

DOI: 10.7667/PSPC180337

# 基于储能型准 Z 源逆变器的 VSG 并网控制策略的研究

漆万碧, 李媛, 方番, 丁隆耀

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

**摘要:** 随着光伏发电装机容量的增加, 以传统控制策略并网的分布式光伏电源会大幅度降低电网惯性, 使电网稳定性减弱。针对该问题, 结合准 Z 源逆变器的优点, 在准 Z 源网络中引入储能单元, 提出基于储能型准 Z 源逆变器的虚拟同步发电机(VSG)并网控制策略。分析了储能型准 Z 源的工作模式。采用 VSG 技术控制系统输出功率, 调节直通占空比使光伏功率钳位在最大功率点, 蓄电池自动弥补功率缺额。讨论考虑 VSG 暂态响应时蓄电池的配置问题, 并推导直通占空比与 VSG 转动惯量和阻尼系数的关系, 为储能型准 Z 源逆变器在 VSG 控制参数设计方面提供参考标准。最后仿真和实验验证了所提策略的有效性。

**关键词:** 虚拟同步发电机; 光储发电系统; 准 Z 源; 并网控制

## Research on VSG grid-controlled strategy based on energy-stored quasi-Z-source inverter

QI Wanbi, LI Yuan, FANG Fan, DING Longyao

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

**Abstract:** With the increase of installed capacity of photovoltaic power generation, the distributed photovoltaic power grid with traditional grid-connected control strategy would greatly reduce the inertia of power grid and undermine the stability of power grid. Given the advantages of quasi-Z-source inverter, this paper presents a Virtual Synchronous Generator (VSG) grid-connected control scheme based on energy-stored quasi-Z-source inverter to solve the problem, in which the energy storage unit is inserted. Firstly, this paper analyzes the working mode of the energy-stored quasi-Z-source. Then the VSG technology is used to control the output power of the system, and the PV power is clamped at the maximum power point by regulating the shoot-through duty ratio so that the battery automatically compensates for the power shortage. In addition, this paper discusses the problem of the battery configuration considering the transient response of VSG, and deduces the relationship between shoot-through duty ratio and moment of inertia as well as damping coefficient of VSG, which provides criterion for the parameter design of quasi-Z-source inverter with VSG control. The simulation and experiment results verify the effectiveness of the method proposed in this paper.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51407122).

**Key words:** virtual synchronous generator; photovoltaic-storage generation system; quasi-Z-source; grid-connected control

## 0 引言

根据《跨国跨洲电网互联技术与展望》, 未来全球电力需求增长速度高于能源需求总体增速, 可再生能源在未来能源格局中将占据重要地位<sup>[1]</sup>。我国西部地区太阳能资源丰富, 光伏发电具有潜在的产业优势。将准 Z 源变流器应用在光伏发电系统中具有单级实现升降压及逆变功能<sup>[2-3]</sup>, 且允许桥臂直通,

无需加入死区时间, 系统可靠性高, 与传统两级式光伏逆变器<sup>[4-5]</sup>相比更具优势。此外, 为解决光伏电源输出功率存在间歇性和波动性的问题, 文献[6-7]提出在光伏逆变系统中引入储能环节, 使其具有一定的可预测性和可调度性, 成为大电网的“可控单元”。在传统光储系统方案中, 蓄电池通过双向 DC/DC 变流器与两级式光伏逆变器直流链连接, 通过控制该变流器来实现对蓄电池的充放电控制<sup>[8-9]</sup>, 然而额外的双向 DC/DC 变流器一定程度增加了系统的复杂度和经济成本。文献[10]首次提出在准 Z

源阻抗网络电容  $C_2$  上并联储能单元来构建新型“准 Z 源+储能”的光储发电系统。该系统不需新增额外变流器, 且可有效补偿光伏电源输出功率与负荷功率的缺额, 实现功率可调度。文献[11-13]基于该光储发电系统拓扑分析了内部功率流向并提出相应电池管理策略; 另外, 文献[14]将储能元件并联在电容  $C_1$  上, 提出能够独立控制 MPPT 和逆变器输出功率的策略。为解决文献[14]直流端电压不稳定的问题, 文献[15]提出恒直流链电压控制策略, 使直流链电压在系统工作过程中保持恒定。然而, 值得注意的是, 文献[10-15]中的并网逆变器的控制策略均采用传统的 PQ 控制, 能快速响应功率指令, 但不能参与电网频率或电压的调节, 也对所连接的电网没有惯量贡献。

近年来, 一种“电网友好型”并网技术—虚拟同步发电机(Virtual Synchronous Generator, VSG)受到了广泛关注和研究。VSG 技术通过控制并网逆变器模拟传统同步发电机(Synchronous Generator, SG)惯性、阻尼及下垂外特性, 使其从电网侧看具有与同步发电机相同的特性<sup>[16]</sup>, 因此并网逆变器能够参与电网功率和频率的调节, 符合国家推广具有即插即用、友好并网特点的并网设备要求<sup>[17]</sup>。目前针对 VSG 的研究集中在逆变器后级电网接口的控制方法实现及性能优化, 例如参数自适应控制<sup>[18-19]</sup>、功率解耦控制<sup>[20-21]</sup>、故障穿越控制<sup>[22-23]</sup>、功率分配<sup>[24]</sup>以及并联协同控制<sup>[7,25]</sup>等。对于变流器本身如何实现内部能量管理以支撑 VSG 输出特性的研究较少, 而更多情况下仅简单采用直流电压源等效前级分布式电源和储能单元<sup>[9]</sup>, 忽略了 VSG 调控储能单元吸收和释放能量模拟同步发电机机电摇摆的过程<sup>[26]</sup>, 缺少直流侧储能单元控制方法的研究。

本文结合准 Z 源逆变器的优点, 在准 Z 源网络中引入储能单元, 提出基于储能型准 Z 源逆变器的 VSG 并网方案。文章首先分析含储能单元的准 Z 源逆变器的工作模式; 然后提出基于准 Z 源逆变器的 VSG 控制策略; 讨论考虑 VSG 暂态响应时蓄电池的配置问题, 进一步推导准 Z 源直通占比与 VSG 转动惯量和阻尼系数的关系, 为“准 Z 源+储能”型光储发电系统在 VSG 控制参数设计方面提供参考标准; 仿真与实验验证了文中所提控制策略。

## 1 储能型准 Z 源逆变器拓扑原理

本文研究的光储发电系统拓扑如图 1(a)所示。从左至右分别是光伏电源、带储能元件的准 Z 源阻抗网络(蓄电池并联在电容  $C_1$  上)、逆变桥、LC 滤波、本地负荷及电网。

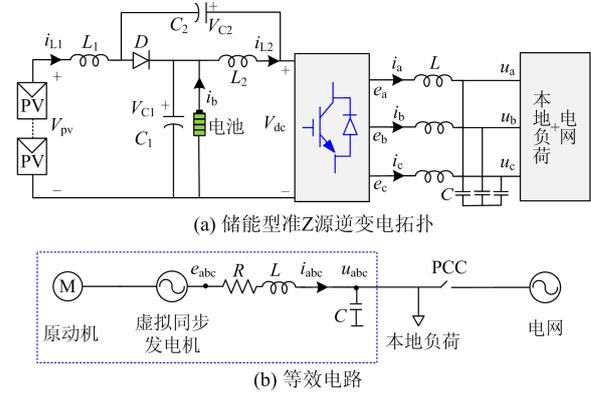


图 1 光储发电系统

Fig. 1 Photovoltaic-storage generation system

本文逆变桥采用 VSG 控制技术, 对于本地负荷和电网, 左侧电路等同于一台同步发电机, 如图 1(b)示, 与传统 SG 模型对应来看, 光伏电源与储能型准 Z 源网络电路等效为原动机, 逆变桥与滤波器电感构成了同步发电机的电路模型: 逆变桥中点输出电压  $e_{abc}$  等效为同步发电机内电势; 滤波电感  $L$  等效为定子绕组,  $R$  为电感内阻;  $i_{abc}$  等效为三相定子电流;  $u_{abc}$  等效为机端输出电压。根据等效电路, 滤波电感上电压电流存在如下关系:

$$L \frac{di_{abc}}{dt} = e_{abc} - u_{abc} - Ri_{abc} \quad (1)$$

### 1.1 准 Z 源逆变器原理

准 Z 源逆变器的工作状态分为两大类: 直通状态(逆变桥桥臂一相/两相/三相上下开关管同时导通)和非直通状态(6 种有效状态和两种传统零矢量状态)。直通状态时三相逆变桥短路, 二极管承受反压截止, 电路如图 2(a)所示; 非直通状态时逆变桥不短路且等同于电流源, 二极管正向导通, 电路如图 2(b)所示。根据电路 KCL、KVL 电路原理及伏秒平衡定理, 文献[14-15]推导出了以下关系式。

$$\begin{cases} i_{L1} + i_b - i_{L2} = 0 \\ V_{C1} = V_{pv} (1 - D_0) / (1 - 2D_0) \\ V_{C2} = V_{pv} D_0 / (1 - 2D_0) \\ V_{dc} = V_{C1} + V_{C2} = V_{pv} / (1 - 2D_0) \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $V_{C1}$ 、 $V_{C2}$  和  $i_{L1}$ 、 $i_{L2}$  分别是电容  $C_1$ 、 $C_2$  的电压和电感  $L_1$ 、 $L_2$  的电流;  $i_b$  为电池电流;  $V_{pv}$  是光伏输入电压;  $V_{dc}$  是非直通状态时直流链电压;  $D_0$  为直通占比。本文逆变器采用 SPWM 调制, 交流侧单相电压幅值  $V_{ac}$  满足式(3)。

$$V_{ac} = \frac{1}{2} MV_{dc} = \frac{1}{2} M \frac{1}{1 - 2D_0} V_{pv} = \frac{1}{2} MBV_{pv} \quad (3)$$

式中： $M$  为 SPWM 调制比； $B$  定义为光伏电源到逆变器直流端的升压比，当  $D_0 > 0$ ， $B > 1$ ，直流链电压  $V_{dc} > V_{pv}$ ，准 Z 源逆变器工作于升压模式；当  $D_0 = 0$ ， $B = 1$ ，直流链电压  $V_{dc} = V_{pv}$ ，准 Z 源逆变器工作于降压模式，与传统电压型逆变器相同。

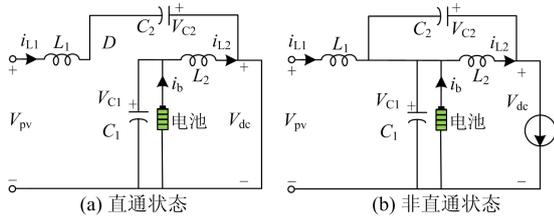


图 2 准 Z 源逆变器工作状态

Fig. 2 Working state of the quasi-Z-source inverter

### 1.2 工作模态分析

根据白天和夜晚的状态以及光伏面板输出功率  $P_{pv}$ 、VSG 功率调度指令值  $P_{ref}$  之间的关系，可将系统的运行方式归纳为 4 种模态，如表 1 所示，具体分析如下。

模态 1(白天)： $P_{pv} \geq P_{ref}$ ，光伏并网系统工作在 MPPT 模式，此时，由于光照充足或本地负荷较小，光伏在满足 VSG 输出功率需求后，将多余的功率给蓄电池充电，当蓄电池充满后，光伏电源退出 MPPT，工作在恒压模式；逆变桥工作在逆变状态。

模态 2(白天)： $P_{pv} < P_{ref}$ ，光伏并网系统 MPPT 运行，因为光照不足或 VSG 所需调度功率大，光伏输出功率达不到 VSG 指令功率，此时，蓄电池将和光伏电源一起作为原动机向虚拟同步发电机提供能量；逆变桥工作在逆变状态。

模态 3(夜晚)：光伏输出功率为零，此时只有蓄电池向后级传送电能；逆变桥工作在逆变模式。

模态 4(夜晚)：当深夜电价较为便宜时，电网向蓄电池充电，为进入模态 2 做准备。

表 1 各模态的功率关系及蓄电池、逆变桥的工作状态

Table 1 Power relation of each mode and the working state of the battery and the inverter bridge

模态	功率关系	蓄电池状态	逆变桥状态
模态 1	白天, $P_{pv} \geq P_{ref}$	充电	逆变
模态 2	白天, $P_{pv} < P_{ref}$	放电	逆变
模态 3	夜晚, $P_{pv} = 0$	放电	逆变
模态 4	夜晚, $P_{pv} = 0$	充电	整流

## 2 系统控制策略

根据功率守恒定律，在任何时刻，系统满足：

$$P_{pv} + P_b = P_{out} \quad (4)$$

式中， $P_b$  是蓄电池发出的功率，当  $P_b > 0$ ，蓄电池工

作在放电状态；当  $P_b < 0$ ，蓄电池工作在充电状态； $P_{out}$  是逆变器向负载和电网输出的功率(即 VSG 的输出功率)，当  $P_{out} > 0$ ，逆变桥工作在逆变状态；当  $P_{out} < 0$ ，逆变桥工作在整流状态。

根据式(4)可知，当控制其中任意两个功率，第 3 个功率就会自动弥补差额；又由于准 Z 源逆变器具有直通占空比  $D_0$  和调制比  $M$  两个独立控制的自由度，故本文的控制思想是：采用 VSG 控制技术调节 SPWM 调制信号  $m_{abc}$  使输出功率  $P_{out}$  跟随  $P_{ref}$ ，而光伏面板输出功率  $P_{pv}$  由直通占空比  $D_0$  的调控钳位在最大功率点  $P_{pv}^*$ ，蓄电池输出功率  $P_b$  自动弥补两者差额。整体控制框图如图 3。

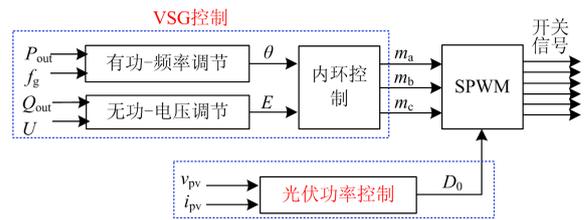


图 3 系统控制框图

Fig. 3 Control block diagram of the system

### 2.1 VSG 控制策略

#### 2.1.1 外环控制

##### 1) 有功-频率调节

VSG 输出有功  $P_{out}$  的调节包括两个部分，一是模拟 SG 机械特性的转子运动方程，二是模拟 SG 下垂特性的调频器。转子运动方程的引入，使并网逆变器具有惯性和阻尼，增强了系统频率的稳定性；调频器通过检测 VSG 输出电压频率与电网工频的差值来调节输入机械转矩与参考转矩的偏差，当电网发生频率异常事件时，VSG 通过检测与电网频率的差异，产生机械转矩偏差  $\Delta T_f$ ，调节 VSG 输入机械功率，从而控制传送到电网的功率，有效提升了 VSG 应对电网频率异常时的能力。这两个部分分别如式(5)、式(6)所示。

$$T_{in} - T_{out} = J \frac{d\omega}{dt} + D(\omega - \omega_g) \quad (5)$$

$$T_{in} - T_{ref} = k_f(f_g - f) \quad (6)$$

式中： $J$ 、 $D$  分别是 VSG 的转动惯量和阻尼系数； $T_{in}$ 、 $T_{out}$ 、 $T_{ref}$  分别是 VSG 机械转矩、电磁转矩、输入参考转矩； $\omega$ 、 $f$  为 VSG 电角速度(在极对数为 1 的情况下，与机械角速度相等)和频率； $\omega_g$ 、 $f_g$  为电网同步电角速度和频率； $k_f$  为频率下垂系数。根据式(5)和式(6)得到如图 4 所示控制框图，其中  $T_D$  是阻尼转矩， $\theta$  是 VSG 电角度。

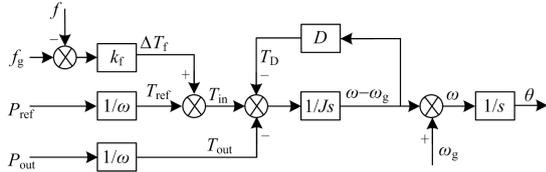


图 4 有功-频率调节

Fig. 4 Control diagram of active power and frequency

## (2) 无功-电压调节

VSG 的无功控制如图 5 所示, 控制方程为

$$E = E_0 + k_Q(Q_{\text{ref}} - Q_{\text{out}}) + k_U(U_{\text{ref}} - U) \quad (7)$$

式中:  $E$ 、 $E_0$  分别为 VSG 虚拟内电势幅值指令和空载电势;  $Q_{\text{ref}}$ 、 $Q_{\text{out}}$  分别是无功参考值和实际值;  $U_{\text{ref}}$ 、 $U$  分别是 VSG 机端输出电压幅值参考值与实际值;  $k_Q$ 、 $k_U$  分别是无功调节系数和电压调节系数。

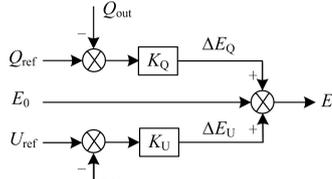


图 5 无功-电压调节

Fig. 5 Control diagram of reactive power and voltage

## 2.1.2 内环控制

结合图 1(b)中的等效电路, 本文 VSG 控制的内环利用虚拟定子绕组(滤波电感)上电流电压的关系实现: 外环产生的电角度  $\theta$  与内电势幅值指令  $E$  合成 VSG 三相内电势  $e_{abc}$ , 再由式(1)所示运算生成三相定子绕组电流参考  $i_{abc}^*$ , 跟实际电流值做比较后经过 PR 控制器生成三相 SPWM 调制信号  $m_{abc}$ , 控制框图如图 6 所示。

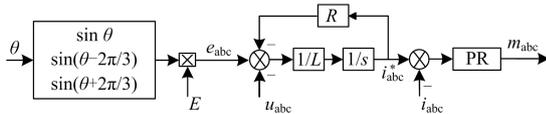


图 6 内环控制

Fig. 6 Inner-loop control

## 2.2 光伏功率控制

光伏功率可通过光伏面板电压的调节实现控制。控制框图如图 7 所示, 在 MPPT 跟踪到最大功率点后, 将对应的瞬时电压  $v_{pv}^*$  作为控制器电压外环参考值, 与  $v_{pv}$  相减后的误差信号经 PI 控制器放大后送给电流内环; 再由电流内环控制生成直通占空比信号  $D_0$ 。通过调节直通占空比  $D_0$  使光伏面板瞬时电压  $v_{pv}$  跟踪到  $v_{pv}^*$ , 光伏输出功率  $P_{pv}$  就被钳位在最大功率点  $P_{pv}^*$ 。

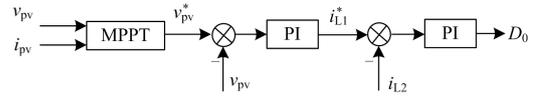


图 7 光伏功率控制

Fig. 7 Photovoltaic power control

综上所述, VSG 控制生成 SPWM 所需三相调制波  $m_{abc}$ , 光伏功率控制产生逆变桥直通占空比信号  $D_0$ , 最后将直通信号加入传统 SPWM 调制合成控制逆变桥的开关信号。针对具体加入直通的方法, 在准 Z 源相关文章已有广泛研究, 本文不再赘述。

## 3 考虑 VSG 暂态响应时蓄电池的配置问题及准 Z 源与 VSG 参数设计的约束关系

从图 4 所示的 VSG 有功控制可知, 在并网运行过程中, 当电网稳定时, 调频器将不起作用, VSG 输出功率由准 Z 源和蓄电池模拟的原动机传送到 VSG 的机械功率的变化来调节。根据文献[8,26], VSG 输出功率  $P_{\text{out}}$  与输入功率  $P_{\text{in}}$  的传递函数为

$$G(s) = \frac{P_{\text{out}}(s)}{P_{\text{in}}(s)} = \frac{T_{\text{out}}(s)}{T_{\text{in}}(s)} = \frac{K/J\omega_{\text{ref}}}{s^2 + sD/J\omega_{\text{ref}} + K/J\omega_{\text{ref}}} \quad (8)$$

式中:  $K$  是力矩系数;  $\omega_{\text{ref}}$  是与工频对应的电角速度。由  $P_{\text{out}}$  到  $P_{\text{in}}$  的二阶传递函数, 可确定其自然振荡频率和阻尼比为

$$\begin{cases} \omega_n = \sqrt{K/J\omega_{\text{ref}}} \\ \xi = D/\sqrt{4KJ\omega_{\text{ref}}} \end{cases} \quad (9)$$

在有功控制中为了获得最快的调节时间和较小的超调量, VSG 阻尼系数  $D$  和虚拟转动惯量  $J$  的取值可根据“最佳二阶系统”概念, 将系统的阻尼比设计在  $\xi=0.707$  处。

当  $0 < \xi < 1$  时, 系统工作在欠阻尼情况, 有功响应出现超调现象。在光伏功率不变的情况下, 在峰值时间  $t_p$  处, 蓄电池需要吸收或释放的电能量可能出现最大值, 因此在蓄电池性能配置时需要考虑欠阻尼工作状态时系统的超调。下面具体分析:

对于模态 1: 如图 8(a),  $0-t_1$  时段, 由于光照充足, 光伏将多余功率给蓄电池充电( $P_{pv} > 0, P_b < 0$ ); 在  $t_1$  时刻, VSG 功率指令  $P_{\text{ref}}$  发生阶跃下降, VSG 输出功率  $P_{\text{out}}$  响应曲线有超调, 由于光伏功率  $P_{pv}$  不变, 根据功率守恒, 蓄电池吸收的功率  $P_b$  的响应曲线也有相等大小的超调, 在阶跃响应的峰值时间  $t_{p1}$  处, 蓄电池吸收功率(充电功率)最大。

对于模态 2: 如图 8(b),  $0-t_2$  时段, 由于光照不足, 光伏和蓄电池一起充当原动机给 VSG 输送能量, 蓄电池工作在放电模式( $P_{pv} > 0, P_b > 0$ );  $t=t_2$  时,

VSG 有功功率指令  $P_{\text{ref}}$  发生阶跃上升, 输出功率响应曲线有超调现象, 由于光伏功率  $P_{\text{pv}}$  不变, 根据功率守恒, 蓄电池功率  $P_{\text{b}}$  的响应曲线与 VSG 输出功率  $P_{\text{out}}$  的响应曲线有相同的超调, 在阶跃响应的峰值时间  $t_{\text{p}2}$  处, 蓄电池释放功率(放电功率)最大。

对于模式 3: 如图 8(c), 由于没有光照, 只有蓄电池向后级电路提供功率( $P_{\text{pv}}=0, P_{\text{b}}>0$ ), 在 VSG 指令功率  $P_{\text{ref}}$  发生阶跃上升的前后, 蓄电池输出功率  $P_{\text{b}}$  始终等于 VSG 输出功率  $P_{\text{out}}$ , 在阶跃响应的峰值时间  $t_{\text{p}3}$  处, 蓄电池释放功率(放电功率)最大。模式 4 为电网反向给蓄电池充电, 情况与模式 3 类似, 这里不再分析。

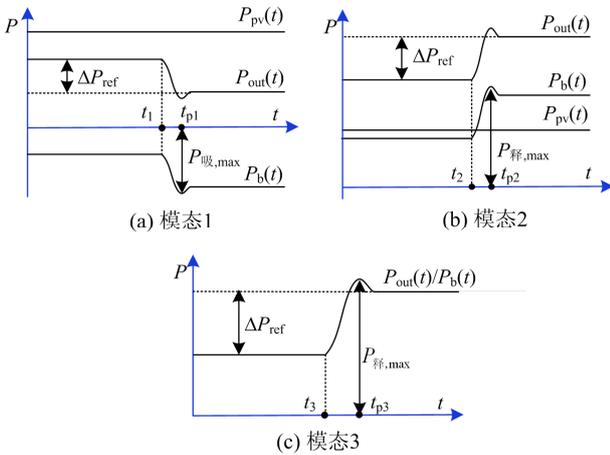


图 8 欠阻尼情况下可能出现的蓄电池最大充放电值

Fig. 8 Maximum charge/discharge value of storage battery in under-damped condition

根据以上分析, 蓄电池吸收、释放的最大功率  $P_{\text{吸,max}}$ 、 $P_{\text{释,max}}$  满足式(10)。

$$P_{\text{释,max}} = P_{\text{吸,max}} = P_{\text{b}}^0 + \Delta P_{\text{b}} + \Delta P_{\text{b}}^{\delta} \quad (10)$$

式中:  $P_{\text{b}}^0$  为  $P_{\text{ref}}$  发生阶跃变化前蓄电池原本吸收或释放的功率;  $\Delta P_{\text{b}}$  为阶跃变化前后蓄电池充放电功率的稳态差值, 其大小等于 VSG 指令功率阶跃变化量  $\Delta P_{\text{ref}}$ ;  $\Delta P_{\text{b}}^{\delta}$  是蓄电池充放电功率的暂态超调, 其大小等于 VSG 输出功率  $P_{\text{out}}$  的暂态超调  $\Delta P_{\text{out}}^{\delta}$ 。根据二阶欠阻尼系统超调量  $\delta\%$  计算公式:

$$\delta\% = e^{-\xi\pi/\sqrt{1-\xi^2}} \times 100\% = \frac{P_{\text{out}}(t_{\text{p}}) - P_{\text{out}}(\infty)}{P_{\text{out}}(\infty)} \times 100\% =$$

$$\frac{\Delta P_{\text{out}}^{\delta}}{P_{\text{out}}(\infty)} \times 100\% = \frac{\Delta P_{\text{b}}^{\delta}}{P_{\text{out}}(\infty)} \times 100\%$$

(11)

即有

$$\Delta P_{\text{b}}^{\delta} = e^{-\xi\pi/\sqrt{1-\xi^2}} \times P_{\text{out}}(\infty) = e^{-\xi\pi/\sqrt{1-\xi^2}} (P_{\text{out}}^0 + \Delta P_{\text{ref}}) \quad (12)$$

式中,  $P_{\text{out}}^0$  是有功功率指令发生阶跃前 VSG 输出功率。则式(10)可以写成

$$P_{\text{释,max}} = P_{\text{吸,max}} = P_{\text{b}}^0 + \Delta P_{\text{ref}} + e^{-\xi\pi/\sqrt{1-\xi^2}} (P_{\text{out}}^0 + \Delta P_{\text{ref}}) = P_{\text{b}}^1 + e^{-\xi\pi/\sqrt{1-\xi^2}} P_{\text{out}}^1 \quad (13)$$

式中,  $P_{\text{b}}^1$ 、 $P_{\text{out}}^1$  分别是有功功率指令发生阶跃后蓄电池充放电功率和 VSG 输出功率的稳态值。

由于在模式 3 中只有蓄电池向后级传送电能, 所以对蓄电池容量需求最大, 此模式  $P_{\text{b}}^0 = P_{\text{out}}^0$ ,  $P_{\text{b}}^1 = P_{\text{out}}^1$ , 式(13)可改写为

$$P_{\text{释,max}} = (1 + e^{-\xi\pi/\sqrt{1-\xi^2}}) P_{\text{out}}^1 \quad (14)$$

将蓄电池等效为电源和内阻串联的简单模型, 则其能释放的最大功率为

$$P_{\text{释,max}}^* = \left(\frac{E_{\text{b}}}{2}\right)^2 / R_{\text{b}} = \frac{E_{\text{b}}^2}{4R_{\text{b}}} \quad (15)$$

式中:  $E_{\text{b}}$  为蓄电池空载电势;  $R_{\text{b}}$  为其等效内阻。为了使蓄电池在 VSG 有功调度中满足后级功率需求, 蓄电池释放的最大功率需满足如下关系式:

$$P_{\text{释,max}}^* = \frac{E_{\text{b}}^2}{4R_{\text{b}}} > (1 + e^{-\xi\pi/\sqrt{1-\xi^2}}) P_{\text{out}}^1 \quad (16)$$

当系统需要向外传送的最大功率已知, 式(16)表示考虑 VSG 暂态响应时蓄电池最大放电功率需要满足的定量关系式。由于蓄电池端电压  $V_{\text{b}} \approx E_{\text{b}}$ , 故式(16)可以写成

$$\frac{V_{\text{b}}^2}{4R_{\text{b}}} > (1 + e^{-\xi\pi/\sqrt{1-\xi^2}}) P_{\text{out}}^1 \quad (17)$$

蓄电池并联在准 Z 源阻抗网络中电容  $C_1$  上, 则  $V_{\text{b}} = V_{\text{c}1}$ , 结合式(9)第 2 项及式(2)第 2 项有:

$$\frac{V_{\text{PV}}^2}{4R_{\text{b}}} \left(\frac{1-D_0}{1-2D_0}\right)^2 > (1 + e^{-\pi/\sqrt{4K\omega_{\text{ref}}(J/D^2)-1}}) P_{\text{out}}^1 \quad (18)$$

式(18)表示准 Z 源直通占空比  $D_0$  与 VSG 虚拟转动惯量  $J$ 、阻尼系数  $D$  的约束关系, 为新型光储发电系统在 VSG 控制参数设计方面提供了参考标准。

## 4 仿真分析

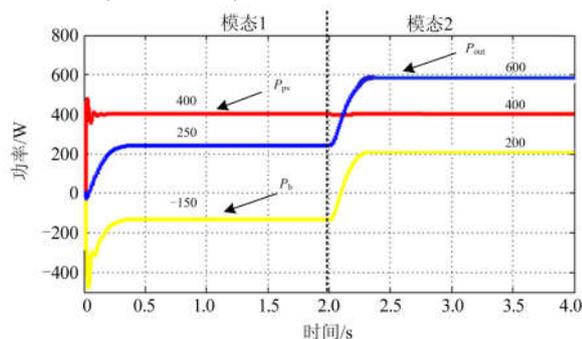
针对本文提出的基于储能型准 Z 源逆变器 VSG 并网控制策略, 在 Matlab/Simulink 仿真环境下构建了图 1 所示的储能型准 Z 源发电系统, 光伏电源和蓄电池均用理想电压源与内阻串联的等效模型代替, 系统主要参数如表 2 所示。

表 2 系统仿真参数

参数	数值	参数	数值
电感 $L_1/L_2$	2 mH	虚拟转动惯量	0.02 kg·m <sup>2</sup>
电容 $C_1/C_2$	4 mF	阻尼系数 $D$	0.5 N·m·s/rad
电池电压/内阻 $E_b/R_b$	90 V/0.1 Ω	光伏电源 $E_{pv}$	80 V
滤波电感/内阻 $L/R$	4 mH/0.1 Ω	光伏电源内阻	3 Ω
本地负荷	12.5 Ω	电网电压幅值	32 V

#### 4.1 VSG 输出功率的阶跃响应

为了验证系统对功率调度指令的响应, 让光伏工作在最大功率点  $P_{pv}^* = 400$  W(对应的光伏电压  $v_{pv}^* = 60$  V), VSG 以  $P_{ref}=250$  W 开机运行, 当  $t=2$  s 时有功指令阶跃到  $P_{ref}=600$  W。输出功率  $P_{out}$ 、蓄电池功率  $P_b$ 、光伏功率  $P_{pv}$  的响应曲线如图 9 所示。从图 9 中可以看到  $P_{ref}$  发生阶跃前后, VSG 输出功率  $P_{out}$  都能在较短时间内跟上指令功率  $P_{ref}$ , 且系统一直满足  $P_{pv}+P_b=P_{out}$ 。发生阶跃前, 由于光伏输出功率  $P_{pv}$  大于 VSG 输出功率  $P_{out}$ , 故在给后级提供电能的同时, 其将多余的能量给蓄电池充电( $P_b=-150$  W), 系统运行在模式 1; 发生阶跃后, 光伏输出功率  $P_{pv}$  小于 VSG 输出功率  $P_{out}$ , 蓄电池工作在放电状态( $P_b=200$  W), 系统运行在模式 2。

图 9 指令功率  $P_{ref}$  的阶跃响应Fig. 9 Step response of instruction power  $P_{ref}$ 

#### 4.2 光伏输出功率的阶跃响应

为了验证蓄电池在光伏发生波动时能够补偿其功率缺额, 设定 VSG 输出功率指令保持  $P_{ref}=250$  W 不变, 以光伏输出功率  $P_{pv}=400$  W 为初始条件开机运行, 在  $t=2$  s 的时刻, 光伏功率跌落到 125 W。输出功率  $P_{out}$ 、蓄电池功率  $P_b$ 、光伏功率  $P_{pv}$  的响应曲线如图 10 所示。从图 10 中可以看到光伏功率发生跌落前后(系统分别工作在模式 1 和模式 2), VSG 输出功率  $P_{out}$  都能较好地稳定在 250 W, 且系统一直满足式(4)的功率守恒条件。表明蓄电池能够很好地补偿光伏电源因天气等不可控因素造成的功率波动。

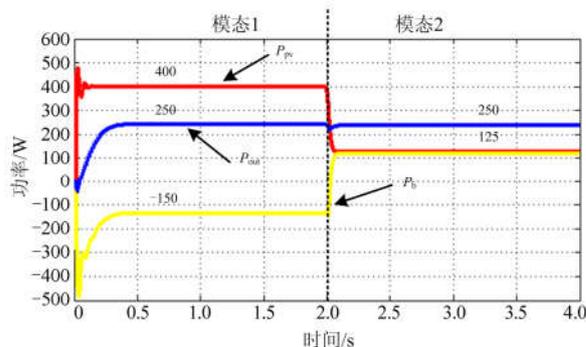


图 10 光伏功率波动的响应曲线

Fig. 10 Response curve of PV power fluctuation

#### 4.3 系统工作模式 3 与模式 4 时的响应

在夜晚时, 光伏输出功率  $P_{pv}=0$  W, 系统的运行状态有模式 3 和模式 4 两种, 如图 11 所示为系统工作在模式 3 时蓄电池给后级电路提供功率的波形, VSG 以  $P_{ref}=250$  W 开机运行, 在  $t=1.5$  s 时, 由于负荷增加, VSG 有功指令阶跃上升到 500 W。在误差范围类, 图中可认为蓄电池功率  $P_b$  一直等于 VSG 输出功率  $P_{out}$ , 即 VSG 输出功率全部由蓄电池供给; 图 12、图 13 分别为 a 相并网电流  $i_{ga}$  的波形及时间在 1 s 左右电压  $u_{ga}$  与  $i_{ga}$  的相位图, 从图中可以看到电压电流相位相同, 逆变器工作在逆变状态, 能量从蓄电池流向负载和电网。

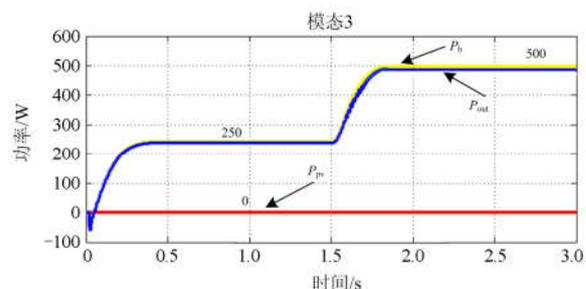


图 11 模式 3 下的功率波形

Fig. 11 Power waveform of mode 3

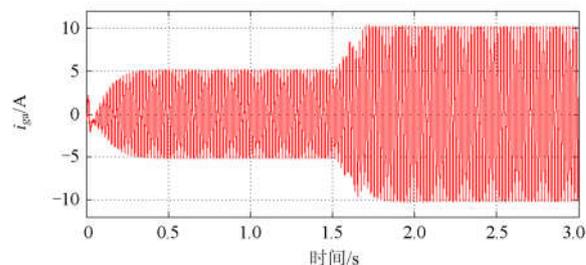


图 12 模式 3 下 a 相并网电流波形

Fig. 12 Grid-connected current waveform of a phase in mode 3

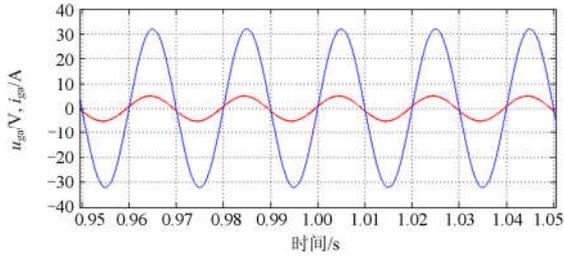


图 13 在模式 3 下 a 相并网电压电流相位图

Fig. 13 Phase diagram of a phase voltage and current in mode 3

如图 14 所示为系统工作在模式 4 时电网向蓄电池充电的波形,  $t=0$  s 时, 电网以 250 W 恒功率给蓄电池充电, 在  $t=1.5$  s 时, 由于本地负荷功率需求下降, 为了加快蓄电池充电速度, 电网以 400 W 恒功率给蓄电池充电, 在误差范围内, 可认为  $P_b=P_{out}$ 。

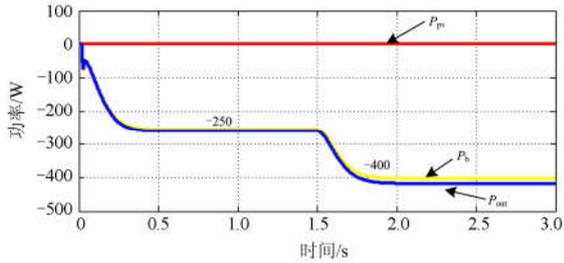


图 14 在模式 4 下功率波形

Fig. 14 Power waveform in mode 4

图 15、图 16 分别为 a 相并网电流  $i_{ga}$  的波形及时间在 1 s 左右电压  $u_{ga}$  与  $i_{ga}$  的相位图, 它们相位相反, 逆变桥工作在整流状态, 能量从电网侧流向蓄电池。

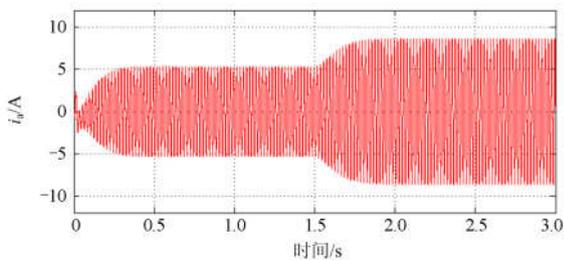


图 15 在模式 4 下 a 相并网电流波形

Fig. 15 Grid-connected current waveform of a phase in mode 4

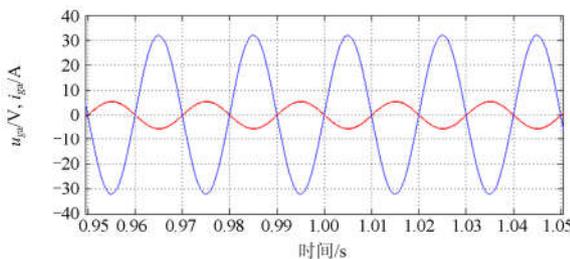


图 16 在模式 4 下 a 相并网电压电流相位图

Fig. 16 Phase diagram of a phase voltage and current in mode 4

### 4.4 VSG 对电网频率的响应

基于准 Z 源光伏发电系统的 VSG 并网控制策略较传统并网方式的一大优势是具有与 SG 类似的调频功能。当检测到电网频率异常时, VSG 控制会引入电网频率与工频的的差值, 产生机械转矩偏差信号, 调节输出功率, 从而参与电网频率的调节。为了验证 VSG 的调频功能, 做了如下仿真:

1) 设定 VSG 初始参考功率  $P_{ref}=250$  W,  $t=1$  s 时, 由于负荷突增, 电网频率从 50 Hz 跌落到 49.8 Hz。如图 17 所示, 当 VSG 检测到电网频率跌落时 VSG 会先将一部分存储在虚拟转子上的动能转换成电能提供给后级负荷, 故虚拟同步发电机在电网频率突降后其机械转速会减小; 随后因为调频器起作用, 机械转速开始回升。如图 18 所示, 经过 1.5 s 左右的暂态响应, 系统输出功率  $P_{out}$  从原来的 250 W 增加至 450 W 左右, 为突增负荷提供功率。

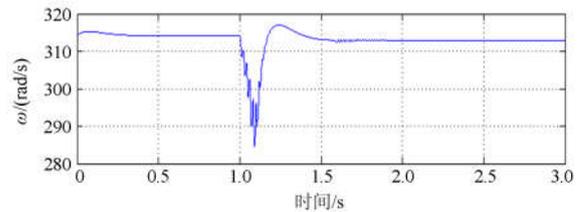


图 17 电网频率骤降时 VSG 机械转速

Fig. 17 VSG mechanical speed when the grid frequency drops

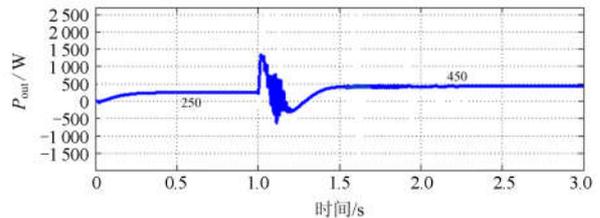


图 18 电网频率骤降时 VSG 输出功率

Fig. 18 VSG output power when the grid frequency drops

2) 设定 VSG 初始参考功率  $P_{ref}=250$  W,  $t=1$  s 时, 由于负荷突减, 电网频率从 50 Hz 变换到 50.2 Hz。如图 19 所示, VSG 检测到电网频率上升, 将多余电能转换为动能存储在虚拟转子上, 故虚拟同步发电机在电网频率突增后其机械转速会增加; 随后因为调频器起作用, 机械转速开始下降。如图 20 所示, 经过 1.5 s 左右的暂态响应, 系统输出功率  $P_{out}$  从原来的 250 W 减小至 50 W。

根据 VSG 对电网频率的响应可知, 当电网频率出现扰动后, VSG 的输出有功会出现相应的调节, 这体现了 VSG 控制较传统并网控制具有明显的抑制频率扰动的优点。

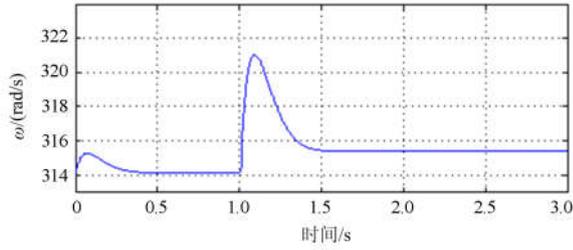


图 19 电网频率突增时 VSG 机械转速

Fig. 19 VSG mechanical speed when the grid frequency raises

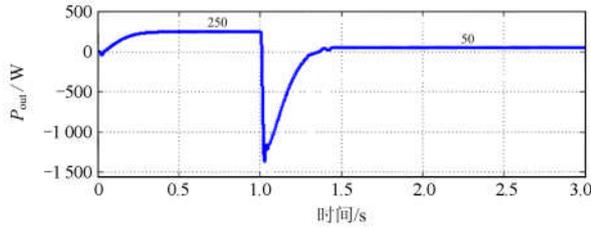


图 20 电网频率突增时 VSG 输出功率

Fig. 20 VSG output power when the grid frequency increases

## 5 实验验证

为了验证所提方法的有效性, 搭建了以 TMS320F28335 DSP 为主控制芯片的小功率等级的实验平台, 实验主电路如图 1 所示, 光伏电源用理想电压源与内阻串联的等效模型替换, 储能电池采用 12 节 3.2 V/200 Ah 电池串联构成 38.4 V/200 Ah 低压蓄电池组, 实测开路电压为 39.8 V, 主要实验参数如表 3 所示。

表 3 系统实验参数

Table 3 System experimental parameters

参数	数值	参数	数值
电感 $L_1/L_2$	0.8 mH	虚拟转动惯量 $J$	0.001 kg·m <sup>2</sup>
电容 $C_1/C_2$	0.96 mF	阻尼系数 $D$	0.05 N·m·s/rad
滤波电感及内阻 $L/R$	4 mH/0.03 Ω	光伏电源 $E_{pv}$	38 V
滤波电容 $C$	5 μF	光伏内阻 $R_{pv}$	2.54 Ω
本地负荷	2.54 Ω	电网电压幅值 $U$	17 V

图 21 为设定系统输出功率参考  $P_{ref}=40$  W, 光伏功率参考  $P_{pv}^*=80$  W (因为  $P_{pv}=(E_{pv}-V_{pv})V_{pv}/R_{pv}$ , 即光伏输入电压参考设置为  $v_{pv}^*=31.56$  V) 的稳态波形。由图 21 可知, 直流链电压  $V_{dc}=48$  V, 输入光伏电压  $V_{pv}=31.56$  V, 实现升压比为 1.52, 验证了准 Z 源网络的升压功能。

图 22 为光伏输出功率保持 80 W 不变时(电压参考值  $v_{pv}^*=31.56$  V), VSG 输出功率指令从 40 W 阶跃

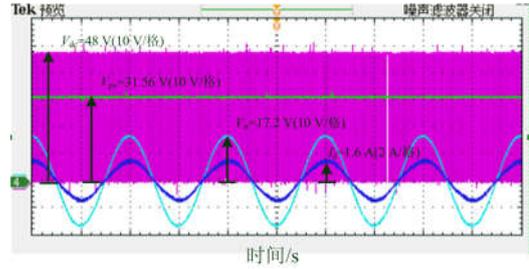


图 21 稳态实验波形

Fig. 21 Steady state experimental waveform

到 120 W 的实验波形。从图 22 中可以看到光伏电源的电压一直稳定在 31.56 V, 保持输出功率稳定为 80 W; 蓄电池电流  $i_b$  从 -0.98 A 变到 1.21 A, 对应着电池从充电 38.60 W 变到放电 47.66 W (电容  $C_1$  的电压被电池钳位在  $V_{C1}=39.39$  V,  $P_b=V_{C1}i_b$ ); VSG 输出 a 相电压幅值  $V_a=17.2$  V, a 相电流幅值  $I_a$  从 1.64 A 变到 4.8 A, 系统输出功率从 42.31 W 变到 123.84 W ( $P_{out}=1.5I_aV_a$ )。考虑电感电容的寄生内阻损耗、开关损耗及测量误差, 实验结果表明蓄电池能够及时通过充放电去弥补 VSG 所需调度功率。

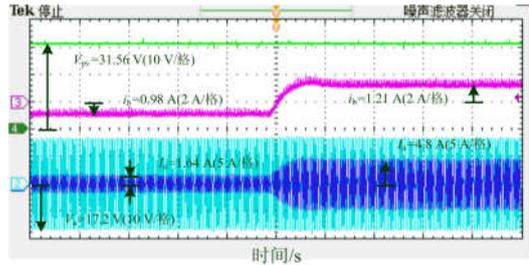


图 22 输出功率阶跃响应的实验波形

Fig. 22 Experimental waveform of output power step response

图 23 为 VSG 输出功率指令保持  $P_{ref}=80$  W 时, 光伏功率从 120 W 阶跃到 40 W (即  $v_{pv}^*$  从 26.5 V 阶跃到 35.1 V) 的实验波形。从图 23 中可以看到 VSG a 相电压  $u_a$ 、a 相电流  $i_a$  的幅值分别稳定在为 17.2 V 和 4.8 A, 系统输出功率保持在 82.56 W; 光伏电压从 26.5 V 阶跃到 34.8 V, 即光伏功率从 119.9 W 变到 42.8 W; 蓄电池电流  $i_b$  从 -0.85 A 变到 1.1 A, 对应着电池从充电

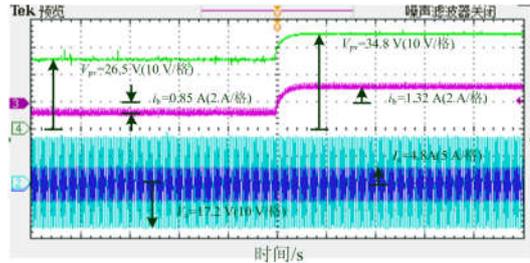


图 23 输入功率阶跃响应的实验波形

Fig. 23 Experimental waveform of input power step response

33.48 W 变到放电 43.34 W ( $V_{C1} \approx 39.39$  V)。考虑电感电容的寄生内阻损耗、开关损耗及测量误差, 实验结果表明蓄电池在光伏功率发生波动时能自动弥补功率缺额, 保证系统输出功率稳定。

## 6 总结

本文针对在准Z源阻抗网络 $C_1$ 上并联蓄电池的新型光储发电系统, 提出电网友好型并网控制策略——VSG技术; 分析了准Z源直通占空比与VSG必要参数的关系, 为文中所提新型光储发电系统在VSG控制参数设计方面提供了参考标准。对文中所提策略进行了仿真和实验验证, 得出以下结论:

1) 本文所提策略中, 蓄电池能够吸收或释放大功率支持VSG摇摆过程和功率调度需求。

2) 当光伏功率发生波动时, 蓄电池能够自动弥补光伏功率的缺额, 使VSG平稳定地向后级传送功率。

3) 由于逆变桥采用了VSG并网控制策略, 系统能够通过检测电网频率的波动, 利用自身惯性抑制频率的恶化, 并通过调频器的作用, 调节虚拟同步发电机输出有功功率, 参与电网调频。

## 参考文献

- [1] 全球能源互联网发展合作组织成果发布会. 跨国跨洲电网互联技术与展望[EB/OL]. [2018-02-22]. <http://www.geidco.org/sites/Xinhuiyi/index.html#her>.
- [2] 杨峰峰, 杨旭红. 基于LCL滤波有源阻尼控制的Z源逆变器并网研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(5): 38-45.  
YANG Fengfeng, YANG Xuhong. Research on Z-source inverter grid-connected system based on LCL filter of active damping control[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(5): 38-45.
- [3] 薛阳, 李华郁, 阚东跃, 等. 基于反馈线性化鲁棒控制 $\mu$ 方法的准开关升压型逆变器光伏并网策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 47-52.  
XUE Yang, LI Huayu, KAN Dongyue, et al. Research on grid-connected control for the quasi-switched boost inverter of photovoltaic system based on feedback linearization and  $\mu$ -synthesis method[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 47-52.
- [4] 李媛, 彭方正. Z源/准Z源逆变器在光伏并网系统中的电容电压恒压控制策略[J]. 电工技术学报, 2011, 26(5): 62-69.  
LI Yuan, PENG Fangzheng. Constant capacitor voltage control strategy for z-source/quasi-Z-source inverter in grid-connected photovoltaic systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(5): 62-69.
- [5] LI Yuan, JIANG Shuai, CINTRON-RIVERA J G, et al. Modeling and control of quasi-Z-source inverter for distributed generation applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 60(4): 1532-1541.
- [6] MAKAROV Y V, DU Pengwei, KINTNER-MEYER M C W, et al. Sizing energy storage to accommodate high penetration of variable energy resources[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012, 3(1): 34-40.
- [7] 石荣亮, 张兴, 刘芳, 等. 提高光储柴独立微网频率稳定性的虚拟同步发电机控制策略[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(22): 77-85.  
SHI Rongliang, ZHANG Xing, LIU Fang, et al. Control strategy of virtual synchronous generator for improving frequency stability of islanded photovoltaic-battery-diesel microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(22): 77-85.
- [8] 温焯婷, 戴瑜兴, 毕大强, 等. 一种电网友好型光储分布式电源控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 464-475.  
WEN Yeting, DAI Yuxing, BI Daqiang, et al. A grid friendly PV/BESS distributed generation control strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 464-475.
- [9] 林岩, 张建成. 含虚拟同步发电机的光/柴/储独立微网控制策略[J]. 电网技术, 2017, 41(4): 1277-1284.  
LIN Yan, ZHANG Jiancheng. Control strategy of islanded photovoltaic-diesel-storage microgrid with virtual synchronous generator[J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1277-1284.
- [10] CINTRON-RIVERA J G, LI Y, JIANG S, et al. Quasi-Z-source inverter with energy storage for Photovoltaic power generation systems[C] // Applied Power Electronics Conference and Exposition, March 6-11, 2011, Fort Worth, Texas, USA: 401-406.
- [11] HU Sideng, LIANG Zipeng, FAN Dongqi, et al. Hybrid ultracapacitor-battery energy storage system based on quasi-Z-source topology and enhanced frequency dividing coordinated control for EV[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(11): 7598-7610.
- [12] SUN Dongsun, GE Baoming, PENG Fangzheng, et al. Power flow control for quasi-Z source inverter with battery based PV power generation system[C] // Energy Conversion Congress and Exposition, September 17-22, 2011, Phoenix, USA: 1051-1056.
- [13] LI Fenglin, GE Baoming, SUN Dongsun, et al. Quasi-Z source inverter with battery based PV power generation system[C] // International Conference on Electrical

- Machines and Systems, August 20-23, Beijing, China: 2011: 1-5.
- [14] GE Baoming, ABU-RUB H, PENG Fangzheng, et al. An energy-stored quasi-Z-source inverter for application to photovoltaic power system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(10): 4468-4481.
- [15] GE Baoming, PENG Fangzheng, ABU-RUB H, et al. Novel energy stored single-stage photovoltaic power system with constant DC-link peak voltage[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 5(1): 28-36.
- [16] RATHORE B, CHAKRABARTI S, ANAND S. Frequency response improvement in microgrid using optimized VSG control[C] // Power Systems Conference, December 19-20, 2016, Bhubaneswar, India: 1-6.
- [17] 国家发展改革委. 国家能源局关于促进智能电网发展的指导意见[EB/OL]. [2018-02-22]. [http://www.nea.gov.cn/2015-07/07/c\\_134388049.htm](http://www.nea.gov.cn/2015-07/07/c_134388049.htm).
- [18] 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, 39(19): 82-89.
- CHENG Chong, YANG Huan, ZENG Zheng, et al. Rotor inertia adaptive control method of VSG[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(19): 82-89.
- [19] LIU Ju, YANG Dongjun, YAO Wei, et al. PV-based virtual synchronous generator with variable inertia to enhance power system transient stability utilizing the energy storage system[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 429-437. DOI: 10.1186/s41601-017-0070-0.
- [20] LI Bin, ZHOU Lin, YU Xinrui, et al. Improved power decoupling control strategy based on virtual synchronous generator[J]. IET Power Electronics, 2017, 10(4): 462-470.
- [21] LI Mingxuan, WANG Yue, XU Ningyi, et al. A power decoupling control strategy for droop controlled inverters and virtual synchronous generators[C] // Power Electronics and Motion Control Conference, May 22-26, 2016, Hefei, China: 1713-1719.
- [22] 陈天一, 陈来军, 郑天文, 等. 基于模式平滑切换的虚拟同步发电机低电压穿越控制方法[J]. 电网技术, 2016, 40(7): 2134-2140.
- CHEN Tianyi, CHEN Laijun, ZHENG Tianwen, et al. LVRT control method of virtual synchronous generator based on mode smooth switching[J]. Power System Technology, 2016, 40(7): 2134-2140.
- [23] 尚磊, 胡家兵, 袁小明, 等. 电网对称故障下虚拟同步发电机建模与改进控制[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 403-411.
- SHANG Lei, HU Jiabing, YUAN Xiaoming, et al. Modeling and improved control of virtual synchronous generators under symmetrical faults of grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 403-411.
- [24] XU Hanzhen, ZHANG Xin, LIU Fang, et al. A reactive power sharing strategy of VSG based on virtual capacitor algorithm[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(9): 7520-7531.
- [25] 祝钧, 李瑞生, 毋炳鑫, 等. 交直流混合微电网接口变换器虚拟同步发电机控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(11): 28-34.
- ZHU Jun, LI Ruisheng, WU Bingxin, et al. Virtual synchronous generator operation of interlinking converter between AC and DC microgrids[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(11): 28-34.
- [26] 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.
- LÜ Zhipeng, SHENG Wanxing, ZHONG Qingchang, et al. Virtual synchronous generator and its applications in micro-grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2591-2603.

收稿日期: 2018-03-27; 修回日期: 2018-05-12

作者简介:

漆万碧(1994—), 女, 硕士研究生, 研究方向为新能源并网技术; E-mail: 1845571702@qq.com

李媛(1980—), 女, 博士研究生, 副教授, 研究方向为可再生能源发电技术; E-mail: 86874034@qq.com

方番(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源逆变器控制技术。E-mail: 356511496@qq.com

(编辑 周金梅)