

独立光氢燃料电池热电联供系统容量配置优化

申航宇^{1,2}, 樊小朝^{1,2}, 史瑞静^{1,2,3}, 王维庆^{1,2}, 王海云^{1,2}, 程志江^{1,2}

(1.新疆大学 电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047; 2.新疆大学 可再生能源发电与并网
技术教育部工程研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830047; 3.新疆工程学院
能源与动力工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830000)

摘要:为解决电解水制氢与燃料电池发电过程中的散热问题,依据电解槽与燃料电池的水冷式散热原理,设计了独立光氢燃料电池热电联供系统。以此为模型基础,制定了控制策略综合协调各模块的启停顺序及出力大小,解决了电解槽低功率运行区间的低效率问题。以综合成本最优为目标函数建立容量配置模型,采用改进粒子群算法得到系统容量最优配置方案。仿真结果表明:所提配置方案与传统配置方案相比,综合成本可降低2.2%,同时能满足储氢罐和储热罐在一个运行周期内始末状态相同,系统的长期稳定供能效果较优,可为目前独立光氢燃料电池热电联供系统容量配置提供一定的参考价值。

关键词:独立热电联供系统;燃料电池;余热利用;容量配置

中图分类号:TM911 文献标识码:A DOI: 10.19457/j.1001-2095.dqed23426

Capacity Configuration Optimization of Cogeneration System for Independent Photohydrogen Fuel Cell

SHEN Hangyu^{1,2}, FAN Xiaochao^{1,2}, SHI Ruijing^{1,2,3}, WANG Weiqing^{1,2},
WANG Haiyun^{1,2}, CHENG Zhijiang^{1,2}

(1.College of Engineering Technology, Xinjiang University, Urumqi 830047, Xinjiang, China; 2.Research
Center of Education Ministry for Renewable Energy Power Generation and Grid Control,
Xinjiang University, Urumqi 830047, Xinjiang, China; 3.School of Energy and Power
Engineering, Xinjiang Institute of Engineering, Urumqi 830000, Xinjiang, China)

Abstract: In order to solve the problem of heat dissipation in the process of producing hydrogen from electrolytic water and generating electricity from fuel cells, an independent photohydrogen fuel cell thermoelectric combined supply system was designed according to the principle of water cooling heat dissipation between electrolytic cell and fuel cell. Based on this model, a control strategy was formulated to coordinate the output order and size of each module, which solved the inefficiency of electrolytic cell in low power operation zone. The capacity allocation model was established with the objective function of optimal comprehensive cost, and the optimal capacity allocation result of the system was obtained by using the particle swarm algorithm. The simulation results show that the overall cost of the configuration scheme proposed can be reduced by 2.2% compared with the traditional configuration scheme, and it can meet the same starting and ending states of the hydrogen storage tank and the heat storage tank during the operation cycle. The long-term energy supply effect of the system is excellent, which can provide a reference value for the capacity configuration of the current stand-alone photohydrogen fuel cell cogeneration system.

Key words: independent cogeneration system; fuel cell; waste heat utilization; capacity configuration

截至2020年底,全球光伏发电装机容量达到750 GW,我国光伏发电装机容量达到252 GW。

分布式光伏发电在大型互联电网中渗透率越来越高,导致大容量集中式系统应对极端天气的能

基金项目:国家自然科学基金(51666017;51667019;51667020)

作者简介:申航宇(1996—),男,硕士研究生,Email:1132337307@qq.com

通讯作者:樊小朝(1979—),男,博士,副教授,硕士生导师,Email:fx0102@126.com

力越来越弱。利用光伏发电制氢,独立光伏-氢储能-燃料电池热电联供系统可有效解决分布式光伏发电供能不稳定问题^[1-2]。氢能在化学能和电能互相转换时,释放大量热能。若利用水冷式原理将这部分热量收集利用,可有效提高系统综合利用效率,否则,由于质子交换膜不耐高温,需用散热风扇进行散热,将进一步降低系统效率。实行热电联供不仅可以节约能源,而且将发电和供热的2次温室气体排放降为1次,已成为分布式光伏发电最具前景的利用方式之一^[3-4]。

光氢燃料电池系统实现稳定供能最重要的一步是制定氢燃料电池系统的电热分配控制策略^[5-6]。文献[7-8]提出一种轮值控制策略,给各电解槽编号,根据高功率、低功率或过载功率三种情形,安排不同序号的电解槽轮流工作,尽可能使每个电解槽工作时间均衡从而延长电解槽的寿命。文献[9-10]将独立供能系统中储能装置的能量状态划分为4个区间,分别采用不同的控制策略进行分配,并将负荷分为重要负荷和随时可切负荷,保障重要负荷的供能稳定。文献[11]设计了独立光伏-燃料电池联合供电模型,对温度、压力等因素对系统效率的影响进行建模及仿真,验证了所提策略的可行性,但忽略了电解槽与燃料电池输出热功率对系统产生的影响,未进行热管理。上述对光氢燃料电池微网的控制策略,主要集中在电能的控制策略,对电热分配控制策略研究的较少。

文献[12-13]建立了微型燃料电池热电联供系统,以电输出功率和热输出功率为第1阶段目标,电效率和热效率为第2阶段目标,采用遗传算法对多目标求帕累托解,再由一次节能指标确定其最佳运行点,最大化利用燃料电池。文献[14]建立了光氢燃料电池独立供能系统容量配置模型,通过Cplex12.8求解器对配置容量求解,并与传统蓄电池热电供能系统容量配置方案进行对比,结果表明氢储能系统的经济性更优。但在系统设计中仅将电加热装置作为紧急制热设备,电加热装置利用水平较低。

本文针对传统光氢燃料电池独立供能系统未考虑电解槽的低效运行区间和电加热装置利用水平低的问题,制定了完整的电热能量分配控制策略,综合协调各设备启停顺序和出力大小,以提高系统电加热装置利用水平,从而减少电解槽和储能罐的容量。相比其他算法,粒子群算法

参数简单且不易早熟,本文选用粒子群算法进行求解。对传统粒子群算法权重变化较线性、易于陷入局部最优解问题,提出动态非线性自适应变化权重粒子群算法,使权重系数变化更平缓,利于算法跳出局部最优解。以经济成本最优为目标函数,以储能装置始末状态相同为约束条件,通过改进粒子群算法对系统容量配置进行优化。

1 系统结构及数学模型

1.1 系统结构

本文所设计的光氢储系统基本结构如图1所示,该系统主要包括光伏电池、燃料电池、电解槽、电加热装置、储氢罐和储热罐等。电能由光伏和燃料电池供给;热能由电解槽、燃料电池和电加热装置供给;储热罐作为辅助热源。

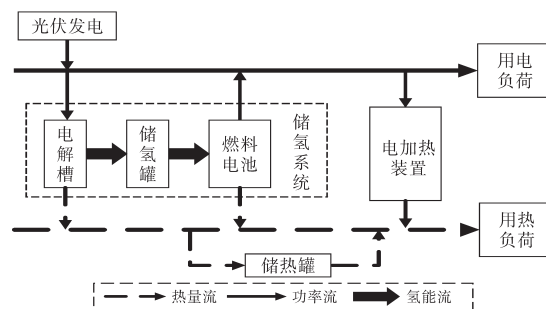


图1 光氢燃料电池系统结构

Fig.1 Photohydrogen fuel cell system structure

1.2 数学模型

1.2.1 电解槽热电平衡模型

电解槽处于平稳运行状态时,温度变化幅度很小,可忽略与环境交换热损耗,电解槽的热电平衡方程为

$$Q_{el} = (1 - \eta_{el})P_{el} \quad (1)$$

式中: P_{el} 为电解槽输入电功率; Q_{el} 为电解槽产热功率,以热水的形式存储作为热网的热源; η_{el} 为电解槽制氢效率,本文取60%。

1.2.2 燃料电池的热电联供模型

与电解槽类似,燃料电池的热电平衡方程为

$$Q_{fc} = \left(\frac{1}{\eta_{fc}} - 1 \right) P_{fc} \quad (2)$$

式中: P_{fc} 为燃料电池的输出电功率; Q_{fc} 为燃料电池的产热功率; η_{fc} 为燃料电池的发电效率,本文取60%。

1.2.3 制氢储氢模型

电解槽制氢模型如下:

$$W_{el}(t) = P_{el}(t)\eta_{el}/39.2 \quad (3)$$

式中: $W_{el}(t)$ 为 t 时刻制氢的质量; 39.2 为理想情况下的 1 kg 氢气等效转换的电能, kW·h。

燃料电池输出功率模型如下:

$$P_{fc}(t) = 39.2 W_{fc}(t) \eta_{fc} \quad (4)$$

式中: $W_{fc}(t)$ 为 t 时刻输出氢气的质量。

储氢罐的数学模型如下:

$$W_{sH}(t) = W_{sH}(t-1) + \left[\eta_H W_{el}(t) - \frac{W_{fc}(t)}{\eta_H} \right] \Delta t \quad (5)$$

式中: $W_{sH}(t)$ 为 t 时刻储氢罐储存的氢气质量; η_H 为储氢效率, 本文取 90%; Δt 为时间步长, 本文取 1 h。

系统运行中, 氢储能系统 t 时刻的最大输出功率受元件自身容量与储氢罐剩余容量的限制, 其数学表达式为

$$P_{el,max}(t) = \min \left\{ \frac{C_{el}}{\Delta t}, \frac{W_{sH,max} - W_{sH}(t)}{\Delta t \eta_{el}} \right\} \quad (6)$$

$$P_{fc,max}(t) = \min \left\{ \frac{C_{fc}}{\Delta t}, \frac{W_{sH}(t) - W_{sH,min}}{\Delta t} \eta_{fc} \right\} \quad (7)$$

式中: C_{el} , C_{fc} 分别为电解槽、燃料电池的容量; $W_{sH,max}$, $W_{sH,min}$ 为储氢罐储氢容量的上限、下限, 取 $W_{sH,max} = 0.9 C_{sH}$, $W_{sH,min} = 0.2 C_{sH}$ 。

1.2.4 电加热装置模型

电加热装置模型如下:

$$Q_{eh}(t) = \eta_{eh} P_{eh}(t) \quad (8)$$

式中: $P_{eh}(t)$ 为 t 时刻电制热装置输入电功率; $Q_{eh}(t)$ 为 t 时刻电制热装置输出热功率; η_{eh} 为电加热装置制热效率, 本文取 95%。

2 系统容量优化模型

2.1 目标函数

微网容量规划以成本最优为目标, 同时将弃光量、缺电量及缺热量以惩罚项的形式计入目标函数以实现稳定供能。经济成本目标函数可表示为

$$\min(C) = 1.05 \sum \left[\frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} + \varphi_i \right] S_i C_i + \alpha W_{tot}^{pv} + \beta W_{tot}^e + \gamma W_{tot}^h \quad (9)$$

其中

$$\begin{cases} \alpha, \beta, \gamma = 10 & 0 < W_{tot}^{pv}, W_{tot}^e, W_{tot}^h < 10 \\ \alpha, \beta, \gamma = 100 & 10 < W_{tot}^{pv}, W_{tot}^e, W_{tot}^h < 100 \\ \alpha, \beta, \gamma = 1000 & 100 < W_{tot}^{pv}, W_{tot}^e, W_{tot}^h < 1000 \\ \alpha, \beta, \gamma = 10000 & 1000 < W_{tot}^{pv}, W_{tot}^e, W_{tot}^h \end{cases} \quad (10)$$

式中: S_i , C_i 分别为第 i 类设备的容量单位成本和容量规模; φ_i 为第 i 类设备每年运维耗资占购买成本比例; r 为实际年利率, 本文取 10%; n 为设备寿命周期; α, β, γ 为随弃光量、缺电量、缺热量变化的惩罚单价系数; W_{tot}^{pv} 为弃光量; W_{tot}^e 为缺电量; W_{tot}^h 为缺热量; 1.05 为系数, 其中包括 0.05 的其他投资成本。

2.2 约束条件

1) 电功率平衡约束如下:

$$\begin{cases} \eta_{pv}(t) C_{pv} = P_{load}(t) + P_{el}(t) + P_{eh}(t) + P_{loss}^{pv}(t) \\ \Delta P(t) > 0 \\ P_{load}(t) = \eta_{pv}(t) C_{pv} + P_{fc}(t) + P_{loss}(t) \\ \Delta P(t) < 0 \end{cases} \quad (11)$$

式中: $\eta_{pv}(t)$ 是 t 时刻光伏出力因子, 其值在 0~1 之间; C_{pv} 为光伏电池容量; $\eta_{pv}(t) C_{pv}$ 为光伏 t 时刻光伏最大出力; $\Delta P(t)$ 为系统盈余功率。

2) 热功率平衡约束如下:

$$\begin{cases} Q_{st}(t) = Q_{st}(t-1) + \{ \eta_h [Q_{el}(t) + Q_{eh}(t)] - \frac{1}{\eta_h} Q_{load}(t) \} \Delta t & \Delta P(t) > 0 \\ Q_{st}(t) = Q_{st}(t-1) + \{ \eta_h Q_{fc}(t) - \frac{1}{\eta_h} [Q_{load}(t) - Q_{loss}(t)] \} \Delta t & \Delta P(t) < 0 \end{cases} \quad (12)$$

式中: $Q_{st}(t)$ 为 t 时刻储热罐储热量; η_h 为热网效率, 本文取 98%。

3) 各装置容量约束如下:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{el}(t) \leq C_{el} \\ 0 \leq P_{fc}(t) \leq C_{fc} \\ 0 \leq P_{eh}(t) \leq C_{eh} \\ 0 \leq Q_{st} \leq C_{st} \end{cases} \quad (13)$$

4) 始末状态约束如下:

$$\begin{cases} Q_{st}(0) = Q_{st}(24) \\ W_{sH}(0) = W_{sH}(24) \end{cases} \quad (14)$$

储氢罐和储热罐能量在一个运行周期内始末状态相同, 可提高系长期运行的可靠性。

3 控制策略与求解方法

3.1 运行控制策略

通过协调各设备的启停顺序与出力大小, 使系统各设备保持高效运行。本文所提运行策略如图 2 所示。图中, $P_{el,max}(t)$, $P_{fc,max}(t)$ 计算分别对应式(6)、式(7), 字母 A~I 表示在对应时间段内的

工作状态,具体如下:

A:系统盈余功率 $\Delta P(t)$ 全部用于电加热装置制热,与储热罐共同供热;

B:电加热装置最大功率运行,不能消纳的功率记为弃光功率 $P_{pvloss}(t)$,与储热罐共同供热;

C:电解槽以最低功率运行, $P_{el}(t)=0.1\Delta P(t)$,其余盈余功率用于电加热装置制热,与储热罐共同供热;

D:系统盈余功率全部供给电解槽制氢,满足热负荷后的多余热能存入储热罐;

E:电解槽和电加热装置都以最大功率运行,

满足热负荷后的多余热能存入储热罐;

F:电解槽以最大功率运行,其余电能给电加热装置进行制热,满足热负荷后的多余热能存入储热罐;

G:燃料电池功率等于缺额功率,燃料电池与储热罐共同供热;

H:燃料电池以最大功率运行,缺电功率记为 $P_{loss}(t)$,与储热罐共同供热;

I:燃料电池以最大功率工作,但系统供热功率仍不能满足系统热负荷需求,将差额热功率记为缺热功率 $Q_{loss}(t)$ 。

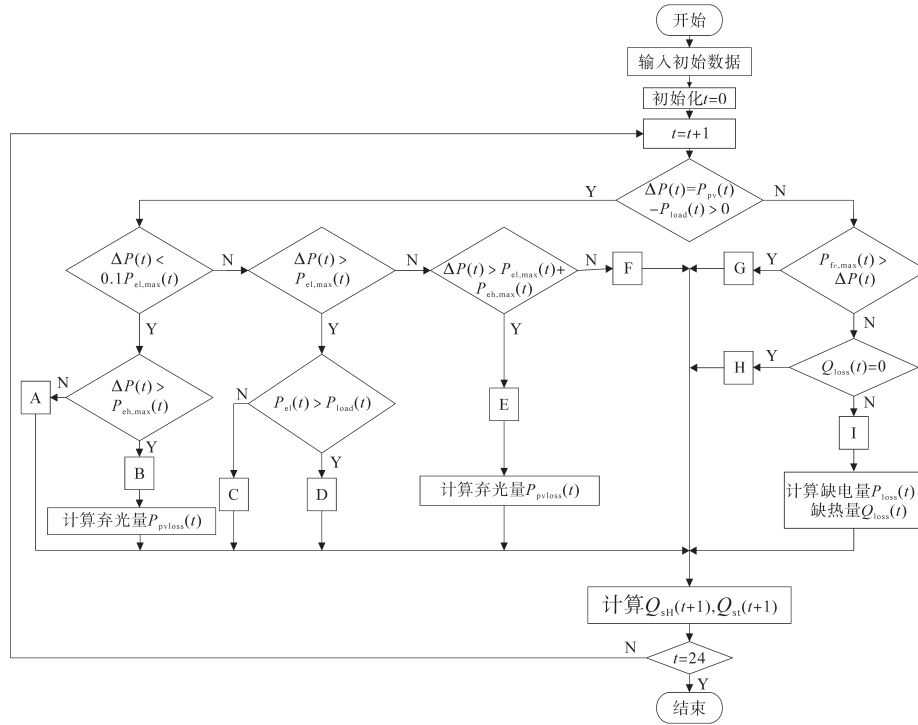


图2 运行控制策略

Fig.2 Operational control strategy

3.2 模型求解方法

在光氢储能系统中,以光伏电池、电解槽、燃料电池、电加热装置、储氢罐和储热罐的容量为优化变量,结合本文运行控制策略,建立优化配置模型。本文采用改进惯性权重的粒子群算法求解优化变量,其速度公式和位置公式如下:

$$v_{ij}(t+1) = \omega v_{ij}(t) + c_1 r_1 (p_i^{\text{best}} - x_{ij}) + c_2 r_2 (g_i^{\text{best}} - x_{ij}) \quad (15)$$

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1) \quad (16)$$

式中: ω 为惯性权重; c_1, c_2 为学习因子; r_1, r_2 为0~1的随机数; t 为迭代次数; $v_{ij}(t)$ 为第 t 次迭代粒子 i 速度矢量第 j 维分量; $x_{ij}(t)$ 为第 t 次迭代粒子 i 位置矢量第 j 维分量; p_i^{best} 为粒子 i 的局部最优解; g_i^{best}

为粒子 i 的全局最优解。

针对传统粒子群算法惯性权重较线性,易陷入局部最优解问题,提出一种动态非线性自适应变化权重系数方法,其表达式如下:

$$\omega(t) = \delta \cos\left(\frac{\pi}{2} \times \frac{t}{T_{\max}}\right)^{\left(n - \frac{t}{T_{\max}}\right)} \quad (17)$$

式中: δ 为系数,取0.8; $T_{\max}$ 为最大迭代次数; n 为1~1.5之间的一个随机数。

此权重系数在迭代过程中变化较平缓,前期权重值较高,容易跳出局部最优解,中后期权重值较低,利于算法寻找最优解。

本文采用改进粒子群算法求解优化变量的流程图如图3所示,步骤如下:

- 1)先设置基本参数,包括储能罐初始状态系数、设备基本参数等;
- 2)设定粒子迭代次数、种群大小,在边界范围内初始化粒子速度、位置;
- 3)将初始化粒子代入控制策略,求取系统弃光量、缺电量和缺热量;
- 4)对初始粒子求适应度值,并初次筛选局部最优解和全局最优解;
- 5)根据式(15)和式(17)更新速度并将速度越限粒子拉回边界内,根据式(16)对位置进行更新,并将越限粒子拉回边界;
- 6)将更新后的粒子代入第3)步,迭代循环至最大迭代次数终止,得到最优容量配置。

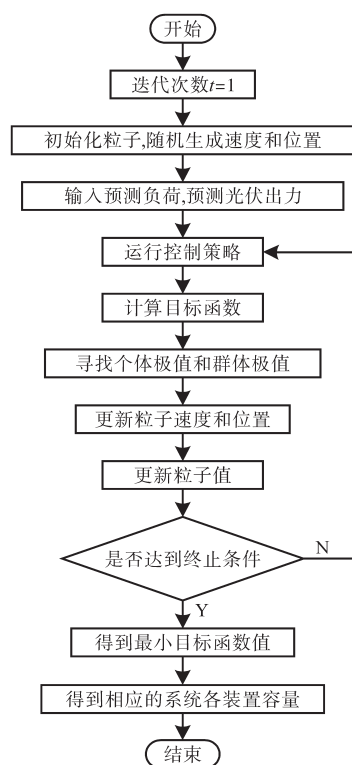


图3 改进粒子群算法优化流程

Fig.3 Improved particle swarm optimization process

4 算例分析

4.1 典型仿真场景

熊宇峰等^[14]曾对独立光伏制氢系统中各设备容量进行优化配置,本文就同一案例,通过 Matlab 软件在既定控制策略下,采用改进粒子群算法对其容量配置进行优化,图4是某典型日的冬季光伏出力因子图,图5为热电负荷图。图5中,电热负荷的高峰区间基本一致,主要集中在8:00—11:00,16:00—18:00,在该时间段内,光辐射强度相对较低,需要较多地使用到储能装置,所以需要

要储能容量的配置尽量精确,有一定裕度空间的前提下能满足系统要求,但容量配置不能过大。

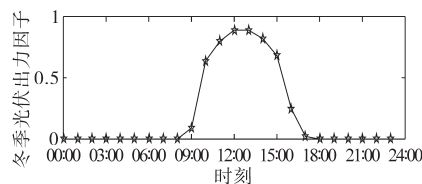


图4 某地冬季典型日光伏出力因子

Fig.4 Typical solar photovoltaic output factors in winter

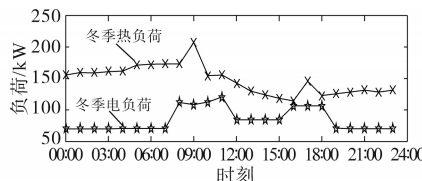


图5 某地冬季典型日热电负荷

Fig.5 Typical daily heat and power load in winter somewhere

4.2 参数设定

本文设定微电网系统的寿命周期为20 a,其他设备参数,如表1所示。

表1 各设备参数

Tab.1 Individual device parameters

设备类型	单位成本/元	运维占比/%
光伏	4 500	2
电解槽	2 210	4
燃料电池	4 550	4
电加热	100	1
储氢罐	65	1
储热罐	3	4

4.3 光氢储与光蓄储配置结果

根据上文所建模型,在相同的场景下通过改进粒子群算法对容量配置优化,设置粒子种群数量为150,迭代次数为170,得到两种系统的配置方案和函数值,如表2所示。

表2中,方案1为本文所配方案,方案2为文献[14]的配置方案,两方案的燃料电池容量配置一致,差异在于电解槽、电加热和储热罐的容量不同。本文电解槽容量减小了89.5 kW,相应的储氢罐容量也减少约7 kg,电加热装置容量略高,储热罐减少527 kW,下降了18%。在有光伏功率时两方案电热能量分配不同,如表3所示。

表2 容量配置结果

Tab.2 Capacity configuration results

	光伏/kW	电解槽/kW	燃料电池/kW	电加热/kW
方案1	1 140	560.5	109	370
方案2	1 099	650	109	351
	储氢罐/kg	储热罐/kW	总成本/万元	
方案1	92.5	2 367	103.9	
方案2	99.6	2 894	106.2	

表3 日间电热分配占比

Tab.3 Proportion of daytime electricity and heat distribution

	耗电/%		制热/%	
	电解槽	电加热装置	电解槽	电加热装置
方案1	70.98	29.02	45.6	44.3
方案2	75	25	60.5	27.8

由表3可知,方案1的电加热装置白天制热量占比为44.3%,大于方案2的27.8%,显著提高了电加热装置的利用水平;本文方案日间总制热占比为89.9%,高于方案2的88.3%,储热罐容量减少了527 kW。具体各设备仿真运行情况如图6~图8所示。

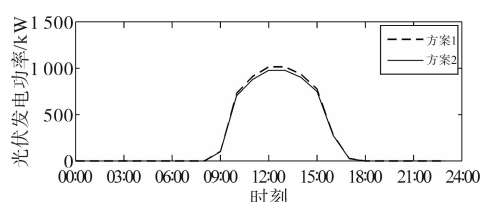
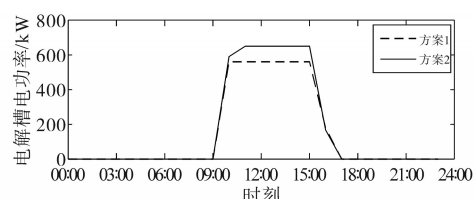
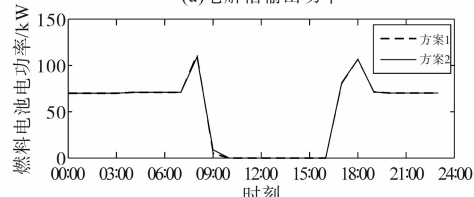


图6 某地冬季典型日光伏电池输出功率

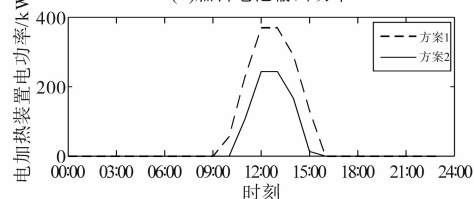
Fig.6 Output power of typical solar cell in winter



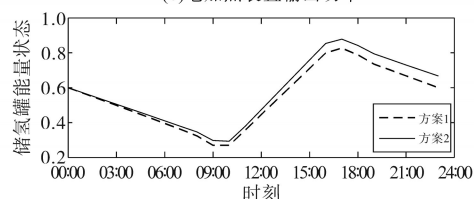
(a)电解槽输出功率



(b)燃料电池输出功率



(c)电加热装置输出功率



(d)储氢罐能量状态

图7 两种方案系统仿真运行情况

Fig.7 Two scenarios system simulation operation

图6是两种方案下的光伏发电输出功率曲线,方案1的输出功率在10:00—15:00区间内高

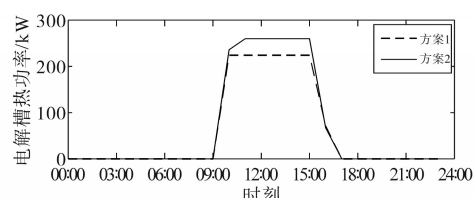
于方案2,其余时间段因为光伏出力因子很小,所以两者输出功率曲线近乎重合。

图7a是两种方案下的电解槽输出功率曲线,方案1在10:00到达电解槽的额定功率,方案2由于电解槽容量大,在11:00到达峰值,一直持续到15:00,此阶段内方案2的电解槽制氢量高于方案1。在其余阶段方案1与方案2相等,是因为系统盈余功率小于方案2电解槽的额定功率。

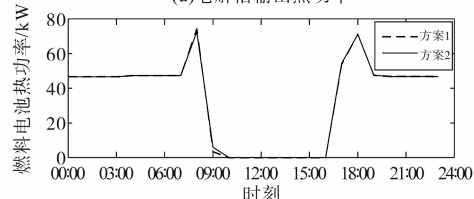
图7b是两种方案下的燃料电池输出功率曲线,两者基本一致。在上午9:00时方案1功率较低,是由于方案1的光伏容量较高,系统缺额功率小于方案2所致。

图7c是电加热装置输出功率曲线,可以明显看到方案1的制热功率整体高于方案2。方案1电加热10:00启动,正是其电解槽达到峰值功率的时刻,与图7a相对应。方案1从12:00到13:00运行在电加热的额定功率370 kW,而方案2的电加热运行在243 kW,未达到其额定容量351 kW,其容量配置偏大。

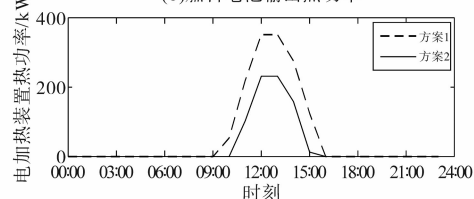
图7d是储氢罐的能量状态曲线,两者都工作在储氢罐的约束区间内。方案1的始末状态相



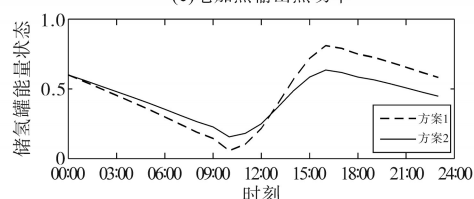
(a)电解槽输出热功率



(b)燃料电池输出热功率



(c)电加热装置输出热功率



(d)储氢罐能量状态

图8 两种方案热功率运行情况

Fig.8 Thermal power operation of two schemes

同,方案2则约高出6.8%,如果累积几个运行周期,将造成储氢罐的储氢量饱和,导致能源浪费。可以发现,方案2的电解槽容量偏高。

图8a是电解槽的输出热功率曲线,方案2的制热量比方案1多187 kW·h;图8b是燃料电池输出热功率曲线,两者基本一致;图8c是电加热装置输出热功率曲线,方案1的制热量为方案2的1.86倍,多638.6 kW·h;图8d是储热罐能量状态曲线。在11:00时,其能量状态到达最低点,方案1为储热罐的6%,方案2为储热罐的15.6%,都满足系统运行需求。但方案2在24:00时,储热罐能量状态相比初始状态下降了14%,不利于长期运行。方案1则同初始状态相同,满足长期运行的条件。

5 结论

通过对比两种方案下的容量配置结果,并通过Matlab软件进行一个运行周期的仿真运行,发现两方案都能较好地满足系统运行要求。

1)两者燃料电池的容量配置是一致的,都能满足光伏发电功率较小或无光照时的电需求。

2)文献[14]方案的电解槽容量偏高,造成了储氢罐容量末状态较初始升高了6.8%,持续几个运行周期可能出现制氢量过剩问题。本文方案电解槽容量较小,储氢罐的始末状态相同,更利于系统长期稳定运行。

3)文献[14]方案配置的光伏电池容量偏低,电加热装置输出功率最高为额定功率的69%,造成储热罐的末状态相比初始状态下降了14%,持续运行可能出现系统缺热现象。本文方案配置了较高容量的光伏发电功率和电加热功率,在12:00—13:00时间段内,电解槽和电加热装置都以额定功率运行,较高的制热量减少了储热罐的后备容量,且保证了储热罐的始末状态相同,利于系统长期稳定运行。

4)本文配置方案的电解槽容量较文献[14]方案减少了89.5 kW,减少的这部分热量由电加热装置提供。由于电加热装置价格仅为电解槽价格的4.5%,所以本文的综合成本为文献[14]方案的97.8%,经济性更好。

参考文献

[1] 侯健,杨铮,贺婷,等.质子交换膜燃料电池热管理问题的研究进展[J].中南大学学报(自然科学版),2021,52(1):19-30.

- Hou Jian, Yang Zheng, He Ting, *et al.* Research progress on thermal management of proton exchange membrane fuel cells [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2021, 52 (1): 19-30.
- [2] 马磊,张超,钟鸣,等.光储气微网优化运行研究[J].电气传动,2021,51(9):67-74.
- Ma Lei, Zhang Chao, Zhong Ming, *et al.* Research on economical operation of the micro-grid with photovoltaic and natural gas[J]. Electric Drive, 2021, 51(9): 67-74.
- [3] 俞红梅,衣宝廉.电解制氢与氢储能[J].中国工程科学,2018,20(3):58-65.
- Yu Hongmei, Yi Baolian. Hydrogen for energy storage and hydrogen production from electrolysis[J]. China Engineering Science, 2018, 20(3): 58-65.
- [4] 杨旭红,尹聪聪.基于孤岛模式光储直流微电网的协调控制策略[J].电气传动,2020,50(5):75-80.
- Yang Xuhong, Yin Congcong. Coordinated control strategy of light storage and DC microgrid based on islanding mode[J]. Electric Drive, 2020, 50(5): 75-80.
- [5] Cappa F, Facci A L, Ubertini S. Proton exchange membrane fuel cell for cooperating households: a convenient combined heat and power solution for residential applications[J]. Energy, 2015, 90: 1229-1238.
- [6] 陈亚爱,洪忆南,周京华,等.级联型储能功率变换系统控制策略综述[J].电气传动,2021,51(7):3-11.
- Chen Ya'ai, Hong Yinan, Zhou Jinghua, *et al.* Summary of control strategies for cascaded energy storage power conversion system[J]. Electric Drive, 2021, 51(7): 3-11.
- [7] 沈小军,聂聪颖,吕洪.计及电热特性的离网型风电制氢碱性电解槽阵列优化控制策略[J].电工技术学报,2021,36(3):463-472.
- Shen Xiaojun, Nie Congying, Lü Hong. Coordination control strategy of wind power-hydrogen alkaline electrolyzer bank considering electrothermal characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(3): 463-472.
- [8] 张皓,段玉兵,姚金霞,等.水下机器人储能装置控制技术的研究[J].电气传动,2020,50(10):91-95,112.
- Zhang Hao, Duan Yubing, Yao Jinxia, *et al.* Research on control technology of energy storage device for underwater robot[J]. Electric Drive, 2020, 50(10): 91-95, 112.
- [9] 毛人杰,李媛,方番.基于模糊控制的储能型准Z源变流器[J].电气传动,2020,50(3):40-44.
- Mao Renjie, Li Yuan, Fang Fan. Energy-stored quasi Z-source converter based on fuzzy control[J]. Electric Drive, 2020, 50(3): 40-44.
- [10] 石庆均.微网容量优化配置与能量优化管理研究[D].杭州:浙江大学,2012.
- Shi Qingjun. Research on optimal sizing and optimal energy management for microgrid[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [11] 李炜.独立的太阳能燃料电池联合发电系统的协调控制设

(下转第65页)

- Peng Qiyuan, Hu Yuxin, Lu Gongyuan. Intelligent generation model of dispatching command based on early-warning text information[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2020, 48(9): 1328-1335, 1363.
- [5] 孙国强, 沈培峰, 赵扬, 等. 融合知识库和深度学习的电网监控告警事件智能识别[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(4): 40-47.
- Sun Guoqiang, Shen Peifeng, Zhao Yang, *et al.* Intelligent recognition of power grid monitoring alarm event combining knowledge base and deep learning[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(4): 40-47.
- [6] 高泽璞, 赵云, 余伊兰, 等. 基于知识图谱的低压配电网拓扑结构辨识方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(2): 34-43.
- Gao Zepu, Zhao Yun, Yu Yilan, *et al.* Low-voltage distribution network topology identification method based on knowledge graph[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(2): 34-43.
- [7] 石访, 张林林, 胡熊伟, 等. 基于多属性决策树的电网暂态稳定规则提取方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(11): 2364-2374.
- Shi Fang, Zhang Linlin, Hu Xiongwei, *et al.* Power system transient stability rules extraction based on multi-attribute decision tree[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(11): 2364-2374.
- [8] 陈通, 樊蓓蓓, 陈东萍. 基于双重模糊模拟的直觉模糊向量关联规则挖掘[J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26(7): 1875-1886.
- Chen Tong, Fan Beibei, Chen Dongping. Intuitionistic fuzzy vector association rules mining based on dual fuzzy simulation[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2020, 26(7): 1875-1886.
- [9] 陆旭, 陈毅红, 熊章瑞, 等. 一种面向大数据分析的快速并行决策树算法[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2020, 42(2): 244-251.
- Lu Xu, Chen Yihong, Xiong Zhangrui, *et al.* A fast parallel decision tree algorithm for big data analysis[J]. Journal of Yunnan University(Natural Sciences Edition), 2020, 42(2): 244-251.
- [10] 徐彪, 尹项根, 张哲, 等. 矩阵算法和优化算法相结合的配电网故障定位[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(5): 152-158.
- Xu Biao, Yin Xianggen, Zhang Zhe, *et al.* Fault location for distribution network based on matrix algorithm and optimization algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(5): 152-158.
- [11] 刘军, 王颖, 张冰, 等. 电力骨干通信网中告警预测方法研究[J]. 光通信研究, 2019(5): 9-13.
- Liu Jun, Wang Ying, Zhang Bing, *et al.* Research on alarm prediction method based on data pre-processing in power backbone communication network[J]. Study on Optical Communications, 2019(5): 9-13.
- [12] 柯杨, 邓祥力. 考虑异常事件约束的电网故障诊断解析模型[J]. 水电能源科学, 2020, 38(12): 180-183, 192.
- Ke Yang, Deng Xiangli. Analytical model of power grid fault diagnosis considering abnormal event constraints[J]. Water Resources and Power, 2020, 38(12): 180-183, 192.
- [13] 晏鹏, 黄晓旭, 黄玉辉, 等. 基于BERT-DSA-CNN和知识库的电网调控在线告警识别[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(4): 129-136.
- Yan Peng, Huang Xiaoxu, Huang Yuhui, *et al.* Online alarm recognition of power grid dispatching based on BERT-DSA-CNN and a knowledge base[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(4): 129-136.
- [14] 王洪彬, 张友强, 童晓阳, 等. 基于PAT包含告警信号的智能变电站保护信息交互建模与验证[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(13): 124-132.
- Wang Hongbin, Zhang Youqiang, Tong Xiaoyang, *et al.* PAT based modeling and verification of interaction for protection system in intelligent substation using alarming signals[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(13): 124-132.
- [15] 姜文, 王禄海, 吴清玉, 等. 电力系统通信网络状态估计模型与智能告警[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(2): 101-105, 118.
- Jiang Wen, Wang Luhai, Wu Qingyu, *et al.* State estimation model for power system communication network and intelligent alarm[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2019, 31(2): 101-105, 118.

收稿日期:2021-10-11

修改稿日期:2021-12-16

(上接第50页)

- 计与仿真研究[D]. 上海:上海交通大学, 2007.
- Li Wei. Control design and simulation research of stand-alone solar fuel cell hybrid generation system[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007.
- [12] Mamaghani A H, Najafi B, Casalegno A, *et al.* Optimization of an HT-PEM fuel cell based residential micro combined heat and power system: a multi-objective approach[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 180: 126-138.
- [13] Mamaghani A H, Najafi B, Casalegno A, *et al.* Long-term economic analysis and optimization of an HT-PEM fuel cell based micro combined heat and power plant[J]. Applied Energy,

2017, 192(C): 519-529.

- [14] 熊宇峰, 司杨, 郑天文, 等. 考虑热电综合利用的光伏储氢独立供能系统容量优化配置[J]. 中国电力, 2020, 53(10): 66-73.
- Xiong Yufeng, Si Yang, Zheng Tianwen, *et al.* Optimal capacity configuration of solar-hydrogen independent power-supply system considering electricity-heat comprehensive utilization[J]. Electric Power, 2020, 53(10): 66-73.

收稿日期:2021-04-28

修改稿日期:2021-05-14