

# 基于一体化可再生燃料电池的分布式控制策略研究

王宏<sup>1</sup>, 张孜乐<sup>2</sup>, 吴立君<sup>3</sup>, 于天佑<sup>2\*</sup>

(1. 中铁建港航局集团有限公司 泰兴港务有限公司, 江苏 泰兴 225453;

2. 上海交通大学 电子信息与电气工程学院, 上海 200240;

3. 国网上海市电力公司 浦东供电公司, 上海 200122)

## Research on Distributed Control Strategy Based on Unitized Regenerative Fuel Cell

WANH Hong<sup>1</sup>, ZHANG Zile<sup>2</sup>, WU Lijun<sup>3</sup>, YU Tianyou<sup>2\*</sup>

(1. Taixing Port Co., Ltd., CRCC Harbour & Channel Engineering Bureau Group Co., Ltd., Taixing 225453, China;

2. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

3. Pudong Electric Power Supply Company, State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200122, China)

**Abstract:** [Objective] Hydrogen energy storage has the characteristics of high energy density and high power. Unitized regenerative fuel cell (URFC) is highly integrated hydrogen storage systems, but their application in distributed DC microgrids has been rarely reported. When combined with electrical energy storage, they hold significant potential in islanded microgrid applications. Economic dispatch is a critical issue in islanded microgrids, as they consist of various generation units with different generation costs and power outputs. Coordinating the output of these units to achieve optimal overall economic operation is a complex optimization problem. [Methods] This paper proposed an improved distributed economic control strategy based on the incremental cost (IC) consensus distributed algorithm, which ensured the lowest system cost when the IC of all generation units was equal. Additionally, a specific node was designed to achieve high-quality voltage restoration. Considering the power limitations of each generation unit, corresponding constraints were incorporated into the algorithm to ensure the feasibility of the dispatch results. Finally, simulations were performed using Matlab/Simulink, and a comparative analysis was conducted on the system's dynamic response performance, economic performance, and stability under different operating conditions. [Results] Simulation results showed that the

proposed control strategy could effectively achieve voltage restoration and significantly enhance the reliability and power quality of the photovoltaic-hydrogen storage islanded DC microgrid. Under various disturbances and load changes, the system could quickly recover to a stable state. Compared with traditional methods, the proposed strategy exhibited notable advantages in both economic efficiency and dynamic performance. [Conclusion] The distributed economic control strategy proposed in this paper exhibits good flexibility and adaptability. In practical applications, the node responsible for voltage restoration can dynamically switch to other power units based on power constraints, ensuring continuous and stable operation of the system. Meanwhile, nodes no longer participating in dispatch can be disconnected from the communication network, reducing the communication burdens. This design enhances the system's fault tolerance and scalability.

**Key words:** unitized regenerative fuel cell; economic dispatch; incremental cost consensus; power constraint

**摘要:** [目的] 氢储能具有高能量密度和大功率的特点。一体化可再生燃料电池 (URFC) 是一种集成化程度较高的储氢系统,但在分布式直流微电网中的应用报道较少。URFC 与电能存储相结合,在孤岛微电网应用中具

有很大的潜力。经济调度是孤岛微电网中的一个关键问题,微电网由不同发电单元组成,而这些单元的发电成本和输出功率各不相同,如何协调各单元的出力以实现整体的最经济运行是一个复杂的优化问题。【方法】本文提出了一种改进的分布式经济控制策略,该策略基于增量成本(IC)共识分布式算法,即当所有发电单元的IC相等时,才能获得整个系统的最低成本。此外,本文还设计了一个节点用于实现高质量的电压恢复。考虑到各发电单元的功率限制,在算法中加入了相应的约束条件,确保调度结果的可行性。最后基于 Matlab/Simulink 进行仿真,对比分析了不同工况下系统的动态响应性能、经济性能和稳定性。【结果】仿真结果表明,所提控制策略能够有效实现电压恢复,显著提升光储氢孤岛直流微电网的可靠性和电能质量。在各种扰动和负荷变化情况下,系统均能快速恢复到稳定状态。与传统方法相比,该策略在经济性和动态性能方面都有明显优势。【结论】本文提出的分布式经济控制策略具有良好的灵活性和适应性。在实际应用中,负责电压恢复的节点可以根据功率约束情况动态切换到其他电源单元,保证系统的持续稳定运行;同时,不再参与调度的节点可以从通信网络中断开,减少通信负担。这种设计使得系统具有更强的容错能力和可扩展性。

**关键词:** 一体化可再生燃料电池; 经济调度; 增量成本共识; 功率约束

## 0 引言

随着直流可再生能源和储能系统数量的显著增加,以及现代直流负载的高渗透率,直流微电网变得更加普及<sup>[1-2]</sup>。目前,直流微电网在多种应用中发挥着重要作用,并得到广泛发展。特别是在一些偏远地区,由于电网扩展成本高昂,孤岛式直流微电网显得尤为重要<sup>[3]</sup>。

光伏发电系统作为直流微电网的重要组成部分,具有向偏远地区孤岛负荷供电的能力<sup>[4]</sup>,然而太阳光照限制了光伏发电系统的功率可用性。因此,为了能在较长时间内维持功率输出的稳定,需要配备足够容量的储能系统<sup>[5-6]</sup>。

对于一个孤岛直流微电网,储能系统应该具有足够的容量以确保在相当长的时间内保持较小的损耗<sup>[7-8]</sup>。燃料电池(Fuel Cell, FC)与电解槽(Electrolytic Zone, EZ)耦合形成可再生燃料电池系统,电解堆电解水生成氢气,燃料电池堆利用储存的氢气发电<sup>[9]</sup>。而一体化可再生燃料电池

(Unitized Regenerative FC, URFC)仅通过单一的可逆电池堆就能在电解模式下将电能转化为氢气存储,并在FC模式下根据需求将储存的氢气重新转化为电能。因此,URFC的质量更轻、物理尺寸更小。与其他储能方式相比,氢储能具有极高的功率密度,且使用寿命长、便于储存和运输<sup>[10]</sup>。URFC作为集成了EZ和FC功能的双向功率流能力的模块,进一步增加了氢储能的功率密度,更适用于长时间尺度的经济调度场景,具备孤岛脱机运行能力。

对于由不同发电成本、不同功率的分布式发电(Distributed Generation, DG)机组组成的孤岛微电网来说,经济调度是一个重要问题<sup>[11]</sup>。传统按容量分配功率的方法未能考虑到发电成本。为解决经济调度问题,学者们提出了一些整体协同控制策略,从通信依赖的角度可以将这些策略分为分散式、集中式和分布式三种<sup>[12]</sup>。直流母线信号控制是一种基于母线电压变化的多机组协同运行的分散控制策略<sup>[13-14]</sup>,该策略不需要通信,但有一个固定的电压偏差。基于瞬时成本函数的集中式等效耗氢控制策略的控制目标是使总当量耗氢量最小化<sup>[15]</sup>,该策略实现了经济上的优化,但也要求整个系统通信规则的统一,并且由于其正确运行取决于中心控制器,因此可靠性较低。一致性算法是一种常见的分布式稀疏通信算法,该算法能显著降低通信成本,提高通信可靠性。增量成本(Incremental Cost, IC)共识算法基于不同发电机组的IC相等的原则<sup>[16]</sup>,可使孤岛微电网的总发电成本最小。

此外,在实际的微电网系统中,每个分布式发电机都有其发电极限。因此,应在其能力限制范围内调度所有的分布式发电机。文献[17]为解决孤岛微电网中多个储能单元的功率分配问题,提出了一种基于一致性算法的功率分配和母线电压调节的分布式控制策略。文献[18]针对传统储能控制调节速度慢的问题,将调度周期内误差率引入储能系统来优化控制策略,利用误差率在电流闭环控制前加入反馈误差环节,对储能电池的DC/DC双向控制器进行优化控制。文献[19]基于最近分布式发电机与母线代理之间直接通信,获得了比平均电压恢复方法更高质量的电压,该分布式发电机组仅作为电压恢复机组,不参与

经济一致调节,当达到功率约束时,开始传输电压信息。

本文针对 URFC 时间响应慢,在要求动态调节速度快、短时间内起停频繁的微电网中很难单独应用的问题,提出了一种分布式控制策略,主要工作如下:

(1) 将 URFC 与电池储能系统相结合,形成短时和长时的混合储能系统,并通过仿真分析了瞬态储能电池的支撑能力和稳态下最优功率输出;

(2) 针对 URFC 在分布式能量管理领域中尚不成熟的问题,设计了一种考虑约束条件和高质量电压恢复的改进分布式共识经济调度算法。

## 1 孤岛直流微电网建模与控制

### 1.1 系统结构

典型的光储氢孤岛直流微电网架构包含光伏、负载、锂离子电池和 URFC<sup>[20]</sup>,如图 1 所示。其中,光伏和锂离子电池分别通过 boost 变流器和双向 buck-boost 变流器与直流母线相连。

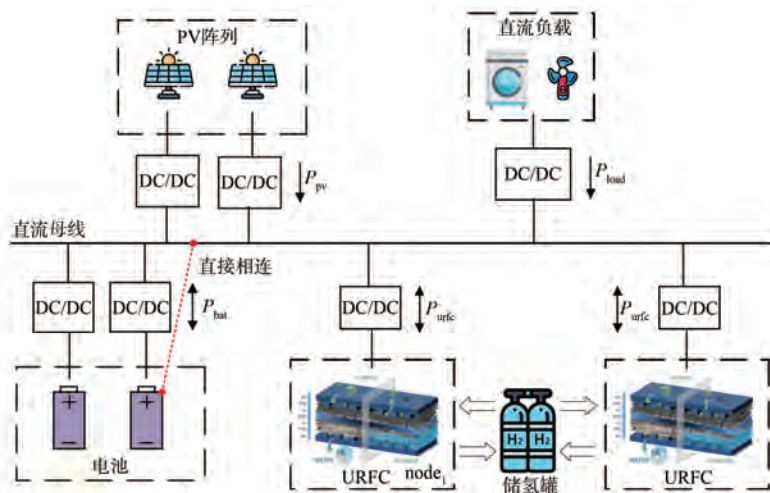


图 1 光储氢孤岛直流微电网架构

Fig. 1 Photovoltaic-hydrogen storage islanded DC microgrid architecture

图 1 中,  $P_{pv}$  为光伏阵列提供的功率;  $P_{bat}$  为电池单元充电或放电的功率;  $P_{urfc}$  为 URFC 单元吸收或放电的功率;  $P_{load}$  为系统负载需求功率。

以机组输出功率方向为正方向,能量平衡可表示为

$$P_{load} = P_{urfc} + P_{pv} + P_{bat} \quad (1)$$

### 1.2 URFC 单元建模

近年来,URFC 单元的建模方法以及接口拓扑也得到了广泛研究<sup>[21]</sup>。URFC 接口变流器示意图如图 2 所示。

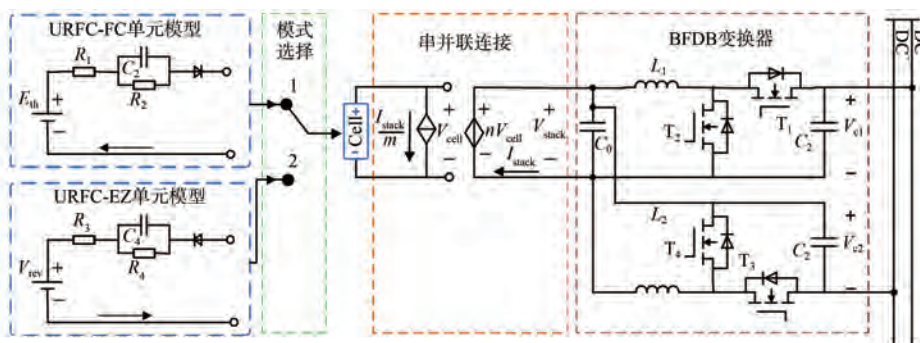


图 2 URFC 接口变流器示意图

Fig. 2 Schematic of the converter with the URFC interface

根据 FC 和 EZ 的不同建模方法,分别对不同模式下的 URFC 单元进行建模。URFC-FC 模式

下的经典经验模型为<sup>[22]</sup>

$$V_{fc} = E_{th} - V_{ohm} - V_{act} - V_{con} \quad (2)$$

式中:  $V_{fc}$  为 FC 的输出电压;  $E_{th}$  为能斯特电压;  $V_{ohm}$ 、 $V_{act}$  和  $V_{con}$  分别为欧姆电压、激活电压和浓度电压。

经验模型可以为开发仿真器提供理论基础。其中,  $E_{th}$  可以通过直流电压源来仿真;  $V_{ohm}$  可以使用串联电阻等效来实现瞬态响应;  $V_{act}$  和  $V_{con}$  可以表征 RC 并联电路的双层电荷效应动态。此外,  $V_{con}$  通常仅在较高的电流密度下才有意义。

URFC-EZ 模式下的经典经验模型为<sup>[23]</sup>

$$V_{ez} = V_{rev} + \eta_{ohm} + \eta_{act} + \eta_{con} \quad (3)$$

式中:  $V_{ez}$  为 EZ 的电池输出电压;  $V_{rev}$  为电池的可逆电位;  $\eta_{ohm}$ 、 $\eta_{act}$  和  $\eta_{con}$  分别为欧姆电压降、活化电压降和浓度电压降。

同样,  $V_{ez}$  可以通过直流电压源来仿真;  $\eta_{ohm}$  可以使用串联电阻等效来实现瞬态响应;  $\eta_{act}$  和  $\eta_{con}$  可以表征 RC 并联电路的双层电荷效应动态。此外,  $\eta_{con}$  通常仅在较高的电流密度下才有意义<sup>[24]</sup>。

根据电路理论的串并联规律<sup>[25]</sup>, 图 2 中橙色部分为串并联转换电路, 其有助于基于单元模型对高功率级 URFC 堆栈进行建模。

### 1.3 URFC 接口变流器建模

由于 URFC 产生大电流和低电压, URFC 需要通过合适的 DC-DC 变流器进行调节和转换。在一些低转换比的应用中, 选择双向 buck-boost 电路作为 URFC 单元的接口变流器<sup>[26]</sup>。然而, 当电压差较大时, 则需要更高增益的双向 DC-DC 变流器。本文基于文献[27]设计了一种用于 URFC 的双向浮动输出双升压变流器 (Bidirectional Floating-output Double-Boost, BFDB), 其由两个绝缘栅双极晶体管、两个二极管、两个电感和两个电容组成。URFC 通过 BFDB 连接到直流母线上, 如图 2 中红色部分所示。BFDB 电压变比为

$$m_{BFDB} = \frac{1+D}{1-D} \quad (4)$$

式中:  $D$  为占空比。

## 2 经济调度问题及分析方法

### 2.1 DG 单元两级控制策略

本文提出的 DG 单元两级控制架构如图 3 所示。其中,  $\lambda_j$  为邻居节点  $j$  发送的信息;  $\lambda_i$  为节点  $i$  的实时观测信息。两级控制策略包括上层经济

调度策略和本地双闭环控制策略<sup>[28]</sup>。通过两级控制策略可以有效地保证系统的稳定性和经济性。其中, 上层经济调度策略通过求解目标经济函数, 计算不同发电机组的最优发电量, 以实现整体经济效益最大化; 本地双闭环控制策略根据上层经济调度策略来调整电压闭环的实际参考电压。实际参考电压表达式为

$$V_i^* = V_{ref} - r_i I_i + \delta V \quad (5)$$

式中:  $V_i^*$  为节点  $i$  的实际参考电压;  $V_{ref}$  为目标电压;  $\delta V$  为控制效果;  $r_i$  为下垂系数;  $I_i$  为单元变流器输出的电流采样。

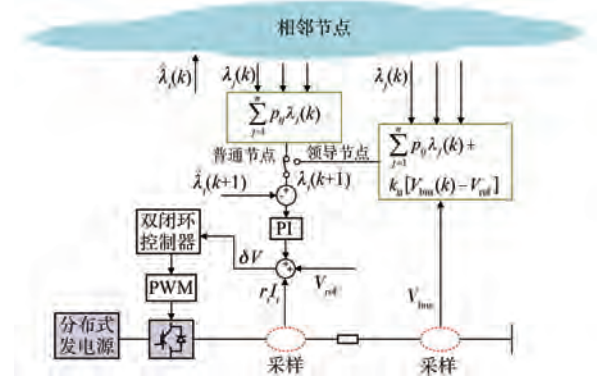


图 3 DG 单元两级控制示意图

Fig. 3 Schematic of two-level control of DG unit

### 2.2 经济调度问题及分析方法

上层经济调度策略属于经济调度问题, 每个 DG 单元的成本函数通常由二次函数表示, 假设有  $n$  个 DG 单元运行在直流微电网中, 其中包含  $n_e$  个电池节点和  $n_h$  个 URFC 节点, 则其成本函数为

$$\begin{cases} C_i(P_i) = \alpha_i P_i^2 + \beta_i P_i + \gamma_i \\ P_i^{\min} \leq P_i \leq P_i^{\max} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $P_i$  为第  $i$  个 DG 单元的有效输出功率;  $C_i$  为成本函数;  $\alpha_i$ 、 $\beta_i$  和  $\gamma_i$  为成本函数系数,  $\alpha_i > 0$ ,  $\beta_i \geq 0$ ,  $\gamma_i \geq 0$ 。

URFC 节点的系数与 URFC 的效率直接相关。URFC 运行于 FC 模式和 EZ 模式且在基本运行范围内时, 效率可简单取为 0.65<sup>[29]</sup>。

经济调度的目标是确定每个 DG 单元的发电量, 使总发电成本最小, 同时保证储能电池荷电状态 (State of Charge, SOC) 在正常范围内<sup>[30]</sup>。URFC 因其功率密度大被用来承担常稳状态的功率, 为保证可靠供电不对其功率进行限制。

因此, 经济性目标函数可以表示为

$$\min C_{\text{cost}} = \min \sum_{i=1}^n (\alpha_i P_i^2 + \beta_i P_i + \gamma_i) + \sum_{i=1}^{n_e} \left[ \frac{C_e^{\text{In}}}{2L_e} P_i \Delta T + \delta_e (SOC - SOC_r) \right] \quad (7)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \sum_{i=1}^n P_i = P_{\text{load}} \\ P_i^{\text{min}} \leq P_i \leq P_i^{\text{max}} \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $C_e^{\text{In}}$  为电池建造成本;  $L_e$  为电池循环次数;  $\delta_e$  为惩罚系数;  $\Delta T$  为两次采样之间的时间间隔;  $SOC_r$  为电池 SOC 参考值。

电池 SOC 与输出功率的关系可由荷电方程来表示:

$$SOC = SOC_0 - \frac{1}{Q} P_i \Delta T \quad (9)$$

式中:  $SOC_0$  为模型预测控制滚动优化的初始值;  $Q$  为额定容量。

综合式(6)~式(9), 经济调度问题可采用拉格朗日乘法求解, 其函数为

$$L(P_1, P_2, \dots, P_n, \lambda) = C_{\text{cost}} + \lambda \left( P_{\text{load}} - \sum_{i=1}^n P_i \right) \quad (10)$$

式中:  $\lambda$  为拉格朗日乘子。

通过式(11)可以得到拉格朗日乘法解:

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial P_i} = 0 \Rightarrow \lambda_i = \frac{\partial C_i}{\partial P_i} = 2\alpha_i P_i + \beta_i + k_e \Delta T \mid_{i \in n_e} \\ \frac{\partial L}{\partial P_i} = 0 \Rightarrow \lambda_i = \frac{\partial C_i}{\partial P_i} = 2\alpha_i P_i + \beta_i \mid_{i \in n_h} \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda} = 0 \Rightarrow \sum_{i=1}^n P_i = P_{\text{load}} \end{cases} \quad (11)$$

$$k_e = \frac{C_e^{\text{In}}}{2L_e} + \frac{\delta_e}{Q} \quad (12)$$

因此, 在功率范围内, 使用拉格朗日乘法解的经济调度问题的最终解为

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda_n \quad (13)$$

值得注意的是, 在短时间尺度内, 式(11)中的  $k_e \Delta T$  极小, 可忽略不计, 因此此时  $\lambda_i$  即为第  $i$  个单元的 IC。

### 2.3 经济调度算法

基于一致性算法的分布式经济调度流程如图 4 所示。选择 IC 作为信息状态, 理想通信网络下矩阵形式的离散时间一致性算法如式(14)和式

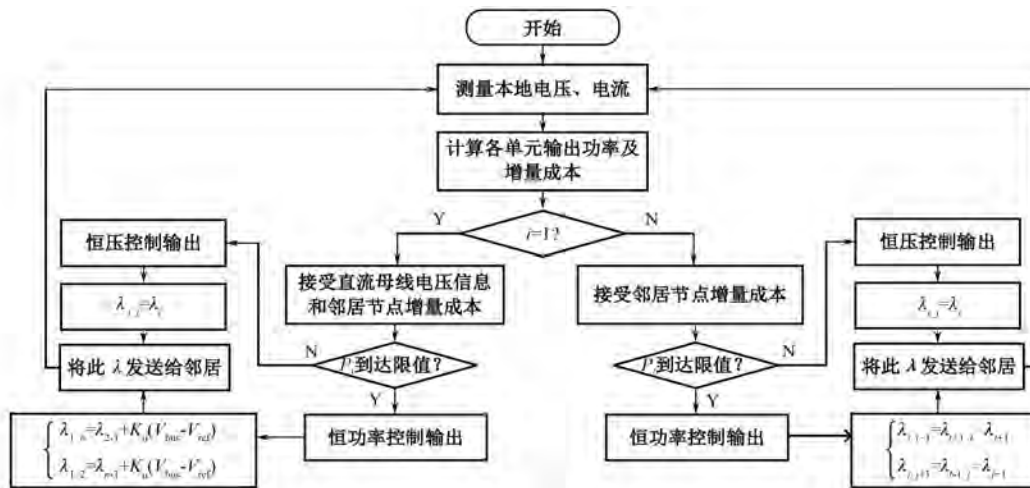


图 4 基于一致性算法的分布式经济调度流程图

Fig. 4 Flowchart of distributed economic dispatch based on consistency algorithm

(15) 所示:

$$\mathbf{A}(k+1) = (\mathbf{I} - \varepsilon \mathbf{L}) \mathbf{A}(k) = \mathbf{P} \mathbf{A}(k) \quad (14)$$

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} d_1 & -a_{12} & \dots & -a_{1n} \\ -a_{21} & d_2 & \dots & -a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ -a_{n1} & -a_{n2} & \dots & d_n \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中:  $a_{ij}$  为节点  $i$  与节点  $j$  通信;  $\varepsilon$  为收敛系数;  $d_i = \sum_{j \neq i} a_{ij}$ ;  $\mathbf{A}$  为各个节点边际成本组成的向量,  $\mathbf{A} = [\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n]^T$ ;  $\mathbf{L}$  为基于图论的图的拉格朗日矩阵, 且  $\mathbf{P} = \mathbf{I} - \varepsilon \mathbf{L}$ 。

由于 URFC 响应速度较慢, 无法瞬态改变功率以响应节点电压的变化。因此, 本文提出一

种高质量电压恢复的方法以支撑节点电压。该方法允许距离直流母线最近的电池节点与母线电压信号采集通信端进行通信,并将其标记为  $\text{node}_1$ ,如图 1 所示;再令该节点为领导者节点,承担高质量电压恢复任务,将电压差额作为拉格朗日乘子法中的惩罚项,从而实现动态共识。由于直流母线电压  $V_{\text{bus}}$  与  $P_{\text{bus}}$  对应,且最终影响功率平衡,所以,该方法还能更快地满足功率平衡约束条件。

对于普通节点,  $\varepsilon$  为适当值时, IC 更新规则为

$$\lambda_i(k+1) = \sum_{j=1}^n p_{ij} \lambda_j(k), \quad i = 2, \dots, n \quad (16)$$

$$p_{ij} = |l_{ij}| / \sum_{j=1}^n |l_{ij}|, \quad i = 2, \dots, n \quad (17)$$

式中:  $p_{ij}$  为原矩阵的变换矩阵的基本变量;  $l_{ij}$  为矩阵  $L$  第  $i$  行第  $j$  列元素。

对于领导者节点, IC 更新规则为

$$\lambda_1(k+1) = \sum_{j=1}^n p_{1j} \lambda_j(k) + k_u [V_{\text{bus}}(k) - V_{\text{ref}}] \quad (18)$$

式中:  $V_{\text{ref}}$  为直流母线额定电压;  $V_{\text{bus}}(k) - V_{\text{ref}}$  为电压恢复项,用作算法的惩罚因子;  $k_u$  为惩罚系数,其作用是控制领导者节点的收敛速度。

当 DG 机组功率超过限制值时,相应节点保持限制值并退出通信网络。

## 2.4 通信传输规则

对领导者节点和普通节点分别进行设计,以保证经济调度和电压恢复任务同时完成。当 DG 单元的功率不超过功率约束时,所有节点的通信传输规则是一致的。设  $\lambda_{i,j}$  为从  $DG_i$  发送到  $DG_j$  的信息,则该规则为

$$\lambda_{i,j} = \lambda_i \quad (19)$$

当达到功率约束时,领导者节点的通信传输规则为

$$\begin{cases} \lambda_{1,n} = \lambda_{2,1} + k_u (V_{\text{bus}} - V_{\text{ref}}) \\ \lambda_{1,2} = \lambda_{n,1} + k_u (V_{\text{bus}} - V_{\text{ref}}) \end{cases} \quad (20)$$

普通节点的通信传输规则为

$$\begin{cases} \lambda_{i,i-1} = \lambda_{i+1,i} = \lambda_{i+1} \\ \lambda_{i,i+1} = \lambda_{i-1,i} = \lambda_{i-1} \end{cases}, \quad i = 2, \dots, n \quad (21)$$

因此,所提出的通信协议等效为功率受限节点的邻居节点之间的通信。

## 2.5 收敛性分析

基于式(16)和式(18),列出矩阵形式的节点边际成本更新方程:

$$\mathbf{A}(k+1) = \mathbf{P}\mathbf{A}(k) + k_u \boldsymbol{\tau} [V_{\text{bus}}(k) - V_{\text{ref}}] \quad (22)$$

式中:  $\boldsymbol{\tau} = [1, 0, \dots, 0]^T$ , 其作用是区分领导者节点和普通节点。

当到达稳态时,式(22)可以写成:

$$\mathbf{A}_{\text{ss}}(k+1) = \mathbf{P}\mathbf{A}_{\text{ss}}(k) = \mathbf{A}_{\text{ss}}(k) \quad (23)$$

式中:  $\mathbf{A}_{\text{ss}}$  为  $\mathbf{A}$  的稳态矩阵。

基于拉格朗日矩阵的两个特性:矩阵任意一行和为 0; 其中一个矩阵特征值为 0。因此可以得到:

$$\begin{cases} (\mathbf{I} - \mathbf{P})\mathbf{A}_{\text{ss}} = 0 \\ (\mathbf{I} - \mathbf{P})\mathbf{I} = 0 \end{cases} \quad (24)$$

式中:  $\mathbf{I} = [1, 1, \dots, 1]^T$ 。

基于式(24),在稳态时,可以求解得到:

$$\mathbf{A}_{\text{ss}} = c\mathbf{I} \quad (25)$$

式中:  $c$  为正实数。

最终所有边际成本趋于一致,因此所提出的经济调度算法可以同时实现高质量的总线电压恢复和经济调度优化两个目标。

## 3 仿真分析

在 Matlab/Simulink 软件中构建了如图 1 所示的光储氢孤岛直流微电网系统模型。为简化分析,储能系统由两块电池和两块 URFC 模块组合而成,光伏组块工作在最大功率点跟踪模式下。4 块电池单元分别标识为 Bat1、Bat2、URFC1 和 URFC2。设置 Bat1 为主节点,主要负责恢复系统电压。DG 单元的额定参数如表 1 所示,各发电单元成本系数如表 2 所示。

表 1 仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters

参数名称	参数值
直流母线电压 $U_{\text{DC}}/V$	400
URFC1-FC 功率 $P_{\text{URFC1-FC}}/kW$	4.2
URFC1-EZ 功率 $P_{\text{URFC1-EZ}}/kW$	12.6
URFC2-FC 功率 $P_{\text{URFC2-FC}}/kW$	3.6
URFC2-EZ 功率 $P_{\text{URFC2-EZ}}/kW$	10.8
URFC 效率	0.65
电池 1 功率 $P_{\text{Bat1}}/kW$	4
电池 1 容量 $Q_{\text{Bat1}}/(kW \cdot h)$	4
电池 2 功率 $P_{\text{Bat2}}/kW$	3
电池 2 容量 $Q_{\text{Bat2}}/(kW \cdot h)$	3

表 2 发电单元成本系数

Tab. 2 Cost coefficients of generation units

发电单元	$\alpha/(\text{元}\cdot\text{kW}^{-2})$	$\beta/(\text{元}\cdot\text{kW}^{-1})$	$\gamma/\text{元}$
URFC1	0.5	1.25	3.42
URFC2	0.55	1.12	3.07
Bat1	0.44	0.62	1.73
Bat2	0.42	0.685	1.52

两个 URFC 的成本函数几乎相同,两个电池的成本函数也几乎相同。设计夜晚放电场景和白天充电场景来验证所提算法的有效性。直流母线电压、DG 单元发电功率以及 DG 单元 IC 的仿真结果分别如图 5~图 7 所示。

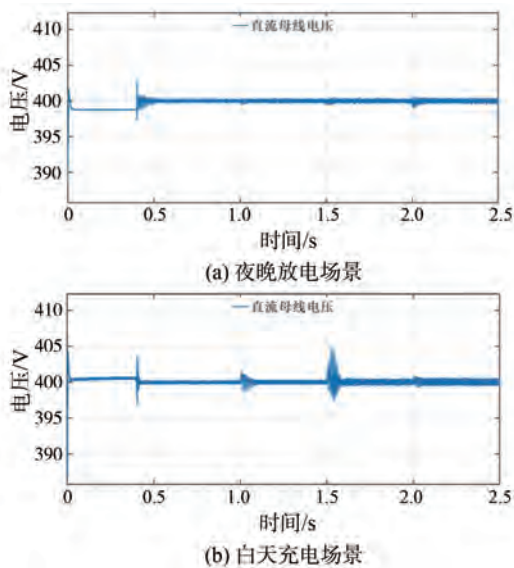


图 5 直流母线电压仿真结果

Fig. 5 Simulation results of DC bus voltage

在夜晚放电场景下,  $t=0\sim 0.4\text{ s}$ , 没有加入共识算法时, 每个 DG 单元根据自己的  $V-P$  下垂曲线放电。在此期间, 每个 DG 单元的功率和 IC 不相等, 并且母线电压存在差异。  $t=0.4\text{ s}\sim 2\text{ s}$ , 加入了共识算法后, 所有 DG 单元均没有达到功率约束。在此期间, 所有 DG 单元的 IC 一致, URFC 的发电功率相等, 电池的发电功率也相等, 母线电压等于额定值。  $t=2\text{ s}\sim 2.5\text{ s}$ , URFC2 达到其功率上限, 在这种情况下, 除 URFC2 外, 其他三个 DG 单元的 IC 达成了新的共识, 母线电压仍等于额定值。可见, 即使有 DG 单元达到其功率约束, 其他 DG 单元也能够运行在最佳经济运行状态。

在白天充电场景下,  $t=0\sim 0.4\text{ s}$ , 没有加入共识算法时, 每个 DG 单元根据自己的  $V-P$  下垂曲

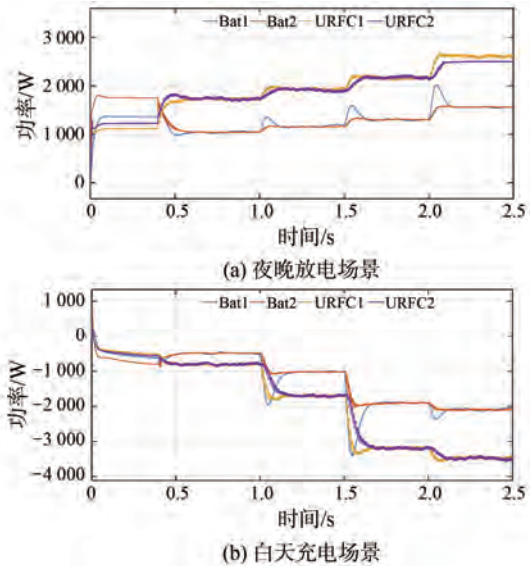


图 6 DG 单元发电功率仿真结果

Fig. 6 Simulation results of DG unit power generation

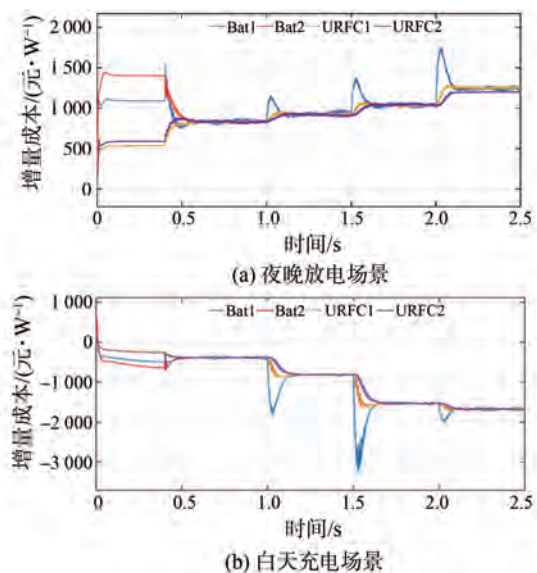


图 7 DG 单元 IC 仿真结果

Fig. 7 Simulation results of DG unit IC

线充电, 在此期间母线电压大于额定值。  $t=0.4\text{ s}\sim 2.5\text{ s}$ , 所有 DG 单元均没有达到功率约束。因此, 在不同的负载条件下, 所有 DG 单元的 IC 达到不同的共识结果, 系统始终运行在最佳经济运行状态, 并且母线电压始终保持准确。

## 4 结语

本文结合 URFC 构建了一个孤岛直流微电网系统。基于微电网的动态和稳态特性, 建立了 URFC 模型, 并将其应用于微电网潮流研究。针

对该系统,提出了一种考虑功率约束和电压恢复的改进经济调度策略。该策略基于 IC 共识算法,将最近节点设置为与母线代理通信的电压恢复节点,以实现高质量的电压恢复。考虑功率约束,当电压恢复单元达到功率约束时,只转发相邻 IC 信息;相反,电压信息也被传递到下一个单元。仿真结果表明,所提控制策略能够有效实现电压恢复,显著提升光储氢孤岛直流微电网的可靠性和电能质量,结果验证了该策略的经济性和可靠性。考虑到仿真中出现的纹波以及电机等特殊负载的场景,在未来研究中将讨论采用模型预测、Nesterov 加速梯度法等方法进一步优化该场景下的电压恢复速度和精度。

### 利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

### 作者贡献

王宏进行了方案设计,张孜乐进行了内容总结与论文撰写,吴立君进行了试验研究,张孜乐、于天佑参与了论文的审核与修改。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

The scheme design was carried out by Wang Hong. The content summary and paper writing were carried out by Zhang Zile. The experimental research was conducted by Wu Lijun. The manuscript was revised by Zhang Zile and Yu Tianyou. All authors have read the last version of paper and consented for submission.

### 参考文献

- [ 1 ] 李霞林,郭力,王成山,等. 直流微电网关键技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 2-17.
- LI X L, GUO L, WANG C S, et al. Key technologies of DC microgrids: An overview [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 2-17.
- [ 2 ] WU D, TANG F, DRAGICEVIC T, et al. Coordinated control based on bus-signaling and virtual inertia for islanded DC microgrids [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(6): 2627-2638.
- [ 3 ] MISHRA M, PATNAIK B, BISWAL M, et al. A systematic review on DC-microgrid protection and grounding techniques: Issues, challenges and future perspective [J]. Applied Energy, 2022, 313: 118810.
- [ 4 ] 曹钦凯,沈玮. 直流微电网能量管理综述[J]. 电工技术, 2023, (4): 211-214.
- CAO Q K, SHEN W. Overview of energy management of DC microgrid [J]. Electric Engineering, 2023, (4): 211-214.
- [ 5 ] 刘畅,卓建坤,赵东明,等. 利用储能系统实现可再生能源微电网灵活安全运行的研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(1): 1-18.
- LIU C, ZHUO J K, ZHAO D M, et al. A review on the utilization of energy storage system for the flexible and safe operation of renewable energy microgrids [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(1): 1-18.
- [ 6 ] LIN X, ZAMORA R. Controls of hybrid energy storage systems in microgrids: Critical review, case study and future trends [J]. Journal of Energy Storage, 2022, 47: 103884.
- [ 7 ] 张保明,陈洁,付菊霞,等. 基于小波包混合储能系统的风功率波动控制策略[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(3): 75-80+94.
- ZHANG B M, CHEN J, FU J X, et al. Control strategy of wind power fluctuation based on wavelet packet hybrid energy storage system [J]. Electric Machines & Control Application, 2020, 47(3): 75-80+94.
- [ 8 ] YU T Y, ISLAM M M, WANG J, et al. Robust optimization in energy management under RESs uncertainties through BESS integration [C]//2023 5th International Conference on Electrical Engineering and Control Technologies, Chengdu, 2023.
- [ 9 ] SHAHRIL A A D, MASDAR M S, MAJLAN E H, et al. A review on mode conversion: Dynamic response of unitized regenerative proton exchange membrane fuel cell [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 50: 91-103.
- [ 10 ] 韩莹,于三川,李萃一,等. 计及阶梯式碳交易的风光氢储微电网低碳经济配置方法[J]. 高电压技术, 2022, 48(7): 2523-2533.
- HAN Y, YU S C, LI L Y, et al. Low-carbon and economic configuration method for solar hydrogen storage microgrid including stepped carbon trading



- [J]. High Voltage Engineering, 2022, 48 (7): 2523-2533.
- [11] COZZOLINO R, CHIAPPINI D, TRIBIOLI L. Off-grid PV/URFC power plant fueled with biogas from food waste: An energetic and economic analysis [J]. Energy, 2021, 219: 119537.
- [12] OLIVARES D E, MMEHRIZI-SANI A, ETEMADI A H, et al. Trends in microgrid control [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5 (4): 1905-1919.
- [13] 谢文强, 韩民晓, 王皓界, 等. 基于虚拟电压的直流微电网多源协调控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(5): 1408-1418.
- XIE W Q, HAN M X, WANG H J, et al. Multi-source coordinated control strategy of DC micro-grid based on virtual voltage [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(5): 1408-1418.
- [14] 薛亚林, 周建萍, 崔屹. 基于直流微电网的混合储能协调控制策略仿真研究[J]. 电机与控制应用, 2017, 44(8): 19-25+37.
- XUE Y L, ZHOU J P, CUI Y. Simulation research on coordinated control strategy of hybrid energy storage based on DC microgrid [J]. Electric Machines & Control Application, 2017, 44(8): 19-25+37.
- [15] 张志文, 李华强. 考虑灵活性的孤岛微电网群分层能量管理策略 [J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48 (20): 97-105.
- ZHANG Z W, LI H Q. A hierarchical energy management strategy for an island microgrid cluster considering flexibility [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(20): 97-105.
- [16] 高文杰, 井天军, 杨明皓, 等. 微电网储能系统控制及其经济调度方法 [J]. 中国电力, 2013, 46 (1): 11-15.
- GAO W J, JING T J, YANG M H, et al. Operation control and economic dispatch of energy storage system for micro-grid [J]. Electric Power, 2013, 46 (1): 11-15.
- [17] ZHANG X L, DONG M, SONG D R, et al. Consensus-based distributed optimization control method in DC microgrid with generation constraints [C]//2019 10th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia, Busan, 2019.
- [18] 曹帅, 吴鑫, 刘锦玉, 等. 光储联合发电系统调度优化控制策略[J]. 电机与控制应用, 2023, 50 (7): 89-94.
- CAO S, WU X, LIU J Y, et al. Scheduling optimization control strategy of PV-and-storage combined power generation system [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(7): 89-94.
- [19] 顾飞, 黄陈蓉, 张建德, 等. 光储系统储能电站的经济优化调度策略[J]. 电工技术, 2020, (14): 18-20.
- GU F, HUANG C R, ZHANG J D, et al. Economic optimal dispatching strategy of energy storage power station in optical storage system [J]. Electric Engineering, 2020, (14): 18-20.
- [20] 王梓灿, 张颖超, 袁春, 等. 直流微电网研究综述 [J]. 信息通信, 2018, (12): 90-95.
- WANG Z C, ZHANG Y C, YUAN C, et al. Overview on DC microgrid research [J]. Information & Communication, 2018, (12): 90-95.
- [21] 余晋宇, 周荔丹, 于天佑, 等. 基于分布式模型预测控制的电-氢混合储能系统控制策略[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(3): 114-124.
- YU J Y, ZHOU L D, YU T Y, et al. Control strategy for electricity-hydrogen hybrid energy storage system based on distributed model predictive control [J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49 (3): 114-124.
- [22] HERNANDZ-GOMEZ Á, LANGARICA-CORDOBA D, MARTINEZ-RODRIGUEZ P R, et al. PEM fuel cell emulators: A review [J]. Electronics, 2023, 12 (13): 2812.
- [23] HERNANDZ-GOMEZ Á, RAMIREZ V, GUILBERT D. Investigation of PEM electrolyzer modeling: Electrical domain, efficiency, and specific energy consumption [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(29): 14625-14639.
- [24] 张新荣, 张伟, 王涛, 等. 百瓦级一体式再生燃料电池堆研究[J]. 电源技术, 2011, 35 (7): 795-798.
- ZHANG X R, ZHANG W, WANG T, et al. Research on hectowatt stack of unitized regenerative fuel cell [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2011, 35(7): 795-798.
- [25] YU J Y, ZHOU L D, MA K, et al. Power-electronics-based mission profile emulator for OBC with simplified BP models [C]//2023 11th International Conference on Power Electronics and

- ECCE Asia, Jeju Island, 2023.
- [26] 胡雪峰, 龚春英. 适用于光伏/燃料电池发电的组合式直流升压变换器 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(15): 8-15+20.
- HU X F, GONG C Y. A combined-type boost converter for solar cell and fuel cell power generating systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32 (15): 8-15+20.
- [27] ZHUO S R, GAILLARD A, PAIRE D, et al. Design and control of a floating interleaved boost DC-DC converter for fuel cell applications [C]//IECON 2018-44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Washington, 2018.
- [28] 赵艺徽, 程鹏, 田新首, 等. 基于电压偏差和 SOC 的电氢耦合系统多源协调控制策略 [J]. 电机与控制应用, 2024, 51(5): 1-11.
- ZHAO Y H, CHENG P, TIAN X S, et al. Multi-source coordinated control strategy based on voltage bias and SOC for electro-hydrogen coupling system [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(5): 1-11.
- [29] LI P A, QIU D K, PENG L F, et al. kW-grade unitized regenerative fuel cell stack design for high round-trip efficiencies [J]. Energy Conversion and Management, 2022, 270: 116277.
- [30] 刘一欣, 郭力, 王成山. 微电网两阶段鲁棒优化经济调度方法 [J]. 中国电机工程学报, 2018, 38 (14): 4013-4022+4307.
- LIU Y X, GUO L, WANG C S. Economic dispatch of microgrid based on two stage robust optimization [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38 (14): 4013-4022+4307.

收稿日期:2024-11-05

收到修改稿日期:2024-12-19

作者简介:

王 宏(1973-),男,硕士,研究方向为智能化港口, wh5102234@163.com;

\*通信作者:于天佑(1997-),男,博士研究生,研究方向为微电网分层控制、能量管理系统和优化调度, 1034036456@qq.com。