

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210944

计及效率特性的电-氢混合储能直流微网经济下垂控制策略

李萃一, 韩莹, 李奇, 陈晓雯, 蒲雨辰, 陈维荣

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 为实现电-氢混合储能微电网在孤岛状态下的自治经济运行, 并降低系统运行对通信网络的依赖, 提出一种计及效率特性的直流微网经济下垂控制策略。该控制策略充分考虑电-氢混合储能系统各子系统的工作特性, 研究了系统运行与效率的关系, 并构建了计及效率特性的电-氢混合储能直流微电网系统成本函数。再结合电-氢混合储能系统的互补工作模式, 驱动各系统基于成本分散地实施电-氢混合储能系统的运行方案, 进而提高直流微电网的自治经济性能。最后, 通过 RT-LAB 实验平台开展实时仿真。结果表明: 所提控制策略相较于传统经济下垂控制, 能够实现燃料电池和电解槽高效率区间的稳定运行, 验证了效率特性对经济运行的必要性; 在一天的运行实验下, 其运行成本相较于传统经济下垂控制降低了 10.38%, 验证了所提出策略的经济性。

关键词: 直流微电网; 效率特性; 电-氢混合储能; 经济下垂控制

Economic droop control strategy of a hybrid electric-hydrogen DC microgrid considering efficiency characteristics

LI Luoyi, HAN Ying, LI Qi, CHEN Xiaowen, PU Yuchen, CHEN Weirong

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: To realize autonomous economic operation of an electric-hydrogen hybrid energy storage microgrid in an island state and reduce the dependence of the system operation on the communication network, this paper proposes a DC microgrid economic droop control strategy that considers efficiency characteristics. It fully considers the operating characteristics of each subsystem of the hybrid electric-hydrogen energy storage system, and studies the relationship between system operation and efficiency. It constructs a cost function of the hybrid electric-hydrogen energy storage DC microgrid system with the efficiency characteristics. In addition, it combines the complementary operation modes of the hybrid system to drive the subsystem to implement the operational scheme of the hybrid electric-hydrogen energy storage system based on cost decentralization, thereby improving the autonomous economic performance of the DC microgrid. Finally, real-time simulation is carried out on the RT-LAB experimental platform. The results show that, compared with traditional economic droop control, the proposed control strategy can achieve stable operation of the system in the high-efficiency range, verifying the need for efficiency characteristics; in a one-day operation experiment, its operating cost is reduced by 10.38%, verifying the economics of the proposed strategy.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52007157).

Key words: DC microgrid; efficiency characteristics; hybrid electric-hydrogen energy storage; economic droop control

0 引言

在能源需求与环境保护的双重压力下, 既改善电力系统调峰性能, 又可促进清洁能源消纳的微电网技术应运而生, 进而推动可再生能源和储能系统

的协调运行成为研究热点^[1-3]。考虑到可再生能源的随机性和间歇性, 为了促进可再生能源消纳并平衡电力波动, 储能系统在微电网中起着重要作用。传统的储能技术如蓄电池自放电率较高^[4], 长时间运行时受限于其规模和可靠性^[5], 更适合于短期电能储存。因此建设含多元的储能系统的微电网变得尤为重要。氢能是一种清洁高效的二次能源, 具有季节性储能的优势^[6]; 氢能系统由燃料电池、电解槽

基金项目: 国家自然科学基金资助(52007157); 中国博士后科学基金资助(2021M692684)

和储氢罐组成，氢气作为能量媒介能够高效地在电解槽和燃料电池之间转化。虽然氢能系统具有持续的充放电能力，但其动态响应相对迟缓，无法单独与具有快速波动性的分布式能源进行配合并难以满足突变负载的需求^[7]。因此，蓄电池系统和氢能系统不同的工作特性在直流微电网中的结合应用可满足突变负载需求并提供长短期功率平衡，这样的互补工作模式可以增强微电网消纳能力、提高运行可靠性和经济性^[8-10]。但传统仅含电储能微电网的控制策略已难以满足含多元储能系统微电网的运行要求，因此有必要探究一种适宜于含氢混合储能微电网的功率分配策略。特别地，由于微电网中分布式电源的多样性，其效率与成本的不同驱动了微电网经济运行的研究^[11-13]。

针对孤岛运行的微电网，通常采用基于直流母线电压信号的下垂控制^[14]，但其并未在功率分配时考虑各分布式电源的成本，无法满足微电网对经济运行的需求。文献[15]首次利用分布式电源的成本函数动态定义下垂控制特性，强制使成本更低的分布式电源出力更多，但其需要事先得知其他系统的成本信息。文献[12]用分布式一致性算法迭代使下垂控制系数收敛至最优经济系数；文献[16]将直流微电网发电成本最优转化为纯电压控制问题，提出一种分布式最优控制，同时实现母线电压调节和发电成本最小化；文献[17]将电压和频率增益转化为下垂系数增量，以自主调节功率分配实现经济运行；但以上文献仅从成本角度出发，并没有考虑实际微源的动态工作特性，运行结果较为理想化。针对光储微电网，文献[18]利用改进的粒子群算法获得微电网最小运营成本并以此设置下垂系数，但其研究对象为仅含蓄电池储能的微电网；文献[19]研究了一种分层控制以实现光储燃系统的功率分配，但其并未考虑到微电网运行的经济性。

此外，系统效率在一定程度上能够反映并影响系统的运行情况，以上文献仅讨论如何分配其运行功率而忽略效率对性能的影响。文献[20]对混合动力有轨电车中燃料电池的效率区间进行优化，提高车辆运行的可靠性和经济性；而在微电网中涉及到含系统效率相关的研究时，由于多元化的储能系统增加了微网的复杂度，现有文献大多考虑将混合储能系统效率设定为常数，以在一定程度上简化设计难度^[21]，然而这将大大降低运行结果的可靠性^[22]。文献[22]考虑对电解槽的效率进行精细建模以实现自适应效率下垂控制；文献[23]利用所提出的能量管理策略最小化运行成本并提高系统效率，但该策略属于集中式控制，对于含风光电氢四种分布式电

源的微电网，有一定的通信压力。

总体来说，现有工作并不能在以实际微源为研究对象的基础上，全面地满足微电网分散控制需求、实际效率特性和运行经济性：利用下垂控制提高经济性的现有研究大多仅计及成本而没有对实际微源进行建模，或是较少探究氢能带来的相关功率分配影响；而考虑实际微源建模的现有研究中，通常采用恒定效率以简化设计难度；在分析效率特性的现有工作中，又忽略了运行经济性和集中式控制带来的通信压力。因此，本文针对电-氢混合储能系统提出了一种计及效率特性的经济下垂控制策略。从蓄电池、燃料电池和电解槽的运行特性切入，构建了计及系统实时效率的微电网成本函数；并结合混合储能系统的互补工作模式，所提经济下垂控制策略能够驱动各系统基于成本实施混合储能系统的运行方案，提高电-氢混合储能微电网的经济运行。最后根据光伏电站典型日的气候数据，并通过RT-LAB半实物仿真平台，将本文提出的策略与传统经济下垂控制策略比较，结果显示本文所提策略的经济性更好，验证了所提策略的有效性和可行性。

1 电-氢混合储能直流微电网

1.1 拓扑结构

本文设计了一种电-氢混合储能的孤岛直流微电网，如图 1 所示。该直流微电网由光伏阵列系统、蓄电池系统、氢能系统(燃料电池、电解槽和储氢罐)和直流负载组成。每个系统通过 DC/DC 变换器连接到 400 V 直流母线。氢作为能量介质，储存在储氢罐中，并可在电解槽和燃料电池之间转换，进而实现微电网中氢燃料的“自给自足”。

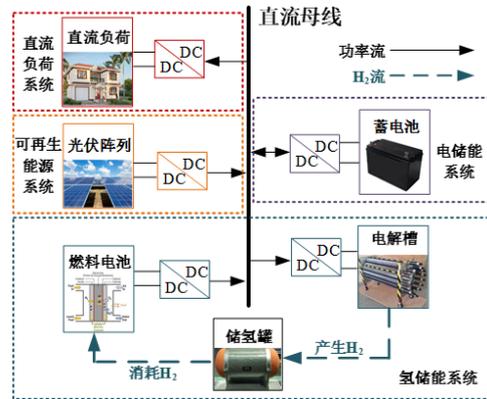


图 1 电-氢混合储能直流微电网结构

Fig. 1 Structure of hybrid electric-hydrogen DC microgrid

具体来说，微电网中负荷需求的能量由光伏系统、蓄电池系统和燃料电池系统提供。其中光伏系

统始终以最大功率点跟踪方式工作,是不可控电源,而蓄电池、燃料电池和电解槽均可控。为了最大化消纳可再生能源,光伏系统发电优先供给负荷,当其无法满足负荷需求时,蓄电池和燃料电池运行以维持供需平衡;而当光伏系统发电大于负荷需求时,光伏系统产生的多余电能不仅可以给电池充电,还可以驱动电解槽产生氢气并将其存储在储氢罐中,作为可长期存储在直流微网中的备用能源,氢气可以提供给燃料电池以补充高负荷下的功率缺额或是在长时间尺度下实现对微电网的功率支撑。

我们已在之前的工作中完成了直流微电网各系统的建模^[24]。元件参数如表 1 所示。

表 1 各元件参数

Table 1 Component paraments

类型	项目	参数
蓄电池组	容量/Ah	300
	额定电压/V	200
	最大功率/W	4 000
	初始荷电状态	50%
燃料电池	最大功率/W	3 000
电解槽	最大功率/W	3 000

1.2 电-氢混合储能系统的效率特性

利用储能系统来平衡可再生能源与负荷需求差异是微电网常见的措施,而多元化的储能系统将带来经济性问题。除常见的运行功率与成本之间的关系外,由于电-氢混合储能系统的效率与各自运行条件息息相关,因此系统效率的建模是必不可少的。

1.2.1 蓄电池的效率特性

蓄电池的系统效率与其开路电压、内阻和充放电电流有关^[1]。

$$\begin{cases} \eta_{\text{dis}} = \left(1 + \sqrt{1 - \frac{4R_{\text{dis}} \cdot U_{\text{bat}} \cdot I_{\text{bat}}}{U_{\text{ocv}}^2}} \right) / 2 \\ \eta_{\text{chg}} = 2 / \left(1 + \sqrt{1 - \frac{4R_{\text{chg}} \cdot U_{\text{bat}} \cdot I_{\text{bat}}}{U_{\text{ocv}}^2}} \right) \end{cases} \quad (1)$$

式中: U_{bat} 是蓄电池的开路电压; R_{bat} 是蓄电池的内阻; I_{bat} 是蓄电池的充放电电流。其中 U_{bat} 和 R_{bat} 与 I_{bat} 和蓄电池的荷电状态(State of charge, SoC)有关。

$$\begin{cases} U_{\text{bat}} = f_1(\text{SoC}, I_{\text{bat}}) \\ R_{\text{bat}} = \begin{cases} R_{\text{dis}} = f_2(\text{SoC}, I_{\text{bat}}), I_{\text{bat}} \geq 0 \\ R_{\text{chg}} = f_3(\text{SoC}, I_{\text{bat}}), I_{\text{bat}} < 0 \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

参考文献[20]得到锂电池系统的 U_{bat} 和 R_{bat} 的关系如式(3)所示。

$$\begin{cases} U_{\text{bat}} = u_1 \text{SoC}^3 + u_2 \text{SoC}^2 + u_3 \text{SoC} + u_4 \\ R_{\text{dis}} = d_1 \text{SoC}^3 + d_2 \text{SoC}^2 + d_3 \text{SoC} + d_4 \\ R_{\text{chg}} = c_1 \text{SoC}^3 + c_2 \text{SoC}^2 + c_3 \text{SoC} + c_4 \end{cases} \quad (3)$$

式中, u_i 、 d_i 和 c_i 分别是开路电压、放电电阻和充电电阻的多项式系数。

依据式(2)和式(3),得到蓄电池的效率曲线如图 2(a)所示,蓄电池系统效率与功率呈反比而与 SoC 呈正比,且与蓄电池系统处于充电或放电状态有关,放电状态下的最低效率值高于充电状态下的最低效率值,但整体而言,蓄电池的效率在全功率、SoC 区间均保持较高值($\geq 75\%$)。

1.2.2 燃料电池的效率特性

燃料电池电堆电压与其极化现象有关,可表示为

$$\begin{cases} V_{\text{fc}} = E_{\text{oc}} - (V_{\text{act}} + V_{\text{ohmic}} + V_{\text{conc}}) \\ V_{\text{act}} = a + b \ln i_{\text{fc}} \\ V_{\text{ohmic}} = i_{\text{fc}} R_{\text{fc}} \\ V_{\text{conc}} = R_{\text{fc}} T \ln(1 - i_{\text{fc}} / i_{\text{Lfc}}) / (nF) \end{cases} \quad (4)$$

式中: E_{oc} 是开路电压; V_{act} 是活化过电压; V_{ohmic} 是欧姆过电压; V_{conc} 是浓差过电压; a 和 b 为常数; i_{fc} 是燃料电池输出电流; R_{fc} 是燃料电池内阻; n 为参与反应的电子数; i_{Lfc} 是极限电流值; F 是法拉第常数。

燃料电池的效率可由电堆效率 η_{stack} 、电效率 E_{fc} 和燃料利用率 η_{fc} 相乘得到。

$$\begin{cases} \eta_{\text{fc}} = E_{\text{fc}} \eta_{\text{stack}} \eta_f \\ \eta_{\text{stack}} = \frac{V_c}{E} \times 100\% \\ E_{\text{fc}} = \frac{P_{\text{fc}}}{P_{\text{stack}}} \end{cases} \quad (5)$$

式中: V_c 为燃料电池的单片电压; E 与燃料电池电堆的反应热有关; P_{fc} 和 P_{stack} 分别代表了燃料电池系统输出功率和电堆功率。

依据式(4)和式(5)及文献[25]相关参数得到燃料电池的效率曲线如图 2(b)所示。极化现象导致随着输出电流的增加,其电堆电压不断下降,而燃料电池的功率逐渐上升,因此系统效率呈现出先增后降的趋势;且低功率时燃料电池的运行效率很低,在该功率(效率)区间的运行将显著影响其性能^[20],因此其不宜工作在低功率(低效率)区间;高功率时系统效率虽有降低,却依然保持在较高值。

1.2.3 电解槽的效率特性

与燃料电池相似,电解槽也存在极化现象,其电压可以表示为可逆电压与过电压之和。

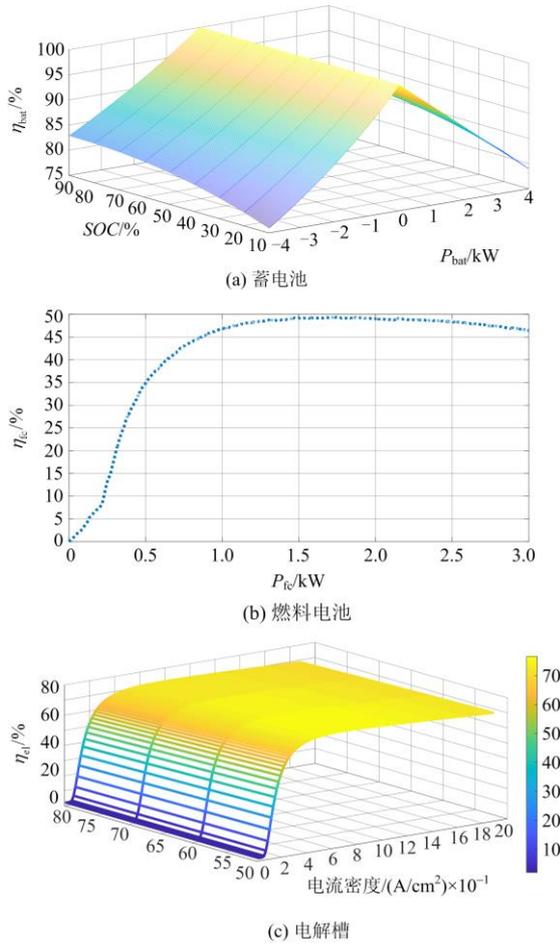


图2 系统效率

Fig. 2 System efficiency curves

$$\begin{cases}
 V_{el} = V_{rev_el} + \eta_{act_el} + \eta_{ohm_el} \\
 \begin{cases}
 V_{rev_el} = 1.229 - 0.9 \times 10^{-3} (T_{el} - 298) \\
 \eta_{act_el} = \alpha_1 \ln\left(\frac{i_{el_cell}}{i_{0,a}}\right) + \alpha_2 \ln\left(\frac{i_{el_cell}}{i_{0,c}}\right) \\
 \eta_{ohm_el} = \frac{\delta_m i_{el_cell}}{\sigma_m}
 \end{cases}
 \end{cases} \quad (6)$$

式中： T_{el} 为电解槽的工作温度； α_1 和 α_2 是浓度过电压的两个系数； i_{el_cell} 是电流密度； $i_{0,a}$ 和 $i_{0,c}$ 为阴极和阳极的交换电流密度； δ_m 和 σ_m 代表薄膜厚度和薄膜的导电性。

电解槽的系统效率由法拉第效率和电压效率构成，计算式如式(7)所示。

$$\begin{cases}
 \eta_{el} = \eta_F \times \eta_V \\
 \eta_F = 96.5 \exp(0.09 / I_{el_cell} - 75.5 / I_{el_cell}^2) \\
 \eta_V = V_{th} / V_{el_cell}
 \end{cases} \quad (7)$$

式中： η_{el} 、 η_F 和 η_V 分别代表电解槽系统效率、法

拉第效率和电压效率； I_{el_cell} 是电解槽的工作电流； V_{th} 是热中性电压。

其中，电流密度与电流之间的关系如式(8)所示。

$$i_{el_cell} = I_{el_cell} / A_{ele} \quad (8)$$

式中， A_{ele} 是有效面积。

热中性电压与可逆电压有关，如式(9)所示。

$$V_{th} = V_{rev_el} + \frac{T_{el} \Delta S}{nF} \quad (9)$$

式中， ΔS 是熵。

不难发现，电解槽效率与温度、电流密度相关，根据式(6)一式(9)，并参考文献[26]的相关数据，搭建了电解槽的电效率模型如图2(c)所示。低电流密度时系统运行效率极低，因此与燃料电池类似，其也宜在高功率(高效率)区间运行工作；而当电流密度升高到一定程度后，系统效率也会存在略微的下降，这是由于极化程度过高，消耗了大量电能。温度对电解槽运行效率的影响不及电流密度，本文将电解槽的工作温度设置在75 °C。

2 计及效率特性的经济下垂控制策略

经济运行的目标旨在依据所提出的策略实施混合储能系统的运行方案，减少微电网的运行成本。本章首先构建了计及效率特性的微电网运行成本函数，然后将其引入经济下垂控制参数以转化优化成本问题为电压控制问题，在允许电压偏差及功率约束内，提高微电网的经济性能。

2.1 直流微电网的控制

光伏发电系统采用最大输出功率点跟踪控制以尽可能提高对可再生能源的消纳能力。电-氢混合储能系统利用所提出的经济下垂控制策略，以平衡光伏出力与负荷需求之间差值并实现微电网的自治经济运行。此外，考虑到对突变负载的快速响应将显著影响燃料电池和电解槽的运行性能，对其爬坡速率进行一定的限制，并加入一阶惯性环节以平缓相应功率变化。微电网各系统的控制框图如图3所示。

2.2 直流微电网系统运行成本函数

微电网的使用成本取决于多种因素，包括能源类型、运行特性、额定值和系统效率等因素，通常可利用能否调度进行划分。成本一般包含如购置成本、运维成本、燃料成本等。本文研究的是一个孤岛的直流微电网，其中不可调度的光伏系统通常因为其工作在最大功率点而不参与经济运行；而氢能系统和蓄电池负责平衡光伏与负荷之间的功率差额。由于它们具有可调度性，也就意味着会参与系统运行成本的计算，另外，氢能系统可实现氢气的自给自足，也就意味着不需要额外的氢气燃料成本。

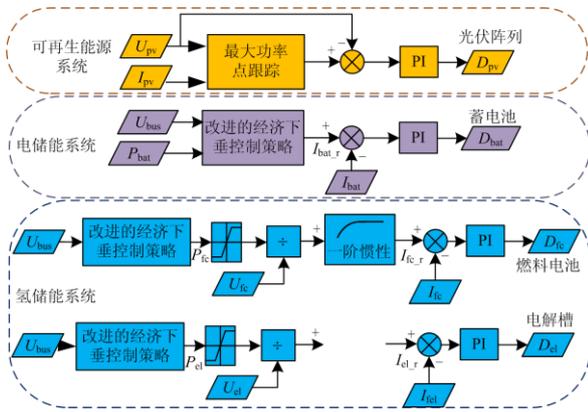


图3 系统控制框图

Fig. 3 System control block diagram

本文采用购置成本 C_{in} 和运维成本 $C_{O\&M}$ 来衡量寿命周期下各系统的运行经济性, 表达式为

$$C_i = \frac{1}{\eta_i(t) \times L_i} (C_{i_in} + C_{i_O\&M}) \quad (10)$$

式中: i 表示第 i 个系统; L_i 表示该系统的寿命; $\eta_i(t)$ 为 t 时刻的系统效率。

燃料电池与电解槽的寿命通常是以为小时为单位的, 而蓄电池的寿命通常用循环次数表示, 利用文献[27]将循环次数转换为以为小时为单位的寿命, 以此统一电-氢混合储能系统的衡量标准。

最终, 蓄电池的运行成本用式(11)来表示。

$$C_{bat}(t) = \frac{1000(C_{bat_in} + C_{bat_O\&M}) \times P_{bat}(t)}{C_N U_{bat_N} N_{cycles} N_{bat_p} \eta_{bat}(t)} \quad (11)$$

式中: C_N 是蓄电池的容量; U_{bat_N} 是蓄电池的额定电压; N_{cycles} 是蓄电池的串联个数。

燃料电池和电解槽的运行成本为

$$C_{fc/el}(t) = \frac{C_{fc/el_in} + C_{fc/el_O\&M}}{L_{ifetime_fc/el} \eta_{fc/el}(t)} \quad (12)$$

因此孤岛直流微电网的总成本可以通过将上述提议的成本相加来计算。

$$C_{total}(t) = \frac{C_{fc/el_in} + C_{fc/el_O\&M}}{L_{ifetime_fc/el} \eta_{fc/el}(t)} + \frac{1000P_{bat}(t)(C_{bat_in} + C_{bat_O\&M})}{C_N U_{bat_N} N_{cycles} N_{bat_p} \eta_{bat}(t)} \quad (13)$$

为避免扭曲系统经济性的公平评价, 有必要将成本归一化。

$$c_i^*(t) = \frac{C_i(t)}{P_{max,i}} \quad (i \in \text{bat, fc, el}) \quad (14)$$

如何根据运行成本合理决定氢能系统和电储能系统的运行方案是本节研究的重点。

2.3 经济下垂控制策略

采用下垂控制的思想来实现孤岛微电网的分散式功率分配, 基于电压的下垂控制策略的通用公式如式(15)所示。

$$U_{bus} = U_{max} - (f_1 n_1 P_i(t) + f_2 n_2 C_i(t)) \quad (15)$$

$$n_1 = \frac{U_{max} - U_{min}}{S}, \quad n_2 = \frac{U_{max} - U_{min}}{C_{max} - C_{min}}$$

式中: U_{bus} 和 U_{max} 分别是直流母线的实际电压和最大允许电压; f_1 和 f_2 是运行模式标志位; $P_i(t)$ 和 $C_i(t)$ 分别是系统的输出功率和运行成本; S 为系统的容量。

(1) 当 $f_1 = 1, f_2 = 0$ 时, 式(15)为基于容量的传统下垂控制。此时系统运行功率与系统容量呈反比, 即容量越大的系统输出功率越大, 如图4(a)所示。

(2) 当 $f_1 = 0, f_2 = 1$ 时, 式(15)为基于成本的传统经济下垂控制, 如图4(b)所示, 运行成本越高的系统输出功率越小。

针对传统下垂控制中基于系统容量分配功率的特性, 若成本高的系统容量大, 这将带来微电网运行成本偏高的问题。因此, 本研究所设计的控制策略通过调节下垂系数改变功率分配特性, 使其能够按照成本分配功率。由式(15)可知, 传统经济下垂控制 U_{bus} 和 U_{max} 这两个全局参数将形成任何时刻所有系统一起运行的场景(如图4(b)虚线所示), 当高成本系统运行在轻负载时会削弱微电网的经济性能。因此, 本研究所设计的控制策略将系统运行成本引入控制参数(电压参考值)使其根据系统当前运行成本和负荷水平调整电-氢混合储能各系统的工作模式, 避免高成本系统运行在轻负载条件下。

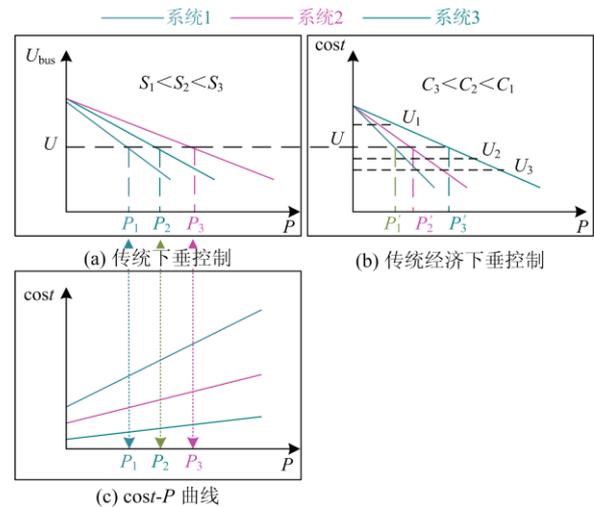


图4 不同下垂控制下的曲线图

Fig. 4 Curves under different types of droop control

由于成本与效率特性、运行功率的耦合关系难以适用于传统经济下垂系数 n_2 的设计,因此本文利用功率-电压下垂关系来解决以上传统下垂控制和传统经济下垂控制的弊端:提出的下垂控制策略应根据运行成本调节电-氢混合储能系统的工作模式,使系统运行在适宜效率区间,尽可能地节省成本;此外,改进后的控制策略还应拥有类似于传统经济下垂控制中功率与成本呈反比的经济特性,以提高微电网的经济性能。

因此,在功率-电压下垂关系下,本文预期的控制目标 G 如下:

G1 由计及效率特性的系统运行成本调整电-氢混合储能各系统的运行方案,避免高成本在轻负载运行的经济不必要性和低功率低效率区间运行对系统性能的不利影响。

G2 类似传统经济下垂控制中按成本分配功率的经济特性,即 $c_1^* > c_2^*$ 时, $P_1 < P_2$; $c_1^* \leq c_2^*$ 时, $P_1 \geq P_2$ 。

为此,本文提出了一种改进的经济下垂控制策略,在 P-U 下垂关系的基础上,将系统运行成本转化为下垂控制参数,以进一步减少微电网运行成本,实施分散的经济运行方案。

由于电-氢混合储能系统具有充放电双功能,需扩展传统的单象限下垂控制为双象限下垂控制结构。定义放电时功率为正,充电时功率为负,本文所提出的改进的经济下垂控制策略如式(16)所示。

$$\begin{cases} U_{\text{bus}} = U_{\text{max},i}(t) - l_i(t)P_i(t), \text{放电} \\ U_{\text{bus}} = U_{\text{min},i}(t) + q_i(t)P_i(t), \text{充电} \end{cases} \quad (16)$$

式中: $U_{\text{max},i}(t)$ 和 $U_{\text{min},i}(t)$ 分别是 t 时刻系统 i 的电压最大值和电压最小值; $l_i(t)$ 和 $q_i(t)$ 是 t 时刻下垂系数。其中,在放电阶段中, $U_{\text{bus}} \leq U_{\text{ref}}$, 放电电压会随着负荷需求的增多而降低,因此放电时存在电压上限 $U_{\text{max},i}$, 计算时符号取“-”;而在充电阶段中, $U_{\text{bus}} \geq U_{\text{ref}}$, 充电电压会随着负荷需求的增多而升高,此时存在电压下限 $U_{\text{min},i}$, 计算时符号取“+”。

采用传统经济下垂控制将成本引入下垂系数的构造思想—将成本与控制参数进行结合,但为了避免其可能带来的经济性能不高现象,实现预期控制目标 G1, 本文选择将归一化后的系统运行成本引入式(15)中电压参考值,即 U_{max} (或扩展二象限的 U_{min}) 的构造中。

$$\begin{cases} U_{\text{max},i}(t) = U_{\text{ref}} - \Delta U \times c_i^*(t)/d, \text{放电} \\ U_{\text{min},i}(t) = U_{\text{ref}} + \Delta U \times c_i^*(t)/d, \text{充电} \end{cases} \quad (17)$$

构造 $U_{\text{max},i}(t)$ 和 $U_{\text{min},i}(t)$ 的主要目的在于能够根

据系统运行成本调整各系统的工作模式,进而不同于传统下垂控制中各系统在任何负载水平下的统一运行,因此这两个参数应能在不同成本下有明显的区分,以节省一定的运行成本。

由式(17)可知, d 越大,成本 $c_i^*(t)$ 对控制参数的影响越小,此时 $U_{\text{max},i}(t)$ 和 $U_{\text{min},i}(t)$ 的设置几乎不起作用; d 越小,成本 $c_i^*(t)$ 对控制参数的影响越大。但若 d 太小,当其一直小于 $c_i^*(t)$ 时,会出现 $U_{\text{max},i}(t)$ 和 $U_{\text{min},i}(t)$ 超出母线电压允许波动范围的现象,系统将一直不工作。因此,分别比较 $d=1, 2, 5, 10$ 时不同负荷下电-氢混合储能系统的工作模式和运行功率后,从系统运行的效率区间和微电网运行成本角度而言,选取 $d=2$ 更为合适(详见 3.1 节)。

此外,为防止设计的电压参考值 $U_{\text{max},i}(t)$ 和 $U_{\text{min},i}(t)$ 超过母线电压所允许的最大波动范围,对它们进行一定的限制,即当其小于母线电压允许最小值或是升高超过母线电压允许最大值时,会分别修正 $U_{\text{max},i}(t)$ 和 $U_{\text{min},i}(t)$ 为母线电压允许最小值和母线电压允许最大值。设计如式(18)所示。

$$\begin{cases} U_{\text{max},i}(t) = \max\left(U_{\text{ref}} - \frac{\Delta U \times c_i^*(t)}{2}, U_{\text{min}}\right), \text{放电} \\ U_{\text{min},i}(t) = \min\left(U_{\text{ref}} + \frac{\Delta U \times c_i^*(t)}{2}, U_{\text{max}}\right), \text{充电} \end{cases} \quad (18)$$

式中: U_{ref} 是直流母线的额定电压,本文设置为 400 V; ΔU 是母线电压的允许最大偏差,为 5%; U_{min} 和 U_{max} 是直流母线电压的最小值和最大值。

与传统下垂控制类似,下垂系数 $l_i(t)$ 和 $q_i(t)$ 构造如式(19)所示。

$$\begin{cases} l_i(t) = \frac{U_{\text{max},i}(t) - U_{\text{min}}}{P_{\text{max},i}}, \text{放电} \\ q_i(t) = \frac{U_{\text{max}} - U_{\text{min},i}(t)}{P_{\text{max},i}}, \text{充电} \end{cases} \quad (19)$$

式中, $P_{\text{max},i}$ 是系统 i 的功率最大值。在 P-U 关系中,通过这样的设置,放电时将 U_{bus} 的变化限制在 $(U_{\text{max},i}(t), U_{\text{min}}]$; 在充电阶段将 U_{bus} 的变化限制在 $(U_{\text{min},i}(t), U_{\text{max}}]$ 。

然而,式(19)这样的参数设计会出现和基于容量的传统下垂控制所带来的输出功率与系统容量呈反比的情形,削弱了微电网经济性。因此本文考虑在满足微电网母线电压变化范围的要求下重新设计该下垂系数以满足预期控制目标 G2。以蓄电池和燃料电池放电的情况进行分析;从直流母线电压 U_{bus} 这一全局变量切入,即 U_{bus} 相等,采用 ϕ 和 ψ 来代

替各系统的 $P_{\max,i}$, 讨论分母的取值会如何影响电-氢混合储能系统的功率分配, 其中 ϕ 和 ψ 取值范围的集合为 $\{P_{\max,\text{bat}}, P_{\max,\text{fc}}, P_{\max,\text{el}}\}$ 。

$$\begin{aligned} U_{\max,\text{bat}} - \frac{U_{\max,\text{bat}} - U_{\min}}{\phi} \times P_{\text{bat}} = \\ U_{\max,\text{fc}} - \frac{U_{\max,\text{fc}} - U_{\min}}{\psi} \times P_{\text{fc}} \end{aligned} \quad (20)$$

化简式(20)可得

$$\frac{\phi \cdot \psi}{2} \times (c_{\text{bat}}^* - c_{\text{fc}}^*) = (1 - \frac{c_{\text{fc}}^*}{2}) \cdot P_{\text{fc}} \cdot \phi - (1 - \frac{c_{\text{bat}}^*}{2}) \cdot P_{\text{bat}} \cdot \psi \quad (21)$$

进行如式(22)设置。

$$(1 - \frac{c_{\text{fc}}^*}{2}) - x = 1 - \frac{c_{\text{bat}}^*}{2} \quad (22)$$

将式(22)代入式(21), 有

$$x \cdot \psi \cdot (\phi - P_{\text{bat}}) = (1 - \frac{c_{\text{fc}}^*}{2}) \cdot (P_{\text{fc}} \cdot \phi - P_{\text{bat}} \cdot \psi) \quad (23)$$

A. 当 $c_{\text{bat}}^* > c_{\text{fc}}^*$ 时, 即 $x > 0$

由于 ϕ 代表了系统功率限值, 意味着 $\phi > P_{\text{bat}}$, 因此等式左边是恒大于 0, 那么等式右边也应恒大于 0。通过数学分析可推知当 $\psi/\phi=1$ 时, 满足与其控制目标 G2, 即 $P_{\text{bat}} < P_{\text{fc}}$ 。

B. 当 $c_{\text{bat}}^* < c_{\text{fc}}^*$ 时, 即 $x < 0$

此时等式左边恒小于 0, 因此等式右边也应恒小于 0。通过数学分析可推知当 $\psi/\phi=1$ 时, 满足预期控制目标 G2, 即 $P_{\text{bat}} \geq P_{\text{fc}}$ 。

因此设置 $\psi/\phi=1$ 时可同时满足 $c_{\text{bat}}^* > c_{\text{fc}}^*$ 时, $P_{\text{bat}} < P_{\text{fc}}$ 和 $c_{\text{bat}}^* \leq c_{\text{fc}}^*$ 时, $P_{\text{bat}} \geq P_{\text{fc}}$ 的按成本分配功率的控制目标。又由于蓄电池负责控制直流母线电压, 为了控制电压波动在最大允许误差内, 设置 $\phi = \psi = P_{\max,\text{bat}}$ 。

最后, 式(16)的构造如式(24)所示。

$$\begin{cases} U_{\text{bus}}(t) = U_{\max,i}(t) - \frac{U_{\max,i}(t) - U_{\min}}{P_{\max,\text{bat}}} \times P_i(t), \text{ 放电} \\ U_{\text{bus}}(t) = U_{\min,i}(t) + \frac{U_{\max} - U_{\min,i}(t)}{P_{\max,\text{bat}}} \times P_i(t), \text{ 充电} \end{cases} \quad (24)$$

根据式(10), 系统的运行功率会影响时变的效率进而影响到系统的运行成本, 而下垂控制参数又与当前系统运行成本有关(式(18)), 因此运行效率与控制参数这两个变量存在耦合关系, 进而使系统运行效率会调节下垂系数。根据式(24)画出本文所提出的改进经济下垂控制策略, 如图 5 所示, 计及系

统实时效率后运行成本的非线性将导致下垂系数的时变性。下垂调节过程进而与系统运行成本和系统稳定运行的效率区间紧密联系, 使得整个下垂控制能够涵盖这两方面: 从运行成本角度来说: 由于下垂控制参数 $U_{\max,i}(t)$ 和 $U_{\min,i}(t)$ 与当前系统运行成本有关, 其将会影响电-氢混合储能系统的工作模式, 避免系统低功率、低效率运行带来的高运行成本; 从系统性能角度来说, 低效率运行将对系统性能, 特别是氢能系统性能带来不利影响^[15], 而时变效率与控制参数的耦合关系保证了氢能系统的下垂调节过程中能够稳定运行在适宜的效率区间。

因此, 本文所提出的经济下垂控制策略全面地考虑系统效率特性及运行成本, 分散地实施电-氢混合储能系统的运行方案, 提高微电网经济性。

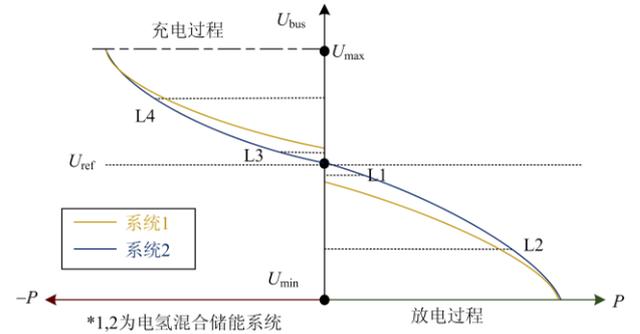


图 5 改进经济下垂控制图

Fig. 5 Curves of the improved economic control strategy

3 仿真实验

为了评估所提出的计及效率特性的经济下垂控制策略的性能和有效性, 基于 RT-LAB 实时仿真系统, 搭建了图 1 平台的电-氢混合储能直流微电网系统, 该平台由 RT-LAB 平台、主机和 DSP 控制器组成, 如图 6 所示。在本系统中, 可以将基于 Simulink 的数学模型上传到 RT-LAB 模拟器上; DSP 收集并处理 RT-LAB 输出的信号, 主机可以对波形进行检测, 实时监控运行过程。

储能系统的成本及寿命参数如表 2 所示^[1]。

表 2 储能系统成本及寿命

Table 2 Cost and lifetime of storage system		
类型	项目	参数
蓄电池	购置成本/(元/kWh)	1 000
	寿命/h	1 500
燃料电池	购置成本/(元/kW)	10 000
	寿命/h	50 000
电解槽	购置成本/(元/kW)	18 000
	寿命/h	50 000

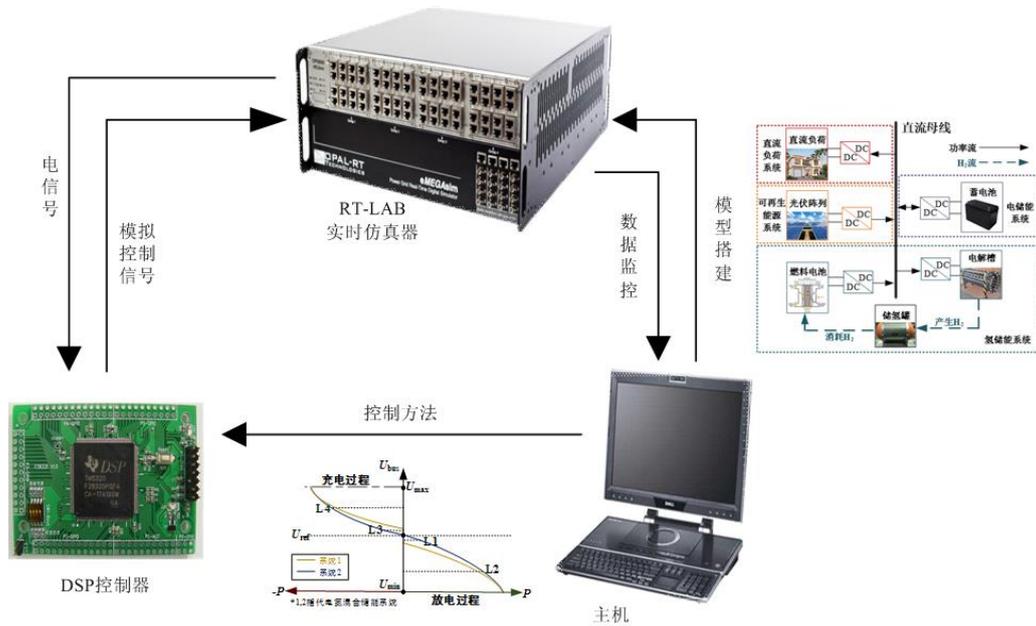


图 6 RT-LAB 平台结构图

Fig. 6 Diagram of RT-LAB platform structure

3.1 参数 d 的影响

如图 7 所示，随着参数 d 的增大，氢能系统开始动作时的系统净负荷逐渐降低，微电网运行成本逐渐增加；氢能系统稳定运行的功率区间与效率区间也随着 d 的增大而降低，进而影响了氢能系统的

性能。 $d = 2$ 时，氢能系统开始运行的时间早于 $d = 1$ 时对应的的时间，此时微电网成本更高，而启动后 $d = 2$ 对应的微电网成本小于或等于 $d = 1$ 对应的的成本。综合考虑系统运行的效率区间和微电网运行成本，选取 $d = 2$ 更为合适。

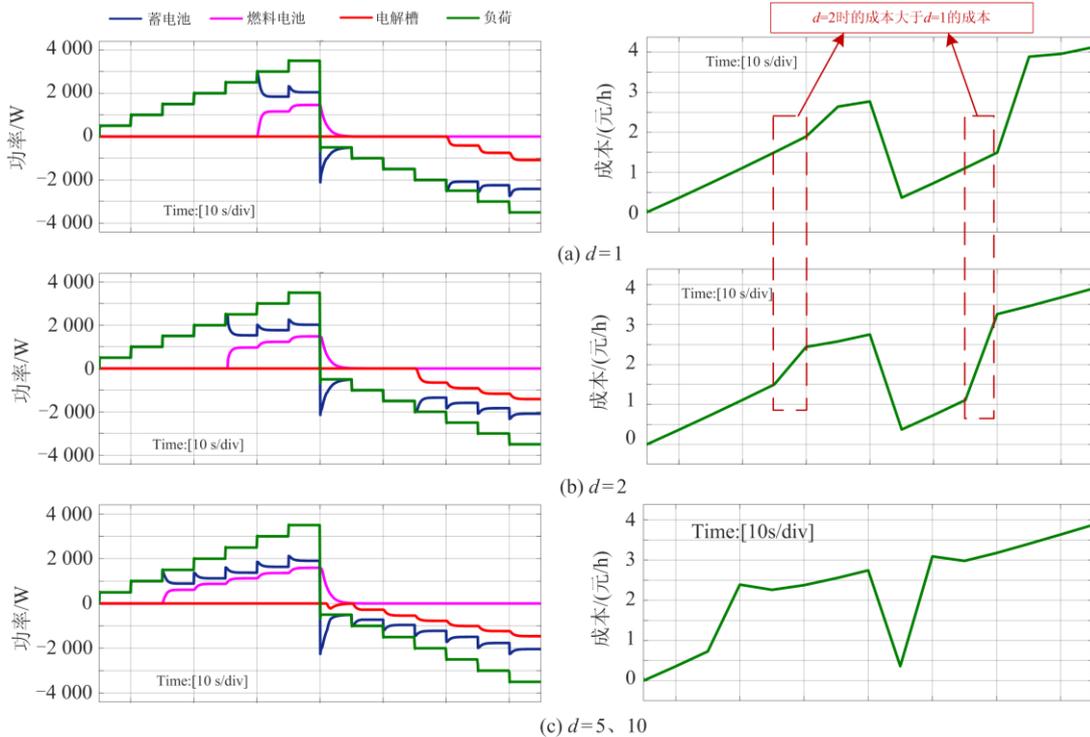


图 7 不同 d 的结果图

Fig. 7 Results of different d

3.2 算例分析 I—运行效果对比

为了突出实时效率对系统运行的影响, 本文对传统经济下垂控制和所提出控制策略分别考虑恒定系统效率和实时效率的实验进行了对比分析。

传统经济下垂控制的功率分配情况如图 8 所示。

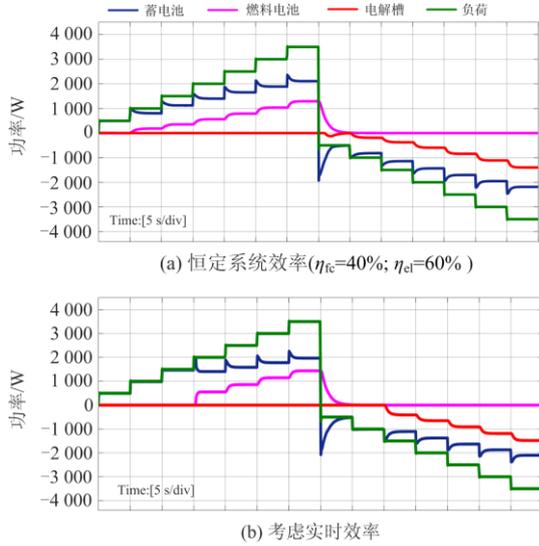


图 8 传统经济下垂控制策略下的功率分配图

Fig. 8 Power distribution diagram under traditional economic droop control method

(1) 若考虑恒定的系统效率, 传统经济下垂控制仅根据成本比例来分配功率, 因此在任何情况下蓄电池和燃料电池/电解槽均会一起工作 ($|P_{\text{net}}|=500 \text{ W}$ 时, 燃料电池和电解槽出力 $< 1 \text{ W}$)。

(2) 为避免低效率启动对系统性能的影响, 在该策略下设置燃料电池和电解槽的最低运行功率为 300 W , 满足该要求时蓄电池和燃料电池或者电解槽便会一起动作。当净负荷 $|P_{\text{net}}|=2000 \text{ W}$ 时, 蓄电池和燃料电池/电解槽一起工作。

本文提出的经济下垂控制策略的功率分配情况如图 9 所示。

(1) 若考虑恒定系统效率, 那么 $U_{\text{max,fc}}$ 和 $U_{\text{min,el}}$ 将是一个定值, 此时燃料电池和电解槽出力的最低净负荷 $P_{\text{net}} = P_{\text{load}} - P_{\text{pv}}$ 将由设定的系统效率决定。

(2) 考虑系统的实时效率后, 由于氢储能系统在低功率区间效率很低, 会导致较高的系统成本进而影响 $U_{\text{max,fc}}(t)$ 和 $U_{\text{min,el}}(t)$, 对应图 5 的 L1 和 L3。如图 9(b) 所示, 在 $|P_{\text{net}}| \leq 2000 \text{ W}$ 时, 仅有蓄电池工作; 当效率提高后, $U_{\text{bus}}(t) \leq U_{\text{max,fc}}(t)/U_{\text{min,el}}(t) \leq U_{\text{bus}}(t)$, 对应图 5 中的 L2 和 L4, 此时燃料电池/电解槽将与蓄电池一起工作。

此外, 为了验证所提控制策略下成本与功率近

似成反比的有效性, 给出了计及实时效率运行下的成本如图 10 所示。结合图 9(b) 和图 10 可知: 当 $0 < P_{\text{net}} < 3500 \text{ W}$ 或 $P_{\text{net}} < -4500 \text{ W}$ 时, 蓄电池的归一化成本小于氢能系统, 因此蓄电池出力更多; 而当 $P_{\text{net}}=5500 \text{ W}$ 时, 燃料电池的归一化成本更小, 此时燃料电池放电略大于蓄电池。证明了本文所改进的控制策略拥有类似传统经济下垂控制中成本与功率呈反比的经济特性。

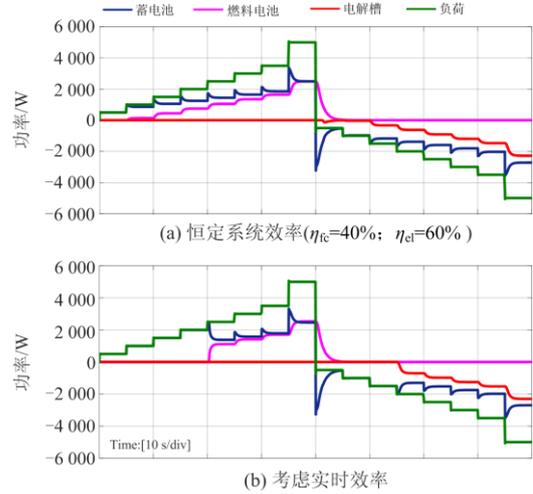


图 9 改进的经济下垂控制策略功率分配图

Fig. 9 Power distribution diagram of the improved economic control strategy

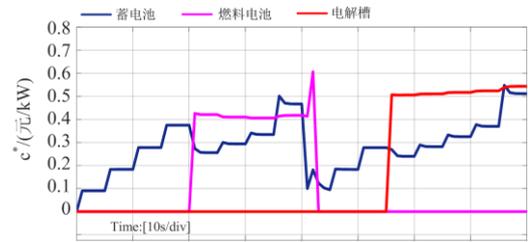


图 10 改进的经济下垂控制策略的成本

Fig. 10 Costs of the improved economic control strategy

对比图 8(b) 和图 9(b) 可知, 相比较本文所提出的策略, 燃料电池和电解槽启动时的净负荷均更低, 启动时燃料电池和电解槽的工作功率也均更低。本文所提出的策略通过设置 $U_{\text{max},i}(t)$ 和 $U_{\text{min},i}(t)$, 使得燃料电池和电解槽启动时净负荷更高, 即可以在不加启动功率限制的前提下, 避免它们在低功率、低效率区间的运行, 实现了高效率区间的稳定运行, 更贴近燃料电池和电解槽的实际运行需求; 且根据式 (12) 可知, 燃料电池和电解槽的运行成本与效率呈反比, 进而避免了低效率工作带来的较高运行成本。进而验证了本文所提出的策略对于提升微网经济性能的可行性。此外, 从图 8、图 9 可以看出,

燃料电池和电解槽输出功率在负荷变化时并不会突变,变化平缓,有一定上升时间。

对比实际运行效率和本文所提出的策略后可以发现,计及效率特性的经济运行策略有效地改进了传统经济下垂控制下微电网运行经济性不高和没有具体结合系统实际工作特性的不足。

3.3 算例分析 II—全天运行经济性对比

从图 11 可以看出,本文所设计的策略在 09:45 左右,电解槽开始加入蓄电池一起吸收光伏与负荷之间的功率差额,16:00 后蓄电池优先放电以维持系统功率平衡,而 17:30 后燃料电池开始工作以满足高负荷需求。而传统经济下垂控制下,电解槽在 09:00 就开始工作,17:20 左右燃料电池开始工作以满足高负荷需求。

从功率平衡角度来说,在微电网功率有盈余或缺额时,传统经济下垂控制下储能系统会立即动作,相较于本文提出的策略,这将延长氢能系统在低功率(低效率)运行区间的时长:电解槽启动时间与停止时间分别提前和延后近 1 h;而燃料电池分别提前和延后了近 10 min;而从成本角度来说,传统经济下垂控制策略下,氢能系统在低功率(低效率区间)的工作会显著增加微电网运行成本,而本文所提出的策略则通过下垂控制参数的设计有效地规避了传统经济下垂控制的这一局限性,使得微电网的运行成本降低了 10.38%,验证了本文所提策略的经济性。

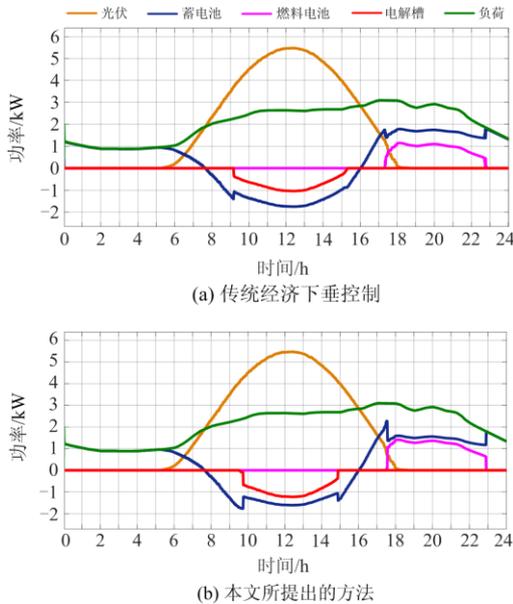


图 11 24 h 微电网功率分配曲线

Fig. 11 24 h microgrid power distribution curves

此外,对比两种策略下直流微电网的电压母线,如图 12 所示,本文构造的下垂控制参数将引起母线

电压偏差稍大于传统经济下垂控制策略,但其依然满足 5% 电压偏差的电能质量要求;电压的变化也侧面反映了电-氢混合储能系统能够执行提出策略下的经济运行方案,验证了控制参数设计的有效性。

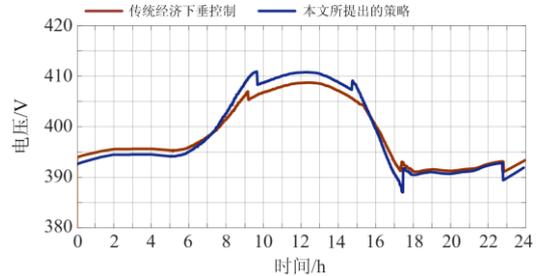


图 12 直流母线电压图

Fig. 12 DC bus voltage curves

对比结果总结如表 3 所示,本文提出的策略可以保证燃料电池和电解槽在高功率、高效率区间的稳定运行,相较于传统经济下垂控制策略,燃料电池平均效率提高了 2.5%,电解槽提高了 0.5%;所提策略下微电网运行成本降低了 10.38%,提高了微电网自治运行经济性;本文的电压偏差率偏高 0.75%,但依然满足电能质量要求。

表 3 对比结果

Table 3 Comparison results

策略	效率	成本/元	电压偏差
传统经济下垂控制	蓄电池: 92.5%	36.6	2.5%
	燃料电池: 45%		
	电解槽: 69%		
本文提出的策略	蓄电池: 92.3%	32.8	3.25%
	燃料电池: 47.5%		
	电解槽: 69.5%		

4 结论

本文搭建了电-氢混合储能直流微电网系统模型,考虑电-氢混合储能系统的工作特性和互补运行特性,设计了一种计及效率特性的经济下垂控制策略,并基于实际的负载工况及环境条件进行了全天候的仿真验证,其结论如下:

(1) 通过考虑混合储能系统的效率特性,在不设置启动功率的约束下可直接实现氢储能系统高功率、高效率区间的稳定运行,提高氢储能系统的效率,进而提高整个微电网的能量利用率。

(2) 根据所提出的经济下垂控制策略,有效地实施微电网各系统的运行方案,避免氢储能系统长时间低功率、低效率区间工作带来的高运行成本;并满足功率分配与成本近似呈反比的经济特性,使得

微电网的运行成本降低了 10.38%。

(3) 相较于传统经济下垂, 本文所提出的策略使燃料电池平均效率提高了 2.5%, 电解槽提高了 0.5%, 提高了系统的总能量利用率。

参考文献

- [1] 陈维荣, 傅王璇, 韩莹, 等. 计及需求侧的风-光-氢多能互补微电网优化配置[J]. 西南交通大学学报, 2021, 56(3): 640-649.
CHEN Weirong, FU Wangxuan, HAN Ying, et al. Optimal configuration of wind-solar-hydrogen multi-energy complementary microgrid with demand side[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2021, 56(3): 640-649.
- [2] UZUNOGLU M, ONAR O C, ALAM M S. Modeling, control and simulation of a PV/FC/UC based hybrid power generation system for stand-alone applications[J]. Renewable Energy, 2009, 34(3): 509-520.
- [3] 何黎君, 程杉, 陈梓铭. 考虑交互功率控制和双边竞价交易的多微电网双层优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(11): 10-17.
HE Lijun, CHENG Shan, CHEN Ziming. A scheduling model of a multi-microgrid system based on bi-layer optimization with consideration of PCC power control and bilateral bidding[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(11): 10-17.
- [4] 孙立明, 杨博. 蓄电池/超导混合储能系统非线性鲁棒分数阶控制[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(22): 76-83.
SUN Liming, YANG Bo. Nonlinear robust fractional-order control of battery/SMES hybrid energy storage systems[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(22): 76-83.
- [5] NEVES D, PINA A, SILVA C A. Comparison of different demand response optimization goals on an isolated microgrid[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2018, 30: 209-215.
- [6] SCHMIDT O, MELCHIOR S, HAWKES A, et al. Projecting the future levelized cost of electricity storage technologies[J]. Joule, 2019, 3(1): 81-100.
- [7] MANE S, MEJARI M, KAZI F, et al. Improving lifetime of fuel cell in hybrid energy management system by Lure-Lyapunov-based control formulation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(8): 6671-6679.
- [8] 蔡国伟, 孔令国, 彭龙, 等. 基于氢储能的主动型光伏发电系统建模与控制[J]. 太阳能学报, 2016, 37(10): 2451-2459.
CAI Guowei, KONG Lingguo, PENG Long, et al. Modeling and control of active PV generation system based on hydrogen storage[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2016, 37(10): 2451-2459.
- [9] 徐靖, 赵霞, 罗映红. 氢燃料电池并入微电网的改进虚拟同步机控制[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(22): 165-172.
XU Jing, ZHAO Xia, LUO Yinghong. Improved virtual synchronous generator control for hydrogen fuel cell integration into a microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(22): 165-172.
- [10] 李健强, 余光正, 汤波, 等. 考虑风光利用率和含氢能流的多能流综合能源系统规划[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(14): 11-20.
LI Jianqiang, YU Guangzheng, TANG Bo, et al. Multi-energy flow integrated energy system planning considering wind and solar utilization and containing hydrogen energy flow[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(14): 11-20.
- [11] 朱翰超, 马蕊. 考虑需求侧管理的冷热电联供微电网优化配置方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(2): 139-146.
ZHU Hanchao, MA Rui. Optimal configuration method of CCHP microgrid considering demand side management[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(2): 139-146.
- [12] 吕振宇, 吴在军, 窦晓波, 等. 自治直流微电网分布式经济下垂控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(4): 900-910.
LÜ Zhenyu, WU Zaijun, DOU Xiaobo, et al. A distributed droop control scheme for islanded DC microgrid considering operation costs[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(4): 900-910.
- [13] HU B, WANG H, YAO S. Optimal economic operation of isolated community microgrid incorporating temperature controlling devices[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(1): 70-80.
- [14] 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 Xialin, GUO Li, WANG Chengshan, et al. Key technologies of DC microgrids: an overview[J].

- Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 2-17.
- [15] NUTKANI I U, WANG P, LOH P C, et al. Cost-based droop scheme for DC microgrid[C] // 2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), September 14-18, 2014, Pittsburgh, PA, USA.
- [16] PENG J, FAN B, LIU W. Voltage-based distributed optimal control for generation cost minimization and bounded bus voltage regulation in DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(1): 106-116.
- [17] ZHOU Q, SHAHIDEHPOUR M, LI Z, et al. Two-layer control scheme for maintaining the frequency and the optimal economic operation of hybrid AC/DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(1): 64-75.
- [18] WANG S, DU M, LU L, et al. Multi-level energy management of a DC microgrid based on virtual-battery model considering voltage regulation and economic optimization[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(3): 2881-2895.
- [19] 薛花, 胡英俊, 董丙伟, 等. 基于分层控制的光-储-燃直流供电系统能量管理方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(21): 53-62.
- XUE Hua, HU Yingjun, DONG Bingwei, et al. Hierarchical control based energy management method for photovoltaic-energy storage fuel cell DC generation system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(21): 53-62.
- [20] LI Q, WANG T, DAI C, et al. Power management strategy based on adaptive droop control for a fuel cell-battery-supercapacitor hybrid tramway[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(7): 5658-5670.
- [21] 李惠琴, 陈燕, 王岗红, 等. 计及功率预测误差的主动配电网实时经济调度方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(16): 100-107.
- LI Huiqin, CHEN Yan, WANG Ganghong, et al. Real-time economic dispatching method for active distribution networks considering power prediction errors[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(16): 100-107.
- [22] ZHANG Y, WEI W. Decentralized coordination control of PV generators, storage battery, hydrogen production unit and fuel cell in islanded DC microgrid[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(15): 8243-8256.
- [23] CAU G, COCCO D, PETROLLESE M, et al. Energy management strategy based on short-term generation scheduling for a renewable microgrid using a hydrogen storage system[J]. Energy Conversion and Management, 2014, 87: 820-831.
- [24] LI L, CHEN W, HAN Y, et al. A stability enhancement method based on adaptive virtual resistor for electric-hydrogen hybrid DC microgrid grid-connected inverter under weak grid[J]. Electric Power Systems Research, 2021, 191.
- [25] 孟翔. 小型燃料电池车研制与能量管理研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
- MENG Xiang. Development and energy management research of a fuel cell vehicle[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.
- [26] GARCÍA-VALVERDE R, ESPINOSA N, URBINA A. Simple PEM water electrolyser model and experimental validation[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37(2): 1927-1938.
- [27] DUFO-LÓPEZ R, BERNAL-AGUSTÍN J L, CONTRERAS J. Optimization of control strategies for stand-alone renewable energy systems with hydrogen storage[J]. Renewable Energy, 2007, 32(7): 1102-1126.

收稿日期: 2021-07-21; 修回日期: 2021-09-26

作者简介:

李萃一(1997—), 女, 博士研究生, 研究方向为微电网的稳定控制与经济运行; E-mail: lly_liluoyi@163.com

韩莹(1990—), 男, 通信作者, 博士, 助理教授, 硕士生导师, 研究方向为混合动力系统/微电网能量管理; E-mail: hanying@my.swjtu.edu.cn

李奇(1984—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为分布式发电并网技术、电力系统无功优化等。E-mail: liqi0800@163.com

(编辑 张爱琴)