考虑燃料电池变工况特性的风-光-氢 综合能源系统优化调度

殷 骏1,李笑竹2,杜锡力1,李建林1,陈来军1,2

(1. 青海大学 新能源光伏产业研究中心,青海 西宁 810016;2. 清华大学 电机工程与应用电子技术系,北京 100084)

摘要:燃料电池是氢储能中的重要组成部分,其运行效率对含氢储能的综合系统的经济性有较大影响。为此,提出考虑燃料电池变工况特性的风-光-氢综合能源系统优化调度方法。通过分析燃料电池输出功率和运行效率间的关系,建立燃料电池变工况条件下运行效率的分段线性化模型。提出考虑燃料电池的变工况效率特性的多模块输出功率协同优化策略和燃料电池多模块工作协同策略,从而提升燃料电池总体运行效率和各模块使用寿命。基于此,以风-光-氢综合能源系统优化调度为例,验证了所提优化运行策略的有效性。 关键词:风-光-氢综合能源系统;燃料电池;效率;寿命;多模块协同;优化调度

中图分类号:TM73;TK01

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202309022

0 引言

清洁能源耦合储能的综合能源系统是当下能源 系统的主流^[1]。其中,氢储能不仅储能容量大,清洁 无污染,且运行灵活,非常适合与风光发电系统相配 合运行。因此很多学者基于氢储能构建综合能源系 统,并对其优化运行进行研究^[2:3]。在各类氢储能优 化运行研究中,少有考虑燃料电池变工况特性的研 究,但在燃料电池实际运行工况下,这会显著影响系 统的经济性与燃料电池工作效率^[4]。为此,本文考 虑燃料电池的变工况特性,开展了考虑燃料电池变 工况特性的风-光-氢综合能源系统优化调度研究。

含氢储能的新型电力系统受到国内外广泛关 注。具体关注点包括新能源与氢储能的耦合,部分 研究考虑新能源输出的不确定性、分布式新能源并 网中产生的能源损耗问题等,通过氢储能弥补风光 能源波动,可实现新能源的有效存储与利用,提高系 统整体经济性与稳定性^[57]。此外,部分研究关注点 为系统整体的低碳运行,通过加入氢储能设备,建立 电氢能量存储模型,在降低系统碳排放的同时,提高 系统整体经济性,实现含氢储能的新型电力系统的 最优调度^[8-10]。上述研究从多个角度实现了新型电 力系统与氢储能的良好耦合,以提高系统经济性。 但其中氢储能大多采用效率为常数的线性模型,导 致模型过于理想,与实际设备输出特性存在一定的 偏差,系统优化调度精确性亟需进一步提升。

收稿日期:2023-03-05;修回日期:2023-08-02

在线出版日期:2023-09-27

基金项目:青海省基础研究计划项目(2023-ZJ-704);国家自 然科学联合基金资助项目(U22A20220)

Project supported by the Basic Research Project of Qinghai Province(2023-ZJ-704) and the Joint Funds of the National Natural Science Foundation of China(U22A20220)

为解决上述问题,提高氢储能模型的准确性,一 些研究从氢储能设备特性出发。文献[11]考虑氢储 能系统精细化模型与电转气设备,有效提高含氢储 能的综合能源系统的经济性。文献[12]考虑柔性负 荷和氢储能精细化模型,进行含氢储能的混合系统 优化调度求解。文献[13]采用精细化氢储能模型, 并改进新能源发电预测数据,有效提高了系统优化 调度的准确性。文献[14]建立精细化电解槽模型, 并据此提出相应运行策略,进行系统优化调度求解。 上述考虑含氢储能的混合系统优化调度等研究,对 氢储能设备进行了精细化建模,有效提高了氢储能 系统优化调度的准确性。此外,文献[15]从燃料电 池特性出发,提出能量管理模式对其运行效率进行 优化。上述文献虽然对燃料电池效率特性进行了研 究,但是并未应用于含氢储能的电力系统优化调度 中。然而燃料电池是氢储能优化调度中非常重要的 一环,考虑到燃料电池模块具有显著的非线性特性[16], 多模块燃料电池因未合理制定运行策略,导致模型 实用性不高,无法通过灵活的模块间输出功率分配 实现更加高效的氢电转换,系统整体效率也较低。

综上所述,本文尝试建立考虑燃料电池变工况 特性的风-光-氢综合能源系统优化调度策略,旨在 解决以下3个方面的问题:为解决燃料电池在优化 调度中过于理想的问题,建立燃料电池分段线性化 的精细模型;针对燃料电池变工况下运行效率不高 的问题,提出燃料电池多模块输出功率协同优化策 略,以提高燃料电池运行效率;针对燃料电池模块逐 级启动导致的模块启动顺序固定^[17]、使用寿命缩短 的问题,提出燃料电池多模块工作协同策略,以平均 各模块工作时长,提高燃料电池模块使用寿命。通 过上述优化调度策略,可提高燃料电池模块总体运 行效率和各模块使用寿命,以提升风-光-氢综合能 源系统优化调度的经济性。

1 燃料电池输出功率与效率特性分析

随着燃料电池输出功率发生变化,燃料电池模 块效率随之呈现非线性特性,且不同类型的燃料电 池特性均不相同。为此,本文选取应用广泛、效率较 高的质子交换膜燃料电池作为研究对象,通过实验 测定的燃料电池在不同负载特性下的输出功率与效 率关系曲线如图1所示^[16]。



Fig.1 Relationship curve between output power and efficiency of fuel cell

由图1可知:燃料电池效率随输出功率的增加 先增大至极点后逐渐减小,且其输出功率-效率特性 呈现明显的非线性变化。根据图1,可建立线性分 段式燃料电池模块输入输出特性模型,具体如下:

$$P_{\rm fc}(t) = \sum_{n=1}^{a} P_{\rm fc}^{n}(t)$$
 (1)

$$M_{\rm fc}(t) = \sum_{n=1}^{a} M_{\rm fc}^{n}(t)$$
 (2)

$$\eta_{\rm fc}^n(t) = P_{\rm fc}^n(t) / M_{\rm fc}^n(t)$$
(3)

$$P_{\rm fc}^{n}(t) = \begin{cases} \alpha_{1}M_{\rm fc}^{n}(t) + \beta_{1} & \varphi_{1} \leq M_{\rm fc}^{n}(t) < \varphi_{2} \\ \alpha_{2}M_{\rm fc}^{n}(t) + \beta_{2} & \varphi_{2} \leq M_{\rm fc}^{n}(t) < \varphi_{3} \\ \alpha_{3}M_{\rm fc}^{n}(t) + \beta_{3} & \varphi_{3} \leq M_{\rm fc}^{n}(t) < \varphi_{4} \\ \alpha_{4}M_{\rm fc}^{n}(t) + \beta_{4} & \varphi_{4} \leq M_{\rm fc}^{n}(t) \leq \varphi_{5} \end{cases}$$
(4)

式中:a为t时段内启动燃料电池模块数; $P_{fc}(t)$ 为t时 段由a块燃料电池模块组成的燃料电池组的发电 功率; $P_{fc}^{n}(t)$ 为t时段第n块燃料电池的发电功率; $M_{fc}(t)$ 为t时段由a块燃料电池模块组成的燃料电池 组的耗氢功率; $M_{fc}^{n}(t)$ 为t时段第n块燃料电池的耗 氢功率; $\eta_{fc}^{n}(t)$ 为t时段第n块燃料电池的 率; $\alpha_{1} - \alpha_{4}, \beta_{1} - \beta_{4}$ 为燃料电池模块输入输出功率 函数的关系系数; $\varphi_{1} - \varphi_{5}$ 为燃料电池模块函数分段 参数。

2 变工况下燃料电池多模块协同优化策略

2.1 燃料电池多模块输出功率协同优化

本文提出一种燃料电池多模块输出功率协同优 化策略,通过协调燃料电池模块运行块数,合理分配 各燃料电池输出功率,使燃料电池模块组高效率运 行。对于多模块协同燃料电池组,其目标函数为使 燃料电池模块运行效率最高,决策变量为各时段下 燃料电池模块工作数量与各模块输出功率,约束条 件为燃料电池组输出功率约束与燃料电池模块自身功率约束。

2.1.1 燃料电池组优化目标

燃料电池组优化目标为燃料电池组整体效率最高,其表达式如式(5)所示。

$$\max \sum_{t \in T} \frac{\sum_{n=1}^{N} P_{fc}^{n}(t)}{\sum_{n=1}^{N} M_{fc}^{n}(t)}$$
(5)

式中:N为t时段内工作的燃料电池模块数;T为时段 集合。

2.1.2 燃料电池组约束

燃料电池组运行过程中,其总输出功率为各模 块输出功率之和,如式(6)所示。

$$P_1 + P_2 + \dots + P_N = P_{\text{out}} \tag{6}$$

式中: $P_1 - P_N$ 分别为第1-N块燃料电池输出功率; P_{out} 为燃料电池组所需承担的输出功率。

燃料电池在运行过程中受其容量与爬坡功率的 限制,燃料电池的输出功率约束及其爬坡功率约束 如式(7)—(9)所示。

$$0 \leq P_{\rm fc}^n(t) \leq P_{\rm fc_max} \tag{7}$$

$$0 \leq P_{\text{fc}_up}^n(t) \leq \min\left(P_{\text{fc}_max}^{\text{up}}, P_{\text{fc}}^n(t) - P_{\text{fc}}^n(t-1)\right) \quad (8)$$

 $0 \leq P_{\text{fc}_\text{down}}^n(t) \leq \min\left(P_{\text{fc}_\text{max}}^{\text{down}}, P_{\text{fc}}^n(t) - P_{\text{fc}}^n(t-1)\right) \quad (9)$

式中: P_{fc_max} 为燃料电池模块最大输出功率; $P_{fc_up}^n(t)$ 、 $P_{fc_down}^n(t)$ 分别为t时段第n块燃料电池模块向上、向下爬坡功率; $P_{fc_max}^u$ 分别为燃料电池模块向上、向下爬坡功率最大值。

2.1.3 燃料电池多模块输出功率协同优化策略

通过构造拉格朗日函数求解最大效率下各燃料 电池模块输出功率分配,可使得燃料电池组运行效 率最大化。所构造的拉格朗日函数如下:

$$=\frac{\sum_{n=1}^{N}P_{\rm fc}^{n}(t)}{\sum_{n=1}^{N}M_{\rm fc}^{n}(t)}$$
(10)

s.t.
$$\begin{cases} P_{1}+P_{2}+\dots+P_{N}=P_{\text{out}}\\ 0 \leq P_{\text{fc}}^{n}(t) \leq P_{\text{fc}_{\text{max}}}\\ 0 \leq P_{\text{fc}_{\text{cup}}}^{n}(t) \leq \min\left(P_{\text{fc}_{\text{max}}}^{\text{up}}, P_{\text{fc}}^{n}(t) - P_{\text{fc}}^{n}(t-1)\right)\\ 0 \leq P_{\text{fc}_{\text{down}}}^{n}(t) \leq \min\left(P_{\text{fc}_{\text{max}}}^{\text{down}}, P_{\text{fc}}^{n}(t) - P_{\text{fc}}^{n}(t-1)\right)\\ F\left(P_{1}, P_{2}, \dots, P_{N}\right) = f + \lambda\varphi\left(P_{1}, P_{2}, \dots, P_{N}\right) \quad (11)\\ \begin{cases} f_{P_{1}}+\lambda\varphi_{P_{1}}(P_{1}, P_{2}, \dots, P_{N}) = 0\\ f_{P_{2}}+\lambda\varphi_{P_{2}}(P_{1}, P_{2}, \dots, P_{N}) = 0\\ \vdots \\ f_{P_{N}}+\lambda\varphi_{P_{N}}(P_{1}, P_{2}, \dots, P_{N}) = 0\\ \varphi\left(P_{1}, P_{2}, \dots, P_{N}\right) = 0\end{cases}$$

152

式中:f为目标函数; $F(P_1, P_2, \dots, P_N)$ 为构造的拉格 朗日函数; λ 为拉格朗日乘子; $\varphi(P_1, P_2, \dots, P_N)$ 为燃 料电池组约束; $f_{P_1} - f_{P_N}$ 分别表示f对变量 $P_1 - P_N$ 求 导; $\varphi_{P_1} - \varphi_{P_N}$ 分别表示 φ 对变量 $P_1 - P_N$ 求导。

通过构造拉格朗日函数,可将式(5)所示的目标 函数转化为式(12),将其作为燃料电池模块组运行 约束,并与燃料电池模块自身约束一起共同作为后 续氢储能系统优化调度模型的约束条件。

2.2 燃料电池多模块工作协同策略

燃料电池模块使用寿命与其启停次数和工作时 长关系密切。针对燃料电池的启停问题,通过控制 燃料电池模块在其工作间隔期间处于怠速状态,可 减少燃料电池启停次数,且怠速状态下燃料电池能 耗极低^[18],为简化计算,本文忽略燃料电池怠速状态 下的能耗,着重优化燃料电池模块工作时长。为保 证合理利用每块燃料电池模块,本文所提燃料电池 多模块工作协同策略将以每一时段燃料电池组中各 燃料电池模块历史工作时长为依据,决定下一工作 时段各燃料电池模块工作优先级,以达到平均各燃 料电池模块工作时长的目的。燃料电池模块历史工 作时长函数如下:

$$\psi_{\rm fc}^{n}(t) = \begin{cases} 1 & P_{\rm fc}^{n}(t) > 0\\ 0 & P_{\rm fc}^{n}(t) = 0 \end{cases}$$
(13)

$$G_{\rm fc}^{n}(\tau) = \begin{cases} \sum_{t=1}^{\tau-1} \psi_{\rm fc}^{n}(t) & \tau=2, 3, \cdots, 24\\ 0 & \tau=1 \end{cases}$$
(14)

式中: $\psi_{f_{e}}^{n}(t)$ 为t时段第n块燃料电池模块工作时长; $G_{f_{e}}^{n}(\tau)$ 为 τ 时段第n块燃料电池模块历史工作时长。

通过计算各燃料电池模块历史工作时长,并对 其进行升序排列确定优先级,即可确定不同时段燃 料电池模块的工作优先级(r=1时,各燃料电池历史 工作时长均为0,此时以模块1—N顺序作为燃料电 池组工作优先级,在逐级启动策略下,燃料电池也将 按模块1—N顺序作为燃料电池组启动顺序),由此 可有效保障燃料电池组的整体使用寿命。

因此,本文所提燃料电池多模块协同优化策略 包括燃料电池多模块工作协同策略与燃料电池多模 块输出功率协同优化策略两部分,在策略实现过程 中,系统将在完成燃料电池工作协同后,在已确定的 工作模块中实现燃料电池模块间的功率分配,从 而实现燃料电池模块工作协同与功率协同的良好 耦合。

3 风-光-氢综合能源系统优化调度模型

基于上述分析建立的燃料电池模块分段线性化 模型与优化运行策略,可作为风-光-氢综合能源系 统优化调度中燃料电池组模型、策略与约束,运用于 风-光-氢综合能源系统。

本文所提风-光-氢综合能源系统优化调度流程 图如附录A图A1所示。该优化调度模型以24h为 调度周期,具体求解方式如下:

 1)当新能源发电量已满足系统负荷需求时,系 统将启动电解槽,将富余电能转化为氢能存储至储 氢罐中,此时混合整数线性规划约束包含电解槽与 储氢罐的相关约束;

2)当新能源发电量无法满足系统电负荷时,启 动燃料电池组,以满足系统负荷需求,此时混合整数 线性规划约束包含燃料电池与储氢罐及其他相关 约束。

在启动燃料电池组时,本文所提燃料电池多模 块协同策略也开始运行,通过将燃料电池组内各模 块历史输出功率P₆^e(t)传递至燃料电池多模块工作 协同策略,计算燃料电池模块历史工作时长,可确定 燃料电池模块工作顺序,然后将燃料电池组所需输 出功率P_{out}传递至燃料电池多模块输出功率协同优 化策略,构建拉格朗日函数,求解燃料电池最优效率 下的各模块输出功率分配,最后将最优结果作为系 统优化调度约束,从而实现燃料电池组的功率输出, 完成系统整体优化调度。在此过程中,燃料电池多 模块协同策略均是以约束形式编程实现,最终通过 混合整数线性规划方式进行优化求解。

3.1 目标函数

本文综合考虑风-光-氢综合能源系统经济运行与清洁能源利用,以系统日运行成本 C 最低为目标 函数,系统日运行成本 C 由系统运行维护成本 C^r、系 统购电成本 C^{buy}与运行惩罚成本 C^{loss}构成,具体如下:

$$\min C = C^{\mathrm{r}} + C^{\mathrm{buy}} + C^{\mathrm{loss}}$$
(15)

$$C^{r} = \sum_{t=1}^{24} \left(r_{\rm el} P_{\rm el}(t) + r_{\rm fc} M_{\rm fc}(t) \right) \Delta t$$
 (16)

$$C^{\text{buy}} = \sum_{t=1}^{24} \omega(t) P_{\text{buy}}(t) \Delta t \qquad (17)$$

$$C^{\rm loss} = \sum_{t=1}^{24} \left(\alpha^{\rm e}(t) P_{\rm loss}(t) + \gamma^{\rm cp} P_{\rm cp}(t) \right) \Delta t \qquad (18)$$

式中: r_{el} 、 r_{fc} 分别为电解槽和燃料电池组运行维护费 用系数; Δt 为单位时段间隔; $P_{el}(t)$ 为t时段电解槽耗 电功率; $\omega(t)$ 为t时段向电网购电价格系数; $P_{huy}(t)$ 为t时段向电网购电功率; $\alpha^{e}(t)$ 为t时段失电惩罚单 价; γ^{ep} 为弃光弃风惩罚系数; $P_{loss}(t)$ 、 $P_{ep}(t)$ 分别为t时 段失电负荷和弃光弃风功率。

3.2 约束条件

1)功率平衡约束。

风-光-氢综合能源系统能量主要来源为风电和 光伏,储能设备为由电解槽、燃料电池、储氢罐构成 的氢储能系统,负荷为园区电负荷。为保证系统内 电功率时刻平衡,需对上述各设备建立功率平衡约 束,并通过弃能、失负荷、购电等辅助手段保证电功 率平衡,其功率平衡约束如下:

$$P_{pw}(t) + P_{buy}(t) - P_{cp}(t) = P_{load}(t) - P_{load}(t)$$

$$P_{\rm loss}(t) + P_{\rm el}(t) - P_{\rm fc}(t)$$
 (19)

式中: $P_{pw}(t)$ 、 $P_{load}(t)$ 分别为t时段光伏风力发电功率和系统电负荷。

针对风、光等自然能源的约束,由于本文侧重点 与创新点为基于燃料电池模块变工况特性的燃料电 池模块工作协同与功率协同优化策略,而风、光不确 定性带来的功率变化只会对燃料电池组总输出功率 调度产生影响,不会对燃料电池模块工作协同与功 率协同优化产生影响,即本文策略在考虑风光不确 定性的情况下依然适用。

2)氢储能单元运行约束。

电解槽是氢储能系统中的电氢转换设备,可将 富余电能转化为氢能存储,电氢转换模型如式(20) 所示。电解槽在运行过程中,会受到最大容量与最 大爬坡功率限制,具体约束如式(21)--(23)所示。

$$M_{\rm el}(t) = \eta_{\rm el} P_{\rm el}(t) \tag{20}$$

$$0 \leq P_{\rm el}(t) \leq P_{\rm el_max} \tag{21}$$

$$0 \leq P_{\text{el_up}}(t) \leq \min\left(P_{\text{el_max}}^{\text{up}}, P_{\text{el}}(t) - P_{\text{el}}(t-1)\right) \quad (22)$$

$$0 \leq P_{\text{el down}}(t) \leq \min\left(P_{\text{el max}}^{\text{down}}, P_{\text{el}}(t) - P_{\text{el}}(t-1)\right)$$
(23)

式中: $M_{el}(t)$ 为t时段电解槽的产氢功率; η_{el} 为电解 槽效率; $P_{el_{max}}$ 为电解槽最大容量; $P_{el_{up}}(t)$ 、 $P_{el_{down}}(t)$ 分别为t时段电解槽向上、向下爬坡功率; $P_{el_{max}}^{up}$ 、 $P_{el_{max}}^{up}$ 分别为电解槽向上、向下爬坡功率最大值。

储氢罐为氢气存储设备,两端分别连接电解槽 与燃料电池,任一时刻储氢罐内能量为上一时刻储 氢罐内能量与这一时段内储氢罐与电解槽、燃料电 池组交互结果之和,具体模型如式(24)所示。此外, 储氢罐与正常高压罐体类似,均存在最大、最小容量 约束。

$$V_{\rm Hst}(t) = V_{\rm Hst}(t-1) + \left(\eta_{\rm s}^{\rm Hst} M_{\rm el}(t) - \frac{M_{\rm fc}(t)}{\eta_{\rm r}^{\rm Hst}}\right) \Delta t \quad (24)$$

$$V_{\text{Hst}_{min}} \leq V_{\text{Hst}}(t) \leq V_{\text{Hst}_{max}}$$
(25)

式中: $V_{\text{Hst}}(t)$ 为t时段储氢罐的储氢量; $V_{\text{Hst_min}}$ 、 $V_{\text{Hst_max}}$ 分别为储氢罐储氢量的最小值和最大值; η_{s}^{Hst} 、 η_{r}^{Hst} 分别为储氢罐的储氢和放氢效率。

燃料电池组采用燃料电池多模块协同优化策略,其约束条件为式(6)—(9)、(12)。

3)其他运行约束。

为保证系统内电负荷的有效供给、风光资源有 效利用以及与外部交互功率在其极限范围内,系统 失电负荷、弃风弃光量以及购电功率需控制在一定 范围内,具体约束如下:

$$0 \leq P_{\text{loss}}(t) \leq \lambda^{\text{loss}} P_{\text{load}}(t)$$
 (26)

$$0 \leq P_{\rm cp}(t) \leq \lambda^{\rm cp} P_{\rm pw}(t) \tag{27}$$

$$0 \leq P_{\rm buv}(t) \leq P_{\rm buv\ max} \tag{28}$$

式中:λ^{loss}、λ^{cp}分别为最大失电负荷比例和最大弃风 弃光比例;*P*_{huv max}为从电网购电的最大功率。

本文所建立的风-光-氢综合能源系统优化调度 模型及其约束均已线性化,因此可采用MATLAB结 合YALMIP对图A1所示优化调度流程图进行编程, 并调用CPLEX求解器进行优化调度求解。

4 算例分析

4.1 算例参数

为验证考虑燃料电池变工况特性的风-光-氢综合能源系统优化调度策略的可行性,选取某氢储能园区作为研究对象^[19],其中光伏风电输出功率及电负荷分别如附录A图A2与图A3所示。园区内电解槽运行维护成本为0.1元/kW。燃料电池模块组中各具体参数如附录A表A1所示^[20]。购电价格为实时电价,具体参数如附录B图B1所示。最大失电负荷、弃风弃光比例均为20%。弃风弃光惩罚系数为0.2元/(kW·h)。失电负荷惩罚单价为实时电价的10倍。本文设置了3种调度方案,以对比分析所提燃料电池多模块协同调度策略的优势,具体调度方案如下。

1)方案1:燃料电池模块采用常效率模型,其效 率为40%。

2)方案2:燃料电池模块采用变效率模型。

3)方案3:燃料电池模块采用变效率模型,多模 块间采用本文所提协同优化策略。

4.2 风-光-氢综合能源系统优化调度结果分析

采用方案3燃料电池多模块协同优化策略下的 风-光-氢综合能源系统电功率平衡图作为代表,具 体分析氢储能系统在整体调度中的作用,方案3下 的调度运行电功率平衡结果如图2所示。





由图2可知,在00:00-05:00、23:00-24:00时 段,风力发电可满足园区电负荷需求,富余电功率用 于驱动电解槽工作,实现电-氢转换以储存富余能 源。在05:00之后,园区电负荷需求逐渐增加,且购 电价格较低,因此采用燃料电池组耗氢发电及网上 购电手段以满足电负荷需求,保证系统经济性。在 10:00-16:00时段,光伏和风力发电功率在满足电 负荷的同时还有较多富余,可将富余电功率用于电 解槽实现电-氢转换,但此时段内电解槽受爬坡功率 限制,无法实现功率的突增,在11:00时电解槽爬坡 功率已达上限,但仍未能完全消纳风电、光伏,导致 存在部分弃风弃光现象,16:00时同理,为保证电解 槽能正常停止运行,需舍弃一定光伏和风力发电功 率。在16:00之后,园区电负荷消耗达到高峰,光伏 和风力发电功率不足,此时燃料电池组发挥主要作 用,通过燃料电池组模块间功率协同,使得燃料电池 组工作效率提升,可弥补17:00-22:00时段内大部 分电负荷缺失,同时搭配辅助购电手段,可有效支撑 园区电负荷需求。

虽然氢储能系统在风-光-氢系统优化调度中的 整体作用并未发生实质性改变,但不同方案下的系 统成本仍存在差异。各方案下储氢罐储氢量变化与 各类成本分别如图3与表1所示。



图3 储氢罐储氢量变化情况

Fig.3 Variation situation of hydrogen storage tank reserve

表1 成本对比

Table 1 Cost comparison

		+	ри; л и / u
成本	数值		
	方案 1	方案 2	方案 3
总成本	490.44	500.42	471.36
运行成本	318.94	318.94	318.94
购电成本	159.88	169.86	140.80
惩罚成本	11.62	11.62	11.62

由表1可知,3种方案下的系统弃风弃光惩罚成 本均为11.62元/d。而在18:00-22:00时段,光伏 资源较少且又处于用电高峰,因此方案1-3下燃料 电池组发电时间均集中于此时段。由图3可知,3种 方案下储氢罐在典型日内始末储氢量均相同,且由 表1可知,各方案下氢储能设备运行成本与弃风弃 光惩罚成本均相同,因此各方案下系统购电成本间 存在差异的原因为各方案下燃料电池模块发电量不 同。为此,下面将对各方案下的燃料电池模块运行 进行具体分析。

4.3 各方案下燃料电池模块运行分析

图 4(a)、(b)分别为方案 2 与方案 3 下的燃料电 池模块输出功率。



Fig.4 Output power of fuel cell modules under Case 2 and Case 3

对图4进行具体分析可知。

1)方案2采用变工况燃料电池模型,且各电池 间无协同,燃料电池模块按所需发电功率逐级启动, 导致燃料电池在大部分运行中处于满功率运行状态,其效率低于平均效率。因此,在耗氢量相同的情 况下,方案2下燃料电池输出功率小于常效率模型, 其系统购电成本也对应上升。但方案2的变工况模 型更加真实地反映了实际工况下燃料电池模块工作 状态,方案1则让调度过于理想化。

2)方案3采用燃料电池多模块协同优化策略, 在此方案下,系统通过改变各时段下的燃料电池投 入数量,并将输出功率平均分配至投入运行的燃料 电池模块,使得各燃料电池模块处于图1中的高效 率阶段,从而提升燃料电池组整体效率。由图4(b) 可知,在本文所提策略下,不同时段投入运行的燃料 电池模块数量与输出功率均处于变化之中,这也验 证了本文所提策略的有效性。通过提升燃料电池组 整体输出效率,使得燃料电池组在耗氢量不变的情 况下可产生更多的电能,这也使得在方案3燃料电 池模块耗氢量与方案2相同的情况下,方案3发电量 更多、购电成本更低。 3)综合对比3种方案下系统总成本可知,方案3 经济性最高,相比方案1成本降低了3.89%,相比方 案2成本降低了5.81%。

由上述分析可知,3种方案经济性间存在差异 的主要原因在于燃料电池模块的运行效率。对3种 方案下燃料电池模块效率进行对比分析,3种方案 下燃料电池组效率如图5所示。



Fig.5 Efficiency of fuel cell stack

由图5可知,在未采用优化策略时,方案2下各时段燃料电池组运行效率均低于方案1的40%燃料电池运行效率,而方案3下,燃料电池模块间相互协同,通过优化燃料电池模块启停数量及功率分配,使得各燃料电池模块均处于高效率阶段,方案3下燃料电池模块效率均高于40%,其在任意时段效率均高于其他2种方案。

3种方案下燃料电池组平均效率与发电量如表2 所示。由表可知,方案3下燃料电池组平均效率为 0.445,在3种方案中最高,对应的发电量380.09 kW·h 也为3种方案中最高,该发电量较方案1提升了 11.29%,较方案2提升了15.35%。正是由于方案3 燃料电池组发电量的提升,使得方案3具有更好的 经济性。

表2 燃料电池组平均效率与发电量

 Table 2
 Average efficiency and power generation

 quantity of fuel cell stack

而日	数值		
坝日	方案 1	方案 2	方案 3
平均效率	0.400	0.386	0.445
发电量 / (kW·h)	341.54	329.52	380.09

综上所述,通过燃料电池多模块协同优化策略, 可实现燃料电池模块间的协同运行和燃料电池组灵 活运行并提高其发电量,最终提高系统经济性。

4.4 各方案下燃料电池组寿命分析

在调度过程中,燃料电池组使用寿命与各模块 间的功率分配息息相关,过度使用燃料电池模块,将 导致其性能变差,从而影响燃料电池组整体使用寿 命^[21]。通过采用本文所提燃料电池多模块协同优化 策略,可平衡各燃料电池模块工作时长,从而提升燃 料电池组整体使用寿命。燃料电池组内各模块使用 率由模块工作时长与燃料电池组整体工作时长的比 值表示,具体如下:

$$\sigma_{\rm fc}^n = \frac{\sum_{t=1}^{\infty} \psi_{\rm fc}^n(t)}{\psi_{\rm fc}}$$
(29)

式中: σ_{fc}^{n} 为第n块燃料电池的使用率; ψ_{fc} 为燃料电池组整体工作时长。

24

方案1由于采用常效率模型,并未进行模块化, 因此不对其进行模块化寿命分析。方案2与方案3 下的燃料电池组设备使用率对比如图6所示。



图6 燃料电池使用率对比



由图6可知,方案3下采用燃料电池多模块协同 优化策略的燃料电池模块使用率更为平均,而在方 案2下,燃料电池模块1、2使用率高达100%,但燃 料电池模块6-8使用率均为0,这将会导致后续调 度中燃料电池模块1、2因为过度使用而性能降低, 从而影响燃料电池整体性能。因此,可将使用率最 高的燃料电池寿命视为燃料电池组整体使用寿命。 另外,由图6可知,方案2下燃料电池模块1、2的使 用率达到100%,而方案3下燃料电池最高使用率为 75%,因此在长时间调度下,采用燃料电池多模块协 同优化策略的燃料电池组使用寿命将延长约25%。

5 结论

为提高燃料电池调度的准确性与经济性,提出 了一种考虑燃料电池变工况特性的风-光-氢综合能 源系统优化调度策略。在考虑燃料电池输出区间内 效率特性下,提出燃料电池多模块协同优化策略, 并结合实际区域数据进行了仿真与分析,主要结论 如下。

1)建立了燃料电池变工况条件下运行效率的分 段线性化模型,可直观表现出燃料电池输出功率与 效率间的对应关系,使得燃料电池在调度过程中更 符合实际。

2)提出了风-光-氢综合能源系统中燃料电池多 模块输出功率协同优化策略。通过该策略进行优化 调度,可将燃料电池组效率提高5.9%,最终将系统 发电量提高15.35%,并将系统成本降低5.81%。

3)提出了风-光-氢综合能源系统中燃料电池多 模块协同优化策略。通过计算燃料电池模块历史工 作时长,并对燃料电池模块工作顺序进行排序,可平 均各燃料电池模块工作时长,将模块使用寿命延长约25%。

本文所提燃料电池变工况下的多模块协同优化 策略仅用于电-氢耦合,以实现电力系统优化调度。 为进一步提高氢储能的工程实用化水平,后续将针 对燃料电池热电输出特性,进行燃料电池热电联供 调度方案研究。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

- [1]张红,袁铁江,谭捷,等.面向统一能源系统的氢能规划框架
 [J].中国电机工程学报,2022,42(1):83-94.
 ZHANG Hong,YUAN Tiejiang,TAN Jie,et al. Hydrogen energy system planning framework for unified energy system [J].
 Proceedings of the CSEE,2022,42(1):83-94.
- [2] 王永利,向皓,郭璐,等.面向多能互补的分布式光伏与电氢 混合储能规划优化研究[J/OL].电网技术.[2023-03-05]. https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2022.2156.
- [3]朱雅魁,耿泉峰. 耦合氢储能的综合能源园区系统容量配置与 运行优化[J/OL]. 现代电力. [2023-03-05]. https://doi.org/ 10.19725/j.cnki.1007-2322.2022.0099.
- [4]杨文,李奇,刘强,等.基于安全运行区域约束的PEMFC发电系统效率优化控制方法[J].中国电机工程学报,2022,42(15):5576-5587.
 YANG Wen,LI Qi,LIU Qiang, et al. Efficiency optimization control method of PEMFC power generation system based on

safe operating area constraints[J]. Proceedings of the CSEE, 2022,42(15):5576-5587.

- [5]司杨,陈来军,陈晓弢,等.基于分布鲁棒的风-氢混合系统氢储能容量优化配置[J].电力自动化设备,2021,41(10):3-10.
 SI Yang, CHEN Laijun, CHEN Xiaotao, et al. Optimal capacity allocation of hydrogen energy storage in wind-hydrogen hybrid system based on distributionally robust[J]. Electric Power Automation Equipment,2021,41(10):3-10.
- [6]张昊天,韦钢,袁洪涛,等.考虑氢-电混合储能的直流配电网 优化调度[J].电力系统自动化,2021,45(14):72-81.
 ZHANG Haotian, WEI Gang, YUAN Hongtao, et al. Optimal scheduling of DC distribution network considering hydrogenpower hybrid energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems,2021,45(14):72-81.
- [7] NGUYEN T H T, NAKAYAMA T, ISHIDA M. Optimal capacity design of battery and hydrogen system for the DC grid with photovoltaic power generation based on the rapid estimation of grid dependency [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2017, 89:27-39.
- [8] 陈锦鹏,胡志坚,陈颖光,等.考虑阶梯式碳交易机制与电制氢 的综合能源系统热电优化[J].电力自动化设备,2021,41(9): 48-55.

CHEN Jinpeng, HU Zhijian, CHEN Yingguang, et al. Thermoelectric optimization of integrated energy system considering ladder-type carbon trading mechanism and electric hydrogen production[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41 (9):48-55.

[9] 韩莹,于三川,李荦一,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 Ying, YU Sanchuan, LI Luoyi, et al. Low-carbon and economic configuration method for solar hydrogen storage mi-

crogrid including stepped carbon trading[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(7): 2523-2533.

- [10] 张鹏成,徐箭,柯德平,等. 氢能驱动下钢铁园区能源系统优化 配置[J]. 电力系统自动化,2022,46(14):1-10.
 ZHANG Pengcheng, XU Jian, KE Deping, et al. Optimal configuration of energy system in iron and steel park driven by hydrogen energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022,46(14):1-10.
- [11] 崔杨,闫石,仲悟之,等. 含电转气的区域综合能源系统热电优 化调度[J]. 电网技术,2020,44(11):4254-4264.
 CUI Yang, YAN Shi, ZHONG Wuzhi, et al. Optimal thermoelectric dispatching of regional integrated energy system with power-to-gas[J]. Power System Technology,2020,44(11):4254-4264
- [12] 邓杰,姜飞,王文烨,等.考虑电热柔性负荷与氢能精细化建模的综合能源系统低碳运行[J]. 电网技术,2022,46(5):1692-1704.
 DENG Jie, JIANG Fei, WANG Wenye, et al. Low-carbon opti-

mized operation of integrated energy system considering electric-heat flexible load and hydrogen energy refined modeling [J]. Power System Technology,2022,46(5):1692-1704.

- [13] LIU X. Optimal scheduling strategy of electricity-heat-hydrogen integrated energy system under different operating modes
 [J]. International Journal of Energy Research, 2022, 46(9): 12901-12925.
- [14] WEI F, SUI Q, LI X, et al. Optimal dispatching of power grid integrating wind-hydrogen systems [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 125 (3) : 106489.
- [15] 甘锐,李奇,江淑娜,等.考虑燃料电池效率区间优化的混合动 力系统双模式能量管理方法[J].中国电机工程学报,2021,41 (20):7027-7039.
 GAN Rui,LI Qi, JIANG Shuna, et al. Dual-mode energy management method considering optimization of fuel cell efficien-
- cy range[J]. Proceedings of the CSEE,2021,41(20):7027-7039. [16] 丁一. 燃料电池系统集群的效率优化研究[D]. 成都:西南交 通大学,2018. DING Yi. Research on fuel cell system cluster efficiency op-

timization[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University,2018.

[17] 朱亚男,李奇,黄文强,等. 基于功率自适应分配的多堆燃料电 池系统效率协调优化控制[J]. 中国电机工程学报,2019,39 (6):1714-1722,1868.
ZHU Yanan,LI Qi,HUANG Wenqiang, et al. Efficiency coordination and optimization control method of multi-stack fuel cell systems based on power adaptive allocation [J]. Procee-

dings of the CSEE,2019,39(6):1714-1722,1868.
[18] 李正辉, 贠海涛, 胡帅, 等. 燃料电池汽车混合动力系统急速启 停控制研究[J]. 电源技术,2021,45(2):199-202.
LI Zhenghui, YUN Haitao, HU Shuai, et al. Research on idle start and stop control of fuel cell vehicle hybrid power system[J]. Chinese Journal of Power Sources,2021,45(2):199-202.

[19] 熊宇峰,陈来军,郑天文,等.考虑电热气耦合特性的低碳园区综合能源系统氢储能优化配置[J].电力自动化设备,2021,41
 (9):31-38.

XIONG Yufeng, CHEN Laijun, ZHENG Tianwen, et al. Optimal configuration of hydrogen energy storage in low-carbon park integrated energy system considering electricity-heat-gas coupling characteristics [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9): 31-38.

[20] 韩丽,鲁盼盼,王晓静,等.考虑氢燃料电池响应延迟特性的电 网日内优化调度[J].太阳能学报,2022,43(6):373-381.

HAN Li, LU Panpan, WANG Xiaojing, et al. Intraday optimal dispatch of power grid considering response delay characteristics of hydrogen fuel cells[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2022,43(6):373-381.

[21] 杨明泽,李奇,蔡良东,等.考虑电堆性能一致性的燃料电池混 合动力系统多目标优化能量管理方法[J/OL].中国电机工 程学报.[2023-03-05]. https://doi.org/10.13334/j.0258-8013. pcsee.222050. 作者简介:

殷 骏(1999—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为新能 源发电与氢储能技术(E-mail: 897174751@qq.com);

陈来军(1984—),男,副教授,博士,通信作者,主要研究 方向为新能源电力系统与储能技术(E-mail:chenlaijun@qhu. edu.cn)。

(编辑 李玮)

Optimal scheduling of wind-solar-hydrogen integrated energy system considering variable operating condition of fuel cell YIN Jun¹, LI Xiaozhu², DU Xili¹, LI Jianlin¹, CHEN Laijun^{1,2}

TIN Jun , LI Alaozhu , DO Ani , Li Jianini , CHEN Laijun

(1. New Energy(Photovoltaic) Industry Research Center, Qinghai University, Xining 810016, China;

2. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Fuel cell is an important part of hydrogen energy storage, its operation efficiency has greater influence on integrated system containing hydrogen energy storage. Therefore, an optimal scheduling method of wind-solar-hydrogen integrated energy system considering variable operating condition of fuel cell is proposed. By analyzing the relationship between output power of fuel cell and operation efficiency, the segmented linearized model of operation efficiency for fuel cell under variable operating conditions is established. A multi-module output power synergistic optimization strategy and a multi-module work synergistic strategy for fuel cell are proposed, which considers the efficiency characteristics of fuel cell under variable operating conditions, so that improving the overall operation efficiency of the fuel cell and the service life of each module. On this basis, the optimal scheduling of the wind-solar-hydrogen integrated energy system is taken as an example, and the effectiveness of the proposed optimal operation strategy is verified.

Key words: wind-solar-hydrogen integrated energy system; fuel cell; efficiency; lifetime; multi-module cooperation; optimal scheduling



图 A1 优化调度流程图

Fig.A1 Flowchart of optimal scheduling







Fig.A3 Park electricity load

表 A1 燃料电池模块参数

Table A1	Table of f	tuel cell	stacks	parameter
----------	------------	-----------	--------	-----------

参数	数值
燃料电池模块数	8
最大输出功率/kW	25
运行维护成本/(元・kW ⁻¹)	0.2

