DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.2.188 **中图分类号**：TM461 **文献标志码**：A

新型电解制氢混合整流器多尺度调频控制策略

张 华[1]，蒋璐岭[2]，孟 鑫[2]，杨浩冉[2]
(1.中电投新疆能源化工集团达坂城风电有限公司，乌鲁木齐 830000；2.四川大学电气工程学院，成都 610065)

摘要：电解制氢负荷容量大、响应速度快、功率灵活可调，是天然的可提供调频能量的物理资源。但由于现有2类电解制氢整流器(晶闸管整流器和PWM整流器)存在一定局限性，无法实现制氢负荷参与系统多尺度频率调节。提出一种新型电解制氢混合整流器多尺度调频控制策略，通过建立混合整流器中晶闸管整流器的触发角和系统频率间的下垂关系，根据系统频率变化调节流经晶闸管整流器的制氢功率，实现一次调频；辅助变换器采用虚拟同步机控制实现惯量补偿，减缓频率变化速度，为晶闸管整流器进行一次调频赢得时间。通过混合整流器中晶闸管整流器和辅助变换器的协调配合，实现电解制氢负荷的多尺度频率调节。最后，搭建小功率实验平台验证所提控制方法的有效性。

关键词：电解制氢；混合整流器；多尺度调频；虚拟同步机控制

Novel Multi-scale Frequency Regulation Control Strategy for Hybrid Rectifier Used in Electrolytic Hydrogen Production

ZHANG Hua[1], JIANG Luling[2], MENG Xin[2], YANG Haoran[2]
(1. Dabancheng Wind Power Co., Ltd., China Power Investment Xinjiang Energy and Chemical Group, Urumqi 830000, China; 2. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Since the electrolytic hydrogen production (EHP) load has a large capacity, a fast response speed and flexible and adjustable power, it is a natural physical resource that can provide energy for frequency regulation. However, due to limitations on the existing two kinds of rectifiers used in EHP(i.e., thyristor and PWM rectifiers), it is difficult to realize the participation of EHP load in the system's multi-scale frequency regulation. In this paper, a novel multi-scale frequency regulation control strategy for a hybrid rectifier used in EHP is proposed. A droop relationship between the firing angle of a thyristor rectifier in the hybrid rectifier and the system frequency is built, so as to realize the primary frequency regulation by regulating the hydrogen production power flowing through the thyristor rectifier according to changes in the system frequency. The auxiliary converter adopts virtual synchronous machine control to realize the inertia compensation, thereby smoothing the rate of change of frequency and gaining time for the primary frequency regulation performed by thethyristor rectifier. Through the coordination between the thyristor rectifier and the auxiliary converter in the hybrid rectifier, the multi-scale frequency regulation of EHP load is achieved. Finally, a low power experimental platform was established to verify the effectiveness of the proposed control method.

Keywords: Electrolytic hydrogen production (EHP); hybrid rectifier; multi-scale frequency regulation; virtual synchronous machine control

收稿日期：2023-06-08；**修回日期**：2023-08-15；**录用日期**：2023-09-28；**网络首发日期**：2024-04-25
基金项目：国家自然科学基金资助项目(52207217)
This work is supported by National Natural Science Foundation of China under the grant 52207217

氢能的发展对于构建清洁低碳、安全高效的综合能源体系，实现“双碳”目标具有重要意义。制氢是氢能产业链的重要一环，其中化工制氢成本低，但二氧化碳排放量大，多数生物质制氢仍处于

试验阶段。电解水制氢成本较高，但利用新能源电解制氢可以有效降低用电成本，并实现氢气从制取到利用全过程零碳排放，具有重要的经济效益和社会效益。典型的新能源电解制氢系统包括新能源发电单元、储能单元和制氢负荷，各单元均通过电力电子设备接入交流母线，系统惯量阻尼不足[1-2]，且新能源发电波动性强，亟需有效的调频措施确保新能源电解制氢系统的安全稳定运行。

目前新能源电解制氢系统的频率调节主要基于发电单元或储能单元[3-4]，采用虚拟同步发电机VSG(virtual synchronous generator)或下垂控制调频，但需要额外配置大量储能设备，成本较高，且并联控制及稳定性分析复杂。而制氢负荷中电解堆栈容量大、功率灵活可调、响应速度快，是天然的可提供调频能量的物理资源[5-7]。因此，应充分发挥电解制氢负荷的调频能力，满足系统的调频需求。整流器作为电解制氢负荷的关键接口设备，其性能对于实现制氢负荷的调频能力具有重要影响。目前常用的电解制氢整流器包括全控型整流器和相控型整流器，但由于这 2 类整流器拓扑和控制策略的局限性，仅能实现单一尺度的频率调节。

相控型整流器采用晶闸管器件，具有可靠性高、功率等级大、成本低等优点，但响应速度慢，可配合大容量电解堆栈实现一次或二次调频，以及时间尺度更长的三次调频等。文献[8]指出电解制氢工厂具备提供电力系统调频辅助服务的能力，并研究了 9 MW 功率等级的电解槽在不同功率变化速率下的频率调节行为；文献[9]采用分层通信的方式，基于系统当前运行状态和在线能量调控策略计算功率指令值，下发给相控型整流器调节制氢功率，实现三次调频；文献[10]开展了综合需求响应模式下含电解制氢装置的能源系统优化运行研究，根据预测的风、光、负荷数据，调节相控型整流器的制氢功率，实现多类型负荷在时间上的转移和不同能源间的转换；文献[11]基于多代理技术，提出了混合能源系统的多模式协调控制策略，采用分层控制方法调节制氢功率，实现系统的稳定运行，但由于相控型整流器响应速度慢，主要负责一次、二次调频或经济优化运行等长时间尺度调节，无法实现时间尺度更短的惯量支撑。

全控型整流器响应速度快，控制灵活度高，但相同功率等级下成本较高，更适合用于中小容量电解堆栈实现快速调频。文献[12]通过在新能源发电设备附近安装电解制氢负荷，消纳新能源发电波动对电力系统的影响，但并未具体研究对系统频率的调节能力；文献[13]建立了包括电解槽、制氢电源及储氢设备在内的动态模型，并基于该模型及储氢设备约束条件对整流电源拓扑及控制结构进行设计；文献[14]比较了基于下垂控制、微分控制及虚拟同步机控制的全控型整流器用于电解制氢负荷调频的可行性，发现基于虚拟同步机控制的制氢负荷能提供更好的频率暂态支撑能力；文献[15]提出了一种基于电解堆栈直流电压调制的附加阻尼控制方案，并对控制器参数进行多工况优化设计，提高制氢负荷并网运行时对次同步振荡的抑制能力。全控性整流器可实现不同时间尺度调频，但由于成本和可靠性制约，并不适用于大容量电解堆栈进行长时间/大功率/高能量尺度调频。

混合整流器由相控型整流器和全控型整流器并联构成，兼具二者优点。文献[16]提出利用混合整流器电解制氢，其中相控型整流器负责传输主要制氢功率，全控型整流器用于改善交、直流侧电能质量，但由于全控型整流器的交、直流侧存在功率耦合，实际效果并不理想；文献[17-18]针对整流器混合拓扑进行研究，提出了多种由相控型整流器和 Vienna 整流器等构成的混合拓扑结构，实现交流侧谐波抑制和单位功率因数运行，但并未用于电解制氢场景，其适应性有待进一步探索；文献[19]提出了由相控型整流器和辅助变换器构成的整流器混合拓扑及控制策略，实现低成本、大功率、高效率电解制氢。目前尚未见到关于混合整流器调频的研究报道，因此，采用混合整流器进行电解制氢负荷调频控制所面临的主要科学问题是计及多尺度调频需求的电解制氢混合整流器协调控制方法研究。

因此，本文通过分析比较相控型整流器和全控型变换器的响应速度及功率等级特点，提出一种新型电解制氢混合整流器多尺度调频控制策略，旨在充分发挥大容量电解制氢负荷的多尺度调频能力。具体而言，晶闸管整流器通过建立系统母线频率和触发角之间的下垂关系，实现长时间/高功率/大能量尺度的频率调节，即一次调频。而辅助变换器采用虚拟同步机控制，通过调节其自身流经的制氢功率，提供虚拟惯量支撑，从而减缓频率变化的速度，实现短时间/低功率/小能量尺度的频率调节，为晶闸管整流器一次调频争取时间。通过对混合整流器中不同变换器的协调控制，重塑电解制氢负荷外特性，使其具备多尺度调频能力。与传统的晶闸管整流器相比，基于本文所提控制策略的混合整流器能实现惯量支撑等快速频率调节；与全控型整流器相比，两者均能实现多尺度频率调节，但在应用于大容量电解堆栈时，基于本文所提控制策略的混合整流器具有更优的经济性。

1 主电路结构

典型的新能源电解制氢系统如图 1 所示，其中整流器是电解堆栈和系统交流母线的关键接口设备。本文所采用的混合整流器拓扑结构及其整体控制框图如图 2 所示，包括主功率变换器和辅助变换器[19]，主功率变换器 SCR(Silicon controlled rectifier)由晶闸管整流器构成，辅助变换器由电压源型变换器 VSC(voltage source converter)和移相全桥 PSFB (phase-shift-full-bridge)变换器级联组成。

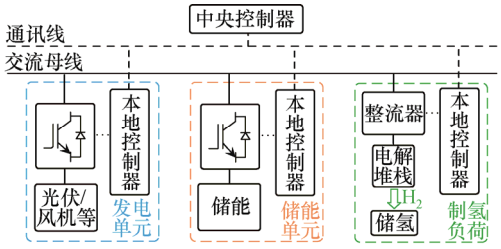


图 1 典型新能源电解制氢系统

Fig. 1 Typical electrolytic hydrogen production system based on renewable energy source

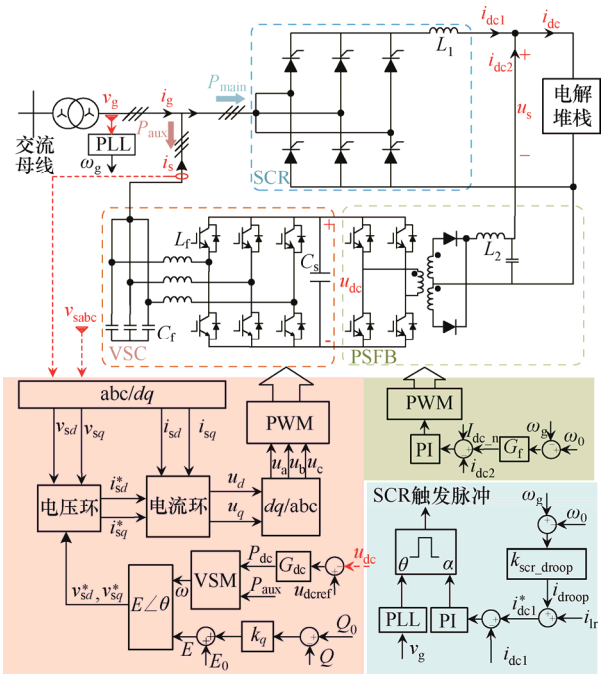


图 2 混合整流器拓扑结构及其控制框图

Fig. 2 Topology of hybrid rectifier and its control block diagram

2 控制策略

当系统发生功率波动导致频率变化时，以交流母线频率下降为例，电解制氢整流器应减少制氢功率(等效为向系统输出功率)，实现对母线频率的支撑。混合整流器等效输出调频功率的示意如图 3 所示，其中辅助变换器迅速调节经由自身传输的制氢功率，以提供惯量支撑，减缓频率跌落速度，为晶闸管整流器调频赢得时间。之后主功率变换器作为调频主力，调节制氢功率进行一次调频乃至二次调频。

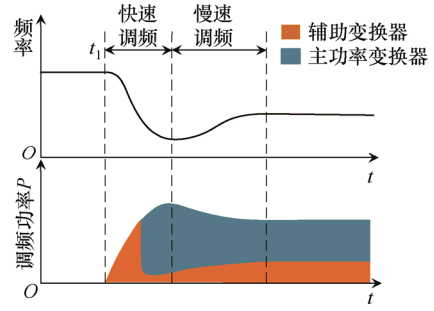


图 3 混合整流器传输调频功率示意

Fig. 3 Schematic of transferred power of hybrid rectifier for frequency regulation

2.1 主功率变换器控制策略

为了实现晶闸管整流器参与系统一次频率调节，需要建立输出功率与系统频率之间的关系，晶闸管整流器控制结构如图 4 所示。

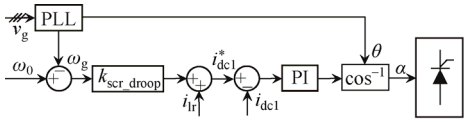


图 4　晶闸管整流器控制结构

Fig. 4 Control structure of thyristor rectifier

根据系统频率变化情况改变其触发角。触发角方程为

$$\alpha=\left(k_{\mathrm{p}}+\frac{k_{\mathrm{i}}}{s}\right)(i_{\mathrm{dc1}}^{*}-i_{\mathrm{dc1}})\cos^{-1}\theta \tag{1}$$

$$i_{\mathrm{dc1}}^{*}=i_{1\mathrm{r}}+k_{\mathrm{scr_droop}}(\omega_{\mathrm{g}}-\omega_{0}) \tag{2}$$

式中：α 为 SCR 的控制触发角；k_{p}、k_{i} 分别为比例积分 PI(proportional-integral)控制器的比例控制系数、积分控制系数；i_{dc1}^{*}、i_{dc1} 分别为 SCR 输出电流的参考值、实际值；ω_{g}、ω_0 分别为交流母线频率的实际值、额定值；$k_{\mathrm{scr_droop}}$ 为输出电流-角频率下垂控制系数；$i_{1\mathrm{r}}$ 为输出电流额定值。通过改变 $i_{1\mathrm{r}}$ 可改变 SCR 的主要制氢功率，通常可根据上层控制调节 $i_{1\mathrm{r}}$ 大小，实现 SCR 参与系统的二次乃至三次调频，本文不讨论二次及三次调频。SCR 根据输出电流-角频率下垂特性建立功率-频率正向关系，得到输出电流参考值。当系统发电功率不足导致频率下跌时，输出电流指令值 i_{dc1}^{*} 随 ω_{g} 减小而减小，电解堆栈产氢功率降低，系统达到新的功率平衡状态。

2.2 VSC 控制策略

混合整流器中的电压源型变换器采用虚拟同步机控制，其控制结构如图 5 所示。有功功率控制环由直流电压控制外环和转子运动方程构成，通过合理设计二者的控制参数，能够实现惯量补偿及输出电压 u_{dc}(辅助变换器的直流母线电压)控制。

有功功率控制环的表达式为

$$P_0-P_{\mathrm{dc}}-P-D(\omega^{*}-\omega_0)=J\omega_0\frac{\mathrm{d}(\omega^{*}-\omega_0)}{\mathrm{d}t} \tag{3}$$

$$P_{\mathrm{dc}}=G_{\mathrm{dc}}(U_{\mathrm{dcref}}-u_{\mathrm{dc}}) \tag{4}$$

式中：P_0、P 分别为有功功率的额定值、实际值；P_{dc} 为直流电压控制外环的输出值；P_0-P_{dc} 共同构成有功功率参考值；D、J 分别为阻尼系数、惯量系数；ω*、ω_0 分别为交流母线频率的实际值、额定值；U_{dcref} 为直流母线电压指令值；u_{dc} 为直流母线电压实际值；G_{dc} 为 PI 控制器。

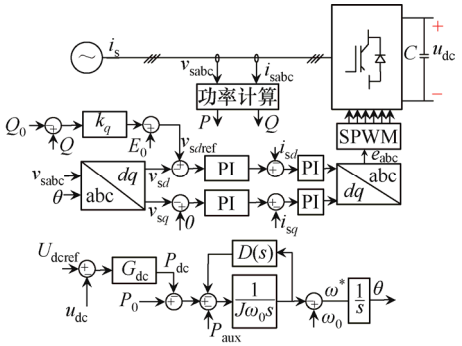


图 5　VSC 控制结构

Fig. 5 Control structure of VSC

无功功率控制环的表达式为

$$v_{sd\mathrm{ref}}=E_0-k_q(Q-Q_0) \tag{5}$$

式中：$v_{sd\mathrm{ref}}$ 为 d 轴电压参考值；E_0 为电压额定值；k_q 为无功-电压下垂系数；Q_0、Q 分别为无功功率的参考值、实际值。如图 5 所示，q 轴电压参考值为 0，经过电压、电流双闭环控制得到调制信号。

2.3 PSFB 变换器控制策略

移相全桥变换器的控制结构如图 6 所示，通过 PI 控制使移相全桥变换器的输出电流 i_{dc2} 跟随其指令值 i_{dc2}^{*}。i_{dc2}^{*} 的表达式为

$$i_{\mathrm{dc2}}^{*}=(\omega_{\mathrm{g}}-\omega_0)(K_{\mathrm{f1}}+K_{\mathrm{f2}}s)+I_{\mathrm{dcn}} \tag{6}$$

式中：ω_{g}、ω_0 分别为系统频率及其额定值；K_{f1}、K_{f2} 分别为比例系数、微分系数；I_{dcn} 为输出电流额定值。通过建立移相全桥变换器输出电流和系统频率间的比例-微分控制保证辅助变换器内部功率平衡，维持辅助变换器直流母线电压恒定。如果没有输出电流-系统频率之间的比例微分控制，移相全桥变换器的输出功率保持恒定，此时，对于 VSC 而言，调节其输入功率实现惯量支撑和维持输出直流母线电压恒定相矛盾。只有根据系统频率变化调节移相全桥变换器的输出功率，保证输入 VSC 的有功功率等于移相全桥变换器的输出功率，才能维

持辅助变换器中的直流母线电压恒定。

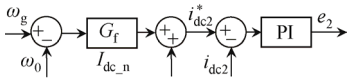
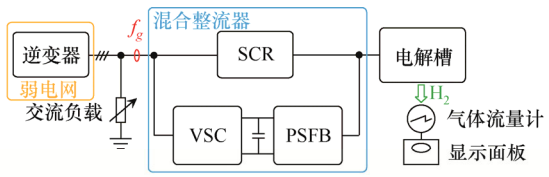


图 6 移相全桥变换器控制结构

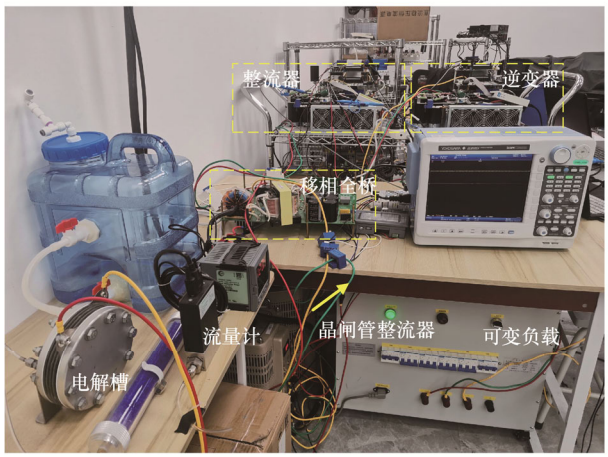
Fig. 6 Control structure of PSFB converter

3 实验验证

为验证所提新型电解制氢混合整流器多尺度调频控制策略的有效性，本文搭建了小功率实验平台，如图 7 所示，包括逆变器、混合整流器、电解槽和交流母线可变负载，并通过流量计、录波仪观测电解槽氢气产量变化和系统频率变化。其中逆变器采用下垂控制策略用于模拟弱电网工况，如果混合整流器直接并入公用电网，当交流母线负载变化时将由电网承担功率变化部分，无法反映基于混合整流器的电解制氢负荷的多尺度调频能力。



(a) 平台原理



(b) 平台照片

图 7 实验平台

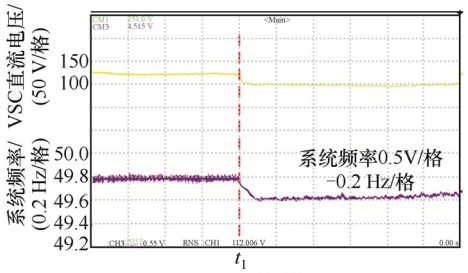
Fig. 7 Experimental platform

实验参数见表 1，由于实验室所用电解槽功率等级(9 V/36 A)较低，电阻仅有 0.25 Ω，需串联分压电阻共同分担混合整流器的输出直流电压。混合整流器中晶闸管整流器和移相全桥变换器均采用本文所提控制策略，电压源型变换器分别采用下垂控制和虚拟同步机控制进行对比，实验结果如图 8 所示。

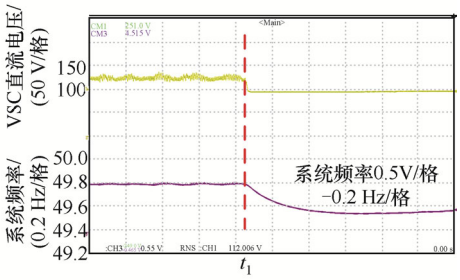
表 1 实验参数

Tab. 1 Experimental parameters

参数	取值
电网相电压有效值 V_s/V	63
VSC 直流电压指令值 u_{dc}/V	130
电网频率 f/Hz	50
PWM 整流器开关频率 f_s/kHz	10.5
VSC 有功、无功下垂系数 k_p	1×10^{-5}
电解槽电阻/Ω	0.25
分压电阻 R_2/Ω	5



(a) 下垂控制



(b) 虚拟同步机控制

图 8 不同控制策略下系统母线频率及辅助变换器直流母线电压波形

Fig. 8 Waveforms of bus frequency of system and DC bus voltage of auxiliary converter under different control strategies

首先验证所提控制策略对系统频率的虚拟惯量支撑作用。在 t_1 时刻系统负荷功率增加，通过录波仪监测系统的交流母线频率，混合整流器中晶闸管整流器始终采用下垂控制策略(图 4 所示的系统频率与晶闸管输出电流间建立下垂控制关系)。当混合整流器中 VSC 采用下垂控制时，如图 8 (a)所示，t_1 时刻系统频率迅速下跌，说明混合整流器无

法为系统提供惯量支撑，即无论晶闸管整流器还是VSC 均无法提供惯量支撑，系统频率稳定性低。反之，当其中 VSC 采用虚拟同步机控制时，如图 8(b)所示，t_1时刻系统频率下降缓慢且平滑，表明混合整流器具备虚拟惯量支撑能力，在系统功率发生失衡时，能减缓系统频率的变化速度。

其次，当交流母线负载功率发生变化时，采用高精度气体流量计测量电解槽产氢速率，验证所提混合整流器协调控制策略。可以通过调节电解堆栈制氢功率来为电网提供一次频率调节，实验结果如图 9 所示。当 VSC 采用下垂控制时，系统稳定运行状态电解槽产氢速率为 124.0 mL/min，系统中交流负载增加后，电解槽产氢速率下降至 114.3 mL/min，如图 9(a)所示，表明电解制氢负荷能够通过降低制氢功率实现一次频率调频。类似地，如图 9(b)所示，当 VSC 采用虚拟同步机控制时，系统稳定状态电解槽产氢速率为 126.8 mL/min，交流负载增加后，电解槽产氢速率降低至 116.2 mL/min。当 VSC 采用 2 种控制方法时，氢气产量下降值近似相等，表明混合整流器中晶闸管整流器能在系统频率发生变化(即系统其他负载发生变化)时，通过调节制氢功率实现电解制氢负荷的一次调频。



(a) 下垂控制



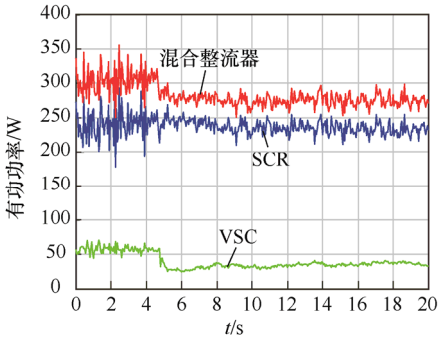
(b) 虚拟同步机控制

图 9　电解槽产氢流量变化

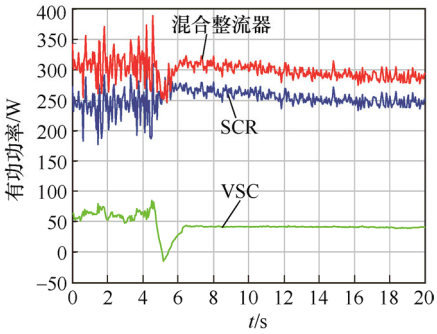
Fig. 9 Changes in hydrogen flow produced by electrolyzer

最后，通过 HIOKI 功率分析仪 6001 测量分别流经混合整流器、晶闸管整流器以及辅功率变换器的有功功率，实验结果如图 10 所示。

在 5 s 时增加系统其他负载功率，当混合整流器中 VSC 基于下垂控制时，各变换器流经功率情况如图 10(a)所示，混合整流器在 5 s 时降低自身吸收的有功功率实现一次调频，但几乎无法为系统提供转动惯量支撑。当混合整流器中 VSC 采用虚拟同步机控制时，功率情况如图 10(b)所示，可见流经 VSC 的有功功率迅速降低，为系统提供转动惯量支撑，减缓频率跌落速度，且经过约 2 s 后有功功率回升，此时仅有VSC有功功率控制环中的比例部分发挥作用。流经晶闸管整流器的有功功率缓慢降低，调节系统交流母线频率，实现一次调频。流经混合整流器的总有功功率先大幅度降低，为系统提供快速频率补偿，随后缓慢达到新稳态实现整个调频过程。



(a)下垂控制



(b) 虚拟同步机控制

图 10　流经 SCR、VSC 和混合整流器的电解制氢功率

Fig. 10 Power of electrolytic hydrogen production flowing through SCR, VSC and hybrid rectifier

4　结语

本文提出了一种新型电解制氢混合整流器多尺度调频控制策略，通过混合整流器中各变换器的协调控制，重塑电解制氢负荷特性。混合整流器中的晶闸管整流器用于实现一次调频乃至二次调频等长时间尺度频率调节，辅助功率变换器通过迅速调节流经自身的制氢功率，实现惯量支撑，减缓系统频率的变化速度，为晶闸管整流器进行一次调频赢得时间。通过二者协调配合，克服现有相控型整

流器或全控型整流器实现大容量电解制氢负荷多尺度频率调节的局限性。

参考文献：

[1] Qi Yang, Yang Tianbo, Fang Jingyang, et al. Grid inertia support enabled by smart loads [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(1): 947-957.

[2] Chen Junru, Liu Muyang, Guo Renqi, et al. Co-ordinated grid forming control of AC-side-connected energy storage systems for converter-interfaced generation [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 133: 107201.

[3] 王皓靖, 刘舒, 包海龙, 等. 运用虚拟同步机技术的新型兆瓦级光-储并网结构[J]. 太阳能学报, 2021, 42(1): 446-452.
Wang Haojing, Liu Shu, Bao Hailong, et al. A new megawatt structure of PV and energy storages with virtual synchronous generator [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2021, 42(1): 446-452. (in Chinese)

[4] 李子阳, 王洪希, 王璞, 等. 虚拟同步发电机并网逆变器微分平坦控制策略[J]. 电源学报, 2025, 23(6): 123-131.
Li Ziyang, Wang Hongxi, Wang Pu, et al. Differential flatness control strategy for grid-connected inverter based on virtual synchronous generator control [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(6): 123-131. (in Chinese)

[5] Xiong Liansong, Liu Lei, Liu Xiaokang, et al. Frequency trajectory planning based strategy for improving frequency stability of droop-controlled inverter based standalone power systems [J]. IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems, 2021, 11(1): 176-187.

[6] Nguyen B L H, Panwar M, Hovsapian R, et al. Power converter topologies for electrolyzer applications to enable electric grid services [C]//IECON 2021 – 47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Toronto, ON, Canada, 2021: 1-6.

[7] 赵强, 张雅洁, 谢小荣, 等. 基于可再生能源制氢系统附加阻尼控制的电力系统次同步振荡抑制方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(13): 3728-3736.
Zhao Qiang, Zhang Yajie, Xie Xiaorong, et al. Mitigation of subsynchronous oscillations based on renewable energy hydrogen production system and its supplementary damping control [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(13): 3728-3736. (in Chinese)

[8] Peltoniemi P, Pyrhnen O, Savolainen J, et al. Frequency regulation possibilities of power-to-gas plants in grids including high shares of renewable energy production [C]// 10th International Renewable Energy Storage, IRES 2016. 2016.

[9] 孔令国, 蔡国伟, 李龙飞, 等. 风光氢综合能源系统在线能量调控策略与实验平台搭建[J]. 电工技术学报, 2018, 33(14): 3371-3384.
Kong Lingguo, Cai Guowei, Li Longfei, et al. Online energy control strategy and experimental platform of integrated energy system of wind, photovoltaic and hydrogen [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(14): 3371-3384. (in Chinese)

[10] 郭梦婕, 严正, 周云, 等. 含风电制氢装置的综合能源系统优化运行[J]. 中国电力, 2020, 53(1): 115-123, 161.
Guo Mengjie, Yan Zheng, Zhou Yun, et al. Optimized operation design of integrated energy system with wind power hydrogen production [J]. Electric Power, 2020, 53(1): 115-123, 161. (in Chinese)

[11] 叶海钧. 风电制氢—燃料电池耦合微网系统的分层控制技术及其工程实现[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
Ye Haijun. Hierarchical control and its project implementtation of a wind-hydrogen-water-electricity hybrid energy system [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016. (in Chinese)

[12] 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.
Shen Xiaojun, Nie Congying, Lü Hong. Coordination control strategy of wind power-hydrogen alkaline electrolyzer bank considering electrothermal characteristics [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(3): 463-472. (in Chinese)

[13] Dozein M G, Jalali A, Mancarella P. Fast frequency response from utility-scale hydrogen electrolyzers [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021, 12(3): 1707-1717.

[14] Veerakumar N, Ahmad Z, Adabi M E, et al. Fast active power-frequency support methods by large scale electro-

lyzers for multi-energy systems [C]//2020 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe). The Hague, Netherlands, 2020: 151-155.

[15] 赵强, 张雅洁, 谢小荣, 等. 基于可再生能源制氢系统附加阻尼控制的电力系统次同步振荡抑制方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(13): 3728-3736.
Zhao Qiang, Zhang Yajie, Xie Xiaorong, et al. Mitigation of subsynchronous oscillations based on renewable energy hydrogen production system and its supplementary damping control [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(13): 3728-3736. (in Chinese)

[16] Bintz S, Fischer M, Roth-Stielow J. Parallel rectifier for regenerative hydrogen production utilizing a combination of thyristor and PWM-based topologies [C]// 2018 20th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'18 ECCE Europe). Riga, Latvia, 2018: 1-10.

[17] 李萍, 王久和, 李建国, 等. 单向混合整流器无源电流控制[J]. 电工技术学报, 2020, 35(21): 4511-4523.
Li Ping, Wang Jiuhe, Li Jianguo, et al. A passivity-based current control strategy for unidirectional hybrid rectifier [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(21): 4511-4523. (in Chinese)

[18] 王久和, 常伟, 陈启丽. 不同拓扑结构混合整流器性能评估[J]. 电工技术学报, 2017, 32(16): 212-222.
Wang Jiuhe, Chang Wei, Chen Qili. Performance evaluation research of different topology hybird rectifiers [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(16): 212-222. (in Chinese)

[19] Meng Xin, Chen Maolin, He Mingzhi, et al. A novel high power hybrid rectifier with low cost and high grid current quality for improved efficiency of electrolytic hydrogen production [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(4): 3763-3768.



张华

作者简介：

张华(1970—)，男，硕士，高级工程师。研究方向：可再生能源发电技术。E-mail：357119252@qq.com。

蒋璐岭(1997—)，女，硕士。研究方向：可再生能源耦合氢能技术。E-mail：jiangluling@stu.scu.edu.cn。

孟鑫(1992—)，男，通信作者，博士，副研究员。研究方向：新能源发电，变换器建模及控制。E-mail：mengxin_pe@163.com。

杨浩冉(2000—)，男，硕士。研究方向：新能源耦合氢能技术。E-mail：1597293474@qq.com。

(责任编辑：陈国珍)