

Research on Auxiliary Secondary Frequency Regulation of Power Grid Using Photovoltaic-Battery System

Haodong Fan, Zhaoxia Xiao

Tianjin Key Laboratory of Advanced Electrical Engineering and Energy Technology, Tianjin Polytechnic University, Tianjin
Email: 1475758613@qq.com

Received: Mar. 2nd, 2018; accepted: Mar. 19th, 2018; published: Mar. 26th, 2018

Abstract

A novel control strategy was proposed to participate in auxiliary second frequency regulation of the power grid by using the multi-functional Photovoltaic (PV)-battery system. The scheme can make the intermittent, fluctuating and non-dispatched PV to participate in grid security and stability operation as “good citizens” actively based on the fast and flexible controllability of grid-connected inverter. That can enhance grid absorbability to PV power generation and the value of PV power generation. When the grid frequency is abnormal, multiple operation modes of the PV-battery generation systems participating in the auxiliary second frequency regulation were analyzed and a hierarchical control strategy was presented considering the rated capacity of grid-connected inverter, solar radiation conditions, battery charge and discharge status, etc.

Keywords

Distributed Generation, Multi-Functional PV-Battery, Auxiliary Secondary Frequency Regulation, Hierarchical Control, Mode Switch

光伏 - 蓄电池系统参与电网二次辅助调频研究

范浩东, 肖朝霞

天津工业大学电工电能新技术天津市重点实验室, 天津
Email: 1475758613@qq.com

收稿日期: 2018年3月2日; 录用日期: 2018年3月19日; 发布日期: 2018年3月26日

摘要

本文提出了一种利用多功能光伏-蓄电池发电系统参与电网二次辅助调频的新方案。该方案利用并网逆变器快速灵活的可控性,将光伏发电由间歇波动的不可调度电源转变为主动参与电网安全稳定运行的“好公民”,不仅有助于增强电网对分布式光伏的消纳能力,更能改善电网的电能质量。当电网频率异常时,综合考虑并网逆变器的额定容量、光照条件、蓄电池充放电状态等实际情况,分析光伏-蓄电池发电系统参与电网二次辅助调频的多种运行模式,提出了一种分层控制策略。

关键词

分布式发电, 多功能光伏-蓄电池, 二次辅助调频, 分层控制, 模式切换

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

大量间歇性高渗透率可再生分布式电源并网发电对电网的调度能力、调频调峰能力和能源消纳能力提出了新的挑战[1] [2] [3] [4]。分布式发电作为电网成员之一将可能参与大电网的安全稳定运行,因此分布式发电本身也朝着智能可调度、功能多元化发展。多功能光伏-蓄电池系统是指光伏发电系统正常发电的同时根据不同运行工况下电网和用户的需求提供 UPS、削峰填谷、谐波抑制、无功补偿、电网电压及频率支持等功能[5]。多功能光伏-蓄电池发电系统的提出可有效减少光伏发电成本的同时提高了分布式发电对电网友好性和参与电网安全稳定运行的能力。本文研究多功能光伏-蓄电池组合发电系统参与电网二次辅助调频,实现未来高渗透率分布式光伏对参与电网频率支持的调节的功能。电网频率作为电能质量三大指标之一,它反映了互联系统间及区域系统内发电有功功率和负荷之间的平衡关系[6] [7] [8] [9] [10]。目前相关研究大多针对蓄电池或电动汽车储能(V2G)参与电网调频调峰[11] [12],光伏-蓄电池发电系统参与电网频率调节的研究处于起步阶段刚刚开始[1]。文献[2] [9]指出蓄电池参与电网调频可在 1 s 内完成,同时可实现瞬间双向能量流动精确控制,其响应速度可达火电调频的 60 倍,调频效率为火电机组的数倍。目前相关研究大多针对蓄电池储能或基于电动汽车储能(V2G)参与电网调频调峰[11] [12],同时文献[13]实现了将风电与储能有机配合并参与电网调度以解决风电消纳和供电可靠性;而文献[14]提出利用飞轮储能的充放电实现了风力发电的平滑接入并参与电网频率调节,但飞轮储能自身具有的一定滞后其与风力发电联合控制具有一定技术难度。文献[15]提出了一种光伏-蓄电池参与电网频率、电压支撑的控制方法概念,并制定了蓄电池调频曲线,并分析了逆变器容量最大化利用,但该实现方法工况较为复杂没有考虑光照变化引起的光伏输出功率变化与蓄电池充放电之间的配合。文献[16] [17]实现了微网孤岛运行模式下利用储能与分布式电源频率的协调控制,对光伏-储能蓄电池结合组合发电系统参与电网调频有一定借鉴作用。本文拟利用光伏-蓄电池发电系统承担电网二次辅助调频的任务,当系统频率超过规定范围,基于光伏-蓄电池发电系统在尽可能保证光伏最大功率输出的前提下,根据 AGC 调度指令迅速改变其有功功率输出辅助主二次调频厂实现快速频率快速恢复,以缩小一次调频与二次调频配合的时累计时间误差,实现对 AGC 调度指令的快速精确跟踪。

2. 系统结构

光伏-蓄电池系统参与大电网二次辅助调频的拓扑结构图如图 1 所示, 硬件连接图如图 2 所示。此系统主要由光伏阵列、蓄电池、双向 DC/DC 变流器、并网逆变器、模拟电网、上层控制中心等组成。上层控制由 dSPACE1103 控制, 在 dSPACE1103 中可以很好协调控制逆变器、变流器、蓄电池、光伏各个模块, 让它们能够在不同情形、不同时间段内相互配合, 在尽可能保证光伏处在最大功率发电状态的前提下使光伏-蓄电池系统能够参与电网的调频。dSPACE 的 Control desk 中具有相应的虚拟表盘和相应的控制模块可以实现系统数据的检测和各个状态之间的转换。图中模拟电网采用的是一个下垂控制逆变器的模型, 其原理是模拟同步发电机的“功频静特性”, 当系统中有功负荷变化时, 系统频率会按照有功/频率下垂系数进行相应改变。

当电网频率因为有功功率缺额导致电网频率下降过低时, 并网逆变器会根据光伏-蓄电池输出能力和逆变器容量计算不同的 P_{ref} 向电网输送相应的有功功率, 为电网提供有功-频率支撑; 当电网频率过高时, 并网逆变器可以工作在整流状态, 在蓄电池 SOC 的合理范围内由电网向蓄电池充电, 从而使电网频率回归到合理的范围内, 可以起到为电网削峰填谷作用; 当电网频率正常时, 光伏蓄电池系统不参与电网的调频, 将光伏所发的电尽可能的送向电网。电池的充放电系统是一个双向的 Boost/Buck 变流器, 可以很好的实现对蓄电池的充放电控制从而保证蓄电池与参与电网调频的逆变器相互配合, 完成多种模式下的转换。

3. 调频原理

本章利用蓄电池和逆变器快速响应的特性参与区域电网的二次辅助调频任务。当电网频率波动异常时, 光伏-蓄电池中心控制器能迅速的检测到频率的异常, 经过内部计算发出相应的指令, 辅助电网的频率恢复。

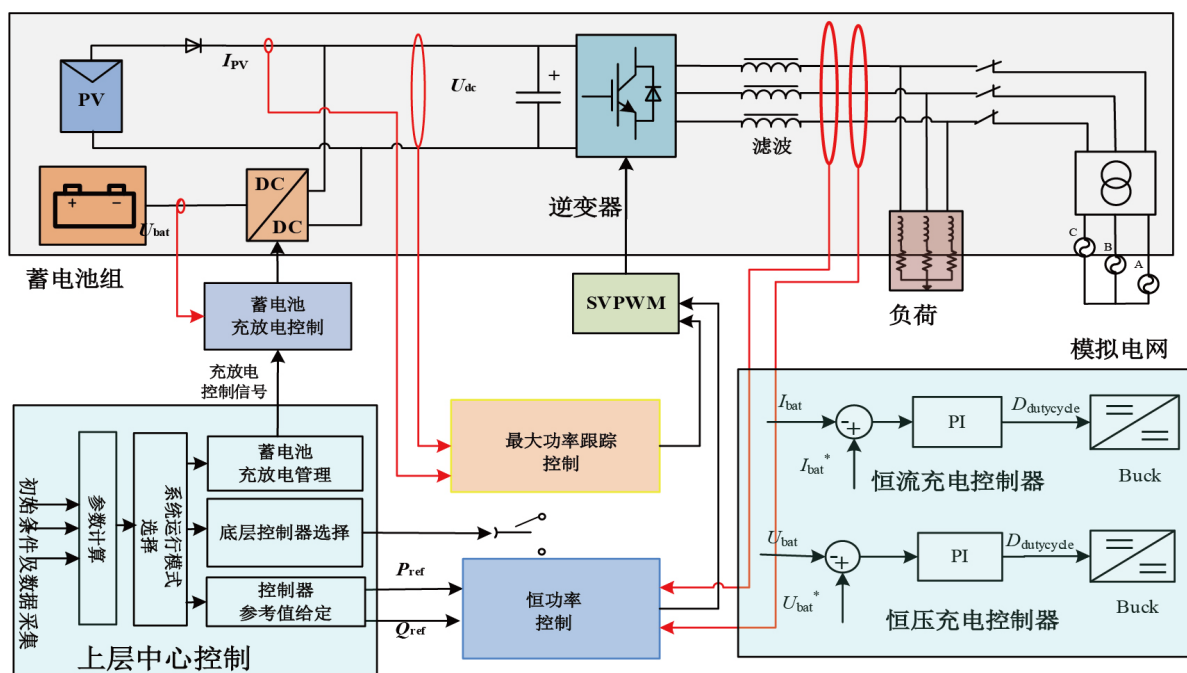


Figure 1. The structure of the multi-functional PV-Battery and its control system

图 1. 光伏-蓄电池系统参与大电网二次辅助调频的硬件拓扑结构图

光伏-蓄电池参与二次调频的方法如图 3 所示。当负荷突然增加时, 负荷频率特性曲线将由 $L_1(\Delta f)$ 移至 $L_2(\Delta f)$, 当传统电源的一次调频功能启动时, 电网运行点将由稳定运行点 a 移至 b 点, 对应的频率偏差从 0 下降至 Δf_1 (其为负值)。当传统电源的二次调频功能启动时, 假设其备用容量不足, 功频曲线将由 $G_1(\Delta f)$ 移至 $G_2(\Delta f)$, 对应的二次调频出力为 ΔP_G , 此时电网运行点将由 b 点移至 c 点, 即频率偏差从 Δf_1 回升至 Δf_2 。在此场景下, 控制并网逆变器输出功率, 功率指令为 P_{ref} , 频率偏差将恢复至 0。即传统电源联合光伏-蓄电池系统参与二次调频, 通过对区域控制误差信号的合理分配, 使得传统电源的出力为 ΔP_G , 光伏-蓄电池的出力为 P_{ref} , 最终实现电网频率的无差调节。

考虑光伏-蓄电池输出能力和逆变器容量, 在此规定当 $50 - \Delta f < f < 50 + \Delta f$ 时, 光伏-蓄电池不参与系统调频; 当 $f > 50 + \Delta f$ 或 $f < 50 - \Delta f$ 时, 启动光伏-蓄电池系统参与电网调频。具体规定如下:

当电网的频率 $f < 49.0$ Hz 或 $f > 51.0$ Hz, 逆变器退出并网运行。当 $49.0 < f \leq 49.3$ Hz 时, 中心控制系

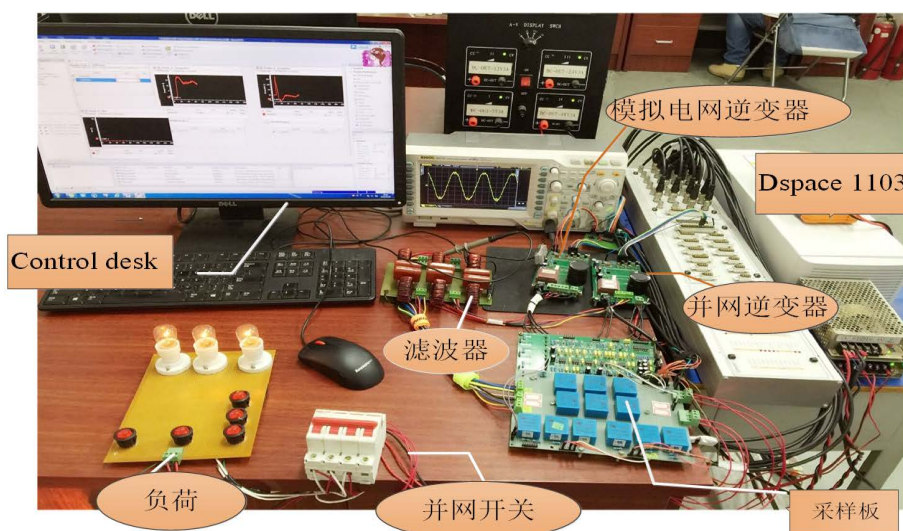


Figure 2. Hardware connection
图 2. 系统硬件实物图

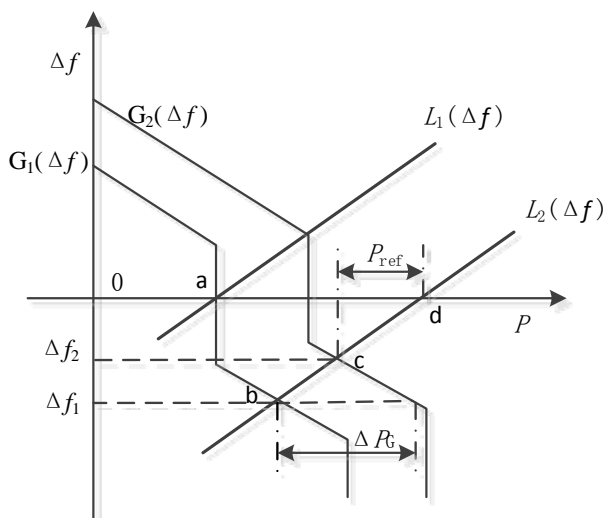


Figure 3. The Principle of PV-battery participating in auxiliary second frequency regulation
图 3. 光伏-蓄电池系统参与二次调频示意图

统确定并网逆变器输出功率参考值 $P_{\text{ref}} = P_n + \Delta P_1$, P_n 为上一时刻并网逆变器输出功率参考值。当 $49.3 < f \leq 49.6$ Hz 时, 中心控制器根据频率变化再次调整并网逆变器输出功率调整值为 ΔP_2 , 此时 $P_{\text{ref}} = P_n + \Delta P_2$; 当频率处在其他范围内以此类推。当 $49.9 < f \leq 50.1$ Hz 时, 并网逆变器输出功率不在调整, 此时 $P_{\text{ref}} = P_n$ 。当系统频率 $f > 50.2$ Hz 时, 此时的 ΔP 值为负值。 $P_{\text{ref}} < 0$ 时, 逆变器处在整流状态。光伏-蓄电池发电系统并网逆变器输出功率如表 1 所示。

4. 控制系统

4.1. 上层中心控制系统

本章所设计微网实验系统采用 dSPACE1103 作为上层中心控制器, DS1103 输出的面板拥 8 路 A/D 和 12 路 D/A 数模转换端口还拥有 20 路高速数字 I/O 外接口。此外还集成了 TMS320F240DSP 控制器可输出 8 路 PWM 信号, 该功能可以满足逆变器控制一般硬件要求。用户在使用前要将 DS1103 控制卡插入到计算机的 PCI 插槽中, 用光纤电缆连接控制卡和 DS1103 输出的面板, 然后将输出面板上端口与实际中的硬件端口相连接, 这样就可以构成在线实时控制系统。

上层中心控制系统主要作用是选择和切换不同的控制模式。状态的转换依据是采样电网的频率和电池 SOC 的状态。光伏-蓄电池发电系统参与电网二次辅助频率调节工作模式如表 2 所示。当系统中心控制器根据电网频率发出并网逆变器的输出功率参考 P_{ref} 时, 可根据 P_{ref} 和 P_{PV} (光伏输出功率) 的比值大小确定电池的充放电转换条件。当 $P_{\text{ref}} > P_{\text{PV}}$ 时, 紧靠光伏输出功率不足以提供并网逆变器所需要的功率值, 这时就需要储能电池放电来弥补功率缺额, 但是当蓄电池的 SOC 小于一定值时, 不能让蓄电池持续放电, 这时仅仅需要将光伏发出的功率全部送到电网, 即令并网逆变器输出功率 $P_{\text{ref}} = P_{\text{PV}}$; 当 $P_{\text{ref}} < P_{\text{PV}}$ 时, 光

Table 1. Output power of grid connected inverter

表 1. 并网逆变器输出功率表

电网频率 f (Hz)	并网逆变器功率调整值	并网逆变器输出功率
$f < 49.0$	电网频率超出范围, 并网逆变器独立运行	
$49.0 < f \leq 49.3$	ΔP_1	$P_{\text{ref}} = P_n + \Delta P_1$
$49.3 < f \leq 49.6$	ΔP_2	$P_{\text{ref}} = P_n + \Delta P_2$
$49.6 < f \leq 49.9$	ΔP_3	$P_{\text{ref}} = P_n + \Delta P_3$
$49.9 < f \leq 50.1$	ΔP_4	$P_{\text{ref}} = P_n$
$50.1 < f \leq 50.4$	ΔP_5	$P_{\text{ref}} = P_n + \Delta P_4$
$50.4 < f \leq 50.7$	ΔP_6	$P_{\text{ref}} = P_n + \Delta P_5$
$50.7 < f \leq 51.0$	ΔP_7	$P_{\text{ref}} = P_n + \Delta P_6$
$F > 51.0$	电网频率超出范围, 并网逆变器独立运行	

Table 2. Operation modes of PV-battery generation system participating in auxiliary second frequency regulation

表 2. 光伏-蓄电池发电系统参与电网二次辅助频率调节工作模式

指令功率	电池 SOC	蓄电池状态	并网逆变器输出功率
$P_{\text{ref}} > P_{\text{PV}}$	$\text{SOC} \leq 5\%$	停止工作	P_{PV}
	$\text{SOC} > 5\%$	放电	P_{ref}
$P_{\text{ref}} \leq P_{\text{PV}}$	$\text{SOC} \geq 95\%$	停止工作	0
	$\text{SOC} < 95\%$	充电	P_{ref}

伏发出功率大于并网逆变器输出功率。此时蓄电池处于充电状态, 光伏剩余功率将经过 DC/DC 双向变流器流入蓄电池, 充电功率为 P_{ref} 与 P_{PV} 之差。当蓄电池 SOC 大于一定范围时, 蓄电池停止充电, 限制光伏功率输出。

电池充放电系统为实现蓄电池充放电的同时, 可控制光伏出口电压 U_{DC} , 使光伏出口电压为光伏最大输出功率时的最佳电压, 从而保证光伏尽可能处在最大功率跟踪状态, 系统的六种运行方式如图 4 所示。

运行状态 I: 此时系统检测到大电网频率处于正常范围内, 并网逆变器保证光伏处于最大功率跟踪状态运行。蓄电池处于关闭状态, 既不需要充电也不需要放电。

运行状态 II: 此时系统检测到大电网频率低于正常值水平, 并网逆变器处于恒功率控制状态, 光伏发出的最大功率不足以提供系统参与电网调频所需功率。蓄电池处于放电状态, 为电网提供相应的有功功率缺额补充, 支撑大电网频率恢复正常值。

运行状态 III: 此时系统检测到大电网频率处于正常范围但频率即将超过正常值。DC/DC 变流器保证光伏处于最大功率跟踪状态, 并网逆变器采用恒功率控制; 蓄电池处于充电状态, 充电功率为光伏输出功率 P_{PV} 与逆变器输出功率 P_{ref} 之差。

运行状态 IV: 此时系统检测到大电网频率在正常范围内, 但蓄电池 SOC 过低。DC/DC 变流器保证光伏处于最大功率跟踪状态, 并将光伏所发功率全部充向蓄电池; 并网逆变器处于零功率输出状态。

运行状态 V: 此时系统检测到大电网频率超过了正常值, 逆变器处于整流状态, 将电网富余的有功功率与光伏发出功率(在蓄电池 SOC 允许情况下)充入蓄电池。

运行状态 VI: 此时, 不满足光伏发电条件, 光伏输出较小功率, 由蓄电池单独参与电网的运行。

4.2. 逆变器、变流器的控制

1) 并网逆变器采用恒功率控制和最大功率跟踪控制

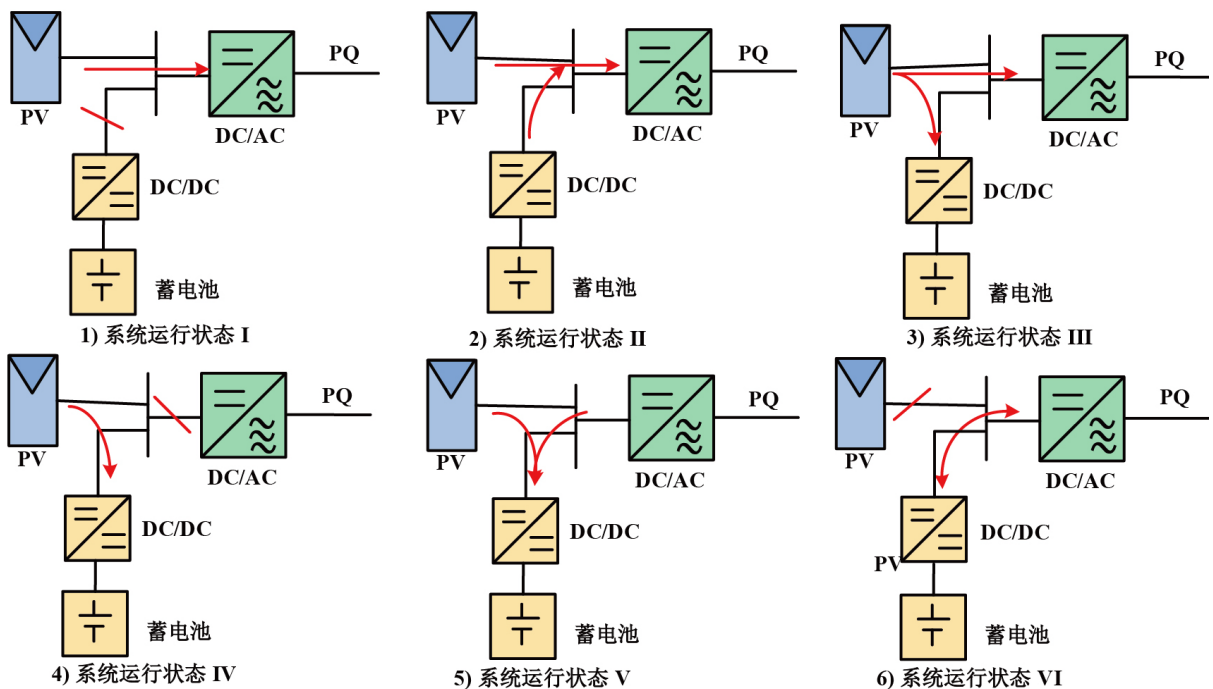


Figure 4. PV-battery generation system operation modes switching
图 4. 光伏 - 蓄电池系统功率流动及运行状态图

恒功率控制的主要目的是使逆变器输出的有功功率、无功功率是一个可控的设定值。当微电网处在并网模式下, 逆变电源的逆变器一般都采用 PQ 控制。采用恒功率控制很大程度上可以使光伏-蓄电池系统能够快更加精确的参与电网频率的调节。系统检测出电网频率与标准值之间的差值, 然后利用有功频率下垂系数就能得到相应的功率缺额。

最大功率跟踪控制思想是光伏处在不同温度下, 不同光照强度下都会对应唯一一个出口电压, 即控制光伏的出口电压为最佳值, 光伏输出的功率最大。在系统中采用恒功率和最大功率跟踪控制目的是在保证最大限度的挖掘光伏的发电潜力前提下还能使光伏-蓄电池系统很好的参与到电网的调频中。

2) 蓄电池充放电控制

蓄电池控制器包含充电控制器和放电控制器。如图 5 和图 6 所示。充电控制时双向变流器工作在 Buck 模式; 放电时工作在 Boost 模式。当中心控制器发出充放电指令时, 蓄电池能有效地切换充放电模式, 并能维持逆变器直流侧电压 $U_{DC-Link}$ 处在光伏输出最大时的出口电压, 从而保证光伏 MTTP 的功能, 尽可能充分利用光伏发出的电能。

控制器采用双闭环控制策略, 电压外环控制 $U_{DC-Link}$ 由上层中心控制指令给定 U_{dc}^* 并输出电流内环给定值, 适当限幅后经电流 PI 控制器控制 Buck 充电; 当光伏出力不足时, 通过放电控制器控制直流母线电压 $U_{DC-Link}$ 保证光伏最大功率运行并弥补逆变器有功功率缺额, 控制亦采用直流母线电压外环、蓄电池放电电流内环控制, 并判断蓄电池电量状态, 当蓄电池电量放至最低时内环电流给定为 0 A。

5. 系统仿真分析

为了验证实验系统的合理性在试验之前有必要进行相应的 Matlab 仿真。仿真条件为电网额定容量 10 MW, 其光伏-蓄电池的单位调节功率为 0.2 MW/Hz。逆变器容量 100 kVA, 光伏发电额定功率为 50 kW, 其光伏最大功率输出特性依据某示范工程多年实际运行历史数据, 蓄电池模型为 19 节 2 V 蓄电池原型, 原始数据均以 Matlab 文件格式存在 Simulink 模型中。光伏-蓄电池发电系统参与二次辅助频率调节时运行模式的选择与切换基于 Stateflow 工具箱实现。仿真时间为 2s, 蓄电池初始荷电状态(SOC)为 30%。

仿真结果如图 7(a)~(d)所示。仿真在 0.05 秒启动并网逆变器, 在 0.05~0.3 s 秒内, 并网逆变器在 $P_{ref} = 10 \text{ kw}$ 时工作, 此时电网频率保持在 50 Hz 运行, 如图 7(a)所示。光伏处于功率输出上升阶段在 0.3 s 稳定

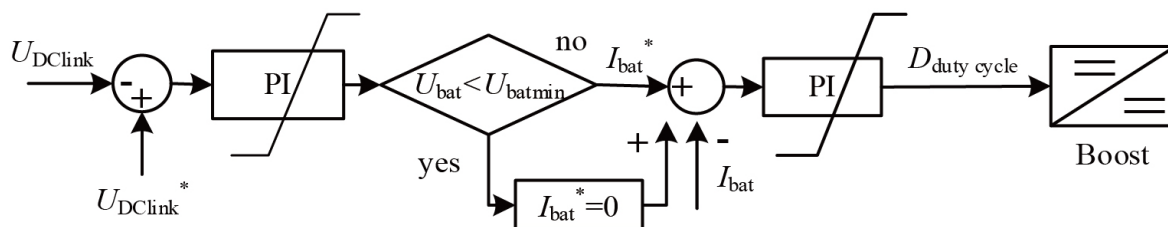


Figure 5. The UDC-Link controller based battery discharging

图 5. 维持直流母线电压放电控制器

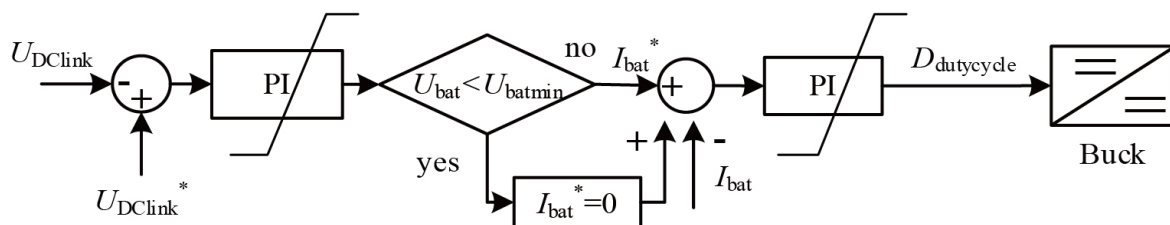
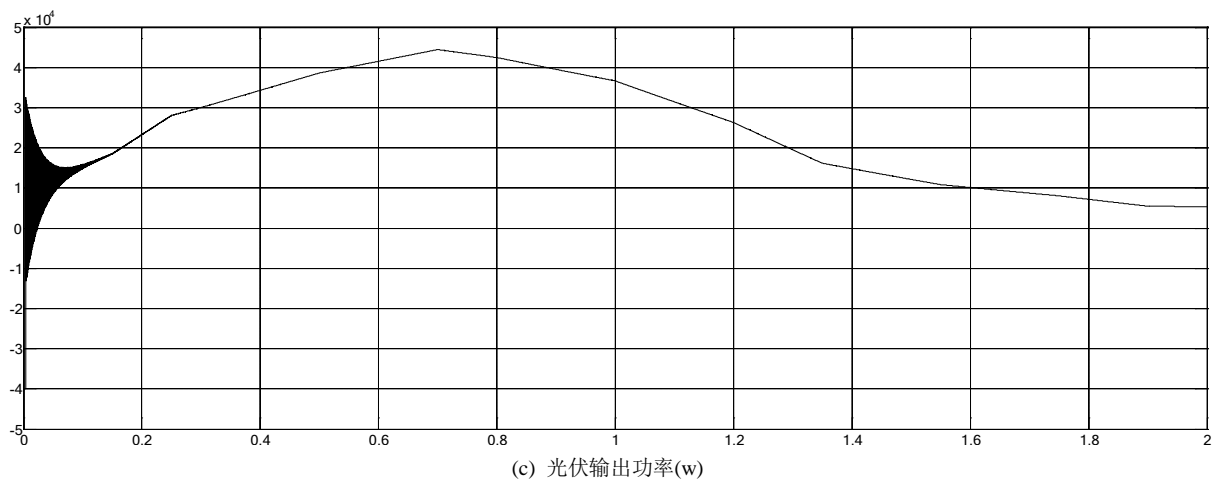
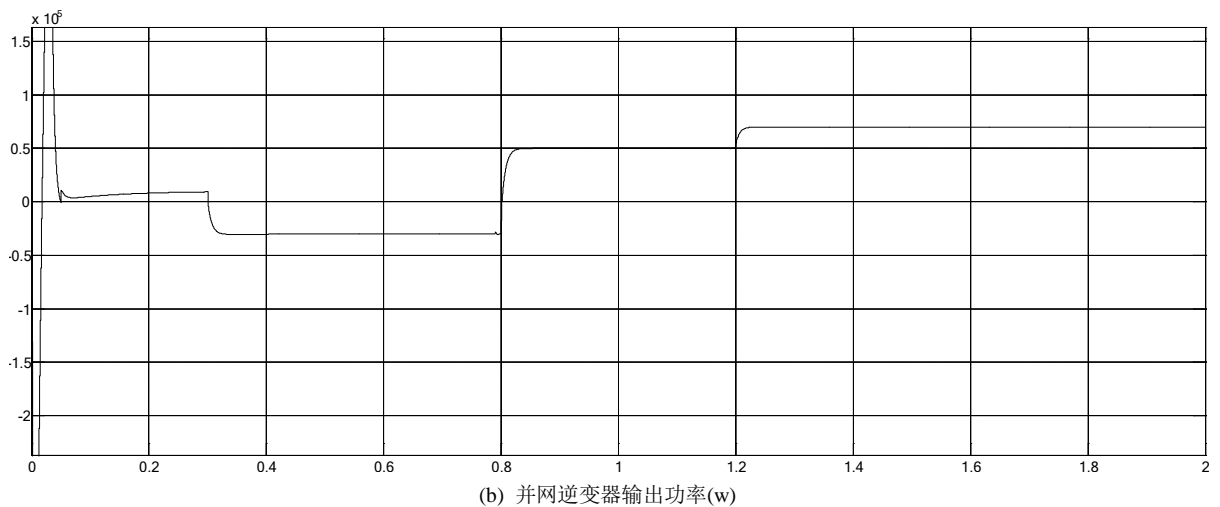
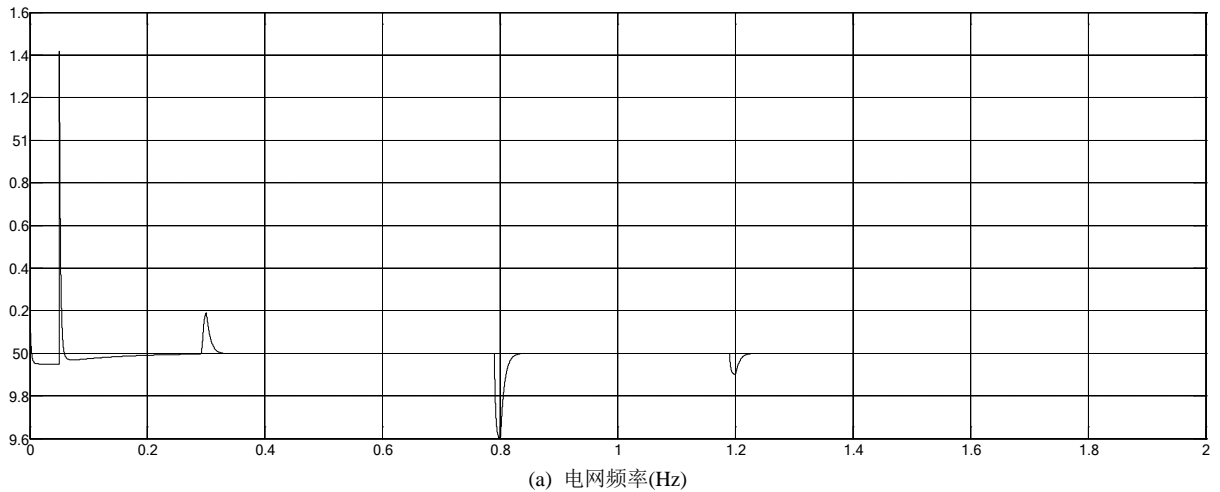


Figure 6. The UDC-Link controller based battery charging

图 6. 维持直流母线电压充电控制器

输出 30 kW 功率, 如图 7(c)所示。在 0.3 秒时刻电网频率突然升高, 控制中心捕获到电网频率异常升高, 立即给并网逆变器下相应指令, 将逆变器的功率输出值 P_{ref} 改变为 -40 kW, 如图 7(b)所示。在 0.3~0.8 s 内系统处于整流状态, 将电网富余有功功率充到蓄电池, 此时电网频率得以降低, 恢复到正常水平。光伏输出功率持续增加, 在 0.7 秒时刻达到最大值 45 kW。在 0~0.8 s 蓄电池都处在充电状态, 充电功率随



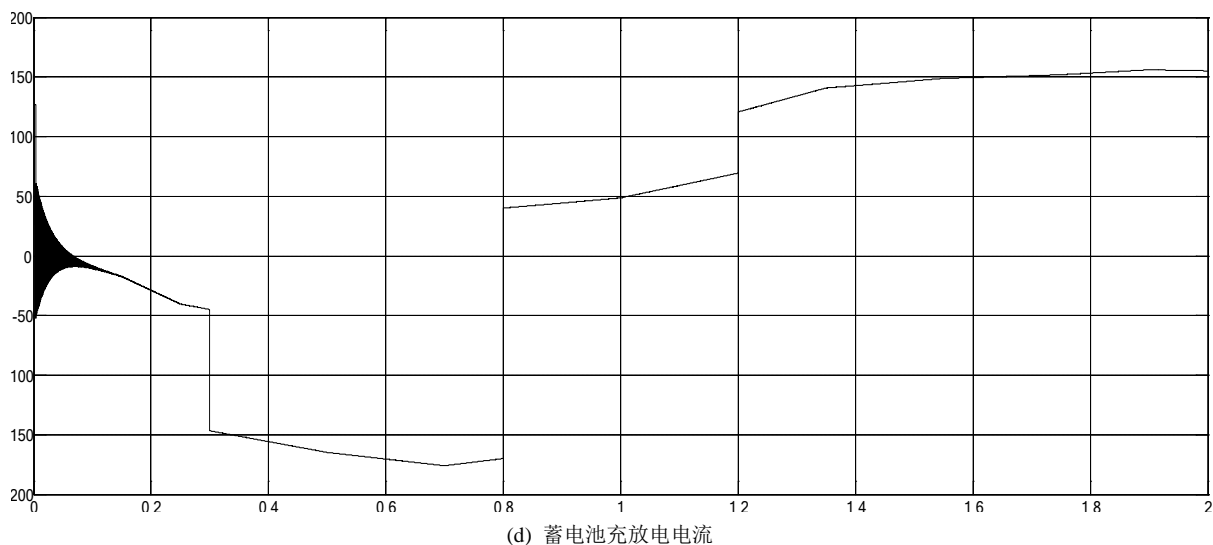


Figure 7. Simulation results of PV-battery system participating in auxiliary second frequency regulation
图 7. 光伏 - 蓄电池系统参与二次辅助调频仿真结果

着光伏输出功率增大而增大。在 0.8 s 时刻, 电网频率下降, 此时并网逆变器处于逆变状态, 向电网输送 50 kW 有功功率, 系统频率得以恢复。在 0.8~1.2 s 内, 光伏发出的有功功率小于逆变器的 P_{ref} , 光伏输出不足以提供逆变器所需功率, 此时上层控制中心发出相应指令让蓄电池切换至放电状态, 弥补功率缺额。同样在 1.2 秒时, 频率出现波动, 系统能稳定运行并恢复频率。

6. 实验结果与分析

在做光伏 - 蓄电池参与电网调频试验之前应该先确保各个逆变器、变流器等模块可以正常工作。另外, 需要在 Control desk 中建立要控制的量和相应的虚拟表盘来读取相应的实验结果。Control desk 中检测的变量有系统频率、并网逆变器输出有功功率、模拟电网的下垂控制逆变器输出有功功率。

1) 当并网逆变器没有投入运行, 模拟电网的下垂控制逆变器单独运行时, 实验结果如图 8 所示:

0~20 s 时, 系统带一个功率为 10 w 的负荷工作, 频率为 50 Hz。20 s 时增加一个负荷为 30 w 的负载, 总负荷为 40 w, 此时频率为 49.985 Hz。在 40 s 时, 切掉所有负荷, 系统频率上升。

该实验结果表明, 下垂控制的逆变器工作状态良好, 能很好的模拟电网的负荷频率特性, 当电网有功负荷突然增加时, 系统有功功率不足, 系统频率会按照负荷频率特性曲线下降; 当电网有功负荷减少时, 系统有功功率富余, 系统频率会按照负荷频率特性曲线上升。

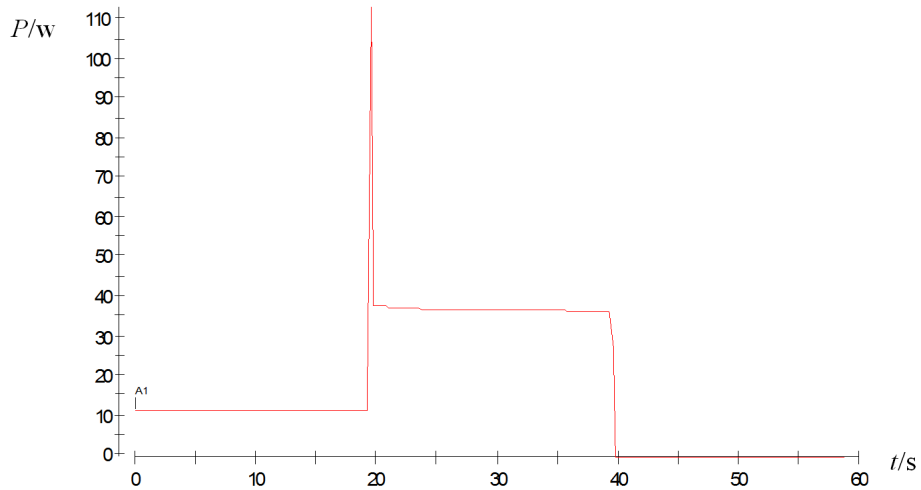
2) 当并网逆变器投入运行时, 此时并网逆变器和模拟电网的下垂控制逆变器处于并联运行。实验结果如图 9 所示:

0~20 s 时, 两台逆变器带一个 12 w 的负荷并联运行, PQ 控制逆变器输出 0 w 有功功率, 系统频率为 50 Hz。

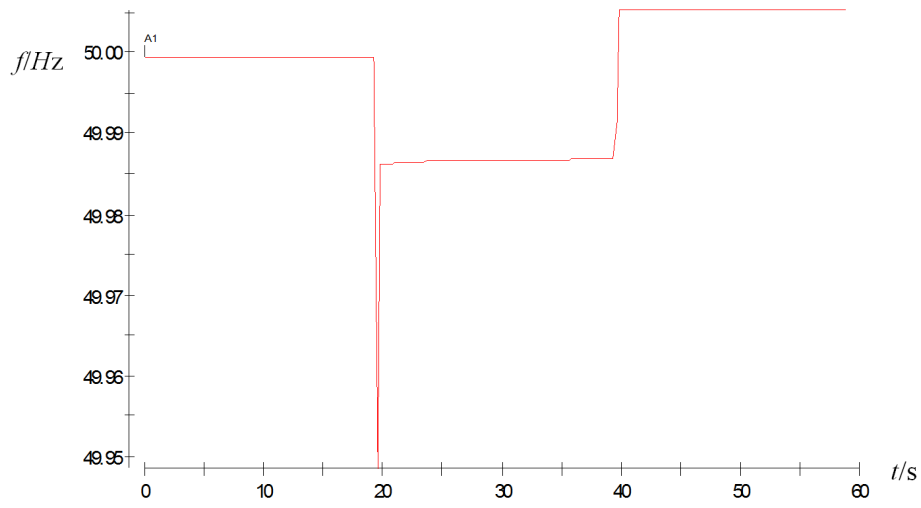
20 s 时, 增加一个 35 w 的负荷, 此时总功率为 47 w, 系统频率下降, 此时使 PQ 控制逆变器输出 35 w 有功功率。系统频率重回 50 Hz。

50 s 时, 减少 12 w 的负荷, 总功率为 35 w, 系统频率上升, 此时使 PQ 控制逆变器有功功率输出降低 12 w。系统频率重回 50 Hz。

当系统有功负荷增加或减少时, dSPACE 上层控制中心会检测系统频率的变化, 根据所测频率的不同 dSPACE 可以控制并网逆变器的有功功率的输出, 可以起到很好的系统频率调节作用。



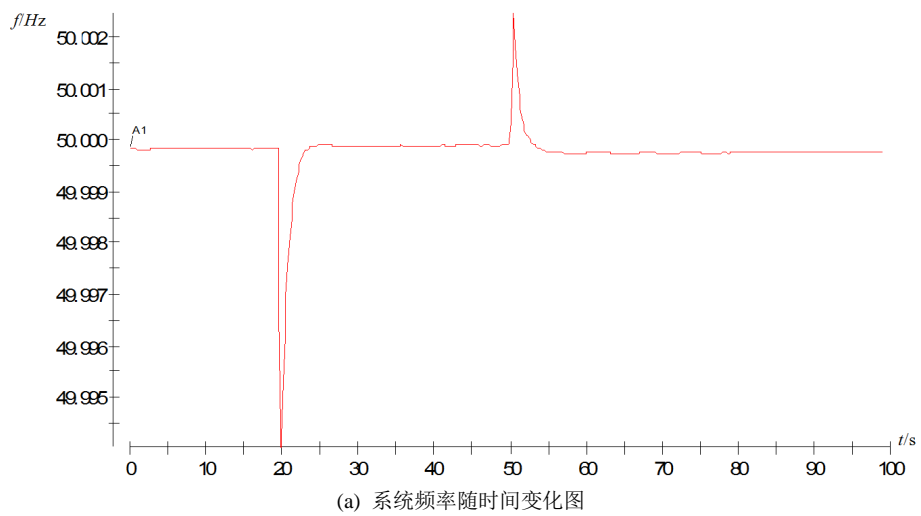
(a) 下垂控制逆变器有功功率输出(w)



(b) 增加/减少负荷时系统频率随时间变化图

Figure 8. Experiment results of inverter with droop control

图 8. 下垂控制逆变器实验结果图



(a) 系统频率随时间变化图

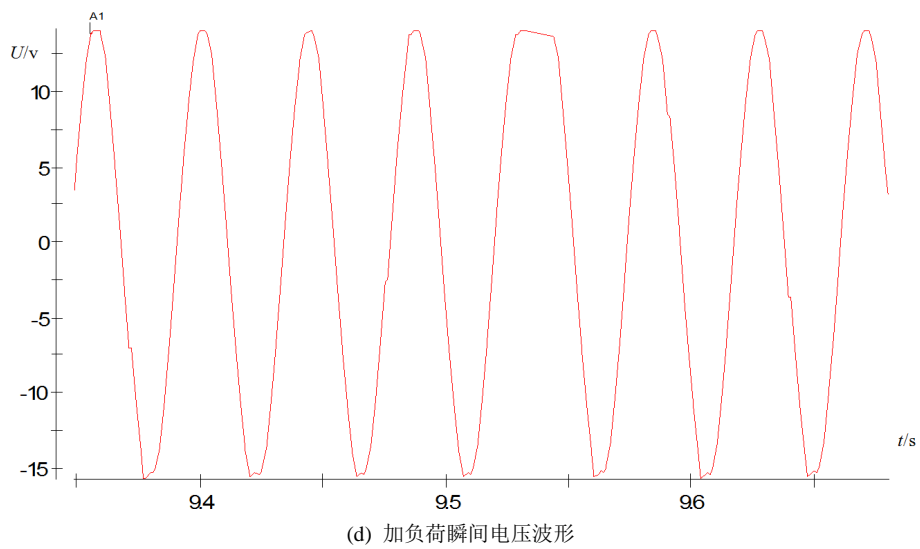
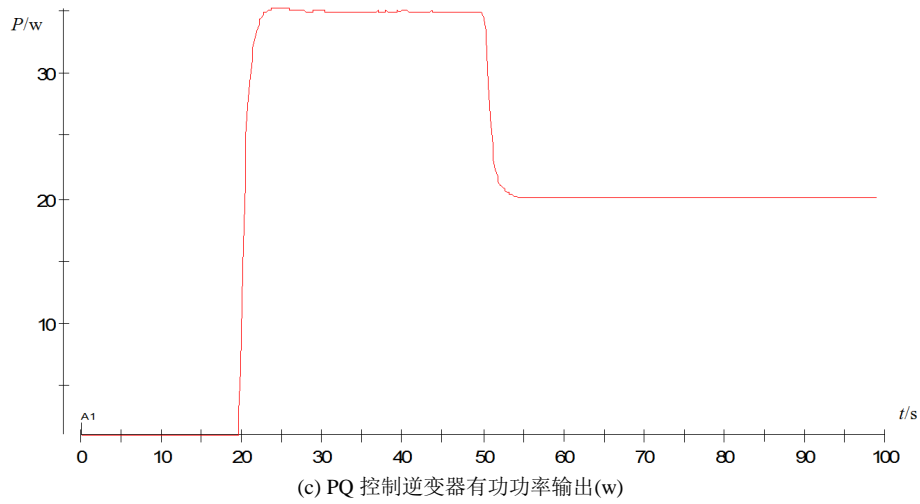
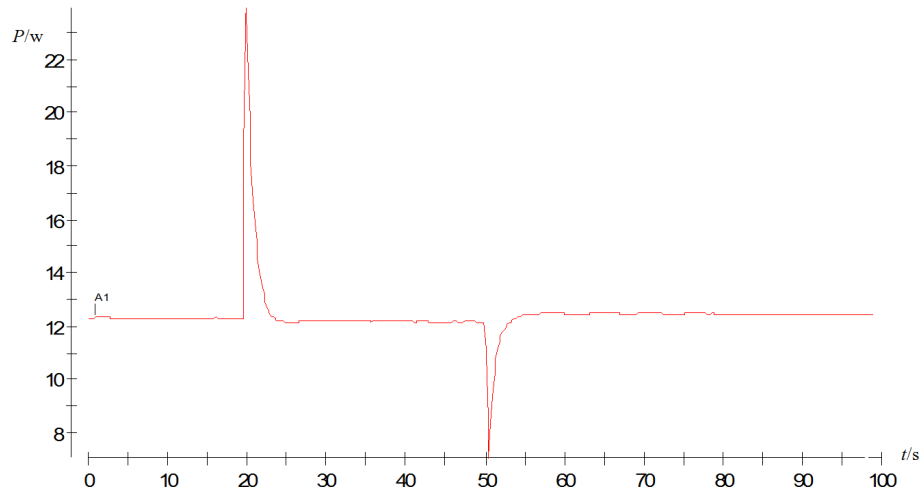


Figure 9. Experiment results of PV-battery system participating in auxiliary second frequency regulation

图9. 光伏-蓄电池系统参与二次辅助调频实验结果图

7. 结论

本章利用在前序章节的基础上, 利用相应的逆变器、变流器设计出含光伏-蓄电池的微网实验系统。并提出光伏-蓄电池系统在保证参与电网安全稳定运行的前提下, 参与到电网的辅助调频。本章节分别用 Matlab 仿真和实验结果验证所设计的运行控制策略的可行性。所设计的控制策略考虑到现实运行的多种情况, 针对不同情况有 6 种运行状态, 各个状态间可以根据外界环境变化相互转换。该方案在实际生活中具有一定的经济效益, 可以减少光伏电站的运行成本和不必要的设备投资, 能做到尽可能减少光伏的弃光现象。

参考文献

- [1] 任洛卿, 白泽洋, 于昌海, 等. 风光储联合发电系统有功控制策略研究及工程应用[J]. 电力系统自动化, 2014(7): 105-111.
- [2] 杨水丽, 李建林, 李蓓, 等. 电池储能系统参与电网调频的优势分析[J]. 电网与清洁能源, 2013(2): 43-47.
- [3] Taheri, H., Akhrif, O. and Okou, A.F. (2013) Contribution of PV Generators with Energy Storage to Grid Frequency and Voltage Regulation via Nonlinear Control Techniques. *Industrial Electronics Society, IECON 2013-39th Annual Conference of the IEEE*, **42**, 10-13.
- [4] 田世明, 栾文鹏, 张东霞, 等. 能源互联网技术形态与关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2015(14): 3482-3494.
- [5] Budenbender, K., Braun, M., Stetz, T., et al. (2011) Multifunktional PV Systems Offering Additional Functionalities and Improving Grid Integration. *International Journal of Distributed Energy Resources*, **7**, 109-128.
- [6] 吴文传, 张伯明, 孙宏斌. 电力系统调度自动化[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.
- [7] 高翔. 现代电网频率控制应用技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [8] 黄际元, 李欣然, 黄继军, 等. 不同类型储能电源参与电网调频的效果比较研究[J]. 电工电能新技术, 2015(3): 49-53, 71.
- [9] 丁冬, 杨水丽, 李建林, 等. 辅助火电机组参与电网调频的 BESS 容量配置[J]. 储能科学与技术, 2014(4): 302-307.
- [10] 文学, 王坚. 南方电网调频模式现状及未来调频模式研究[J]. 电网技术, 2010(12): 119-123.
- [11] 项顶, 宋永华, 胡泽春, 等. 电动汽车参与 V2G 的最优峰谷电价研究[J]. 中国电机工程学报, 2013(31): 15-25.
- [12] 鲍彦, 贾利民, 姜久春, 等. 电动汽车移动储能辅助频率控制策略的研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(11): 115-126.
- [13] 黄杨, 胡伟, 闵勇, 等. 计及风险备用的大规模风储联合系统广域协调调度[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(9): 41-47.
- [14] 孙春顺, 王耀南, 李欣然. 飞轮辅助的风力发电系统功率和频率综合控制[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(29): 111-116.
- [15] Bhatt, R. and Chowdhury, B. (2011) Grid Frequency and Voltage Support using PV Systems with Energy Storage. *North American Power Symposium*, **1**, 4-6. <https://doi.org/10.1109/NAPS.2011.6025112>
- [16] Shi, H., Zhuo, F., Yi, H., et al. (2015) A Novel Real-Time Voltage and Frequency Compensation Strategy for Photovoltaic-Based Microgrid. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **62**, 3545-3556.
- [17] 郭力, 富晓鹏, 李霞林, 等. 独立交流微网中电池储能与柴油发电机的协调控制[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 70-78.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2333-5394，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：jee@hanspub.org