

含光伏-储能的并网虚拟同步发电机协调控制策略

林 岩, 张建成

(华北电力大学电力工程系, 河北保定 071003)

Coordinated Control Strategy of Grid-connected Virtual Synchronous Generator with Photovoltaic and Energy Storage

LIN Yan, ZHANG Jiancheng

(Department of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

摘 要: 虚拟同步发电机 (VSG) 技术是一种新型的控制方式, 目前研究集中在对逆变器接口的控制上, 忽略了对直流侧元件的分析和控制。针对该问题, 对分布式电源和储能设备进行了具体建模, 通过能量管理对 VSG 和直流元件进行协调控制。设计了一种含光伏-储能的并网虚拟同步发电机协调控制策略, 减缓了光伏出力突变对电网造成的冲击, 实现了对不平衡功率的快速补偿和储能荷电状态的调整。通过 Matlab/Simulink 工具搭建了仿真模型, 对相关分析和所提方案进行了系统仿真和方法验证。

关键词: 虚拟同步发电机; 协调控制; 超级电容器; 光伏电源

Abstract: Virtual synchronous generator (VSG) technology is a novel control method, which can simulate virtual inertia for distributed generator, and solve the problem of power system stability caused by large-scale grid-connected renewable energy sources. However, existing researches only focused on the control of inverter interface of VSG, which ignore the analysis and control of DC side components. Therefore, distributed generator and energy storage devices are modeled, and coordinated control of VSG and DC components is achieved by energy management. A coordinated control strategy is designed for grid-connected VSG with photovoltaic and energy storage, which alleviate the impact on power grid caused by the sudden change of PV output to compensate unbalanced power rapidly and adjust the charge state of energy storage equipment. Relevant theoretical analysis and proposed scheme are verified by the simulation system built with Matlab/Simulink simulation tool.

Keywords: virtual synchronous generator; coordinated control; super capacitor; photovoltaic generator

基金项目: 国家自然科学基金项目(51177047); 河北省科技计划项目(16214504D)

0 引 言

基于可再生能源的分布式发电技术是解决能源、环境问题的重要途径之一^[1]。由于国际社会对新能源产业的广泛关注, 近年来, 以风光发电为主的分布式发电技术取得了长足的发展, 可再生能源在电力系统中的渗透水平正迅速提高。

大规模的可再生能源并网在改善能源结构的同时, 也给电网的控制运行带来了严峻的挑战^[2]。与传统同步发电机相比: 分布式电源的电气及物理分布相对分散, 难以进行集中的调度及通信^[3]; 分布式电源及其逆变器接口几乎不具备惯性, 无法在电网受到扰动时抑制功率和频率的波动^[4-5]。此外, 分布式电源输出非线性 and 随机波动性的特点, 也会对电网的稳定运行造成影响^[6]。

随着分布式电源并网容量的不断扩大, 早期将分布式电源当作不可控发电单元的控制方式已不再能够满足实际应用的要求^[7]。分布式电源除向电网提供电能之外, 还应像同步发电机一样, 为电网的稳定运行提供一定的频率和电压支撑作用^[8]。

基于这种思想, 欧洲研究人员在 VSYNC (virtual synchronous machines) 项目中率先提出了虚拟同步发电机的概念, 通过控制逆变器模拟转子转动方程, 使其具备虚拟惯性和阻尼特性^[9], 该技术在近年得到了广泛的研究。克劳斯塔尔工业大学的学者为 VSG 引入了励磁控制, 使其能够同时参与一次调压和调频率^[10]。文献 [11-12] 提出了同步逆变器(Synchronverter)的概念, 在数学和物理模型上实现了 VSG 对同步发电机的完美等效。针对 VSG 参数选择较为灵活的特点, 文献 [13-15] 提

出了虚拟转动惯量自适应的控制方法,使VSG能以较小的有功、频率超调量实现对变化的快速响应。

VSG技术在构成上包括了可再生能源、储能元件和逆变器接口3个部分。然而,目前针对VSG的研究往往集中在对后级逆变器接口的控制上,而出于简化分析的目的,前级的分布式电源与储能元件通常被等效为直流电源^[16]。

文献[17-18]均指出VSG的直流侧应包括一次能源(primary source)和储能设备,并提出了通过控制储能来模拟同步发电机的旋转动能变化的理念。文献[19]对VSG的储能单元功率、能量参数的优化配置方法进行了详细的数学分析和研究,但并未涉及具体的前级控制方法。文献[20]应用VSG技术控制蓄电池系统充放电实现了提高系统稳定性的功能,并研究了蓄电池的充放电优化控制方法,但其所建模型不包括分布式电源,也未考虑分布式电源与储能装置间的协调策略。

本文在现有研究的基础上,对分布式电源和储能设备进行了具体的建模,重点研究了VSG与直流侧元件之间的协调控制策略,通过能量管理实现了VSG控制与直流侧电气信息的相互联系,使系统各部分有机地结合在一起,进而得到了含光伏-储能的并网虚拟同步发电机模型。最后,利用Matlab/Simulink进行仿真实验对所提控制策略进行了验证。

1 系统结构

含光伏电源与储能装置的虚拟同步发电机并网系统结构如图1所示。

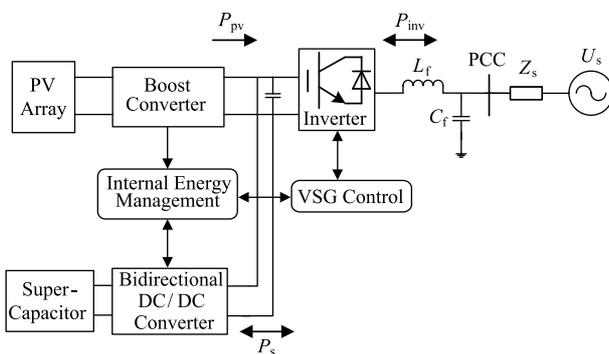


图1 含光伏-储能的VSG并网系统结构

VSG系统分为前级的DC/DC控制部分和后级的DC/AC控制部分。光伏阵列和超级电容器分别经Boost变换器和双向Buck/Boost变换器与直流

母线相连,直流母线汇集直流侧能量,送入由VSG控制的逆变器中。 P_{inv} 为逆变器交换功率, P_{pv} 为光伏阵列出力, P_s 为超级电容器吸收或释放的功率。

在并网系统中,储能设备主要用于弥补光伏出力波动时引发的不平衡功率,其充放电频率较高,但每次吸收和释放的能量较少。与蓄电池相比,超级电容器具有功率密度高、充放电时间短、绿色环保等优点^[21],在稳定母线电压方面有更为出色的表现^[22],适合作为光伏并网系统中的能量缓冲单元。

但超级电容器充放电时端电压起伏较大,将超级电容器经过Buck/Boost变换器与直流母线连接,不仅能避免端电压变化对直流母线产生影响、提高超级电容器的容量利用率,也便于灵活地选择直流母线电压等级和储能元件的配置参数^[23]。

内部能量管理环节接收各项测量参数,对系统的能量流动进行协调控制,使含光伏-储能的虚拟同步发电机并网系统维持正常运行。整个控制过程不需要施加外加控制信号,实现了VSG并网单元的自我管理。

2 协调控制策略

2.1 VSG控制

逆变器的有功-频率控制部分通过VSG控制模拟二阶同步发电机转子运动方程,使逆变器表现出虚拟的惯性和阻尼特性;本文着重研究VSG控制,无功-电压控制环节仅采用一般的下垂控制方法,图2为VSG控制框图。

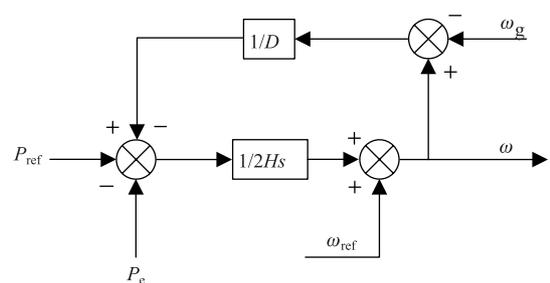


图2 VSG控制框图

如图2所示,有功-频率控制方程为

$$P_{ref} - P_e = 2Hs(\omega - \omega_{ref}) + D(\omega - \omega_g) \quad (1)$$

式中: P_{ref} 为VSG功率指令, P_e 为虚拟电磁功率; ω_g 、 ω 和 ω_{ref} 分别为电网和VSG的角频率及角频率

的参考值； H 为虚拟惯性时间常数； D 为虚拟阻尼因子。通过在虚拟惯性环节输出端引入角频率的前馈信号 ω_{ref} ，可提高 VSG 启动时的响应速度。

H 采用文献 [15] 提出的自适应虚拟惯量控制，但在 H 增大和减小时采用不同的比例系数，使 H 值的选择更为灵活：

$$H = \begin{cases} H_0 + k_1 \frac{|\omega - \omega_g|}{\omega - \omega_g} \frac{d\omega}{dt}, \frac{d\omega}{dt} > C \\ H_0 + k_2 \frac{|\omega - \omega_g|}{\omega - \omega_g} \frac{d\omega}{dt}, \frac{d\omega}{dt} < -C \\ H_0, \left| \frac{d\omega}{dt} \right| \leq C \end{cases} \quad (2)$$

H_0 为虚拟惯性时间常数的稳态值， k_1 、 k_2 均为常数，分别控制 H 的增大和减小幅度。 C 为 H 变化阈值，防止因微小误差引起控制器频繁动作， H 的变化规律如表 1。

表 1 虚拟惯量变化规律

$\omega - \omega_g$	$d\omega/dt$	H 值变化
>0	>0	增大
>0	<0	减小
<0	<0	增大
<0	>0	减小

为确定 H_0 与 D 的取值，应用小信号模型得到一个以 P_{ref} 为输入、 P_c 为输出的典型二阶传递函数

$$\begin{cases} \Delta P_{ref} - \Delta P = (2Hs + D)\Delta\omega \\ \Delta P = k_1 \Delta\sigma = \frac{k_1}{s} (\Delta\omega - \Delta\omega_g) = \frac{k_1}{s} \Delta\omega \end{cases} \quad (3)$$

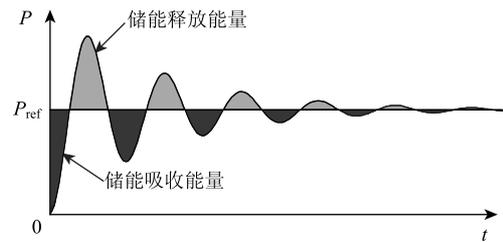
$$\frac{P_c}{P_{ref}} = \frac{k_1}{2Hs^2 + Ds + k_1} \quad (4)$$

$k_1 = U_g E / X$ ， U_g 为电网电压； E 为 VSG 的输出电压； x 为 VSG 的等效输出阻抗值，具体参考文献 [17]，VSG 的自然振荡频率和阻尼比为

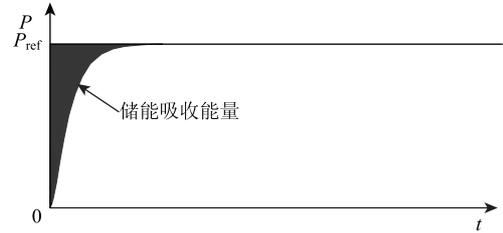
$$\begin{cases} \omega_n = \sqrt{\frac{k_1}{2H}} \\ \zeta = \frac{D}{4H\omega_n} = \frac{D}{2\sqrt{2Hk_1}} \end{cases} \quad (5)$$

不同阻尼比下的 VSG 阶跃响应如图 3 所示^[19]。

可见，当 VSG 处于欠阻尼状态时，储能设备将多次重复吸收、释放能量的过程。为减少储能充放电次数，并减轻光伏出力突变时对电网造成的冲



(a) 欠阻尼



(b) 临界阻尼及过阻尼

图 3 VSG 阶跃响应

击，本文通过对 H_0 与 D 的选择，使 VSG 在稳态时处于 ξ 略大于 1 的过阻尼状态。为使系统保持稳定。 k_2 的选择应满足调节过程中 H 始终大于 0 的要求。

2.2 能量管理

由式(4)可知，稳态下 VSG 的输出功率 P_c 取决于 P_{ref} 。在以往研究中，由于直流侧元件被直流电源等效， P_{ref} 通常被设置为固定常数。

在并网模式下，为实现对光伏能源的最大利用，Boost 电路采用最大功率跟踪(maximum power point tracking, MPPT)控制光伏功率输出。

并网系统正常运行时，令 $P_{ref} = P_{pv}$ ，VSG 输出功率随光伏出力动态变化，储能设备仅用于补偿暂态过程中出现的不平衡功率。稳态下，光伏电能全部输入电网，储能既不充电也不放电。

由于光伏电源输出具有波动性和间歇性的特点，在长期运行过程中，储能设备将不可避免地出现荷电状态过低/过高的情况。为防止设备因过充/过放造成损坏，由以上分析可知，通过调整 P_c 与 P_{ref} 之间的大小关系，有规律地对储能设备进行充放电，能够将其荷电状态控制在安全范围内。

本文采用超级电容器端电压表征其荷电状态，设计内部能量管理如图 4 所示。

设 (U_{sc-min}, U_{sc-max}) 为超级电容器电压的绝对工作区间。为确保运行过程中不发生电压越界问题，并使储能元件在条件突变时具备有一定的调节裕度，将电压的相对工作区间设定为 $(\bar{U}_{sc-min},$

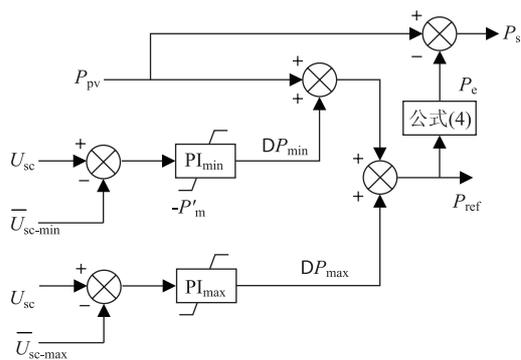


图4 内部能量管理

\bar{U}_{sc-max})。

$P_{ref} = P_{pv} + \Delta P_{max} + \Delta P_{min}$, ΔP_{max} 、 ΔP_{min} 为 VSG 功率修正指令。运行过程中, 若 U_{sc} 小于 \bar{U}_{sc-min} , 二者间的差值将经过 PI_{min} 环节得到 ΔP_{min} , 减小 VSG 的功率输出。若 U_{sc} 大于 \bar{U}_{sc-max} , 则二者差值经 PI_{max} 环节得到 ΔP_{max} , 增大 VSG 的功率输出。

P_{ref} 经过公式(4)表示的传递函数得到 P_e , P_{pv} 与 P_e 的差值 P_s 即作为对超级电容器的充放电功率信号, 传递给 Buck/Boost 变换器控制。

同时, 分别对 PI_{min} 与 PI_{max} 环节进行限幅, 将 ΔP_{min} 的幅值上限和 ΔP_{max} 的幅值下限设置为零。则当 $\bar{U}_{sc-min} \leq U_{sc} \leq \bar{U}_{sc-max}$ 时, 功率修正指令环节输出为零, 不对超级电容器正常工作造成干扰。

将 ΔP_{min} 的幅值下限设定为 $-P_{pv}$, 当 ΔP_{min} 取幅值下限时, $P_{ref} = 0$, 根据式(4)可知, 稳态下 $P_e = 0$, 即 VSG 系统与电网不进行能量交换, 超级电容器仅吸收光伏电能进行充电, 避免调整过程中对电网产生影响。对 ΔP_{max} 的幅值上限不作特殊要求。

2.3 不平衡功率补偿

采用 VSG 控制后, 由于虚拟阻尼项和惯性项的作用, 逆变器的输出功率滞后于输入的功率指令, 外界环境变化时, 减小了光伏电源出力突变对电网造成的冲击, 有利于提高电网的运行稳定性。

而逆变器输入与输出之间的功率差值, 即不平衡功率, 需要通过控制储能设备及时进行补偿。当系统处于过阻尼条件下, 储能设备的充放电功率为

$$P_s = \frac{\omega_n}{2\sqrt{\xi^2 - 1}} \left(\frac{e^{-\lambda_1 t}}{\lambda_1} - \frac{e^{-\lambda_2 t}}{\lambda_2} \right) P_{ref} \quad (6)$$

式中: $\lambda_{1,2} = -\omega_n \xi \pm j\omega_n \sqrt{1 - \xi^2}$ 为求解式(4)得到的系统特征根。

根据文献 [24], 忽略内部损耗后, 直流母线电压可表示为以下函数形式:

$$\left(\frac{C_{dc}}{\omega_0} \right) \frac{dU_{dc}}{dt} = P_e \pm P_s - P_{pv} \quad (7)$$

式中: ω_0 为基波角频率; U_{dc} 、 C_{dc} 分别为直流母线的电压和电容值; P_s 为超级电容器吸收/释放的功率(以吸收为正)。

因此, 参考文献 [25], 利用直流母线电压及能量管理的反馈信号 P_s , 设计 Buck/Boost 变换器的控制如图 5 所示, 控制储能装置进行快速充放电。

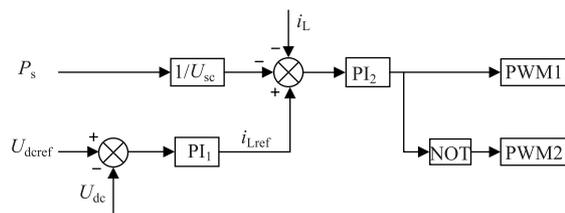


图5 Buck/Boost 变换器控制结构图

图中 i_L 和 i_{Lref} 分别为双向 Buck/Boost 变换器的电感电流及其参考值, U_{dcref} 为直流母线电压参考值, U_{sc} 为超级电容器端电压。将从能量管理侧反馈而来的信号 P_s 作为前馈输入到电感电流控制环中, 提高变换器的控制精度和响应速度。

双向 Buck/Boost 变换器采用互补 PWM 控制。当光伏电源出力骤减时, VSG 输出功率 P_e 的变化速度滞后于 P_{pv} , 超级电容器充放电功率信号 P_s 为负。同时根据公式(7), 直流母线电压呈下降趋势, Buck/Boost 变换器工作于 Boost 模式, 控制超级电容器放电; 反之, 当光伏电源输出功率突增时, P_e 小于 P_{pv} , P_s 信号为正, 同时直流母线电压呈上升趋势, Buck/Boost 变换器工作于 Buck 模式, 控制超级电容器充电。

3 仿真分析

在 Matlab/Simulink 平台搭建如图 1 所示的含光伏-储能的虚拟同步发电机并网系统仿真模型。光伏阵列参数为: $S_{ref} = 1000 \text{ W/m}^2$, $T_{ref} = 25^\circ\text{C}$, $U_{oc} = 376 \text{ V}$, $I_{sc} = 35.68 \text{ A}$, $U_m = 298 \text{ V}$, $I_m = 33.56 \text{ A}$, 采用电导增量法实现最大功率跟踪。

超级电容器组由 25 个 MAXWELL 公司的 16V 小型模块超级电容器电池 (16V/cell, 58F/cell) 串联而成, 等效电容为 2.32F, 等效串联内阻为 $22 \text{ m}\Omega \times 25 = 550 \text{ m}\Omega$ 。参考文献 [26], 将超

级电容器的绝对工作电压区间设定为 200~400V，相对工作电压区间为 220~380V。双向 Buck/Boost 变换器电感值为 3mH，直流母线电容为 5mF，直流母线电压额定值为 800V。其余控制参数见表 2。

表 2 VSG 系统控制参数

参数	数值	参数	数值
E/V	380	k_2	0.18
P_{base}/kW	10	k_{p1}	0.8
H_0	0.2	k_{i1}	0.08
D	10	k_{p2}	0.6
k_1	0.06	k_{i2}	0.2

3.1 光照突变实验

设定 3s 前，光照强度为 0W/m²，3s 时光照强度突增至 1 000W/m²，光伏输出功率为 10kW。对照实验为：配置直流电源，VSG 控制中 H 使用固定值，设定 P_{ref} 在 3s 时从 0kW 阶跃至 10kW。图 6 为仿真运行结果。

观察仿真结果可见，配置光伏-储能后的 VSG 输出功率、角频率曲线，与配置直流电源时的 VSG 输出基本重合。采用自适应虚拟惯量控制之后， H 为一动态变化值，减小了暂态过程中的角频率变化幅度。

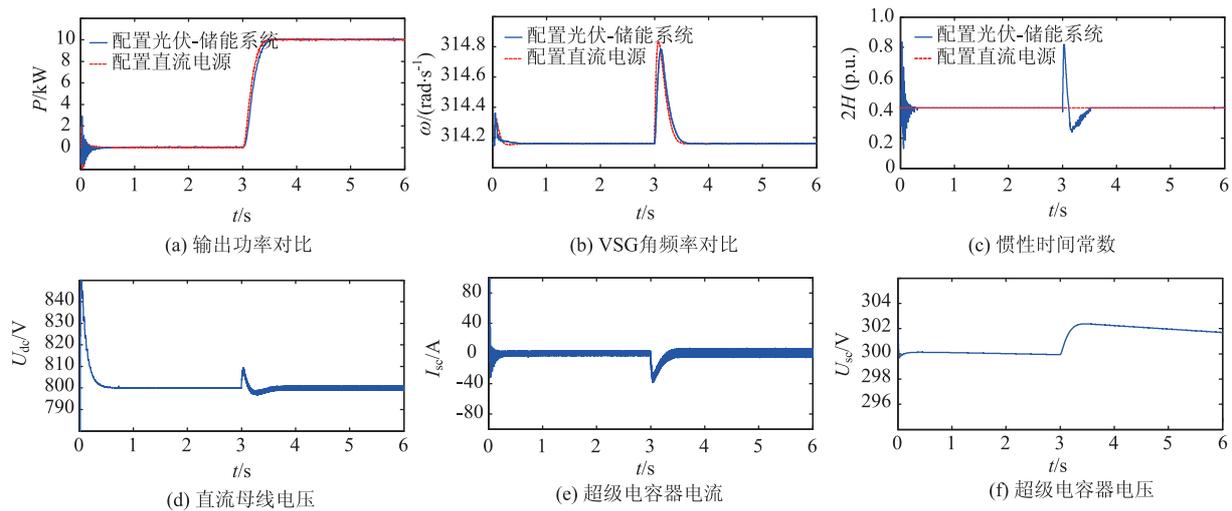


图 6 光照强度突变

光照强度突增时，光伏出力大于 VSG 输出功率，直流母线电压上升。双向 Boost/Buck 变换器工作于 Buck 模式，控制超级电容器充电，超级电容器电流为负，端电压上升。经储能设备补偿不平衡功率后，直流母线电压迅速回落，并稳定在 800V 附近，可知所提方案能够有效补偿不平衡功率，并抑制直流母线电压波动。

考虑到在实际环境中光照条件可能发生频繁变化，设置光照强度在 0~10s 间连续波动。

观察图 7 中的仿真结果可知，本文所提控制策略在光照强度频繁波动的环境下同样能够取得较好的控制效果。 H 将根据角频率及频率偏差调整大小，系统变化程度越剧烈， H 的惯性作用越为显著。

3.2 超级电容器电压越界实验

设定 U_{sc} 初始电压为 223V，初始光照强度为

1 500W/m²，2s 时度突降至 0W/m²，2.5s 时升至 500W/m²，图 8 为仿真实验结果。

为补偿光伏出力突降时的不平衡功率，控制超级电容器在 2s 时开始放电，其端电压在 2.1s 时跌落到 220V 以下，功率修正指令环节投入工作，降低 VSG 功率指令使之小于光伏出力。Buck/Boost 控制器利用多余的光伏电能对超级电容器充电。调整荷电状态的过程中，储能设备先放电、后充电，相当于充当了光伏电源与电网之间的缓冲环节。

由于 ΔP_{min} 的幅值被限制在 0 和 P_{pv} 之间，VSG 输出功率始终大于 0，VSG 系统不从电网侧吸收能量，优先利用光伏电能充电。实现了对荷电状态的自主调整，减小了调节过程中对电网的干扰，也避免了与电网交换能量时可能造成的不必要的能量损失。

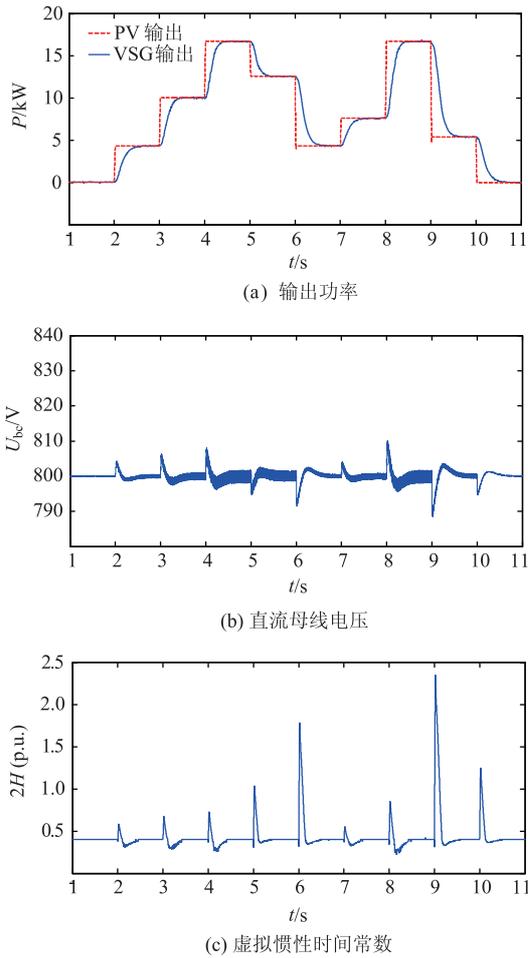


图7 光照强度连续波动

由此证明,所提方案在超级电容器端电压越界时能够实现荷电状态的调整。

4 结论

为解决可再生能源大规模并网造成的电网不稳定问题,本文基于VSG控制方法,提出了一种含光伏-储能的并网虚拟同步发电机协调控制策略:

① 对分布式电源和储能元件进行了具体建模,分析了暂态过程中直/交两侧的能量流动关系,通过能量管理将不平衡功率信号及荷电状态信息传递给储能和VSG控制,协调系统能量的出入关系、控制储能设备有规律地充电放电,补偿出现的不平衡功率。

② 通过Matlab/Simulink工具进行了仿真实验,仿真结果证明,所提策略有效实现了VSG的设计功能,能够减小光伏出力波动对电网造成的冲击,快速地补偿不平衡功率、稳定直流母线电压,

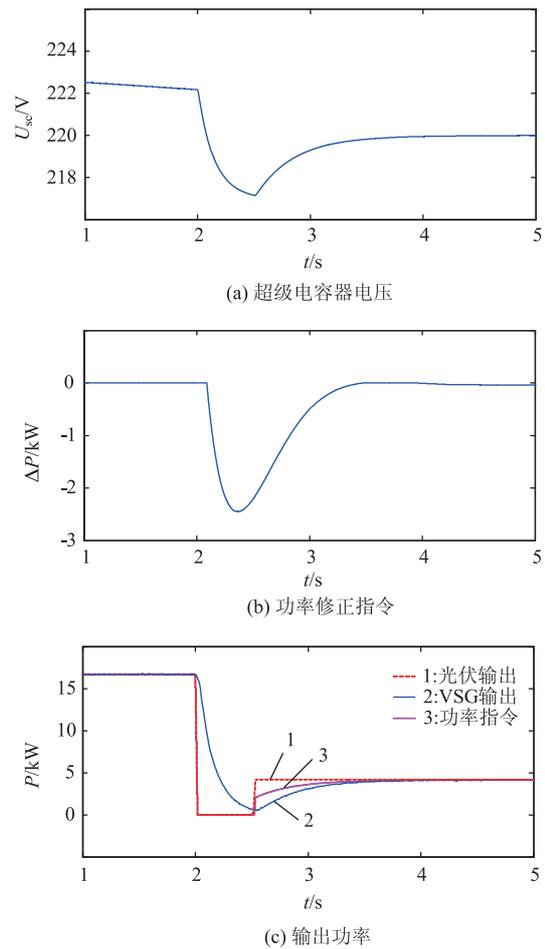


图8 超级电容器电压越界实验

并通过修正功率指令对储能设备的荷电状态进行实时调整。

参考文献

- [1] 王成山,李鹏,分布式发、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.
- [2] 曾正,赵荣祥,汤胜清,等. 可再生能源分散接入用先进并网逆变器研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(24): 1-12.
- [3] Zeng Z, Zhao R, Yang H. Coordinated control of multi-functional grid-tied inverters using conductance and susceptance limitation[J]. IET Power Electronics, 2014, 7(7): 1821-1831.
- [4] 范明天,张祖平,苏傲雪,等. 主动配电系统可行技术的研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(22): 12-18.
- [5] Borges C L T, Martins V F. Multistage expansion planning for active distribution networks under de-

- mand and distributed generation uncertainties [J]. *Electrical Power and Energy Systems*, 2012, 36: 107-116.
- [6] 刘伟, 彭冬, 卜广全, 等. 光伏发电接入智能配电网后的系统问题综述 [J]. *电网技术*, 2009, 33(19): 1-6.
- [7] IEEE-SA Standards Board. IEEE Std 1547-2003 IEEE standard for interconnecting distributed resources with electric power systems [S]. 2003.
- [8] 吕志鹏, 盛万兴, 钟庆昌, 等. 虚拟同步发电机及其在微电网中的应用 [J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(16): 2591-2603.
- [9] Loix T, De Breucker S, Vanassche P, et al. Layout and performance of the power electronic converter platform for the VSYNC project [C] // *PowerTech*, 2009 IEEE Bucharest. IEEE, 2009: 1-8.
- [10] Beck H P, Hesse R. Virtual synchronous machine [C] // *International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation*. 2007: 1-6.
- [11] Zhong Q C, Weiss G. Synchronverters: Inverters that mimic synchronous generators [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, 58(4): 1259-1267.
- [12] Zhong Q C, Nguyen P L, Ma Z Y, et al. Self-synchronized synchronverters: Inverters without a dedicated synchronization unit [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2014, 29(2): 617-630.
- [13] Thowfeek M H, Jaafar A. Distributed generation grid integration using virtual synchronous generator with adoptive virtual inertia [C] // *Energy Conversion Congress and Exposition*. 2013: 4546-4552.
- [14] Alipoor J, Miura Y, Ise T. Power system stabilization using virtual synchronous generator with alternating moment of inertia [J]. *Emerging & Selected Topics in Power Electronics IEEE Journal of*, 2015, 3(2): 451-458.
- [15] 程冲, 杨欢, 曾正, 等. 虚拟同步发电机的转子惯量自适应控制方法 [J]. *电力系统自动化*, 2015(19): 82-29.
- [16] Bevrani H, Ise T, Miura Y. Virtual synchronous generators: A survey and new perspectives [J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2014, 54(1): 244-254.
- [17] Liu J, Miura Y, Ise T. Comparison of dynamic characteristics between virtual synchronous generator and droop control in inverter-based distributed generators [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2016, 31(5): 3600-3611.
- [18] Liu J, Miura Y, Bevrani H, et al. Enhanced virtual synchronous generator control for parallel inverters in microgrids [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2016: 1-10.
- [19] 曾正, 邵伟华, 冉立, 等. 虚拟同步发电机的模型及储能单元优化配置 [J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(13): 22-31.
- [20] Vassilakis A, Kotsampopoulos P, Hatziaegyriou N, et al. A battery energy storage based virtual synchronous generator [C] // *Bulk Power System Dynamics and Control - IX Optimization, Security and Control of the Emerging Power Grid (IREP)*, 2013 IREP Symposium. IEEE, 2013: 1-6.
- [21] 顾帅, 韦莉, 张逸成, 等. 超级电容器老化特征与寿命测试研究展望 [J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(21): 145-153.
- [22] 张旭辉, 温旭辉, 赵峰. 电机控制器直流侧前置双向 Buck/Boost 变换器的直接功率控制策略研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(33): 15-22.
- [23] Wei J, Fahimi B. Active current sharing and source management in fuel cell-battery hybrid power system [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2010, 57(2): 752-761.
- [24] Delghavi M B, Yazdani A. A unified control strategy for electronically interfaced distributed energy resources [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2012, 27(27): 803-812.
- [25] 张国驹, 唐西胜, 周龙, 等. 基于互补 PWM 控制的 Buck/Boost 双向变换器在超级电容器储能中的应用 [J]. *中国电机工程学报*, 2011, 31(6): 15-21.
- [26] Cheng Y. Super capacitor applications for renewable energy generation and control in smart grids [C] // *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2011: 1131-1136.

收稿日期: 2016-06-16

作者简介:

林岩(1991—), 男, 硕士研究生, 研究方向为光伏发电系统运行控制技术, E-mail: 510286577@163.com;
张建成(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为新型能量储存技术、电能质量控制技术和新能源发电控制技术, E-mail: zhang_jiancheng@126.com.

(责任编辑: 杨秋霞)