

# 基于机会约束规划的混合储能优化配置方法

谢石骁, 杨莉, 李丽娜

(浙江大学 电气工程学院, 浙江省 杭州市 310027)

## A Chance Constrained Programming Based Optimal Configuration Method of Hybrid Energy Storage System

XIE Shixiao, YANG Li, LI Lina

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China)

**ABSTRACT:** The capacity configuration of micro-generation sources is directly related to the power quality of microgrid and its economy. Considering the randomness of wind power generation, a chance-constrained programming based capacity configuration method and a corresponding model for hybrid energy storage system (HESS), in which the constraints of both power output of an HESS and state of charge (SOC) are considered and the minimum cost of HESS is taken as objective, are proposed. The proposed model is solved by genetic algorithm and the relation between the confidence degree of wind power fluctuation that does not overstep a certain interval and the cost of optimal configuration of HESS is obtained, thus a quantitative basis to appropriately compromise between power quality and economy is provided while the capacity of an HESS is configured. Besides, in allusion to the time characteristic of wind power fluctuation the power of the HESS is allocated, and according to the restraint of SOC a fuzzy control strategy is designed to modify the reference value of power of HESS to achieve the purpose of increasing the service life of HESS. The effectiveness of the proposed method is verified by simulation results.

**KEY WORDS:** microgrid; hybrid energy storage; chance constrained programming; fuzzy control

**摘要:** 微电源的容量配置问题直接关系微网的电能质量和经济性。考虑到风电的随机性, 提出了基于机会约束规划的混合储能容量配置方法。该方法考虑了混合储能装置的功率出力与荷电状态约束, 以装置成本最低为目标, 采用遗传算法求解, 得到风电输出功率波动不超过某一区间的置信度与混合储能最佳配置成本间的关系, 从而为配置混合储能容量时为在电能质量和经济性间取得适度折中提供了定量依据。此外, 该方法针对风电波动时间特性对混合储能装置进行功率

分配, 依据荷电状态限制设计了模糊控制策略, 修正储能装置的功率参考值, 以达到延长使用寿命的效果。仿真结果验证了该方法的有效性。

**关键词:** 微网; 混合储能; 机会约束规划; 模糊控制

## 0 引言

由于能源危机和环境约束, 微网越来越引起人们关注, 根据美国电力可靠性解决方案协会定义, 微网的特点是功率 10 MW 以下, 由多种分布式发电单元、储能单元、负荷及控制装置组成。由于微能源具有随机性和间歇性, 因此孤岛状态下微网的能量平衡是微网的核心问题之一<sup>[1-2]</sup>, 微网的电源结构优化及控制策略设计直接关系到微网的性能。

风力和光伏发电的输出功率具有不稳定性 and 不可预测性, 配置储能装置能够有效提高不稳定可再生能源发电的可控性及可调度性。不同种类的储能装置特性以及适用范围相差甚远, 近年来, 微网中混合储能系统的配置和控制策略引起了人们的关注。混合储能系统通过采用小容量、长寿命、高功率比的储能环节辅助大容量、相对循环次数受限、高相对能量比、低功率比的储能环节(前者典型如飞轮、超级电容, 后者典型如化学电池储能), 对微网功率波动按时间特性进行分类补偿, 以取得大幅度优于单一储能环节的系统性能和经济性。

目前, 混合储能系统的研究主要集中在控制策略上, 容量配置的相关研究较少, 综合考虑控制策略和容量配置的相关研究更少。文献[3]中提出了基于能量预测的动态能量优化算法, 在提高补偿效果的同时考虑了储能设备成本; 文献[4]运用滑动平均滤波器完成储能设备功率分配, 使储能电池输出功率更加平滑; 文献[5]依据风电波动特性区分混合储能设备功率输出, 提高系统可靠性的同时延长了电

基金项目: 国家 863 高技术基金项目(2012AA050204); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2009QNA4014)。

The National High Technology Research and Development of China (863 Program) (2012AA050204); Project Supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities(2009QNA4014) .

池寿命；文献[6]采用多时滞调节控制策略提高了储能的灵活性与实用性；文献[7-8]依据储能荷电状态采用模糊控制策略对储能功率输出进行修正，避免了储能设备容量枯竭或饱和；文献[9]采用神经网络策略完成储能设备的协调配合，减少了储能电池容量。值得指出的是，文献[3-9]均按经验配置混合储能系统容量，而未进行定量分析。

风速的随机性和间歇性使风力发电机的输出功率具有不确定性，不可避免会突然出现大幅度的功率波动，希望通过储能装置使风电输出完全可控，既不经济也不现实。机会约束规划的实质是在一定程度上考虑不确定因素，将传统优化中完全满足的约束条件软化为满足约束条件的概率高于某一置信水平。考虑到机会约束规划和风力发电输出特性，本文将机会约束规划引入混合储能系统优化配置问题，以使容量配置更具实用性。

在此基础上，本文针对含风电、储能电池系统、超级电容器的孤岛系统，提出基于机会约束规划的混合储能配置模型，将混合储能装置与风力发电输出进行协调控制，使系统输出以某一置信水平处于一定范围内，实现了系统性能和经济性之间的合理折中，并设计了按时间特性分类补偿的控制策略，以延长储能设备寿命。

## 1 混合储能系统模型及控制策略

### 1.1 微网结构

微网典型结构参见文献[3]。微网主要由发电单元、储能单元和本地负荷构成。发电单元包括风力发电、光伏发电等可再生能源，储能单元包括功率型和能量型储能元件<sup>[3]</sup>。微网与电网并网运行时，微网主要用于补偿谐波电流和尖峰负荷。孤岛运行条件下，微电网的负荷跟踪运行能力和系统可靠性主要通过储能装置来提高。因此本文将研究重点放在混合储能装置在微网孤岛运行条件下的应用。

考虑到目前实际微网情况和性价比，本文选取了储能电池和超级电容器作为混合储能装置，表1中列出了储能电池系统和超级电容器的价格性能

表1 混合储能装置参数

Tab. 1 Parameters of hybrid energy storage system						
设备类型	额定功率费 用/(USD/kW·h)	额定容量费 用/(USD/kW)	寿命/a	荷电状态 使用范围	循环 次数	传输 效率/%
储能 电池	488	325	15~30	0.20~0.80	3 000	75~85
超级 电容器	366	37 000	50	0.05~0.95	50 000	95

参数<sup>[4,10]</sup>。由表1可知：1) 储能电池容量密度大、造价低，但充放电效率低、响应速度慢、循环使用寿命短；2) 超级电容器动态响应快，冲放电效率高，循环使用次数多，使用寿命长，但容量密度小、造价高。因此，合理配置储能电池和超级电容形成混合储能装置，能够弥补单一储能装置的不足。

### 1.2 混合储能装置控制策略

在海岛微网中，风电所占份额较大，且风电机组使用效率最高，以浙江省摘箬山海岛微网为例，规划新能源容量为4.8 MW，而其中风电为3 MW。因此本文暂不考虑光伏、海流发电等带来的不确定因素，重点放在混合储能对风力发电不确定出力的有功补偿方面。

风能为具有随机性、不稳定性特征的能源，一般由4种成分的风速来模拟，即基本风、阵风、渐变风和随机风。基本风在较短时间内可视为常数，其他3种风叠加形成的脉动风才是影响风力发电波动性的主要因素。

图1给出了风电功率频谱图，其中 $f_{wt}$ 为符合微网要求的截止频率， $f_{uc}$ 为高通滤波器截止频率。由图1可知，补偿高频功率波动所需能量较小，而补偿低频功率波动所需容量较大。因此，可以发挥超级电容器响应速度快的特性补偿风电波动中的高频部分，而发挥储能电池容量密度高的特性补偿低频分量。

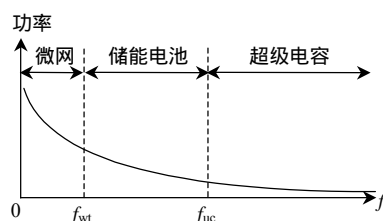


图1 风电功率波动频谱

Fig. 1 Spectrum of wind power fluctuation

混合储能系统采用储能电池和超级电容器发出的实时总功率 $P_H$ 对风力发电输出功率 $P_{WT}$ 中波动部分进行补偿，使风电输出功率 $P_{WT}$ 尽可能接近其目标值 $P_{WT}^*$ 。混合储能的补偿功率分别由储能电池系统和超级电容器进行承担。

混合储能装置控制流程如图2所示。图2中： $P_H^*$ 为混合储能装置功率输出参考值； $P_B^*$ 、 $P_U^*$ 分别为储能电池和超级电容功率输出参考值； $S_B$ 、 $S_U$ 分别为储能电池和超级电容的荷电状态； $\Delta P_B$ 、 $\Delta P_U$ 分别为储能电池和超级电容的修正功率； $P_B$ 、 $P_U$ 分

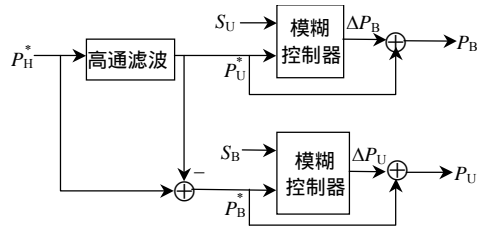


图 2 混合储能装置控制流程

Fig. 2 Control folw chart of hybrid energy storage system  
别为修正后储能电池和超级电容的输出功率。经过高通滤波器分配后得到储能电池系统和超级电容器的功率参考值<sup>[3]</sup>分别为

$$\begin{cases} P_H^* = P_{WT} - P_{WT}^* \\ P_U^* = P_H^* \frac{T_{UC}S}{1 + T_{UC}S} \\ P_B^* = P_H^* - P_U^* \end{cases} \quad (1)$$

式中  $T_{UC}$  为高通滤波器时间常数。

荷电状态反映储能设备的剩余容量占总容量的比值,是制定混合储能设备能量控制策略的重要依据。储能装置枯竭或饱和均会严重影响储能装置的使用寿命,因此本文采取模糊控制策略对储能设备功率参考值进行修正。

图 2 中,模糊控制器将荷电状态饱和度  $\varepsilon_x^S$  和功率参考值饱和度  $\varepsilon_x^P$  作为输入,  $x$  取 B(表示储能电池)或 U(表示超级电容)。 $\varepsilon_B^S$ 、 $\varepsilon_U^S$  的连续论域分别为  $[-0.6, 0.6]$ 、 $[-0.9, 0.9]$ ,  $\varepsilon_B^P$ 、 $\varepsilon_U^P$  的连续论域均为  $[-1, 1]$ , 模糊集均为 {NB, ZO, PB}(NB 表示负大, ZO 表示零, PB 表示正大)。模糊输出为功率修正参数  $\Delta k_x$  的隶属函数  $\varepsilon^{\Delta k_x}$ , 其模糊集为 {NB, NS, ZO, PS, PB}(NS 表示负小, PS 表示正小), 离散论域为  $[-1, -0.5, 0, 0.5, 1]$ 。图 3 给出了  $\varepsilon_B^P$ 、 $\varepsilon_B^S$ 、 $\Delta k_B$  的隶属数  $\mu_B^P$ 、 $\mu_B^S$ 、 $\mu_B^{\Delta k_B}$ 。

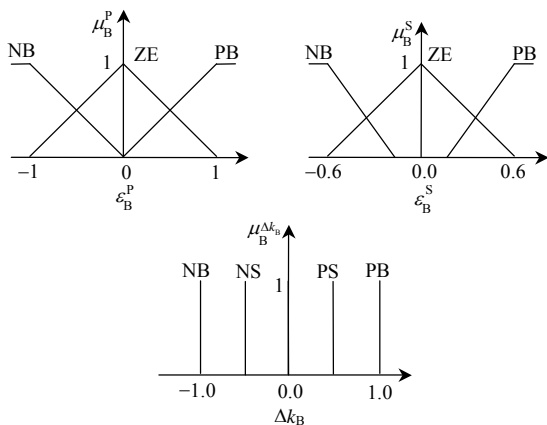


图 3 储能系统隶属函数

Fig. 3 Membership function of battery energy storage system

建立如表 2、3 所示的模糊控制规则,得到  $\Delta k_x$  的模糊集合。控制规则依据储能设备功率参考值和荷电状态对参考功率加以修正,避免储能设备枯竭或饱和。若储能设备荷电状态(state of charge, SOC)处于中间阈值,储能设备按功率参考值充放电;当 SOC 趋近于枯竭(饱和)时,如果此时功率参考值为放电(充电)功率,则应适当修正参考功率。

表 2 储能电池模糊控制规则

Tab. 2 Fuzzy rule of battery energy storage system

$\varepsilon_B^S$	模糊控制规则		
	$\varepsilon_B^P = \text{NB}$	$\varepsilon_B^P = \text{ZO}$	$\varepsilon_B^P = \text{PB}$
NB	ZO	NS	NB
ZO	ZO	ZO	ZO
PB	PB	PS	ZO

表 3 超级电容器模糊控制规则

Tab. 3 Fuzzy rule of ultracapacitor

$\varepsilon_U^S$	模糊控制规则		
	$\varepsilon_U^P = \text{NB}$	$\varepsilon_U^P = \text{ZO}$	$\varepsilon_U^P = \text{PB}$
NB	ZO	NS	NB
ZO	PS	ZO	NS
PB	PB	PS	ZO

采用加权平均法对输出模糊集合进行解模糊,得到功率修正参数  $\Delta k_x$ , 则修正后的储能设备功率参考值为

$$P_x = P_x^* + \bar{P}_x \Delta k_x \quad (2)$$

式中  $\bar{P}_x$  为额定功率。

值得关注的是,采用模糊控制策略虽然能延长储能设备的使用寿命,但降低了风电的平滑效果。结合风电波动特征,若采取 100% 满足约束条件来配置混合储能装置,则其成本将极大增加。此时若采取某一置信水平满足约束条件,将更具实际价值,所以本文选取机会约束规划来优化储能容量配置。

## 2 混合储能装置优化配置模型

### 2.1 机会约束规划

常用的确定性规划包括线性规划、非线性规划、多目标规划、目标规划、动态规划、多层规划等,但对于不确定规划问题,经典的优化理论通常是无能为力的。文献[11]运用机会约束规划配置风电场极限穿透功率,避免发生概率很低的违反约束条件的情况对风电装机容量的限制。文献[12-14]运用机会约束解决了输电规划中的不确定因素,给规划人员提供了选择方案。文献[15]针对水火电系统中的不确定因素的影响,提出了基于机会约束的短期优化调度不确定模型,以帮助调度人员确定火电

机组组合及费用目标。

机会约束规划允许决策在一定程度上不满足约束条件,但该决策应使约束条件满足的概率不小于某一置信水平,从而使传统优化中的刚性约束条件保持一定程度的柔性,以在目标函数最优和满足约束条件间取得适度的折中。文献[16]中提出的机会约束规划的常见形式为

$$\begin{cases} \min f(\mathbf{x}, \boldsymbol{\varepsilon}) \\ \text{s.t.} \begin{cases} P_r\{g_j(\mathbf{x}, \boldsymbol{\varepsilon}) \leq 0\} \geq \alpha \\ G(\mathbf{x}, \boldsymbol{\varepsilon}) \leq 0 \end{cases} \end{cases} \quad (3)$$

式中： $\mathbf{x}$  为决策向量； $\boldsymbol{\varepsilon}$  为随机向量； $f(\mathbf{x}, \boldsymbol{\varepsilon})$  为目标函数； $G(\mathbf{x}, \boldsymbol{\varepsilon}) \leq 0$  为一般优化问题中的刚性约束，要求 100% 满足； $P_r\{g_j(\mathbf{x}, \boldsymbol{\varepsilon}) \leq 0\}$  为约束条件满足的概率， $g_j(\mathbf{x}, \boldsymbol{\varepsilon})$  为机会约束； $\alpha$  为机会约束条件的置信水平。

## 2.2 混合储能数学模型

在本文风力发电混合储能模型中，混合储能装置的有功补偿作用是将风电出力与制定目标值的差额限制在某一指定区间范围  $\delta$  内。采用机会约束规划，是为了处理风电出力恶劣且储能设备工况不利于充放电时储能设备无法完全补偿风电波动的实际运行情况，即通过小概率违反约束条件避免 100% 满足约束条件造成的高额代价。事实上，由于装机容量和负荷较小，孤岛运行的微网出现大功率波动时，往往需要依赖切机、切载等紧急控制措施来满足功率平衡的要求<sup>[17]</sup>。

荷电状态与储能设备充放电功率的关系为

$$S_x = \frac{E_x^{\text{ini}} + \int_0^t (\eta_{\text{ch}}^x P_{\text{ch}} - \frac{1}{\eta_{\text{dis}}^x} P_{\text{dis}}) dt}{\bar{E}_x} \quad (4)$$

式中： $S_x$ 、 $E_x^{\text{ini}}$  分别为储能设备的荷电状态、初始容量； $\eta_{\text{ch}}^x$ 、 $\eta_{\text{dis}}^x$  分别为充、放电效率； $P_{\text{ch}}$ 、 $P_{\text{dis}}$  分别为充放电功率； $\bar{E}_x$  为储能设备的额定容量。

以风电输出功率  $P_{\text{WT}}$  的低频分量作为输出目标值  $P_{\text{WT}}^*$ ， $P_{\text{WT}}^*$  也可以采用如下表述形式<sup>[3,5,7,9]</sup>：

$$P_{\text{WT}}^* = \frac{1}{1 + T_{\text{WT}} s} P_{\text{WT}} \quad (5)$$

式中  $T_{\text{WT}}$  为低通滤波器的平滑时间常数。

为检验应用混合储能系统后风电功率平滑的效果，选取风电功率输出平滑率  $\eta_{\text{cer}}$  作为评估指标<sup>[18-20]</sup>。

$$\eta_{\text{cer}} = \frac{P_{\text{WT}} + P_{\text{B}} + P_{\text{U}} - P_{\text{WT}}^*}{P_{\text{WT}}} \quad (6)$$

基于机会约束规划的混合储能数学模型为

$$\begin{cases} \min C = C_{\text{P.U}} \bar{P}_{\text{U}} + C_{\text{P.B}} \bar{P}_{\text{B}} + C_{\text{E.U}} \bar{E}_{\text{U}} + C_{\text{E.B}} \bar{E}_{\text{B}} \\ \text{s.t.} \begin{cases} \Pr\{\eta_{\text{cer}} \leq \delta\} \geq \alpha \\ -\bar{P}_x \leq P_x \leq \bar{P}_x \\ \underline{S}_x \leq S_x \leq \bar{S}_x \end{cases} \end{cases} \quad (7)$$

式中： $\bar{E}_{\text{U}}$ 、 $\bar{E}_{\text{B}}$  分别为超级电容器、储能电池的额定容量； $\delta$  为风电平滑率区间范围； $\bar{S}_x$ 、 $\underline{S}_x$  分别为储能装置荷电状态上下限； $C$  为混合储能装置总成本费用； $C_{\text{P.U}}$ 、 $C_{\text{P.B}}$  分别为超级电容器和储能电池额定功率单价； $C_{\text{E.U}}$ 、 $C_{\text{E.B}}$  分别为超级电容器和储能电池额定容量单价。

## 2.3 遗传算法流程

采用遗传算法求解基于机会约束规划的混合储能规划模型，基本步骤如下：

- 1) 初始化。输入遗传算法中染色体个数、交叉概率和变异概率，采用随机方法产生 1 组初始配置方案，作为遗传算法的初始种群。
- 2) 对种群中的每个染色体进行仿真运算。
- 3) 检验其是否满足机会约束条件，如满足则进入步骤 4)，如都不满足则进行变异运算形成新一代染色体种群，执行步骤 2)。
- 4) 选取满足机会约束条件的染色体，计算其对应的目标函数值，即混合储能配置成本。
- 5) 对种群中的染色体进行精英选择操作。
- 6) 对种群中的染色体进行变异和交叉操作，得到新一代染色体。
- 7) 判断是否达到最大迭代次数，达到则停止计算，否则重复步骤 2) — 5)。
- 8) 以求解过程中发现的最好染色体作为混合储能最优配置方案。

## 3 仿真分析

本文采用 Matlab/Simulink 进行仿真分析，仿真时间选取为 80 min，依据微网和混合储能设备运行特性，将高通滤波器截止频率设为 0.02 Hz，储能电池和超级电容的 SOC 初值均选为 0.5，风电平滑率区间  $\delta$  设定为  $\pm 2\%$ ，储能设备参数如表 1 所示。

在置信区间  $\alpha = [80\%, 100\%]$  进行多次仿真，不同置信区间下的成本如图 4 所示。由图 4 可知，随着  $\alpha$  不断增大，混合储能设备容量和成本不断增加，但  $\alpha$  在 90% 和 96% 时都出现明显拐点，所以可选取为最优置信水平（图 4 中两者均可作为最优置信水平）。在实际应用中，由于各地风况和控制策略的不

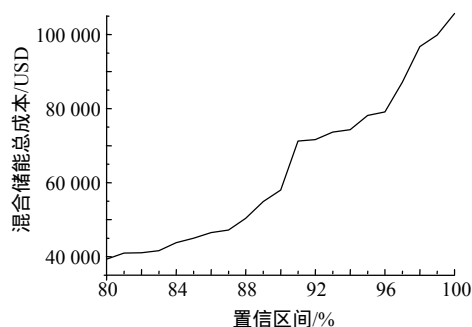


图4 不同置信区间下的成本

Fig. 4 Cost under different confidence interval

同,最优置信水平也将有所不同。

对 $\alpha$ 选取为90%的情况进行分析,混合储能系统最优配置方案为:储能电池额定功率 $\bar{P}_B$ 和额定容量 $\bar{E}_B$ 分别为23.24 kW、23.18 kW·h,超级电容器额定功率 $\bar{P}_U$ 和额定容量 $\bar{E}_U$ 分别为8.99 kW、0.97 kW·h。混合储能系统对风电功率的平滑作用如图5所示。由图5可知,混合储能系统能够有效平滑风电输出功率,以使 $P_{WT}$ 更逼近 $P_{WT}^*$ ,减少了波动频率,提高了风力发电系统的电能质量。图5中,虚线为 $\pm 2\%$ 的带宽,即风电功率输出经混合储能补偿后90%以上时间的波动在 $\pm 2\%$ 内,而小于10%时间内功率输出超出波动区间。对于遗传算法选取的不满足约束区间A和点B,在未经混合储能系统补偿前,A、B内风电输出功率波动剧烈,两者偏离目标值高达18%,因而也说明利用机会约束配置容量能够避免风电剧烈波动带来的成本增加。

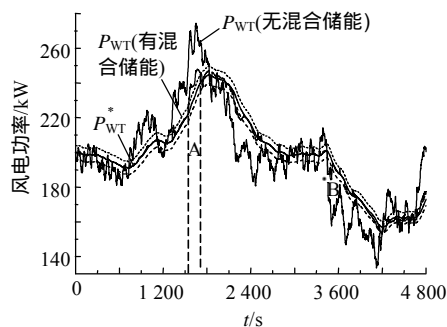


图5 混合储能系统对功率波动的平滑作用

Fig. 5 Hybrid energy storage system's smoothing effect on power fluctuation

图6为储能电池系统和超级电容器吸收补偿的有功功率。由图6可知,超级电容器补偿了混合储能系统中较高频部分,而储能电池系统则补偿低频部分。相比无超级电容器作为辅助设备的储能系统,储能电池的充放电周期变大,储能电池的充放电次数也明显减少,有效延长了储能电池使用寿命。

图7为储能电池和超级电容器的荷电状态。利用1.2节控制策略, $S_B$ 和 $S_U$ 均被有效控制于合理

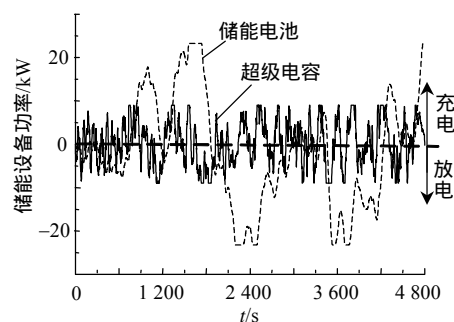


图6 储能电池系统与超级电容器的有功功率

Fig. 6 Active power of battery energy storage system and ultracapacitor

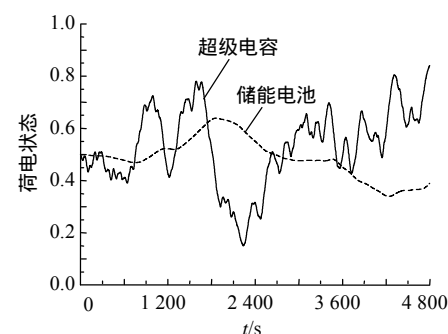


图7 储能电池系统与超级电容器的荷电状态

Fig. 7 State of charge variance in battery energy storage system and ultracapacitor

范围,避免了储能设备饱和或枯竭对储能设备寿命的影响。

## 4 结论

本文将机会约束规划方法用于混合储能系统容量配置问题,建立了相应的机会约束模型,并利用遗传算法完成寻优计算。与传统规划方法相比,本文方法可以适当处理风力发电出力随机变化等不确定因素,对约束条件的处理更加灵活,从而将传统刚性约束进行柔化,得到的置信区间与风电平滑效果关系曲线对实际容量配置更具实用性。本文按时间特性进行功率分配及模糊控制策略,能够有效发挥储能设备优点,延长使用寿命,但文中未考虑其他发电单元及模糊控制策略的优化,该方面内容有待于进一步研究。

## 参考文献

- [1] 黄伟,孙昶辉,吴子平,等.含分布式发电系统的微网技术研究综述[J].电网技术,2009,33(9):14-18.  
Huang Wei, Sun Changhui, Wu Ziping, et al. A review on microgrid technology containing distributed generation system[J]. Power System Technology, 2009, 33(9): 14-18(in Chinese).
- [2] 郑漳华,艾芊.微电网的研究现状及在我国的应用前景[J].电网技术,2008,32(16):27-31.  
Zheng Zhanghua, Ai Qian. Present situation of research on microgrid and its application prospects in China[J]. Power System Technology,

- 2008, 32(16): 27-31(in Chinese) .
- [3] 王虹富, 曹军, 邱家驹, 等. 一种用于分布式发电系统的有功补偿模型[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(8): 94-98 .  
Wang Hongfu, Cao Jun, Qiu Jiaju, et al. An active power compensation model for grid-connected distributed generation system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(8): 94-98(in Chinese) .
- [4] Liu F C, Liu J J, Zhou L Y. A novel control strategy for hybrid energy storage system to relieve battery stress[C]//Power Electronics for Distributed Generation Systems .Hefei, China :IEEE ,2010 :929-934 .
- [5] 侯世英, 房勇, 孙韬, 等. 混合储能系统在独立光伏发电系统功率平衡中的应用[J]. 电网技术, 2011, 35(5): 183-187 .  
Hou Shiying, Fang Yong, Sun Tao, et al. Application of hybrid energy storage system in power balance of stand-alone photovoltaic power system[J]. Power System Technology, 2011, 35(5): 183-187(in Chinese) .
- [6] 张国驹, 唐西胜, 齐智平. 超级电容器与蓄电池混合储能系统在微网中的应用[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(12): 85-89 .  
Zhang Guojun, Tang Xisheng, Qi Zhiping. Application of hybrid energy storage system of super-capacitors and batteries in a microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(12): 85-89(in Chinese) .
- [7] Toshifumi I, Masanori K, Akira T. A hybrid energy storage with a smes and secondary battery[J]. IEEE Trans on Applied Superconductivity, 2005, 2(15): 1915-1918 .
- [8] Caux S W, Hankache M, Fadel D, et al. On-line fuzzy energy management for hybrid fuel cell systems[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35(5): 2134-2143 .
- [9] Abbey C, Strunz K, Joos G. A knowledge-based approach for control of two-level energy storage for wind energy systems[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2009, 2(24): 539-547 .
- [10] Ross M, Hidalgo R, Abbey C, et al. Analysis of energy storage sizing and technologies[C]//Electric Power and Energy Conference .Halifax, Canada : IEEE , 2010 : 1-6 .
- [11] 雷亚洲, 王伟胜, 印永华, 等. 基于机会约束规划的风电穿透功率极限计算[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(5): 32-35 .  
Lei Yazhou, Wang Weisheng, Yin Yonghua, et al. Wind power penetration limit calculation based on chance constrained programming [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(5): 32-35(in Chinese) .
- [12] 杨宁, 文福栓. 基于机会约束规划的输电系统的规划方案[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(14): 23-27 .  
Yang Ning, Wen Fushuan. Transmission system expansion planning based on chance constrained programming[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(14): 23-27(in Chinese) .
- [13] 于晗, 钟志勇, 黄杰波, 等. 考虑负荷和风电不确定性的输电系统约束规划[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(2): 20-24 .  
Yu Han, Zhong Zhiyong, Huang Jiebo, et al. A chance constrained transmission network expansion planning method associated with load and wind farm variations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(2): 20-24(in Chinese) .
- [14] 赵国波, 刘天琪, 李兴源, 等. 基于灰色机会约束规划的输电系统规划[J]. 电网技术, 2009, 33(1): 22-25 .  
Zhao Guobo, Liu Tianqi, Li Xingyuan, et al. Power transmission system planning based on grey chance constrained programming [J]. Power System Technology, 2009, 33(1): 22-25(in Chinese) .
- [15] 朱建全, 吴杰康. 水火电力系统短期优化调度的不确定性模型[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(6): 51-54 .  
Zhu Jianquan, Wu Jiekang. An uncertainty model for short-term optimization scheduling of hydrothermal power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(6): 51-54(in Chinese) .
- [16] 刘宝碇, 赵瑞清, 王纲. 不确定规划及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 76-85 .
- [17] 林湘宁, 李正天, 薄志谦, 等. 适用于微网孤岛运行的低频减载方法[J]. 电网技术, 2010, 34(3): 16-20 .  
Lin Xiangning, Li Zhengtian, Bo Zhiqian, et al. An under-frequency load shedding method adaptive to the islanding operation of micro-grids[J]. Power System Technology, 2010, 34(3): 16-20(in Chinese) .
- [18] 李碧辉, 申洪, 汤涌, 等. 风光储联合发电系统储能容量对有功功率的影响及评价指标[J]. 电网技术, 2011, 35(4): 123-128 .  
Li Bihui, Shen Hong, Tang Yong, et al. Impacts of energy storage capacity configuration of hpws to active power characteristics and its relevant indices[J]. Power System Technology, 2011, 35(4): 123-128(in Chinese) .
- [19] Brekken T K A, Yokochi A, Jouanne A V, et al. Optimal energy storage sizing and control for wind power applications[J]. IEEE Trans on Sustainable Energy, 2011, 2(1): 69-77 .
- [20] Teleke S, Baran M E, Huang A Q, et al. Control strategies for battery energy storage for wind farm dispatching[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2009, 24(3): 725-732 .



谢石骁

收稿日期: 2011-07-17.

作者简介:

谢石骁(1986), 男, 硕士研究生, 研究方向为分布式发电技术, E-mail: walkan134@gmail.com;

杨莉(1974), 女, 副教授, 研究方向为电力系统优化调度、分布式发电技术, E-mail: feeyangli@zju.edu.cn;

李丽娜(1987), 女, 硕士研究生, 研究方向为新能源调度优化。

(责任编辑 徐梅)