

计及一致性的多点新能源发电制氢协同控制策略研究

施涛^{1,2}, 许泽炎¹, 雷震亚¹, 朱维骏¹

(1. 南京邮电大学自动化学院, 南京 210023; 2. 南京邮电大学碳中和先进技术研究院, 南京 210023)

摘要: 随着新能源的快速发展,为了满足供电系统高可靠性的需求,如何实现多点新能源之间的协同控制,成为研究的热点问题。文章提出一种计及一致性的多点新能源发电制氢系统协同控制策略,一方面,基于负载需求以及新能源发电功率,动态调整各台虚拟同步发电机的输出功率,使电解槽在参与电网频率调节的同时能够提升整体的制氢效率;另一方面,通过建立频率一致性算法,维持并联系统各节点间的频率同步,确保系统稳定运行。其次,考虑多点协同控制在交互的过程中存在的通信延时问题,在原有协同控制策略的基础上,引入模型预测控制,提前预测并补偿延时造成的控制误差,来提升系统在通信延时情况下的鲁棒性。最后,通过仿真验证所提控制策略的有效性。

关键词: 协同控制; 制氢效率; 一致性算法; 通信延时; 模型预测控制

Study on Cooperative Control Strategy of Multi-point New Energy Power Generation and Hydrogen Production Considering Consistency

SHI Tao^{1,2}, XU Zeyan¹, LEI Zhenya¹, ZHU Weijun¹

(1. College of Automation, Nanjing University of Posts and Telecommunication, Nanjing 210023, China;

2. Institute of Advance Technology for Carbon Neutrality, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

Abstract: With the rapid development of renewable energy, how to achieve cooperative control among multiple renewable energy sources to meet the high-reliability requirements of power supply systems has become a hot research topic. In this paper a kind of cooperative control strategy for a multi-point renewable energy power-to-hydrogen system that takes consistency into account is proposed. On one hand, based on load demand and renewable energy generation power, the output power of each virtual synchronous generator (VSG) is dynamically adjusted to enable the electrolyzer to participate in grid frequency regulation while improving the overall hydrogen production efficiency. On the other hand, the stable operation of the system is maintained by setting up a frequency consistency algorithm and maintaining frequency synchronization among the nodes of the parallel system. Furthermore, considering the communication delay issues that arise during the interaction process of multi-point cooperative control, the model predictive control is introduced on the basis of the original cooperative control strategy to predict and compensate for control errors in advance due to delays, thereby enhancing the system's robustness under communication delay conditions. Finally, the effectiveness of the proposed control strategy is verified through simulation.

Keywords: cooperative control; hydrogen production efficiency; consensus algorithm; communication delay; model predictive control

0 引言

新能源发电凭借其清洁低碳的优势迅猛发展,但新能源输出功率的间歇性以及波动性给电力系

统安全稳定运行带来巨大挑战,迫切需要额外的灵活调节资源^[1-4]。氢能作为一种来源广泛、清洁无碳、灵活高效、应用场景丰富的二次能源,是支撑能源转型变革、构建现代能源体系的重要载体;一方

收稿日期:2025-02-27

基金项目:国家自然科学基金(62192753)。

面,可将多余的电能以化学能的方式储存在氢气中,平抑可再生能源功率波动,提高消纳空间,推进能源清洁化;另一方面,通过集成虚拟同步控制技术,新能源发电制氢系统可模拟同步发电机组的惯量响应特性,实现对电网频率的主动支撑^[5-7]。

为了满足供电系统高可靠性的需求,对多点新能源发电制氢系统进行并联协同控制。然而,并联系统在稳态运行时存在的功率分配、节点状态不一致、频率波动等相关问题不可忽视^[8-9]。文献[10]提出了一种新型混合整流器协同控制方法,并应用于电解槽制氢系统,实现多尺度频率调节,但并未考虑电解槽的制氢效率;文献[11]通过小信号模型揭示了并联虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)功率振荡的产生机理,提出了一种基于一致算法的二次调频控制策略,能够有效抑制并联 VSG 系统的功率振荡;文献[12]提出了一种基于一致性的并联 VSG 分布式控制方法,可以很好的实现 VSG 系统频率恢复及出力合理分配;文献[13]利用模型预测控制实现对频率偏差的实时补偿,提升了 VSG 并网逆变器的无差调频能力和运行性能;文献[14]提出了基于模型预测控制的 VSG 控制方法,有效解决了新能源出力波动或负荷投切等导致微网内瞬时功率失衡时,引起的系统频率振荡问题,但并未扩展到多机系统中;文献[15]提出了一种基于系统阻尼比可控可变的 VSG 参数协调控制策略,有效改善 VSG 系统动态响应的同时优化系统储能的容量配置;文献[16]将共识算法与模型预测控制相结合,模型预测控制计算出的增量功率通过一致性算法进行交互,优化系统之间的相互阻尼,能够有效抑制有功功率波动;文献[17]研究了存在故障和干扰的情况下,微电网(microgrid, MG)的频率和电压恢复问题。以上研究内容通过建立分布式控制方法,一方面能够实现 VSG 系统频率的恢复及有功出力

的合理分配;另一方面,针对新能源出力波动或负荷投切等导致微网内瞬时功率失衡时,引起的系统频率振荡问题,提出了解决方法;能够有效提升系统在扰动情况下的稳定性,抑制系统的有功功率波动,但并未考虑多点之间的通信延时问题。

在多点协同控制过程中,通信延时常常无法忽略。延时的存在会弱化系统的动态性能,造成系统频率波动,因此需要考虑通信延时的因素对协同控制策略进行优化^[18-19]。文献[20]提出了一种考虑通信延时的分布式发电系统高可靠协同控制策略,通过引入 Artstein 变换,将含延时系统的稳定性问题转换为无延时系统的控制器优化设计问题,提升了系统在通信延时下的控制性能;文献[21]将虚拟阻抗与频率变化率以及自适应惯量相结合,降低了初始功率超调量,提升了机组频率、功率的一致性,增强系统在通信不确定环境下的鲁棒性。上述文献在研究多点协同控制时,考虑了通信延时对系统性能的影响,提出的控制策略能够有效增强系统在通信不确定情况下的鲁棒性,但缺乏对多点协同情况下有功出力分配问题研究。

在以上研究的基础上,本文以氢能作为灵活调节资源,并基于频率一致性算法,提出多点新能源发电制氢协同控制策略;当电网频率发生扰动时,新能源发电制氢系统不仅能够参与电网频率调节,减缓各节点频率不一致带来的波动;还能对每台电解槽的输入功率进行合理分配,提升电解槽整体的制氢效率,兼顾电网的稳定性和制氢系统的经济性。其次,在原有控制的基础上,设计模型预测控制器,来缓解多点协同控制存在的通信延时问题,提升系统整体的鲁棒性。

1 新能源发电制氢系统概述

1.1 新能源发电制氢并网系统

新能源发电制氢系统的基本架构如图 1 所示。

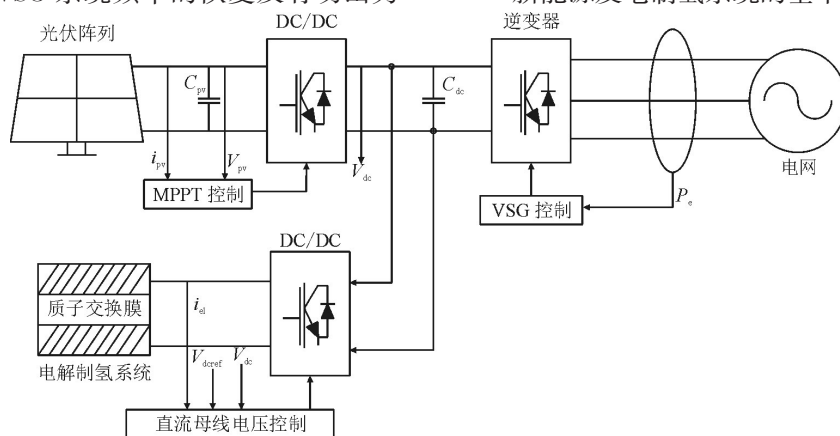


图1 新能源发电制氢系统框图

Fig. 1 Block diagram of new energy power generation and Hydrogen production system

图中核心由新能源发电单元、电解制氢单元及并网接口单元3部分构成。光伏发电系统通过电力电子变换器接入直流母线,与电解制氢装置形成直流侧直接耦合;电解制氢系统通过双向DC/DC变换器与直流母线进行功率交互。系统通过并网逆变器接入电网,完成电能的双向流动。

为弥补新能源发电系统缺乏惯量与调频能力的固有缺陷,采用虚拟同步发电机(VSG)技术对并网逆变器进行改造^[22-23]。该技术通过模拟同步发电机的机电特性,使系统具备动态响应电网频率波动的能力。当电网频率发生偏移时,VSG控制模块通过调节逆变器输出功率,实现系统对电网的有功支撑。耦合后的新能源发电制氢系统不仅能实现清洁能源的高效转化与存储,还可作为灵活调节资源参与电网频率稳定控制,形成发电-制氢为一体化的新型电力系统单元。

1.2 电解制氢系统

1.2.1 电解槽模型

电解槽是电解制氢系统的核心模块,其性能直接影响制氢效率和系统的稳定性。常见的电解槽类型有碱性电解槽、质子交换膜(proton exchange membrane, PME)电解槽和固体氧化物电解槽等,本文主要根据质子交换膜电解槽的模型进行分析,其结构如图2所示^[24-25]。

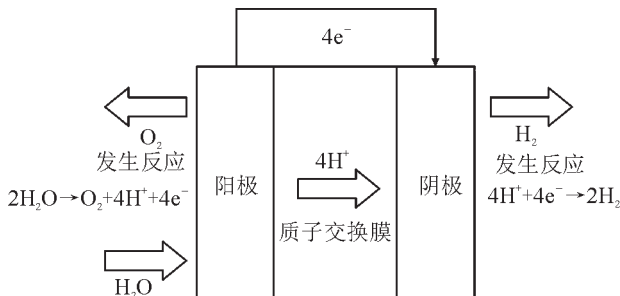


图2 电解槽基本结构

Fig. 2 Basic structure of the electrolyzer

1.2.2 电解槽运行特性

电解槽数学模型可表示为

$$\begin{cases} Q_{cl} = P_{cl} \eta \\ \eta = 0.965 e^{(0.09 I_{cl} - 75.5 I_{cl}^2) \frac{U_{in}}{U_{cl}}} \end{cases} \quad (1)$$

式中: Q_{cl} 为电解槽产氢量; P_{cl} 为电解槽输入功率; η 为电解槽效率; I_{cl} 为电解电流; U_{in} 为热中性电压,即理论分解电压 1.23 V; U_{cl} 为实际电解水电压。

图3给出了PEM电解槽的效率特性曲线。从图中可以看出,电解槽的制氢效率与输入功率密切相关。在初始阶段,当输入功率较低时,电解槽尚

未进入最佳工作状态,电流密度相对较低,导致整体效率不高。随着输入功率的逐渐增加,电解槽的电流密度也随之增大,制氢效率迅速提升。当输入功率达到某一临界值时,电解槽的效率达到峰值。然而,一旦超过这一临界值,随着输入功率的增加,电解槽内的电流逐渐增大,在高电流密度下,电解槽电极表面的电化极化显著增强,导致电解槽的实际电解电压升高,从式(1)可以看出,制氢效率与电解电压成反比,因此,继续增加输入功率会导致效率逐渐下降。

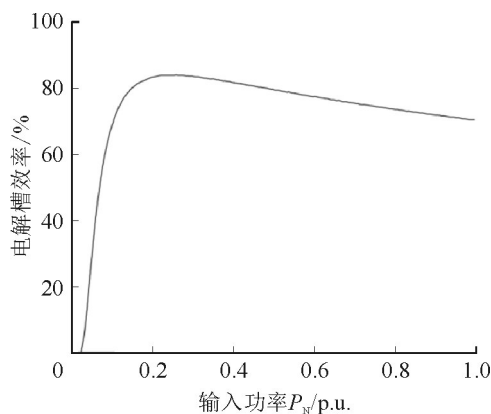


图3 PEM电解槽效率特性曲线

Fig. 3 Efficiency characteristic curve of the PEM electrolyzer

根据上述分析可知,在设计多机并联系统的协同控制策略时,必须充分考虑电解槽的效率因素。这样不仅可以提高整个系统的整体效率,还能确保资源的合理利用,避免因功率分配不当而造成的能源浪费。通过优化功率分配,可以实现系统的高效运行,从而提高电解制氢过程的经济性。

2 多点新能源发电制氢系统协同控制策略

2.1 协同控制目标

多点新能源发电制氢系统协同控制旨在应对新能源发电特性与制氢系统运行需求带来的挑战,通过优化各组件运行及相互协作,实现电力与氢能的高效融合,其核心目标涵盖功率分配优化、频率调节协同以及系统稳定性提升多个方面。

2.1.1 参与电网频率调节,维持电网稳定

电网频率扰动是影响电力系统稳定运行的关键因素。多点新能源发电制氢系统借助虚拟同步控制技术,在频率波动时迅速调整VSG输出功率,主动投身电网频率调节。当电网频率上升,系统可降低新能源发电注入量或增加电解槽制氢负荷,消耗多余电能;频率下降时,则减少电解槽功率需求,向电网补充电能。系统能够在短时间内将电网频

率稳定在允许范围内,极大地提升电力系统的稳定性与可靠性,为电网的安全运行提供有力支撑。

2.1.2 优化功率分配,提升能源利用率

通过分析电解槽的制氢效率与输入功率之间的关系,构建动态协同控制策略;基于实时新能源发电功率与电网负载需求,对每台虚拟同步发电机的输出功率进行调整。其目的在于实现各电解槽输入功率均衡化,规避因功率偏差致使部分电解槽运行于低效区间,进而提升能源转化效率。当光照变化引发新能源发电功率波动时,系统能快速响应,动态调整 VSG 输出功率,保障各电解槽输入功率稳定于最佳效率区间,减少弃电现象,实现新能源的高效利用。

2.2 协同控制策略

2.2.1 并联运行机理

多点新能源发电制氢系统协同控制框架见图 4 所示。在并联运行时,由于电解槽制氢效率与输入功率呈非线性关系,当各电解槽输入功率差异较大时,部分电解槽可能工作于低效率区间,导致系统整体制氢效率下降。为确保系统稳定且高效运行,需对各新能源发电单元及电解槽进行协同控制。

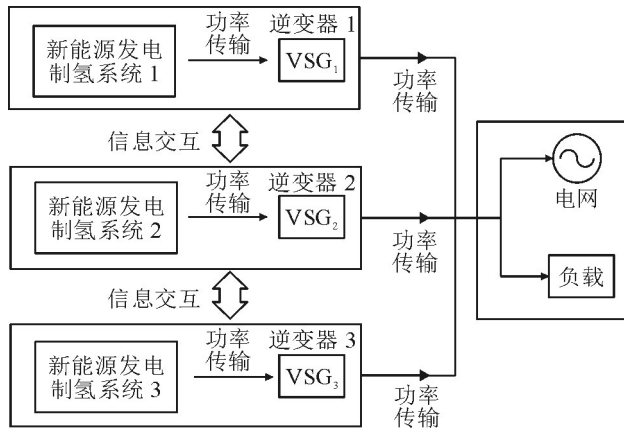


图4 多点新能源发电制氢系统协同控制框架

Fig. 4 Cooperative control framework for multi-new energy Hydrogen production system

在电网频率出现扰动时,VSG 能够依据频率偏差,主动调节自身输出有功功率,从而参与电网频率调节。同时,在多点协同控制框架下,各单元间需进行信息交互,以获取系统整体运行状态。通过通信网络,各新能源发电单元与电解槽之间共享发电功率、电解槽输入功率以及电网频率等关键信息,为功率分配以及频率恢复提供数据支持,进而实现各单元间的协同工作,优化系统整体性能。

2.2.2 功率分配策略

考虑电解槽制氢效率的功率分配策略旨在根

据电网实时负载需求与新能源发电发电量,动态调整各台 VSG 的输出功率,从而改变每台电解槽的输入功率,以优化电解槽的制氢效率,使得多点新能源发电制氢系统在参与电网频率调节的基础上,确保新能源发电资源的高效利用。单台 VSG 的转子运动方程为

$$\begin{cases} \omega = \frac{d\theta}{dt} \\ \frac{P_m - P_e}{\omega_n} - D(\omega - \omega_n) = J \frac{d\omega}{dt} \end{cases} \quad (2)$$

$$P_m = -K_p(f - f_n) + P_{ref} \quad (3)$$

式中: J 为虚拟转动惯量; D 为虚拟阻尼系数; ω 和 ω_n 分别为输出角频率和额定角频率; P_m 为 VSG 理论输出有功功率; P_e 为 VSG 的输出有功功率; P_{ref} 为参考输出功率; K_p 为有功-频率下垂系数; f 为电网的实际频率; f_n 为电网参考频率。

根据式(3)可知,通过调整各台 VSG 的参考输出功率 P_{ref} ,即可对各台 VSG 的输出功率进行分配,控制策略为

$$P_{refi} = P_{Vi} - \frac{\left(\sum_{i=1}^n P_{Vi} - P_{load}\right)}{n} \quad (4)$$

式中: P_{refi} 是第 i 台 VSG 的参考输出功率,即需要分配的功率指令; P_{Vi} 是第 i 台新能源设备的输出功率; $\sum_{i=1}^n P_{Vi}$ 是新能源设备的总输出功率; P_{load} 电网当前的总负载需求。

2.2.3 基于一致性算法的频率控制

一致性算法是一种分布式协调控制方法,其目标是通过多个个体之间的交互促使他们的状态趋于一致,即达到某种全局一致的状态或目标。其基础是信息的局部交换和基于图论的通信拓扑结构。一致性算法通过迭代计算更新每个节点的状态,其一般形式为

$$\dot{x}_i(t) = \sum_{j \in N_i} a_{ij} [x_j(t) - x_i(t)] - g_i [x_i(t) - x_{ref}] \quad (5)$$

式中: $x_i(t)$ 为节点 i 在 t 时刻的状态信息; a_{ij} 为节点间信息交互权重系数; $x_j(t)$ 是相邻节点在 t 时刻的状态信息; x_{ref} 是参考状态值。

在多点新能源发电制氢系统中,由于控制参数的差异性,导致每台 VSG 在面对扰动时响应特性的差异,造成在扰动时间内各节点的频率有着较大的波动,影响系统的稳定性,甚至会触发连锁保护动作。因此保证各节点间频率一致是确保系统正常运行的基础。

因此,建立计及一致性算法的频率控制策略,确保每台VSG的频率在与其他节点的信息交互中趋向一致,减缓由于单个VSG频率偏差引发系统频率波动。同时一致性算法还带有频率恢复功能,通过将每台VSG的频率与额定值进行同步,确保在发生扰动事件后,各节点的频率能够快速恢复至额定值。

并联VSG频率一致性控制框图见图5。

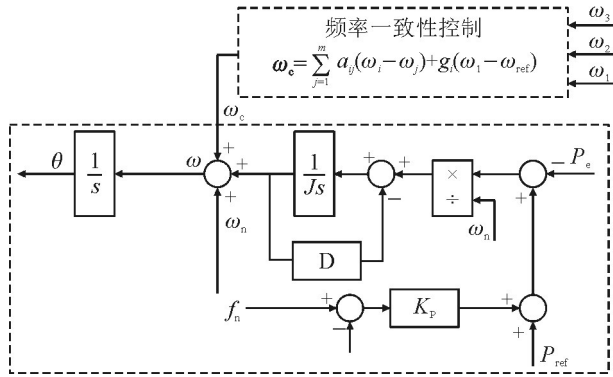


图5 并联VSG频率一致性控制框图

Fig. 5 Parallel VSG frequency consistency control block diagram

图5所示的控制框图将一致性算法与VSG动态模型结合,计及一致性算法的频率控制通过信息交互,补偿各节点间的频率偏差,促使各发电单元节点的频率状态趋向一致。每个节点通过与邻居节点的交互调整频率输出控制量 ω_c ,使得所有节点的频率 ω_i 同步到参考值 ω_{ref} 。

$$\omega_c = \sum_{j=1}^m a_{ij}(\omega_i - \omega_j) + g_i(\omega_i - \omega_{ref}) \quad (6)$$

$$\omega_{ref} = \omega_n + k_p(\omega_{pccref} - \omega_{pcc}) + k_i \int (\omega_{pccref} - \omega_{pcc}) dt \quad (7)$$

式中: g_i 为第*i*个节点连接到参考值的边的权值; a_{ij} 为第*i*个节点到相邻节点的权重值; ω_i 为第*i*个节点的角频率; ω_j 为第*j*个节点的角频率; ω_{pcc} 为并网点的角频率; ω_n 为额定角频率; ω_{pccref} 为并网角频率参考值; k_p 和 k_i 分别为PI控制器的比例和积分系数。

3 协同控制策略优化

3.1 通信延时有对多点协同控制的影响

在多点新能源发电制氢系统中,各单元之间的实时信息交互是实现协同控制的基础。为了确保系统的高效运行,必须准确传递新能源发电功率及电网频率等关键参数。然而,通信网络的延时特性对系统的协同控制性能产生了多方面的负面影响。

在多点VSG控制中,各节点需要共享频率信息以实现全局同步,通信延时会显著减缓频率信号传

递至VSG单元的速度,导致VSG无法及时调整输出功率。这不仅削弱了系统对电网频率扰动的响应速度,延长了系统频率的恢复时间,还会引起系统频率的波动,从而影响系统的稳定性和可靠性。

理想情况下系统频率特性和有延时情况下系统频率特性见图6和图7。

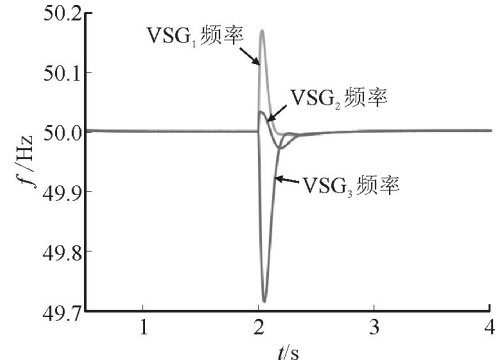


图6 理想情况下系统频率特性

Fig. 6 System frequency characteristics under ideal condition

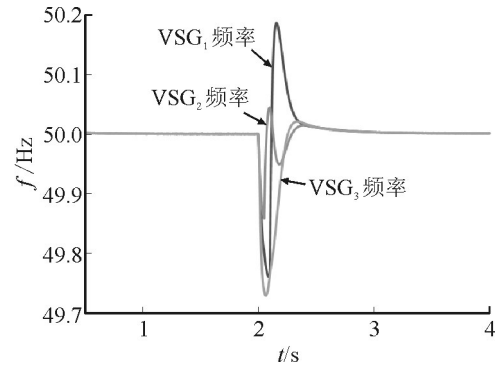


图7 有延时情况下系统频率特性

Fig. 7 System frequency characteristics with time delay

从图6-7可以看出,在通信延时的情况下,每台VSG接收到系统信号的速度不同,导致各VSG无法及时调整输出功率,从而引发系统频率的波动。以VSG₁频率为例,理想情况下,当系统发生扰动时,频率会出现短暂的波动并迅速恢复到额定值。而在通信延时的情况下,系统频率的波动范围显著增大,频率恢复时间延长了0.2s。

这种延时不仅影响了系统的动态响应性能,还可能导致频率波动的累积效应,进一步加剧系统的不稳定状态。因此,为了提高多点新能源发电制氢系统的协同控制性能,必须采取有效的措施来减少通信延时,增强系统的鲁棒性。

3.2 控制策略优化

在多机并联场景下,各VSG节点间的通信延时会引发功率与频率的波动,模型预测控制(model predictive control, MPC)控制器可以通过预测未来时

0.175 MW、0.125 MW,参与电网的频率调节,维持电网的稳定。

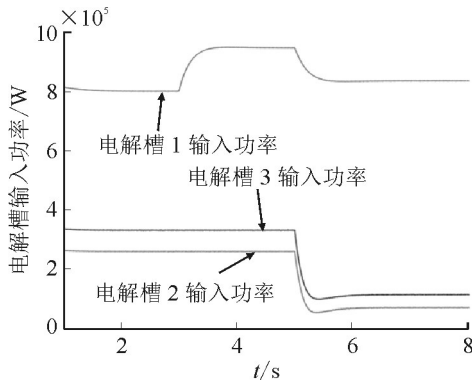


图10 传统控制策略电解槽输入功率

Fig. 10 Input power of electrolyzer with traditional control strategy

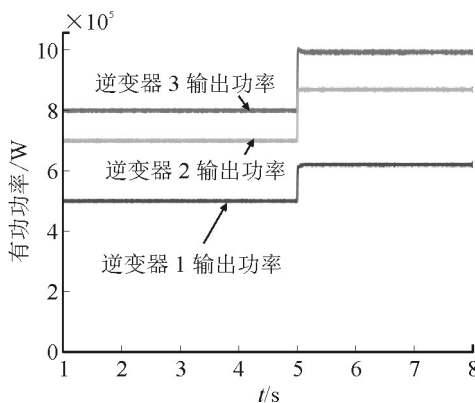


图11 传统控制策略逆变器输出功率

Fig. 11 Output power of inverter with traditional control strategy

本文协同控制策略下的逆变器输入、输出功率见图12-13。从图12-13可以看出在 $t=2.5$ s光伏发电1增加时,3台逆变器根据功率分配策略,调整自身的输出功率;在 $t=4.5$ s时,负载需求增多,3台逆变器同样增加输出功率,维持电网的稳定。

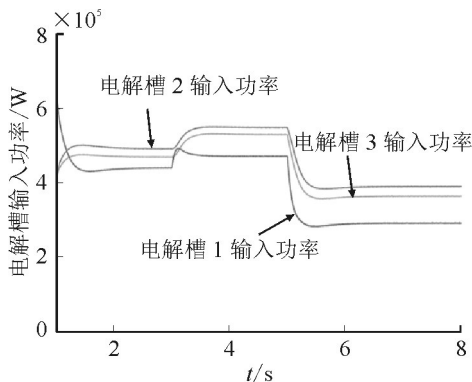


图12 协同控制策略电解槽输入功率

Fig. 12 Input power of electrolyzer with cooperative control strategy

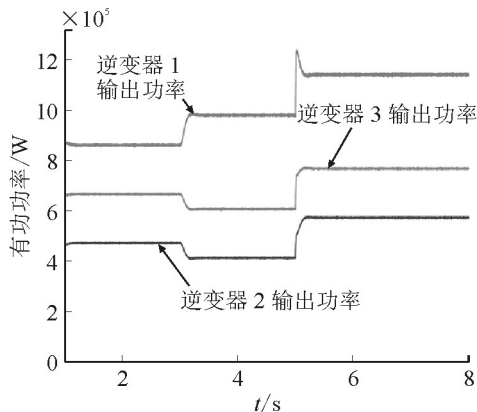


图13 协同控制策略逆变器输出功率

Fig. 13 Output power of inverter with cooperative control strategy

不同控制策略制氢效率对比图见图14。从图14可以看出,在 $t=1$ s到 $t=2.5$ s时段内,传统控制策略下整体制氢效率约56.2%,本文协同控制策略下整体制氢效率约56.5%;在 $t=2.5$ s到 $t=4.5$ s时段内,传统控制策略下整体制氢效率约55.8%,本文协同控制策略下整体制氢效率约56.3%;在 $t=4.5$ s到 $t=8$ s时段内,传统控制策略下整体制氢效率约55.9%,本文协同控制策略下整体制氢效率约57.3%;因此本文提出的协同控制策略通过对逆变器输出有功功率的优化分配,有效提升了多机并联系统中电解槽的整体制氢效率。

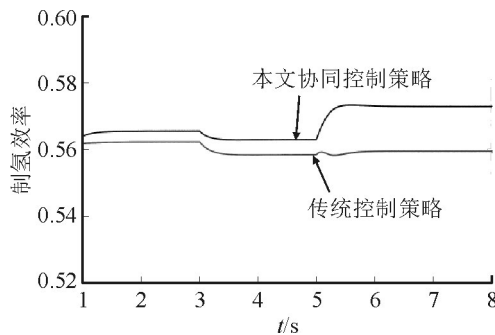


图14 制氢效率

Fig. 14 Hydrogen production efficiency

4.3 增加一致性算法前后系统频率波动的对比

基于上述系统设置扰动事件,分析增加频率一致性算法前后系统频率动态性能的差别。在 $t=2$ s时电网下发调度指令要求3台VSG的总输出有功功率增加0.5 MW。常规控制策略下各节点的频率见图15。从图15中可以看出,由于有功功率的变化,致使各节点频率不同程度的波动,其中节点1的最大频率偏差为0.24 Hz,节点3的最大频率偏差为0.3 Hz。

加入频率一致性算法后节点频率的波形见图16。从图16中可以看出,相较于常规控制策

略,节点1的最大频率偏差减小了0.07 Hz,节点3的最大频率偏差虽然没有显著减小,但频率的恢复时间明显缩短,缩短了约0.05 s。

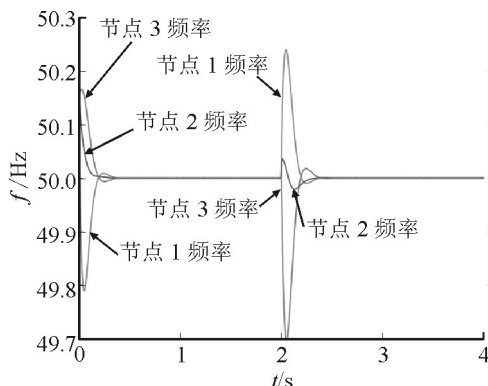


图15 传统控制策略下节点频率
Fig. 15 Node frequency of traditional control strategy

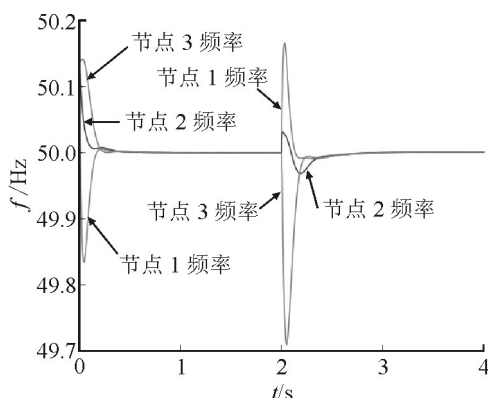


图16 加入算法后节点频率
Fig. 16 Node frequency after adding algorithm

角频率偏差值见图17。图17显示了在扰动事件下,常规控制策略与频率一致性算法作用下,各节点间角频率偏差值总和 $\omega_{\text{总}}$ 的波形;角频率偏差值总和公式为

$$\omega_{\text{总}} = |\omega_1 - \omega_2| + |\omega_1 - \omega_3| + |\omega_2 - \omega_3| \quad (11)$$

可以看出,相较于常规控制策略,加入一致性算法后的各节点间角频率偏差值总和减小约1.6 rad/s,相当于各节点间的频率偏差值总和减小了约0.25 Hz。

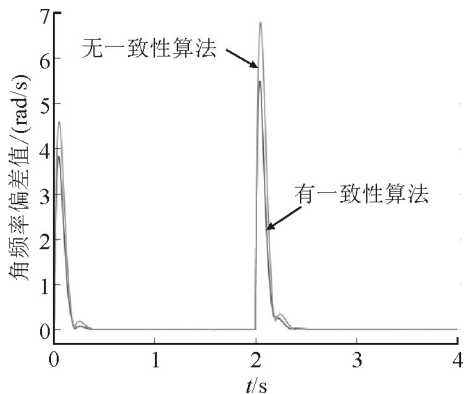


图17 角频率偏差值
Fig. 17 Angular frequency deviation

4.4 通信延时情况下系统动态性能对比

为了验证MPC控制器在通信延时条件下的有效性,设置节点1通信延时 $\tau_1=100$ ms;节点2通信延时 $\tau_2=50$ ms;在 $t=2$ s时,电网下发调度指令,增加0.5 MW输出功率,每台VSG根据指令调整各自的输出功率,未添加MPC控制器时,各节点的频率和逆变器输出功率波形见图18-19。从图中可以看出,由于通信延时的存在,每台VSG接收到调度指令的速度不一致,导致各节点间的频率有较大的波动,节点1的最大频率偏差达到0.38 Hz,频率恢复时间为0.39 s;节点2的最大频率偏差达到0.27 Hz,频率恢复时间为0.38 s;节点3的最大频率偏差达到0.49 Hz,频率恢复时间为0.385 s;

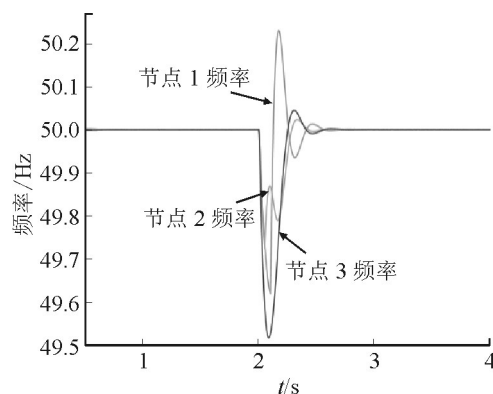


图18 节点频率
Fig. 18 Node frequency

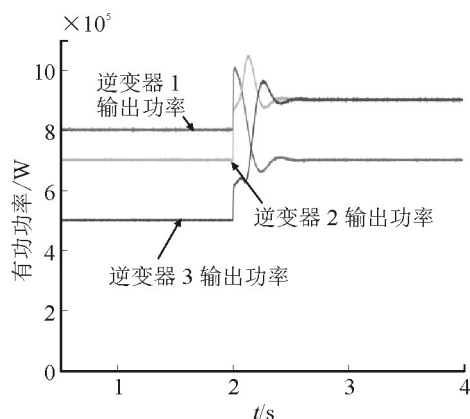


图19 逆变器输出有功功率
Fig. 19 Output active power of inverter

MPC控制器可以通过预测未来时刻的系统状态,提前计算并补偿因通信延时导致的控制误差,减缓因通信延时导致的频率大幅度波动。加入MPC控制器后,各节点频率和逆变器输出功率波形见图20-21。从图中可以看出,节点1的最大频率偏差为0.27 Hz,频率恢复时间为0.35 s;节点2的最大频率偏差为0.23 Hz,频率恢复时间为0.29 s;节点3的最大频率偏差为0.38 Hz,频率恢复时间

为 0.27 s。相较于传统控制策略,各节点的最大频率偏差分别减小了 0.11 Hz、0.04 Hz、0.11 Hz,频率恢复时间分别缩短了 0.04 s、0.09 s、0.085 s。

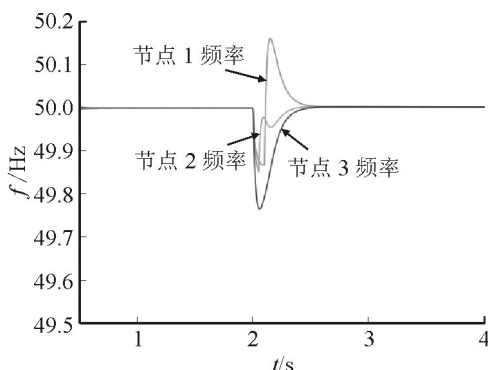


图 20 节点频率
Fig. 20 Node frequency

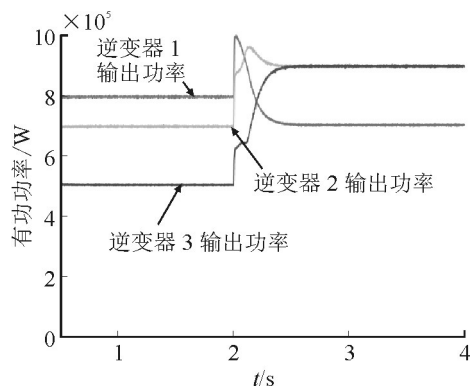


图 21 逆变器输出有功功率
Fig. 21 Output active power of inverter

5 结语

本文提出了一种基于一致性算法的多点新能源发电制氢协同控制策略,在传统虚拟同步控制的基础上进行改进,成功实现电网频率调节和制氢效率优化的双重目标;不仅使得多点新能源发电制氢系统能够主动参与电网频率调节,同时有效提升了电解槽的制氢效率,保障了能源的高效利用;频率一致性算法有效减少了各节点之间的频率偏差,提高了系统的整体稳定性。与此同时,针对多点协同控制中通信延时的不可避免性,本文进一步设计了基于模型预测控制的补偿策略;MPC 控制器通过提前预测系统状态,补偿了因延时引起的控制误差,显著增强了系统在通信延时条件下的鲁棒性。

仿真结果表明,在保证新能源发电制氢系统能够参与电网频率调节的前提下,本文提出的协同控制策略能够动态调节 VSG 的输出功率,实现电解槽输入功率的合理分配,提升整体制氢效率。相较于传统控制策略,所提策略不仅提高了制氢效率,还优化了电网频率调节响应,减少了因通信延时带来

的频率波动,加速了频率恢复时间。

未来的研究可进一步拓展该策略在更大规模系统中的应用,探索更多变量(如不同类型的电解槽与新能源发电形式)对控制效果的影响,进一步提升系统的灵活性与适应性。

参考文献

- [1] 刘敦楠,赵宁宁,李鹏飞,等. 基于“共享储能-需求侧资源”联合跟踪可再生能源发电曲线的市场化消纳模式[J]. 电网技术, 2021, 45(7): 2791-2800.
LIU Dunnan, ZHAO Ningning, LI Pengfei, et al. Market-oriented consumption model based on the joint tracking of renewable energy generation curve of *shared energy storage & demand side resources*[J]. *Power System Technology*, 2021, 45(7): 2791-2800.
- [2] 盛万兴,吴鸣,季宇,等. 分布式可再生能源发电集群并网消纳关键技术及工程实践[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(8): 2175-2186.
SHENG Wanxing, WU Ming, JI Yu, et al. Key techniques and engineering practice of distributed renewable generation clusters integration[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(8): 2175-2186.
- [3] 廖思阳,皮山泉,徐箭,等. 新型电力系统直控式负荷多层级协同调控关键技术综述[J]. 高电压技术, 2023, 49(9): 3669-3683.
LIAO Siyang, PI Shanquan, XU Jian, et al. Review of key technologies for multi-level cooperative regulation of direct-controlled loads in new power systems[J]. *High Voltage Engineering*, 2023, 49(9): 3669-3683.
- [4] 邓思成,郑天文,陈来军,等. 提高关键负荷供电可靠性的交直流微网分布式能量优化管理策略[J]. 高电压技术, 2021, 47(1): 55-62.
DENG Sicheng, ZHENG Tianwen, CHEN Laijun, et al. Optimal management strategy for distributed energy with enhanced power supply reliability of critical loads for AC/DC hybrid microgrids[J]. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(1): 55-62.
- [5] 张学,裴玮,梅春晓,等. 含电/氢复合储能系统的孤岛直流微电网模糊功率分配策略与协调控制方法[J]. 高电压技术, 2022, 48(3): 958-968.
ZHANG Xue, PEI Wei, MEI Chunxiao, et al. Fuzzy power allocation strategy and coordinated control method of islanding DC microgrid with electricity/hydrogen hybrid energy storage systems[J]. *High Voltage Engineering*, 2022, 48(3): 958-968.
- [6] M. AGREDANO-TORRES, XU Qianwen, ZHANG Mengfan, et al. Correnll dynamic power allocation control for frequency regulation using hybrid electrolyzer systems[J]. *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*. 2023(10): 2991-2998.

- [7] N. VEERAKUMAR. Fast active power-frequency support methods by large scale electrolyzers for multi-energy systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid. 2020, 11(2): 44-54.
- [8] 刘忠,杨陈,蒋玮,等. 基于一致性算法的直流微电网储能系统功率分配技术[J]. 电力系统自动化,2020,44(7): 61-69.
- LIU Zhong, YANG Chen, JIANG Wei, et al. Consensus algorithm based power distribution technology for energy storage system in DC microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(7): 61-69.
- [9] 李鹏程,张纯江,袁然然,等. 改进SOC下垂控制的分布式储能系统负荷电流分配方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(13): 3746-3754.
- LI Pengcheng, ZHANG Chunjiang, YUAN Ranran, et al. Load current sharing method of distributed energy storage systems by improved SOC drooping control[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3746-3754.
- [10] MENG X, JIANG LI, HE MZ, et al. Anovel multi-scale frequency regulation method of hybrid rectifier and its specific application in electrolytic Hydrogen production[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(1): 123-129.
- [11] 许振宇,陈殷,石梦璇,等. 基于一致性算法的并联虚拟同步机系统小信号模型分析[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(7): 2427-2437.
- XU Zhenyu, CHEN Yin, SHI Mengxuan, et al. Small-signal analysis of consensus-algorithm-based parallel virtual synchronization generators system[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(7): 2427-2437.
- [12] 陈来军,王余阳,郑天文,等. 基于一致性的并联虚拟同步发电机分布式协同控制[J]. 控制理论与应用, 2017, 34(8): 1084-1091.
- CHEN Laijun, WANG Yuyang, ZHENG Tianwen, et al. Consensus-based distributed control for parallel-connected virtual synchronous generator[J]. Control Theory & Applications, 2017, 34(8): 1084-1091.
- [13] 李帅虎,胡耀尹,罗滇生,等. 基于模型预测控制的光储发电系统VSG频率控制方法[J]. 全球能源互联网, 2022, 5(4): 348-355.
- LI Shuaihu, HU Yaoyin, LUO Diansheng, et al. VSG frequency control method of photovoltaic system with storage based on model predictive control[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2022, 5(4): 348-355.
- [14] 陈来军,王任,郑天文,等. 改善独立微网频率动态特性的虚拟同步发电机模型预测控制[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(3): 40-47.
- CHEN Laijun, WANG Ren, ZHENG Tianwen, et al. Model predictive control of virtual synchronous generator to improve dynamic characteristic of frequency for isolated microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(3): 40-47.
- [15] 吴泓林,李海啸,李山,等. 面向储能容量配置优化的VSG参数协调控制策略[J/OL]. 电气工程学报, 1-10. [2025-02-27]. <https://kns.cnki.net/kns8s/defaultresult/index?crossids>.
- WU Honglin, LI Tsunami, LI Shan, et al. VSG parameter coordinated control strategy toward optimization of energy storage capacity configuration [J/OL]. Journal of Electrical Engineering, 1-10. [2025-02-27]. <https://kns.cnki.net/kns8s/defaultresult/index?crossids>.
- [16] LIN Jican, LIU Shenquan, TIAN Meijun, et al. Power oscillation suppression of multi-VSG based on both consensus and model predictive control[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2024, 155: 109459.
- [17] SHAHAB M A, MOZAFARI B, SOLEYMANI S, et al. Distributed consensus-based fault tolerant control of islanded microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(1): 37-47.
- [18] 张占强,窦春霞,岳东,等. 考虑通信时延的事件触发电压分布式协同控制[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(17): 5426-5434.
- ZHANG Zhanqiang, DOU Chunxia, YUE Dong, et al. Event-triggered voltage distributed cooperative control with communication delay[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(17): 5426-5434.
- [19] 马婧涵,文传博. 考虑通信延迟的微电网分布式二次协调控制[J]. 可再生能源, 2021, 39(7): 969-975.
- MA Jinghan, WEN Chuanbo. Distributed secondary coordinated control of microgrid considering communication delay[J]. Renewable Energy Resources, 2021, 39(7): 969-975.
- [20] 卢卓禹,邓思成,许文浩,等. 考虑通信延时的分布式发电系统协同控制策略[J]. 高电压技术, 2024, 50(10): 4530-4539.
- LU Zhuoyu, DENG Sicheng, XU Wenhao, et al. Cooperative control strategy of distributed generation system considering communication delays[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(10): 4530-4539.
- [21] 李东东,陈昊,姚寅,等. 考虑非均匀通信延迟的多VSG功率振荡抑制[J]. 电力建设, 2024, 45(9): 63-73.
- LI Dongdong, CHEN Hao, YAO Yin, et al. Power oscillation suppression of multi-VSG considering non-uniform communication delays[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(9): 63-73.
- [22] 钟庆昌. 虚拟同步机与自主电力系统[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 336-348.
- ZHONG Qingchang. Virtual synchronous machines and autonomous power systems[J]. Proceedings of the CSEE,

- 2017,37(2): 336-348.
- [23]曾正,赵荣祥,汤胜清,等. 可再生能源分散接入用先进并网逆变器研究综述[J]. 中国电机工程学报,2013,33(24):1-12.
- ZENG Zheng, ZHAO Rongxiang, TANG Shengqing, et al. An overview on advanced grid-connected inverters used for decentralized renewable energy resources[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(24): 1-12.
- [24]李亚军,何山,胡兵,等. 考虑最大效率的风光制氢系统容量配置及功率调控[J]. 电气传动,2024,54(10):50-57.
- LI Yajun, HE Shan, HU Bing, et al. Capacity configuration and power regulation of scenic Hydrogen production system considering maximum efficiency[J]. Electric Drive, 2024, 54(10): 50-57.
- [25]MA Zhiwen, WITTEMAN L, WRUBEL J A, et al. A comprehensive modeling method for proton exchange membrane electrolyzer development[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(34): 17627-17643.
- 作者简介:**
- 施涛(1982—),男,副教授,研究方向为新能源与储能运行控制。
- 许泽炎(2000—),男,硕士,研究方向为新能源与储能运行控制。E-mail:1222056624@njupt.edu.cn。
- 雷震亚(2006—),男,学士,研究方向为新能源与储能运行控制研究。
- 朱维骏(2002—),男,硕士,研究方向为新能源与储能运行控制。
-
- (上接第25页)
- [21]韩凝晖,周颖,石坤,等. 面向新型电力系统电量平衡的可调节负荷互动潜力分析[J]. 电力需求侧管理,2022,24(6):70-76.
- HAN Ninghui, ZHOU Ying, SHI Kun, et al. Adjustable load interaction potential oriented to power balance of new power system[J]. Power Demand Side Management, 2022, 24(6): 70-76.
- [22]鲁宗相,林弋莎,乔颖,等. 极高比例可再生能源电力系统的灵活性供需平衡[J]. 电力系统自动化,2022,46(16):3-16.
- LU Zongxiang, LIN Yisha, QIAO Ying, et al. Flexibility supply-demand balance in power system with ultra-high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(16): 3-16.
- [23]孔慧超,黄学劲,王文钟,等. 园区受端新型电力系统电力电量再平衡方法[J]. 综合智慧能源,2024,46(2):68-74.
- KONG Huichao, HUANG Xuejin, WANG Wenzhong, et al. Electric power and energy rebalancing method for new power systems at receiving ends of industrial parks[J]. Integrated Intelligent Energy, 2024, 46(2): 68-74.
- [24]OHLENDORF N, SCHILL W P. Frequency and duration of low-wind-power events in Germany[J]. Environmental Research Letters, 2020, 15(8): 084045.
- [25]杨楠,贾俊杰,邢超,等. 基于E-Seq2Seq技术的数据驱动型机组组合智能决策方法[J]. 中国电机工程学报,2020,40(23):7587-7599.
- YANG Nan, JIA Junjie, XING Chao, et al. Data-driven intelligent decision-making method for unit commitment based on E-Seq2Seq technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(23): 7587-7599.
- 作者简介:**
- 徐子韬(1998—),男,硕士研究生,从事电力系统规划和运行研究工作。E-mail:346083405@qq.com。
- 王志昊(2000—),男,硕士研究生,研究方向为电力系统分析。
- 张智(1994—),男,讲师,通信作者,从事电力系统规划和运行研究工作。