

## 考虑储能荷电状态的可再生能源制氢优化控制

王智良, 郭亮亮, 李新宇, 刘鑫蕊  
(东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘要:** 针对可再生能源、电解槽和储能设备集成的孤岛直流微电网制氢系统, 提出了1种考虑储能荷电状态(state of charge, SoC)的优化控制策略. 首先, 对碱性电解槽的制氢效率特性进行分析, 提出了1种制氢效率随母线电压变化而自适应调整的优化控制方法, 通过与储能系统协调互补, 将制氢效率保持在较高的范围内. 当储能SoC越过上下限时, 设计了1种不依赖通信的SoC主动恢复控制策略, 确保储能系统的安全运行. 其次, 设计了1种考虑极端工况下的功率协调控制策略, 通过各个运行模式之间的灵活切换来保证直流微电网的稳定运行. 最后, 通过MATLAB/Simulink仿真平台对所提控制策略的有效性进行了验证.

**关键词:** 可再生能源; 直流微电网; 储能; 荷电状态(SoC); 制氢效率

中图分类号: TK 91 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2025)07-0030-08

## Optimal Control of Hydrogen Production by Renewable Energy Source Considering State of Charge of Energy Storage

WANG Zhi-liang, GUO Liang-liang, LI Xin-yu, LIU Xin-rui

(School of Information Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China.  
Corresponding author: LIU Xin-rui, E-mail: liuxinrui@ise.neu.edu.cn)

**Abstract:** An optimal control strategy considering the state of charge (SoC) of energy storage is proposed for an isolated DC microgrid for hydrogen production system composed of renewable energy, electrolytic cell, and energy storage equipment. Firstly, the characteristics of hydrogen production efficiency of alkaline electrolyzers are analyzed, and an optimal control method for adaptive adjustment of hydrogen production efficiency with bus voltage change is proposed. By coordinating with the energy storage system, the hydrogen production efficiency is kept within a high range. When the SoC of energy storage violates the upper and lower limits, a communication-independent SoC active recovery control strategy is designed to ensure the safe operation of the energy storage system. Secondly, a power coordinated control strategy considering extreme conditions is designed to ensure the stable operation of the DC microgrid through flexible switching between various operating modes. Finally, the effectiveness of the proposed control strategy is verified by MATLAB/Simulink simulation platform.

**Key words:** renewable energy source; DC microgrid; energy storage; state of charge (SoC); hydrogen production efficiency

为保护生态环境, 实现可持续发展, 世界各国都在致力于推进能源转型, 可再生能源(renewable energy source, RES)发电技术得到快速发展<sup>[1]</sup>. 然而以光伏(photovoltaic, PV)和风力

发电(wind turbine generation, WTG)为代表的可再生能源发电具有间歇性和不确定性, 这给可再生能源发电并入大电网带来挑战<sup>[2]</sup>. 氢能具有清洁、可存储、能量密集以及用途广泛等优点, 逐渐

收稿日期: 2024-10-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62173074, 52477075).

作者简介: 王智良(1974—), 男, 辽宁沈阳人, 东北大学副教授, 硕士生导师; 刘鑫蕊(1981—), 女, 辽宁沈阳人, 东北大学教授, 博士生导师.

成为能源枢纽,氢能技术被视为智能电网和可再生能源发电大规模发展的重要支撑<sup>[3]</sup>。

对于大规模工业制氢,碱性电解槽具有技术成熟、生产成本低、单槽制氢量大等优势,被广泛应用于大规模可再生能源制氢系统<sup>[4]</sup>。目前,针对可再生能源制氢的直流微电网能量协调控制方面,一些学者进行了探索和研究。文献[5]建立了WTG、制氢装置和燃料电池之间的系统模型,以实现能量的相互转化,但并没有考虑不同单元之间的协调控制策略。文献[6]提出了1种考虑制氢效率优化的直流微网功率协调控制策略,根据母线电压的变化范围来划分工作模式,但没有将储能系统的安全纳入考虑范围。针对光-储-氢直流微电网,文献[7]提出了1种基于模式触发的功率协调控制策略,以提高新能源的就地消纳能力,但是没有充分考虑制氢效率的优化。文献[8]建立了1种考虑风电制氢效率的风氢系统优化调度模型,并采用人工蜂群算法求解最优制氢功率。然而,这类考虑制氢效率的研究适用于稳态优化调度的场景,而不适用于动态功率平衡的控制场景。

因此,本文提出了1种考虑储能SoC的可再生

能源制氢优化控制策略。首先对碱性电解槽的制氢效率进行建模分析,建立制氢效率和直流母线电压之间的下垂特性关系,根据直流母线电压允许的波动范围来确定制氢效率优化区间,以实现制氢效率自适应控制。对于储能单元,当SoC越限后,将通过调节电压增益进行SoC恢复控制,以确保储能系统的安全运行。最后根据母线电压和储能SoC的状态设计了1种考虑极端工况的微电网功率协调控制策略,并对所提控制策略进行仿真验证。

## 1 电解槽制氢效率特性建模

图1为典型的可再生能源制氢拓扑结构图,主要包括PV、WTG、储能系统(energy storage system, ESS)、碱性电解槽和直流负载,它们分别连接到同一电压等级的直流母线上。其中,为保证可再生能源的最大化利用,PV和WTG均运行在最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)模式下。ESS和电解槽作为协调控制单元,在维持微电网功率平衡的同时,促进可再生能源的就地消纳。

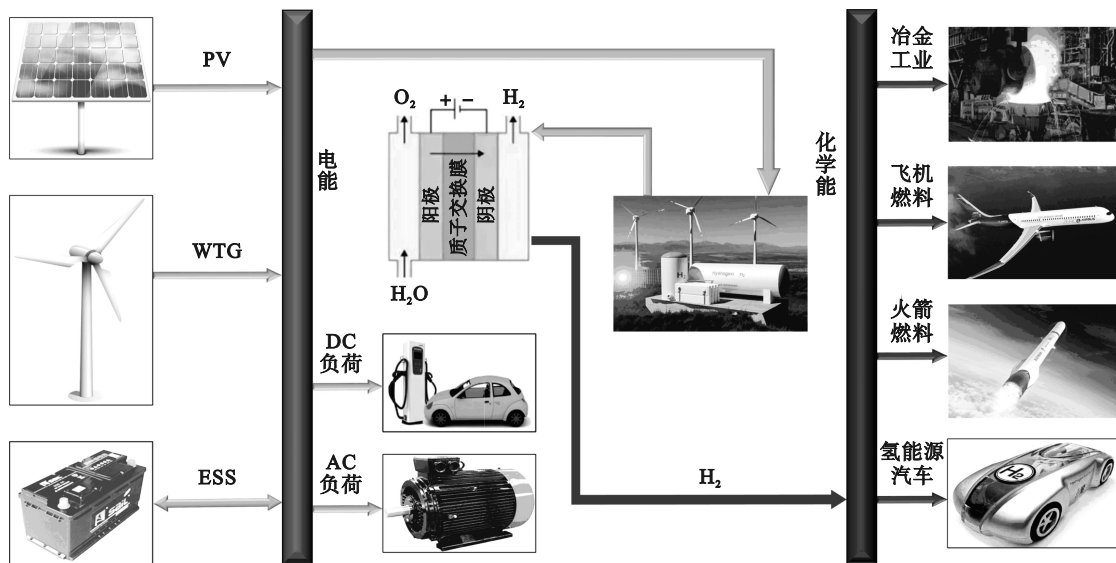


图1 可再生能源制氢拓扑结构图

Fig. 1 Topology diagram of hydrogen production by RES

### 1.1 电解槽建模

直流微电网的制氢单元是由多组碱性电解槽并联在直流母线上构成的,其中每个电解槽由多个电解室串联而成<sup>[9]</sup>。电解室通过化学反应将水电解成氢气和氧气,实现电能到化学能的转换<sup>[10]</sup>。

任意温度下的电解室端口电压与电流的数学模型为

$$V_{\text{unit}} = V_{\text{rev}} + V_{\text{ohm}} + V_{\text{con}}, \quad (1)$$

$$V_{\text{rev}} = 1.253 - 2.451 \cdot 6e^{-5} \theta, \quad (2)$$

$$V_{\text{ohm}} = \frac{r_1 + r_2 \theta}{A_{\text{EL}}} I_{\text{EL}}, \quad (3)$$

$$V_{\text{con}} = (s_1 + s_2 \theta + s_3 \theta^2) \times \lg \left( \frac{t_1 + t_2 / \theta + t_3 / \theta^2 + \alpha}{A_{\text{EL}}} I_{\text{EL}} + 1 \right). \quad (4)$$

式中:  $V_{\text{unit}}$  为电解室端口电压;  $V_{\text{rev}}$  为可逆电压;  $V_{\text{ohm}}$  和  $V_{\text{con}}$  分别为欧姆极化和浓差极化引起的过电压;  $\theta$  为电解室温度;  $I_{\text{EL}}$  为电解室工作电流;  $r_1$

和  $r_2$  为电解液电阻参数;  $A_{EL}$  为电极反应面积;  $s_1, s_2, s_3$  和  $t_1, t_2, t_3$  为过电压系数;  $a$  为调节系数.

由于电解槽是由多个电解室串联而成的, 因此电解槽的端口电压  $V_{EL}$  为

$$V_{EL} = nV_{unit}. \quad (5)$$

其中,  $n$  为串联的电解室数量.

电解槽的产氢速率  $v_H$  的数学模型为<sup>[11]</sup>

$$v_H = \eta_F \frac{nI_{EL}}{zF}, \quad (6)$$

$$\eta_F = a_1 \exp\left(\frac{a_2 + a_3\theta}{I_{EL}/A_{EL}} + \frac{a_4 + a_5\theta}{(I_{EL}/A_{EL})^2}\right). \quad (7)$$

式中:  $\eta_F$  为法拉第效率;  $F$  为法拉第常数;  $z$  为单次反应过程中交换的电子数;  $a_1 \sim a_5$  为法拉第效率系数.

### 1.2 碱性电解槽制氢效率分析

碱性电解槽制氢效率  $\eta$  的数学模型为<sup>[12]</sup>

$$\eta = \frac{Q_H(1-\beta\theta)}{Q_{power} + Q_{heat}} = \frac{KR_H(1-\beta\theta)}{zFV_{rev} + zF(1-\lambda)(V_{ohm} + V_{con}) + \frac{zF\theta S}{nI_{EL}}}. \quad (8)$$

式中:  $Q_{power}$  为吸收的电能量;  $Q_{heat}$  为来自外热源补偿的热能;  $Q_H$  为氢气的化学热能;  $K$  为电化学相关系数;  $R_H$  为氢气的电化学热值;  $\beta$  为电解室温度调节系数;  $\lambda$  为反应过程中的热能散失系数;  $S$  为熵值.

由式(8)可得电解槽制氢效率与电流、温度的关系, 如图2所示. 由图2可知, 当温度一定时, 电解槽的制氢效率随着输入电流的增大而先增大后减小. 因此, 为提高可再生能源的利用率, 有必要对电解槽的制氢效率进行控制和优化. 由于电解槽内的温控设备能够将电解室中的温度维持在恒定值, 因此后续对制氢效率的优化控制是针对制氢效率与输入电流的关系进行设计的, 同时这种控制方案适用于任意温度下的制氢效率控制.

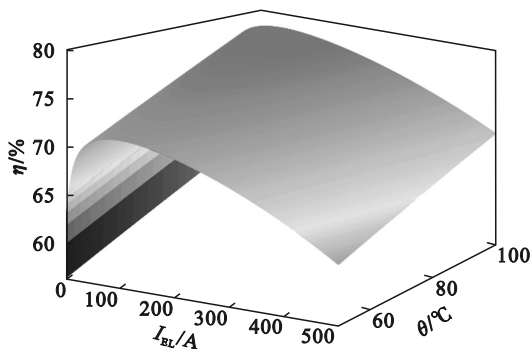


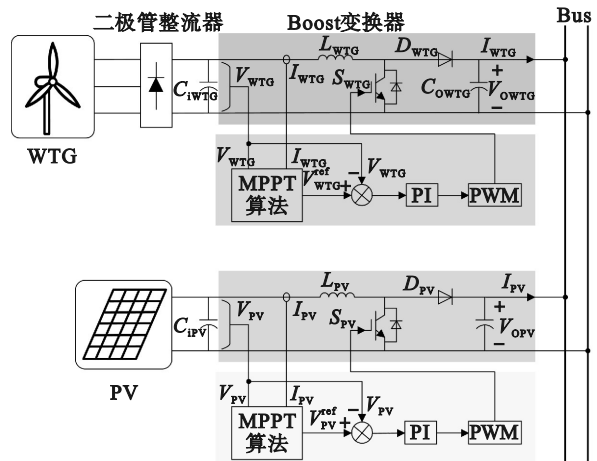
图2 电解槽制氢效率与电流、温度的关系

Fig. 2 Relationship of the hydrogen production efficiency with current and temperature in electrolytic cell

## 2 直流微电网控制策略

### 2.1 可再生能源发电 MPPT 控制

为保证可再生能源的最大利用率, PV 和 WTG 采用 MPPT 算法实现最大功率点跟踪, 以提高系统中可再生能源的利用率. 图3为 PV 和 WTG 在 MPPT 算法下的控制结构图, 通过 Boost 变换器实现最大功率输出. 详细的 MPPT 算法已有相关学者进行了报道, 可参考文献[13], 本文不再提供 MPPT 算法的细节.



注: PWM 为脉冲宽度调制; PI 为比例-积分控制.

图3 可再生能源发电 MPPT 控制结构

Fig. 3 MPPT control structure of renewable energy power generation

### 2.2 碱性电解槽制氢效率控制

电解槽制氢效率控制包括两种模式, 分别是效率自适应控制和定电压控制. 电解槽的工作模式取决于储能系统的 SoC. 当储能系统运行在极端条件下时, 采取定电压控制模式, 以保证系统的稳定性. 当储能系统运行在安全范围内时, 采用效率自适应控制模式, 将制氢效率维持在较高水平. 本节主要对效率自适应控制模式的工作原理进行分析.

在直流微电网中, 当系统输出功率大于负荷消耗功率时, 母线电压会在一定范围内抬升; 相反, 当系统输出功率小于负荷消耗功率时, 母线电压会发生一定范围内的跌落. 因此, 当储能 SoC 在安全范围内时, 制氢效率和直流母线电压之间的关系如图4所示, 可以实现制氢效率自适应控制.

当可再生能源输出功率小于负荷消耗功率时,  $V_{dc}^{min} < V_{dc} \leq V_{dc}^{nom}$ , 此时制氢效率和直流母线电压之间的关系为

$$\eta_{\text{ref}} = \eta_{\text{max}} + R_{\text{ELL}} \cdot (V_{\text{dc}} - V_{\text{dc}}^{\text{nom}}), \quad (9)$$

$$R_{\text{ELL}} = \frac{\eta_{\text{max}} - \eta_{\text{L}}}{V_{\text{dc}}^{\text{nom}} - V_{\text{dc}}^{\text{min}}}. \quad (10)$$

式中:  $\eta_{\text{ref}}$  为参考效率;  $\eta_{\text{max}}$  为母线电压在额定值  $V_{\text{dc}}^{\text{nom}}$  处对应的最大制氢效率;  $R_{\text{ELL}}$  为母线电压低于额定值时的下垂系数;  $V_{\text{dc}}$  为直流母线电压测量值;  $V_{\text{dc}}^{\text{min}}$  为直流母线电压最小值;  $\eta_{\text{L}}$  为  $V_{\text{dc}}^{\text{min}}$  对应的制氢效率.

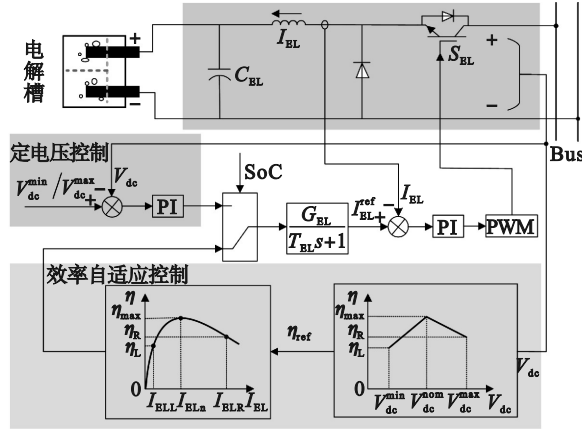


图4 电解槽制氢效率控制结构图

Fig. 4 Structure diagram of electrolytic cell hydrogen production efficiency control

当可再生能源输出功率大于负荷消耗功率时,  $V_{\text{dc}}^{\text{nom}} < V_{\text{dc}} \leq V_{\text{dc}}^{\text{max}}$ , 此时制氢效率和直流母线电压之间的关系为

$$\eta_{\text{ref}} = \eta_{\text{max}} - R_{\text{ELR}} (V_{\text{dc}} - V_{\text{dc}}^{\text{nom}}), \quad (11)$$

$$R_{\text{ELR}} = \frac{\eta_{\text{max}} - \eta_{\text{R}}}{V_{\text{dc}}^{\text{max}} - V_{\text{dc}}^{\text{nom}}}. \quad (12)$$

式中:  $V_{\text{dc}}^{\text{max}}$  为直流母线电压最大值;  $\eta_{\text{R}}$  为  $V_{\text{dc}}^{\text{max}}$  对应的制氢效率;  $R_{\text{ELR}}$  为母线电压高于额定值时的下垂系数.

结合式(9)~(12)以及图4,可以得到:在某一时刻采集直流母线电压  $V_{\text{dc}} \in [V_{\text{dc}}^{\text{min}}, V_{\text{dc}}^{\text{max}}]$ ; 然后,通过式(9)和式(11)计算得到这一时刻的参考效率,根据电解槽制氢效率和输入电流的关系得到此刻的参考电流  $I_{\text{EL}}^{\text{ref}}$ ; 最后,通过比例-积分调节使得电解槽电流  $I_{\text{EL}}$  跟踪到参考电流  $I_{\text{EL}}^{\text{ref}}$ , 从而实现电解槽制氢效率随系统功率变化的自适应调节.

当电解槽工作在效率自适应控制模式下时,储能系统通过被动充电或放电来维持直流微电网的功率平衡,以减小母线电压的偏差,从而将电解槽制氢效率维持在较高水平.

### 2.3 储能 SoC 主动恢复控制

由于直流微电网中可再生能源输出功率的间歇性和波动性,储能单元需要维持整个直流微

电网的功率平衡,其表达式为

$$I_{\text{oB}} = I_{\text{PV}} + I_{\text{WTG}} - I_{\text{EL}} - I_{\text{load}}. \quad (13)$$

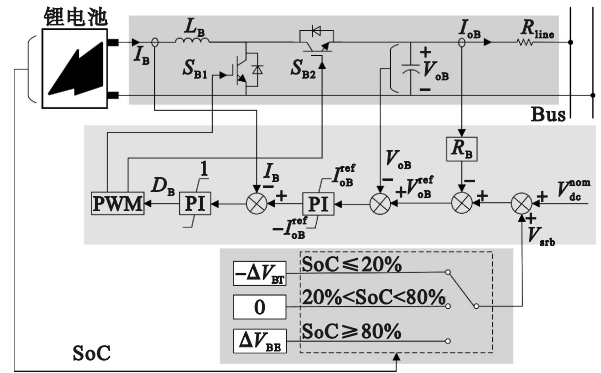
式中:  $I_{\text{PV}}$  为光伏发电输出电流;  $I_{\text{WTG}}$  为风力发电输出电流;  $I_{\text{oB}}$  为蓄电池输出或输入电流;  $I_{\text{load}}$  为负载电流.

蓄电池的 SoC 最佳运行范围为 (20% 80%)<sup>[14]</sup>, 为避免蓄电池的“过充/过放”行为,本文提出了1种不依赖通信的储能 SoC 主动恢复控制策略,如图5所示,其表达式为

$$V_{\text{oB}}^{\text{ref}} = V_{\text{dc}}^{\text{nom}} + V_{\text{srb}} - R_{\text{B}} I_{\text{oB}}. \quad (14)$$

$$V_{\text{srb}} = \begin{cases} -\Delta V_{\text{BT}}, & \text{SoC} \leq 20\%, \\ 0, & 20\% < \text{SoC} < 80\%, \\ \Delta V_{\text{BE}}, & \text{SoC} \geq 80\%. \end{cases} \quad (15)$$

式中:  $V_{\text{srb}}$  为电压增益;  $V_{\text{oB}}^{\text{ref}}$  为蓄电池变换器的参考电压;  $\Delta V_{\text{BT}}$  和  $\Delta V_{\text{BE}}$  为变换器在不同 SoC 下的正电压增益;  $R_{\text{B}}$  为蓄电池下垂系数;  $I_{\text{oB}}$  为变换器的输出电流.



注:  $L_{\text{B}}$  为电感;  $I_{\text{B}}$  为蓄电池电流;  $D_{\text{B}}$  为占空比.

图5 储能单元 SoC 主动恢复控制结构图

Fig. 5 Active recovery control structure diagram of SoC of energy storage unit

结合式(14)和式(15)可知,当蓄电池的 SoC 在 (20% 80%) 范围内时,  $V_{\text{srb}}$  为 0, 此时储能单元根据系统的功率情况自适应切换充电和放电状态来维持系统功率平衡. 当蓄电池的  $\text{SoC} \geq 80\%$  或  $\text{SoC} \leq 20\%$  时, 此时越过了储能安全的上下限, 通过调节电压增益  $V_{\text{srb}}$  来进行 SoC 恢复控制, 下文将分别对电压增益  $\Delta V_{\text{BE}}$  和  $\Delta V_{\text{BT}}$  进行设计.

当蓄电池  $\text{SoC} \leq 20\%$  时, 为避免发生过度放电行为, 此时可再生能源输出电流大于  $\eta_{\text{L}}$  对应的制氢输入电流和负荷消耗电流之和, 即

$$I_{\text{RES}} > I_{\text{ELL}} + I_{\text{load}}. \quad (16)$$

式中:  $I_{\text{RES}}$  为可再生能源输出电流,  $I_{\text{RES}} = I_{\text{PV}} + I_{\text{WTG}}$ ;  $I_{\text{ELL}}$  为电解槽在效率优化范围内的最小输入电流.

由于蓄电池的充电电流不能超过其额定值,且直流母线的电压存在下限,因此,储能变换器的电压增益 $\Delta V_{BT}$ 为

$$0 < \Delta V_{BT} < \min [(I_{RES} - I_{ELL} - I_{load})R_B, R_B I_{OB}^{limit}, V_{dc}^{nom} - V_{dc}^{min}]. \quad (17)$$

式中, $I_{OB}^{limit}$ 为储能单元的最大输入或输出电流。

此时蓄电池进行充电,直至储能 SoC 达到安全范围内,其充电电流大小为

$$I_{OB} = \frac{\Delta V_{BT}}{R_B}. \quad (18)$$

当可再生能源输出电流小于 $\eta_L$ 对应的制氢输入电流和负荷消耗电流之和时,在这种极端条件下,电解槽采用定电压 $V_{dc}^{min}$ 控制,允许其输入电流小于效率优化下的最小电流,以减小电解槽电流和降低制氢效率为代价来维持直流母线电压的稳定,同时可削减部分非重要负荷.由于蓄电池 SoC 已低于下限,因此它将退出运行。

当蓄电池 SoC  $\geq 80\%$  时,为避免发生过度充电行为,则要求可再生能源输出电流小于 $\eta_R$ 对应的制氢输入电流和负荷消耗电流之和,即

$$I_{RES} < I_{ELR} + I_{load}. \quad (19)$$

式中, $I_{ELR}$ 为电解槽在效率优化范围内的最大输入电流。

由于蓄电池的放电电流不能超过其额定值,且直流母线的电压存在上限,因此,储能变换器的电压增益 $\Delta V_{BE}$ 为

$$0 < \Delta V_{BE} < \min [(I_{ELR} + I_{load} - I_{RES})R_B, R_B I_{OB}^{limit}, V_{dc}^{max} - V_{dc}^{nom}]. \quad (20)$$

此时蓄电池进行放电,直至储能 SoC 恢复到安全范围内,其放电电流大小为

$$I_{OB} = \frac{\Delta V_{BE}}{R_B}. \quad (21)$$

当可再生能源输出电流大于 $\eta_R$ 对应的制氢输入电流和负荷消耗电流之和时,在这种极端条件下,电解槽采用定电压 $V_{dc}^{max}$ 控制,允许其输入电流大于效率优化下的最大电流,以增大电解槽电流造成的低制氢效率为代价来维持直流母线电压的稳定.此时,蓄电池 SoC 已越过安全上限,它将不再进行充电。

### 2.4 功率协调控制

结合可再生能源发电 MPPT 控制、电解槽制氢效率控制和储能 SoC 主动恢复控制,设计基于氢/储控制模式相互配合、灵活切换的直流微电网能量协调控制策略,以保证直流微电网的可靠运行,如图 6 所示.根据储能 SoC 和潮流不平衡程度,将直流微电网划分为 7 种运行模式。

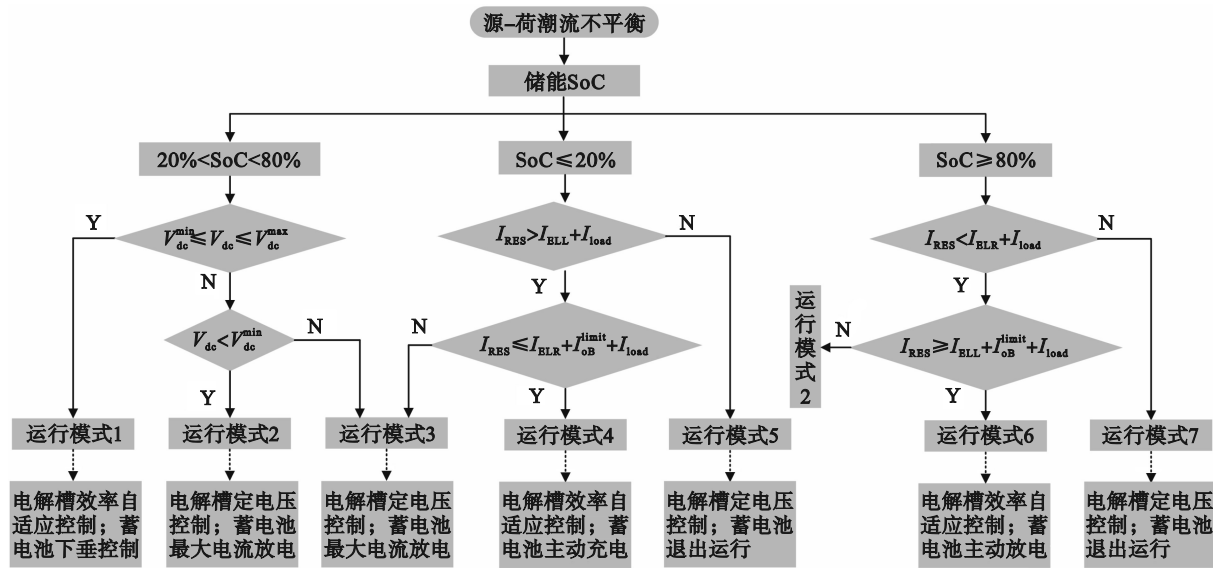


图 6 直流微电网的功率协调控制策略

Fig. 6 Power coordination control strategy of DC microgrid

模式 1 当蓄电池处于  $20\% < \text{SoC} < 80\%$  的安全运行范围内时,若母线电压偏差在允许范围之内,此时电解槽工作在效率自适应控制模式下,蓄电池采用下垂控制,被动切换充/放电状态来维持直流微电网的稳定运行。

模式 2 在模式 1 的基础上,若母线电压小

于系统所允许的最小值,此时电解槽工作在定电压 $V_{dc}^{min}$ 模式下,蓄电池以最大电流放电。

模式 3 在模式 1 的基础上,若母线电压大于系统所允许的最大值,此时电解槽工作在定电压 $V_{dc}^{max}$ 模式下,蓄电池以最大电流充电。

模式 4 当蓄电池处于  $\text{SoC} \leq 20\%$  的极限情

况下时,若满足  $I_{ELR} < I_{RES} - I_{load} < I_{ELR} + I_{OB}^{limit}$ ,此时蓄电池通过电压增益  $\Delta V_{BT}$  来主动获取充电电流,电解槽采用效率自适应控制,随着母线电压的降低而被动减小制氢输入电流.若  $I_{RES} > I_{ELR} + I_{OB}^{limit} + I_{load}$ ,此时系统功率过剩,电解槽和蓄电池采用模式 3 下的控制方式.

模式 5 在模式 4 的基础上,若  $I_{RES} \leq I_{ELR} + I_{load}$ ,此时系统功率严重不足.在这种极端条件下,电解槽采用定电压  $V_{dc}^{min}$  控制,可适当削减部分非重要负荷来维持系统的稳定,而蓄电池 SoC 已越过安全下限,将退出运行.

模式 6 当蓄电池处于  $SoC \geq 80\%$  的极限情况下时,若满足  $I_{ELR} + I_{OB}^{limit} < I_{RES} - I_{load} < I_{ELR}$ ,此时蓄电池通过电压增益  $\Delta V_{BE}$  来主动获取放电电流,电解槽采用效率自适应控制,随着母线电压的抬升而被动增大制氢输入电流.若  $I_{RES} < I_{ELR} + I_{OB}^{limit} + I_{load}$ ,此时系统功率不足,电解槽和蓄电池采用模式 2 下的控制方式.

模式 7 在模式 6 的基础上,若  $I_{RES} \geq I_{ELR} + I_{load}$ ,此时系统功率严重过剩.在这种极端条件下,电解槽采用定电压  $V_{dc}^{max}$  控制,以增大电解槽电流造成的低制氢效率为代价来维持直流母线电压的稳定,而蓄电池 SoC 已越过安全上限,将退出运行.

### 3 仿真分析

为验证本文所提控制策略的有效性,在 MATLAB/Simulink 仿真平台上搭建了直流微电网系统.该系统主要包括 PV、WTG、碱性电解槽和蓄电池储能,仿真参数如表 1 所示.

#### 3.1 案例 1:储能低 SoC 场景下的运行结果

当蓄电池 SoC 越过安全下限时,可再生能源制氢系统的运行结果如图 7 所示.在 0~0.5 s 内,对应模式 4 中的工况,此时母线电压低于额定值,储能 SoC 低于 20%,蓄电池主动获取来自电解槽的电流进行充电,同时保证母线电压大于最小值,制氢效率在优化区间内.在 0.5~1.0 s 内,对应模式 5 中的工况,此时系统功率严重不足,电解槽采用定电压控制,母线电压保持在最小值 380 V,储能单元输出电流为 0,电解槽制氢功率减小以维持系统稳定,同时制氢效率退出优化区间.在 1.0~1.5 s 内,对应模式 3 中的工况,此时系统功率过剩,电解槽工作在定电压模式下,母线电压保持在最大值 420 V,蓄电池以额定功率 20 kW 充

电,电解槽制氢功率大于优化范围内的最大值,同时制氢效率也在优化区间外.在 1.5~2.0 s 内,对应模式 1 中的工况,此时储能 SoC 大于 20%,已恢复至安全范围内,允许通过放电来将母线电压维持在额定值附近,此时制氢效率接近最大值,约为 74%.

表 1 系统仿真参数  
Table 1 System simulation parameters

参数	符号	数值
直流母线电压额定值/V	$V_{dc}^{nom}$	400
母线电压波动范围/V	$\Delta V$	20
蓄电池额定功率/kW	$P_{oB}$	20
电解槽额定功率/kW	$P_{EL}$	50
电解槽工作温度/°C	$\theta$	80
效率下垂系数(左)	$R_{ELL}$	1.5
效率下垂系数(右)	$R_{ELR}$	0.8
储能下垂系数	$R_B$	2

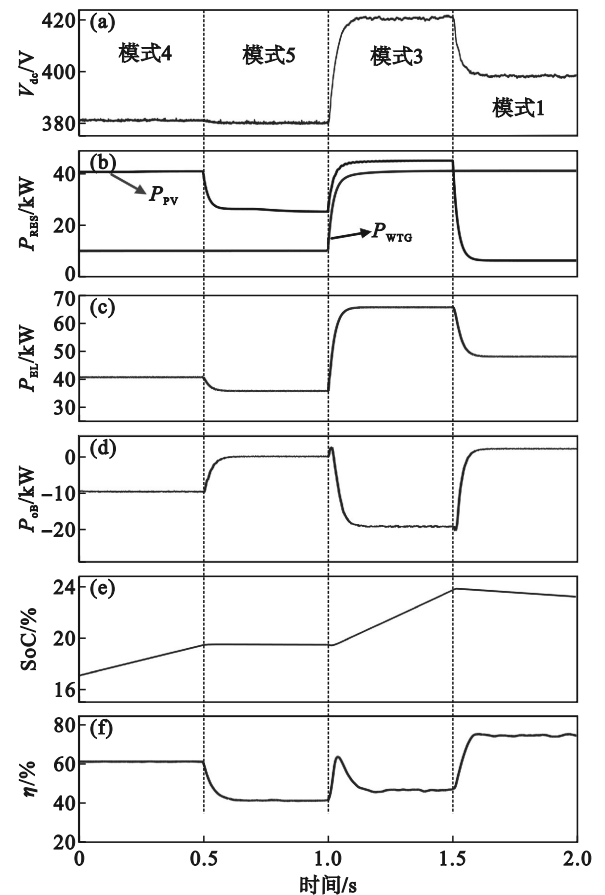


图 7 储能低 SoC 场景下的运行结果

Fig. 7 Operation results of energy storage under low SoC scenario

- (a) 直流母线电压; (b) 可再生能源输出功率;
- (c) 电解槽功率; (d) 蓄电池功率;
- (e) 储能 SoC; (f) 制氢效率.

### 3.2 案例 2: 储能高 SoC 场景下的运行结果

当蓄电池 SoC 越过安全上限时, 可再生能源制氢系统的运行结果如图 8 所示. 在 0~0.5 s 内, 对应模式 6 中的工况, 此时母线电压大于额定值, 储能 SoC 大于 80%, 蓄电池主动进行放电, 同时保证母线电压小于最大值, 且电解槽制氢效率在优化区间内. 在 0.5~1.0 s 内, 对应模式 7 中的工况, 此时系统功率严重过剩, 电解槽采用定电压控制, 母线电压保持在最大值 420 V, 储能单元充电电流为 0, 电解槽制氢功率增大以维持系统稳定, 同时制氢效率退出优化区间. 在 1.0~1.5 s 内, 对应模式 2 中的工况, 此时系统功率不足, 电解槽工作在定电压模式下, 母线电压保持最小值 380 V, 蓄电池以额定功率 20 kW 放电, 电解槽制氢功率小于效率优化范围内的最小值, 同时制氢效率也在优化区间外. 在 1.5~2.0 s 内, 对应模式 1 中的工况, 此时储能 SoC 小于 80%, 已恢复至安全范围内, 允许蓄电池充电来将母线电压维持在额定值附近, 此时制氢效率接近最大值, 约为 75%.

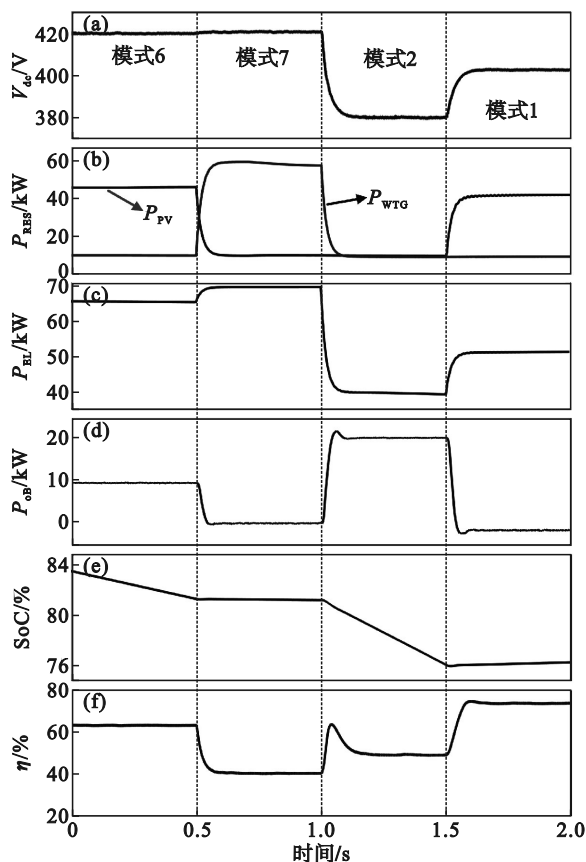


图 8 储能高 SoC 场景下的运行结果

Fig. 8 Operation results of energy storage under high SoC scenario

- (a) 一直流母线电压; (b) 一可再生能源输出功率;  
(c) 一电解槽功率; (d) 一蓄电池功率;  
(e) 一储能 SoC; (f) 一制氢效率.

## 4 结 论

本文所提出的可再生能源制氢控制策略兼顾了储能系统的安全性和电解槽的制氢效率. 当储能 SoC 在安全运行范围内时, 配合电解槽的效率自适应控制, 通过被动切换充放电状态来维持系统功率平衡, 将制氢效率维持在较高水平. 当储能 SoC 越过上下限时, 蓄电池将主动获取充放电电流进行 SoC 恢复, 具有响应速度快、通信要求低等优势. 此外, 所设计的功率协调控制策略考虑了多种极端条件下的运行需求, 仿真结果验证了所提控制策略在各个模式下的有效性.

### 参考文献:

- [1] 金胜赫, 张化光, 孙秋野, 等. 基于一致性的微电网分布式不对称功率分配控制[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2016, 37(10): 1374-1378.  
(Kim Sung-hyok, Zhang Hua-guang, Sun Qiu-ye, et al. Consensus-based distributed asymmetric power sharing control in microgrids [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2016, 37(10): 1374-1378.)
- [2] Saxena A, Shankar R, El-Saadany E F, et al. Intelligent load forecasting and renewable energy integration for enhanced grid reliability[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2024, 60(6): 8403-8417.
- [3] Alanne K. A survey of Finnish energy engineering students' knowledge and perception of hydrogen technology [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, 43(22): 10205-10214.
- [4] Ursua A, Gandia L M, Sanchis P. Hydrogen production from water electrolysis: current status and future trends[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2012, 100(2): 410-426.
- [5] Zhou T, Francois B, Lebbal M H, et al. Real-time emulation of a hydrogen-production process for assessment of an active wind-energy conversion system [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, 56(3): 737-746.
- [6] 尹德强, 姚良忠, 程帆, 等. 考虑制氢效率优化的氢-储-风直流微网功率协调控制[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(13): 19-29.  
(Yin De-qiang, Yao Liang-zhong, Cheng Fan, et al. Power coordinated control for DC microgrid with hydrogen-storage-wind power considering hydrogen production efficiency optimization [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2024, 48(13): 19-29.)
- [7] Han Y, Yang H Q, Li Q, et al. Mode-triggered droop method for the decentralized energy management of an islanded hybrid PV/hydrogen/battery DC microgrid [J]. *Energy*, 2020, 199: 117441.
- [8] Hong Z P, Wei Z X, Han X J. Optimization scheduling control strategy of wind-hydrogen system considering hydrogen production efficiency [J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 47: 103609.
- [9] 袁铁江, 张江飞, 滕越. 基于虚拟同步机的新能源制氢系统协调控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(1): 163-175.

(下转第 70 页)