

基于电压偏差和 SOC 的电氢耦合系统多源协调控制策略

赵艺徽¹, 程鹏^{1*}, 田新首¹, 贾利民^{1,2}

(1. 华北电力大学 国家能源交通融合发展研究院, 北京 102206;

2. 北京交通大学 轨道交通控制与安全国家重点实验室, 北京 100044)

Multi-Source Coordinated Control Strategy Based on Voltage Bias and SOC for Electro-Hydrogen Coupling System

ZHAO Yihui¹, CHENG Peng^{1*}, TIAN Xinshou¹, JIA Limin^{1,2}

(1. China Institute of Energy and Transportation Integrated Development, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. State Key Laboratory of Rail Traffic Control and Safety, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: In the highway DC microgrid, the time characteristics and charging mode characteristics of electric vehicle charging behavior may cause varying degrees of impact on the DC bus voltage, and the high-penetration rate of electric vehicle loads presents new challenges to the coordination control of the "source-load-storage" system. By analyzing the traffic load characteristics and micro-source characteristics of the highway DC microgrid, a multi-source coordinated control strategy based on DC bus voltage bias for electro-hydrogen coupling system is proposed. This control strategy uses the battery as the core component of voltage regulation to achieve coordinated and self-consistent operation by detecting the fluctuation of the DC bus voltage at the inverter port, without the need for communication to achieve power balance of the system. To avoid the battery exiting operation due to the crossing of the state of charge (SOC), a multi-source adaptive droop controller is designed, enabling the hydrogen unit to actively respond to SOC changes, reduce the unbalanced power caused by battery SOC management, suppress the speed of SOC approaching the boundary value, and achieve dynamic balance of SOC. Finally, the effectiveness of the proposed control strategy is verified in Matlab/Simulink.

Key words: highway DC microgrid; electro-hydrogen coupling; traffic load; coordinated control; adaptive droop control

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2021YFB2601605)
National Program on Key Basic Research Project
(2021YFB2601605)

摘要: 在公路直流微电网中, 电动汽车充电行为的时间特性和充电方式特性会对直流母线电压造成不同程度的冲击, 高渗透率的电动汽车负荷对“源-荷-储”协调控制提出新的挑战。通过分析公路直流微电网的交通负荷特性和微源特点, 提出了一种基于直流母线电压偏差的电氢耦合系统多源协调控制策略。此控制策略以蓄电池作为调压核心元件, 通过检测变流器端口直流母线电压波动来实现协调自治运行, 无需通信即可实现系统的功率平衡。为避免蓄电池因荷电状态(SOC)过界而退出运行, 设计了一种多源自适应下垂控制器, 使氢能单元主动响应 SOC 变化, 减少蓄电池 SOC 管理造成的不平衡功率, 抑制 SOC 向边界值的趋近速度, 实现 SOC 的动态平衡。最后, 在 Matlab/Simulink 中验证了所提控制策略的有效性。

关键词: 公路直流微电网; 电氢耦合; 交通负荷; 协调控制; 自适应下垂控制

0 引言

微电网可以有效发挥分布式电源(Distributed Generation, DG)的能效, 解决配电网系统中多种用能设施需求, 是实现工业园区、交通服务区大规模可再生能源利用的关键技术。DG 和电动汽车(Electric Vehicle, EV)充电站在环境污染治理和节能减排方面具有不可比拟的优势^[1-3], 是未来智能交通能源网中的重要组成部分。目前对于交通能源网的研究集中在充电

站规划设计^[4]、负荷需求预测^[5]等方面,对于含多源多负荷特性的公路直流微电网协调控制技术的研究相对较少。

工业园区负荷单体容量大、可控性强,可实现“源-荷”间的互动调控,能够有效解决大规模新能源并网带来的功率平衡难题,辅助电网安全稳定运行^[6]。相比之下,公路交通服务区负荷调控能力低,这对“源-储”间的功率调控提出了更高的要求。公路直流微电网有信号灯照明、空调排风、通信办公和EV充电等多种类型负荷,其中EV的类型、充电时间和充电方式等充电特性是影响交通能源网的重要因素。同时,EV用户在交通服务区内多选择快速充电,这种充电行为具有短时无序的特点,会对微电网造成巨大冲击^[7]。因此,高渗透率的EV充电负荷时空分布的不确定性和不均衡性会对微电网带来不同程度的负荷冲击,造成系统输电阻塞,加剧系统源-荷功率不平衡,严重影响系统稳定运行^[8-9]。EV充电也增大了微电网的负荷容量,导致传统电储能难以长时间消纳母线上的不平衡功率。而氢能具有能量密度高、储量丰富及寿命长等特点^[10-11],利用电储能与氢储能构成的电氢混合储能单元,可以快速平抑DG出力波动和EV充电对母线电压的冲击,降低氢能系统响应延迟对系统稳定运行的影响^[12-14]。

公路直流微电网协调控制技术的根本在于维持发电侧与负荷侧的功率供需平衡,关键是实现直流母线电压的稳定控制^[15]。文献[16]将电氢储能系统间的功率分配问题考虑到协调控制中,建立模糊功率分配策略,通过多源间控制方式的快速切换,维持储能荷电状态(State of Charge, SOC)趋于合理工作区间,实现系统的稳定运行。文献[17]为获得稳定的母线电压,对蓄电池采用恒压控制,并依据其SOC划分系统运行模式以防止SOC越界,避免SOC剧烈变化影响系统稳定性。文献[18]基于储氢罐压力和储能运行状态将系统划分为10种运行模式,并在变流器中搭载多种控制策略,通过不断切换变流器控制策略,实现系统源-荷功率的协调控制,维持直流母线电压的稳定。依据系统运行状态来精确划分工作模式,虽然可以实现各种工况下源-荷供需平衡,但频繁切换变流器控制策略,不仅使系统复杂程度

增大,在切换过程还可能会对电流和电压造成冲击,影响电能质量。自适应下垂控制具有冗余性高、可即插即用的特点,能有效降低变流器控制策略切换次数和系统复杂程度。文献[19]在下垂控制器中引入采样保持器,依据采样保持器的输出结果实现自适应下垂控制,进而提高母线电压质量。文献[20]通过模糊逻辑推理控制器调整下垂系数,减小传输功率变化造成的电压偏差,提高系统的运行特性。文献[21]在下垂系数中引入SOC因子、电压误差调整系数和调整步长,实现自适应下垂控制,抑制母线电压跌落,提高系统抗负载能力。但上述自适应下垂控制在微源较多时仍会导致系统控制结构复杂。

本文以由蓄电池储能(Battery Energy Storage, BES)、燃料电池(Fuel Cell, FC)和电解槽(Electrolyzer, EL)构成的电氢耦合孤岛公路直流微电网为研究对象,提出一种基于母线电压偏差的多源协调控制策略。通过该策略来平衡电网功率波动,缓解系统输电阻塞,减少变流器控制策略切换次数,实现孤岛公路直流微电网的稳定运行。该控制策略以蓄电池作为直流母线电压的稳定核心,必需避免其因SOC异常而退出运行,因此提出一种考虑储能SOC的多源自适应下垂控制器,通过对蓄电池和氢能单元进行实时功率分配,使氢能单元主动响应SOC变化,可有效缓解蓄电池在SOC管理过程中造成的不平衡功率,同时使SOC向设定值趋近,提高锂电池使用寿命和可再生能源利用率。基于Matlab/Simulink搭建了电氢耦合孤岛公路直流微电网仿真模型,对所提策略的控制性能进行了仿真验证。

1 公路直流微电网微源特性分析

1.1 系统组成及特性分析

本文研究的孤岛公路直流微电网系统采用共直流母线结构,如图1所示。其中风机(Wind Turbine, WT)单元采用直驱永磁同步发电机(Permanent Magnet Synchronous Generator, PMSG)、全功率变流器和DC/DC变流器并网结构;光伏(Photovoltaic, PV)单元采用光伏阵列和DC/DC变流器并网结构;BES单元由蓄电池和双向DC/DC变流器组成,实现能量双向流动;FC单元由质子交换膜燃料电池组成;EL单元由碱性水

电解槽组成;恒功率负载 (Constant Power Load, CPL) 由 DC/DC 和 DC/AC 变流器以及恒定功率的交/直流负载模拟;恒阻抗负载 (Constant Impedance Load, CIL) 由电阻性负载直接与直流母线并联。

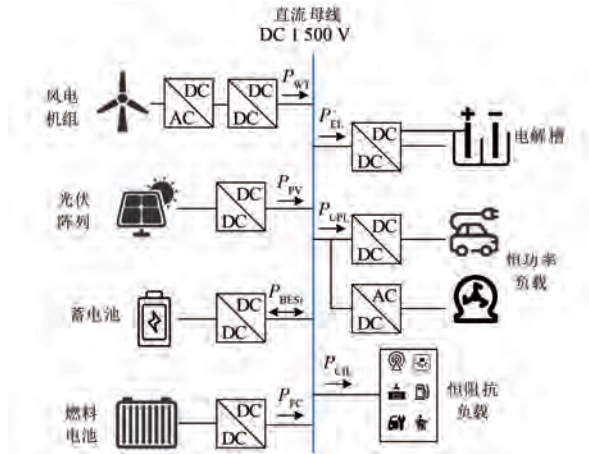


图 1 孤岛公路直流微电网系统结构

Fig. 1 Structure of DC microgrid system for island highway

分布式发电单元中,光伏因其无噪声、无污染、高安全性、不受地域限制及易于分散布局等优势,在交通领域备受青睐,具有庞大的装机容量。而风机的运转会产生噪音污染和光影闪烁上的视觉干扰,同时风电场的安装选址也对地形有较高要求,诸多限制因素使风机装机容量远低于光伏装机容量。基于上述分析,本文在系统中仅配置少量风力发电,分布式发电单元以光伏发电为主。

一般情况下,为了获得更高的发电效率,提升系统经济效益,风机、光伏等 DG 单元分别采用最佳叶尖速比控制法和粒子群优化算法来实现最大功率点跟踪 (Maximum Power Point Tracking, MPPT) 运行模式,在特殊情况下进入有功备用运行模式^[22]。

蓄电池的高功率密度和快响应速度是微电网能够灵活安全稳定运行的基础,整个系统的功率波动主要由蓄电池承担。FC 和 EL 组成的氢能系统具有能量密度高的特点,可有效弥补蓄电池能量密度低的缺陷,防止蓄电池发生深度充放电,以实现系统长时间下的独立运行,且蓄电池也可以弥补氢能系统响应延迟的缺陷。

本文设置系统主要组成模块包括:额定功率为 300 kW 的 PMSG、2.2 MW 的 PV、880 kW 的 EL

和 900 kW 的 FC。系统主要参数见表 1。

表 1 微源参数

Tab. 1 Parameters of micro-sources

参数名称	参数值
风机额定功率/kW	300
风机额定风速/(m·s ⁻¹)	12
光伏额定功率/MW	2.2
蓄电池额定容量/Ah	300
蓄电池 SOC 上限/%	90
蓄电池 SOC 下限/%	40
电解槽额定功率/kW	880
电解槽安全运行功率/kW	112
燃料电池额定功率/kW	900
燃料电池安全运行功率/kW	82

1.2 电动汽车交通特性分析

交通特性是 EV 及其配套设施为满足用户需求 and 交通网络约束而具备的一系列性质的综合描述。EV 作为电力负荷,其充电行为具有随机性和间歇性的特点,在 EV 并网对电网运行产生不同影响的层面,EV 充电行为的时间特性和充电方式特性是必需考虑的交通特性。

在时间特性方面,EV 的起始充电行为在交通服务区这种无约束情况下呈现出短时无序的特点;在充电方式特性方面,EV 充电方式可分为慢速充电和快速充电。慢速充电通常使用交流充电桩给电池充电,充电电流和功率较小,对电网冲击也较小,但每次充电所需的时间较长,一般为 8 h;快速充电是利用大电流给 EV 充电,多采用直流脉冲快速充电法,能够在 0.5 h 内补充 70%~80% 的电池容量,但这种充电方式不仅会给电网带来较大的冲击,还会减少电池的使用寿命。不同充电方式可以等效为不同负载类型,慢速充电方式可等效为 7 kW 的恒定交流负载,快速充电方式可等效为 90 kW 的恒定直流负载^[23]。

根据我国 EV 类型以及不同功能 EV 的出行特点,将交通服务区内的 EV 分为如下两类:

1) 通勤车:主要包括私家车、出租车和公交车等,是交通服务区的主要 EV 类型。这类车辆在到达交通服务区时,多为行驶过程中现有电量无法抵达目的地而采用紧急快速充电。负荷曲线在日间波动幅度较大,对电网稳定造成严重冲击;在夜间波动幅度降低,对电网冲击减弱,整体呈现出短时无序的特点。

2) 交通运维车:主要包括各种功能用车,如

环卫车、抢修车和物流车等。这类车辆具有特定的行驶路线和专用充电位置,多采用慢充和换电相结合的充电方式。负荷曲线呈现出夜间高、日间低且总体平稳的特点,对电网的影响较小。

基于EV的交通特性分析,可知公路直流微电网负荷波动特点为日间波动幅度大、变化频率快,而夜间波动幅度小、变化频率慢。并且,由于交通服务区不仅具有车辆供能属性,还具有一定的商业服务属性,这导致公路交通服务站内的EV的起始充电行为为满足以12:00和18:00为中心的狭窄均匀分布,呈现出“双峰”态势。

2 公路直流微电网多源协调控制策略

2.1 基于直流母线电压偏差信号的多源协调控制

DG单元、BES单元、FC单元和EL单元均通过变流器接入公共直流母线,直流母线电压将各微源联系起来,成为衡量微网稳定运行的关键指标。选择直流母线电压 U_{bus} 作为微源间的协调信号,并以蓄电池为核心,使系统中氢能单元与蓄电池协调配合,共同分担系统的负荷冲击,提高系统直流母线电压质量。

基于电压偏差信号的多源协调控制示意图如图2所示。其中, P_{mpp} 为DG单元最大输出功率; P_{dismax} 、 P_{chmax} 分别为BES单元最大放电功率、最大充电功率; P_{ELmax} 为EL单元的最大制氢功率; P_{FCmax} 为FC单元的最大运行功率。本文设定直流母线电压额定值 U_N 为1500V。根据 $\pm 10\%$ 的直流母线电压允许偏差,设定直流母线电压运行的上下限 U_{max} 、 U_{min} 分别为1650V和1350V;设定直流母线功率盈余和功率缺损电压边界值 U_h 、 U_l 分别为1575V和1425V,各微源根据直流母线电压按分段下垂特性变化。

根据图2对系统中各单元运行模式进行分析。

模式1: $U_{max} > U_{bus} > U_h$,此时直流母线功率盈余,DG单元工作于有功备用运行模式,减少向直流母线注入电能,防止直流母线电压进一步升高;EL单元达到最大制氢功率,降低系统的弃风弃光率,提高系统能量利用效率;BES单元工作于下垂控制模式,维持直流母线电压稳定;FC单元处于待机模式。

模式2: $U_h > U_{bus} > U_N$,此时DG单元工作于

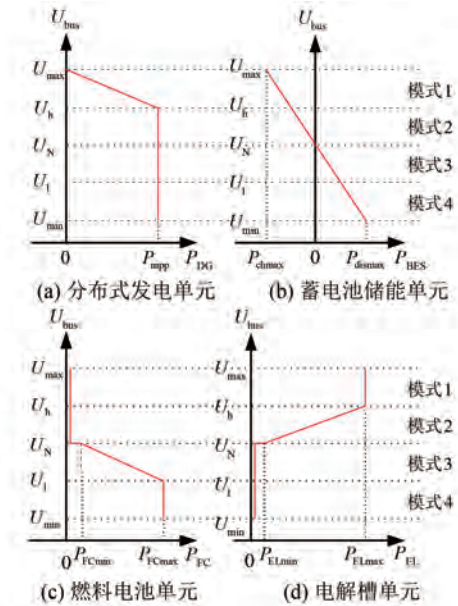


图2 多源协调控制示意图

Fig. 2 Schematic diagram of multi-source coordinated control

MPPT运行模式;BES单元与EL单元工作于下垂控制模式,共同维持直流母线电压稳定;FC单元处于待机模式。

模式3: $U_N > U_{bus} > U_l$,此时DG单元工作于MPPT运行模式;BES单元与FC单元工作于下垂控制模式,共同维持直流母线电压稳定;EL单元处于待机模式。

模式4: $U_l > U_{bus} > U_{min}$,此时直流母线功率缺损,DG单元工作于MPPT运行模式;FC单元达到最大输出功率;BES单元工作于下垂控制模式,维持直流母线电压稳定;EL单元处于待机模式。若直流母线电压跌至 U_{min} 以下,则采用负载管理算法,按照设定优先级进行逐级减载。

2.2 电氢耦合系统控制策略

将蓄电池、燃料电池和电解槽组合成电氢混合储能系统,实现微源间的优势互补,通过下垂控制,有效分配微源间的功率,维持系统发电与负载消耗之间的功率平衡,实现直流母线电压的稳定控制。BES_i单元下垂控制表达式为

$$U_{ref_i} = U_N - r_{BES} P_{BES_i} \quad (1)$$

式中: U_{ref_i} 为BES_i单元变流器输出直流电压参考值; U_N 为直流母线电压额定值; r_{BES} 为BES_i单元的初始下垂系数; P_{BES_i} 为BES_i单元输出功率。

EL单元和FC单元的下垂控制表达式为

$$\begin{cases} P_{ELref} = P_{ELmin} - r_{EL}(U_N - U_{bus}) \\ P_{FCref} = P_{FCmin} - r_{FC}(U_{bus} - U_N) \end{cases} \quad (2)$$

式中: P_{ELref} 和 P_{FCref} 分别为 EL 单元和 FC 单元变流器输出功率参考值; P_{ELmin} 和 P_{FCmin} 分别为 EL 单元和 FC 单元的最小安全运行功率; r_{EL} 和 r_{FC} 分别为 EL 单元和 FC 单元的下垂系数; U_{bus} 为直流母线电压测量值。

当 DG 单元出力或负荷变化导致 U_{bus} 改变时, 蓄电池、燃料电池和电解槽将依据电压分段下垂控制曲线改变自身工作点, 协调源-荷间的不平

衡功率, 平抑直流母线电压波动。在燃料电池和电解槽的工作温度范围内, 其电功率与温度相关, 保持电堆温度处于最佳工作温度能很大程度提高燃料电池和电解槽的动态响应能力^[24]。

本文提出的多源协调控制方法如图 3 所示。为了避免各单元接口变流器模式之间频繁切换, 图 3 中的开关信号均采用滞环比较器。为配合燃料电池动态响应速度, 在燃料电池参考功率生成环节添加斜率抑制器, 以契合 FC 单元的响应尺度。

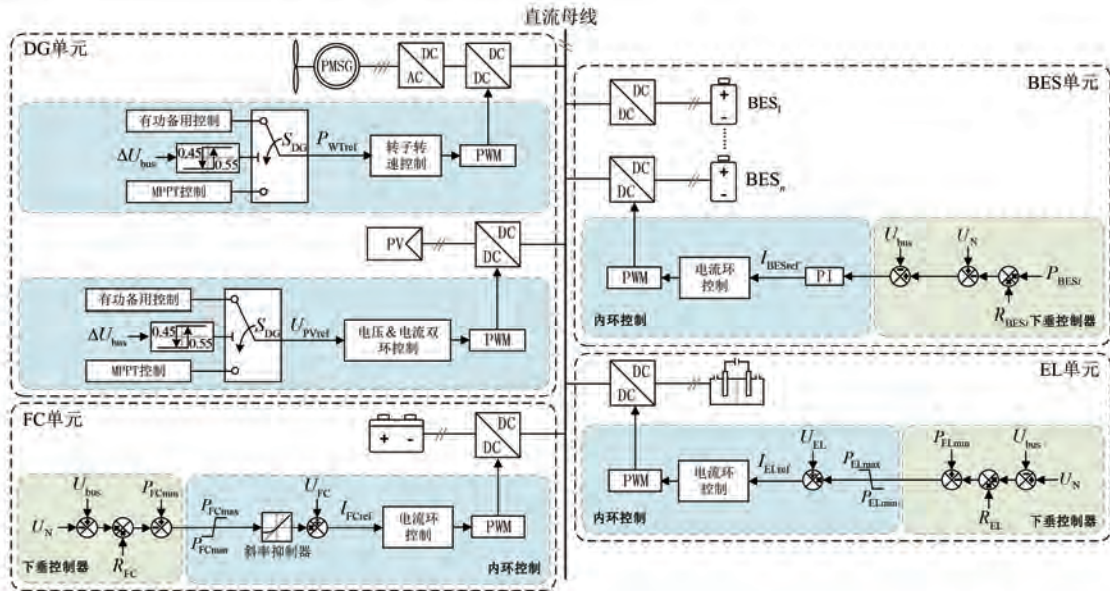


图 3 多源协调控制框图

Fig. 3 Block diagram of multi-source coordinated control

3 多源自适应下垂控制器

3.1 基于 SOC 的多源自适应下垂控制器

由于传统下垂控制的下垂系数是固定的, 所以当 BES 单元的 SOC 处于不同状态时, 微源之间的功率分配是固定的, 这可能导致蓄电池频繁出现过度充电或深度放电, 失去对直流母线电压的支撑能力, 还会降低蓄电池的使用寿命^[25]。SOC 是衡量蓄电池剩余功率的关键指标, 也是影响微网功率互济能力的重要因素。蓄电池作为多源协调控制策略的核心, 必需避免其因为 SOC 到达边界而退出运行。因此, 设计一种基于储能 SOC 的自适应下垂控制器以避免蓄电池过度充电或深度放电是必不可少的。

本文设计的多源自适应下垂控制器的本质是

基于下垂控制框架构建 SOC 快速收敛函数, 修改下垂系数, 使氢能系统主动响应储能 SOC 的变化, 避免蓄电池过度充电或深度放电, 实现 SOC 动态平衡和负载均流。

在多源自适应下垂控制器的作用下, 当蓄电池处于充电状态时, 即 $U_{bus} > U_N$, 其下垂系数会随着 SOC 的增大而增大, 避免 SOC 快速达到上限; 当蓄电池处于放电状态时, 即 $U_{bus} < U_N$, 其下垂系数会随着 SOC 的减小而增大, 避免 SOC 快速达到下限。BES 单元修正后的下垂系数表达式为

$$R_{BES_i} = \begin{cases} r_{BES}(1 + \Delta SOC_i)^{\varepsilon_i}, & \Delta U_{bus} \geq 0 \\ r_{BES}(1 - \Delta SOC_i)^{\varepsilon_i}, & \Delta U_{bus} < 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: R_{BES_i} 为 BES_i 单元的修正下垂系数; $\Delta SOC_i = SOC_i - SOC_N$ 为 BES_i 单元实际 SOC 与设

定 SOC 的偏差量; ε_i 为收敛调整因子; $\Delta U_{\text{bus}} = (U_{\text{bus}} - U_N) / U_N$, $\Delta U_{\text{bus}} \geq 0$ 表示直流母线电压高于额定值, $\Delta U_{\text{bus}} < 0$ 表示直流母线电压低于额定值。

为了进一步提高控制器对 SOC 趋于边界区域速度的抑制能力, 本文将 ε_i 设置为一个动态变化的值, 并引入一个优化因子来加强对下垂系数的调节, ε_i 的表达式为

$$\varepsilon_i = 1 + \frac{|\Delta \text{SOC}_i|}{K} \quad (4)$$

式中: K 为优化因子, 可通过调整 K 在线优化 ε_i , 以提高对 SOC 趋于边界值速度的抑制效果。

在对储能 SOC 的管理过程中, 蓄电池会在 SOC 较高时降低其充电功率, 或在 SOC 较低时降低其放电功率, 这两种情况将导致母线上不平衡功率的增大。在 BES 单元因 SOC 管理而降低放电功率时, 燃料电池作为功率输出电源, 需要增加其输出功率, 补偿 BES 单元 SOC 管理所增大的不平衡功率。FC 单元修正后的下垂系数表达式为

$$R_{\text{FC}} = \begin{cases} r_{\text{FC}}, & \text{其他} \\ r_{\text{FC}}(1 - \Delta \text{SOC}_{\text{avg}})^{\varepsilon_{\text{avg}}}, & \Delta U_{\text{bus}} < 0, \\ & \Delta \text{SOC}_{\text{avg}} < 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: R_{FC} 为 FC 单元的修正下垂系数; $\Delta \text{SOC}_{\text{avg}} = \text{SOC}_{\text{avg}} - \text{SOC}_N$ 为 BES 单元平均 SOC 与设定 SOC 的偏差量; ε_{avg} 为由 $\Delta \text{SOC}_{\text{avg}}$ 计算出的平均收敛调整因子。

SOC_{avg} 和 ε_{avg} 的表达式为

$$\text{SOC}_{\text{avg}} = \left(\sum_i^n \text{SOC}_i \right) / n \quad (6)$$

$$\varepsilon_{\text{avg}} = 1 + \frac{|\Delta \text{SOC}_{\text{avg}}|}{K} \quad (7)$$

电解槽作为可控功率负载, 可在蓄电池降低其充电功率时增加制氢功率, 补偿 BES 单元 SOC 管理所增大的不平衡功率。EL 单元修正后的下垂系数表达式为

$$R_{\text{EL}} = \begin{cases} r_{\text{EL}}(1 + \Delta \text{SOC}_{\text{avg}})^{\varepsilon_{\text{avg}}}, & \Delta U_{\text{bus}} \geq 0, \\ & \Delta \text{SOC}_{\text{avg}} \geq 0 \\ r_{\text{EL}}, & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

式中: R_{EL} 为 EL 单元的修正下垂系数。

通过对电解槽和燃料电池的下垂系数进行调节, 使其主动响应蓄电池 SOC 的变化, 补偿 BES

单元 SOC 管理所增大的不平衡功率, 减小直流母线电压偏差, 提高系统电能质量。

3.2 多源自适应下垂控制器机理分析

为了验证多源自适应下垂控制器的合理性, 在不失一般性的情况下, 将各单元初始下垂系数取标么值 1, 得到各单元下垂系数随 K 和 SOC 变化的表面图如图 4 所示。

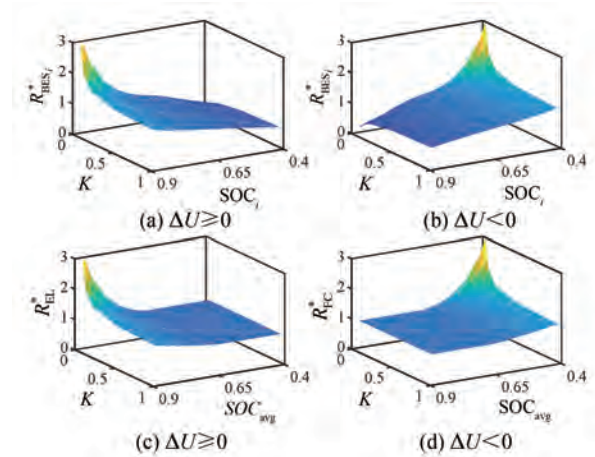


图 4 各单元下垂系数随 K 和 SOC 变化的表面图

Fig. 4 Surface graph of the variation of droop coefficient of each unit with K and SOC

当直流母线电压高于额定值时, 蓄电池处于充电状态, 若此时 SOC 高于额定值, 这意味蓄电池的存储电能较多, 因此 R_{BES_i} 应增大以减小蓄电池的充电功率, R_{EL} 应增大以增大电解槽的制氢功率; 若此时 SOC 低于额定值, 这意味蓄电池的存储电能较少, 因此 R_{BES_i} 应减小以增大蓄电池的充电功率, 如图 4(a) 和图 4(c) 所示。当直流母线电压低于额定值时, 蓄电池处于放电状态, 若此时 SOC 低于额定值, 这意味蓄电池的存储电能较少, 因此 R_{BES_i} 应增大以减小蓄电池的放电功率, R_{FC} 应增大以增加燃料电池输出功率; 若此时 SOC 高于额定值, 这意味蓄电池的存储电能较多, 因此 R_{BES_i} 应减小以增大蓄电池的放电功率, 如图 4(b) 和图 4(d) 所示。上述分析表明, 多源自适应下垂控制器符合预期控制规律。

由图 4 可知, 在 SOC 偏离额定值时, K 取值越小, 下垂系数的变化越大, 这表明优化因子 K 的取值影响 SOC 的收敛速度。此外, 当 ΔSOC_i 较小时, 即电氢混合储能单元处于 SOC 均衡的早期, K 的取值几乎不会影响各单元下垂系数的最终值。

相反,当 ΔSOC_i 较大时,即 SOC 接近边界值,系统处于 SOC 均衡的后期,此时 K 取值越小,下垂系数变化幅度就越大,SOC 的收敛速度就越快。然而,在实际应用中, K 不应该太大或太小,因为 K 太大会降低 SOC 均衡后期的速度,而 K 太小则会导致 SOC 均衡的速度过快,并可能导致系统振荡,因此 K 的取值应满足下垂系数的变化范围。

4 仿真与分析

4.1 仿真设置

为验证所提多源协调控制策略在不同场景下的有效性,本文基于 Matlab/Simulink 搭建了如图 1 所示的电氢耦合孤岛公路直流微电网仿真模型。并根据前述对源荷特性的分析,设置了四种风速和光照构成的组合:高风速和高光照(0~60 s)、高风速和低光照(60 s~120 s)、低风速和低光照(120 s~180 s)以及低风速和高光照(180 s~240 s)。同时在低风速和低光照环境下设置大幅度的恒功率负载波动,以模拟恶劣环境下的 EV 充电负荷冲击。光照、风速及负荷需求情况如表 2 所示。在多种工况下验证多源间的协调控制,BES₁ 和 BES₂ 的 SOC 初始状态分别设置为 80% 和 75%,优化因子 K 取 0.1。

表 2 光照强度、风速及负荷需求情况

Tab. 2 Light intensity, wind speed and load demand

时间/s	光照强度/ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)	风速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	恒功率 直流负 载/kW	恒功率 交流负 载/kW	电阻 负载/ Ω
0~30	1 000	12	720	28	3
30~60	1 000	12	360	28	5
60~90	800	10	450	28	5
90~120	600	9	810	35	3
120~150	400	8	990	35	5
150~180	700	9	900	14	3
180~210	900	9	540	14	2
210~240	900	8	90	7	2

4.2 高 SOC 环境下多源协调控制仿真结果

根据表 2 所设工况,获得高 SOC 环境下多源协调控制仿真结果,如图 5 所示。在 0~30 s、60 s~90 s 和 180 s~240 s 期间,直流母线电压 U_{bus} 处于 U_h 和 U_N 之间,系统以模式 2 运行,BES 单元与 EL 单元相互配合,在制氢的同时共同维持直流母线电压稳定,风光单元工作于 MPPT 模式;在 30 s~60 s 期间,直流母线电压 U_{bus} 高于 U_h ,系统

以模式 1 运行,此时直流母线上功率严重溢出,风光单元由 MPPT 控制切换为有功备用控制,减少向直流母线注入电能,EL 单元达到最大制氢功率,直流母线电压由 BES 单元和 DG 单元共同维持;在 90 s~180 s 期间,直流母线电压 U_{bus} 处于 U_N 和 U_l 之间,系统以模式 3 运行,FC 单元由待机模式切换为下垂控制模式,迅速增发功率,平抑负载波动,与 BES 单元共同维持直流母线电压稳定。

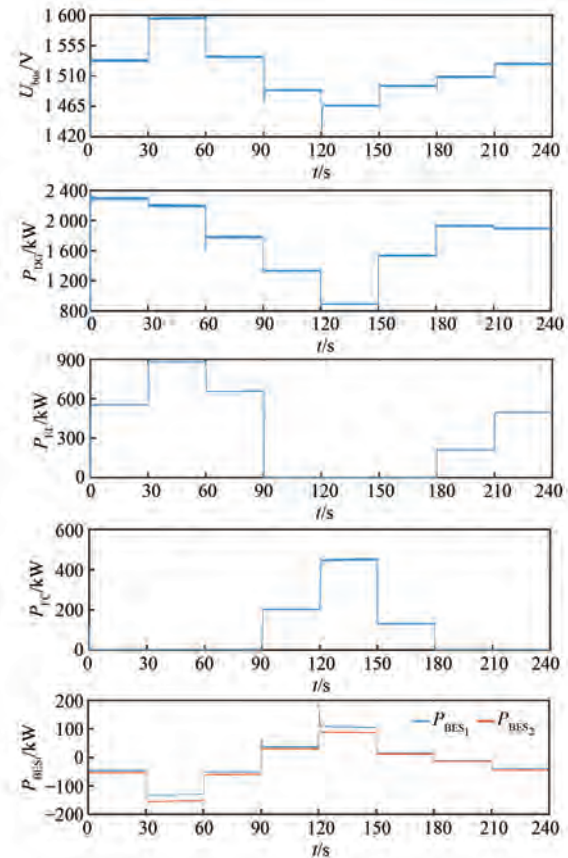


图 5 高 SOC 环境下多源协调控制仿真结果

Fig. 5 Simulation results of multi-source coordinated control in a high SOC environment

保持高 SOC 的仿真环境,进行传统下垂控制与多源自适应控制对比仿真,其中模式 2 所处工况的仿真结果如图 6 所示。在蓄电池 SOC 处于较高值时,多源自适应下垂控制器将抑制蓄电池的充电功率,同时提高电解槽的制氢功率,减小蓄电池 SOC 管理所导致的不平衡功率,有效降低了直流母线电压偏差。此外,在多源自适应下垂控制器的调节下,储能 SOC 偏差由 5% 降低至 4.5%,在 240 s 时,SOC₁ 和 SOC₂ 分别为 80.8% 和 76.3%,低于传统下垂控制下的 82.3% 和 77.3%。

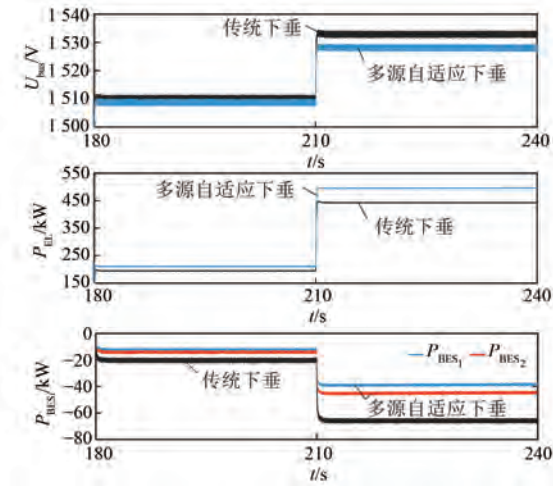


图6 模式2下多源自适应下垂与传统下垂仿真结果对比
Fig.6 Comparison of simulation results between multi-source adaptive droop and traditional droop in mode 2

4.3 低SOC环境下多源协调控制仿真结果

根据表2所设工况,将 BES_1 和 BES_2 的SOC初始状态分别设置为55%和50%,获得低SOC环境下多源协调控制仿真结果,如图7所示。

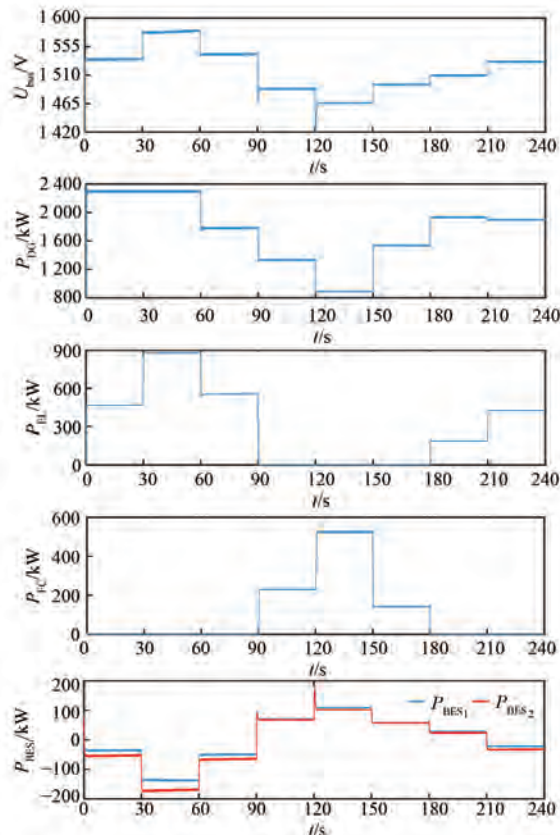


图7 低SOC环境下多源协调控制仿真结果
Fig.7 Simulation results of multi-source coordinated control in a low SOC environment

与高SOC环境下的仿真结果不同,在30s~60s期间,由于多源自适应下垂控制器增大了蓄电池的充电功率,减小了直流母线上的不平衡功率,因此避免了风光单元进入有功备用控制模式,降低了系统的弃风弃光率。保持低SOC的仿真环境,进行传统下垂控制与多源自适应控制的对比仿真,其中模式3所处工况的仿真结果如图8所示。在蓄电池SOC处于较低值时,多源自适应下垂控制器将抑制蓄电池的放电功率,同时提高燃料电池的输出功率,减小蓄电池SOC管理所导致的不平衡功率,有效降低了直流母线电压偏差,提高了系统电能质量。此外,在多源自适应下垂控制器的调节下,储能SOC偏差由5%降低至4.4%,在240s时, SOC_1 和 SOC_2 分别为57.7%和53.3%,高于传统下垂控制下的57.3%和52.3%。因此,多源自适应下垂控制器有效降低了储能SOC的偏差,抑制了SOC向边界值的趋近速度。

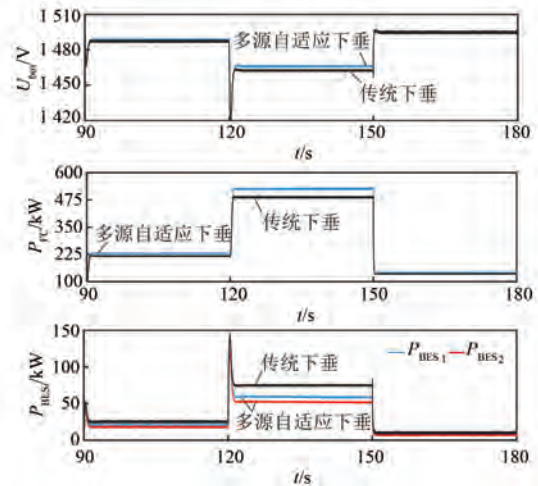


图8 模式3下多源自适应下垂与传统下垂仿真结果对比
Fig.8 Comparison of simulation results between multi-source adaptive droop and traditional droop in mode 3

5 结语

为保证孤岛公路直流微电网中“源-荷-储”协调运行,实现直流母线电压稳定控制,本文提出了一种基于电压偏差和SOC的多源协调控制策略,该控制策略能够使微电网中各单元通过检测直流母线电压偏差进行模式切换,有效平抑DG发电和EV充电行为对直流母线电压的冲击,无需通信技术,即可实现多源间协调自治运行。为避免储能SOC过界,设计了一种多源自适应下垂控制

器,该控制器能实时优化电氢耦合系统各单元间的功率分配,减少 SOC 管理所造成的不平衡功率,实现储能 SOC 平衡,抑制 SOC 向边界值的趋近速度,提高了直流母线电压质量。

参考文献

- [1] 陈国平,董昱,梁志峰. 能源转型中的中国特色新能源高质量发展分析与思考[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(17): 5493-5506.
CHEN G P, DONG Y, LIANG Z F. Analysis and reflection on high-quality development of new energy with Chinese characteristics in energy transition [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(17): 5493-5506.
- [2] 何晨可,朱继忠,刘云,等. 计及碳减排的电动汽车充换储一体站与主动配电网协调规划[J]. 电工技术学报, 2022, 37(1): 92-111.
HE C K, ZHU J Z, LIU Y, et al. Coordinated planning of electric vehicle charging-swapping-storage integrated station and active distribution network considering carbon reduction [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(1): 92-111.
- [3] 周孝信,陈树勇,鲁宗相,等. 能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 1893-1904+2205.
ZHOU X X, CHEN S Y, LU Z X, et al. Technology features of the new generation power system in China [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1893-1904+2205.
- [4] 姜欣,冯永涛,熊虎,等. 基于出行概率矩阵的电动汽车充电站规划[J]. 电工技术学报, 2019, 34(增刊1): 272-281.
JIANG X, FENG Y T, XIONG H, et al. Electric vehicle charging station planning based on travel probability matrix [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(S1): 272-281.
- [5] 李楠,马宏忠. 基于综合预测模型和蒙特卡洛的电动汽车保有量及负荷预测方法研究[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(12): 74-80.
LI N, MA H Z. Research on electric vehicle ownership and load prediction method based on comprehensive prediction model and Monte Carlo [J]. Electric Machines & Control Application, 2022, 49(12): 74-80.
- [6] 蒋雪怡,徐箭,廖思阳,等. 考虑工业用户响应意愿差异性的工业园区多类型负荷协同平抑风电功率波动控制方法[J]. 武汉大学学报(工学版), 2022, 55(9): 876-885.
JIANG X Y, XU J, LIAO S Y, et al. Coordinated control scheme of multi-type loads for wind power fluctuation in industrial parks considering the difference in response willingness of industrial users [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2022, 55(9): 876-885.
- [7] 盛裕杰,郭庆来,刘梦洁,等. 多源数据融合的用户充电行为分析与充电设施规划实践[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(12): 151-162.
SHENG Y J, GUO Q L, LIU M J, et al. User charging behavior analysis and charging facility planning practice based on multi-source data fusion [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(12): 151-162.
- [8] ROY P, ILKA R, HE J, et al. Impact of electric vehicle charging on power distribution systems: A case study of the grid in western Kentucky [J]. IEEE Access, 2023, 11: 49002-49023.
- [9] 王海鑫,袁佳慧,陈哲,等. 智慧城市车-站-网一体化运行关键技术研究综述及展望[J]. 电工技术学报, 2022, 37(1): 112-132.
WANG H X, YUAN J H, CHEN Z, et al. Review and prospect of key techniques for vehicle-station-network integrated operation in smart city [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(1): 112-132.
- [10] PEI W, ZHANG X, DENG W, et al. Review of operational control strategy for DC microgrids with electric-hydrogen hybrid storage systems [J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2022, 8(2): 329-346.
- [11] NASSER M, MEGAHED T F, OOKAWARA S, et al. A review of water electrolysis-based systems for hydrogen production using hybrid/solar/wind energy systems [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2022, 29(58): 86994-87018.
- [12] CHEN Q, ZHOU J, QIU P, et al. Smooth control strategy for fuel cell-battery power system [C]//2019 IEEE 3rd Conference on Energy Internet and Energy System Integration, Changsha, 2019.
- [13] 张勇,彭勇刚,韦巍. 计及制氢效率的光-储-氢系

- 统协调控制策略研究[J]. 太阳能学报, 2021, 42(11): 67-75.
- ZHANG Y, PENG Y G, WEI W. Coordination control for PV, storage and hydrogen system considering hydrogen energy conversion efficiency [J]. *Acta Energetica Sinica*, 2021, 42(11): 67-75.
- [14] FANG R M, LIANG Y. Control strategy of electrolyzer in a wind-hydrogen system considering the constraints of switching times [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(46): 25104-25111.
- [15] LIN Y F, FU L J. A study for a hybrid wind-solar-battery system for hydrogen production in an islanded MVDC network [J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 85355-85367.
- [16] 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 X, PEI W, MEI C X, 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.
- [17] 李奇, 蒲雨辰, 韩莹, 等. 电-氢孤岛直流微电网的分层能量管理[J]. 西南交通大学学报, 2020, 55(5): 912-919.
- LI Q, PU Y C, HAN Y, et al. Hierarchical energy management for electric-hydrogen island direct current micro-grid [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2020, 55(5): 912-919.
- [18] ZHAI D Y, YAO L Z, LIAO S Y, et al. A coordinated control strategy of wind power/hydrogen integrated system [C] // 2022 7th International Conference on Power and Renewable Energy, Shanghai, 2022.
- [19] 喻思, 米阳, 马宇辰, 等. 自适应高通滤波下垂控制的孤岛直流微电网功率分配控制[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(18): 19-26.
- YU S, MI Y, MA Y C, et al. Power distribution control of an island DC microgrid based on adaptive high-pass filter droop control [J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(18): 19-26.
- [20] 徐进, 金逸, 胡从川, 等. 适用于海上风电并网的多端柔性直流系统自适应下垂控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(4): 78-85.
- XU J, JIN Y, HU C C, et al. DC voltage adaptive droop control of multi-terminal VSC-HVDC system for offshore wind farms integration [J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(4): 78-85.
- [21] 袁娜娜, 王允建, 张君, 等. 直流微网中基于SOC的改进下垂控制[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(15): 17-23.
- YUAN N N, WANG Y J, ZHANG J, et al. Improved droop control based on SOC in DC microgrid [J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(15): 17-23.
- [22] 方奇文, 刘海鹏, 王蒙, 等. 改进麻雀搜索算法在光伏阵列MPPT中的应用[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(7): 87-94+103.
- FANG Q W, LIU H P, WANG M, et al. Application of improved Sparrow search algorithm in photovoltaic arrays MPPT [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2022, 49(7): 87-94+103.
- [23] BO W, WANG D L, ZHAO Y, et al. Situation awareness of electric vehicle charging load based on random forest algorithm [J]. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2022, 2022: 2821495.
- [24] 张海峥, 张兴, 李明, 等. 一种有功备用式光伏虚拟同步控制策略[J]. 电网技术, 2019, 43(2): 514-520.
- ZHANG H Z, ZHANG X, LI M, et al. A photovoltaic virtual synchronous generator control strategy based on active power reserve [J]. *Power System Technology*, 2019, 43(2): 514-520.
- [25] SHEN X J, ZHANG X Y, LI G J, et al. Experimental study on the external electrical thermal and dynamic power characteristics of alkaline water electrolyzer [J]. *International Journal of Energy Research*, 2018, 42(10): 3244-3257.

收稿日期:2024-01-16

收到修改稿日期:2024-02-27

作者简介:

赵艺徽(1998-),男,硕士研究生,研究方向为新能源电力系统,zhaoyihui617@163.com;

*通信作者:程鹏(1988-),男,博士,副研究员,研究方向为新能源电力系统,p.cheng@ncepu.edu.cn.

Multi-Source Coordinated Control Strategy Based on Voltage Bias and SOC for Electro-Hydrogen Coupling System

ZHAO Yihui¹, CHENG Peng^{1*}, TIAN Xinshou¹, JIA Limin^{1,2}

(1. North China Electric Power University, China Institute of Energy and Transportation Integrated Development, Beijing 102206, China;

2. State Key Laboratory of Rail Traffic Control and Safety, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Key words: highway DC microgrid; electro-hydrogen coupling; traffic load; coordinated control; adaptive droop control

In the highway DC microgrid, the time characteristics and charging mode characteristics of electric vehicle charging behavior cause varying degrees of impact on the DC bus voltage. And the high-penetration rate of electric vehicle loads presents new challenges to the coordination control of the “source-load-storage” system.

By analyzing the traffic load characteristics of high-speed service areas and the characteristics of micro-source, a multi-source coordinated control strategy based on DC bus voltage bias is proposed. This control strategy can balance the power fluctuation of the grid, alleviate the transmission congestion of the system, reduce the switching times of converter control strategy, and realize the stable operation of DC microgrid on isolated highway. The control strategy takes the battery as the core component of voltage regulation, realizes coordinated and self-consistent operation by detecting the voltage fluctuation of DC bus at the converter port, and realizes the power balance of the system without communication.

At the same time, in order to avoid the battery

out of operation due to the state of charge (SOC), a multi-source adaptive droop controller considering the energy storage SOC is designed. Through the real-time power distribution of the electric hydrogen coupling unit, the hydrogen energy unit can actively respond to the SOC change, which can effectively alleviate the unbalanced power caused by the battery in the SOC management process, and make the SOC approach the set value, so as to improve the service life of lithium battery and the utilization rate of renewable energy.

The simulation results show that the proposed control strategy can achieve coordinated control among multi-source under various operating conditions, stabilize the DC bus voltage fluctuation, and maintain the source load power balance in the system. By comparing the traditional droop control method with the proposed multi-source adaptive droop control method, it is verified that the proposed method can effectively alleviate the unbalanced power caused by the battery in the SOC management process, and realize SOC balancing and load sharing.