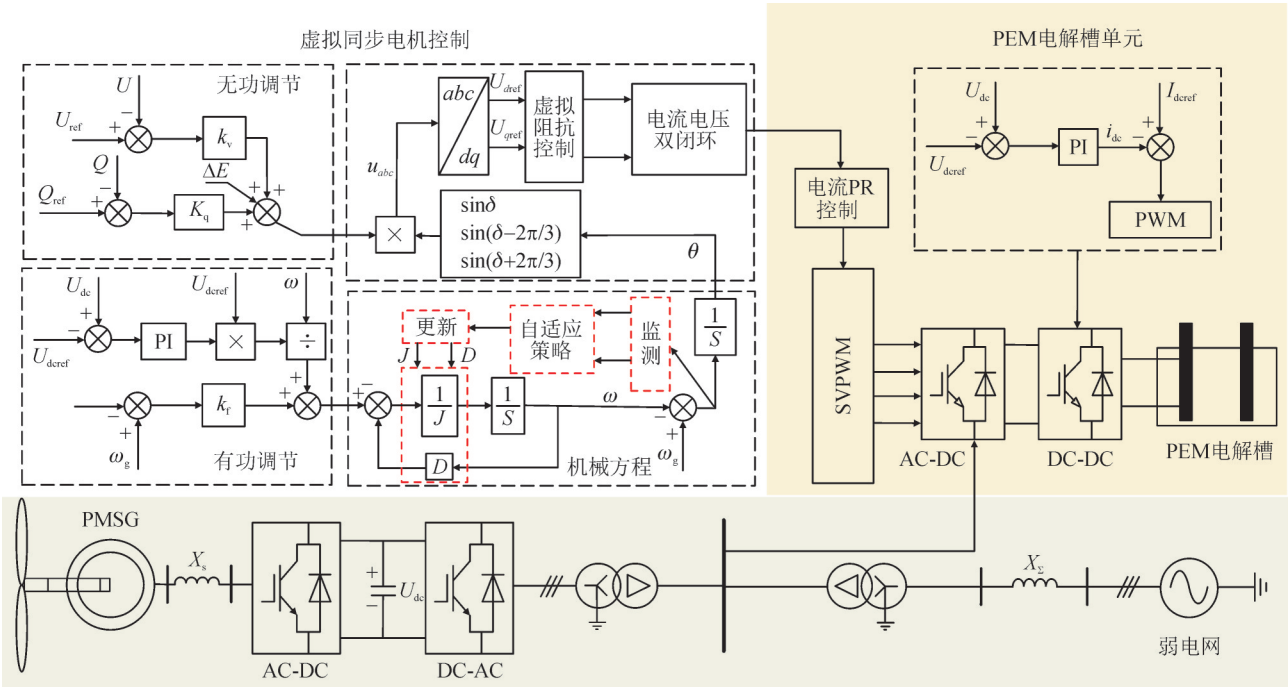


图1 风氢耦合系统拓扑图及其控制策略

Fig. 1 Topology diagram and control strategy of wind-hydrogen coupling system

1.2 跟网型永磁直驱风机拓扑图及控制结构

本小节建立了完整的跟网型PMSG物理仿真模型。跟网型风机与构网型风机比较其具有最大功率跟踪、低损耗等优点。其主要结构见图1,其采用背靠背全功率变流器结构,包括机侧整流器,直流母线,网侧整流器3部分。机侧与网侧变流器均采用双闭环控制策略,区别在于机侧变流器以转速作为外环给定,网侧变流器则以直流电压作为外环给定,二者的内环均为电压电流控制环,其共同作用产生的SVPWM调制波信号,见图2。

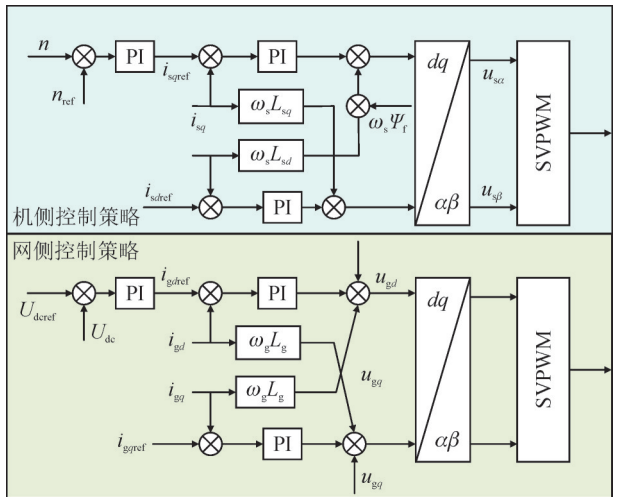


图2 PMSG变流器控制策略

Fig. 2 PMSG converter control strategy

1.3 弱电网数学建模及特性分析

弱电网通常指并网点等值阻抗较大、短路容量较低的电网,其强弱程度常采用短路比SCR(short-circuit ratio)进行量化。基于戴维南等值模型,短路容量及短路比可表示为

$$\begin{cases} S_{sc} = \frac{U^2}{|Z_g|} \\ SCR = \frac{S_{sc}}{S_N} \end{cases} \tag{1}$$

式(1)中: Z_g 为电网等值阻抗; S_N 为并网装置额定容量。文中 S_N 为10 MW, S_{sc} 为35 MW, SCR 为3.5。从频率特性来看,并网系统有功功率与功角之间满足式(2)

$$\Delta P \approx \frac{U_0 U}{X_g} \cos \delta \cdot \Delta \delta \tag{2}$$

式(2)中: U_0 为电网电压幅值; U 为并网点电压幅值; X_g 为等值电抗。可以看出当 X_g 较大时,功角调节灵敏度降低,易导致频率波动放大,进而影响并网系统稳定性。

1.4 PEM电解槽制氢负荷建模

质子交换膜电解槽与其他传统类型电解槽相比具有高效率、高紧凑性、响应速度快、产生氢气纯度高等优点。PEM电解槽广泛应用在可再生能源系统中,其能够适应负载快速变化的需求。其结构见图3。

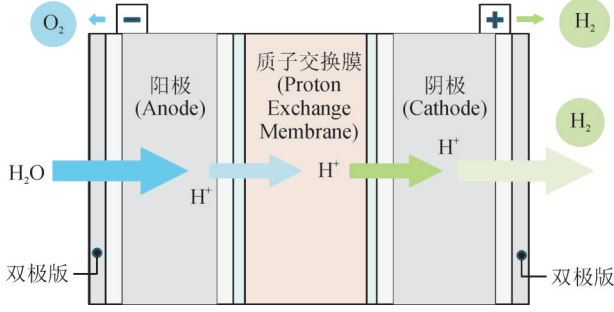


图3 PEM电解槽结构图

Fig. 3 PEM electrolytic cell structure diagram

PEM电解槽的极化曲线是表征其电化学性能的重要依据,能够直观地反映电解槽在不同运行状态下电流和电压的变化规律。在实际运行中,单体电解槽电压 U_{EL} 与电流 I_{EL} 并不满足简单的线性关系,而是受到活化极化、欧姆极化和浓差极化等多种极化效应的综合影响。因此,通常采用半经验的电化学模型对二者之间的关系进行描述,表达式为

$$U_{EL} = U_{rev} + \frac{RT}{\alpha F} \ln\left(\frac{I_{EL}}{A \cdot I_0}\right) + r \cdot I_{EL} + m \cdot \exp(n \cdot I_{EL}) \quad (3)$$

式(3)中: U_{rev} 为PEM电解槽可逆电压; R 为理想气体常数; T 为电解温度; α 为电荷传递系数,经验值为0.5左右; F 为法拉第常数; A 为电极有效活化面积; I_0 为交换电流密度。

通过极化曲线可以得到 U_{EL} 和 I_{EL} 的数学建模

$$P_{EL} = U_{EL} \cdot I_{EL} \quad (4)$$

鉴于各电解槽单元具有一致的电气特性,其单体电压与电流保持相等。将各单体电压串联叠加后,便可得到电解槽的总输出电压。即

$$\begin{cases} U_{ELS} = n_{EL} U_{MEL} \\ I_{ELS} = I_{EL} \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中: U_{ELS} 为电解槽端口总电压; I_{ELS} 为流过电解槽的电流; n_{EL} 为电解槽单元数量; U_{MEL} 为单个电解槽单元电压。 U_{rev} 由式(6)得到, U_{EL} 由式(7)得到:

$$U_{rev} = 1.48 - k_r T \quad (6)$$

$$U_{EL} = U_{rev} + U_{ohm} + U_{act} + U_{conc} \quad (7)$$

式(7)中: U_{act} 为活化极电压; U_{ohm} 为欧姆极化电压; U_{conc} 为浓差过电位; U_{act} 表达式为

$$U_{act} = \frac{RT}{t_1 z F} \cdot \ln\left(\frac{I_s^2}{t_2 T}\right) \quad (8)$$

式(7)中欧姆极化电压表达式为

$$U_{ohm} = (R_{EL} + R_{BPP}) I_{ELS} \quad (9)$$

综上所述分析可得到PEM电解槽等效电路模型见图4。

同时,在功率调节允许范围方面,PEM电解槽制氢可在额定消耗功率的5%~150%范围内平稳运行^[32-34],即

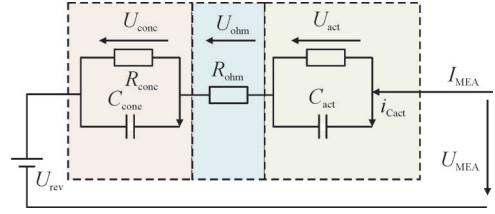


图4 质子交换膜电解槽等效电路模型

Fig. 4 Equivalent circuit model of PEM electrolyzer

$$\begin{cases} P_{PEM}^{max} = 150\% \times P_{PEM,n} \\ P_{PEM}^{min} = 5\% \times P_{PEM,n} \end{cases} \quad (10)$$

式(10)中: P_{PEM}^{max} 、 P_{PEM}^{min} 分别为PEM电解槽的最大及最小制氢消耗功率; $P_{PEM,n}$ 为PEM电解槽的额定制氢功率,文中选取额定功率为2.5 MW的PEM电解槽,其最大消耗功率能达到3.75 MW,最小消耗为0.125 MW。PEM电解槽制氢负荷可在1 s内快速响应功率参考值并稳定至新的运行点,表明其具备快速功率调节能力。可看得出其负荷响应能力较强,具备可参与电网调频的潜在能力。

PEM电解槽负荷调节特性曲线见图5,通过图5可以看出,PEM电解槽负荷虽然受一定斜坡约束的影响^[34],但其在可在功率调节区间内能准确跟踪参考值的变化,且其功率动态响应区间较大。

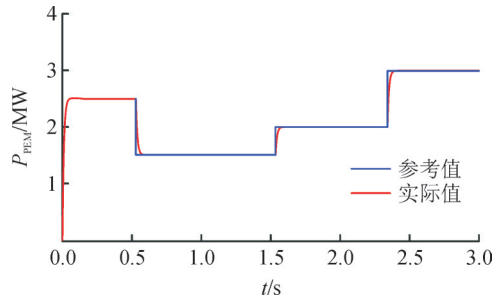


图5 PEM电解槽负荷调节特性曲线

Fig. 5 Load regulation characteristic curve of PEM electrolyzer

2 基于虚拟同步机的电解槽变流器控制策略

2.1 PEM电解槽变流器控制策略

文中PEM电解槽AC/DC逆变器引入了虚拟同步电动机的控制策略,可使PEM电解槽在电网侧表现出类似于同步电动机的动态特性,使其成为一个具有主动支撑能力的“友好型负荷”。其本质思想是借助电力电子设备对传统同步电动机的惯性、阻尼及频率响应特性进行模拟,提升系统的惯性支撑能力和频率调节能力,增强电网运行的稳定性和鲁棒性。在具体建模过程中,为简化分析并突出主要动态特性,通常将虚拟同步电动机的极对数设为1。在此假设条件下,其转子运动可由经典的同步

电机摆动方程进行描述,即

$$\begin{cases} J \frac{d\omega}{dt} = T_e - T_m - D(\omega - \omega_g) \\ \frac{d\theta}{dt} = \omega \end{cases} \quad (11)$$

式(11)中: J 为转动惯量; ω 为系统额定角频率; T_e 为电磁转矩; T_m 为机械负载力矩; D 为阻尼系数; ω_g 为电网角频率; θ 为电角度。

VSM定子电气关系为

$$u_{abc} = -R_s i_{abc} - L_s \frac{di_{abc}}{dt} + u_{0abc} \quad (12)$$

式(12)中: L_s 、 R_s 分别为定子电感和定子电阻; u_{abc} 为同步电动机端口电压。

下面分析在虚拟同步电动机控制策略下,制氢负荷如何根据电网频率的变化对自身功率消耗进行动态调节,并通过这种方式参与系统频率支撑,实现电网频率迅速恢复至稳定状态。

2.1.1 有功—频率调节

由转子运动方程可进一步推导出有功—频率关系。为了提高系统对频率扰动的响应能力,通常采用下垂特性方程对其进行描述

$$P_m = P_e - k_f(\omega - \omega_g) \quad (13)$$

式(13)中: P_m 为机械功率; P_e 为电磁功率也为PEM电解槽实际消耗功率; k_f 为调频系数。根据图6(a)中的有功—频率调节策略可以看出 P_e 实际为直流侧制氢负荷所消耗的功率,是经过直流电压的额定值和实际值作差经比例积分环节得到的。可以看出,其刚好与传统运用在源侧的VSG控制策略相反。当系统频率上升时负荷侧响应频率变化 P_e 增大,机械功率 P_m 减小;频率下降时 P_m 增大, P_e 减小,其符合VSM控制策略所要实现可柔性负荷的效果。

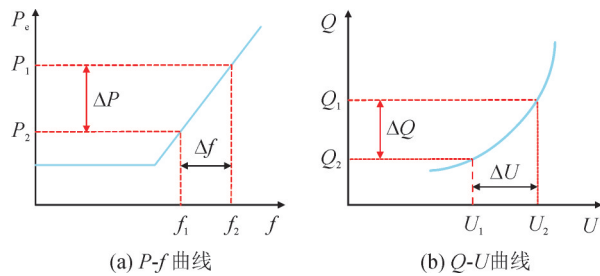


图6 有功—频率,无功—电压下垂曲线

Fig. 6 Active-frequency, reactive-voltage droop curves

2.1.2 无功—电压调节

传统同步电动机通过励磁环节控制虚拟电动势 U 来调节无功及端口电压。 U 主要包括空载电动势 U_0 ,电压变化量 ΔU_v ,无功电压变化量 ΔU_q 三部分,其关系表达式为

$$U = \Delta U_v + \Delta U_q + U_0 \quad (14)$$

ΔU_v 及 ΔU_q 表达式为

$$\begin{cases} \Delta U_v = k_v(U_{PEM,ref} - U_{PEM}) \\ \Delta U_q = k_q(Q_{PEM,ref} - Q_{PEM}) \end{cases} \quad (15)$$

式(15)中: Q_{PEM} 为PEM电解槽电力电子变换器吸收网侧无功功率的实际值; $Q_{PEM,ref}$ 为PEM电解槽的额定无功功率; k_q 为电压调节权重系数; k_v 为无功电压调节权重系数; $U_{PEM,ref}$ 和 U_{PEM} 分别为PEM电解槽变流器端口线电压有效值的额定值和实际值。当整个系统达到平稳状态时,其无功—电压的下垂曲线动态响应曲线见图6(b)。

2.2 DC/DC 整流器控制策略

直流侧电压的稳定性直接影响电解槽的运行状态,并对其使用寿命具有重要作用。制氢DC/DC整流器采用Buck变换器。其控制策略框图见图1,采用传统双闭环PI控制,其中外环为直流电压 U_{dc} 电压环, U_{dc} 选取600 V,内环为直流电流 I_{dc} 电流环。

3 VSM 虚拟惯性及阻尼自适应

3.1 J 和 D 对频率/动态特性的影响

同步电动机的功角曲线、转子角频率振荡曲线见图7。图7(a)区间 $[\delta_A, \delta_B]$ 对应图7(b)区间 $[t_1, t_2]$,在区间内,随着输入功率的增加, $d\omega/dt$ 会突然增加随后降至为0,可通过增加 J 来控制 $d\omega/dt$ 的变化速度, D 保持不变为初始值;在 t_2 时刻 $d\omega/dt$ 为0, $\Delta\omega$ 最大,故在 $[t_2, t_3]$ 时刻应增大 J 减小 D 来增加 $d\omega/dt$ 并抑制 $\Delta\omega$ 变化。后续区间同理分析即可。

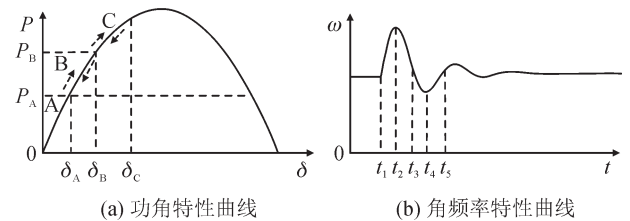


图7 J 、 D 动态响应曲线

Fig. 7 J 、 D dynamic response curve

不同区间 J 、 D 选取原则见表1。

表1 J 、 D 选取标准

Table 1 J 、 D selection criteria

区间	$\Delta\omega$	$d\omega/dt$	J	D
$[t_1, t_2]$	>0	>0	增加	保持
$[t_2, t_3]$	>0	<0	减小	增加
$[t_3, t_4]$	<0	<0	增加	保持
$[t_4, t_5]$	<0	>0	减小	增加

3.2 小信号建模分析

结合式(11)-(13),通过拉式变换可以将方程在复频域表示为传递函数

$$\begin{cases} Js\Delta\omega(s) = -\Delta P_{ref}(s) + \Delta P(s) - D\Delta\omega(s) \\ s\Delta\delta(s) = \Delta\omega(s) \\ \Delta P(s) = K_p\Delta\delta(s) \\ K_p = \frac{E_0 U_g}{X_f} \end{cases} \quad (16)$$

由于功角很小,假设 δ 为0, $Z=X_f$ 。将 D 替换为 (k_f+D) ,得到有功功率的小信号模型表达式为

$$G(s) = \frac{-\frac{K_p}{J\omega_0}}{s^2 + \frac{k_f + D}{J} + \frac{K}{J\omega_0}} \quad (17)$$

3.3 自适应VSM控制策略

基于表1中 $d\omega/dt$, $\Delta\omega$ 与 J 和 D 的关系,可设计出基于Sigmoid函数的自适应VSM控制策略。Sigmoid函数在初始阶段近似呈现出指数增趋势,随着输入的增加,其输出值的增长速率减缓并最终稳定在一特定值,同时该函数具有良好的平滑特性,能有效避免控制参数突变导致系统稳定性降低,其数学形式为

$$\sigma(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (18)$$

定义频率变化率与频率偏差的幅值分别为

$$\begin{cases} x = \left| \frac{d\omega}{dt} \right| \\ y = |\Delta\omega| \end{cases} \quad (19)$$

联立式(16)-(19),则惯量与阻尼的自适应表达式可统一表示为:

$$J = \begin{cases} J_0 & x \leq M_J \\ J_0 + \frac{K_{J1}}{1 + e^{-\alpha_1(x - M_J)}} \cdot x & M_J < x \leq M_{J1} \\ J_0 + \frac{K_{J1}}{1 + e^{-\alpha_1(x - M_J)}} \cdot x + \frac{K_{J2}}{1 + e^{-\alpha_1(x - M_{J1})}} \cdot x & x > M_{J1} \end{cases} \quad (20)$$

$$D = \begin{cases} D_0 & y \leq M_D \\ D_0 + \frac{K_D}{1 + e^{-\alpha_2(y - M_D)}} \cdot y^\beta & y > M_D \end{cases} \quad (21)$$

式(20)、(21)中: J_0 、 D_0 分别为VSM转动惯量和阻尼系数稳态基准值; K_J 、 K_D 为转动惯量和阻尼系数的调节系数; α_1 、 α_2 为Sigmoid函数陡峭系数,控制参数过渡的平滑参数; M_J 、 M_D 为角速度变化阈值和角速度偏差阈值。具体控制策略逻辑如下:

$|d\omega/dt|$ 低于阈值 M_J 时,Sigmoid函数值趋近于零,系统保持基准值 J_0 运行;当 $|d\omega/dt|$ 远高于 M_J 时,Sigmoid函数值趋近于1, J 在基准值基础上增加 $K_J \cdot |d\omega/dt|$,增量与角速度变化率呈正比关系,符合设计的要求;同理,当频率偏差 $|\Delta\omega|$ 低于阈值 M_D 时,阻尼系数维持基准值 D_0 保持不变;当频率偏差 $|\Delta\omega|$ 远超于 M_D 时,阻尼系数在基准值基础上增加 $K_D \cdot |\Delta\omega|^\beta$ 。

式(20)、(21)中, α_1 和 α_2 体现控制参数过渡的平滑程度: α 值越大,Sigmoid函数在阈值附近的上升沿越陡峭,控制效果越接近传统控制; α 值越小,过渡越平缓,系统鲁棒性增强但响应灵敏度相应降低。通过调节系数 β 能进一步增加系统的灵活性:当 $\beta>1$ 时,阻尼增量随频率偏差呈超线性增长,适用于抑制大偏差工况下的频率振荡;当 $0<\beta<1$ 时,增量呈次线性增长,可防止阻尼系数过快饱和。

该策略通过Sigmoid函数的连续性确保了 J 和 D 在阈值附近的平滑过渡,在保留传统控制策略物理直观性的同时,有效克服了其数学不连续性带来的参数跳变问题。

3.4 基准值参数设定方法

J_0 、 D_0 可依据“最优二阶系统”进行选定^[35],当系统处于稳态时, $d\omega/dt=0$, D_0 可依据式(22)进行参数设定

$$0 < D < \frac{T_{m\max} - T_e}{\omega_{\max} - \omega_{Te}} \quad (22)$$

式(22)中: $T_{m\max}$ 为机械转矩最大值; $\omega_{\max}$ 为角偏移量最大值。 J_0 的参数设定可参照式(23)

$$J \leq \frac{P_{\max}}{\max\{\omega(d\omega/dt)\}} \quad (23)$$

式(23)中, $P_{\max}$ 为VSM输出功率最大值。

4 仿真验证

为验证自适应VSM策略的有效性,本章结合前面章节推导的公式及控制策略设计了精细化的物理仿真,搭建PMSG、PEM电解槽物理仿真模型,其总体控制结构图见图1。将风电制氢系统置入弱电网中,弱电网SCR设置为3.5^[36]。分别设置系统频率扰动,PEM电解槽负荷投切,变风速3种工况对自适应VSM策略频率支撑的效果进行验证,并与 J 自适应VSM(以下简称AVSM),传统VSM控制策略及双闭环控制策略作对比验证分析。主要仿真参数见表2。

表2 仿真参数

Table 2 Simulation parameter

参数	数值
线电压幅值 U_l/V	380
额定频率 f/Hz	50
网侧电阻 R_s/Ω	0.000 5
网侧滤波电感 L_s/H	0.000 1
基准惯性参数 J_0	10
基准阻尼参数 D_0	1 500
电解槽有功负荷/MW	2.5
PMSG额定容量/MW	5

4.1 系统频率阶跃仿真验证

为了验证 AVSM 策略的有效性, 设置系统频率在 1 s 时由额定值 50 Hz 下降至 49.9 Hz, 在 2 s 时恢复额定值 50 Hz, 而后在 3.2 s 又上升至 50.1 Hz 直至 4 s 恢复额定值 50 Hz。频率扰动下不同控制下策略对应的电解槽功率响应见图 8。

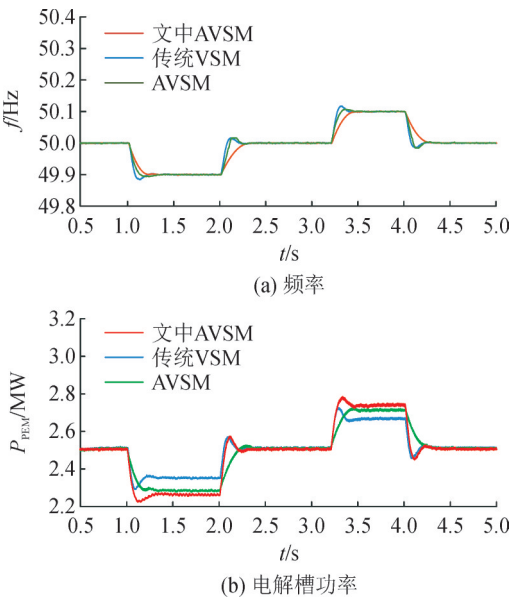


图 8 频率扰动下频率与电解槽功率的响应曲线

Fig. 8 The response curve of frequency and power under frequency disturbance

系统频率扰动变化见图 8(a)。从图 8(a)可以明显看出 PEM 电解槽采用 VSM 策略使系统具备了惯量和阻尼。其中在 1 s 和 4 s 时刻频率下降以及在 2 s 和 3.2 s 时刻频率上升时, 采用文中所提出的 AVSM 策略, 系统频率的超调量显著小于另外两种控制策略, 且超调恢复时间更短。PEM 电解槽负荷消耗的功率见图 8(b), 3 种结果均表明, 其能够较好地跟踪系统频率变化, 具有良好的动态响应特性, 验证了 VSM 策略应用在 PEM 电解槽制氢侧的可行性; 采用文中 AVSM 策略控制的电解槽在频率跌落达到稳态时消耗功率稳定在 2.281 MW 左右, 比传统 VSM 策略控制下的系统增加了 0.05 MW 左右, 比 AVSM 增加了 0.02 MW 左右, 但相较于传统 VSM 其牺牲较小的制氢效率能达到更好的频率支撑效果, 具有一定的优越性。

双闭环控制策略下频率与电解槽功率的响应见图 9。在频率扰动施加瞬间, PEM 电解槽未产生明显功率响应; 同时, 在弱电网条件下, 其频率波动幅度较采用 VSM 控制策略时显著增大, 且缺乏阻尼和惯性; 由此可知, 其不具备频率支撑的能力。

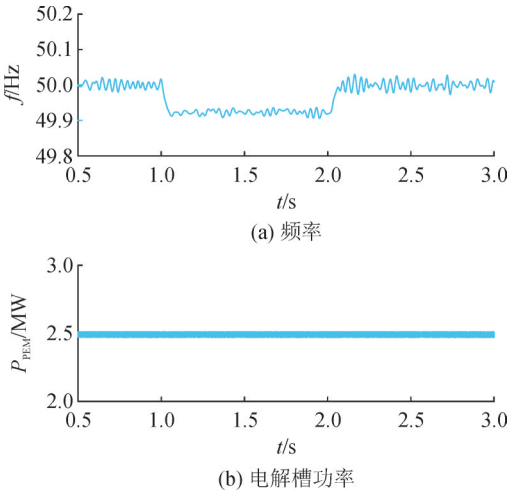


图 9 双闭环控制策略下频率与电解槽功率的响应曲线
Fig. 9 Response curve of frequency and electrolytic cell power under double closed-loop control strategy

4.2 PEM 电解槽负荷突然投切仿真验证

兆瓦级的 PEM 制氢电解槽投切瞬间会对电力系统及制氢设备本体的安全稳定运行构成威胁。其突然的启停会引起系统内有功和频率的剧烈波动。

本小节设置 1 s 时在系统网侧投入一台额定功率为 2.5 MW 的 PEM 电解槽制氢负荷, 2 s 时将其切出, 系统频率变化及电解槽负荷功率响应见图 10。

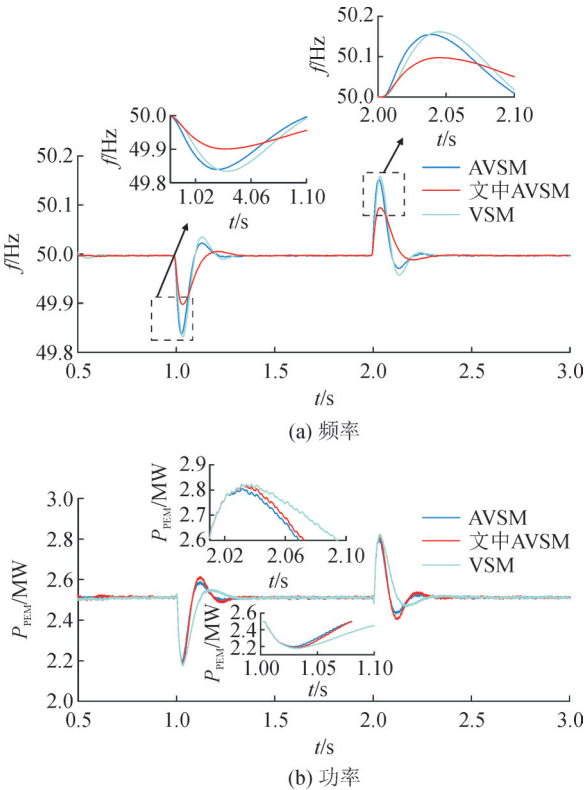


图 10 制氢负荷投切下频率与功率的响应曲线
Fig. 10 Response curve of frequency and power under hydrogen production load switching

制氢负荷投切下 P_m , P_e , U_{dc} 响应曲线见图 11。

如图11所示,在1 s制氢负荷投入的瞬间,采用常规VSM控制策略的系统频率跌落至49.834 Hz;采用AVSM策略频率跌落至49.839 Hz;文中采用的AVSM策略系统频率跌至49.900 Hz,对比传统VSM策略其超调下降了0.066 Hz,相较于传统VSM策略其超调下降了0.061 Hz。对比之下其超调量分别下降了66%和61%;功率超调较其他两种策略分别高了0.02 MW及低了0.01 MW,可以看出其消耗的功率消耗增加量或减少量可忽略不计,在牺牲较少的制氢速率的情况下其改善频率超调的效果能保持较明显水平。同样的可以看出,在2 s时制氢负荷突增时AVSM策略较其他两种策略也有显著改善。通过对比可以看出所提AVSM策略能改善频率超调量并缩短超调时间,同时对制氢负荷消耗的功率的超调量几乎没有影响,与另外两种控制策略相比具有一定的优越性。

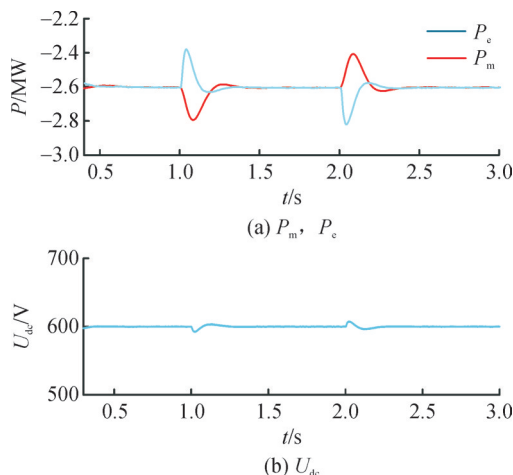


图11 制氢负荷投切下 P_m, P_e, U_{dc} 响应曲线

Fig. 11 P_m, P_e, U_{dc} response curves under hydrogen production load switching

由图11(a)可以看出,制氢负荷投切的瞬间系统总的功率瞬间缺额,虚拟机械功率 P_m 绝对值在0.2 s上升后恢复稳态值,电磁输出功率 P_e 绝对值在此期间与其刚好相反最后恢复稳态值时两者保持一致,这完全符合文中提出的制氢负荷VSM策略。从图11(b)看出其直流电压波动起伏值较小且能瞬间恢复至额定值600 V,说明DC-DC换流器的控制策略效果较好,具有较好的电压稳定功能。

4.3 变风速情况下VSM控制策略出力情况

弱电网场景下电力系统主动支撑能力较弱,风能的随机性会造成宽功率波动。在风-氢耦合系中宽功率波动会引起系统频率的扰动进而会影响PEM电解槽的寿命。设置PMSG风速为典型风速,PMSG输出功率、电流及电压见图12。

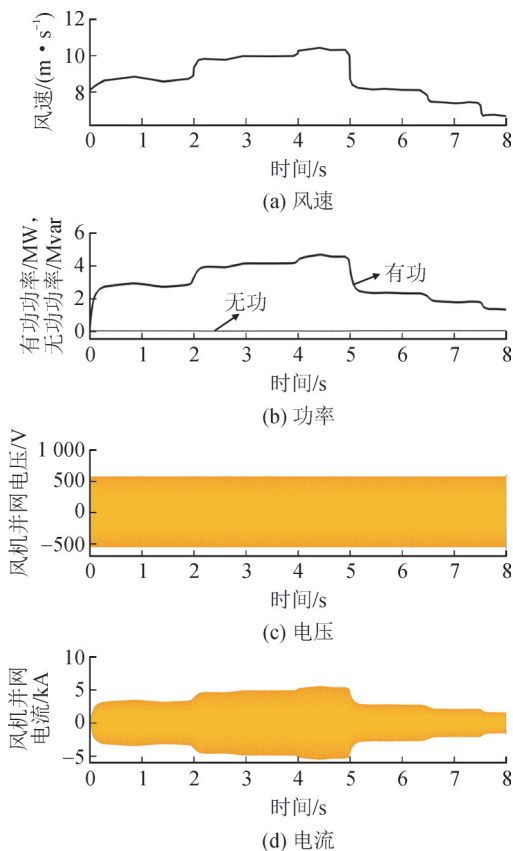


图12 典型日风速下PMSG仿真图

Fig. 12 PMSG simulation diagram under typical daily wind speed

风速在2~2.12 s时首次剧烈上升,由8.88 m/s升至9.77 m/s,风机输出功率由3.5 MW升至4.66 MW,电流由4 030 A升至5 344 A;;在时间4.91 s至5.44 s时风速首次由10.32 m/s快速下降至8.1 m/s;功率稳定跟随风速由4.91 MW降落至2.81 MW,电流也由6 308 A回落至3 358 A;风速剧烈变化时并网点电压均保持563.4 V不变,无功功率稳定在较低水平,电流及功率变化趋势均能稳定跟随风速变化,验证了PMSG控制策略的有效性。在典型日风速下,系统频率及电解槽功率见图13。

由图13可见在2 s时风速剧烈上升期间,系统功率瞬间增加,在文中提出的AVSM控制下,系统频率超调为0.033 9 Hz,常规VSM控制的超调为0.044 1 Hz,超调量下降了23.13%,功率波动也相较传统控制策略下降了0.02 MW。在4.91 s时,风速急剧下降,导致系统功率缺额,AVSM策略下的频率下跌至49.941 4 Hz,常规VSM策略下频率下降49.919 2 Hz,频率超调量下降至53.62%,相应的电解槽消耗功率最大值也减小了0.06 MW。通过对比可以看出,在典型日风速下,采用AVSM控制策略的PEM电解槽能快速响应系统频率的变化从而抑制其超调量,同时对电解槽功率变化也有一定的平抑

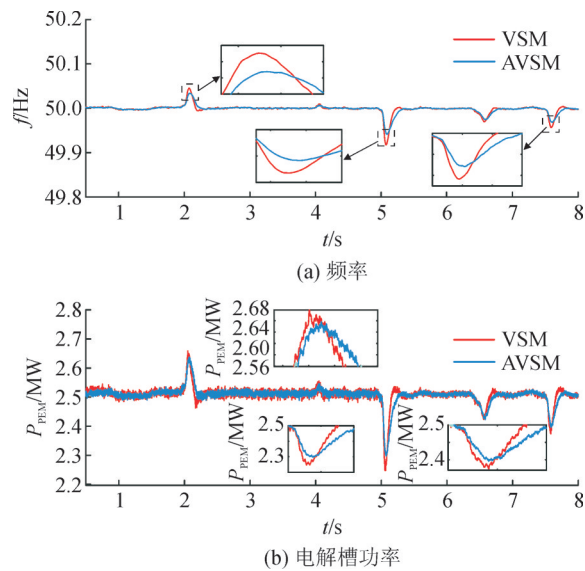


图 13 典型日风速下系统频率 PEM 电解槽功率响应
Fig. 13 Power response of system frequency PEM electrolyzer under typical daily wind speed

作用,波动范围在允许最大值 3.75 MW 以下,频率波动范围均在 0.2 Hz 之间,符合国家标准。

5 结论

随着以风电为代表的可再生能源接入比例不断提高,电网侧的可控柔性负荷已经成为了一种新型的调节资源。针对弱电网下电力系统主动支撑能力不足的问题,文中提出了一种基于自适应虚拟同步机控制策略的风氢耦合系统。通过仿真结果可以得出如下结论:

1)所提的自适应虚拟同步机控制策略是通过 Sigmoid 函数自适应调节惯量和阻尼系数,使二者实现协同控制,实现调节过程平稳运行对系统频率的动态特性进行协同优化。

2)针对 PEM 电解槽制氢负荷所提的 AVSM 控制策略较传统的 VSM 控制策略相比,在制氢负荷投切工况下,其超调量最高下降了 66%和 61%,在典型日风速下其频率超调量下降了 23%和 56%对频率波动具抑制作用,且频率恢复稳态的时间明显加快。

3)文中所提的 AVSM 策略充分利用了 PEM 电解槽快速功率响应的能力,使电网中不平衡的功率主要由 PEM 电解槽制氢负荷消纳补偿,减少了电力系统中同步机组调频的压力,保障了可再生能源平稳运行。

为进一步利用可控柔性负荷对电力系统支撑的能力,文中接下来将会向储一氢协同支撑策略方向进行研究,依据其不同支撑能力对其功率消耗进行合理分配,进一步提升可柔性负荷的支撑能力。

参考文献:

[1] 王士博,孔令国,张 珣,等. 风储耦合多碱性电解制氢功率—状态滚动优化控制[J/OL]. 中国电机工程学报: 1-14[2026-01-16].<https://link.cnki.net/urlid/11.2107.TM.20250909.1644.014>. Wang Shibao, Kong Lingguo, Zhang Xun, et al. Wind turbine and energy storage coupled multi alkaline electrolysis hydrogen production power state rolling optimization control[J/OL]. Proceedings of the CSEE: 1-14[2026-01-16].<https://link.cnki.net/urlid/11.2107.TM.20250909.1644.014>.

[2] 袁雪枫,余才阳,鲍杰利. 风能驱动发电机宽频振荡监测方法研究[J]. 电网与清洁能源, 2025, 41(2): 107-112. Yuan Xuefeng, Yu Caiyang, Bao Jieli. A study on the broadband oscillation monitoring of wind-driven generators[J]. Power System and Clean Energy, 2025, 41(2): 107-112.

[3] 金 楚,李作红,林 勇,等. 考虑频率安全及风能转移的风电场规划与运行[J]. 电力建设, 2025, 46(3): 155-165. Jin Chu, Li Zuohong, Lin Yong, et al. Planning and operation of wind farms considering frequency safety and wind energy transfer [J]. Electric Power Construction, 2025, 46(3): 155-165.

[4] 王义军,胡一鸣,许家豪. 计及风能—碳捕集运行模式下的区域综合能源低碳经济调度[J]. 电测与仪表, 2025, 62(8): 39-48. Wang Yijun, Hu Yiming, Xu Jiahao. Low - carbon economic dispatching of RIES considering wind energycarboncapture operation mode[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(8): 39-48.

[5] 邱一苇,吉 旭,朱文聪,等. 面向新能源规模化消纳的绿化工技术研究现状与关键支撑技术展望[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(18): 6934-6955. Qiu Yiwei, Ji Xu, Zhu Wencong, et al. Research status of green hydrogen based chemical engineering technology and prospect of key supporting technologies for large - scale utilization of new energies[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43 (18): 6934-6955.

[6] 林 今,程 祥,邱一苇,等. 可再生能源电解水制氢的组网接入与运营关键技术研究综述[J]. 高电压技术, 2025, 51(5): 2078-2095. LIN Jin, CHENG Xiang, QIU Yiwei, et al. A review of structure configuration, integration, operation and key technologies of renewable energy power to hydrogen system[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(5): 2078-2095.

[7] 杨 胜,樊艳芳,侯俊杰,等. 可再生能源 ALK-PEM 联合制氢系统多时间尺度优化运行策略[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53 (3): 68-80. Yang Sheng, Fan Yanfang, Hou Junjie, et al. Multi - time scale optimization strategy of a renewable energy ALK-PEM combined hydrogen production system[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(3): 68-80.

[8] 施 涛,许泽炎,雷震亚,等. 计及一致性的多点新能源发电制氢协同控制策略研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2025, 46(2): 26-36. Shi Tao, Xu Zeyan, Lei Zhenya, et al. Study on cooperative control strategy of multi-point new energy power generation and hydrogen

- production considering consistency[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2025, 46(2): 26-36.
- [9] 宋洁, 郜捷, 梁丹曦, 等. 质子交换膜电解制氢系统建模研究综述[J]. 电力建设, 2024, 45(2): 58-78.
Song Jie, Gao Jie, Liang Danxi, et al. A review on modeling of hydrogen production system with proton exchange membrane electrolysis[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(2): 58-78.
- [10] 范建斌, 孟昭军, 周格格, 等. 电解水制氢储能系统并网互动运行标准体系架构研究[J]. 电网与清洁能源, 2025, 41(9): 1-8.
Fan Jianbin, Meng Zhaojun, Zhou Gege, et al. Research on the standard framework for the grid integration and interactive operation of water electrolysis - based hydrogen energy storage systems[J]. Power System and Clean Energy, 2025, 41(9): 1-8.
- [11] 李建林, 王大龙, 赵文鼎, 等. 计及动态氢价的光伏电解水制氢调度策略[J]. 电力建设, 2025, 46(2): 99-112.
Li Jianlin, Wang Dalong, Zhao Wending, et al. Hydrogen production scheduling strategy for photovoltaic electrolysis of water considering dynamic hydrogen prices[J]. Electric Power Construction, 2025, 46(2): 99-112.
- [12] 李建林, 郑新龙, 梁忠豪, 等. 电解水制氢电源的宽范围动态调压控制策略[J/OL]. 中国电机工程学报: 1-18 [2026-01-16]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.psee.250761>.
Li Jianlin, Zheng Xinlong, Liang Zhonghao, et al. Wide range dynamic voltage regulation control strategy for hydrogen production powersupply by electrolysis[J/OL]. Proceedings of the CSEE: 1-18 [2026-01-16]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.psee.250761>.
- [13] 刘国永, 任永峰, 薛宇, 等. 基于 PEM 电解槽的风氢耦合系统能量管理研究[J]. 太阳能学报, 2024, 45(7): 240-248.
Liu Guoyong, Ren Yongfeng, Xue Yu, et al. research on energy management of wind - hydrogen coupling system based on pem electrolyzer[J]. Actaenergiae solaris sinica, 2024, 45(7): 240-248.
- [14] 何杭航, 夏杨红, 李立民, 等. 风电直接制氢系统自适应功率协同控制[J]. 电网技术, 2025, 49(9): 3699-3709.
He Hanghang, Xia Yanghong, Li Limin, et al. Adaptive power coordination control based on wind - hydrogen direct - connected system[J]. Power System Technology, 2025, 49(9): 3699-3709.
- [15] 燕兵, 杨志林, 张岩, 等. 含海上风电制氢和多重响应的综合能源系统源-荷多时间尺度优化调度[J]. 南方电网技术, 2025, 19(6): 107-120.
Yan Bing, Yang Zhilin, Zhang Yan, et al. Optimization of source - load multi - time scale for hydrogen integrated energy system including hydrogen production from offshore wind power and multiple responses[J]. Southern Power System Technology, 2025, 19(6): 107-120.
- [16] 万庆祝, 闵现娟, 于佳松, 等. 需求响应下的电制氢多模式利用综合能源系统优化调度[J]. 供用电, 2024, 41(12): 81-92.
Wan Qingzhu, Min Xianjuan, Yu Jiasong, et al. Optimized scheduling for an integrated energy system with multi - modal utilization of electricity - to - hydrogen under demand response[J]. Distribution & Utilization, 2024, 41(12): 81-92.
- [17] 曹蕃, 郭婷婷, 陈坤洋, 等. 风电耦合制氢技术进展与发展前景[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(6): 2187-2201.
Cao Fan, Guo Tingting, Chen Kunyang, et al. Progress and development prospect of coupled wind and hy - drogen systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(6): 2187-2201.
- [18] Lin Haiyang, Wu Qiuwei, Chen Xinyu, et al. Economic and technological feasibility of using power - to - hydrogen technology under higher wind penetration in China[J]. Renewable Energy, 2021 (173): 569-580.
- [19] Ramakrishnan S, Delpisheh M, Convery C, et al. Offshore green hydrogen production from wind energy: critical review and perspective[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2024 (195): 114320.
- [20] 氢能产业发展中长期规划(2021—2035年)[EB/OL]. [2026-01-16]. <https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcflb/ghwb/202203/P02022032331439-6580505.pdf>.
Medium - and long - term plan for the development of the hydrogen energy industry (2021—2035)[EB/OL]. [2026-01-16]. <https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcflb/ghwb/202203/P02022032331439-6580505.pdf>.
- [21] 汪颖, 钟启明, 刘育权, 等. 新型电力系统的电能质量扰动治理关键技术综述及展望[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(22): 8670-8691.
Wang Ying, Zhong Qiming, Liu Yuquan, et al. Review and prospects of key technologies for power quality disturbance mitigation in new-type power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(22): 8670-8691.
- [22] 李思颖, 易俊, 林伟芳. 质子交换膜电制氢负荷协同储能参与电力系统调峰能力评估[J]. 电网技术, 2025, 49(2): 552-561.
Li Siying, Yi Jun, Lin Weifang, et al. Proton exchange membrane hydrogen production load collaborates with energy storageto participate in the evaluation of peak load balancing capacity of power system[J]. Power System Technology, 2025, 49(2): 552-561.
- [23] Wang Xiongzheng, Meng Xin, Nie Gongzhe, et al. Optimization of hydrogen production in multi-electrolyzer systems: a novel control strategy for enhanced renewable energy utilization and electrolyzer lifespan[J]. Applied Energy, 2024(376): 124299.
- [24] 柴海东, 任永峰, 云平平, 等. 构网型风氢耦合系统电解槽轮值优化控制[J]. 高压电器, 2024, 60(7): 12-22.
Chai Haidong, Ren Yongfeng, Yun Pingping, et al. Rotational optimization control of electrolytic cell in grid - forming wind - hydrogen coupling system[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(7): 12-22.
- [25] Sharifzadeh M, Cooper N, Van't Noordende H, et al. Operational strategies and integrated design for producing green hydrogen from wind electricity[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024 (64): 650-675.
- [26] 李建林, 鞠万辉, 梁忠豪, 等. 考虑混合电解槽启停特性的风氢储能系统精细化功率分配策略[J]. 电力系统自动化, 2026, 50(7): 74-84.
Li Jianlin, Ju Wanhui, Liang Zhonghao, et al. Refined power distribution strategy for wind-hydrogen-storage systems considering start-stop characteristics of hybrid electrolyzers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2026, 50(7): 74-84.
- [27] 鞠万辉, 任永峰, 云平平, 等. 考虑功率模糊分段的风氢储能系统混合电解槽分组轮换策略[J]. 太阳能学报, 2026, 47(3): 222-233.

Ju Wanhui, Ren Yongfeng, Yun Pingping, et al. Group rotation strategy of wind - hydrogen - storage system hybrid electrolyzer considering fuzzy piecewise power control[J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2026, 47(3): 222-233.

[28] 翟冬阳, 姚良忠, 程帆, 等. 提升系统频率支撑能力的“车—氢”柔性可控负荷协同构网控制[J]. *电网技术*, 2025, 49(8): 3230-3243.

Zhai Dongyang, Yao Liangzhong, Cheng Fan, et al. A coordinated grid-forming control method of EV and hydrogen flexible controllable loads for enhancing system frequency support capability[J]. *Power System Technology*, 2025, 49(8): 3230-3243.

[29] Huang C, Zong Y, You S, et al. Analytical modeling and control of grid-scale alkaline electrolyzer plant for frequency support in wind-dominated electricity - hydrogen systems[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2023, 14(1): 217-232.

[30] 贺彬, 任永峰, 孟庆天, 等. 基于构网型储能双虚拟电机控制的风电制氢系统[J]. *高电压技术*, 2025, 51(4): 1867-1876.

He Bin, Ren Yongfeng, Meng Qingtian, et al. Hydrogen production system by wind power based on dual virtual motor control for grid-forming energy storage[J]. *High Voltage Engineering*, 2025, 51(4): 1867-1876.

[31] 范新桥, 张宽, 赵波, 等. 面向PEM电解制氢的虚拟同步控制技术[J]. *储能科学与技术*, 2024, 13(11): 3949-3960.

Fan Xinqiao, Zhang Kuan, Zhao Bo, et al. Research on virtual synchronous control technology for PEM electrolysis hydrogen production[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2024, 13(11): 3949-3960.

[32] 郜捷, 宋洁, 王剑晓, 等. 支撑中国能源安全的电氢耦合系统形态与关键技术[J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(19): 1-15.

Gao Jie, Song Jie, Wang Jianxiao, et al. Form and key technologies of integrated electricity - hydrogen system supporting energy security in China[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(19): 1-15.

[33] 尹德强, 姚良忠, 程帆, 等. 考虑制氢效率优化的氢—储—风直流微网功率协调控制[J]. *电力系统自动化*, 2024, 48(13): 19-29.

Yin Deqiang, Yao Liangzhong, Cheng Fan, et al. Power coordinated control for DC microgrid with hydrogen-storage-wind power considering hydrogen production efficiency optimization[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2024, 48(13): 19-29.

[34] Koponen J, Kosonen A, Ruuskanen V, et al. Control and energy efficiency of PEM water electrolyzers in renewable energy systems[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(50): 29648-29660.

[35] 杨赟, 梅飞, 张宸宇, 等. 虚拟同步发电机转动惯量和阻尼系数协同自适应控制策略[J]. *电力自动化设备*, 2019, 39(3): 125-131.

Yang Yun, Mei Fei, Zhang Chenyu, et al. Coordinated adaptive control strategy of rotational inertia and damping coefficient for virtual synchronous generator[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2019, 39(3): 125-131.

[36] 郭旭存, 任永峰, 张岩, 等. 基于双自适应协同优化的构网型储能主动支撑策略[J/OL]. *高电压技术*: 1-15[2026-01-16]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20250938>.

Guo Xucun, Ren Yongfeng, Zhang Yan, et al. Active support strategy for grid-forming energy storage based on dual adaptive collaborative optimization[J/OL]. *High Voltage Engineering*: 1-15[2026-01-16]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20250938>.

王佳乐(2000—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为新能源发电(E-mail: 3310638192@qq.com)。

任永峰(1971—), 男, 博士, 教授, 博导, 主要从事新型电力系统运行与控制、新能源发电、氢能存储技术方面的研究(通信作者)(E-mail: renyongfeng@imut.edu.cn)。