

## 基于模糊控制与非线性优化的孤立微网能量管理策略\*

胡峥辉<sup>1</sup>, 舒杰<sup>2†</sup>, 游林儒<sup>1</sup>, 郝晓田<sup>1</sup>, 吴志锋<sup>2</sup>, 崔琼<sup>2</sup>, 丁建宁<sup>3</sup>

(1. 华南理工大学, 自动化科学与工程学院, 广州 510640; 2. 中国科学院广州能源研究所, 中国科学院可再生能源重点实验室, 广州 510640; 3. 江苏省光伏科学与工程协同创新中心, 江苏 常州 213164)

**摘要:** 为减小可再生能源输出功率波动对孤立微网电能质量的影响, 本文设计了一种基于模糊控制与非线性优化的能量管理策略并应用于风/光/储/柴构建的微网系统中。以能量平衡、瞬时功率控制、锂离子电池及超级电容混合储能综合协调控制为目标, 开展仿真研究, 并在已有的 150 kW 风/光/储/柴微网实验平台上进行了验证。研究表明, 在非线性的作用下, 系统动态响应快、瞬时功率缓冲控制效果好, 该策略具有实用价值。

**关键词:** 微电网; 模糊控制; 非线性优化; 混合储能; 超级电容

中图分类号: TK519

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.2095-560X.2015.06.007

## An Energy Management Strategy Based on Fuzzy Control and Nonlinear Optimization for Isolated Micro-grids

HU Zheng-hui<sup>1</sup>, SHU Jie<sup>2</sup>, YOU Lin-ru<sup>1</sup>, XI Xiao-tian<sup>1</sup>, WU Zhi-feng<sup>2</sup>,  
CUI Qiong<sup>2</sup>, DING Jian-ning<sup>3</sup>

(1. College of Automation Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. CAS Key Laboratory of Renewable Energy, Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, 510640, China; 3. Jiangsu Collaborative Innovation Center of Photovoltaic Science and Engineering, Changzhou 213164, Jiangsu, China)

**Abstract:** To reduce the output power fluctuation of renewable energy and the establishment cost of the isolated micro-grids, this paper presents an energy management strategy based on fuzzy control and nonlinear optimization. The strategy was applied to a micro-grid system which consists of wind, light and diesel engine storage. We carried out some simulations with aims of power balance, coercion of the instantaneous power, lithium-ion battery and super capacitor storage as the optimization condition. The results were verified on the experimental platform. A numerical example showed that, nonlinear optimization could accelerate the dynamic response of the system and buffer the instantaneous power. These results reveal that such strategy might have practical values.

**Key words:** micro-grid; fuzzy control; nonlinear optimization; hybrid energy storage; super capacitors

## 0 引言

孤立微电网由于惯性较小, 在没有大电网的支撑下, 可再生能源输出功率波动对系统的稳定性及电能质量会造成一定影响, 因此设计合理的能量管理策略很重要。

混合储能<sup>[1]</sup>充分结合了能量型和功率型两种储能元件的优点, 在提高储能功率输出能力的同时, 又具有较好的经济效益。针对混合储能的控制策略, 文献[2-5]等针对并网型微网在一定程度上平抑了可

再生能源的波动, 具有较好的性能, 但是不能直接应用于孤立微网, 因为运行工况不同, 储能元件容量和输出功率有限<sup>[6]</sup>, 在可再生能源输出功率变化较大时并不能满足负荷电能质量需求。在实际孤立微网中, 更常见的组合方式为可再生能源发电、燃油(气)机组发电及储能相结合<sup>[7-8]</sup>, 然而对于这种组合应用的微网控制策略并不多见。有研究者采用模糊控制策略在平抑可再生能源输出功率取得了成效<sup>[9-10]</sup>, 本文尝试将其应用于柴油机与混合储能系统的瞬时功率控制, 使二者能够协调工作, 抑制可再

\* 收稿日期: 2015-09-22 修订日期: 2015-10-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51206170); 中科院佛山市合作项目(2012HY1006551); 广州市创新平台与共享项目(201509010018)

† 通信作者: 舒杰, E-mail: shujie@ms.giec.ac.cn

生能源发电功率波动。

另外, 对于能量管理策略, 不仅要关注调度策略的技术指标, 也要考虑策略的经济效益。混合储能利用能量型储能电池(铅酸电池或锂离子电池)和超级电容器快速充放电的特点, 提供瞬时功率缓冲, 改善电能质量。本文在模糊控制的基础上, 设计了一种非线性优化的方法, 通过合理的选取目标函数和约束条件, 对储能电池和超级电容的输出功率进行调整, 既能最大限度地减少储能电池容量, 减少蓄电池充放电次数, 又能适应柴油发电机组出力爬坡慢的特性。

## 1 控制策略简介

本文研究的孤立微网主要由光伏、柴油发电机组、蓄电池及超级电容所组成, 微网结构及控制策

略如图 1 所示(参见文献[8])。柴油发电机组与混合储能系统协调缓冲可再生能源带来的波动, 实现系统的动态平衡。在这里结合图 1 对本文控制策略进行简要说明, 从图中可以看到, 首先对差额功率(可再生能源波动)进行滤波处理, 将其分解为两个部分高频  $P_{\text{High}}(t)$  和低频  $P_{\text{Low}}(t)$ , 其中低频部分及获取的蓄电池荷电状态  $\text{Soc}_B(t)$  将作为模糊控制的两个输入, 利用模糊控制即可得到柴油机应承担的功率值  $P_D(t)$ 。接下来进行非线性优化, 通过对超级电容荷电状态  $\text{Soc}_C(t)$ 、蓄电池预输出功率  $P_{B\_Pre}(t)$  以及高频功率  $P_{\text{High}}(t)$  进行分析、求解, 最后得到蓄电池应承担的功率  $P_B(t)$  及超级电容应承担的功率  $P_C(t)$ 。这三者协调分享差额功率, 实现了系统的动态平衡, 优化了系统的运行。

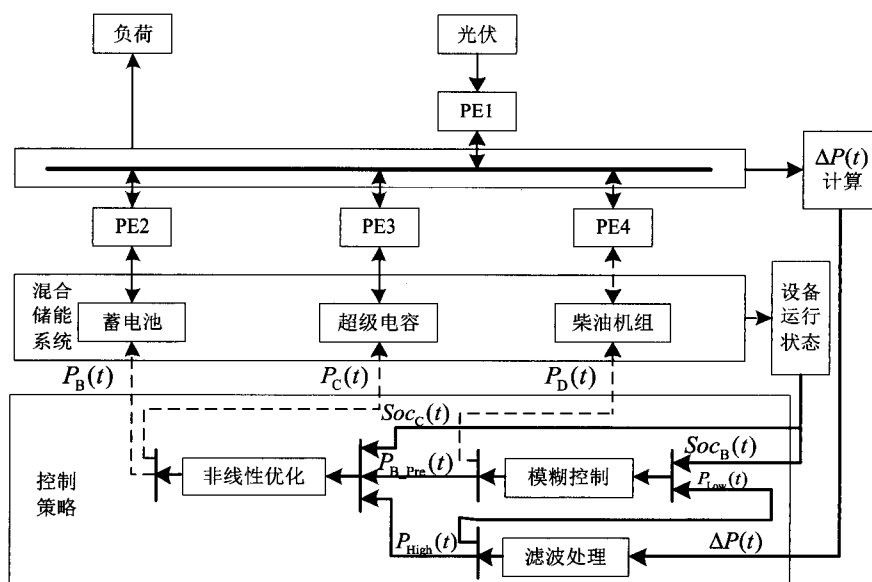


图 1 微网结构及控制策略

Fig. 1 Structure and control strategy of microgrids

## 2 控制策略的设计

### 2.1 滤波处理

在进行模糊控制<sup>[9-10]</sup>之前, 需要对差额功率进行滤波处理, 由于数据均由系统定时采样而得, 因此这里选用 FIR 低通滤波器对差额功率进行数字滤波。鉴于仿真平台为 matlab, 这里直接利用信号处理工具箱来进行设计, 其设计方法为 kaiser 窗, 确定好归一化频率以及幅值范围之后(本文中分别设置为 0.1~0.3 Hz 及 1~5 db), 即完成 FIR 滤波器的设计。通过滤波, 差额功率  $\Delta P(t)$  被分解为两个部

分, 低频  $P_{\text{Low}}(t)$  和高频  $P_{\text{High}}(t)$ , 且满足以下关系式。

$$\Delta P(t) = P_{\text{Low}}(t) + P_{\text{High}}(t) \quad (1)$$

### 2.2 模糊控制

考虑到蓄电池和柴油机的爬坡率<sup>[11]</sup>均比较低, 适合承担差额功率中的低频部分, 因此经过 FIR 滤波器滤波所得的低频功率将在蓄电池和柴油机之间进行分配。然而对于混合储能系统, 难以精确地给出充放电功率动态控制模型, 在这里采用模糊控制来对低频功率进行分配。其设计思想如下:

(1) 当蓄电池无法满足光伏波动时, 柴油机开启; 若蓄电池电量偏低, 适当增加柴油机输出功率, 给蓄电池充电。

(2) 当蓄电池可以满足光伏波动时, 柴油机关掉。

因此在本文中利用差额功率中的低频功率和蓄电池荷电状态作为输入, 由两者之间的模糊关系来确定柴油发电机组的输出功率。其输入和输出的隶属度函数如图 2 所示。根据控制思想, 可以设计模糊控制规则如表 1 所示。

由输入和输出的隶属度函数以及模糊控制规则, 可以得到对应的输出。利用加权平均法进行清晰化可以得到  $t$  时刻柴油机的输出功率为:

$$P_D(t) = \frac{\sum_{i=1}^n z_i \mu_C(z_i)}{\sum_{i=1}^n \mu_C(z_i)} \quad (2)$$

其中,  $z_i$  为根据模糊规则所确定的第  $i$  个输出,  $\mu_C(z_i) = \mu_A[P_{Low}(t)] \mu_B[Soc_B(t)]$  为  $z_i$  所对应的隶属度。

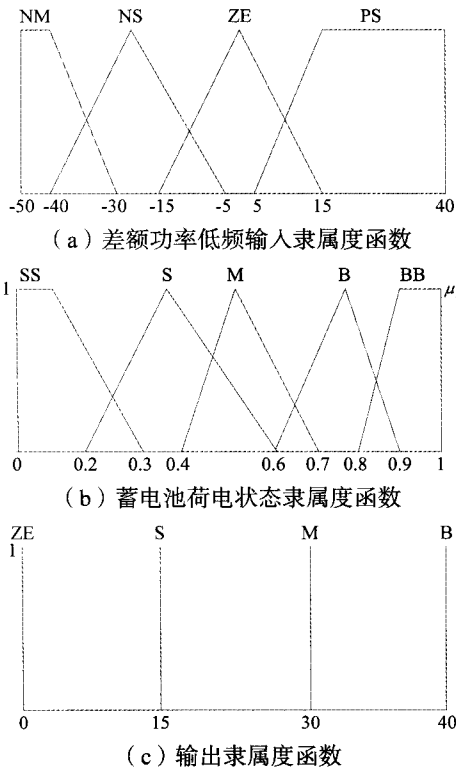


图 2 隶属度函数  
Fig. 2 Membership functions

表 1 模糊控制规则  
Table 1 Fuzzy control rule

$P_{Low}(t)$	$Soc_B(t)$				
	SS	S	M	B	BB
PS	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE
ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE
NS	M	M	S	S	ZE
NM	B	B	B	B	S

### 2.3 非线性优化

通过模糊控制, 差额功率中的低频部分可以分解为两个部分, 柴油机输出功率  $P_D(t)$  和蓄电池预输出功率  $P_{B\_Pre}(t)$ , 且满足关系式:

$$P_{Low}(t) = P_D(t) + P_{B\_Pre}(t) \quad (3)$$

如果不考虑超级电容的容量, 那么可以将差额功率中的高频部分全部交给超级电容来承担, 此时, 柴油机和蓄电池能够协调承担差额功率中的低频部分, 超级电容则承担高频部分, 保证了爬坡率, 能够及时缓冲微网中的高频波动。

上述策略虽然在一定程度上能满足要求, 但是对超级电容的容量需求很大。为了解决这个问题, 本文研究设计了一种非线性优化方法, 以蓄电池电压偏差作为优化目标, 以超级电容可用容量能够缓冲当次以及下次功率波动作为条件 (其中下次功率波动为根据光伏预测信息计算而得)。在本策略中, 选取蓄电池电压偏差作为优化目标, 即减少蓄电池电压波动, 根据分配的线性关系, 相当于进行二次滤波并将波动功率转移给超级电容; 由于超级电容响应快, 将波动尽量交给超级电容对提升系统响应速度也有帮助。另外, 蓄电池和超级电容相比, 其充放电次数有限, 寿命较短, 本策略以减少蓄电池电压偏差为目标, 能减少蓄电池的充放电次数, 从而延长蓄电池使用寿命, 使策略具有较好的经济性。

由于策略以蓄电池电压偏差最少作为优化目标, 考虑到其电池电压与输出功率成线性关系, 这里将优化目标转化为蓄电池输出功率的波动最小。而超级电容当前可用容量则只需要能够及时缓冲当次以及下次功率波动即可, 这样又能最大限度地降低其容量需求。

再综合考虑对蓄电池和超级电容输出功率造成影响的一些因素<sup>[12]</sup>, 可以确定优化目标和条件限制如下。

- (1) 蓄电池输出功率波动最小；
- (2) 超级电容必须能够缓冲当次冲击；
- (3) 超级电容在当次充放电后其荷电状态必须能够缓冲下次冲击；
- (4) 蓄电池和超级电容输出功率限制；
- (5) 分配后和分配前功率之和相同。

在这里将第一点的要求作为优化目标，而将其他几点要求作为约束条件，这样目标函数可以写为：

$$\min z = |P_B(t) - P_B(t-1)| \quad (4)$$

式中， $P_B(t)$  为蓄电池  $t$  时刻的输出， $P_B(t-1)$  为  $t-1$  时刻蓄电池的输出。

约束条件的分析如下。

(1) 超级电容必须能够缓冲当次冲击。超级电容不能出现过充过放的情况，其约束条件可以描述为：

$$0 < Soc_C(t-1) + \frac{P_C(t)\Delta t}{Cap_C} < 1 \quad (5)$$

其中， $Soc_C(t-1)$  为  $t-1$  时刻超级电容的荷电状态， $P_C(t)$  为  $t$  时刻超级电容的输出功率， $\Delta t$  为仿真步长， $Cap_C$  为超级电容的容量。

(2) 超级电容在当次充放电后其荷电状态必须能够缓冲下次冲击。这样做的目的是实现预判性，也是最大限度减少超级电容容量的一个关键点，其约束条件可以描述为：

$$0 < Soc_C(t-1) + \frac{[P_C(t) + P_C(t+1)]\Delta t}{Cap_C} < 1 \quad (6)$$

式中， $P_C(t+1)$  为  $t+1$  时刻超级电容的预输出功率，即光伏的波动值，可以通过预测得到，本文采用 bp 神经网络对光伏进行预测，得出其波动值。

(3) 蓄电池  $t$  时刻最大输出功率限制。储能介质  $t$  时刻的最大允许充放电功率由其自身的充放电特性和  $t$  时刻的剩余电量决定，其表达式如下<sup>[10-11]</sup>。

充电时：

$$P_{B\_LimitC}(t) = \min \left\{ \frac{Soc_{B\_Max} - (1 - \sigma_B) Soc_B(t-1)}{\eta_{B\_C} \Delta t}, P_{B\_MaxC} \right\} \quad (7)$$

放电时：

$$P_{B\_LimitD}(t) = \min \left\{ \frac{[(1 - \sigma_B) Soc_B(t-1) - Soc_{B\_Min}] \eta_{B\_D}}{\Delta t}, P_{B\_MaxD} \right\} \quad (8)$$

式中， $P_{B\_LimitC}(t)$  为  $t$  时刻最大允许充电功率， $P_{B\_LimitD}(t)$  为  $t$  时刻最大允许放电功率， $P_{B\_MaxC}$  和  $P_{B\_MaxD}$  分别为由蓄电池特性决定的最大充电和放电功率。 $Soc_{B\_Min}$  和  $Soc_{B\_Max}$  分别为蓄电池的电量上限和下限，范围是  $0 \sim 1$ 。 $\sigma_B$  为蓄电池的自放电效率， $\eta_{B\_C}$  和  $\eta_{B\_D}$  分别为蓄电池的充电和放电效率。

因此蓄电池输出功率取值范围约束为：

$$|P_B(t)| \leq P_{B\_Limit}(t) \quad (9)$$

其中，

$$P_{B\_Limit}(t) = \begin{cases} P_{B\_LimitC}(t), & Sgn[P_{B\_Pre}(t)] \geq 0 \\ P_{B\_LimitD}(t), & Sgn[P_{B\_Pre}(t)] < 0 \end{cases} \quad (10)$$

(4) 超级电容  $t$  时刻最大输出功率限制。同理可得，其输出功率约束为：

$$|P_C(t)| \leq P_{C\_Limit}(t) \quad (11)$$

其中，

$$P_{C\_Limit}(t) = \begin{cases} P_{C\_LimitC}(t), & Sgn[P_{High}(t)] \geq 0 \\ P_{C\_LimitD}(t), & Sgn[P_{High}(t)] < 0 \end{cases} \quad (12)$$

(5) 分配后和分配前功率之和相同。此约束可以使优化后的功率之和能与原功率之和相同，使最终调度效果造成的功率波动最小，其约束可表示为：

$$P_B(t) + P_C(t) = P_{B\_Pre}(t) + P_{High}(t) \quad (13)$$

在确定好目标函数与约束条件之后，本文通过编程对其求解，在此之前需要将以上约束条件进行简化，取蓄电池输出功率  $P_B(t)$  为  $X_1(t)$ ，超级电容输出功率  $P_C(t)$  为  $X_2(t)$ ，这样以上条件可以写为：

$$\min z = |X_1(t) - X_1(t-1)|$$

$$s.t. \begin{cases} |X_1(t)| \leq P_{B\_Limit}(t) \\ P_{Min}(t) \leq |X_2(t)| \leq P_{Max}(t) \\ X_1(t) + X_2(t) = P_{B\_Pre}(t) + P_{High}(t) \end{cases} \quad (14)$$

本文通过编程对其进行求解，思路如下：

①  $X_1(t)$  从  $X_1(t-1)$  到  $P_{B\_Limit}(t)$  范围内以步长为 1 取整值, 通过式 (14) 中的等式条件求出  $X_2(t)$ , 再根据  $X_2(t)$  的不等式约束条件判断是否满足要求, 若不满足, 则重复步骤 1, 若满足, 则记下  $X_1(t)$  和  $X_2(t)$  的值, 执行下一步骤。

②  $X_1(t)$  从  $X_1(t-1)$  到  $-P_{B\_Limit}(t)$  范围内以步长为 -1 取整值, 同样如步骤 1 所示, 若求出满足要求的  $X_1(t)$  使目标函数更小, 则选取本步骤中求出的  $X_1(t)$  和  $X_2(t)$ , 否则, 选取上一步骤中的值。

### 3 算例分析

本文利用实验平台所采集的光伏数据作为测试数据, 其采集时间为 5 月份, 地点为广东, 采集时间段为 6:00~18:00, 采集时间间隔为 30 s。差额功率可由光伏波动计算所得, 如图 2 所示。柴油发电机组最大输出功率为 40 kW, 最小输出功率为 5 kW, 爬坡率为 30 kW/min, 蓄电池 (本文选用锂电池) 和超级电容的参数信息如表 2 所示。

对于蓄电池的选取, 主要考虑到锂电池在储能环保、能量密度高等优势以及考虑到实验平台的实际情况等因素而定。和铅酸蓄电池相比, 其放电平台不如铅酸蓄电池稳定, 在一定时间内, 电压监测不准确。但是在模糊控制的作用下, 并不追求每一步控制效果达到最佳, 而是宏观上达到一个较好的控制效果, 相当于抵消了锂电池不稳定性的影响。

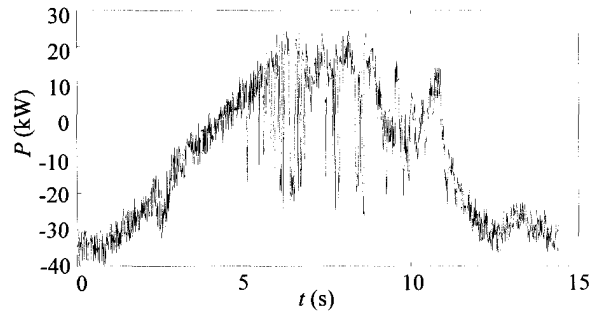


图 2 差额功率  
Fig. 2 Balance power

表 2 锂电池和超级电容参数  
Table 2 Parameters of batteries and supercapacitors

参数类型	锂电池	超级电容
最大充电功率 (kW)	10	50
最大放电功率 (kW)	10	50
充电效率 (%)	85	98
放电效率 (%)	85	98
自放电率 (%/min)	0.004	0.01
荷电初始值	0.5	0.5

在 Matlab 上搭建仿真模型, 如图 3 所示, 仿真时长为 14.4 s, 仿真步长 0.01 s (由于采样时间间隔为 30 s, 一天的采样点为 1 440 个, 这里取仿真时间为 14.4 s, 故仿真步长取 0.01 s)。

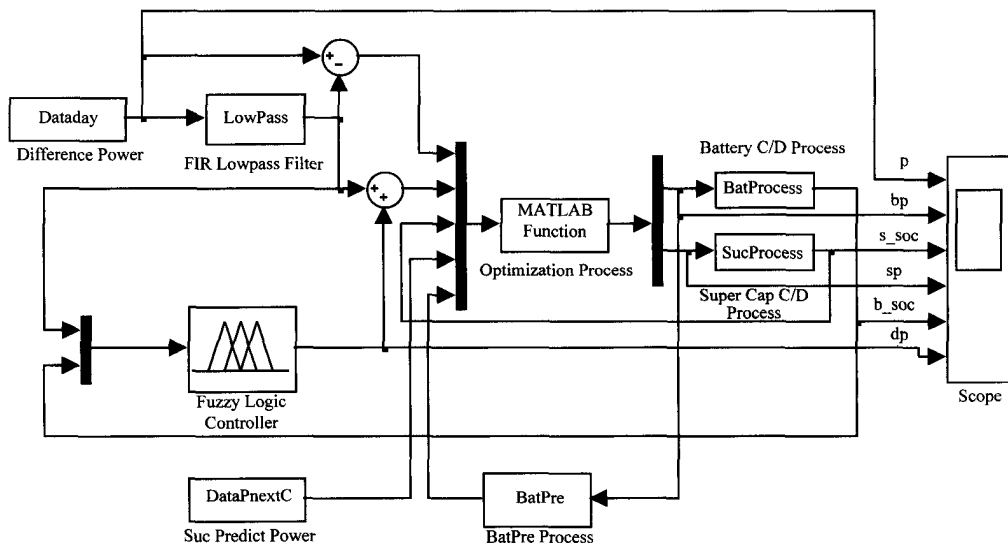
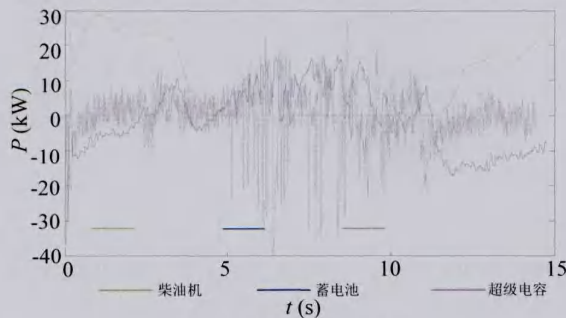


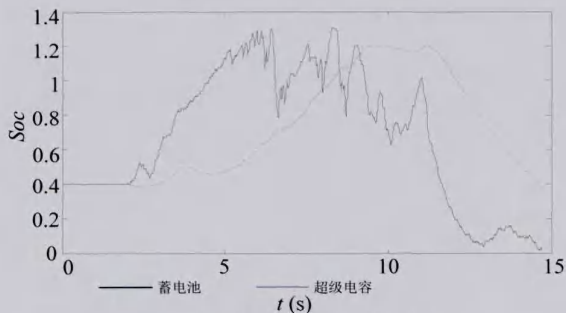
图 3 仿真模型  
Fig. 3 Simulation model

从图 2 中可以看出, 在没有储能系统的情况下, 微电网中的功率波动是比较大的, 容易造成系统不稳定。此时若采用单一的蓄电池储能, 由于其爬坡率和充放电功率都比较低, 无法平衡光伏输出所带来的波动, 另外由于差额功率正负波动比较频繁(这里统计为 116 次), 若直接利用蓄电池吸收, 会造成蓄电池频繁充放电, 会大大缩短蓄电池的使用寿命。

使用 Fir 数字滤波和模糊控制策略的控制效果如图 4 所示。从图 4a 各机组出力情况可以看出, 在蓄电池输出功率不足时, 柴油机及时开启, 向微网输送电能, 随着差额功率逐渐变小, 柴油机输出功率也逐渐变小; 当蓄电池完全可以承担差额功率波动或者差额功率为正, 需要储存电能时, 柴油机则关闭。通过模糊控制, 柴油机将蓄电池输出功率不足的部分填补起来, 同时能根据情况给蓄电池充电, 二者协调控制, 很好地承担了差额功率的低频部分。



(a) 各机组出力情况



(b) 蓄电池与超级电容荷电状态

图 4 模糊控制策略

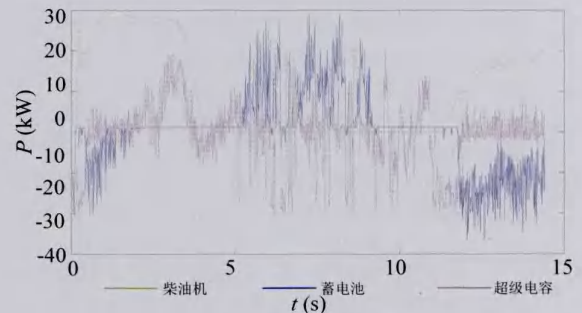
Fig. 4 Strategy of fuzzy control

另一方面, 由于超级电容响应快, 爬坡率高, 从图中可以看出, 对于光伏的随机波动, 超级电容都能够很好地吸收。在这个策略中超级电容的充放电波动次数为 423 次, 蓄电池的充放电次数为 35 次。

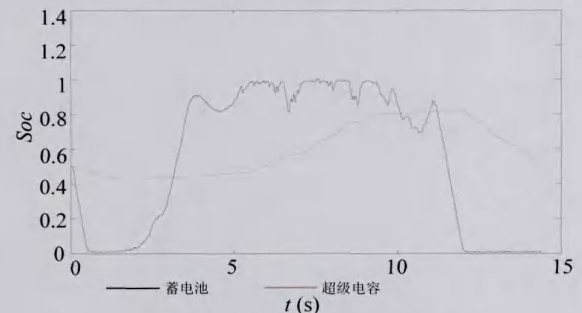
接下来对模糊控制策略中蓄电池和超级电容的荷电状态<sup>[13]</sup>进行分析, 从图 4b 中可以看出, 蓄电池的荷电上限在 0.9 附近, 没有越限, 超级电容容量也能满足要求(此处超级电容容量为 15 kW·h)

利用模糊控制与非线性优化策略的控制效果如图 5 所示(超级电容容量为 3 kW·h)。一方面, 从图 5a 中可以看出, 柴油机依旧保持原来的输出, 去分担蓄电池承担的低频功率, 而蓄电池在非线性优化的作用下, 只在早晨及晚上光伏输出不够时向外放电; 在中午光照强烈时充电, 而其余时刻, 其对光伏波动调节的任务交给了超级电容, 本身则不进行充放电。另一方面, 从图 5b 蓄电池和超级电容的荷电状态来看, 荷电上限在 0.8 附近, 而对于超级电容而言, 在本文策略下, 虽然超级电容容量小, 但超级电容每一次都能够很好的缓冲光伏波动带来的冲击。

对比图 4 和图 5 可以看出, 与一般模糊控制相比, 在非线性优化的作用下, 超级电容能够以最小的容量来缓冲功率波动, 同时又能最大限度地减少蓄电池电压偏差波动。



(a) 各机组出力情况



(b) 蓄电池与超级电容荷电状态

图 5 模糊控制与非线性优化策略

Fig. 5 Strategy of fuzzy control and nonlinear optimization

表 3 两种策略中数据比较

Table 3 Data comparison between two strategies

对比数据	模糊控制策略	模糊控制与 非线性优化策略
蓄电池容量 (kW·h)	100	100
超级电容容量 (kW·h)	15	3
蓄电池充放电次数	35	9
超级电容充放电次数	423	467

## 4 结 论

算例分析表明,采用模糊控制调度策略,柴油机组、蓄电池和超级电容三者协调工作,降低了可再生能源输出功率波动对微电网系统的影响。本文提出的非线性优化方法极大程度地减少了对超级电容的容量需求,减少蓄电池电压偏差,能降低建站成本,使系统具有更好的经济效益。

### 参考文献:

- [1] ISE T, KITA M, TAGUCHI A. A hybrid energy storage with a SMES and secondary battery[J]. IEEE Transactions on superconductivity, 2005, 15(2): 1915-1918.
- [2] 唐西胜, 齐智平. 平抑间歇式电源功率波动的混合储能系统设计[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(20): 24-28.
- [3] 黄羚, 蔡涛, 陈天锦, 等. 基于 SOC 调整的光伏电站储能系统调控策略[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(16): 66-70.
- [4] 洪海生, 江全元, 严玉婷. 实时平抑风电场功率波动的电池储能系统优化控制方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 103-109.
- [5] 丁明, 林根德, 陈自年, 等. 一种适用于混合储能系统的控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(7): 1-6.

- [6] 王新刚, 艾芊, 徐伟华, 等. 含分布式发电的微电网能量管理多目标优化[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(20): 79-83.
- [7] 刘梦璇, 郭力, 王成山, 等. 风光柴储孤立微网系统协调运行控制策略设计[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(15): 19-24.
- [8] 毕锐, 吴建锋, 丁明, 等. 孤立微网多元储能与柴油机协调控制策略[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(17): 73-97.
- [9] CHEN Y K, WU Y C, SONG C C, et al. Design and Implementation of Energy Management System With Fuzzy Control for DC Microgrid Systems[J]. IEEE Transactions on power electronics, 2013, 28(4): 1563-1570.
- [10] 吴振威, 蒋小平, 马会萌, 等. 用于混合储能平抑光伏波动的小波包-模糊控制[J]. 中国电机工程学报, 2013, 34(3): 317-324.
- [11] PALMA-BEHNKE R, BENAVIDES C, LANAS F, et al. A Microgrid Energy Management System Based on the Rolling Horizon Strategy[J]. IEEE Transactions on smart grid, 2013, 4(2): 996-1006.
- [12] GEE A M, DUNN R W. Novel battery supercapacitor hybrid energy storage control strategy for battery life extension in isolated wind energy conversion systems[C]// International Universities Power Engineering Conference. Cardiff, UK: IEEE. 2010. 1-6.
- [13] OLIVARES D E, CANIZARES C A, KAZENRANI M. A Centralized Energy Management System for Isolated Microgrids[J]. IEEE Transactions on smart grid, 2014, 5(4): 1864-1875.

### 作者简介:

胡峥辉 (1991), 男, 硕士研究生, 主要从事微网调度控制技术研究。

舒杰 (1969-), 男, 博士, 研究员, 主要从事可再生能源及微网技术研究。

游林儒 (1956-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力电子技术与运动控制、嵌入式系统及信号处理方面的研究。