

# 基于多时间尺度风储协同的微电网能量管理策略研究

文凌锋<sup>1</sup>, 党广宇<sup>1</sup>, 田伟<sup>2</sup>, 刘振东<sup>1</sup>, 郑毅<sup>1</sup>, 黄志斌<sup>1</sup>

(1. 广西电网有限责任公司贵港供电局, 广西 贵港 537000;

2. 南京四方亿能电力自动化有限公司, 江苏 南京 211111)

**摘要:**文中在研究国内外储能系统配合间歇式能源协调控制策略的基础上,从分钟级与毫秒级两个时间尺度对微电网能量进行协调控制,提出了储能系统的瞬时的波动平滑输出控制策略与长时间的计划输出控制策略,通过仿真搭建了包含风机系统、电池储能系统的仿真算例,验证了电池储能系统的平滑输出控制策略和储能系统的计划输出控制策略的可行性。

**关键词:**微电网架构;能量管理系统;联络线控制;微电网中央控制器;多时间尺度

**中图分类号:**TM73

**文献标志码:**A

**文章编号:**2096-3203(2018)03-0123-06

## 0 引言

微电网能量管理系统的主要任务是在满足网内负荷需求及电能质量的前提下,对微网内部各分布式电源、储能设备及不同类型负荷进行合理调度,保证微网经济、安全、稳定地运行<sup>[1-6]</sup>。但由于风能等新能源受天气和气候的影响,输出功率具有不稳定性及间歇性,对微电网产生明显的冲击,轻则电能质量恶化,造成频率和电压不稳定,重则会引发微电网停电的恶性事故。为解决这一难题,需研究储能与风力等间歇式能源的协同控制方法。

储能装置可以有效地抑制间歇式能源的波动,平滑其输出功率,稳定输出电压,提高电能质量,是保证间歇式能源并网运行的关键<sup>[7]</sup>。但储能系统配合间歇式能源的策略在实际应用中存在如下问题:首先,储能系统配合间歇式能源的计划输出要求的储能系统具有较大的容量、较宽的输出功率范围,如果储能系统的发电计划制定的不合理,储能系统将处于频繁的充放电转换之中,这将大大缩短电池储能系统的使用寿命。其次,风力发电的预测误差也将影响储能系统发电计划的制定。如果风力的输出功率预测误差较大,整个系统发电计划的误差和储能系统实际输出值都将增大,容易导致输出功率达到储能系统的输出限值,影响最终的控制效果<sup>[8-10]</sup>。最后对于风速变化引起的风力出力快速波动引起微电网功率缺额,要求系统具备储能快速平抑可再生能源瞬时功率波动的能力,否则系统可能由于功率和频率异常引起微电网垮网。

因此,如何在考虑以上影响因素的前提下,合理地制定储能系统与风力发电的协调控制是研究

的一个重点。

本文基于新能源发电和负荷的短期功率预测技术,优化微电网内储能设备的充放电曲线以及需求侧管理负荷的运行状态。在日前调度计划的基础上,综合考虑风储微电网风力发电曲线和储能容量配置较小等实际情况下,提出一种多时间尺度的分层协调控制策略<sup>[11-16]</sup>。首先根据每时段风速预测信息给出了联络线分时交换功率的计算方法,上层能量管理系统将该联络线交换功率参考值与上级主动配电网调度中心通信,接收调度中心制定的分时联络线交换功率。能量管理系统依据此分时功率需求实现底层分布式电源控制器的管理和微电网中央控制器对储能系统的分时功率曲线下发。该能量管理系统层策略保证了风储微电网按照联络线交换功率需求输出,即联络线功率分时恒定,时间相应是分钟级( $\geq 5$  min)。同时采用快速面向通用对象的变电站事件(generic object oriented substation event, GOOSE)通信机制的三层微电网体系架构,保证系统运行的稳定性。

## 1 自动化系统架构

微电网以并网与孤网两种方式运行,系统中含有大量不稳定的分布式电源,同时系统缺乏大电网的支撑,系统的高效、可靠运行控制难度较高。与传统的变电站监控相比,微电网监控系统除了常规的监视和控制外,其架构需要考虑整个微电网的稳定性与经济性。

在控制方面,微电网内风机等分布式电源出力具有随机性和波动性,而且使用大量电力电子装置的逆变电源不具有大电网的电源自同步性和惯性,微电网中负荷波动对系统电压频率影响更大、变化

更快,而大电网中负荷波动相对冲击小。因此整个微电网监控系统架构需要考虑到微电网的快速稳定控制。

在监视方面,系统信息量大。由于微电网中使用储能,储能管理单元(battery management systems, BMS)需大量上传电池信息如单体电池电压、端电压、充放电电流、荷电状态(state of charge, SOC)、模块箱温度、蓄电池相关充放电控制参数、告警信息等必要信息至监控系统。根据目前项目实施结果来看,BMS 通信信息量大,有庞大的信息点进入监控数据库处理。因此微电网自动化与保护系统架构设计既需要处理大容量的信息接入,又要保证紧急情况控制和保护的快速性。传统变电站就地层与站控层的两层架构模式显然无法满足上述要求。

本文采用监视网和控制网分离的电网三层两网的自动化系统架构,如图 1 所示。整个系统架构基于 IEC 61850 的通信体系,三层是指:优化控制与监视层,协调控制与保护层和就地控制与保护层。两网是指:监视采用 MMS 网,中央控制采用 GOOSE 网。两者分开组网,既保证控制信息的快速性又保证监视信息的全面性。61850 MMS 制造报文系统和 GOOSE 报文通信是基于 61850 数字化变电站的通信基础。MMS 是一种应用层协议。实现了出自不同制造商的设备之间的互操作性,使系统集成变得简单、方便。GOOSE 是 IEC 61850 标准定义的一种通用的以对象为中心的变电站事件抽象模型,提供(如命令、告警等)快速传输的机制,可用于跳闸和故障录波启动等。在智能电站中 MMS 用于监控网络,GOOSE 是一种实时应用,用于传送间隔闭锁信号和实时跳闸信号。

## 2 分钟级的调度计划曲线响应策略

调度中心根据依据市场信息、风功率预测功率以及储能的运行约束等下发本微电网对电网联络线的交换功率曲线,如图 2 所示。

微电网能量管理系统中存储了包括各种风力出力、负荷功率、气象资料在内的历史数据以及来自互联网的气象数据,进行风电出力预测和负荷预测,以最小化偏离调度系统功率指令为目标,保证微电网的可控性:

$$\min P_{\text{deviation}} = \sqrt{\left(P_{\text{iaverage}} T - \int_{t_0}^{t_0+T} P_i dt\right)^2} \quad (1)$$

式中:  $P_{\text{deviation}}$  为调度系统下发的有功功率与实际有功功率的偏差值;  $P_{\text{iaverage}}$  为调度系统下发的时间尺度  $T$  的微电网与电网交换有功功率平均值;  $P_i$  为电网实时交换的有功功率值。

为了使联络线功率能稳定在设定值附近,该策略需要读取联络线的实时功率和储能的充放电功率,通过计算联络线实时功率与设定值的差值  $\Delta P_{\text{bat}}$ ,得出储能应当修正的功率大小,计算方法如图 3 所示。图 3 中的  $P_{\text{line}}$  为联络线的实时功率;  $P_{\text{ref}}$  为联络线功率的设定值;  $P_{\text{bat\_now}}$  为储能的实时充放电功率;  $P_{\text{bat\_new}}$  为储能的期望充放电功率;  $\Delta P_{\text{bat}}$  为储能的当前功率与期望功率之差。

能量管理系统根据调度计划安排,结合风电场的发电预测结果,制定合理的总输出功率目标曲线,通过储能系统的充、放电功率的实时调整以及充放电状态的迅速切换,使“风电系统+储能系统”的总功率输出符合计划安排。控制效果如图 4 所示。

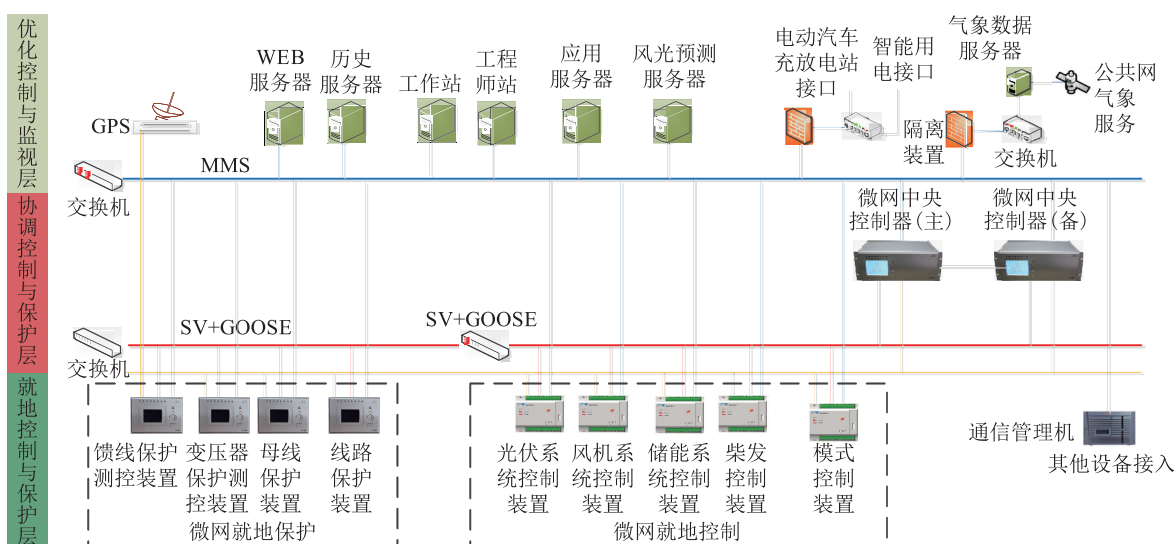


图 1 微电网自动化系统结构

Fig.1 Micro-grid automation architecture

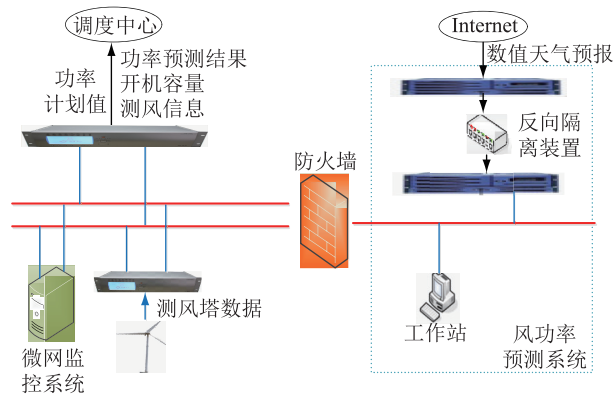


图2 响应调度计划的联络线功率控制  
Fig.2 Power dispatching diagram

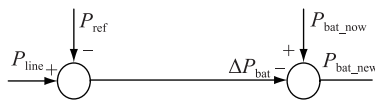


图3 调度计划曲线响应策略控制逻辑  
Fig.3 Power dispatching logic

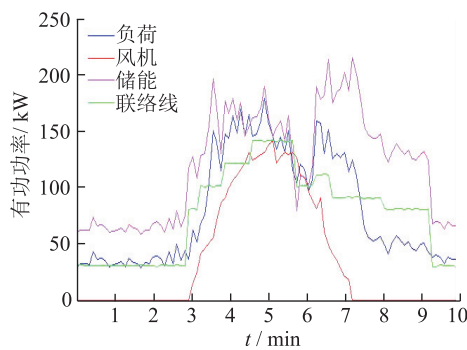


图4 风储配合的联络线输出效果  
Fig.4 Wind bess tie-line output

### 3 毫秒级的间歇式能源平滑策略

由于风力发电新能源具有随机性、间歇性、出力变化快的特点,新能源并网运行会对微电网运行与控制带来较大的影响,当新能源的总容量达到一定比例后甚至会给微电网带来稳定问题。大容量的电池储能系统的引入,可以有效平抑间歇式能源输出功率的波动性,减少对电网的冲击,并为新能源的高效利用带来显著的效益。

从控制效果上看,可认为是用时间窗口为  $\Delta T$  的低通滤波器对风力发电的输出功率进行滤波,其某一时刻滤波输出值应等于  $\Delta T$  时间段内的输出功率平均值,并以该平均值作为总输出功率目标值。储能系统“滤波”作用所具备的时间窗  $\Delta T$  越长,滤波后的曲线越平滑,但是每次计算出的需要储能放出或吸收的功率越大,所需的储能容量也越大。

滤除功率波动中的高频分量可以使用一阶巴

特沃兹低通滤波器,如式(2)所示:

$$H(s) = \frac{y}{x} = \frac{1}{Ts + 1} \quad (2)$$

式中:  $T$  为滤波时间常数。

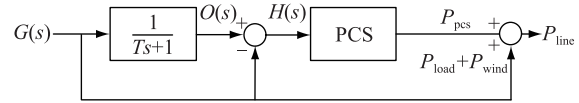


图5 平滑滤波控制逻辑

Fig.5 Smoothed control logic

考虑到风力发电和负荷都会造成联络线功率的突变,因此滤波对象应是风力发电和负荷功率的代数和,即净负荷。

图5中的输入功率信号  $G(s)$  是净负荷,通过式(4)描述的一阶滤波器得到滤波后的目标信号  $O(s)$ ,该目标信号是风力、负荷和储能三者功率之和(即联络线处的功率),其中,储能的作用是减小风力或者负荷功率突变造成的联络线功率波动的大小,如图6所示,  $\Delta T$  为  $O(s)$  中的储能功率分量。

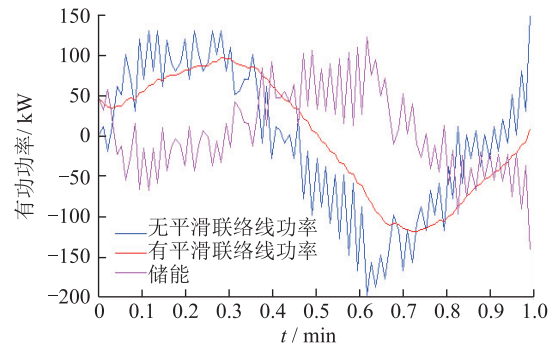


图6 储能系统配合间歇式能源平滑输出控制效果

Fig.6 Smoothed power control

目标信号  $O(s)$  减去净负荷  $G(s)$  得到储能输出功率的参考指令  $H(s)$ ,若  $H(s)$  为正,则表示储能要发出功率;若  $H(s)$  为负,则表示储能要吸收功率。这几个输出量的关系如式(3)、式(4):

$$O(s) = \frac{1}{1 + sT} G(s) \quad (3)$$

$$H(s) = \frac{1}{1 + sT} G(s) - G(s) = \frac{-sT}{1 + sT} G(s) \quad (4)$$

储能按照指令输出功率为,与净负荷之和即为联络线功率大小,用式(5)表示:

$$P_{\text{pcs}} + P_{\text{wind}} + P_{\text{load}} = P_{\text{line}} \quad (5)$$

由于储能的滤波作用,联络线功率波动相比较净负荷的波动来说,要平滑很多。

对于式(5)所示的方程,求解方法如下:

(1)  $x$  为输入信号  $G(s)$ ,  $y$  为输出信号  $O(s)$ ,  $s$  用  $\frac{dy}{dt}$  来表示,得到其微分方程。

$$x = T \frac{dy}{dt} + y \quad (6)$$

(2) 方程式右边的  $y$  用其前一时刻的值  $y'$  来代替, 并对其进行差分化即  $dy = y - y'$ ,  $dt = Ts$ ,  $Ts$  为迭代步长, 即仿真中相邻的时间间隔, 因此可得到:

$$y = \frac{Ts}{T}(x - y') + y' \quad (7)$$

(3) 输出信号  $O(s)$  为风力、负荷和储能的三者功率之和, 即联络线功率, 因此取  $y'$  为前一时间点的联络线功率, 取  $x$  为当前的净负荷大小, 得出的  $y$  为联络线功率期望, 减去净负荷即为储能功率期望。

平滑控制针对间歇式可再生能源输出功率的短期波动, 要求控制速度达到毫秒级要求 ( $\leq 100$  ms)。本文第 1 章提出的自动化系统架构中协调控制层的微电网中央控制器直采联络线的功率, 通过 GOOSE 与储能变流器做快速的功率控制交互, GOOSE 指令的通信延时低于 5 ms, 满足系统平滑的快速性要求。

## 4 实例分析

### 4.1 联络线计划输出试验

为了验证提出微电网自动化系统架构以及控制策略的可行性, 采用某实际微网系统, 如图 7 所示。1 套 50 kW 的风力发电系统, 1 套 30 kW 的储能系统, 1 套 50 kW 的模拟负载系统, 系统母线为 400 V 交流工频电压。

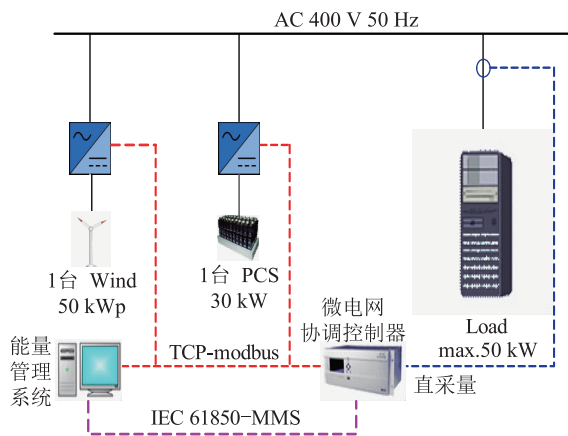


图 7 某微电网系统  
Fig.7 Micro-grid project

能量管理系统以风力发电预测为参考值, 作为下一小时发电计划或进行小时级调度的目标值。根据发电计划或调度, 对可再生能源的输出功率波动、指定时段内调度或发电计划目标值改变时的变化率, 结合储能 SOC、充放电功率、运行寿命限制以及 PCS (power convert system, PCS) 功率上下限限

制, 最后给出储能系统最佳的充放电功率指令。风储协调控制联络线目标输出功率, 如图 8 所示。

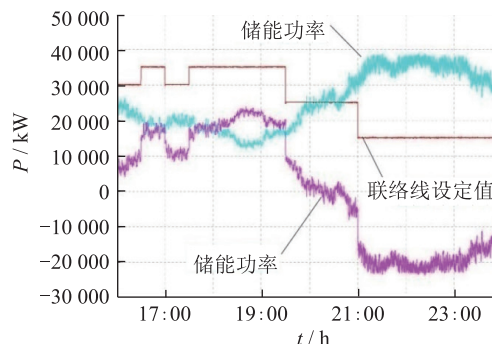


图 8 联络线计划输出目标曲线  
Fig.8 Tie-lie output curve

### 4.2 储能快速平滑风电输出波动仿真试验

1 MW 风力发电系统, 500 kW 储能系统, 采用 PSCAD 仿真。仿真系统结构如图 9 所示。仿真系统由恒频恒速风电模块、储能系统模块和大系统模块组成。其中恒频恒速风电模块又分为风速计算模块、桨距角控制模块, 风力机模块和感应电机模块组成; 储能系统模块由电池模块 DC/DC 变换器模块, DC/AC 变换器模块和 LCL 滤波器模块组成; 大系统模块由无穷大电源与系统等值电感组成。

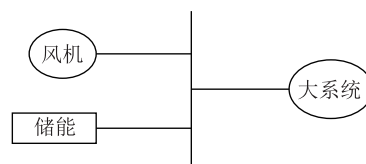


图 9 储能系统平滑功率控制仿真结构

Fig.9 Wind bess control simulated control diagram

仿真一: 滤波时间常数为 100 时, 系统的仿真结果如图 10。

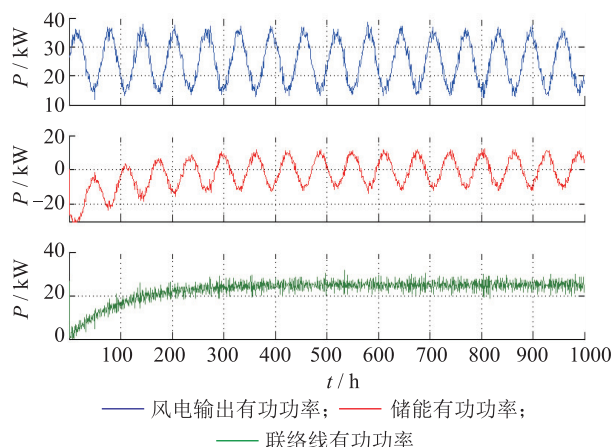


图 10  $T_{bat1} = 100$  时储能平滑风电输出波动仿真

Fig.10 Smooth control power curves when  $T_{bat1} = 100$

仿真二: 滤波时间常数为 20 时, 系统的仿真结

果如图 11。

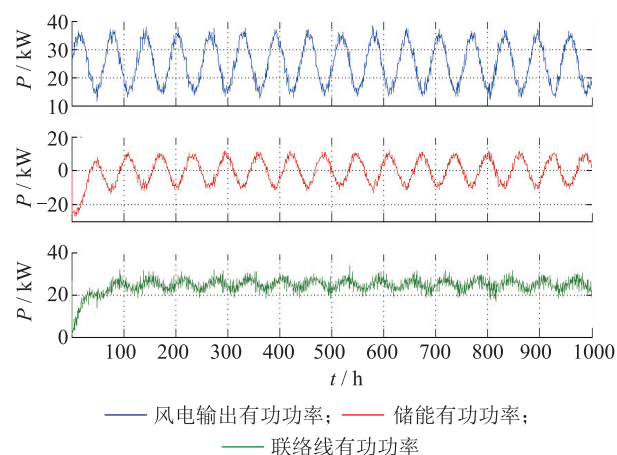


图 11  $T_{bat_2} = 20$  时,储能平滑风电输出波动仿真

Fig.11 Smooth control power curves when  $T_{bat_2} = 20$

仿真过程:0 s 时仿真开始,风力发电机采用转速控制,转速初始值为发电机额定运行时的转速值;0.01 s 时,储能系统直流母线预充电结束,直流母线电压为 750 V;1 s 时,风力发电机转为转矩控制;2 s 时,储能系统开始滤波控制;5 s 时,风力机投入桨距角控制。

由仿真可以看出,基于储能平滑快速分布式电源波动策略时,选取的滤波时间常数越大,滤波后的输出所含高频分量越少,输出越平滑,滤波效果越好;滤波时间常数越小,滤波效果越差。

## 5 结语

本文从自动化系统架构、储能系统配合间歇式能源协调控制策略的基础上,提出了储能系统的平滑输出控制策略与计划输出控制策略,通过搭建了包含风力发电系统、电池储能系统的仿真算例,验证了电池储能系统的平滑输出控制策略、储能系统的计划输出控制策略。本文提出的微网系统架构与控制方案,为微电网的协调控制提供了重要的研究和应用参考,具有较高的应用推广意义。

### 参考文献:

[1] 王成山,李鹏.分布式发电、微网与智能配电网的发展与挑战[J].电力系统自动化,2010,34(2):10-14,23.  
WANG Chengshan, LI Peng. Development and challenges of distributed generation, the micro-grid and smart distribution system[J]. Automation of Electrical Power System, 2010, 34(2):10-14.

[2] 王成山,武震,李鹏.微电网关键技术研究[J].电工技术学报,2014,29(2):1-12.  
WANG Chengshan, WU Zhen, LI Peng. Research on key technologies of micro-grid[J]. Transactions of China Electro-technical Society, 2014, 29(2): 1-12.

[3] 张建华,苏玲,陈勇,等.微网的能量管理及其控制策略[J].电网技术,2011,35(7):24-28.  
ZHANG Jianhua, SU Ling, CHEN Yong, et al. Energy management of micro-grid and its control strategy[J]. Power System Technology, 2011, 35(7):24-28.

[4] 郭思琪,袁越,张新松,等.多时间尺度协调控制的独立微网能量管理策略[J].电工技术学报,2014,29(2):122-129.  
GUO Siqi, YUAN Yue, ZHANG Xinsong, et al. Energy management strategy of isolated micro-grid based on multi-time scale coordinated control[J]. Transactions of China Electro-technical Society, 2014, 29(2):122-129.

[5] 魏博渊,向红吉,陈维荣,等.微网的主动网间重组及联合运行[J].电力系统自动化,2015,15(30):30-33.  
WEI Boyuan, XIANG Hongji, CHEN Weirong, et al. Active re-combinant and combined operation of micro grids[J]. Automation of Electrical Power System, 2015, 15(30):30-33.

[6] 雷金勇,谢俊,甘德强.分布式发电供能系统能量优化及节能减排效益分析[J].电力系统自动化 2009, 33(23):29-36.  
LEI Jinyong, XIE Jun, GAN Deqiang. Optimization of distributed energy system and benefit analysis of energy saving and emission reduction[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(23):29-36.

[7] 王冉,王丹,贾宏杰,等.一种平抑微网联络线功率波动的电池及虚拟储能协调控制策略[J].中国电机工程学报,2015,35(20):5124-5134.  
WANG Ran, WANG Dan, JIA Hongjie, et al. Coordinated control strategy of battery and virtual energy storage to smooth micro-grid tie-line power fluctuations[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(20):5124-5134.

[8] 许晓慧,苏义荣,施勇,等.并网运行模式下微电网能量优化调度算法研究[J].电网与清洁能源,2016,32(08):117-122,128.  
XU Xiaohui, SU Yirong, SHI Yong, et al. Real-time energy optimization management algorithm of micro-grid in the grid-connected mode[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(08):117-122,128.

[9] 李少林,姚国兴.风光互补发电蓄电池超级电容器混合储能研究[J].电力电子技术,2010,44(2):12-14.  
LI Shaolin, YAO Guoxing. Research on super capacitor battery energy storage in wind/solar power system[J]. Power Electronics, 2010, 44(2):12-14.

[10] 李国杰,唐志伟,聂宏展,等.钒液流储能电池建模及其平抑风电波动研究[J].电力系统保护与控制,2010,38(22):115-119.  
LI Guojie, TANG Zhiwei, NIE Hongzhan, et al. Modeling and controlling of vanadium redox flow battery to smooth wind Power fluctuations[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(22):115-119.

[11] 樊玮,周楠,刘念,等.基于需求响应的用户侧微电网多目标优化运行方法[J].电网与清洁能源,2016,32(4):17-23.

- FAN Wei, ZHOU Nan, LIU Nian, et al. Multi-objective optimal operation method for micro-grids on the user side based on demand response[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(4):17-23.
- [12] 雷 博. 电池储能参与电力系统调频研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2014.
- LEI Bo. Research on application of battery energy storage system in power system frequency regulation[D]. Changsha: Hunan University, 2014.
- [13] 柳 伟. 孤立微电网分布式协同频率控制[D]. 南京: 东南大学, 2015.
- LIU Wei. Distributed cooperative frequency control for islanded micro-grid[D]. Nanjing: Southeast University, 2015.
- [14] 李碧辉, 汤 涌, 申 洪, 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, 2010, 35(4):121-128.
- LI Bihui, TANG Yong, SHEN Hong, et al. Impacts of energy storage capacity configuration of HPWS to active power characteristics and its relevant indices [ J ]. Power System Technology, 2010, 35(4):121-128.
- [15] 王 栋, 方志辉. 海岛风电并网运行特性对电网适应性的分析[J]. 浙江电力, 2016, 35(5):42-46.
- WANG Dong, FANG Zhihui. Analysis on operation characteristic adaptability of integrated island wind power to power grid[J]. Zhejiang Electric Power, 2016, 35(5):42-46.
- [16] 徐 俊, 欧阳丽, 周 春. 多智能用户微电网的分层分时能量管理[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(10):21-26, 33.
- XU Jun, OUYANG Li, ZHOU Chun, et al. Multi-time scale energy management for micro-grid system with smart users[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(10):21-26, 33.

作者简介:



文凌锋

文凌锋(1985—),男,本科,工程师,从事微电网运行与控制相关工作(E-mail: wen\_lf.ggg@gx.csg.cn);

党广宇(1977—),男,本科,工程师,从事微电网运行与控制相关工作(E-mail: dang\_gy.ggg@gx.csg.cn);

田 伟(1989—),男,本科,工程师,研究方向为微电网运行与控制(E-mail: tianwei@sf-auto.com)。

### Research on Micro-grid Energy Management System Based on Multi-time Scale

WEN Lingfeng<sup>1</sup>, DANG Guangyu<sup>1</sup>, TIAN Wei<sup>2</sup>, LIU Zhendong<sup>1</sup>, ZHEN Yi<sup>1</sup>, HUANG Zhibin<sup>1</sup>

(1. Guangxi Power Grid Co., Ltd. Guigang Power Supply Bureau, Guigang 537000, China;

2. Nanjing SiFang Epower Automation Co., Ltd., Nanjing 211111, China)

**Abstract:** Based on the research of energy storage system cooperation with intermittent energy coordination control strategy at home and abroad, from the minute and millisecond two time scales, this paper proposed a smooth output control strategy and a planned output control strategy. The simulation system includes wind power generation system and battery energy storage system and it verifies the smooth output control strategy and the planned output control strategy of the energy storage system.

**Key words:** micro-grid architecture; energy management system; tie-line control; micro-grid center controller; multi-time scale

(编辑 钱 悦)