

# 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

李碧辉, 申洪, 汤涌, 王皓怀

(中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192)

## Impacts of Energy Storage Capacity Configuration of HPWS to Active Power Characteristics and Its Relevant Indices

LI Bihui, SHEN Hong, TANG Yong, WANG Haohuai

(China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China)

**ABSTRACT:** The common characteristic of solar energy and wind power are the low energy density and strong randomness. As a new form of power generation unit, which complements the characteristics of wind power generation system with that of photovoltaic generation system and energy storage device, Hybrid photovoltaic/wind power generation system with storage bank (HPWS) can decrease active power fluctuation and improve power quality as well as mitigate the influence of active power fluctuation due to intermittent power generation of wind farms and solar PV generation systems, thus the technical characteristics, capacity configuration and control strategy of wind power generation, solar PV generation and energy storage equipments greatly impact the overall active power characteristics of HPWS system. On the basis of analyzing structural features, mathematical model and technical features of HPWS system, an optimized charging/discharging model of energy storage unit is proposed, in which the minimum fluctuation of active power is taken as objective function and in the constraints the initial capacity of energy storage at each step and charging/discharging control storage are taken into account. Based on the proposed model, three indices, by which the active power fluctuation is checked, are put forward, and combining with other two indices that evaluate the power supply reliability of HPWS system the characteristics of overall output active power of HPWS system is comprehensively evaluated. The checking computation of actual example is verified by the simulation software programmed by Matlab, and the varying trend of active power characteristics with the scheme of energy storage capacity configuration is analyzed.

**KEY WORDS:** wind power generation; solar PV generation; energy storage technology; capacity configuration; active power characteristics; indices of fluctuation of active power

**摘要:** 风力发电、太阳能光伏发电以及储能的技术特性、容量配置及控制策略对联合发电系统总有功功率特性有重要影响。分析了风光储联合发电系统的结构特点、数学模型和技术特点,提出了一种储能单元充放电优化模型,该模型以有功功率波动最小为目标函数,其约束条件考虑了每个步长的储能初始容量和储能充放电控制策略。根据该模型,提出了衡量风光储联合发电系统有功功率波动的 3 个指标,并结合评价风光储联合系统供电可靠性指标,综合评价总输出功率特性,通过 Matlab 编程进行了实例验算,分析了有功功率特性随储能容量配置方案的变化趋势及各指标的意义。

**关键词:** 风力发电; 太阳能光伏发电; 储能技术; 容量配置; 有功功率特性; 有功功率波动指标

## 0 引言

长期以来,蓄电池等储能元件一般应用于偏远地区的孤立电网中,其容量确定方法有年能量平衡法、年最长或平均连续无效能平衡法、电量盈亏平衡法、基本负荷连续供电保障小时计算法等<sup>[1-4]</sup>。近年来,随着风电的大规模开发,其功率波动对系统的冲击越来越突出,严重时威胁到电力系统的安全稳定运行,将储能应用于间歇式电源以平抑功率波动是一种理想的解决方案。风光储联合系统是一种新型发电单元<sup>[5]</sup>,利用风力发电和光伏发电的互补性及储能元件平抑功率波动的特性,可使联合发电系统的总输出有功功率保持相对平稳,减小功率波动,提高电能质量,降低对电网的冲击。

目前国家电网公司已经在河北张家口张北、尚义 2 个县风电场开始建设国内首个风光储能示范项目。该项目计划开发规模为风电 500 MW、太阳能光伏发电 100 MW、化学储能 75 MW。项目建成

后,其将成为世界上最大的太阳能光伏发电场、最大的风光储实验中心、世界上规模最大的风光储三位一体示范工程。

风光储联合发电系统中的储能容量配置及其控制策略直接影响联合发电系统的有功功率特性。文献[6-8]用切线法多目标优化配置光伏组件和蓄电池的容量。文献[9]采用遗传算法优化风光互补独立供电系统的容量配置,决策变量不仅有传统算法中的光伏电池和蓄电池容量,而且增加了风力发电机的类型、容量(台数)以及光伏电池的倾角。文献[10-11]提出了一些衡量风光储系统供电可靠性的指标,如负载缺电率(loss of power supply probability, LPSP) $\eta_{LPSP}$ 和蓄电池组荷电状态(station of charge, SOC)等。

但上述研究工作主要围绕独立供电系统,以功率平衡和供电可靠性为目标,研究储能容量的配置,并没有针对平抑总有功功率波动特性开展研究。而储能装置应用于大规模并网型间歇式电源中的主要目标是平抑功率波动,为此,本文研究储能容量及其控制策略对有功功率波动的影响,提出衡量风光储联合发电系统有功功率波动的有功功率偏差率 $\alpha$ 、部分有功功率偏差率 $\beta$ 及峰谷斜率总和3个指标,并结合部分文献常用的评价风光储联合系统供电可靠值 $\eta_{LPSP}$ 、能量浪费率 $\eta_{EXE}$ ,利用5个指标综合衡量总输出功率特性。最后针对实例计算,分析不同指标随容量变化的趋势及优缺点,据此确定储能最优容量的方法。

## 1 风光储联合发电系统的结构及特性

### 1.1 风光储联合发电系统的典型结构

风光储联合发电系统的典型结构如图1所示,

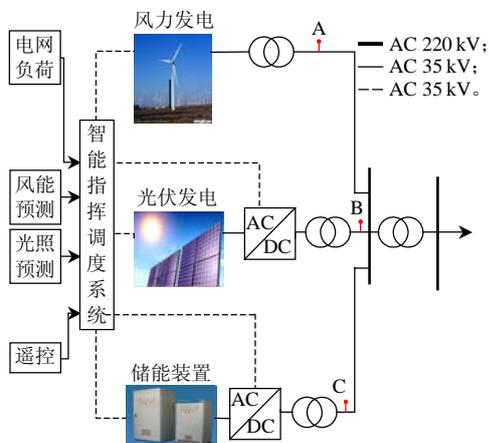


图1 风光储联合发电系统的典型结构

Fig. 1 The typical structure of hybrid photovoltaic and wind power generation system

主要由发电单元和储能单元构成。发电单元包括风力发电和太阳能光伏发电部分,用于将风、光等可再生能源转化为电力,储能单元主要包括蓄电池等储能元件,具有能量调节和平衡负载的作用。

### 1.2 风力发电特性

风力发电具有大幅度长时间尺度随机功率波动特性,大规模风力发电的功率波动时间常数一般为分钟级甚至更长。如酒泉地区玉门风电场10 min内出力变化大于装机容量 $\pm 20\%$ 的概率为1.87%,60 min内出力变化大于装机容量 $\pm 20\%$ 的概率增加为72.84%,因此随着预测时间的延长,如预测1 d内24 h的风力出力,其大幅度长时间尺度波动特性更加明显。

### 1.3 太阳能光伏发电特性

太阳能光伏发电的有功功率特性取决于太阳日照强度及天空云量分布,1 d内整体特性体现为白天较大,晚上较小,但白天受天气影响会出现快速剧烈的功率波动,成锯齿形分布。

### 1.4 储能技术特性

目前,电池储能在分布式发电系统具有应用前景。其中,铅酸蓄电池动态调节过程很短,可以在很短时间内实现充放电切换,成本较低,应用较广泛,但寿命较短<sup>[12]</sup>;钠硫电池是目前世界上示范或商业运行规模最大的储能电池,工程运用经验较丰富;液流电池、全钒液流电池具有寿命长、能量和功率独立设计、易于调节、电解液可重复循环使用的优点;锂离子电池在安全和循环性能方面具有突出优势。工程上根据电池的功能和经济性选择储能元件的类型。

不同类型电池体现不同的充放电特性,如只要铅酸蓄电池在电池容量允许范围内的充放电电流足够大,就可以在min级内实现充放电转换,这比较适应风光储联合系统间歇式供电、充放电频繁快速的特点。所以,目前实际风光储项目中常使用铅酸蓄电池。

## 2 风光储联合发电系统的数学模型

风力发电和太阳能光伏发电均为不可控元件,其功率的数学模型可以看作是随机分布的时间序列,用 $P_{WG}(t)$ 和 $P_{PV}(t)$ 分别表示 $t$ 时刻风力发电和太阳能光伏发电的有功功率。本文风光储联合发电系统的数学模型以风力发电和太阳能光伏发电有功功率时间序列为基础,为使总有功功率输出保持恒

定,对储能元件按照一定的控制策略进行充放电。因此,风光储联合发电系统的数学模型本质上是储能元件的控制模型。

储能元件控制模型的建模思路是:当风、光发电的有功功率输出小于负荷所需的参考值  $P_{\text{ref}}(t)$  时,有功功率缺额由蓄电池放电补充,直至降到电池容量最小值  $C_{\text{batmin}}$ ,下一 min 蓄电池即不能提供有功功率输出;当风、光的有功功率输出之和大于负荷所需的参考有功功率时,按照不浪费能量资源的原则,控制系统将富余的能量以充电形式储存在蓄电池里,直至蓄电池充满至电池容量最大值  $C_{\text{batmax}}$ ,控制系统停止充电,多余的有功功率仍然输出,下一 min 蓄电池不能充电储能。

该控制模型主要的约束条件为  $t$  时刻负荷的有功缺额  $P_{\Delta}(t)$ ,  $t$  时刻电池的初始容量  $C_{\text{bat}}(t)$  和  $t$  时刻风光储联合发电系统的总有功功率  $P_{\text{total}}(t)$ 。

$t$  时刻负荷的有功功率缺额为

$$P_{\Delta}(t) = P_{\text{ref}}(t) - [P_{\text{PV}}(t) + P_{\text{WG}}(t)]$$

式中:  $P_{\text{PV}}(t)$  为第  $t$  min 光伏发电的有功功率输出;  $P_{\text{WG}}(t)$  为第  $t$  min 风力发电的有功功率输出;  $P_{\Delta}(t)$  为第  $t$  min 负荷有功功率缺额;  $P_{\text{ref}}(t)$  为第  $t$  min 希望风光储联合系统输出的预期参考功率,该值是经过前期关于风、光资源分布情况和当地负荷情况调研得到的常数。若  $P_{\Delta}(t) > 0$ ,则第  $t$  min 蓄电池处于放电状态;若  $P_{\Delta}(t) < 0$ ,则第  $t$  min 蓄电池处于充电状态。

$t$  时刻电池的初始容量<sup>[15]</sup>为

$$C_{\text{bat}}(t) = C_{\text{bat}}(t-1)(1-\delta) - P_{\text{bat}}(t)\eta_{\text{cha}}\Delta t$$

式中:  $C_{\text{bat}}(t)$  和  $C_{\text{bat}}(t-1)$  分别是蓄电池第  $t$  min 和第  $(t-1)$  min 的初始容量,  $\text{kW}\cdot\text{min}$ ;  $\delta$  为自放电电流率;  $\eta_{\text{cha}}$  为蓄电池充电效率,其大小由充电电流决定,一般取 0.65~0.85。

$t$  时刻风光储联合发电系统实际总有功功率为

$$P_{\text{total}}(t) = P_{\text{bat}}(t) + P_{\text{PV}}(t) + P_{\text{WG}}(t)$$

针对某组风力和光伏发电输出有功功率的预测值,将每 1 min 的  $P_{\text{bat}}(t)$  和下 1 min 的储能容量  $C_{\text{bat}}(t)$  分为如下 5 种情况。

1) 当风力和光伏发电的输出有功功率预测值小于负荷所需的参考值时,有功缺额由蓄电池放电补充,第  $(t+1)$  min 蓄电池初始容量的计算方法如下:

$$\begin{cases} P_{\text{bat}}(t) = P_{\Delta}(t) \\ C_{\text{bat}}(t+1) = C_{\text{bat}}(t)(1-\delta) - P_{\text{bat}}(t)\eta_{\text{cha}}\Delta t \end{cases} \quad (1)$$

式中  $P_{\Delta}(t) > 0$  且  $P_{\Delta}(t)\Delta t < C_{\text{bat}}(t)$ 。

2) 当蓄电池处于放电状态,如果第  $t$  min 蓄电池的储能随放电降到最小值  $C_{\text{batmin}}$ ,则在第  $(t+1)$  min 时,蓄电池已不能提供有功输出功率,第  $(t+1)$  min 蓄电池初始容量的计算方法如下:

$$\begin{cases} P_{\text{bat}}(t) = [C_{\text{bat}}(t) - C_{\text{batmin}}] / \Delta t \\ C_{\text{bat}}(t+1) = C_{\text{batmin}} \end{cases} \quad (2)$$

式中  $P_{\Delta}(t) > 0$  且  $P_{\Delta}(t)\Delta t > C_{\text{bat}}(t)$ 。

3) 当风力和光伏发电输出有功功率之和大于负荷所需的参考有功功率时,按照不浪费能量资源的原则,控制系统将富余的能量以充电的形式储存在蓄电池里,直至蓄电池充满。第  $(t+1)$  min 蓄电池初始容量的计算方法如下:

$$\begin{cases} P_{\text{bat}}(t) = P_{\Delta}(t) \\ C_{\text{bat}}(t+1) = C_{\text{bat}}(t)(1-\delta) + P_{\text{bat}}(t)\eta_{\text{cha}}\Delta t \end{cases} \quad (3)$$

式中  $P_{\Delta}(t) < 0$  且  $|P_{\Delta}(t)\Delta t| < [C_{\text{batmax}} - C_{\text{bat}}(t)]$ 。

4) 在蓄电池充电时,蓄电池容量在  $t$  min 内充满至最大值  $C_{\text{batmax}}$ ,控制系统停止充电过程,多余的有功功率还是输出给负荷。第  $(t+1)$  min 蓄电池初始容量的计算方法如下:

$$\begin{cases} P_{\text{bat}}(t) = -[C_{\text{batmax}}(t) - C_{\text{bat}}(t)] / \Delta t \\ C_{\text{bat}}(t+1) = C_{\text{batmax}}(t) \end{cases} \quad (4)$$

式中  $P_{\Delta}(t) < 0$  且  $|P_{\Delta}(t)\Delta t| > [C_{\text{batmax}} - C_{\text{bat}}(t)]$ 。

5) 当风力和光伏发电输出有功功率等于负荷所需的参考输出功率,即  $P_{\Delta}(t)=0$  时,第  $(t+1)$  min 蓄电池初始容量的计算方法如下:

$$\begin{cases} P_{\text{bat}}(t) = 0 \\ C_{\text{bat}}(t+1) = C_{\text{bat}}(t) \end{cases}$$

### 3 风光储联合发电系统有功功率评价指标

国内外文献提出了很多指导风光储储能容量配比的指标,如供电可靠性指标、经济指标等,本文引入国际上较多参考文献采用的  $\eta_{\text{LPSP}}$  和  $\eta_{\text{EXC}}$ ,这 2 个指标属于衡量联合系统供电可靠性的指标,可以间接评价联合系统输出功率波动。

$\eta_{\text{LPSP}}$  为系统不能满足的负荷需求除以评估期总负荷需求的比值<sup>[16]</sup>。它是一个广泛运用于风光储联合系统中优化容量配置的工程应用标准。当蓄电池放电至最小值  $C_{\text{batmin}}$  时,控制系统断开蓄电池和负荷的连接,负荷需求即不能满足。

$t$  时间内的供电损失值为

$$E_{\text{LPSP}}(t) = P_{\text{load}}\Delta t - [P_{\text{PV}}(t)\Delta t + P_{\text{WG}}(t)\Delta t + C_{\text{bat}}(t) - C_{\text{batmin}}]\eta_{\text{inv}}$$

评估期  $T$  内,供电损失率表示为

$$\eta_{\text{LPS}}(T) = \sum_{t=1}^T E_{\text{LPS}}(t) / \sum_{t=1}^T P_{\text{load}}(t) \Delta t$$

式中:  $\Delta t$  为用于计算的步长;  $T$  为评估期, 并假设评估期内风、光伏发电出力保持不变。

$\eta_{\text{EXC}}$  为风力、光伏发电浪费的功率与评估期负载总的功率要求的比值<sup>[13]</sup>。当  $P_{\text{WG}}(t) + P_{\text{PV}}(t) + P_{\text{bat}}(t) = P_{\text{total}}(t) > P_{\text{ref}}(t)$  时, 风力和光伏发电浪费的能量为

$$E_{\text{WE}}(t) = [P_{\text{PV}}(t) + P_{\text{WG}}(t)] \Delta t - \{P_{\text{ref}} \Delta t / \eta_{\text{inv}} + [C_{\text{batmax}} - C_{\text{bat}}(t-1)] / \eta_{\text{cha}}\}$$

$$\eta_{\text{EXC}}(T) = E_{\text{WE}}(T) / [2 \sum_{t=1}^T P_{\text{load}}(t) \Delta t]$$

式中  $E_{\text{WE}}(t)$  是在满足负荷要求和储能元件充电要求的基础上, 风力发电和光伏发电浪费的能量。

这 2 个指标主要针对风光储系统的电源, 偏向评价供电可靠性。由于目前尚未提出一个较全面地衡量不同容量储能的平抑有功功率波动能力的指标, 本文提出 3 个衡量总有功功率特性的指标, 主要偏向风光储联合系统的外特性和对并网系统的冲击性。

有功功率偏差率  $\alpha$  是类比方差, 方差是用来度量随机变量及其数学期望之间的偏离程度, 而有功功率偏差率是衡量风光储总输出有功功率相对于  $P_{\text{ref}}(t)$  的偏离程度, 它的表达式为

$$\alpha = \sum_{t=0}^n \{ [P_{\text{total}}(t) - P_{\text{ref}}(t)] / P_{\text{ref}}(t) \}^2$$

式中  $\alpha$  越大, 总输出的功率相对于  $P_{\text{ref}}(t)$  偏离越大, 输出功率波动越大, 对负载的冲击越大。

当风力和光伏发电出力满足负荷需求和蓄电池充电需求且仍然还有富余的情况下, 加大蓄电池容量, 有功功率输出波动没有改善。因此, 排除这种情况, 在有功功率偏差率的基础上, 定义部分有功功率偏差率, 即当  $P_{\text{WG}}(t) + P_{\text{PV}}(t) + P_{\text{bat}}(t) = P_{\text{total}}(t) > P_{\text{ref}}(t)$  时, 有功功率偏差率为

$$\beta = \sum_{t=0}^n \{ [P_{\text{total}}(t) - P_{\text{ref}}(t)] / P_{\text{ref}}(t) \}^2$$

风光储联合系统总输出曲线是将评估期  $T$  内风光储系统输出有功功率的离散时间序列相邻值由线段连接形成的折线图。峰谷斜率总和  $\gamma$  是总输出曲线每个仿真步长的功率峰谷斜率绝对值之和, 计算公式为

$$\gamma = \sum_{t=0}^n |k(t)| = \sum_{t=0}^n (|P_{\text{total}}(t) - P_{\text{total}}(t+1)| / \Delta t)$$

式中:  $k(t)$  为第  $t$  步长的线段斜率;  $\beta$  可以定性衡量

输出功率急速上升或下降的快慢,  $\beta$  越大, 输出功率急速变化的速度越快。

#### 4 算例结果与分析

为简化处理, 本算例以 1 min 为步长, 输入 20 min 的风力和光伏发电的离散功率序列, 并假设在每个仿真步长  $\Delta t$  内, 蓄电池充放电电流不变(不超过最大允许充放电电流), 蓄电池端电压不变(不超过最大允许充电内电压), 即输出有功功率近似不变, 每个步长起始时, 通过控制改变蓄电池输出功率, 并保持 1 min 内蓄电池输出功率恒定。计算各指标时, 取  $\Delta t=1$ ,  $T=20$ ,  $\eta_{\text{cha}}=1$ ,  $\delta=0$ ,  $\eta_{\text{inv}}=0.8$ 。

本文用 Matlab 编写分析程序, 计算每 min 储能的初始容量、充放电功率、风光储联合系统的总输出功率。其中风力发电容量为 1500 kW, 太阳能光伏发电容量为 1200 kW。假设风光储联合发电系统有功功率期望函数值  $P_{\text{ref}}(t)$  为定值 2000 kW, 储能元件配置容量范围为 0~800 kW·min。

风力和太阳能光伏发电有功功率随机时间序列的变化曲线见图 2。从图 2 可以得到不加储能时风光联合发电的功率波动情况; 与  $P_{\text{ref}}(t)$  相比, 风力和太阳能光伏发电联合输出功率波动剧烈, 若直接并网, 系统节点电压和频率会随之急速变化, 对系统造成较大冲击。

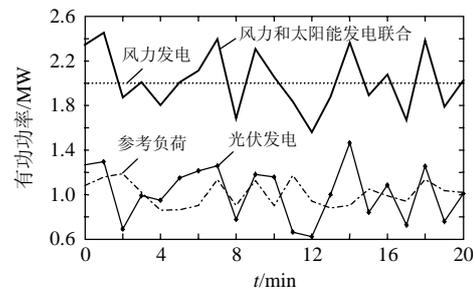


图 2 风力发电和太阳能光伏发电有功功率随机时间序列的变化曲线

Fig. 2 The curve of discrete output power series of wind and photovoltaic power generation

储能容量对风光储联合发电系统总输出功率的影响见图 3。从图 3(a)可以看到, 当风光储联合系统的储能容量范围为 0~300 kW·min 时, 随着容量增加, 总输出功率波动明显减小, 该范围的储能元件平波效果明显。从图 3(b)可以看到, 当储能容量在 400~800 kW·min 之间变化时, 在 0~11 min 和 14~20 min 时间段内, 5 条总输出功率曲线基本重合, 只有在 11~14 min 的时间段内, 随着容量增加, 总输出曲线波动减小, 但储能容量平波效果不太明

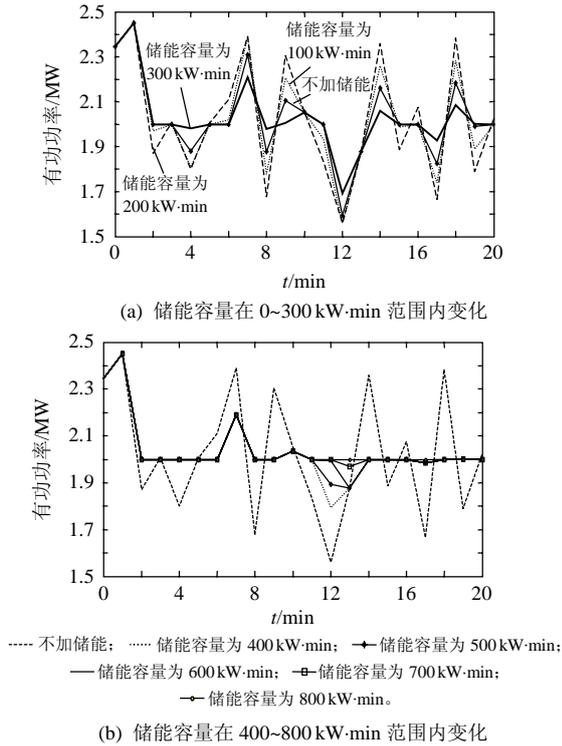


图 3 储能容量对风光储联合发电系统总输出功率的影响  
**Fig. 3 The influence of the storage capacity on the output power of the hybrid photovoltaic and wind power generation system**

显, 所以当储能容量在 400~800 kW·min 变化时, 储能容量平抑有功功率波动的效果不明显。

利用 Matlab 编写分析程序, 计算有功输出波动的有功功率偏差率 $\alpha$ 、部分有功功率偏差率 $\beta$ 、斜率总和 $\gamma$ 以及间接分析输出功率波动率的供电可靠性 2 个指标, 即供电损失率 $\eta_{LPSP}$ 和能量浪费率 $\eta_{EXC}$ , 并计算出不同容量下各项指标占不加储能时初始值的百分比。

图 4 为配置储能容量为 0~800 kW·min 的蓄电池, 风光储联合系统输出功率评价指标的变化趋势。随着储能在 0~800kW·min 不断增加, 5 项指标总体趋势都是下降, 当储能在 0~400 kW·min 增加时,

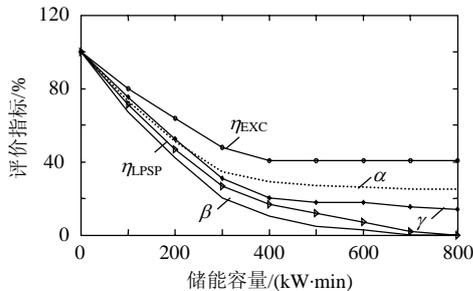


图 4 不同储能容量下风光储联合系统有功功率评价指标的变化情况  
**Fig. 4 The variation trend of active power evaluation indexes of hybrid photovoltaic wind power generation system with different storage capacities**

5 项指标下降较快, 当储能在 500~800kW·min 增加时, 5 项指标基本趋于平稳。

对比 $\alpha$ 和 $\beta$ 的变化趋势, 当储能容量在 400~800kW·min 变化时,  $\alpha$ 基本不变,  $\beta$ 下降较明显。这说明, 在储能容量较大的系统中, 用 $\alpha$ 无法衡量不同储能容量平抑波动的区别, 而用 $\beta$ 可以较明显地区分这种区别。主要原因是按照能源不浪费的原则, 当 $P_{total}(t) > P_{ref}(t)$ 时, 即在风力和光伏发电富余, 且蓄电池充满的情况下, 系统的总输出功率大于负荷需求, 无法通过增加储能容量平抑波动, 所以 $\alpha$ 基本保持不变, 而 $\beta$ 排除了这种情况, 变化明显。

当储能容量逐渐增加到 400 kW·min 以上时,  $\eta_{EXC}$  保持在未加储能时的 40.607% 不变, 此时能源浪费程度较大, 这说明, 在本文的储能充放电控制方式下,  $\eta_{EXC}$  不能通过增加储能容量的方式减小到较小的程度, 供电可靠性和有功功率波动的减小在一定程度上是在浪费能源的基础上实现的。

因此, 针对风光储联合系统有功功率波动最小、能量浪费较少的目标, 综合考虑, 针对该组风力发电和光伏发电的输出功率, 应该选择容量为 400kW·min 的储能元件。

### 5 结论

1) 本文提出了衡量风光储联合系统总输出有功功率波动的 3 个指标 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ , 引入常用的供电可靠性指标 $\eta_{LPSP}$ 和 $\eta_{EXC}$ 间接衡量总输出有功功率波动。 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 主要针对风光储联合系统的外特性和对并网系统的冲击性, $\eta_{LPSP}$ 和 $\eta_{EXC}$ 主要针对风光储系统电源, 偏向于评价供电可靠性。当衡量系统有功功率特性时, 应将 5 项指标综合考虑。

2) 对于某地区的风光储配比, 首先对 1 组风力发电和光伏发电的功率预测值计算不同储能容量下的 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 、 $\eta_{LPSP}$ 和 $\eta_{EXC}$ , 通过综合考虑这 5 种指标得到最优容量。然后, 大量选取  $n$  组风力发电和光伏发电的预测值, 重复计算, 运用统计概念, 最后得到有功功率波动最小的最优容量概率分布, 这可以为风光储联合系统中储能容量的选取提供指导。

3) 本文 $P_{ref}(t)$ 为  $t$  时刻风光储联合系统输出的预期参考功率, 是关于时间  $t$  的函数, 拟合条件是前期关于风、光资源分布情况和当地负荷预测情况, 由于本文仿真时间为 20min, 短时间内将 $P_{ref}(t)$ 近似成常数是可行的, 但风光储联合系统是基于较

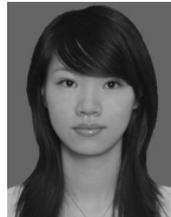
长时间的预测仿真进行优化配置的。如何衡量风光储联合系统有功功率特性并进行容量配置有待进一步研究。

4) 本文的主要目标是衡量有功功率波动特性, 当储能容量增加至较大值时, 储能元件平抑有功功率波动的效果不明显, 如何利用风光储联合系统的经济指标进行系统优化配置值得深入探讨。

5) 本文主要研究了孤网系统中风光储容量对比对平抑总输出功率波动的影响, 今后将重点研究风光储系统并入大电网后, 风光储系统储能容量配置对有功功率特性的影响以及 5 项评价指标的指导作用。

## 参考文献

- [1] Rachid B, Omessad H, Cristian N, et al. Optimal sizing of stand-alone hybrid wind PV system with battery storage[C]//12th European Conference on Power Electronics and Applications. Aalborg, Denmark: EPE, 2007: 1-10.
- [2] 王承煦, 张源. 风力发电[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002: 58-66.
- [3] 张步涵, 曾杰, 毛承雄, 等. 电池储能系统在改善并网风电场电能质量和稳定性中的应用[J]. 电网技术, 2006, 30(15): 54-58. Zhang Buhuan, Zeng Jie, Mao Chengxiong, et al. Improvement of power quality and stability of wind farms connected to power grid by battery energy storage system[J]. Power System Technology, 2006, 30(15): 54-58(in Chinese).
- [4] 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).
- [5] 栗文义, 张保会. 风能大规模利用对电力系统可靠性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(1): 100-105. Li Wenyi, Zhang Baohui. Reliability impacts of large scale utilization of wind energy on electric power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(1): 100-105(in Chinese).
- [6] Kalyanmoy D, Amrit P, Sanler A. A fast multi-objective genetic algorithms: NSGA-II[J]. Renewable Energy, 1999, 7(3): 17-31.
- [7] Hartley L E, Martinez-Lozano J A, Ulla M P, et al. The optimization of inclination of a solar collector to maximize the incident solar radiation[J]. Renewable Energy, 1999, 9(4): 216-223.
- [8] Marion W, Urban K. User's manual for years[R]. London: National Renewable Energy Laboratory, 1995.
- [9] Xu Daming, Kang Longyun, Chang Liuchen, et al. Optimal sizing of standalone hybrid wind PV power systems using genetic algorithms[C]//18th Annual Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Saskatoon, Saskatchewan, Canada: IEEE, 2005: 1722-1725.
- [10] Yang Hongxing, Zhou Wei, Lu Lin, et al. Optimal sizing method for stand-alone hybrid solar-wind system with LPSP technology by using genetic algorithm[J]. Solar Energy, 2008(82): 354-357.
- [11] Zhou Wei, Yang Hongxing, Fan Zhaohong. Battery behavior prediction and battery working states analysis of a hybrid solar-wind power generation system[J]. Renewable Energy, 2008, 33(6): 1413-1423.
- [12] Masaaki S. Development of VRLA batteries for photovoltaic application[R]. GS News Technical Report, 2001, 60(2): 13-18.
- [13] Anderson M D, Carr D S. Battery energy storage technologies[J]. Proceedings of the IEEE, 1993, 81(3): 475-479.
- [14] Zhao Ping, Zhang Huamin, Zhou Hantao, et al. Reserch outline of redox flow cells for energy storage in China[J]. Chinese Battery Industry, 2005, 10(4): 96-99.
- [15] Daniele M, Anna P. Sorrentinoa method to improve microgrid reliability by optimal sizing PV wind plants and storage systems[C]//20th International Conference on Electricity Distribution. Prague Czech: CIRED, 2009: 8-16.
- [16] Diaf S, Diaf D, Belhamel M, et al. A methodology for optimal sizing of autonomous hybrid PV wind system[J]. Energy Policy, 2007(35): 5708-5718.



李碧辉

收稿日期: 2010-11-07。

作者简介:

李碧辉(1986), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定控制及负荷建模、大规模风电接入电力系统运行控制关键技术, E-mail: libihui@epri.sgcc.com.cn;

申洪(1971), 男, 博士, 研究方向为电力系统运行与控制、电力系统稳定分析、新能源发电;

汤涌(1959), 男, 博士, 教授级高级工程师, 博士生导师, 研究方向为电力系统仿真和分析研究、电力系统稳定与控制;

王皓怀(1984), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统电压稳定与控制、风光储联合发电系统并网相关问题研究。

(责任编辑 杜宁)