DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.6.162 **中图分类号**：TM323 **文献标志码**：A

兼具高可靠性高效率的大功率电解制氢电源研究

贺明智，谭 杨，孟 鑫，陈茂林
(四川大学电气工程学院，成都 610000)

摘要：针对目前相控型和全控型整流器在电解制氢领域无法兼顾高功率等级、高制氢效率和高可靠性的问题，提出一种由主功率整流器和辅助变换器并联构成的整流器混合拓扑及其控制策略，其中主功率整流器为晶闸管整流器，辅助变换器由脉宽调制电压源型变换器和移相全桥变换器级联构成。通过分析辅助变换器数学模型，并以补偿纹波电流和吸收谐波电流为控制目标，给出重复控制+比例谐振控制的电流控制方法，实现制氢单元高效运行的同时保证输入电流质量优化。此外，还提出整流器混合拓扑的3种容错运行模式，以提高其可靠性。通过搭建电解制氢平台以及半实物仿真对整流器混合拓扑及其控制策略进行验证，结果证明了所提整流器混合拓扑的正确性和有效性。

关键词：大功率电解制氢；整流器混合拓扑；容错运行；高制氢效率；高可靠性

Research on High-power Electrolytic Hydrogen Production Power Supply with High Reliability and High Efficiency

HE Mingzhi, TAN Yang, MENG Xin, CHEN Maolin
(College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610000, China)

Abstract: To address the problem that phase-controlled and fully-controlled rectifiers cannot combine high power level, high hydrogen production efficiency and high reliability in the field of electrolytic hydrogen production at present, a hybrid rectifier topology which consists of a main power rectifier and an auxiliary converter in parallel and its control strategy are proposed. The main power rectifier is a thyristor rectifier, and the auxiliary converter consists of a pulse width modulated voltage source converter and a phase-shifted full-bridge converter in cascade. Through an analysis of the mathematical model of the auxiliary converter, the compensation of ripple current and the absorption of harmonic current are taken as control objectives, and a current control method of repetitive control with proportional resonance control is given to realize an efficient operation of the hydrogen production unit while optimizing the input current quality. In addition, three fault-tolerant operation modes of the hybrid rectifier topology are proposed to improve its reliability. An electrolytic hydrogen production platform was built and semi-physical simulations were performed to verify the hybrid rectifier topology and its control strategy, and results proved the topology's correctness and effectiveness.

Keywords: High-power electrolytic hydrogen production; hybrid rectifier topology; fault-tolerant operation; high hydrogen production efficiency; high reliability

氢能的推广对于构建清洁低碳、安全高效的综合能源体系，实现“双碳”目标具有重要意义。基于新能源的电解制氢可实现氢气从生产到利用的零碳排放，但其耗电量较高[1-2]。因此，提高新能源电解制氢效率对实现电解制氢的大规模商业化应用至关重要。在交流母线结构的可再生能源电解制氢系统中，整流器作为电解堆栈与交流母线的关键接口设备，其供电质量对电解堆栈的制氢效率有

收稿日期：2023-03-28；**修回日期**：2023-04-24；**录用日期**：2023-05-17；**网络首发日期**：2023-06-19
基金项目：国家自然科学基金青年基金资助项目(52207217)
This work is supported by Youth Fund of the National Natural Science Foundation of China under the grant 52207217

重要影响[3]。近年来，部分学者研究了变换器输出电能质量对电解堆栈制氢效率的影响，结果表明，电解堆栈制氢量虽然由输入电流平均值定义，但电流纹波会在电解槽中产生额外的功率损耗，降低了制氢效率[4-5]。目前常用的电解制氢整流器主要包括相控型整流器和全控型整流器。

相控型整流器具有结构简单、容量大、成本低等优点[6]，适用于大容量电解堆栈，但其并网电流畸变严重，难以满足并网要求，且输出电流纹波含量较高，影响电解堆栈制氢效率[7-8]。例如：文献[9]和文献[10]分别指出通过增加移相变压器绕组或采用开放端绕组结构来增加晶闸管整流器的输出脉波数，从而抑制输出电压脉动，减小谐波含量；文献[11]提出一种 24 脉波整流电路，通过引入辅助整流桥来增加整流器工作模态，进而将整流器脉波数倍增，该方法增加的整流器成本较小，但引入的辅助整流桥会产生比较严重的附加导通损耗，降低整流器能量转换效率。相比相控型整流器，全控型整流器响应速度快，交直流侧电能质量好，具备高制氢效率和高并网质量，但功率器件价格高昂。例如：文献[12]提出采用绝缘栅双极晶体管 IGBT(insulate-gate bipolar transistor)和二极管相串联的电流源型脉冲宽度调制 PWM(pulse width modulation)整流器电解制氢，但在大电流应用中其导通损耗较高[13]，不适用于大容量电解堆栈；文献[14]提出电压源型 PWM 整流器级联 DC/DC 变换器的拓扑电解制氢，并给出具体的控制策略及设计方法，但仍主要适用于中、小容量电解堆栈。

相控型和全控型整流器单独用于大容量电解堆栈制氢时均具有一定的局限性，而由相控型和全控型整流器并联构成的混合拓扑方案可兼具两者优点。文献[15-17]提出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、单位功率因数运行和宽范围输出电压，但并未用于制氢场合，其适应性难以估计。此外，上述混合整流器拓扑主要集中于改善交流侧电流，并未关注直流侧供电的电能质量。文献[18]提出利用整流器混合拓扑电解制氢，但全控型整流器的交、直流侧存在功率耦合，实际效果并不理想[19-24]。

针对上述问题，本文提出一种新型整流器混合拓扑及控制策略，用于大容量电解制氢负荷。整流器混合拓扑包括晶闸管整流器和辅助变换器，其中晶闸管整流器承担电解堆栈所需的主要功率，辅助变换器在传输部分功率的同时，补偿交流侧谐波并抑制直流输出电流纹波，实现高功率等级、高制氢效率和电网电流质量的优化。针对整流器混合拓扑的多种故障情况，提出 3 种容错运行模式，实现电解堆栈不间断运行，确保整流电源的高可靠性。

1　整流器混合拓扑结构及工作原理

本文所提整流器混合拓扑主电路结构如图 1 所示，其由晶闸管整流器和辅助变换器并联组成，其中辅助变换器为 PWM 电压源型变换器 VSC(voltage source converter)和移相全桥 PSFB(phase-shifted full-bridge)变换器级联结构。主功率单元结构灵活，可采用 6n(n=1, 2,⋯)脉波整流器结构。为简化分析，本文采用 6 脉波晶闸管整流器展开分析。电压源型变换器的交流侧通过 LC 滤波器接入交流母线。辅助变换器直流母线处的电容 C_s 用于完成交流侧和直流侧的功率解耦。滤波电感 L_1 用于实现自然换流。VSC 用于吸收晶闸管整流器的并网电流谐波和无功分量并维持辅助变换器的直流母线电压稳定。

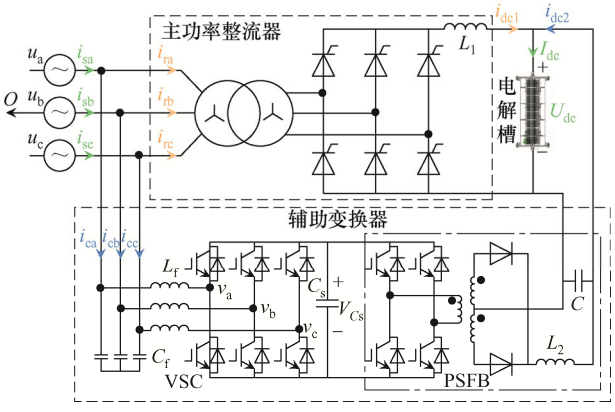
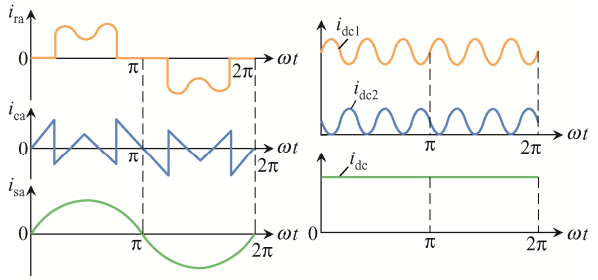


图 1　所提整流器混合拓扑主电路结构

Fig. 1 Structure of main circuit of proposed hybrid rectifier topology

整流器混合拓扑的电流波形如图 2 所示。稳态运行时，以 a 相电流波形为例，整流器混合拓扑交流侧输入电流为晶闸管整流器与 VSC 的输入电流叠加，即 $i_{sa}=i_{ra}+i_{ca}$。VSC 的输入电流通过电流跟踪控制实现与晶闸管整流器输入电流关于基频正弦波形互补。PSFB 根据参考信息产生补偿电流 i_{dc2}，以补偿晶闸管整流器直流电流纹波。因此电解堆栈输入电流 I_{dc} 由电流 i_{dc1} 与电流 i_{dc2} 合成，具备低纹波特性，以提高电解堆栈的制氢效率。



(a) 交流侧输入电流 (b) 电解堆栈输入电流

图 2 整流器混合拓扑的电流波形

Fig. 2 Current waveforms of hybrid rectifier topology

2 控制策略

晶闸管整流器采用比例积分 PI(proportional integral)控制来调节触发角 α，从而改变晶闸管触发时刻，实现输出电流 i_{dc1} 跟随其指令值，其控制结构不再赘述。图 3 为整流器混合拓扑的控制框图，包含 VSC 和 PSFB 变换器 2 个部分。

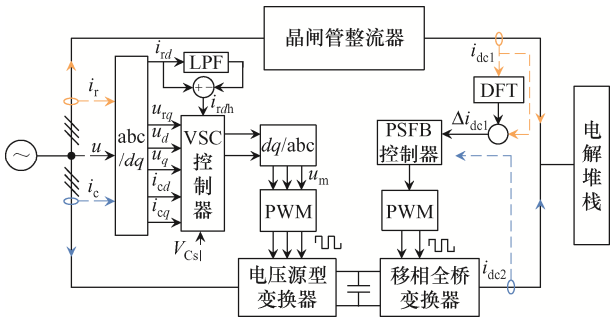


图 3 整流器混合拓扑控制框图

Fig. 3 Control block diagram of hybrid rectifier topology

2.1 VSC 控制策略

VSC 的作用包括控制辅助变换器直流母线电压 V_{Cs} 稳定以及补偿晶闸管整流器的交流电流谐波分量。首先对前者进行分析，图 1 中 VSC 在两相旋转坐标系(d-q 坐标系)下的数学模型为

$$\begin{cases} L_{\mathrm{f}}\dfrac{\mathrm{d}i_{cd}}{\mathrm{d}t}-\omega L_{\mathrm{f}}i_{cq}=u_d-v_d \\ L_{\mathrm{f}}\dfrac{\mathrm{d}i_{cq}}{\mathrm{d}t}+\omega L_{\mathrm{f}}i_{cd}=u_q-v_q \end{cases} \tag{1}$$

式中：L_{f} 为交流侧滤波电感；i_{cd} 和 i_{cq} 分别为VSC交流电流的 d 轴和 q 轴分量；ω 为系统角频率；u_d 和 u_q 分别为电网电压的 d 轴和 q 轴分量；v_d 和 v_q 分别为 VSC 交流电压的 d 轴和 q 轴分量。辅助变换器直流母线瞬时功率 P_{dc} 可表示为

$$P_{\mathrm{dc}}=V_{Cs}C_{\mathrm{s}}\frac{\mathrm{d}V_{Cs}}{\mathrm{d}t}=P_{\mathrm{ac}}=\frac{3}{2}u_d i_{cd} \tag{2}$$

式中：V_{Cs} 为辅助变换器直流母线电压；C_{s} 为辅助变换器直流母线电容值。由式(2)可得，并网电流 i_{cd} 到直流母线电压 V_{Cs} 的传递函数为

$$G_{vi}(s)=\frac{3u_d}{2sV_{Cs}C_{\mathrm{s}}} \tag{3}$$

采用 PI 控制器控制 V_{Cs} 跟随其指令值 V_{Cs}^{*}，得到电流调节信号 i_{Cs} 为

$$i_{Cs}(s)=\left(K_{\mathrm{p1}}+\frac{K_{\mathrm{i1}}}{s}\right)(V_{Cs}^{*}-V_{Cs}) \tag{4}$$

式中，K_{p1} 和 K_{i1} 分别为 VSC 中 PI 控制器的比例和积分系数。

根据式(1)~(4)可得，VSC 的控制结构如图 4 所示。其中：G_{c} 为电流调节器；G_{pwm} 为变换器的传递函数；u_d、u_q 为电压前馈分量，有利于增强系统动态响应特性以及抗干扰能力；i_d^{*}、i_q^{*} 分别为 VSC 并网电流的 d、q 轴参考值，表示为

$$\begin{cases} i_d^{*}=i_{rdh}+i_{Cs} \\ i_q^{*}=i_{rqh}+i_{q_SCR} \end{cases} \tag{5}$$

式中：i_{rdh}、i_{rqh} 分别为晶闸管整流器并网电流在 d 轴和 q 轴的谐波分量；i_{q_SCR} 为晶闸管整流器并网电流在 q 轴的基波分量。

电流调节器 G_{c} 采用 PI 控制器和重复控制器并联的复合结构。该结构优点为重复控制器可实现无静差跟踪谐波指令，而 PI 控制器可实现无静差跟踪基波指令的同时弥补重复控制器动态性能不佳的缺点，保证了系统的动态响应。6 脉波晶闸管整

流器并网电流 i_r 的谐波次数主要为 5、7 次，三相坐标系中 $6n\pm1$ 次谐波转换为 d-q 坐标系中 $6n$ 次谐波，因此采用延迟时间为 $T_0/6$ 的重复控制器 G_{RC} 可实现对$6n$ 次谐波分量的跟踪。G_{RC} 在离散域下可表示为

$$G_{RC}(z)=\frac{z^{-T_0/6}G_f(z)}{1-Q(z)z^{-T_0/6}} \tag{6}$$

式中：$z^{-T_0/6}$ 为延迟环节；T_0 为基波周期；$Q(z)$通常选择为低通滤波器 LPF(low-pass filter)或略小于 1 的常数，以提高系统稳定性；$G_f(z)$为幅值相位补偿器，$G_f(z)=K_r z^k S(z)$，其中 K_r 为重复控制增益，z^k 为相位超前环节，$S(z)$为一个滤波器。

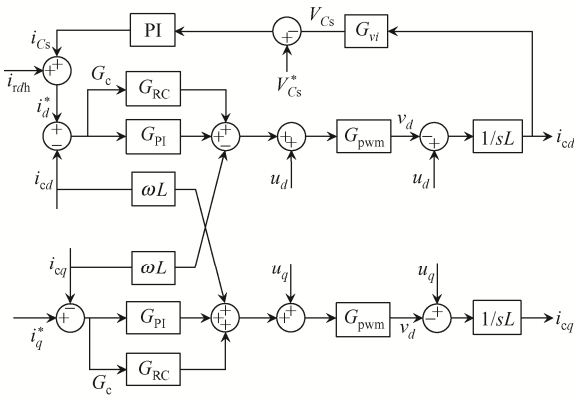


图 4　VSC 控制框图

Fig. 4 Control block diagram of VSC

2.2　PSFB 变换器控制策略

通过对图 1 中 PSFB 变换器建模，其控制信号到输出电流的传递函数为

$$G_{id}(s)=\frac{i_{dc2}(s)}{d(s)}=\frac{V_{Cs}(RCs+1)}{L_2RCs^2+L_2s+R} \tag{7}$$

式中，R 为电解堆栈等效电阻。

根据该模型可得控制结构如图 5 所示，其中 G_i 为电流调节器，G_{PWM} 为变换器的传递函数。总参考电流 i_{dc2}^* 为

$$i_{dc2}^*=\Delta i_{dc1}+I_{set} \tag{8}$$

式中：Δi_{dc1} 为晶闸管整流器输出直流电流的纹波分量，可采用离散傅里叶变换 DFT(discrete Fourier transform)滑窗均值滤波算法获得；I_{set} 为直流偏置，其大小设置为 $\Delta i_{dc1}/2$ 以上，作用是使总参考电流 i_{dc2}^* 大于 0。

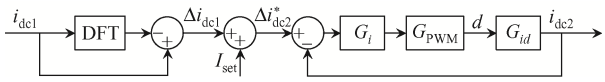


图 5　PSFB 变换器控制框图

Fig. 5 Control block diagram of PSFB converter

由于 PSFB 仅需补偿晶闸管整流器输出电流中频率为 300 Hz 的纹波分量，因此采用谐振角频率为 6ω 的准谐振控制器和 PI 控制器并联的结构组成电流调节器 G_i，对误差电流进行控制。G_i 表示为

$$G_i(s)=K_{p2}+\frac{K_{i2}}{s}+\frac{2K_R\omega_c s}{s^2+2\omega_c s+(6\omega)^2} \tag{9}$$

式中：K_{p2} 和 K_{i2} 分别为 PSFB 中 PI 控制器的比例系数和积分系数；K_R 为谐振增益系数；ω_c 为截止角频率。

3　容错运行模式

整流器混合拓扑正常运行时，晶闸管整流器、VSC 和 PSFB 变换器同时向电解堆栈提供功率。为提高整流器混合拓扑的可靠性，本文针对晶闸管整流器、VSC 和 PSFB 变换器中某环节发生驱动故障时，通过拓扑重构实现容错运行，确保电解堆栈不中断运行，且尽可能提高整流器混合拓扑的交、直流侧电能质量。

3.1　VSC 故障

当 VSC 中某开关器件的驱动发生故障时，该开关器件无法正常导通，此时可将 VSC 中所有开关器件关断，使其等效为一个不控整流器，则整流器混合拓扑的等效电路如图 6 所示。此时 PSFB 变换器仍可正常运行，补偿晶闸管整流器输出电流中的纹波分量。电解堆栈仍具有高制氢效率，但整流器混合拓扑的并网电流质量较差。VSC 和 PSFB 变

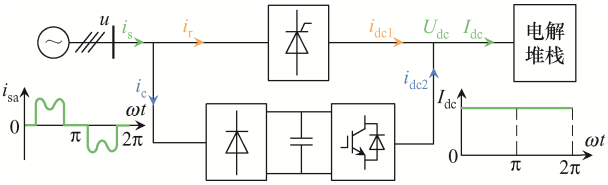


图 6　VSC 故障时整流器混合拓扑的等效电路

Fig. 6 Equivalent circuit of hybrid rectifier topology in the case of VSC fault

换器的电流指令分别为

$$\begin{cases} i_d^* = i_q^* = 0 \\ i_{\mathrm{dc2}}^* = \Delta i_{\mathrm{dc1}} + I_{\mathrm{set}} \end{cases} \tag{10}$$

3.2 PSFB 故障

该模式下 PSFB 变换器将停止工作，电解堆栈仅由晶闸管整流器供电，等效电路如图 7 所示。整流器混合拓扑直流侧存在纹波电流 Δi_{dc1}，电解堆栈制氢效率下降但仍可继续制氢。VSC 此时可作为有源滤波器和静止无功补偿器，用于补偿晶闸管整流器产生的谐波和无功电流。其控制结构与正常模式相同，指令值同式(5)。

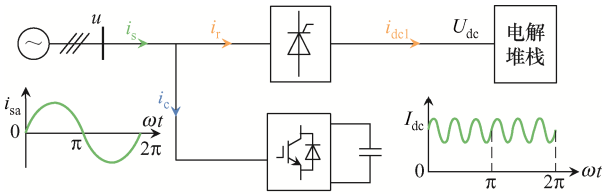


图 7 PSFB 故障时整流器混合拓扑的等效电路

Fig. 7 Equivalent circuit of hybrid rectifier topology in the case of PSFB fault

3.3 晶闸管整流器故障

该模式下晶闸管整流器停止工作，仅由辅助变换器为电解堆栈供电，等效电路如图 8 所示。在此模式下，VSC 的输入电流可控制为单位功率因数纯正弦波，电容 C_{s} 仅传递有功功率，实现其交流侧和直流侧的功率解耦。VSC 和 PSFB 的电流指令分别为

$$\begin{cases} i_d^* = i_{\mathrm{Cs}} \\ i_q^* = 0 \end{cases} \tag{11}$$

$$i_{\mathrm{dc2}}^* = P_{\mathrm{dc}} / U_{\mathrm{dc}} \tag{12}$$

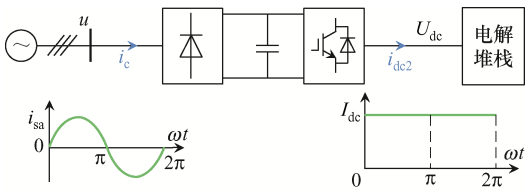


图 8 晶闸管整流器故障时的等效电路

Fig. 8 Equivalent circuit in the case of thyristor rectifier fault

此外，该模式下电解槽的制氢功率取决于辅助变换器的容量。鉴于辅助变换器正常工作时的有功功率仅为补偿晶闸管整流器直流纹波所需功率，因此，辅助变换器的容量可表示为

$$P_{\mathrm{dc}} = U_{\mathrm{dc}} \Delta I_{\mathrm{dc1}} \tag{13}$$

式中，ΔI_{dc1} 为 Δi_{dc1} 的有效值，计算公式为

$$\Delta I_{\mathrm{dc1}} = \sqrt{I_{\mathrm{dc1}}^2 - I_{\mathrm{dc}}^2} \tag{14}$$

式中，I_{dc1} 为 i_{dc1} 的有效值。

定义辅助变换器的等效容量 λ 为

$$\lambda = \frac{P_{\mathrm{dc}}}{P} \times 100\% = \frac{P_{\mathrm{dc}}}{U_{\mathrm{dc}} I_{\mathrm{dc}}} \times 100\% = \frac{\Delta I_{\mathrm{dc1}}}{I_{\mathrm{dc}}} \times 100\% \tag{15}$$

式中，P 为整流器混合拓扑的额定功率。

以 6 脉波晶闸管整流器为例，则 I_{dc} 和 I_{dc1} 的数学表达式分别为

$$I_{\mathrm{dc}} = \frac{6\int_{\frac{1}{3}\pi+\alpha}^{\frac{2}{3}\pi+\alpha} \sqrt{6} U \sin(\omega t)\mathrm{d}(\omega t)}{2\pi R} = \frac{2.34 U \cos\alpha}{R} \tag{16}$$

$$I_{\mathrm{dc1}} = \frac{1}{R}\sqrt{\frac{6}{2\pi}\int_{\frac{1}{3}\pi+\alpha}^{\frac{2}{3}\pi+\alpha} (\sqrt{6} U \sin\omega t)^2 \mathrm{d}(\omega t)} = \frac{U}{R}\sqrt{3 + \frac{9\sqrt{3}}{2\pi}\cos(2\alpha)} \tag{17}$$

式中，U 为交流侧相电压的均方根。

联立式(14)~式(17)，则辅助变换器等效容量 λ 表示为

$$\lambda = \sqrt{\frac{\pi^2 + \frac{3\sqrt{3}}{2}\pi\cos(2\alpha)}{18\cos^2\alpha} - 1} \times 100\% \tag{18}$$

同理可计算 12 脉波、24 脉波晶闸管整流器的波纹率，在此不做赘述。对于大功率电解制氢的应用场景，晶闸管整流器的触发角通常不超过 30°，以保证达到电解堆栈的可逆电压。当 α=30°时，辅助变换器的等效容量为 18.3%。

因此，该模式运行的最大功率为整流器混合拓扑额定功率的 18.3%。此外，如果电解堆栈功率需求低于此值，可将晶闸管整流器切除，仅采用辅助变换器供电，以提高整流器混合拓扑的效率及电能质量。

4　实验验证

为了验证所提整流器混合拓扑和控制策略的有效性，本文搭建了小功率电解水制氢实验平台，如图 9 所示，包括混合整流器、电解堆栈等。利用可编程交流电源模拟交流母线，用高精度气体流量计测量氢气生产速率。此外，通过 RT-lab 平台半实物仿真验证大功率工况条件下的有效性。相关实验参数和半实物仿真参数见表 1。

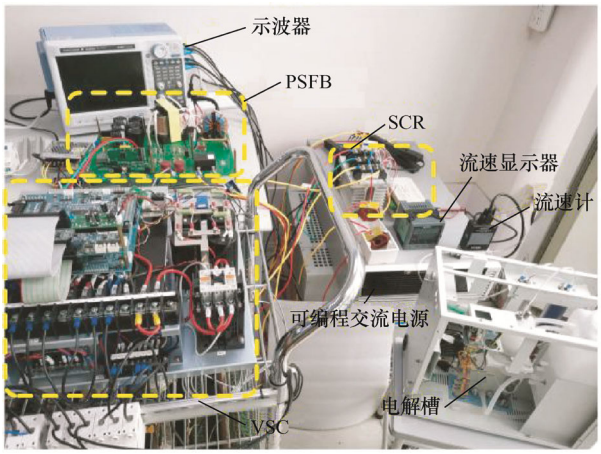


图 9　电解制氢实验平台

Fig. 9 Experimental platform of electrolytic hydrogen production

表 1　实验与仿真参数

Tab. 1 Experimental and simulation parameters

参数	实验值	仿真值
相电压 u/V	52 (交流电压有效值)	220
输出电压 U_{dc}/V	44	200
电容电压 V_{Cs}/V	190	700
输出电流 I_{dc}/A	6.07	5 000
电网频率 f/Hz	50	50
开关频率 f_s/kHz	10	10
解耦电容 C_s/μF	800	6 000
电感 L_1/μH	3 000	100
电感 L_2/μH	250	200
滤波电感 L_f/μH	1 000	50
滤波电容 C_f/μF	10	100
产氢率/(mL/min)	75.8	—

4.1　实验结果

首先，比较了分别采用晶闸管整流器与整流器混合拓扑供电的关键电能质量。整流器混合拓扑正常模式下的实验结果如图 10 所示。图 10(a)为 6 脉波晶闸管整流器单独供电时的相关实验波形，此时，电流平均值为 6.07 A，均方根值为 6.33 A，电解堆栈消耗的功率为 278.52 W。由图 10(a)可见，直流输出电压 U_{dc1} 和电流 i_{dc1} 均包含较大纹波，且晶闸管整流器并网电流 i_{ra} 存在严重畸变和无功成分。图 10(b)为所提整流器混合拓扑实验波形。由图 10(b)可见，经 PSFB 变换器补偿后，直流输出电压 U_{dc} 和输出电流 I_{dc} 纹波得到明显改善。此时，电解堆栈电流平均值为 6.07 A，均方根值为 6.09 A，电解堆栈消耗的功率为 267.96 W，在相同产氢率下，制氢效率提高约3.8%。此外，整流器混合拓扑的并网电流 i_{sa} 谐波含量大幅降低，波形得到明显改善，原因是晶闸管整流器并网电流的谐波和无功

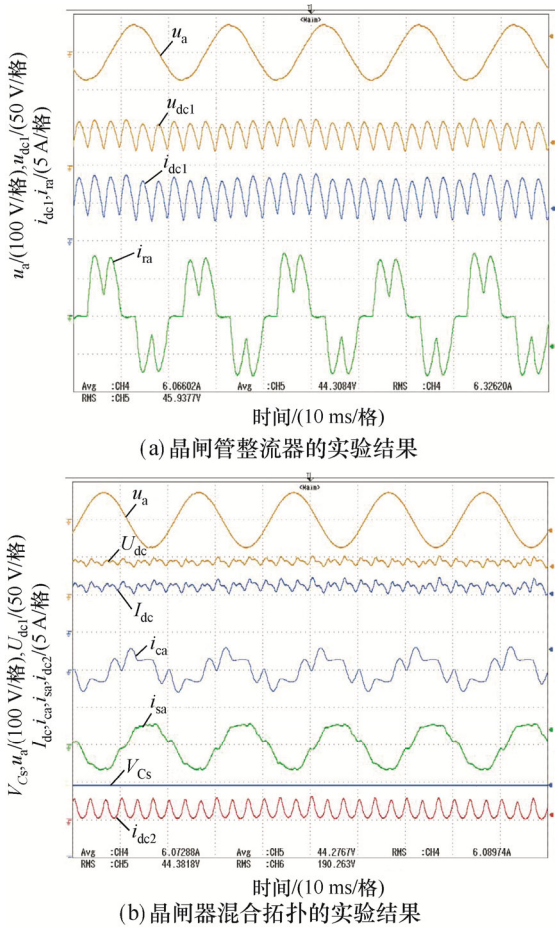


图 10　整流器混合拓扑正常模式下的实验结果

Fig. 10 Experimental results of hybrid rectifier topology in normal mode

分量被 VSC 吸收。

其次，比较了晶闸管整流器与整流器混合拓扑分别供电时电解堆栈的制氢效率，两者通过设定相同的输出电流平均值来获得相同的产氢率，并比较电解堆栈消耗的功率，以研究不同整流器供电时电解堆栈的制氢效率。高精度气量显示及可编程交流电源如图 11 所示，晶闸管整流器和整流器混合拓扑分别供电时电解堆栈产氢率相同(75.8 mL/min)。根据可编程交流电源显示，晶闸管整流器和整流器混合拓扑所消耗的有功功率近似，但与晶闸管整流器相比，整流器混合拓扑的无功功率总需求大幅降低，原因是整流器混合拓扑中 VSC 可以补偿晶闸管整流器中的谐波和无功功率。

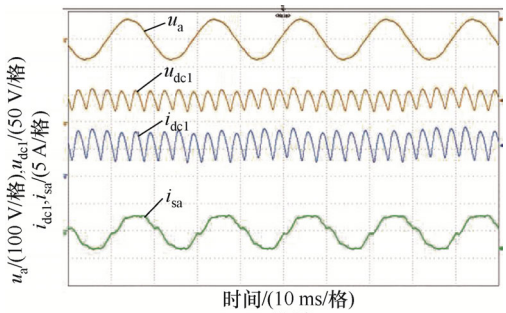


(a) 晶闸管整流器供电 (b)整流器混合拓扑供电

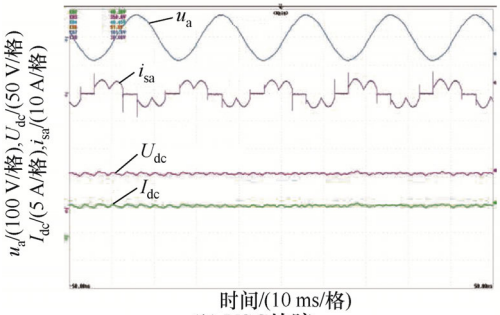
图 11 高精度气量显示及可编程交流电源

Fig. 11 Display of high-precision gas meter and programmable AC power supply

图 12 给出了容错模式下的实验波形。由图 12 可知，所提整流器具备容错能力，高供电可靠性得到保障。其中，VSC 故障时整流器混合拓扑输出电流的纹波较小，但无法补偿谐波和无功电流。PSFB



(a) PSFB故障



(b) VSC故障

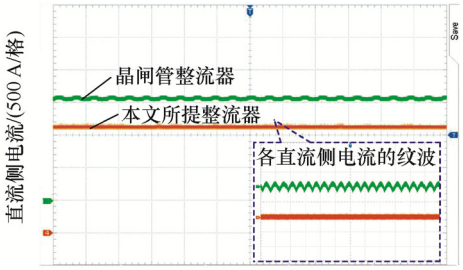
图 12 容错模式下的实验结果

Fig. 12 Experimental results in fault-tolerant mode

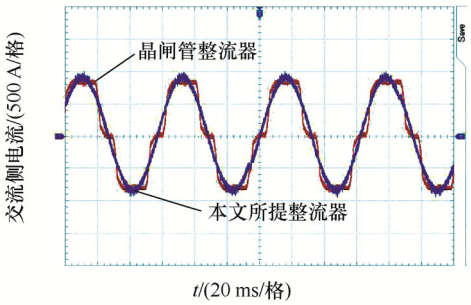
变换器故障时无法补偿输出纹波，但输入电流质量较高。

4.2 半实物仿真

通过RT-lab平台半实物仿真结果验证了所提整流器混合拓扑在大功率工况条件下的有效性。晶闸管整流器和所提整流器混合拓扑电流波形如图 13 所示。图 13(a)为整流器混合拓扑和晶闸管整流器直流输出电流波形，相比于晶闸管整流器，整流器混合拓扑的直流电流纹波得到补偿；图 13(b)为整流器混合拓扑和晶闸管整流器交流侧电网电流波



(a) 晶闸管整流器和所提整流器混合拓扑的直流输出电流

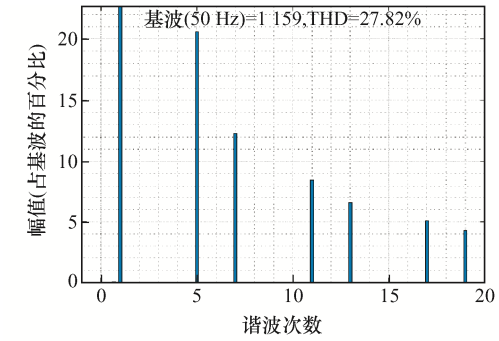


(b) 晶闸管整流器和所提整流器混合拓扑的交流侧电流

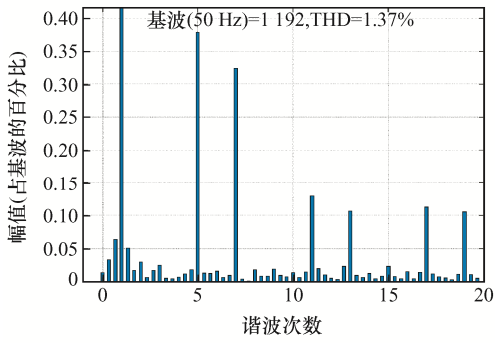
图 13 晶闸管整流器和所提整流器混合拓扑电流波形

Fig. 13 Current waveforms of thyristor rectifier and proposed hybrid rectifier topology

形。图 14 给出了二者的 FFT 分析。可见，晶闸管整流器网侧电流畸变严重，总谐波畸变率 THD (total harmonic distortion)为 27.8%，而所提整流器混合拓扑电网电流正弦度高，THD 仅为 1.37%，整流器混合拓扑有效提高了电解制氢效率和电网电流质量。



(a) 晶闸管整流器输入电流



(b) 所提整流器混合拓扑输入电流

图 14　输入电流 FFT 分析

Fig. 14 FFT analysis of input current

5　结语

本文针对电解制氢整流电源，提出了一种新型整流器混合拓扑及控制策略，采用晶闸管整流器承担主要功率，辅助变换器用于补偿其交流侧谐波和直流侧纹波分量。本文对新型整流器混合拓扑工作原理进行分析并给出控制策略具体结构后，设计了整流器混合拓扑各环节出现故障时的容错运行工况，并且通过实验样机与 RT-lab 平台进行了验证。实验结果表明，与晶闸管整流器相比，所提整流器混合拓扑的制氢效率有效提高，并网电流谐波含量减少约 30%，RT-lab 平台半实物仿真结果验证了所提整流器混合拓扑在大功率工况条件下的有效性。本文所提整流器混合拓扑可实现大功率、高效率电解制氢的同时确保高供电可靠性。

参考文献：

[1] 陈彬, 谢和平, 刘涛, 等. 碳中和背景下先进制氢原理与技术研究进展[J]. 工程科学与技术, 2022, 54(1): 106-116.
Chen Bin, Xie Heping, Liu Tao, et al. Principles and progress of advanced hydrogen production technologies in the context of carbon neutrality [J]. Advanced Engineering Sciences, 2022, 54(1): 106-116. (in Chinese)

[2] 吉旭, 周步祥, 贺革, 等. 大规模可再生能源电解水制氢合成氨关键技术与应用研究进展[J]. 工程科学与技术, 2022, 54(5): 1-11.
Ji Xu, Zhou Buxiang, He Ge, et al. Research review of the key technology and application of large-scale water electrolysis powered by renewable energy to hydrogen and ammonia production [J]. Advanced Engineering Sciences, 2022, 54(5): 1-11. (in Chinese)

[3] 何平, 雷勇, 杜佳耘, 等. 基于EWT-FC方法的氢-超级电容混合储能功率分配[J]. 电源学报, 2023, 21(5): 191-199.
He Ping, Lei Yong, Du Jiayun, et al. Hydrogen- supercapacitor hybrid energy storage power distribution based on EWT-FC method [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(5): 191-199. (in Chinese)

[4] Dobó Z, Palotás Á B. Impact of the current fluctuation on the efficiency of alkaline water electrolysis [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(9): 5649-5656.

[5] Ruuskanen V, Koponen J, Kosonen A, et al. Power quality and reactive power of water electrolyzers supplied with thyristor converters [J]. Journal of Power Sources, 2020, 459: 228075.

[6] 刘源, 梅烨, 曹丰文, 等. VIENNA 整流器的设计与优化[J]. 电源学报, 2018, 16(2): 110-118
Liu Yuan, Mei Ye, Cao Fengwen, et al. Design and optimization of VIENNA rectifier [J]. Journal of Power Supply, 2018, 16(2): 110-118. (in Chinese)

[7] Meng Fangang, Yang Wei, Zhu Yi, et al. Load adaptability of active harmonic reduction for 12-pulse diode

bridge rectifier with active interphase reactor [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(12): 7170-7180.

[8] Solanki J, Fröhleke N, Böcker J. Implementation of hybrid filter for 12-pulse thyristor rectifier supplying high-current variable-voltage DC load [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(8): 4691-4701.

[9] Zhang Yingying, Xia Jinsong, Zhang Xiaoli, et al. Modeling and prediction of the reliability analysis of an 18-pulse rectifier power supply for aircraft based applications [J]. IEEE Access, 2020, 8: 47063-47071.

[10] 苗晓阳, 李冰然, 傅洪全. 适用于 DFIG 连接到直流微网的双变换器设计与实现[J]. 电源学报. 2024, 22(5): 170-181.
Miao Xiaoyang, Li Bingran, Fu Hongquan. Design and implementation of dual-converter for connecting DFIG to DC microgrid [J]. Journal of Power Supply. 2024, 22(5): 170-181.(in Chinese)

[11] 王景芳, 陈安臣, 姚绪梁, 等. 一种直流侧串联辅助单相整流器的 24 脉波整流器[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(23): 8120-8129.
Wang Jingfang, Chen Anchen, Yao Xuliang, et al. A 24-pulse rectifier with an auxiliary single-phase rectifier in series at DC side [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(23): 8120-8129. (in Chinese)

[12] Solanki J, Fröhleke N, Böcker J, et al. High-current variable-voltage rectifiers: state of the art topologies [J]. IET Power Electronics, 2015, 8(6): 1068-1080.

[13] 谢海超, 王学梅. 一种用于改善 IGBT 开关过冲的主动栅极控制技术[J]. 电源学报, 2024,22(4):280-291.
Xie Haichao, Wang Xuemei. Active gate control technology for improving switching overshoots of IGBTs [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(4): 280-291. (in Chinese)

[14] Xiao Huagen. A modular low current ripple electrolysis power supply based on multiphase half-bridge high-frequency inverters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(10): 10088-10096.

[15] 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)

[16] Zhu Jianxin, Wu Hongfei, Chen Junyu, et al. A hybrid three-phase AC/DC power system for low-frequency pulsed load applications [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(3): 1871-1882.

[17] 袁义生，张执钦，刘文钦. 一种单相 Vienna 整流器及其控制方法[J]. 电源学报, 2023,21(2):63-71.
Yuan Yisheng, Zhang Zhiqin, Liu Wenqin. Single-phase Vienna rectifier and its control method [J]. Journal of Power Supply, 2023,21(2):63-71. (in Chinese)

[18] Chang Yiran, Cai Xu. Hybrid topology of a diode-rectifier-based HVDC system for offshore wind farms [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2019, 7(3): 2116-2128.

[19] 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: P.1-P.10.

[20] 成庶, 李蔚, 陈特放, 等. 整流器主电路开路故障诊断及容错控制研究 [J]. 电工技术学报, 2016, 31(13): 26-35.
Cheng Shu, Li Wei, Chen Tefang, et al. Research on open-circuit fault diagnosis and fault-tolerant control scheme for rectifier main circuits [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(13): 26-35. (in Chinese)

[21] Meng Xin, Liu Zeng, Zheng Haoyang, et al. A universal controller under different operating states for parallel inverters with seamless transfer capability [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(9): 9794-9812.

[22] 江法洋, 郑丽君, 宋建成, 等. LCL 型并网逆变器重复双闭环控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(10): 2944-2954.
Jiang Fayang, Zheng Lijun, Song Jiancheng, et al. Repetitive-based dual closed-loop control approach for grid-connected inverters with LCL filters [J]. Proceedings of

the CSEE, 2017, 37(10): 2944-2954. (in Chinese)

[23] 兰梓冉, 郝瑞祥, 角宏林, 等. 基于重复控制和状态反馈的三相逆变器最优预见控制[J]. 电工技术学报, 2022, 37(6): 1473-1481.
Lan Ziran, Hao Ruixiang, Jiao Honglin, et al. Optimal preview control of three-phase inverter based on repe-titive control and state-feedback [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(6): 1473-1481. (in Chinese)

[24] 周乐明, 姜捷, 陈燕东, 等. LCL 型逆变器并联系统母线电压质量改善方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(23): 7000-7012, 7113.
Zhou Leming, Jiang Jie, Chen Yandong, et al. Bus-voltage quality improvement method for parallel-connected LCL-type inverters system in islanded micro-grid [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(23): 7000-7012, 7113. (in Chinese)



贺明智

作者简介：

贺明智(1979—)，男，博士，教授。研究方向：电力电子技术在新能源发电系统中的应用、特种 MW 级及以上(超)大功率电源核心技术及应用。E-mail：darmyhe@vip.126.com。

谭杨(1999—)，男，硕士研究生。研究方向：电力电子变换器拓扑及其控制策略方面研究。E-mail：1907999767@qq.com。

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

陈茂林(1998—)，男，硕士研究生。研究方向：电力电子变换器(整流器、逆变器)拓扑、控制策略以及并联变换器优化控制。E-mail：1374429953@qq.com。

(责任编辑：陈国珍)