

# 组合蓄能离网型自治光伏发电系统 优化运行与配置设计

王立娜, 周克亮, 卢闻州, 程明

(东南大学 电气工程学院, 江苏省 南京市 210096)

## Optimal Operation and Configuration Design of Off-Grid Autonomous Photovoltaic Generation System With Hybrid Energy Storage

WANG Li-na, ZHOU Ke-liang, LU Wen-zhou, CHENG Ming

(School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu Province, China)

**ABSTRACT:** An off-grid autonomous photovoltaic generation system with hybrid energy storage, in which the water-electrolytic hydrogen making equipment and battery are integrated to store the energy, is proposed and the approaches for optimal operation and configuration for the proposed autonomous photovoltaic generation system are given. The proposed photovoltaic generation system can eliminate the mismatching between intermittent solar irradiation and the time-varying load demand, and the given optimal operation and configuration design approaches can be employed to optimize its operation and investment cost. Taking two consumers located in different latitudes for example, the comparative calculation and simulation of the proposed autonomous photovoltaic generation system with hybrid energy storage and conventional photovoltaic generation system with battery are performed. Simulation results show that the proposed photovoltaic generation system with hybrid energy storage not only can operate in green autonomous mode and provide uninterrupted power supply, but also possesses such advantages as lower investment cost, smaller volume, light weight and so on.

**KEY WORDS:** hybrid energy storage; photovoltaic generation; optimal system design; off-grid; autonomous operation

**摘要:** 提出了采用电解水制氢与蓄电池相结合的组合蓄能离网型自治光伏发电系统及其优化运行与配置设计方法。该系统不仅能消除太阳能与用户负荷间供需失配的影响,且能实现运行和成本的优化。以不同纬度地区的2个用户为例,对组合蓄能光伏发电系统和常规蓄电池蓄能光伏发电系统进

行了对比计算与仿真。仿真结果表明,与常规系统相比,组合蓄能系统不仅能够绿色自治运行,提供不间断的电力供应,且成本较低、体积较小、重量较轻等。

**关键词:** 组合蓄能; 光伏发电; 优化设计; 离网型; 自治运行

## 0 引言

作为一种洁净能源发电装置,离网型光伏发电系统成本较高,适用于那些化石燃料匮乏和电网无法伸入的偏远地区<sup>[1-15]</sup>。常规离网型光伏发电系统通常采用蓄电池蓄能来减缓由太阳辐射强度的波动以及用户负荷的时变所造成的供需失配,从而提供较稳定的供电。当蓄电池容量不足时,常规系统采用电荷泻放和供电中断等手段防止蓄电池过度充放电来保证系统安全运行,但这将带来电力浪费并导致系统效率下降。由于蓄电池能量密度低、自漏电率较高,使得常规系统难以自治运行以提供长期稳定且经济的电力供应;若常规系统添加柴油发电来保证供电连续,则增加了燃油费用并导致污染。

本文研究一种离网型光伏发电系统。该系统采用蓄电池和电解水制氢相结合的方式蓄能,其中蓄电池用于短时蓄能;而电解水制氢用于长期蓄能。组合蓄能方式大大增强了系统的能量缓冲能力,能彻底消除系统中电力供需的失配,使系统能够长期提供不间断的供电且动态响应好,于是发电系统能够实现绿色自治运行(即零排放、完全依赖光伏发电且供电不间断)。

## 1 离网型光伏发电系统

### 1.1 常规离网型光伏发电系统

常规离网型光伏发电系统采用单一的蓄电池蓄

基金项目: 江苏省“六大人才高峰”资助项目(2008116); 教育部留学回国人员启动资金资助项目。

能,如图 1(a)所示。如图 1(b)所示,该系统有 2 条传输通道 A 和 B 将光伏电能  $P_S$  供应给用户:部分光伏电能  $P_{SD}$  由通道 A 直接供应用户;部分电能  $P_{SB}$  由通道 B 经蓄电池缓冲后供应用户。其基本工作原理为:1) 若  $P_S$  大于用户所需,而蓄电池未充满,则部分电能首先经通道 A 送到用户满足其需求,其余的电量将经通道 B 用于蓄电池充电;2) 若  $P_S$  小于用户所需,而蓄电池未电力不足,则  $P_S$  全部经通道 A 送到用户,而蓄电池经通道 B 放电以补充用电缺口;3) 若  $P_S$  大于用户所需,而蓄电池已充满,则部分光伏电能经通道 A 送到用户满足其需求,且为避免蓄电池损坏,多余能量将通过泻放电阻  $R$  释放,但这样会造成光伏电能的浪费从而导致系统效率的下降;4) 若  $P_S$  小于用户所需,而蓄电池电力不足,为避免蓄电池损坏,则中断用户供电,  $P_S$  全部经通道 B 用于蓄电池充电。要保证该光伏发电系统优化运行,应尽可能避免第 3) 和 4) 类情形出现,这就要求蓄电池的容量足够大。

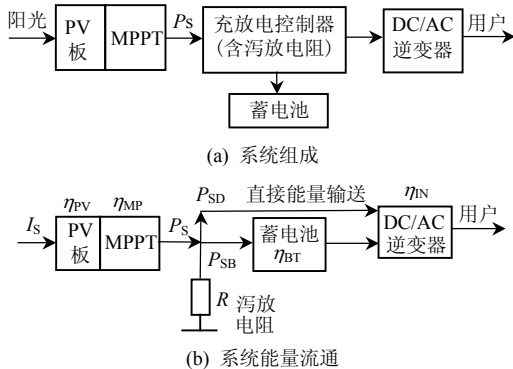


图 1 常规离网型光伏发电系统

Fig. 1 Conventional off-grid photovoltaic generation system

蓄电池容量的估算选择方法有:年能量平衡法、年最长连续阴雨天气电能平衡法、光电盈亏平衡法和基本负荷用电保障小时法等<sup>[1]</sup>。但这些方法计算出的结果参差不齐,或蓄电池容量不足使得光伏发电系统频繁停电,且泻放电阻消耗电能而导致系统效率下降;或蓄电池容量足够大却导致成本过高、体积过大、重量过重,且由于蓄电池自放电率较高等因素,蓄电池所存储的电能流失严重,不适合长期储能。此外,即使采用单一的蓄电池蓄能的风光互补方式亦无法完全保证系统连续供电<sup>[2]</sup>,系统需要添加有污染的柴油发电机组提供约 20% 的负载用电方可满足用户连续供电。因而采用单一的蓄电池储能难以实现离网型光伏发电系统的绿色自治运行。

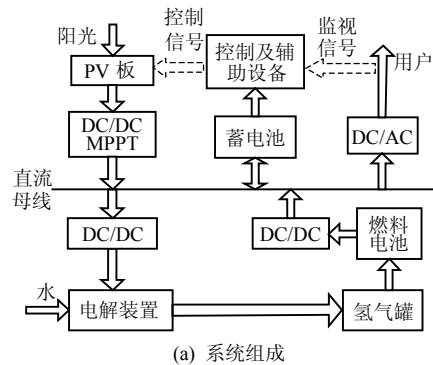
下面将采用蓄电池与电解水制氢的组合蓄能方式来实现离网型光伏发电系统绿色自治运行<sup>[6-9]</sup>。

## 1.2 组合蓄能离网型光伏发电系统

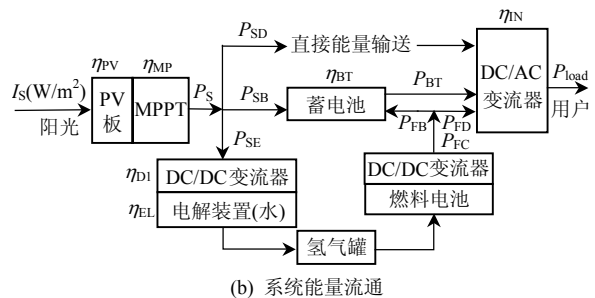
### 1.2.1 系统组成

如图 2(a)所示,组合蓄能发电系统采用了蓄电池与电解水制氢蓄能(水电解氢装置、氢气罐、燃料电池)的组合方式取代了单一的蓄电池,其中蓄电池容量较小用于短时动态蓄能,电解水制氢蓄能方式容量大,用于长期蓄能。系统通过泻放电阻流失常能量,或借助柴油发电以保证供电连续。由于蓄电池效率高( $\eta_{BT} \approx 0.8 \sim 0.9$ )、动态特性好但能量密度低、自放电率较高,而氢气能量密度高易长期存贮无泄漏,但电解氢装置( $\eta_{EL} \approx 0.6 \sim 0.8$ )和燃料电池( $\eta_{FC} \approx 0.4 \sim 0.7$ )效率较低,蓄电池和水电解制氢装置相结合可形成优势互补:系统自治运行,且动态响应好、能量利用效率高、成本较低、体积较小和重量较轻。和常规系统相比,该组合蓄能系统增加了 2 条能量传输通道 C 和 D,其中通道 C: PV 板→电解装置→燃料电池→用户;通道 D: PV 板→电解装置→燃料电池→蓄电池→用户。

本文将针对组合蓄能系统提出优化运行与配置设计方案,使系统能量利用率能达到最佳,并优化系统主要部件规格(如 PV 板面积、蓄电池容量、氢气罐容量等),以确保系统能长期绿色自治运行,且使系统投资成本等接近最小化。



(a) 系统组成



(b) 系统能量流通

图 2 离网型组合蓄能光伏发电系统

Fig. 2 Off-grid photovoltaic generation system with hybrid energy storage

### 1.2.2 效率最优运行与控制策略

如图 2(b)所示, 各通道按照能量传输效率的高低排序依次为  $\eta_A > \eta_B > \eta_C > \eta_D$ , 其中  $\eta_A = \eta_{PV} \eta_{MP} \eta_{IN}$ ,  $\eta_C = \eta_{PV} \eta_{MP} \eta_{D1} \eta_{EL} \eta_{FC} \eta_{D2} \eta_{IN}$ ,  $\eta_B = \eta_A \eta_{BT}$ ,  $\eta_D = \eta_C \eta_{BT}$ 。本着能量利用效率最优的原则, 该系统相应的工作模式为: 任一时刻, 光伏电能  $P_S$  将优先通过传输效率较高的通道送往用户负荷。具体来说: 当  $P_S$  大于用户需要时, 光伏电能将首先经通道 A 送往用户, 多余的电能将优先经通道 B 用于蓄电池充电, 若蓄电池已充满电, 则电解氢装置开启, 多余能量将经通道 C 和 D 电解成氢气存贮起来; 当  $P_S$  低于用户需要时, 所有的光伏电能将经通道 A 送往用户, 不足的电能将优先经通道 B 由蓄电池放电补充, 若蓄电池电力不足, 则燃料电池开启, 将利用存贮的氢气产生电能经通道 C 和 D 来补足电力。

为实现系统以效率最优的方式运行, 可采取如图 3 所示的双滞环控制方案<sup>[8-9]</sup>, 其中设置滞环的目的是为防止电解装置和燃料电池频繁开关;  $E_{Lup}$  表示蓄电池已充满电,  $F_{Clow}$  表示蓄电池电力已用尽,  $E_{Lup} - F_{Clow}$  代表蓄电池的放电深度, 当然为保证系统的正常安全运行,  $F_{Cup}$  与  $F_{Clow}$  的取值均留有余量,  $F_{Cup}$  要低于蓄电池安全上限防止过充电,  $F_{Clow}$  要高于蓄电池安全下限防止过放电; 电解氢装置按可变输入功率模式运行; 而燃料电池由于负载跟随响应较慢, 它将以近似恒定功率的方式发出电能<sup>[8]</sup>, 其输出功率取略大于用户平均负荷值, 以尽量减少通道 D 的使用从而提高系统效率。

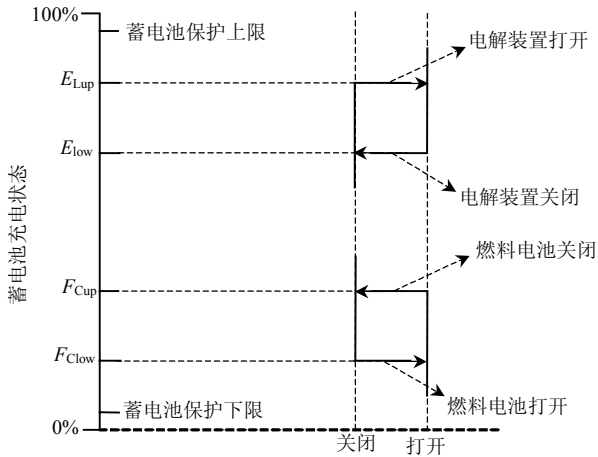


图 3 双滞环控制方案

Fig. 3 Double hysteresis control scheme

### 1.2.3 系统元件规格设计

系统元件的规格设计若过大将增加不必要的投资, 过小则不能满足用户需求。由于太阳辐射的间歇性、用户负荷的波动性以及二者之间的失配, 如

何选择规格合理的元件, 在保证系统自治运行的条件下尽可能地降低系统成本是本小节的主要任务。

1) PV 板面积。假定一年来系统实现了自治运行且正好实现了能量供需平衡, 即光伏电能恰好满足用户需求, 则由图 2(b)可知, 该系统的能量传输效率为

$$\eta_{sys} = c_A \eta_A + c_B \eta_B + c_C \eta_C + c_D \eta_D \quad (1)$$

其中  $c_A + c_B + c_C + c_D = 1$ ,  $c_i (i = A, B, C, D)$  为通道  $i$  一年内传输的能量占系统年传输总能量的比率。若已知用户负荷年均值  $P_{LYavg}$ , 则系统需要的 PV 板面积为

$$A_{PV} = M_{PV} \frac{P_{LYavg}}{I_{SYavg} \eta_{sys}} \quad (2)$$

其中:  $I_{SYavg}$  为年均太阳能辐射强度;  $M_{PV}$  为裕度系数, 取值应大于等于 1 以保证系统输入的能量超出用户的消耗, 当  $M_{PV} = 1$  时, 系统达到能量供需平衡。

图 4 为光伏电能与用户负荷的失配图。当系统能量供需平衡时,  $t_1 \sim t_2$  期间内“+”面积对应一年内通过通道 C 或 D 供应用户的能量;  $t_0 \sim t_3$  期间内阴影面积对应一年内通过通道 A 或 B 供应用户的能量。由于供需失配的随机性以及  $\eta_A$  与  $\eta_B$ 、 $\eta_C$  与  $\eta_D$  之间相差不大, 为简化计算, 令式(1)中  $c_A = c_B$  以及  $c_C = c_D$ , 于是可计算出 PV 板所需面积。

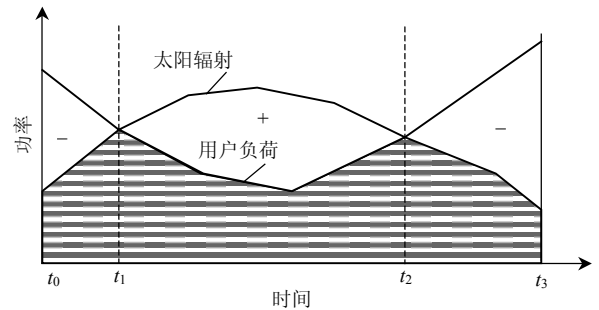


图 4 光伏电能与用户负荷失配关系

Fig. 4 Mismatching between solar power and user load

2) 蓄电池容量。为保证蓄电池的安全工作, 应当避免其过度充放电, 其容量为

$$E_{BT} = M_{BT} \frac{24 P_{LMmax}}{D_{oD} \eta_{BT}} \quad (3)$$

其中:  $D_{oD} = E_{Lup} - F_{Clow}$ , 为蓄电池放电深度; 裕度系数  $M_{BT}$  一般取 2~5, 即蓄电池容量可以满足用户 2~5d 的用电需求;  $P_{LMmax}$  为用户月平均功率最大值。

3) 电解氢装置的额定功率。考虑到电解装置用于吸收多余的光伏电能以及自身的短时过载能力, 其额定功率为

$$P_{ELr} = M_{EL} I_{Smax} A_{PV} \eta_{PV} \eta_{MP} \eta_{D1} \quad (4)$$

其中: 裕度系数  $M_{EL}$  一般可取 0.5~1;  $I_{Smax}$  为太阳

辐射强度最大值。

4) 燃料电池的额定功率。燃料电池发电用于满足用户用电, 考虑到其自身特性, 其额定功率为

$$P_{FCr} = M_{FC} P_{LMmax} / (\eta_{IN} \eta_{D2}) \quad (5)$$

其中裕度系数  $M_{FC}$  一般可取 1.2~2。

5) 氢气罐容积。图 4 中, 在  $t_1 \sim t_2$  期间, 多余能量将水电解为氢气存贮。依据理想气体方程, 氢气的热功当量为 237 kJ/mol 或 65.8 Wh/mol, 1 mol 氢气的体积在常温下约为 22.4 L, 于是氢气罐容积为

$$V_{HT} = \frac{0.022 \ 4 M_{TH}}{65.8 H_{PT}} \int_{t_1}^{t_2} \frac{P_s - P_{Load} / \eta_{IN}}{\eta_{D1} \eta_{EL}} dt \quad (6)$$

其中: 裕度系数  $M_{HT}$  至少大于 1, 以应对一年内氢气储量的涨跌;  $H_{PT}$  为氢气罐的气体存贮压强, 单位为标准大气压。

若系统为常规离网型光伏发电系统, 若要保证系统自治运行即式(2)中  $c_C = c_D = 0$ , 其计算 PV 板面积的方法不变, 而蓄电池容量的计算方法与本系统氢气罐容积的计算类似

$$E_{BTC} = \frac{M_{BTC}}{D_{oD}} \int_{t_1}^{t_2} (P_s - P_{Load} / \eta_{IN}) dt \quad (7)$$

其中  $M_{BTC}$  为裕度系数, 取大于 1 的值。

## 2 算例分析

选择我国北京和奥地利因斯布鲁克(简称因市) 2 地区的家庭用户进行研究, 其典型年份的太阳辐射和用户负荷数据见图 5 和 6。主要元件的效率为: PV 板  $\eta_{PV} \approx 0.1$ ; 铅蓄电池  $\eta_{BT} \approx 0.9$ ; 功率变换器  $\eta_{D1} = \eta_{D2} = \eta_{IN} \approx 0.95$ ; MPPT  $\eta_{MP} \approx 0.95$ ; 燃料电池  $\eta_{FC} \approx 0.65$ ; 电解装置  $\eta_{EL} \approx 0.7$ 。组合蓄能所采用的双滞环控制方案的主要参数为:  $E_{Lup} = 0.9$ ,  $E_{Llow} = 0.8$ ,  $F_{Cup} = 0.5$ ,  $F_{Clow} = 0.4$ 。仿真工具采用 TRNSYS16 软件<sup>[16]</sup>。

当采用常规离网型光伏发电系统给用户供电且实现自治运行时, 其蓄电池的充电状态  $S_{oCB}$  初值取 0.5, 以应付蓄电量的上下涨跌, 并令  $S_{oCB} > 0.95$  对应过充电状态,  $S_{oCB} < 0.3$  对应过放电状态, 即放电深度  $D_{oD} = 65\%$ , 且取  $M_{PV} = 1$  及  $M_{BTC} = 1$ , 依据 1.2.2 节的方法计算的系统能量平衡时的系统最低规格配置见表 1。由表 1 可见, 常规系统要实现自治运行所需的蓄电池容量过大, 且因市所需的蓄电池容量远比北京大, 这反映出因市地区用户的供需失配的程度更严重。一般而言, 供需匹配程度愈好, 所需的蓄电池的容量愈小, 反之愈大。

表 1 所列规格的常规系统的 2 年来的结果见图

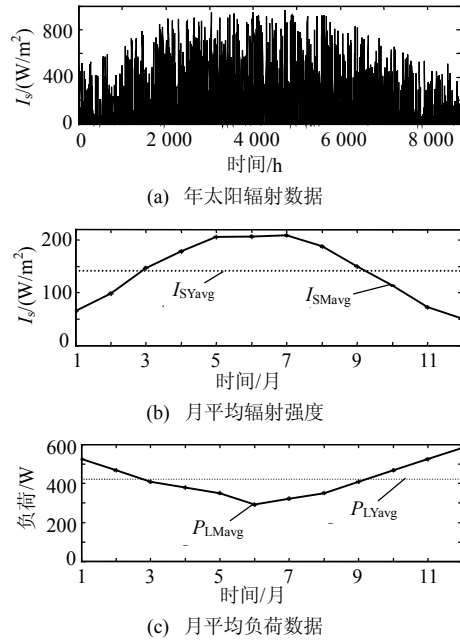


图 5 因斯布鲁克地区的太阳辐射和用户负荷数据  
Fig. 5 Solar irradiation and user load in Innsbruck

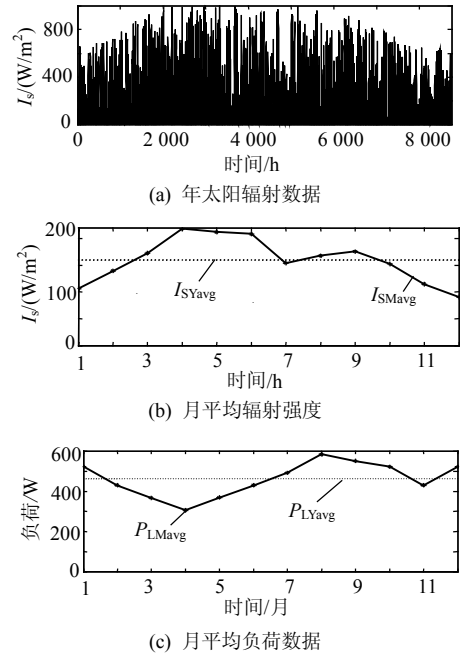


图 6 北京地区的太阳辐射和用户负荷数据  
Fig. 6 Solar irradiation and user load in Beijing

表 1 常规系统主要元件规格  
Tab. 1 Sizes of key components for conventional photovoltaic generation system

常规光伏发电系统	因斯布鲁克	北京
PV 板面积/m <sup>2</sup>	36	35
蓄电池容量/kWh	1 776	1 184

7, 其中图 7(a)和 7(b)分别代表因市、北京两地蓄电池的工作情况。图中的仿真结果显示, 2 年运行中两地蓄电池  $S_{oCB}$  的波动范围为: 0.28~0.9(因市)和 0.35~0.96(北京), 均接近放电深度 65%; 2 年后两

地最终的蓄电池充电状态为：0.51(因市)，0.48(北京)，均接近初值。由此可见，采用 1.2.2 节的方法所估算系统元件的规格，系统基本实现了供需能量平衡，蓄电池的所需容量的大小正好满足要求。需要指出的是，两地系统的蓄电池的持续充放电时间均长达数月，考虑到蓄电池的自放电等情况，若要实现能量平衡，蓄电池的容量可能要取大得多的值。当采用离网型组合蓄能光伏发电系统给用户供电且实现自治运行时，若取  $M_{PV}=1$ ， $M_{BT}=2$ ， $M_{HT}=1.6$ ， $M_{FC}=1.5$ ， $M_{EL}=0.8$  且  $H_{PT}=100$  个大气压，依据 1.2.2 节的方法所计算出系统能量平衡时的元件规格见表 2。同样为应对能量的波动，蓄电池充电状态  $S_{oCB}$  和氢气罐的充气状态  $S_{oCH}$  的初值均设为 0.5。

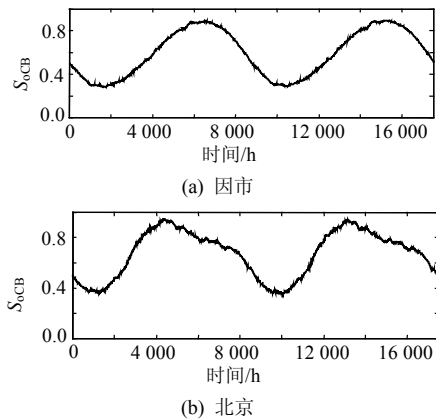


图 7 2年中常规光伏发电系统的蓄电池运行状态

Fig. 7 Battery operation state of conventional photovoltaic generation systems in two years

表 2 组合蓄能系统主要元件规格  
Tab. 2 Sizes of key components for hybrid energy storage system

名称	PV 板/ m <sup>2</sup>	蓄电池/ kWh	氢气罐/ m <sup>3</sup>	电解氢装置/ kW	燃料电池/ kW
因市	51	56	9	3.6	1
北京	44	56	6	3.2	1

采用表 2 所列规格的组合蓄能系统的 2 年来仿真结果见图 8。2 年运行中两地  $S_{oCB}$  的波动范围为：0.35~0.95(因市)，0.38~0.93(北京)，均在蓄电池安全工作范围内； $S_{oCH}$  的波动范围为：0.31~0.95(因市)，0.41~0.93(北京)，均在氢气罐容量许可范围内；2 年后两地最终的  $S_{oCH}$  为：0.59(因市)，0.62(北京)，均接近初值。由此可见，采用 1.2.2 节的方法所估算系统元件的规格，系统基本实现了供需能量平衡。考虑到氢气罐的裕度系数  $M_{HT}=1.6$ ，对氢气罐的容量的估算也基本准确。需要指出的是，由于氢气罐比蓄电池的蓄能容量要高出很多，因此只需根据  $S_{oCH}$  的变化就可判断系统能量是否平衡。

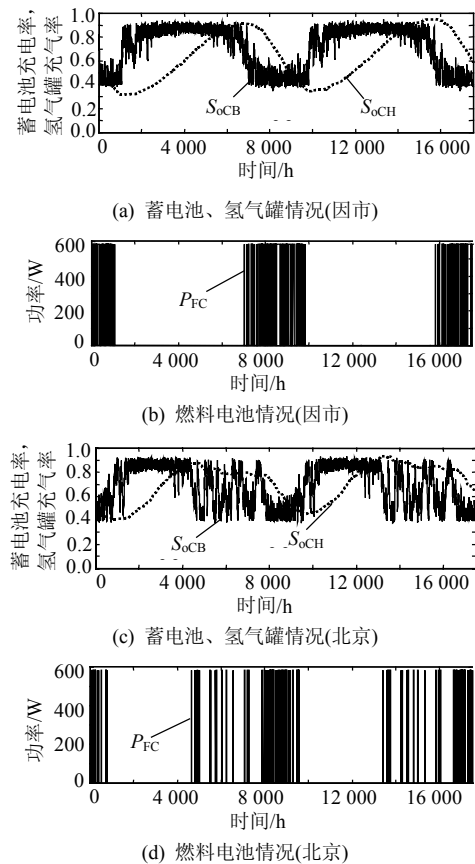


图 8 2年中组合蓄能光伏发电系统的运行状态

Fig. 8 Operation state of the hybrid energy storage photovoltaic generation systems in two years

根据表 3 所列主要元部件的技术和经济参数，表 4 列出了两地常规系统与组合蓄能系统的成本、体积与重量的估算值。其中，对于控制及辅助装置的成本，常规系统按 0.5 万元计算；组合蓄能光伏发电系统按 2 万元计算。依据表 1~4，虽然组合蓄能系统增加了 PV 板的面积，但无论从成本、体积还是重量的指标来衡量，若要实现自治运行，组合蓄能系统均明显优于常规系统。若放大 PV 板尺寸，

表 3 主要元件技术经济参数

Tab. 3 Techno-economic parameters of key components

名称	PV 板	铅酸电池	电解装置	燃料电池	氢气罐
单价	5 万元/ kW	0.1 万元/ kWh	1.0 万元/ kW	1.0 万元/ kW	0.1 万元/ m <sup>3</sup>
功率或 能量密度	—	30 Wh/kg (50 Wh/L)	310 W/kg (300 W/L)	310 W/kg (300 W/L)	—

表 4 2 种系统成本、质量和体积的比较

Tab. 4 Comparison of cost, weight, and volume between two kinds of system

系统	成本/万元	体积/m <sup>3</sup>	质量/t	
因市	常规系统	196.10	35.52	59.20
	组合系统	38.60	10.14	1.88
北京	常规系统	136.40	23.68	39.47
	组合系统	34.40	7.13	1.88

组合蓄能系统还可以提供氢燃料供其他用途。需要指出的是,根据表1和4中所列的技术经济数据,常规光伏系统采用蓄电池储能来实现自治运行均不切实际,没有实用价值,仅用于和组合蓄能系统进行比照之用,便于直观了解组合蓄能的特性。

### 3 结论

1) 采用电解水制氢蓄能与蓄电池相结合的组合蓄能方式能帮助离网型光伏发电系统消除由太阳能波动与用户负荷变化所造的电力供需失配的影响,从而实现自治运行,系统零排放、无污染。

2) 和常规光伏发电系统相比,在自治运行的前提下,采用本文所提出的效率最优运行方式以及配置设计方法降低了系统的投资成本、体积和重量等。该运行效率最优方式以及配置设计方法能帮助工程设计人员准确测算出系统实现自治运行所需的最低系统配置,也为运行、投资和管理方准确估算投资成本效益提供了极为有用的工具。

### 参考文献

- [1] 王承煦,张源. 风力发电[M]. 北京:中国电力出版社,2003:1-100.
- [2] 许洪华, Barley C D, Tu P. 西藏4kW风光互补发电系统优化设计[J]. 太阳能学报, 1998, 19(3): 225-230.  
Xu Honghua, Barley C D, Tu P. The optimization design for 4kW wind/PV hybrid generating system in Tibet[J]. Acta Energetica Sinica, 1998, 19(3): 225-230(in Chinese).
- [3] 丁明, 吴义纯. 基于改进遗传算法的风力: 柴油联合发电系统扩展规划[J]. 中国电机工程学报, 26(8): 23-27.  
Ding Ming, Wu Yichun. Expansion planning of wind-diesel energy system based on genetic algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(8): 23-27(in Chinese).
- [4] 吴理博, 赵争鸣, 刘建政, 等. 独立光伏照明系统中的能量管理控制[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(22): 68-71.  
Wu Libo, Zhao Zhengming, Liu Jianzheng, et al. A novel energy management and control for stand-alone photovoltaic lighting system[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(22): 68-71(in Chinese).
- [5] 卢继平, 白树华. 风光氢联合式独立发电系统的建模及仿真[J]. 电网技术, 2007, 31(22): 75-79.  
Lu Jiping, Bai Shuhua. Modeling and simulation of conjoint independent power generation system consisting of power generation by wind energy, solar energy and hydrogen energy[J]. Power System Technology, 2007, 31(22): 75-79(in Chinese).
- [6] 栗文义, 张保会, 巴根. 风/柴/储能系统发电容量充裕度评估[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(16): 62-67.  
Li Wenyi, Zhang Baohui, Ba Gen. Capacity adequacy evaluation of wind-diesel-storage system[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(16): 62-67(in Chinese).
- [7] 陈树勇, 戴慧珠, 白晓民, 等. 风电场的发电可靠性模型及其应用[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(3): 26-28.  
Chen Shuyong, Dai Huizhu, Bai Xiaomin, et al. Reliability model of wind power plants and its application[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(3): 26-28(in Chinese).
- [8] 王海超, 鲁宗相, 周双喜, 等. 风电场发电容量可信度研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(10): 103-106.  
Wang Haichao, Lu Zongxiang, Zhou Shuangxi, et al. Research on the capacity credit of wind energy resources[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(10): 103-106(in Chinese).
- [9] 吴义纯, 丁明, 张立军. 含风电场的电力系统潮流计算[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(4): 36-39.  
Wu Yichun, Ding Ming, Zhang Lijun. Power flow analysis in electrical power networks including wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(4): 36-39(in Chinese).
- [10] 申洪, 王伟胜. 一种评价风电场运行情况的新方法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(9): 90-93.  
Shen Hong, Wang Weisheng. A new method for evaluating operation of wind power plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(9): 90-93(in Chinese).
- [11] 陈星莺, 刘孟觉, 单渊达. 超导储能单元在并网型风力发电系统的应用[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(12): 63-66.  
Chen Xingying, Liu Mengjue, Shan Yuanda. Application of superconducting magnetic energy storage system: SMES in wind power system of network-forming[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(12): 63-66(in Chinese).
- [12] 戴欣平, 马广, 杨晓红. 太阳能发电变频器驱动系统的最大功率追踪控制法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(8): 95-99.  
Dai Xiping, Ma Guang, Yang Xiaohong. A control method for maximum power tracing of photovoltaic generation system[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(8): 95-99(in Chinese).
- [13] Hollmuller P, Joubert J M, Lachal B, et al. Evaluation of a 5 kWp photovoltaic hydrogen production and storage installation for a residential home in Switzerland[J]. Int J Hydrogen Energy, 2000(25): 97-109.
- [14] Øystein U. Stand-alone power systems for the future: optimal design, operation & control of solar-hydrogen energy systems [D]. Norwegian: Norwegian University of Science and Technology, 1998.
- [15] Zhou K L, Ferreira J A, de Haan S W H. Optimal energy management strategy and system sizing method for stand-alone photovoltaic-hydrogen systems[J]. Int J Hydrogen Energy, 2008(32): 477-489.
- [16] Klein S A, Beckman W A, Mitchell J W, et al. Trnsys-a transient simulation program solar energy laboratory[R]. University of Wisconsin-Madison, 2004.



王丽娜

收稿日期: 2008-12-04.

作者简介:

王丽娜(1983—), 女, 硕士研究生, 研究方向为新能源发电技术, E-mail: 2002109424@163.com;

周克亮(1970—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力电子与电力传动、新能源发电技术、控制理论与应用等;

卢闻州(1983—), 男, 博士研究生, 主要研究

方向为电力电子与电力传动;

程明(1960—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为新型电机设计与驱动技术、新能源发电技术等。

(责任编辑 王晔)