

大规模碱液电解制氢系统协调控制策略

李立民¹, 申屠磊璇², 夏杨红¹, 冯启帆¹, 曹莹², 韦巍¹

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院)

摘要: 在制氢基地中, 多台并联的碱液电解槽协调控制共同参与可再生能源的调节是一种未来的主要趋势。然而, 随时间变化的可再生能源会对碱液电解槽的温度产生影响, 进而导致其额定功率发生变化。在这种情况下, 如果持续使用具有恒定下垂系数的下垂控制器, 可能会导致碱液电解槽之间出现不合理的功率分配。在现有文献中, 这一问题很少被考虑到。为填补这一空白, 针对含多台并联碱液电解槽的电解制氢系统提出了一种自适应功率协调控制方法。首先, 建立了碱液电解槽的等效电路模型, 并绘制出最大电流-温度曲线。在此基础上, 提出了温度驱动的下垂系数设置策略。控制系统会定期更新碱液电解槽的模型, 并结合其温度实时计算下垂系数。然后, 分析了所提控制策略对碱液电解槽热力学特性的影响。最后, 在所搭建的电解制氢实验平台上对所提控制策略进行了验证。实验结果表明, 所提方法能够实现不同碱液电解槽之间合理的功率分配。

关键词: 多台并联的碱液电解槽; 自适应功率协同控制策略; 等效电路模型; 温度驱动; 热力学特性

中图分类号: TK91; TM991.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-6772(2025)03-0083-11

Adaptive coordination control strategy for large-scale alkaline water electrolysis hydrogen production system

LI Limin¹, SHENTU Leixuan², XIA Yanghong¹, FENG Qifan¹, CAO Ying², WEI Wei¹

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University Shanghai, Hangzhou 310027, China; 2. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Hangzhou 310014, China)

Abstract: In hydrogen production bases, the coordinated control of multiple parallel alkaline water electrolyzers (AWEs) to jointly participate in the regulation of renewable energy is a major trend in the future. However, renewable energy sources that fluctuate over time can have an impact on the temperatures of alkaline water electrolyzers, which in turn leads to changes in their rated power. In such a situation, if the droop controller with a constant droop coefficient is continuously used, it may result in an unreasonable power distribution among alkaline water electrolyzers. This issue has seldom been considered in the existing literature. To fill this gap, this paper proposes an adaptive power coordination control method for the hydrogen production system with multiple parallel alkaline water electrolyzers. Firstly, an equivalent circuit model of alkaline water electrolyzers is established, and the maximum current-temperature curve is plotted. On this basis, a temperature-driven droop control strategy is proposed. The control system will periodically update the model of alkaline water electrolyzers and calculate the droop coefficient in real time by combining with their temperatures. Then, the impact of the proposed control strategy on the thermodynamic characteristics of alkaline water electrolyzers is analyzed. Finally, the proposed control strategy is verified on the built electrolytic hydrogen production experimental platform. The experimental results show that the proposed method can achieve a reasonable power distribution among different alkaline water electrolyzers.

Key words: multiple parallel alkaline water electrolyzers; ; equivalent circuit model; temperature-driven droop; thermodynamic characteristics

0 引言

对可再生能源的开发逐渐成为国际共识, 但随

着可再生能源在一次能源发电中所占比例越来越高, 电力系统频率稳定性受到了严重威胁, 进而限制了可再生能源的发展^[1]。储能技术的开发可以有

收稿日期: 2024-12-30; 策划编辑: 白娅娜; 责任编辑: 李雅楠 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.BB24123001

基金项目: 国家电网有限公司科技项目资助 (4000-202499318A-1-3-ZB)

作者简介: 夏杨红(), 性别男, 湖北武汉人, 教授。E-mail: roxyiah@126.com

引用格式: 李立民, 申屠磊璇, 夏杨红, 等. 大规模碱液电解制氢系统协调控制策略 [J]. 洁净煤技术, 2025, 31(3): 83-93.

LI Limin, SHENTU Leixuan, XIA Yanghong, et al. Adaptive coordination control strategy for large-scale alkaline water electrolysis hydrogen production system [J]. Clean Coal Technology, 2025, 31(3): 83-93.



效地解决这一问题。在这些储能技术中，氢气因其储能规模大且存储成本低，被视为 21 世纪极具发展前景的储能介质^[2]。而碱液电解槽（Alkaline water electrolyzer, AWE）凭借成熟的制造技术和低成本的优势，是目前最常见的电解制氢设备^[3]。

文献 [4] 介绍了一个利用可再生能源的制氢基地的典型结构，这种拓扑结构常见于海岛或荒漠地区，在这些地区可再生能源的波动较大，需要电解槽参与电网调节^[5]。目前，关于电解槽参与电网调节的研究更多地聚焦于质子交换膜（Proton Exchange Membrane, PEM）电解槽。文献 [6] 引入了一种风机-电解槽自适应功率协调控制策略，该策略能够基于直流母线电压，在最大功率模式和功率限制模式下实现对输出功率的无缝调节。文献 [7] 提出了一种适用于大功率 PEM 电解槽的快速频率响应（FFR）机制。随后，在参考文献 [8] 中，提出了一种虚拟同步机制控制方法，以提供虚拟惯性响应。文献 [9] 提出了利用质子交换膜（PEM）电解槽为电网提供电网构建服务的方法。文献 [10] 提出碱液电解槽和 PEM 电解槽具有相似的动态特性，虽然目前研究人员普遍认为碱液电解槽的动态特性差，但那是由于碱液电解槽的额定功率受温度影响且其升温速度慢导致的，低温下碱液电解槽的功率受到限制，因此虽然上述的研究都是 PEM 电解槽，但是对于内环电路的控制是可以应用到碱液电解槽的。

然而，上述调节控制策略在应用于大规模制氢基地（即多台并联的碱液电解槽电解制氢系统）时存在一些局限性。一方面，上述方法主要侧重于对单台电解槽的控制。与单个大功率碱液电解槽相比，多台并联的碱液电解槽模块涉及各电解槽之间的协调配合问题，这个问题对于电力系统而言显然更有吸引力。另一方面，上述研究均基于碱液电解槽温度恒定这一假设，当温度波动时，仍然采用上述控制策略可能会造成电解槽的过载或轻载。

多台并联的碱液电解槽模块具有诸多优势，例如制氢功率大、运行范围广以及具备容错能力等^[11]。文献 [12] 设计了一种三相交错并联 LLC 电路拓扑，用作制氢单元与电网之间的接口，以实现不同槽的鲁棒控制。文献 [13] 提出了多台并联的电解制氢设备间的功率分配方案，以达到效率最优。文献 [14] 提出了氢储能与传统的电储能等装置一体控制、协调配合功率分配、共同参与微电网频率控制的方法。文献 [15] 分析了并联电解槽间不平衡电流的产生机制，提出了一种电解槽运行状态的分析方法。文献 [16] 采用 10 个小额定功率的碱液电解槽

来取代单个大额定功率的碱液电解槽，碱液电解槽的启停次数取决于风力涡轮机输出功率的波动情况。上述多种电堆协调优化方法都涉及对多台碱液电解槽的优化控制。但这些控制策略是集中式的，因此存在单点故障问题，系统的可靠性令人担忧。另一方面，这些多电堆协调优化方法主要侧重于能源管理，是从长期运行的角度使总发电量与需求相匹配这一角度进行设计的，没有考虑诸如冷启动过程等基础控制问题。

现有关于碱液电解槽参与电网调节的研究未考虑其温度变化。一方面原因在于碱液电解槽连接到大电网，且系统功率波动不大^[7-9]；另一方面，在低温情况下，杂质气体含量相对较高，在此过程中，碱液电解槽会停机，不参与系统调节^[17]。然而，近来离网制氢已成为一种趋势^[18]。为节省投资成本，碱液电解槽通常不安装加热装置。可再生能源输出的大幅波动会导致碱液电解槽出现明显的温度变化。此外，最近的研究已通过低频脉冲等手段实现了碱液电解槽的宽温度范围运行^[19]。在此背景下，有必要研究碱液电解槽在宽温度范围内参与系统调节的方法，以便最大限度地对源端的功率波动做出响应。

大量研究表明，碱液电解槽的伏安特性与其温度和压强相关。压强主要影响效率，对额定功率的影响可忽略不计。同时温度对效率和额定功率均存在影响^[20]。一台 250 KW 的电解槽从 25 ℃ 升温至 80 ℃ 大约需要 60 min。在此过程中，平均电流上升速率为 56.5 A/min^[21]。这种情况下仍然使用恒定的下垂控制策略将会导致功率分配不均，即重载或者轻载，甚至会导致碱液电解槽被烧毁。在可再生能源

表 1 现有的碱液电解槽控制方法比较

现有方法	多电解槽	分散式控制	支撑电网	宽温度范围	过电压保护
文献[12-14]	√	×	√	×	×
文献[21-23]	×	×	×	√	×
文献[7-9]	×	√	√	×	×
文献[6]	×	×	√	×	√
本文	√	√	√	√	√

波动情况下，传统研究主要聚焦于源端，即光伏、储能系统等。文献 [22] 提出了一种自适应下垂控制策略，其下垂系数根据实际光伏功率输出进行调整。文献 [23] 提出了一种分布式事件触发控制策略，通过调节虚拟电阻来实现储能系统（ESS）各

单元间的荷电状态 (SoC) 的平衡。然而, 大多数论文仅侧重于调整下垂系数以改善源端的动态性能, 针对碱液电解槽为应对自身额定功率变化而进行自适应下垂调节机制的研究还是一片空白。

笔者的主要贡献在于针对碱液电解槽提出了一种温度驱动的下垂控制策略, 每个碱液电解槽单元采用分散式控制策略, 控制系统收集不同温度下的电解电压和电流, 并将其与相应的温度相结合, 以拟合碱液电解槽的模型。随后, 通过将碱液电解槽的实时温度与该拟合模型相结合, 便可得到该温度下的下垂系数。针对 2 个时段之间的不匹配问题, 设计了一个过电压保护装置。最后, 对所提出的控制策略下的长期温度发展趋势进行了热力学分析。

笔者论述结构如下: 在第 2 节中, 建立了碱液电解槽的电气模型; 在第 3 节中, 提出了温度驱动的下垂控制策略; 在第 4 节中, 对所提出的控制策略进行了热力学分析; 第 5 节展示了实验结果, 以验证所提控制策略的有效性; 第 6 节进行总结。

1 碱液电解槽的建模

图 1 描绘了一个典型的碱液电解槽的 U_{ele} - I_{ele} - T_{el} 三维特性图, 其中 U_{ele} 为碱液电解槽电压, I_{ele} 为电解槽电流, T_{el} 为电解槽温度。从图中可以看到, 随着温度升高, 电解槽的最大电流逐渐增大。在本节中, 为描述最大功率与温度之间的关系, 建立了一个温度耦合的电解槽模型。

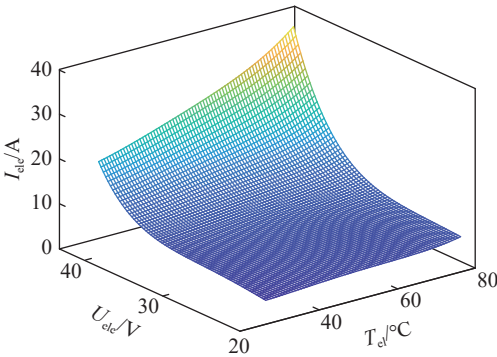


图 1 碱液电解槽的 U_{ele} - I_{ele} - T_{el} 三维特性

Fig. 1 U_{ele} - I_{ele} - T_{el} relationship of the alkaline water electrolyzer

在工业制氢领域, 双极性结构的碱液电解槽技术成熟且成本较低, 因而被广泛采用^[23-24]。图 2 展示了一种典型双极性结构的碱液电解槽的电堆内部结构。对于这种结构, 每 2 个相邻电极构成一个电解小室单元, 2 个端部电极与直流电源相连, 分别充当每个电解小室的阳极和阴极。对于其他电极而言, 其两侧分别充当相邻电解小室的阳极和阴极。隔膜可将电解小室内的氢气和氧气分隔开来, 以避

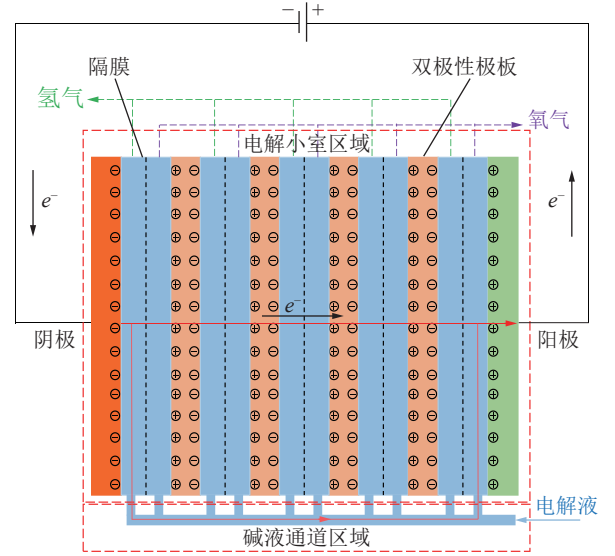


图 2 双极性碱液电解槽的内部结构

Fig. 2 The internal structure of the bipolar alkaline water electrolyzer

免气体混合。电解液从电解槽下方的电解液通道供应至各个电解小室内。电流会流经电解小室区域和通道区域。

基于上述分析, 建立等效电路模型如图 3 所示。需要注意的是, 该模型中同一块极板既能做阳极又能做仅适用于双极性结构的碱液电解槽, 而对于单极性结构, 由于其中任意极板只能做阳极或者阴极, 因此, 该模型不适用。在此模型中, 双电层电容 C_{dio} 与双电层效应相关联。电解反应中的热力学现象通过一个理想二极管 D_{dic} 来建模, 该二极管的阈值电压等于可逆电压 U_{rev} 。 R_{cell} 是极化电压的等效电阻, 极化电压包括欧姆过电位和活化过电位。 R_{ch} 代表通道电阻, D_{dio} 与电解反应的启动相关, 其端电压 U_{Ddio} 如下:

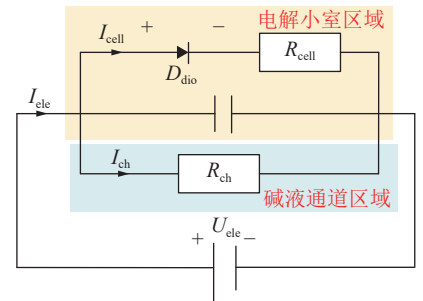


图 3 碱液电解槽等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit of the alkaline water electrolyzer

$$U_{Ddio} = \begin{cases} U_{ele} & U_{ele} < U_{rev} \\ U_{rev} & U_{ele} \geq U_{rev} \end{cases} \quad (1)$$

当电解槽端电压 U_{ele} 降至可逆电压 U_{rev} 以下时, 电解反应无法启动, 没有电流流经电池, 碱液电解槽将会停止运行。因此, 以下分析是基于电解

槽端电压大于可逆电压的假设进行的。可以表示为

$$U_{\text{rev}} = \frac{N\Delta G}{2F} \quad (2)$$

式中: N 为电解池的数量; ΔG 为吉布斯自由能; F 为法拉第常数, $96\,485\text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$ [25]。对于工业碱液电解槽而言, 其允许的运行温度范围是 $30 \sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$, 在此温度范围内, ΔG 的波动范围极小, 因此可将其视为常数 ($233.49\text{ KJ} \cdot \text{mol}^{-1}$)。

在稳态下, 电解槽电流 I_{ele} 可以表示为

$$I_{\text{ele}} = I_{\text{cell}} + I_{\text{ch}} = \frac{U_{\text{ele}} - U_{\text{rev}}}{R_{\text{cell}}} + \frac{U_{\text{ele}}}{R_{\text{ch}}} \quad (3)$$

式中: I_{cell} 为 ; I_{ch} 为 ; U_{ele} 和 U_{rev} 很容易获取, I_{ele} 主要受 R_{cell} 和 R_{ch} 的影响。在工业碱液电解槽中, R_{cell} 和 R_{ch} 主要由通道结构、电解液电阻、隔膜和极板电阻构成, 它们的具体参数由制造商掌握, 一般用户无法获取。然而, R_{cell} 和 R_{ch} 都在很大程度上取决于温度, 并且与温度呈线性关系, 即:

$$\begin{cases} R_{\text{cell}}(T_{\text{el}}) = a_1 + a_2 T_{\text{el}} \\ R_{\text{ch}}(T_{\text{el}}) = a_3 + a_4 T_{\text{el}} \end{cases} \quad (4)$$

式中: α_i 为半经验系数 (这里 i 取值为 1, 2, 3, 4), T_{el} 为碱液电解槽的温度。

结合式 (1) - 式 (4), 可求得 I_{ele} 为

$$I_{\text{ele}} = \begin{cases} \frac{U_{\text{ele}}}{a_3 + a_4 T_{\text{el}}} & U_{\text{ele}} < U_{\text{rev}} \\ \frac{U_{\text{ele}} - U_{\text{rev}}}{a_3 + a_4 T_{\text{el}}} + \frac{U_{\text{ele}}}{a_3 + a_4 T_{\text{el}}} & U_{\text{ele}} \geq U_{\text{rev}} \end{cases} \quad (5)$$

制氢系统通过预先大量采集三维数据点 (U_{ele} , I_{ele} , T_{el}), 并将这些点代入式 (5), 可以拟合得到 α_i 。

相应地, 最大电流 $I_{\text{max},T}$ 表示为

$$I_{\text{max},T} = \frac{U_N - U_{\text{rev}}}{a_1 + a_2 T_{\text{el}}} + \frac{U_N}{a_3 + a_4 T_{\text{el}}} \quad (6)$$

式中: U_N 为电解槽的额定电压。

由式 (6), 可以绘制出一个典型碱液电解槽的最大电流 $I_{\text{max},T}$ 与温度 T_{el} 之间关系的曲线, 如图 4 所示。

2 温度驱动的下垂控制策略

在本节中, 首先介绍碱液电解槽的传统下垂控制策略, 并概述恒定下垂系数存在的不足。然后, 将详细阐述所提出的温度驱动下垂控制策略, 以解决这些问题。

2.1 碱液电解槽的传统下垂控制策略

图 5 展示了一个传统的碱液电解制氢系统[26]。传统的碱液电解制氢系统结构由 Buck 电路和控制系统组成。Buck 电路用于转换电压等级, 其输入侧

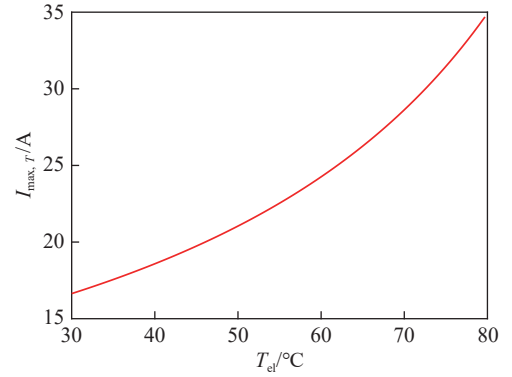


图 4 碱液电解槽最大电流与温度对应关系

Fig. 4 Relationship between electrolyzer maximum current and temperature

电容为 C_{in} , 输出侧连接一个 LC 滤波器, 该滤波器的电感为 L_f , 电容为 C_f , D_1 为二极管, S_1 为开关管, d 为占空比。电解槽的输入电压和电流分别为 U_{ele} 和 I_{ele} 。碱液电解制氢系统与直流母线之间的线路电阻为 R_{line} 。 V_{DC} 为直流母线电压。在控制系统中, P_{ref} 和 U_{ele}^* 分别为参考功率和参考电压, P_{ref} 是通过下垂曲线与 V_{DC} 共同计算得出的。

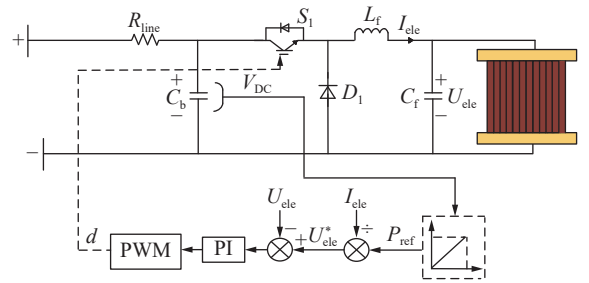


图 5 传统的碱液电解制氢系统

Fig. 5 Traditional hydrogen production system by alkaline water electrolysis

如图 5 所示, 传统的下垂控制策略是将碱液电解槽视为具有恒定等效电阻值的静态负载, 这使得参考功率与直流母线电压之间呈现出恒定的关系。然而, 根据上一节的分析, 在实际情况中, 碱液电解槽的性能会随温度发生显著变化。如果采用图 5 所示的控制策略, 电解槽的端电压可能会超出其限值。例如, 利用第 2 节中提到的电解槽相关数据, 图 6 展示了在此控制策略下 U_{ele} 、 V_{DC} 与 T_{el} 之间的关系, 如果最大功率参考值取的是 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的最大功率, 且直流母线的电压范围在 $100 \sim 150\text{ V}$ 之间, 超出额定电压的区域用红色标示, 从该图中我们可以看到, 在某些区域存在过电压情况, 最大电压达到了 $1.5U_N$ 。由于电解槽允许的超限范围是 $1.1U_N$, 所以图中的超限电压是极其危险的。

另一方面, 为了提高系统的可靠性, 碱液电解

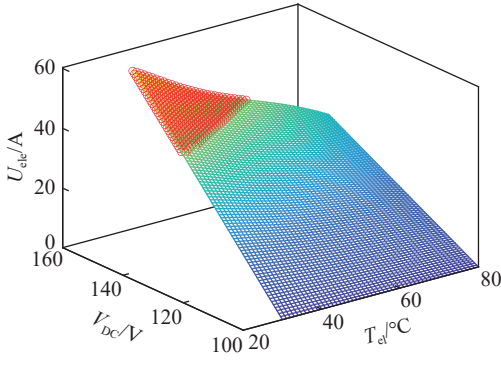


图 6 传统下垂控制策略下碱液电解槽的 U_{ele} - V_{DC} - T_{el} 三维特性

Fig. 6 U_{ele} - V_{DC} - T_{el} relationship of the alkaline water

槽的功率应与其额定功率成正比^[27]。因此,静态下垂增益的调整方式如下:

$$K_{droop1}/S_1 = K_{droop2}/S_2 = K_{droopi}/S_i \quad (7)$$

式中: K_{droop1} 和 S_i 分别为第 i 个 ($i=1,2,\dots,n$) 碱液电解槽的下垂系数和额定功率。从上一节内容可知,碱液电解槽的性能会随温度变化而改变。如果碱液电解槽的控制系统的下垂系数保持恒定,那么各个电解槽模块间的功率分配将会不准确。

1.2 所提的温度驱动下垂控制策略

所提控制策略中,碱液电解槽系统结构如图 7 所示。 $I_{ref,T}$ 为电解槽温度为 T_{el} 时的参考电流, $\Delta I_{ref,T}$ 为电压保护单元的输出, $I_{ref,T}^*$ 为经电解槽电压保护环节后被送至电流环路的实际电流参考值。

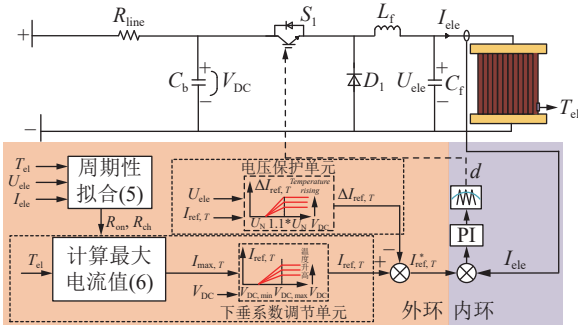


图 7 所提温度驱动的下垂控制策略原理

Fig. 7 The control block of the proposed temperature-driven droop control strategy

笔者所提出的温度驱动控制策略由 2 个环路组成,即内环和外环。内环主要用于实现精确的输出电流跟踪,外环为内环提供电流参考值 $I_{ref,T}^*$,外环包含 2 个单元,即下垂系数调节单元和电压保护单元。

下垂系数调节单元的原理如下:

当直流母线电压 V_{DC} 大于上限值 V_{DC}^{max} 时,电流参考值维持在最大电流 I_{max}^T 。当 V_{DC} 小 $K_{droop,T} =$

$\frac{I_{max,T}}{V_{DC}^{max} - V_{DC}^{min}}$ 于上限值 V_{DC}^{max} 但大于下限值 V_{DC}^{min} 时,电流参考值是直流母线电压的线性函数。如果 V_{DC} 小于 V_{DC}^{min} ,则电解槽将会关闭,所以此时电流参考值被设为零。总的来说,具体的控制规律可表示为:

$$I_{ref,T} = \begin{cases} 0 & V_{DC} \leq V_{DC}^{min} \\ K_{droop,T}(V_{DC} - V_{DC}^{min}) & V_{DC}^{min} < V_{DC} < V_{DC}^{max} \\ I_{max,T} & V_{DC} \geq V_{DC}^{max} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $K_{droop,T}$ 为下垂系数,其计算公式可表示为

$$K_{droop,T} = \frac{I_{max,T}}{V_{DC}^{max} - V_{DC}^{min}} \quad (9)$$

通过第 2 节中所分析, $I_{max,T}$ 是依据式 (6) 进行计算的。利用第 1 节的数据,并结合式 (9),我们能够得到随温度变化的下垂系数曲线,如图 8 所示。整体控制效果展示如图 9 所示, U_{ele} - V_{DC} - T_{el} 之间的关系如图 10 所示,电解槽的电压从未超出额定电压。

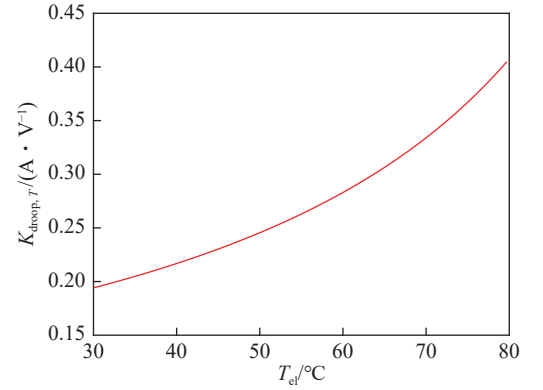


图 8 温度对 $K_{droop,T}$ 的影响

Fig. 8 Effect of temperature on $K_{droop,T}$

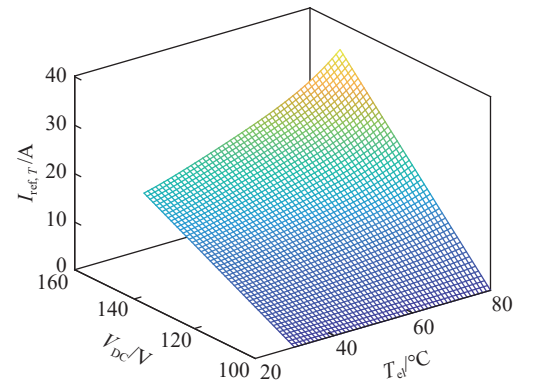


图 9 不同温度下电流参考值曲线

Fig. 9 Current reference curves at different temperature

在工业碱液电解制氢系统中,其正常运行寿命在 10~20 a。在此期间,电解液、极板以及隔膜会发生氧化,这会导致计算模型出现不匹配的情况。因此,控制系统需要定期收集数据,并对电解槽模型的相关参数进行拟合。该周期会根据电解槽的负载情况及工作时间来设定,通常为 1~2 a。

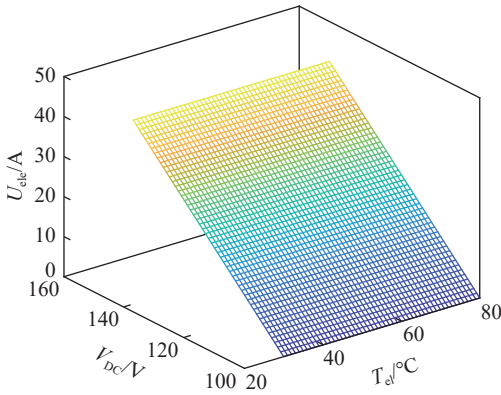


图 10 所提控制策略下碱液电解槽的 U_{ele} - V_{DC} - T_{el} 三维曲面
Fig. 10 U_{ele} - V_{DC} - T_{el} relationship of the alkaline water electrolyzer under the proposed control strategy

下垂系数与温度之间的关系为随温度升高，碱液电解槽最大电流增大，导致下垂系数增大。联在同一条直流母线上各碱液电解槽的 V_{DC}^{max} 和 V_{DC}^{min} 相同，对于最大电流更大的碱液电解槽而言，为了实现相同母线电压下更大的功率分配，需要更大的下垂系数，式 (9) 中 $K_{droop,T}$ 的计算公式正好能实现该目的。

为防止因模型更新不及时而导致过电压问题，笔者提出了一种电压保护单元。通过减去一个电流偏差 $\Delta I_{ref,T}$ ，可将电解槽的电流参考值拉回到该温度下的最大电流范围之内：

$$I_{ref,T}^* = I_{ref,T} - \Delta I_{ref,T} \quad (10)$$

碱液电解槽允许超出限值的最大电压为额定电压 U_N 的 10%。因此， $\Delta I_{ref,T}$ 可以表示为

$$\Delta I_{ref,T} = \begin{cases} 0 & U_{ele} \leq U_N \\ K_{droop,T} (V_{DC} - V_{DC}^{min}) & U_N < U_{ele} < 1.1 \times U_N \\ I_{max}^T & U_{ele} \geq 1.1 \times U_N \end{cases} \quad (11)$$

值得一提的是，笔者重点关注大型制氢基地中不同碱液电解槽之间的协同控制。当拓展应用至大型制氢基地时，为实现各电解槽之间协同控制的目标，要求每个碱液电解槽的控制系统设定相同的直流电压上下限。

2 热力学分析

具体的热力学平衡结构形式如图 11 所示。在没有外部加热装置的情况下，一般的热平衡方程可表示为^[28-29]

$$\sum_k m_k C_{pk} \cdot \frac{dT_k}{dt} = \dot{Q}_{gen} - \dot{Q}_{exc} - \dot{Q}_{gas} - \dot{Q}_{cool} \quad (12)$$

式中： m_k 表示组分 k 的质量； C_{pk} 为组分 k 的比热容； $\dot{Q}_{gen}$ 为产热速率； $\dot{Q}_{exc}$ 是碱液电解槽与周围环境之间的热交换速率； $\dot{Q}_{gas}$ 是气体带走的热量；

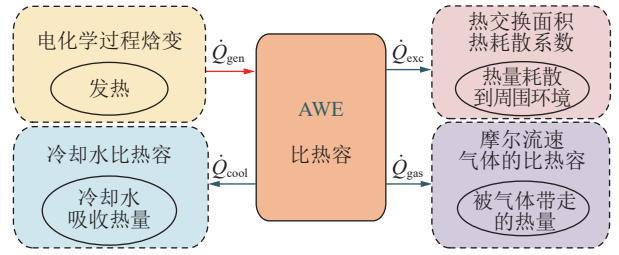


图 11 热力学平衡结构

Fig. 11 Thermal balance structure form

$\dot{Q}_{cool}$ 为冷却器带走的热量； T_k 为组分 k 的温度。

为简化计算，设定了以下 3 个假设：

(1) 由于碱液电解槽的模块化趋势愈发明显，内部各组成单元之间的温差越来越小，因此在分析过程中，将气液分离器和热交换器视为一个整体，并且忽略温度梯度。

(2) 为了降低投资成本，工业碱液电解槽呈现有不安装加热装置的趋势^[30]。本次热力学分析旨在研究无加热装置情况下的温度变化情况。

(3) 工业碱液电解槽在低压区域效率太低，会自动关闭^[31]。在本次分析中，假定所有的工业碱液电解槽都参与电解反应，即 $U_{ele} > U_{rev}$ 。

$\dot{Q}_{gen}$ 为电解槽在单位时间内电化学反应所产生的热量，其表达式为

$$\dot{Q}_{gen} = I_{ele} * (U_{ele} - U_{rev}) \quad (13)$$

式中： $\dot{Q}_{exc}$ 为单位时间内散失到周围环境中的热量，其表达式为

$$\dot{Q}_{exc} = \sum_v k_v S_v (T_{el} - T_a) \quad (14)$$

式中： k_v 为组分 v 的散热系数； S_v 是组分 v 的导热面积； T_a 为环境温度。

$\dot{Q}_{cool}$ 为冷却水吸收的热量，如下所示：

$$\dot{Q}_{cool} = \dot{m}_{cool} C_{cool} (T_{el} - T_{cool}) \quad (15)$$

式中： $\dot{m}_{cool}$ 为电解液的质量流量； C_{cool} 为电解液的比热容； T_{cool} 为冷却水的温度。

$\dot{Q}_{gas}$ 是气体带走的热量，如下所示：

$$\dot{Q}_{gas} = \dot{m}_{H_2} C_{H_2} (T_{el} - T_a) + \dot{m}_{O_2} C_{O_2} (T_{el} - T_a) \quad (16)$$

式中： $\dot{m}_{H_2}$ 和 $\dot{m}_{O_2}$ 分别为氢气和氧气的摩尔质量流量； C_{H_2} 和 C_{O_2} 分别为氢气和氧气的比热容。

对于型号相同但初始温度不同的碱液电解槽，碱液电解槽的热力学方程是一个常微分方程；对于参数相同但初始温度不同的各碱液电解槽而言，由于方程系数相同，最终温度能够趋于一致；对于型号不同且初始温度不同的碱液电解槽，理论上，由于方程系数不同，参数上的差异可能会导致常微分方程解的最终值出现变化。

3 实验结果

3.1 实验平台与案例描述

为了全面评估所提控制策略的有效性，笔者设计了 Matlab 仿真与硬件实验。碱液电解槽的建模参考的是第 1 节的方法，具体如式 (1)-式 (6)。仿真实验相关数据如表 2-表 5 所示。笔者搭建的硬件实验平台如图 12 所示。该平台由 3 个商用电解槽、2 个 Buck 电路、1 个光伏模拟器以及 1 个数字信号处理器 DSPTM320F28335 组成。实验对象 AWE - I、AWE - II 和 AWE - III 在前文中已提及，它们由苏州竞立制氢设备有限公司生产。AWE - I 的额定电压为 40 V，如图 12c、图 13d 和图 13e 所示，AWE - II 和 AWE - III 的额定电压均为 96 V。它们的电气特性参数与表 1-表 5 中所示的参数相同。实测的 $I_{\max}^T - T_{el}$ 曲线与拟合曲线的对比情况如图 13 所示，可以看出拟合曲线是准确的。这些碱性水电解装置配备了赫斯曼（Hesemann）型温度传感器。整个系统架构如图 12f 所示。2 个碱性水电解装置分别通过一个 Buck 电路并联在直流母线上运行，由一个光伏模拟器为它们供电。相关规格参数展示见表 5 和表 6。

表 2 AWE- I 的 2 个电堆的特性参数

Table 2 Characteristic Parameters of AWE- I 's two stacks	
参数	数值
$a_1 - a_4$	5.856 5, -0.047 1, 4.013 9, -0.031 9
电堆本体的导热面积(S_{ele3}, m^2)	0.3
气液分离器的导热面积(S_{sep3}, m^2)	0.25
气液分离器的质量(m_{sep3}, kg)	20
碱液的质量(m_{lye3}, kg)	15
电解小室数量(N_{elB})	20

表 3 热力学常量

Table 3 Thermodynamic constants	
参数	数值
电堆散热系数($k_{el}, W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)	4.3
气液分离器的散热系数($k_{sp}, W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)	10
环境温度($T_a, ^\circ C$)	20
氢气的比热容($C_{H_2}, J \cdot K^{-1}$)	27.28
氧气的比热容($C_{O_2}, J \cdot K^{-1}$)	29.96
铁的比热容($C_{Fe}, J \cdot K^{-1}$)	460
碱液的比热容($C_{lye}, J \cdot K^{-1}$)	3 100

表 4 Awe- II 的特性参数

Table 4 Characteristic parameters of AWE- II	
参数	数值
$a_1 - a_4$	2.764, -0.007 1, 13.429, -0.114 3
电堆本体的导热面积(S_{ele1}, m^2)	0.6
气液分离器的导热面积(S_{sep1}, m^2)	0.5
气液分离器的质量(m_{sep1}, kg)	40
碱液的质量(m_{lye1}, kg)	30
电解小室数量(N_{el1})	48

表 5 AWE- III 的特性参数

Table 5 Characteristic Parameters of AWE- III	
参数	数值
$a_1 - a_4$	10.331 1, -0.086 6, 12.4, -0.08
电堆本体的导热面积(S_{ele2}, m^2)	0.7
气液分离器的导热面积(S_{sep2}, m^2)	0.6
气液分离器的质量(m_{sep2}, kg)	50
碱液的质量(m_{lye2}, kg)	48
电解小室数量(N_{el1})	48

表 6 Buck 电路参数

Table 6 Parameters of the Buck converters	
参数	数值/型号
开关管型号	MITSUBISHI, PM200DV1A120
开关频率(kHz)	10
滤波电感($L_{f-I}, L_{f-II}, L_{f-III}, mH$)	6, 3, 3
Buck电路的滤波电容($C_{f-I}, C_{f-II}, C_{f-III}, mF$)	10, 1, 1
Buck电路的输入电容($C_{b-I}, C_{b-II}, C_{b-III}, mF$)	1, 1, 1
直流母线电压上限($V_{DC,max}, V$)	100
直流母线电压下限($V_{DC,min}, V$)	150

如图 13a 所示，光伏模拟器是由瑞佳通（Rigatron）公司生产的 TopCon Quadro 系列可编程直流电源，它既可以在电压源模式下运行，也可以在功率源模式下运行。在电压源模式下，光伏模拟器能够自动调节输出功率以维持恒定的输出电压。该模式可模拟源侧功率充足的情况；在功率源模式下，它能够按照指令输出恒定功率，此模式可模拟源侧功率不足的情况。

为验证所提出控制策略的有效性，笔者设计了以下几种情况进行研究。

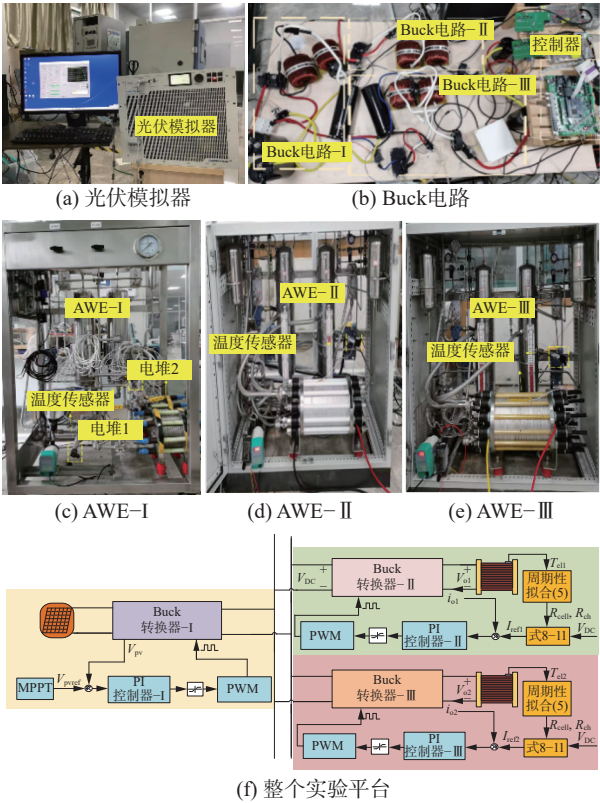


图 12 实验平台

Fig. 12 Experimental platform

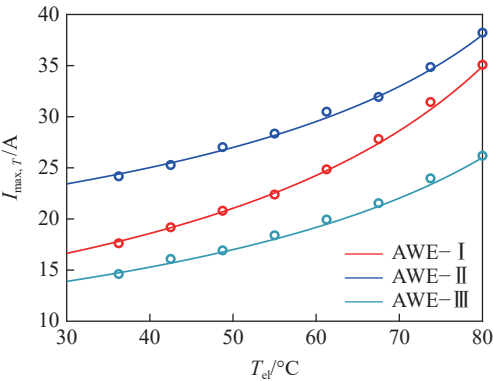


图 13 $I_{\max,T}-T_{el}$ 曲线 (o:实测值, ‘-’拟合曲线)

Fig. 13 $I_{\max,T}-T_{el}$ curves (o: Measured, ‘-’: fitted).

表 7 Buck 电路控制器参数

Table 7 Parameters of the controller of Buck converters	
参数	数值
Buck电路-I 的电流环(k_{p-I}, k_{i-I}, s^{-1})	0.3, 8
Buck电路-II 的电流环($k_{p-II}, k_{i-II}, s^{-1}$)	0.3, 8
Buck电路-III 的电流环($k_{p-III}, k_{i-III}, s^{-1}$)	0.6, 6

(1) 案例 1

分被进行 matlab 仿真和硬件对比实验,总共 3 个工况。工况 1 和工况 2 是 Matlab 仿真实验,采用的碱液电解槽模型数据展示在表 1-表 4 中,以验证所

提控制策略下槽间温度变化情况。工况 3 是硬件实验,光伏模拟器以功率源模式运行。AWE-II 和 AWE-III 同时在直流母线上运行。工况 3 是验证长时间尺度所提控制策略的温度

(2) 案例 2

本案例是硬件实验,光伏模拟器以功率源模式运行,分别采用所提温度驱动下垂控制策略和传统下垂控制策略进行操作。观察短时间尺度的电解槽动态特性。

(3) 案例 3

光伏模拟器以电压源模式运行,向 AWE-III 发出一个阶跃电流参考扰动指令。

3.2 实验现象

(1) 案例 1

1) 工况 1

这里做一个仿真对比实验,使用 2 个初始温度不同但完全相同的碱液电解槽装置。所采用的碱液电解槽模型为 AWE-I,它包含 2 个电堆以及 2 套气液分离系统。在下文中,AWE-I 的 2 个电堆分别用电堆 1 和电堆 2 来表示,这 2 个电堆的相关参数分别展示在表 1 和表 3 中。起初,电堆 1 和电堆 2 的初始温度分别为 30 $^{\circ}C$ 和 80 $^{\circ}C$ 。2 个碱液电解槽的总输入功率为 1 800 W。在 $t=100\,000\,s$ 时,功率下降至 900 W。电堆的温度变化曲线如图 14a 所示。从该图中我们可以看出,2 个碱液电解槽的温度和功率将会趋于均衡。

2) 工况 2

针对型号不同且初始温度不同的碱液电解槽,这里做一个仿真对比实验。计算时使用了 2 种不同型号的碱性电解槽的数据,以下称为 AWE-II 和 AWE-III。它们对应的参数列于表 3 至表 4 中。初始温度和输入功率与工况 1 相同。这些碱液电解槽的温度变化曲线如图 14b 所示,可以看出,温度并不会趋于均衡。

3) 工况 3

图 15 展示了 AWE-I 的 2 个电堆之间以及 AWE-II 和 AWE-III 之间的长时间尺度的温度和功率分布评估情况。对于 AWE-I 而言,2 个电解堆的温度和功率分布最终能够趋于一致。然而,对于 AWE-II 和 AWE-III 来说,它们最终的温度和功率分布是不同的。这里需要注意的是,由于工作环境条件的变化,环境条件与工况 2 的环境条件参数不完全一致,造成图 14b 与图 15 的差异。

(2) 案例 2

图 16 展示了当 AWE-II 处于 67 $^{\circ}C$ 且 AWE-III 处于 45 $^{\circ}C$ 时,供电功率突然增加期间的动态响

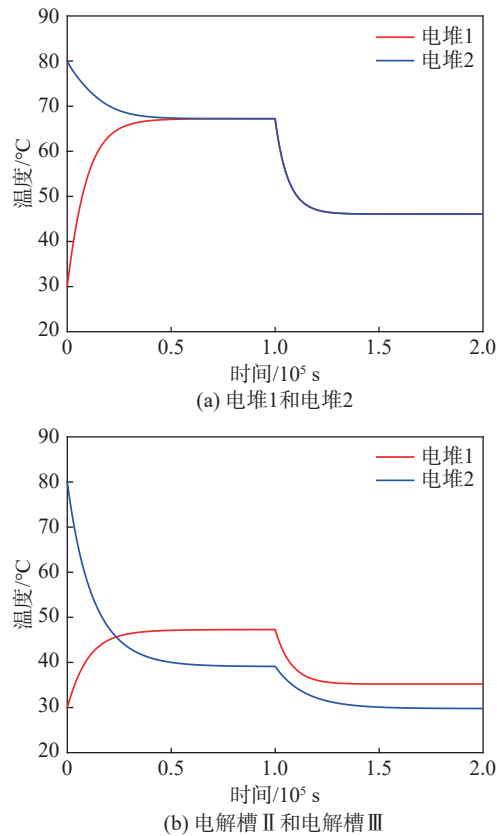


图 14 温度发展趋势的比较图

Fig. 14 Comparison of the temperature development trends between (a)stack1 and stack2. (b)AWE- II and AWE- III.

应情况。光伏模拟器光照强度的增加使得供电功率从 2.8 KW 提升至 3.3 KW。为清晰展示所提出的控制策略在功率分配方面的有效性,在该案例中关闭了电压保护单元。在传统下垂控制策略下,将处于 80 °C 时 AWE- II 的最大功率 3.5 KW 以及 AWE- III 的最大功率 2.5 KW,分别作为 Buck 电路- II 和 Buck 电路- III 的最大功率参考值。从图 16a 可以看出,在整个过程中, AWE- II 和 AWE- III 的功率比始终保持在 7 : 5。然而,当供电功率增加时, AWE- III 的电压从 92 V 升高到 96 V,超出额定电压限值 4 V,而 AWE- II 的电压从 84 V 升高到 86 V。此时, AWE- II 的调节能力尚未被充分利用。

在所提出的温度驱动下垂控制策略下,如图 16b 所示, AWE- II 的电流大于其在传统下垂控制策略下的电流。在整个过程中, AWE- II 和 AWE- III 的电压均低于 92 V。

(3) 案例 3

为验证电压保护单元的有效性,针对 AWE- III 开展了阶跃电流参考值扰动测试,对比结果如图 17 所示。起初,电解电流为 16 A,电压为 88 V。在出现 7 A 的参考电流扰动后,从图 17a 中可以观察到,在没有保护单元的情况下,电压会从 88 V 飙

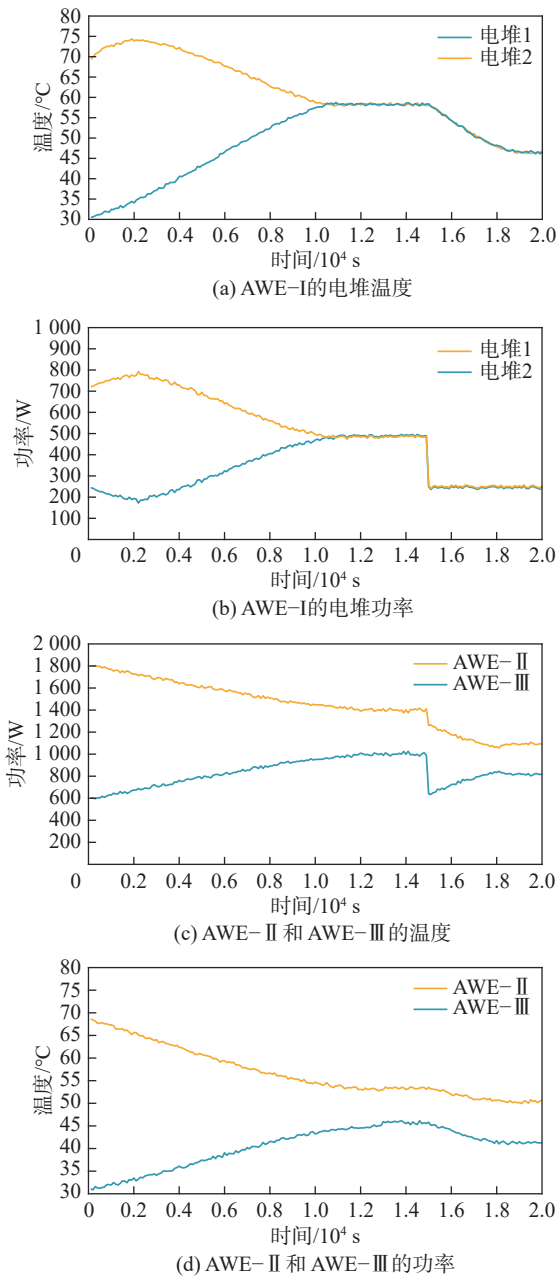


图 15 长时间尺度下的温度和功率发展趋势

Fig. 15 Long-term evolution of temperature and power

升至 94.5 V。然而,在启用保护单元的模式下,从图 17b 可知,电解电流值被限制在 19 A,并且电解电压也降至 92.7 V,这极大地降低了过电压风险。

4 结 论

笔者针对多个并联碱液电解槽的系统提出了一种温度驱动的下垂控制策略。该控制系统会根据拟合的电解槽模型以及电解槽的温度实时更新下垂系数。针对因下垂系数计算错误而导致的电压超限问题,笔者引入了一个电压保护单元。此外,还对所提出的控制策略应用于电解槽进行了热力学分析。通过我们实验室搭建的仿真平台和含多个并联碱液

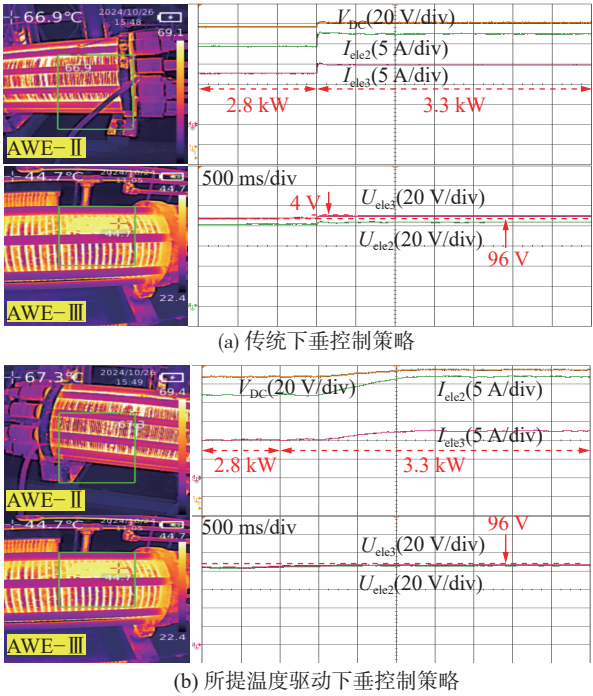


图 16 功率源模式短时间尺度 AWE- II 和 AWE- III 的动态波形

Fig. 16 Short-term Dynamics response of AWE- II and AWE- III in the power source

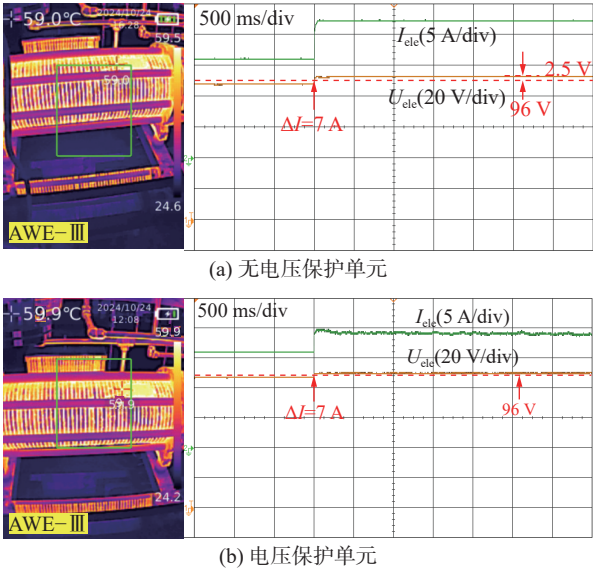


图 17 参考电流阶跃上升情况下的电解电压和电流动态波形

Fig. 17 Dynamics response of electrolysis voltage and current during sudden current reference increase.

电解槽的硬件电解制氢系统，验证了所提方法的有效性。实验结果表明：

- 1) 在硬件实验平台下，传统恒定下垂系数的控制策略会有电压越限达 4 V 的情况，而在所提出的控制策略下没有发生电压越限。
- 2) 在硬件实验平台下，没有电压保护单元的作用电流阶跃扰动会使电压越限达 2.5 V，而在有电压

保护单元的作用下，可以将电压稳定在额定电压。

3) 在仿真平台下，相同型号和容量的碱液电解槽在 30 000 s 内温度能趋于一致。对于不同型号和容量的碱液电解槽，温度最终是发散的。在硬件实验平台下，相同型号和容量的碱液电解槽在 10 200 s 内温度能趋于一致。

由于电解槽的额定功率与温度相关，下垂系数能够随容量自动调整，碱液电解槽功率的合理分配，避免了不同碱液电解槽的过载或者轻载。且实现了分散控制。该策略的局限性在于一方面，不精确的建模会造成下垂系数的错误设置，进而影响槽的功率精确分配。需要对碱液电解槽的相关参数定期拟合，以获得精确模型。下垂系数的自动调整仅仅实现了碱液电解槽功率的一次调整，即按照槽的容量分配功率，并对源侧功率变化做出响应。但是在所提的变下垂系数控制策略下，不同型号的碱液电解槽的温度可能会发散，造成槽之间的功率分配拉大，白白降低了制氢效率，为了实现电解制氢系统的温度收敛，有必要对电解槽进行 3 次控制，即制氢系统的中央处理设备下发指令进行干预。

参考文献 (References) :

[1] 卓振宇, 张宁, 谢小荣, 等. 高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战 [J]. 电力系统自动化, 2021, 45(9): 171-191.
ZHUO Zhenyu, ZHANG Yu, XIE Xiaorong, et al. Key Technologies and Developing Challenges of Power System with High Proportion of Renewable Energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(9): 171-191.

[2] 潘光胜, 顾钟凡, 罗恩博, 等. 新型电力系统背景下的电制氢技术分析与展望 [J]. 电力系统自动化, 2023, 47(10): 1-13.
PAN Guangsheng, GU Zhongfan;LUO Enbo, et al. Analysis and Prospect of Electrolytic Hydrogen Technology Under Background of New Power Systems.[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(10): 1-13.

[3] 俞红梅, 邵志刚, 侯明, 等. 电解水制氢技术研究进展与发展建议 [J]. 中国工程科学, 2021, 23(2): 146-152.
Yu Hongmei, Yu Hongmei, Yu Hongmei, et al. Hydrogen Production by Water Electrolysis: Progress and Suggestions[J]. Chinese Journal of Engineering, 2021, 23(2): 146-152.

[4] 汪家铭. 山西孝义建设鹏湾氢港氢能产业园 [J]. 四川化工, 2020, 23(4): 39.
WANG Jiaming, Pengwan Hydrogen Port Hydrogen Energy Industrial Park is being constructed in Xiaoyi, Shanxi[J]. , 2020, 23(4): 39.

[5] 范新桥, 张宽, 赵波, 等. 面向 PEM 电解制氢的虚拟同步控制技术研究 [J]. 储能科学与技术, 2024, 13(11): 3949-3960.
FAN Xinqiao , ZHANG Kuan , ZHAO Bo , LIU Min , WU Qiliang, Research on virtual synchronous control technology for PEM electrolysis hydrogen production[J]. 2024, 13(11): 3949-3960.

- [6] HE Hanghang, XIA Yanghong, et al. Adaptive Power Coordination Control for Electrolysis Hydrogen Directly Driven by Wind Turbines[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2025, 40(1): 2315-2326.
- [7] MEHDI Ghazavi Dozein, AHVAND Jalali, et al. Fast Frequency Response From Utility-Scale Hydrogen Electrolyzers[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021, 12(3): 1707-1717.
- [8] MEHDI Ghazavi Dozein; ANTONELLA Maria De Corato, et al. Virtual Inertia Response and Frequency Control Ancillary Services From Hydrogen Electrolyzers[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 38(3): 2447-2459.
- [9] SAMAN Dadjo Tavakoli; MEHDI Ghazavi Dozein, et al. Grid-Forming Services From Hydrogen Electrolyzers[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 14, no. 4, pp. 2205-2219.
- [10] Alexander B, Hartmut S. Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids: A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews., 2018, 82(3): 2240-2454.
- [11] 贺明智, 陈茂林, 孟鑫. 基于规划算法的并联制氢装置效率优化控制方法 [J]. 可再生能源, 2023, 41(10): 1401-1407.
He Mingzhi; Chen Maolin, Meng Xin. Efficiency optimization control method of parallel hydrogen production unit based on programming algorithm[J]. Renewable Energy Resources, 2023, 41(10): 1401-1407.
- [12] 苏星宇. 新能源电解水制氢电源并联控制策略研究 [D]. 北方工业大学, 2024.000589.
- [13] 贺明智, 陈茂林, 孟鑫. 基于规划算法的并联制氢装置效率优化控制方法 [J]. 可再生能源, 2023, 41(10): 1401-1407.
HE Mingzhi, CHEN Maolin, MENG Xin, Renewable Energy Resources, Efficiency Optimization Control Method for Parallel Hydrogen Production Devices Based on Planning Algorithms[J]. 2023, 41(10): 1401-1407.
- [14] G. -H. Lee, J. -Y. Park, J. Ban, Y. -J. Kim and J. P. S. Catalão, Data-Driven Modeling and Optimal Control of Hydrogen Energy Storage for Frequency Regulation[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2023, 38(2): 1231-1245.
- [15] 张全朝. 并联型电解槽电流不平衡性分析 [J]. 科技风, 2012, (09): 110-111.
ZHANG Quanchao, Analysis on the Current Imbalance of Parallel Electrolyzers[J]. 2012, (09): 110-111.
- [16] BUTTLER Alexander, SPLIETHOFF Hartmut, Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids: A review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 82(3): 2440-2454.
- [17] Hirokazu Kojima, Kensaku Nagasawa, Naoto Todoroki, et al Influence of renewable energy power fluctuations on water electrolysis for green hydrogen production[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(12): 4572-4593.
- [18] S. V. Mathews, S. Rajakaruna and C. V. Nayar, Design and implementation of an off grid hybrid power supply with reduced battery energy storage[J]. 2013 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), Hobart, TAS, Australia, 2013: 1-6.
- [19] Xia Y, Yu M, Yang P, et al. Generation-storage coordination for islanded DC microgrids dominated by PV generators[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2019, 34(1): 130-138.
- [20] A. M. De Corato, M. Ghazavi Dozein, S. Riaz and P. Mancarella, Hydrogen Electrolyzer Load Modelling for Steady-State Power System Studies[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2023, 38(6): 4312-4323.
- [21] Li Z, Chan K W, Hu J, et al. Adaptive Droop Control Using Adaptive Virtual Impedance for Microgrids With Variable PV Outputs and Load Demands[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 68(10): 9630-9640.
- [22] LU Jinghang; LIU Xiaojie, et al. A distributed control strategy for state-of-charge balance of energy storage without continuous communication in AC microgrids[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2022, 14(1): 206-216.
- [23] 赵梦杰. 双极解耦电解水制备高纯氢的材料与装置研究 [D]. 合肥工业大学, 2023.000169.
- [24] Xiong J, Xia Y, Peng Y and Wei W, A Multimode Self-Optimization Electrolysis Converting Strategy for Improving Efficiency of Alkaline Water Electrolyzers[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 39(3): 3738-3748.
- [25] Alfredo Ursúa, Sanchis P. Static-dynamic modelling of the electrical behaviour of a commercial advanced alkaline water electrolyser[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37(24): 18598-18614.
- [26] MANUEL Agredano-Torres, MENG FAN Zhang, et al. Decentralized Dynamic Power Sharing Control for Frequency Regulation Using Hybrid Hydrogen Electrolyzer Systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2024, 15(3): 1847-1858.
- [27] Liu H, Yang Y, Wang X, et al. An Enhanced Dual Droop Control Scheme for Resilient Active Power Sharing Among Paralleled Two-Stage Converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(8): 6091-6104.
- [28] 夏杨红, 韦巍, 程浩然, 等. 大规模可再生能源直接电解碱液制氢关键科学问题 [J]. 太阳能学报, 2024, 45(7): 224-231.
XIA Yanghong, HU Zhiyuan, et al. Wide Range Operation Control Strategy For Electrolysis Hydrogen Production Based On Renewable Energy[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2024, 45(8): 34-43.
- [29] 胡可崴, 李浩, 王创, 等. 电解水制氢的多物理场建模与监控技术综述 [J]. 电力自动化设备, 2023, 43(12): 3-13.
HU K, Li H, et al. Review on multiphysics modeling and regulation of power-to-hydrogen electrolyzer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(12): 3-13.
- [30] 许祎明, 涂宏, 周军. 可再生能源驱动的碱性水电解制氢技术研究与优化 [J]. 电力勘测设计, 2024(10): 1-5+51.
XU Yiming, TU Hong, ZHOU Jun. Research and Optimization of Alkaline Water Electrolysis for Hydrogen Production Driven by Renewable Energy[J]. Electric Power Survey, 2024(10): 1-5+51.
- [31] 夏杨红, 胡致远, 韦巍, 等. 可再生能源电解制氢宽范围运行控制策略 [J]. 太阳能学报, 2024, 45(08): 34-43.
XIA Y, HU Z, et al. Wide Range Operation Control Strategy For Electrolysis Hydrogen Production Based On Renewable Energy[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2024, 45(08): 34-43.