

# 基于实证数据和模糊控制的多时间尺度 风储耦合实时滚动平抑波动

刘春燕,晁 勤,魏丽丽

(新疆大学 电气工程学院,新疆 乌鲁木齐 830047)

**摘要:**风电间歇性和随机性造成并网功率波动很大,严重影响电力系统安全稳定性。基于某风电场出力实证数据,在多时间尺度上采用概率统计法研究风电波动规律和风储耦合特性;采用实时 5 点滚动法制定多时间尺度平抑风电波动目标,兼顾国网规定的多时间尺度风电波动限值进行目标修正,并利用储能分时跟踪平抑风电波动目标,合理确定多时间尺度储能配置容量和充放电控制策略;考虑储能经济性,采用补偿度进一步修正储能容量,并采用模糊控制原理优化荷电状态,得到储能不过充过放的优化控制策略。仿真结果表明该方法有效可行,当抑制 10 min 风电波动的储能容量为 15% 时,90% 以上的风储合成出力能够跟踪平抑风电波动目标。

**关键词:**多时间尺度;风储耦合;概率统计;控制;风电;储能

**中图分类号:** TM 614

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.02.006

## 0 引言

以风能为原动力的风力发电系统,由风速变化引起的风电功率波动对电力系统安全性和稳定性的影响越来越受到人们关注。文献[1-3]通过内蒙古和东北风电场实际数据分析充分给予了论证,提出了建立有效的风电功率预测系统方案;但并未涉及解决风电波动的方法。随着储能技术水平不断提高,经济成本降低,在风电场出口侧安装储能装置平抑其输出功率波动<sup>[4-7]</sup>,是目前解决平抑风电波动的方法之一。文献[8-11]研究了单一储能或混合储能平抑风电功率波动的有效性与可行性。文献[12-13]提出采用正态分布和低通滤波器的方法确定平抑目标制定储能容量。文献[14]对风电场日出力曲线和储能容量关系进行了研究。文献[15-16]基于模糊控制理论和机会约束规划对混合储能进行充放电控制和容量配置。但上述文献均没有涉及多时间尺度风储耦合及储能容量配置和充放电控制策略研究。

本文提出基于某风电场出力实证数据在秒级(3 s)、分钟级(10 min)、小时级(1 h、3 h)多时间尺度上采用概率统计法研究风电波动规律和风储耦合特性,采用实时 5 点滚动法制定多时间尺度平抑风电波

动目标,兼顾国网规定的多时间尺度风电波动限值进行目标修正,并利用储能分时跟踪平抑风电波动目标,合理确定多时间尺度储能配置容量和充放电控制策略,考虑储能经济性,采用补偿度进一步修正储能容量,并采用模糊控制原理优化荷电状态(SOC)达到不过充过放的优化控制策略。

## 1 基于实证数据的风电出力多时间尺度波动特性分析

### 1.1 风电出力间歇性及随机性论证

对某风电场(259.5 MW)2011 年 1 月 1 日至 12 月 31 日数据进行分析与统计,如图 1 所示(截取某连续 4 天实际出力(标么值),时间尺度为 10 min)。结果表明:风电出力具有间歇性(第 1 天风电出力第 50 个采样点至第 67 个采样点始终为 0)和随机性(连续 4 天毫无规律)。

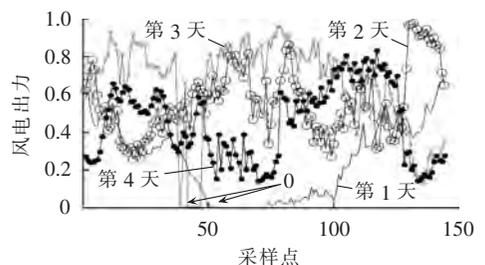


图 1 某风电场连续 4 天的风电出力  
Fig.1 Wind power output of a wind farm for four successive days

风电出力在不同时间尺度(秒级(3 s)、分钟级(10 min)、小时级(1 h、3 h))呈现不同波动特征,因此,有必要分时段研究风电功率波动特征,找出平抑波动最佳方案。

收稿日期:2014-01-13;修回日期:2014-11-10

基金项目:科技部国家国际科技合作专项资助项目(2013DFG61-520);国家自然科学基金资助项目(51267020);教育部 2012 年高等学校博士学科点专项科研基金博导类联合资助课题(20126501110003)

Project supported by International Science & Technology Cooperation Program of China(2013DFG61520),the National Natural Science Foundation of China(51267020) and the Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of Ministry of Education 2012(20126501110003)

## 1.2 多时间尺度风电出力波动特性分析及统计

### 1.2.1 风电出力波动分析统计方法

风电出力波动分析统计方法主要从风电出力在不同时间尺度下的变化率及幅度和分布概率角度进行,定义如下 4 个计算公式。

#### a. 风电功率波动变化率 $\Delta P_b$ 。

设  $P(t+1)$  为当前时刻风电出力,  $P(t)$  为前一时刻的风电出力,  $P_N$  为总装机容量, 则  $\Delta P_b$  为:

$$\Delta P_b = \frac{|P(t+1) - P(t)|}{P_N} \times 100\% \quad (1)$$

#### b. 风电功率波动幅度平均值 $P_{avr}$ 。

设风电场某时间段风电变化功率为  $\Delta P$ ,  $n$  为风电场出力时间段数, 则  $P_{avr}$  为:

$$P_{avr} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \Delta P(j) \quad j=1, 2, \dots, n \quad (2)$$

#### c. 风电功率波动变化量标准差 $D$ 为:

$$D = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (\Delta P(j) - P_{avr})^2} \quad (3)$$

#### d. 风电功率波动变化率分布概率 $G$ 。

设  $N_{\Delta P_b}$  为风电功率变化率某数值出现的次数,  $N_{total}$  为风电功率变化率出现的总次数, 则  $G$  为:

$$G = \frac{N_{\Delta P_b}}{N_{total}} \quad (4)$$

### 1.2.2 基于实证数据的风电波动量与国网规定对比分析

国家电网规定风电波动不同时间尺度必须限制在一定范围内(简称“国网限值”,下同),如表 1 所示。

表 1 风电场最大功率变化率国网推荐值  
Table 1 Maximum wind power variation recommended by State Grid

风电场装机容量/MW	10 min 最大变化量/MW	1 min 最大变化量/MW
<30	20	3
30~150	装机容量/3	装机容量/10
>150	50	15

根据式(1)和式(4)以及国网限值对某区风电场(259.5 MW)实证数据进行 1 min 和 10 min 最大变化量分别大于 15 MW 和 50 MW 的概率统计,结果如表 2 所示。

表 2 某风电场风电变化率概率统计表  
Table 2 Statistics of wind power variation rate of a wind farm

风电场装机容量/MW	超出 10 min 最大变化量概率/%	超出 1 min 最大变化量概率/%
259.5	22.89	1.3

统计结果表明:风电波动超标率较高,需要加装储能平抑,但是国网的規定只是 2 个时间尺度,对不同储能装置不完全吻合其充放电特性,有必要增加超短(秒级)和超长(小时级)时间风电波动分布特性分

析,以利于风储耦合研究。

### 1.2.3 多时间尺度风电出力波动特性分析及统计

#### a. 单台风机与风电场输出功率对比分析。

图 2 为某 259.5 MW 风电场与其中某 1.5 MW 单台风电机组每 10 min 出力(标么值)对比图(为使图形清晰化,一年样本数据中只选择其中 144 个采样点)。从图中可以看出:由于风电场内各台风电机组排列方式、风速及尾流效应等因素的影响,在相同时间内,单台风电机组出力波动要比风电场出力波动大。风电场较单台风电机组输出功率波动具有“平滑效应”。因此建议大规模风机并网以风电场配置储能较宜。

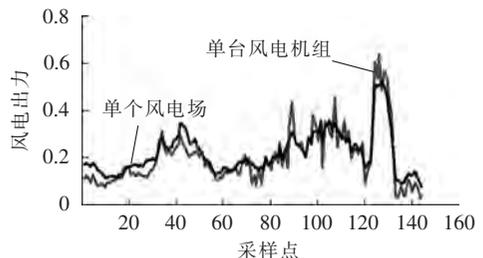


图 2 单台风机、单个风电场输出功率对比  
Fig.2 Comparison of power output between single wind turbine and whole wind farm

#### b. 多时间尺度风电功率变化率对比分析。

对上述同一算例系统中单台风电机组和风电场在每一时间段内实测输出功率数据进行统计分析,由于现场风电最小采集时间间隔为 3 s,国网规定限值是 1 min 和 10 min,目前已安装的大部分储能容量最大充放电时间为 4 h,因此涉及的时间尺度为 3 s、10 min、1 h、3 h。

在各时间尺度下,应用式(2)和(3)对单台风电机组和风电场功率波动幅度平均值和风电功率波动变化量标准差进行统计,表 3 为风电场统计结果。

表 3 各时间尺度波动幅值和标准差  
Table 3 Fluctuation amplitude and standard deviation for different time scales

时间尺度	$P_{avr}/kW$	$D/kW$	时间尺度	$P_{avr}/kW$	$D/kW$
3 s	0.0197	0.1686	1 h	0.0196	0.3722
10 min	0.0350	0.2441	3 h	0.0220	0.4118

由表 3 可知,不同时间尺度风电波动特征不同。

在各时间尺度下,应用式(1)和(4)对单台风电机组和风电场功率波动变化率分布概率进行统计,如图 3 和图 4 所示(图中风电出力变化率为标么值)。由图可知,风电出力变化率集中于 0 值附近,满足正态分布。

对单台风电机组和风电场输出功率变化率各个时间尺度在装机容量的 20% 内、[20%, 40%)、[40%, 90%) 范围分布概率累计和最大分布概率及风电出力

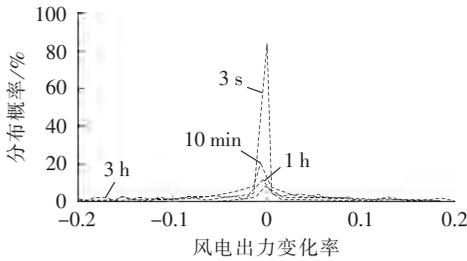


图 3 多时间尺度下单台风电机组出力变化率情况

Fig.3 Power output variation rate of single wind turbine for different time scales

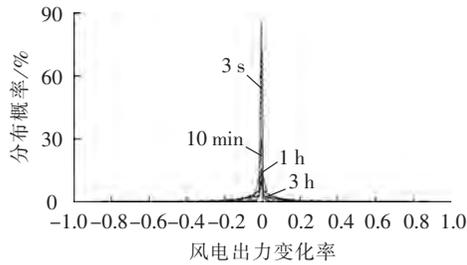


图 4 多时间尺度下单个风电场出力变化率情况  
Fig.4 Power output variation rate of whole wind farm for different time scales

波动最大波动量(标么值)进行统计,如表 4 和表 5 所示。由表可知,在短时间尺度内,风电出力变化率分布较集中。在长时间尺度,即小时级以上,风电出力变化率分布不集中。

表 4 各时间尺度输出功率变化率 [20%,40%)、[40%,90%) 概率统计

Table 4 Probability of power output variation rate within [20%,40%) and within [40%,90%) for different time scales

时间尺度	变化率在 [20%,40%) 概率/%		变化率在 [40%,90%) 概率/%	
	单台风机	单个风电场	单台风机	单个风电场
3 s	0	0	0	0
10 min	2.05	0.2	0.59	0.02
1 h	12.35	5.1	3.57	0.87
3 h	19.75	16.6	11.10	6.03

表 5 各时间尺度风电功率波动最大分布概率和最大波动量

Table 5 Maximum probability and fluctuation of wind power for different time scales

时间尺度	最大分布概率/%		最大波动量	
	单台风机	单个风电场	单台风机	单个风电场
3 s	82.2	85.0	0.1368	0.0932
10 min	20.2	29.8	0.9026	0.6199
1 h	11.7	15.8	0.9152	0.8501
3 h	8.2	9.6	0.9353	0.8950

由表 1 可知该风电场国网规定的 10 min 最大变化量不允许超过  $50/259.5=0.2$  即 20%,1 min 最大变化量不允许超过  $15/259.5=0.06$  即 6%,而图 4 和表 4 均表明各时间段风电场波动变化率主要分布在装机容量的 20% 内,变化率在 [20%,40%) 的概率虽然较 [40%,90%) 的概率稍高但都很小,因此确

定将变化率概率在 [20%,40%) 的波动量抑制到 20% 以内,虽然平抑效果不完美,但所配置的储能容量不需要很大。

## 2 基于模糊控制的风储耦合实时滚动平抑波动储能容量及控制策略

### 2.1 兼顾国网限值制定风储耦合实时滚动平抑波动目标

本文运用实时采样 5 点滚动平均算法制定能够跟随实际风电功率变化的平抑目标曲线,再兼顾国网限值修正平抑目标曲线达到风电功率变化率在 20% 规定范围内。计算公式如下。

a. 实时采样 5 点滚动平均算法求目标  $P_1(t)$ :

$$P_1(t) = \frac{1}{5} [P_{wind}(t-1) + P_{wind}(t-2) + P_{wind}(t-3) + P_{wind}(t-4) + P_{wind}(t-5)] \quad t \geq 6 \quad (5)$$

b. 国网限值修正得到最终平抑目标值  $P_{zt}(t)$ :

$$P_{zt}(t) = \begin{cases} P_1(t) & -\Delta P_v < P_1(t) - P_1(t-1) < \Delta P_v \\ P_1(t-1) - \Delta P_v & P_1(t) - P_1(t-1) < -\Delta P_v \\ P_1(t-1) + \Delta P_v & P_1(t) - P_1(t-1) > \Delta P_v \end{cases} \quad (6)$$

其中,  $\Delta P_v$  为国网限值。

以时间尺度 10 min(风电场)为例(下同),采用式(5)和式(6)对某风电场进行计算,如图 5 所示为平抑目标与风电实际功率(均为标么值,下同)曲线(为清晰起见,截取图中部分数据)。根据数据显示,平抑目标在一定程度上平滑了风电实际功率波动。

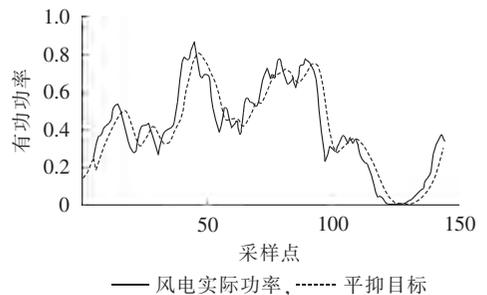


图 5 风电实际功率与平抑目标  
Fig.5 Actual wind power and smoothing target

### 2.2 考虑补偿度并跟踪目标构建储能容量及控制策略

#### 2.2.1 确定储能充放电控制策略

如图 6 所示,当风电实际功率大于平抑目标值时,能量流向储能;当实际功率小于平抑目标时,能量从储能流出;当风电实际功率等于平抑目标时,储能不动作。

#### 2.2.2 确定储能额定功率

由图 6 计算差值得到各点储能充放电功率值,但依据表 5 可知,最大波动量达到 0.8950 p.u.,储能功率配置偏大,经济性差,本文采用概率统计法对差

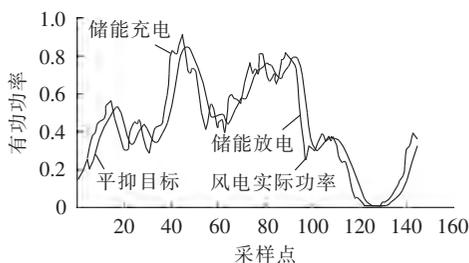


图 6 储能充放电控制策略示意图

Fig.6 Schematic diagram of energy storage charging/discharging control strategy

值功率进行概率统计,只需补偿[20%,40%)范围的波动,即确定一定补偿度后求取储能额定功率。

若储能容量选择风电场装机容量,折算标么值为 1,对图 6 进行储能充放电功率与充放电次数概率统计,如图 7 和图 8 所示(图中储能充放电功率为标么值)。结果表明:储能充放电功率大部分在风电场装机容量的 30% 以内,完全吻合了[20%,40%)范围。当补偿度为 0.9 时,储能充放电功率为 15%,即 38.92 MW。

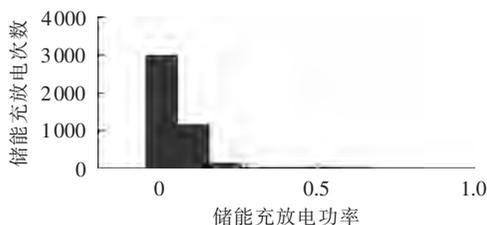


图 7 储能充放电概率分布

Fig.7 Probability distribution of energy storage charging/discharging

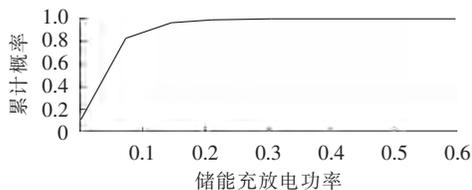


图 8 储能充放电功率累计概率

Fig.8 Cumulative probability of energy storage charging/discharging power

图 8 表明,如果接近全额补偿,储能充放电功率需要风电场装机容量的 30%。

### 2.2.3 确定储能额定容量

对图 6 进行风电实际功率与平抑目标所围成的各面积概率统计计算,如图 9 和图 10 所示(图中横轴均为标么值),储能充放电容量多数在风机装机容量的 30% 以内。若累计概率达到 90% 以上,储能额定容量为风机装机容量的 20%,即 51.9 MW·h。

### 2.3 采用模糊控制法优化 SOC 修正控制策略

由上述确定的储能额定容量与额定功率是建立在 100% 完全充放电基础上,势必造成储能过充过放,对储能造成损害。因此本文采用模糊控制法优

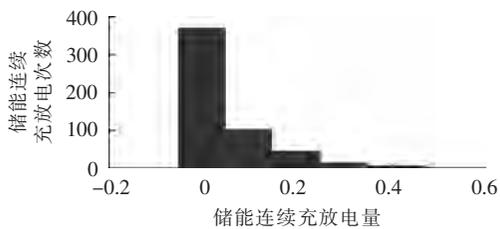


图 9 储能容量概率分布

Fig.9 Probability distribution of energy storage capacity

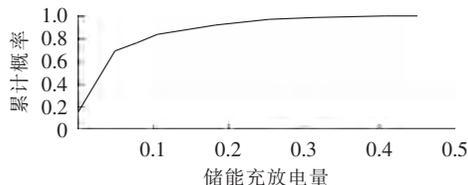


图 10 储能容量累计概率

Fig.10 Cumulative probability of energy storage capacity

化 SOC,进一步修正控制策略,避免储能过充过放,延长储能使用寿命。

模糊控制系统框图如图 11 所示。其中输入量为储能剩余 SOC 和储能装置充放电功率  $P_c$ ,输出为储能修正功率。隶属度和模糊规则如图 12 和表 6 所示。

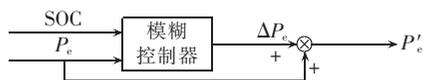


图 11 优化 SOC 控制策略图

Fig.11 Strategy of optimal SOC control

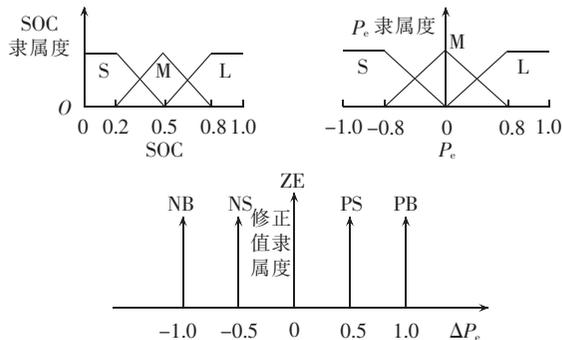


图 12 输入、输出隶属度函数

Fig.12 Input and output membership functions

表 6 模糊控制规则

Table 6 Fuzzy control rules

SOC	$P_c$		
	S	M	L
S	ZE	NS	NB
M	ZE	ZE	ZE
L	PB	PS	ZE

储能装置处于充电运行方式,  $P_c > 0$ :

$$SOC(t) = \frac{E_{original} + \int_0^t P_c(t) \eta_c dt}{E_N}$$

储能装置处于放电运行方式,  $P_c < 0$ :

$$SOC(t) = \frac{E_{\text{original}} + \int_0^t \frac{P_e(t)}{\eta_d} dt}{E_N}$$

其中,  $E_{\text{original}}$  为储能装置初始容量;  $P_e$  为储能装置充放电功率;  $\eta_c$  为充电效率;  $\eta_d$  为放电效率;  $E_N$  为额定容量。

采用中心法求得储能修正值, 得到修正后的储能功率为  $P'_e(t) = P_e(t) + \Delta P_e$ 。

当储能剩余电量不充足时, 适当减小储能放电功率, 避免储能过放, 反之亦然。

图 13 给出了有无模糊控制时剩余 SOC 变化情况。从图中可以看出, 加模糊控制策略后, 剩余 SOC 在 0.2~0.8 范围波动, 避免储能装置枯竭或者饱和, 在一定程度上延长使用寿命。

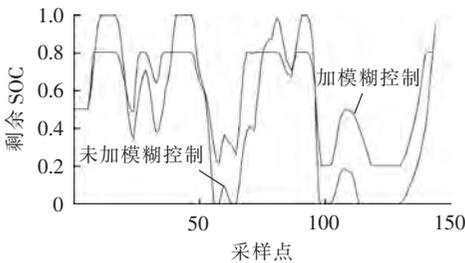


图 13 剩余荷电状态变化  
Fig.13 Variation of remaining SOC

### 2.4 储能平抑多时间尺度风电功率波动效果分析

风储耦合平抑多时间尺度风电波动方法总体流程如图 14 所示, 得到 10 min 风储合成出力 (标幺值) 总体效果如图 15 所示。

从图 15 中可以得出, 加装储能之后, 风电实际输出功率得到平抑, 有多数点跟踪上平抑目标, 部分采样点没有跟踪上平抑目标, 是因为补偿度选取 0.9 和 SOC 优化造成, 但误差不大, 总体效果良好。

考虑到秒级风电出力波动变化率多数在装机容量的 5% 以内, 只有个别风电出力变化率超出 5%, 满足国网 1min 限值 6% 的要求, 并且平抑秒级波动可通过风电机组桨距角和变频器进行控制。所以本文主要分析分钟级和小时级风电出力变化率所需储能功率与容量。

表 7 给出了储能装置 10 min、1 h、3 h 额定功率和额定容量配置, 表中单台风机 1.5 MW, 单个风电场 259.5 MW。

根据表 7 计算结果得出: 风电出力变化率在分钟级所需要的储能容量较小时级小。随着时间尺度增加, 平抑风电出力变化率所需储能容量增加。在平抑风电出力时, 考虑储能装置的响应时间和功率密度, 分钟级波动可采用功率型 (超级电容器) 或能量型 (铅酸蓄电池) 储能装置, 小时级波动只能采用能量型储能装置。

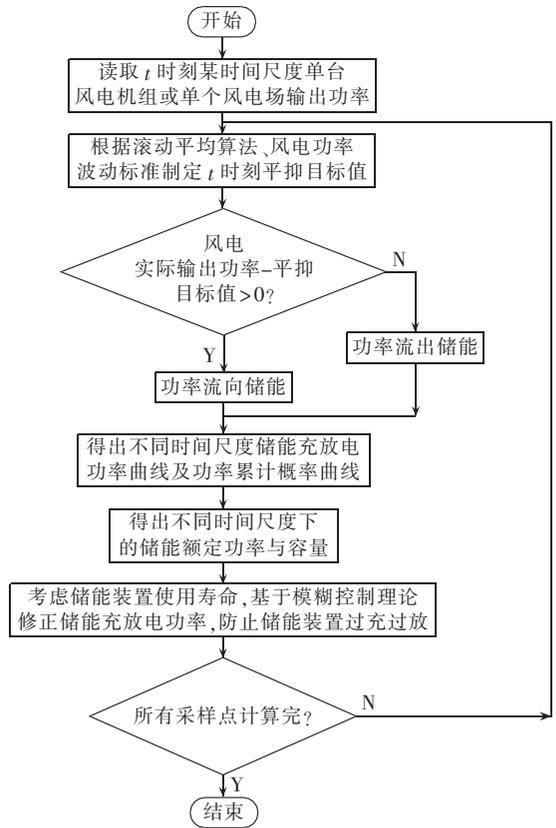


图 14 储能平抑风电输出功率变化率流程图  
Fig.14 Flowchart of wind power output variation restraint with energy storage

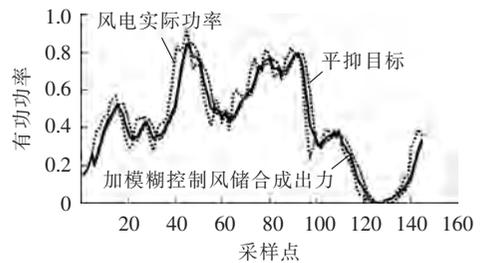


图 15 风储合成总体效果  
Fig.15 Overall effect of wind-storage coupling

表 7 不同时间尺度储能容量和功率配置  
Table 7 Configuration of energy storage capacity and power for different time scales

时间尺度	额定功率/MW		额定容量/(MW·h)	
	单台风机	单个风电场	单台风机	单个风电场
10 min	0.225	38.92	0.200	51.90
1 h	0.525	51.90	0.600	64.88
3 h	1.050	77.85	0.465	90.82

## 3 结论

本文基于风电出力长时间实测历史数据, 对于单台风电机组和风电场输出功率在不同时间尺度下的波动特性进行了量化分析对比, 制定了平抑多时间尺度风电波动的储能容量和控制策略, 所得主要结论如下。

a. 随着时间尺度的增加, 风电输出功率变化率增

加,主要分布在装机容量的 20% 以内。

**b.** 考虑平抑风电输出功率所需储能的成本,采用实时采样 5 点滚动法兼顾电网限值制定平抑目标,基于概率分布方法和引入补偿度确定储能额定功率及额定容量。研究表明,随着时间尺度的增加,储能额定容量和额定功率也增大,但不超过风电装机容量的 30%,经济性较好。

**c.** 通过模糊控制能够更好地优化储能充放电功率,使得储能装置避免枯竭或者饱和,延长储能使用寿命。

#### 参考文献:

- [1] POUL S, NICOLAOS A C. Power fluctuations from large wind farms[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2007, 22(3): 958-965.
- [2] 侯佑华, 房大中, 齐军. 大规模风电入网的有功功率波动特性分析及发电计划仿真[J]. 电网技术, 2010, 34(5): 60-66.  
HOU Youhua, FANG Dazhong, QI Jun. Analysis on active power fluctuation characteristics of large-scale grid-connected wind farm and generation scheduling simulation under different capacity power injected from wind farms into power grid[J]. Power System Technology, 2010, 34(5): 60-66.
- [3] 崔杨, 穆钢, 刘玉, 等. 风电功率波动的时空分布特性[J]. 电网技术, 2011, 35(2): 110-114.  
CUI Yang, MU Gang, LIU Yu, et al. Spatiotemporal distribution characteristic of wind power fluctuation[J]. Power System Technology, 2011, 35(2): 110-114.
- [4] 国家电网公司“电网新技术前景研究”项目咨询组. 大规模储能技术在电力系统中的应用前景分析[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 3-8.  
State Grid Corporation “Grid Technology Prospect Research” Project Consulting Group. The application prospects of large-scale energy storage technology in power system analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 3-8.
- [5] BARTON J, INFIELD D. Energy storage and its use with intermittent renewable energy[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2004, 19(2): 441-448.
- [6] 王虹富, 曹军, 邱家驹, 等. 一种用于分布式发电系统的有功功率补偿模型[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.
- [7] 丁明, 徐宁舟, 毕锐. 用于平抑可再生能源功率波动的储能电站的建模及评价[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(2): 66-72.  
DING Ming, XU Ningzhou, BI Rui. Modeling of BESS for smoothing renewable energy output fluctuation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(2): 66-72.
- [8] 李霄, 胡长生, 刘昌金. 基于超级电容储能的风电场功率调节系统建模与控制[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(9): 86-90.  
LI Xiao, HU Changsheng, LIU Changjin. Based on super capacitor energy storage power regulation system modeling and control of wind farms[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(9): 86-90.
- [9] 任天鸿, 晁勤, 王海亮, 等. 钒液流电池平滑风电场输出功率研究[J]. 低压电器, 2013(5): 38-43.  
REN Tianhong, CHAO Qin, WANG Hailiang, et al. Research of vanadium redox flow battery on smoothing output of wind farm[J]. Low Voltage Apparatus, 2013(5): 38-43.
- [10] 南晓强, 李群湛. 考虑风功率预测误差分布的储能功率与容量配置法[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(11): 117-122.  
NAN Xiaoliang, LI Qunzhan. Energy storage power and capacity allocation based on wind power forecasting error distribution[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(11): 117-122.
- [11] 蒋平, 熊华川. 混合储能系统平抑风力发电输出功率波动控制方法设计[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 122-126.  
JIANG Ping, XIONG Huachuan. Hybrid energy storage system smooth wind power output power fluctuation control method design[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 122-126.
- [12] 李文斌, 卢继平, 徐兵. 平抑风电场功率波动的储能容量选取方法[J]. 华东电力, 2012, 40(3): 39-43.  
LI Wenbin, LU Jiping, XU Bing. Selection of energy storage capacity to suppress the wind power fluctuation[J]. East China Electric Power, 2012, 40(3): 39-43.
- [13] 孔飞飞, 晁勤, 袁铁江, 等. 用于短期电网调度的风电场储能容量估算法[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(7): 21-24.  
KONG Feifei, CHAO Qin, YUAN Tiejia, et al. Estimation of wind farm energy storage capacity for short-time power dispatch[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(7): 21-24.
- [14] 张浩, 马爱军, 李文斌. 风电场日出力曲线和储能容量关系研究[J]. 中国电力, 2012, 45(6): 77-81.  
ZHANG Hao, MA Aijun, LI Wenbin. Wind farms study on the relationship between the force curve and energy storage capacity[J]. Electric Power, 2012, 45(6): 77-81.
- [15] 丁明, 林根德, 陈自年. 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.  
DING Ming, LIN Gende, CHEN Zinian. A control strategy for hybrid energy storage systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(7): 1-6.
- [16] 谢石晓, 杨莉, 李丽娜. 基于机会约束规划的混合储能优化配置方法[J]. 电网技术, 2012, 36(5): 79-84.  
XIE Shixiao, YANG Li, LI Lina. A chance constrained programming based optimal configuration method of hybrid energy storage system[J]. Power System Technology, 2012, 36(5): 79-84.

#### 作者简介:



刘春燕

刘春燕(1987—),女,山西临汾人,硕士研究生,研究方向为电力系统稳定与控制(E-mail: 794262601@qq.com);

晁勤(1959—),女,湖南宁乡人,教授,博士研究生导师,主要从事洁净能源并网技术等方面的研究工作(E-mail: cqtdx@163.com);

魏丽丽(1987—),女,河南商丘人,硕士研究生,研究方向为洁净能源与并网技术(E-mail: 464238026@qq.com)。

## Wind-storage coupling based on actual data and fuzzy control in multiple time scales for real-time rolling smoothing of fluctuation

LIU Chunyan, CHAO Qin, WEI Lili

(College of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China)

**Abstract:** The intermittence and randomness of wind power causes serious fluctuation of grid-connecting power, which harmfully impacts on the security and stability of power system. Based on the actual power outputs of a wind farm, the probabilistic method is applied to research the rules of wind power fluctuation and the characteristics of wind-storage coupling in multiple time scales. The real-time 5-point rolling method is adopted to set the target of wind power fluctuation smoothing for different time scales, which are modified according to the corresponding limits stipulated by State Grid and tracked periodically using the energy storage to rationally determine the energy storage capacity configuration and charging/discharging control strategy. The compensation degree is further adopted to economically modify the energy storage capacity. The charging/discharging control strategy is improved by optimizing the state of charge with the fuzzy control principle to avoid overcharge and overdischarge. Simulative results show the proposed method effective and feasible: when the energy storage capacity configuration is 15%, more than 90% of the wind-storage power output can track the smoothing target of 10 min wind power fluctuation.

**Key words:** multiple time scales; wind-storage coupling; probability and statistic; control; wind power; energy storage

(上接第 34 页 continued from page 34)

## Joint secure & economic dispatch considering wind power, pumped storage and demand response

LI Dan, LIU Junyong, LIU Youbo, GAO Hongjun

(School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** Aiming at the reverse peak-shaving and uncertainty of wind power, a joint secure & economic dispatch model considering the wind power, pumped storage, demand response and thermal power is proposed to make use of the advantages of pumped storage and demand response. A bidimensional ladder overlapping cost function is designed according to the time and power attributes of load transfer and a comprehensive demand-response cost model including the interruptible load capacity and power cost is formed. A comprehensive assessment system of dispatch cost is constructed based on the predicted and random scenarios, which considers the constraints of pumped storage power station and system security. Simulation is carried out for a 10-bus system and the simulative results show that, based on the proposed model, the system operational cost is decreased, the investment delayed, the wind curtailment reduced and the system operational economy enhanced.

**Key words:** wind power; pumped storage; demand response; two-dimensional overlapping; multi-scenario; secure and economic dispatch; models