

单级式光伏发电有功备用虚拟同步发电机频率支撑策略

贾德香¹, 钟诚², 柳占杰¹, 郑厚清¹, 郭阳³

(1. 国网能源研究院有限公司, 北京 102209;

2. 东北电力大学 电气工程学院, 吉林 吉林 132012;

3. 北京中电普华信息技术有限公司, 北京 100192)

摘要:光伏发电系统通常工作在最大功率跟踪模式,无法为电网提供惯性和频率支撑。虚拟同步发电机(VSG)控制可提供类似同步发电机的行为特性,但通常应用于储能或光储系统。以单级式光伏拓扑为对象,提出一种有功备用的光伏VSG控制策略。该策略源于光伏阵列 $P-V$ 特性曲线和同步发电机功角特性曲线的相似性,光伏阵列电压直接响应电网频率变化,实现对直流电压控制的同时,提供类似同步发电机“自发”惯性响应。设计了一种基于短路电流估算的光伏最大功率估算方法。该方法无需额外传感器和复杂估计算法,与所提VSG控制策略融合,实现递推估算。不同场景下仿真结果验证了所提方法的有效性和优越性。

关键词:虚拟同步发电机;有功备用;惯性响应;频率支撑;最大功率点估算

中图分类号: TM712 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed24193

Virtual Synchronous Generator of Single-stage Photovoltaic Power Generation System with Active Power Reserve for Frequency Support

JIA Dexiang¹, ZHONG Cheng², LIU Zhanjie¹, ZHENG Houqing¹, GUO Yang³

(1. State Grid Energy Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China; 2. College of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, Jilin, China; 3. Beijing China-power Information Technology Co., Ltd., Beijing 100192, China)

Abstract: Photovoltaic (PV) generation usually operates in maximum power point tracking (MPPT) mode, which cannot provide inertia and frequency support for the power system. Virtual synchronous generator (VSG) control is an attractive control method that can provide the similar behavior of synchronous generator (SG). However, it is commonly applied to the energy storage system or PV generators with energy storage systems. A novel PV-VSG control strategy based on active power reserve for single-stage PV generation was proposed. The principle of the strategy comes from the similarities of the power-angle characteristic curve and the PV array $P-V$ characteristic curve. PV array voltage is directly regulated based on the grid frequency, and realize control of DC voltage while providing "spontaneous" inertial response similar to synchronous generators. In addition, a maximum power estimation method based on real-time short-circuit current estimation was designed, and the additional sensors and complex estimation algorithms are not required. Integrated with VSG control strategy, the recursive estimation was implemented. The simulation results in different scenarios have verified the effectiveness and superiority of the proposed method.

Key words: virtual synchronous generator(VSG); active power reserve; inertial response; frequency support; maximum power point estimation

近年来,以光伏、风电为代表的新能源发电接入电网容量不断增大,改善了电力能源结构,实现了低碳排放。但是,光伏发电具有随机性和

间歇性,且通常采用最大功率跟踪控制^[1],因而,光伏渗透率不断提高,将降低电力系统惯性和调频能力,引发频率稳定性弱的新问题^[2-3]。

基金项目:国家自然科学基金联合基金(U1866601);吉林省自然科学基金(20190201289JC)

作者简介:贾德香(1971—),男,博士,正高级工程师,Email:16702324@qq.com

通讯作者:钟诚(1985—),男,博士,副教授,Email:zhongcheng@neepu.edu.cn

为实现新能源的友好接入,虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)技术被提出,使得并网逆变器能够模拟同步发电机的特性,提供有功和无功支撑^[4-5]。但是,常规VSG控制主要针对直流侧为储能系统,即要求直流侧为“电压恒定、容量无限”的电源^[6-9]。而光伏发电具有较强随机性,且直流电压恒定需要通过控制实现,因此常规VSG应用范围有限。为此,有学者提出构造光储联合系统^[10-12],弥补光伏发电随机性的不足,但其本质直流侧仍为储能电池。

近期,已有少量文献探讨无储能光伏发电VSG控制。文献[13-15]中,针对双级式光伏发电系统,前级DC/DC变换器采用定电压控制,维持中间直流电压稳定,而后级网侧变流器采用常规VSG控制。但是,对于单级式光伏发电系统,只包含一级并网逆变器,其需同时兼顾功率跟踪和直流电压控制。文献[16]提出一种考虑源动态特性VSG控制方法。该方法在常规VSG控制中引入附加控制,避免最大可用功率不足而造成直流电压跌落。但该方法是一种切换控制,且没考虑光伏有功备用运行方式。文献[17-18]提出一种有功备用光伏VSG控制。但是,该类方法为功率控制方式,频率支撑依赖测量频率和频率变化率信息,没有完全模拟同步发电机惯性行为。

综上,本文提出一种有功备用单级光伏发电系统VSG有功控制策略。该方法使得光伏阵列电压直接响应电网电压,提供自发惯性响应。另外,设计一种递推估算光伏最大功率的方法,与所提VSG方法融合,实现有功备用运行。

1 VSG控制策略

1.1 VSG控制原理

本文所提VSG控制策略源于同步发电机功角特性曲线和光伏阵列 $P-V$ 特性曲线的相似性。

电力系统中,常规同步发电机的功角特性曲线可以描述为

$$P_s = \frac{EU}{X} \sin \delta \quad (1)$$

$$\delta = \int (\omega_s - \omega_g) dt \quad (2)$$

式中: P_s 为同步发电机输出有功; E 为同步发电机电动势幅值; U 为电网电压幅值; δ 为两个电压矢量的功角差; X 为虚拟阻抗; ω_s 为同步发电机电动势角频率; ω_g 为并网点电压角频率。

工程上,光伏阵列通常采用单二极管模型表

述,其数学模型^[19-20]为

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{A k T / q}} - 1 \right) - \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_{sh}} \quad (3)$$

式中: I_{pv} 为光伏电池输出电流; I_{ph} 为光生电流; I_0 为二极管反向饱和电流; q 为电荷; k 为波兹曼常数; V_{pv} 为光伏电池输出电压; R_s 为串联电阻; R_{sh} 为并联电阻; A 为二极管理想因子; T 为光伏阵列温度。

式(3)为非线性隐函数,为分析其曲线特性,需要做一定简化。通常工程允许假设: $I_{ph}=I_{sc}$, I_{sc} 为短路电流;通常 R_s 值的很小。由上述假设,式(3)可简化为

$$I_{pv} = I_{sc} \left\{ 1 - C_1 \left[\exp \left(\frac{V_{pv}}{C_2 V_{oc}} \right) - 1 \right] \right\} \quad (4)$$

式中: V_{oc} 为开路电压; C_1, C_2 为相应系数。

为简化,对 $\exp[V_{pv}/(C_2 V_{oc})]$ 进行泰勒展开,并忽略高阶项,则式(4)可以进一步简化为

$$I_{pv} \approx I_{sc} - C_1 I_{sc} [V_{pv}/(C_2 V_{oc})] \quad (5)$$

依据式(5),光伏输出功率近似表示为

$$P_{pv} = I_{pv} V_{pv} \approx V_{pv} I_{sc} - [C_1/(C_2 V_{oc})] I_{sc} V_{pv}^2 \quad (6)$$

由式(6)易知,光伏阵列 $P-V$ 特性为单峰值曲线。设 V_{mpp} 为光伏峰值功率,在 $V_{pv}=[0, V_{mpp}]$ 时, P_{pv} 随着 V_{pv} 的增大而增大,且随着变化率 dP_{pv}/dV_{pv} 逐渐减小。

本文以sun-power公司的SPR-305E-WHT光伏板为例,光伏阵列特性曲线如图1所示;取与光伏阵列取相同额定功率,同步发电机特性曲线如图2所示。

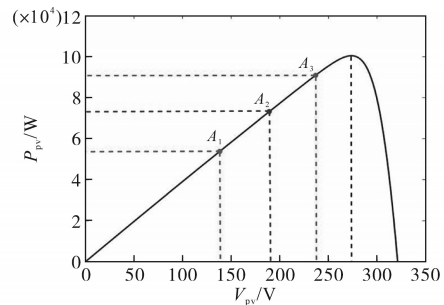


图1 光伏阵列特性曲线

Fig.1 PV array $P-V$ characteristic curve

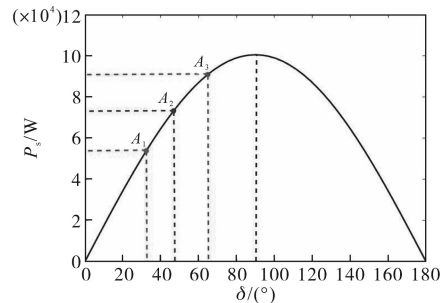


图2 同步发电机功角特性曲线

Fig.2 Synchronous generator power angle characteristic curve

研究图1和图2左半段曲线对应关系,以功率相同为联系, V_{pv} — δ 对应特性曲线如图3所示。

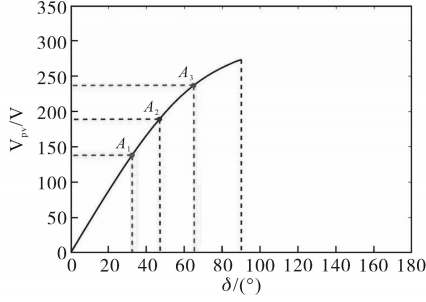


图3 V_{pv} — δ 对应特性曲线

Fig.3 V_{pv} — δ correspondence characteristic curve

由图3可知,左半段曲线内, V_{pv} 和 δ 近似为线性关系,尽管与光伏阵列 P — V 特性曲线形状不完全相同,但光伏阵列 P — V 特性曲线和同步发电机功角特性曲线具有相似性。基于这些相似性,本文将光伏电压 V_{pv} 类比于功角 δ ,构造新的VSG控制。

1.2 VSG控制结构

本文所提单级VSG控制方框图如图4所示,它主要包括有5个控制环节:最大功率估算环节、下垂控制环节、转子运动方程模拟环节、功角计算环节和电压电流跟踪环节。

最大功率估算环节用于实时估算当前光伏发电的最大可用功率。本文设计了一种基于实时短路电流估算的最大功率估计算法,具体过程将在第3节阐述。

下垂控制环节中,频率标么值乘以下垂系数获得变化减载率 $\Delta r^{\circ}\%$ 。 $\Delta r^{\circ}\%$ 叠加在初始减载率 $r_0\%$,获得减载率参考值 $r^{\circ}\%$ 。减载率参考值定义为

$$r^{\circ}\% = \frac{1 - P_m}{P_{map}} \quad (7)$$

式中: P_{map} 为光伏阵列最大可用功率; P_m 为当前给定虚拟机械功率。

P_m 同时受 $r^{\circ}\%$ 和 P_{map} 影响,不同光照下, P_{map} 不同。因而,下垂控制环节提供的功率不同,具有一定自适应性。

模拟转子运动方程环节与典型VSG控制策略保持一致。转子运动方程如下式:

$$J \frac{d\omega_s}{dt} = \frac{1}{\omega_s} (P_m - P_e) - D(\omega_s - \omega_0) \quad (8)$$

式中: J 为VSG动惯量; ω_s 为VSG转速; ω_0 为额定角频率; P_e 为VSG的输出电磁功率; D 为阻尼系数。

利用式(8)来获得VSG的角频率信息 ω_s , 积分后获得VSG的相位角 φ 。功角计算模块的功能是计算功角 δ , 并将其变换为光伏阵列电压参考值 V_{ref} 。

基于1.1节的描述,本文将功角 δ 类比于光伏阵列电压 V_{pv} 。功角 δ 为电网电压矢量 U 相位和VSG电压矢量 E 相位的差值。VSG相位 φ 已经获得。但通常,电网相位需要通过锁相环获得。锁相环存在测量延迟和误差。本文中,采用电压矢量运算获得 δ , 无需锁相环。

依据矢量外积公式,可知:

$$|E \times U| = |E||U|\sin\delta = E_{\alpha}U_{\beta} - E_{\beta}U_{\alpha} \quad (9)$$

式中: δ 为VSG电压矢量 E 和电网电压矢量 U 之间的夹角,即功角; E_{α} , U_{α} 分别为矢量 E 和 U 在 α 轴上的分量; E_{β} , U_{β} 分别为矢量 E 和 U 在 β 轴上的分量。

通过式(9)反推,得到功角的计算公式:

$$\delta = \arcsin\left(\frac{E_{\alpha}U_{\beta} - E_{\beta}U_{\alpha}}{|E||U|}\right) \quad (10)$$

简单的,让光伏阵列电压参考值 V_{pv}^* 和 δ 成线性关系,即

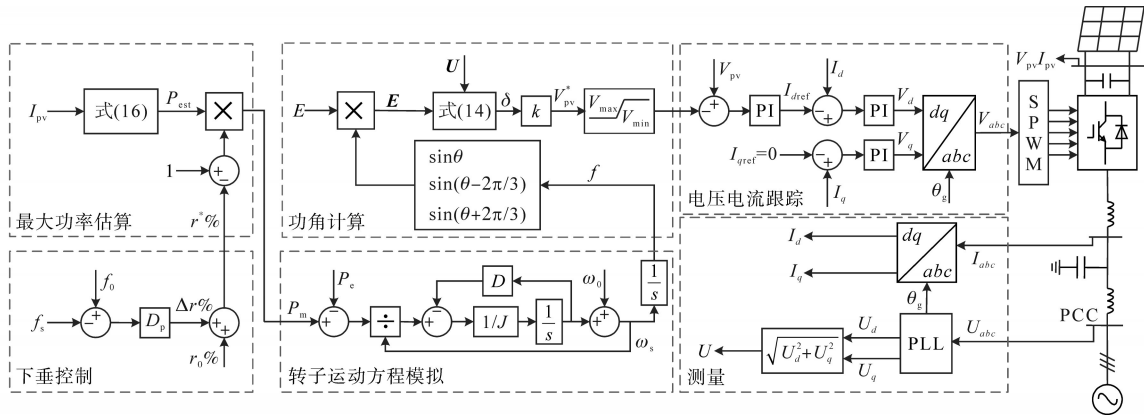


图4 虚拟同步发电机控制整体框图

Fig.4 The whole control diagram of VSG strategy

$$V_{pv}^* = k\delta \quad (11)$$

式中: k 为线性类比因子。

电压电流跟踪环节中双环控制为光伏系统典型控制方法。通过控制有功电流 I_d 控制光伏阵列电压 V_{pv} ,使其跟踪电压参考值 V_{pv}^* 。通过饱和限值器,使得光伏阵列电压小于最大功率点电压 V_m ,迫使系统工作 $P-V$ 特性曲线左侧。无功电流参考 I_q^* 设置为零,实现单位功率因数并网。

2 光伏最大功率估计算法

2.1 基于短路电流的最大功率估算

注意到,不同环境条件的最大功率点电流 I_m 和短路电流 I_{sc} 近似成比例关系^[20],即

$$I_m = k_{lsc} I_{sc} \Rightarrow k_{lsc} = \frac{I_m}{I_{sc}} \quad (12)$$

式中: I_m 为最大功率点电流; k_{lsc} 为关系比值。

定义 $I_{r^*\%}/I_{sc}$,其中 $I_{r^*\%}$ 为对应 $r^*\%$ 的光伏电流。显然,当 $I_{r^*\%} = I_m$ 时, $r^*\% = 0$;当 $I_{r^*\%} = I_{sc}$ 时, $r^*\% = 1$ 。以sun-power公司光伏阵列为例,不同光照、温度条件下, $P-V$ 特性曲线上山段的 $I_{r^*\%}/I_{sc}$ 与 $r^*\%$ 关系曲线如图5所示。

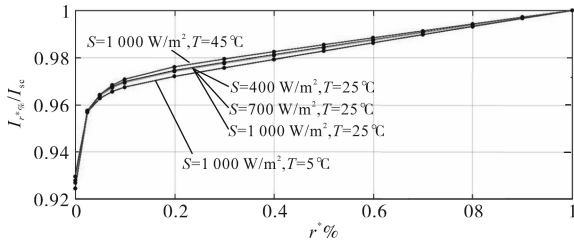


图5 不同环境条件下的 $I_{r^*\%}/I_{sc}-r^*\%$ 曲线

Fig.5 The curves of $I_{r^*\%}/I_{sc}-r^*\%$ under various environment conditions

不同光照、温度下的曲线近似重叠,这带来极大的便利。不同光照、温度下的 $I_{r^*\%}/I_{sc}$ 与 $r^*\%$ 关系可以采用数学式表达。综合考虑精确度和复杂度,本文采用分段曲线来表述 $I_{r^*\%}/I_{sc}$ 与 $r^*\%$ 之间的关系,如下式:

$$\frac{I_{r^*\%}}{I_{sc}} = \begin{cases} a_0 - \frac{a_1 r^*\% + a_2}{r^*\% + a_3} & r^*\% \leq 0.1 \\ a_4 r^*\% + a_5 & r^*\% > 0.1 \end{cases} \quad (13)$$

式中: $a_0 \sim a_5$ 为拟合系数。

本文利用曲线拟合工具,依据光伏阵列数学模型数据进行线性回归,得到系数 $a_0 \sim a_5$ 的数值。对应的拟合曲线图如图6所示。

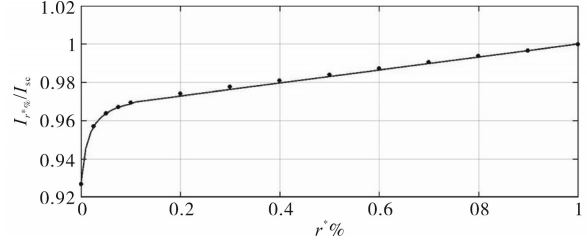


图6 $I_{r^*\%}/I_{sc}-r^*\%$ 曲线拟合曲线

Fig.6 The fitting curve of $I_{r^*\%}/I_{sc}-r^*\%$

图6中,拟合曲线最大拟合误差为0.002 3,均方根误差为0.001 4。可见,式(13)分段曲线具有良好的拟合精度。

根据式(13),估算出短路电流 I_{sc} 如下式:

$$I_{sc} = \begin{cases} \frac{(r^*\% + a_3)I_{r^*\%}}{(a_0 - a_1)r^*\% + a_0 a_3 + a_2} & r^*\% \leq 0.1 \\ \frac{I_{r^*\%}}{a_4 r^*\% + a_5} & r^*\% > 0.1 \end{cases} \quad (14)$$

将式(14)估算的短路电流 I_{sc} 代入式(12),可估算出最大功率点电流 I_m 。

光伏最大功率点电压 V_m 可通过 Lambert-W 函数^[20-21]获得:

$$V_m = \eta W \left(\frac{I_m (1 + \frac{R_s + \sqrt{R_{sh} R_s + R_s^2}}{R_{sh}})}{I_s} - R_s I_m \right) \quad (15)$$

式中: η 为转换效率; W 为 Lambert-W 函数。

结合式(12)、式(14)和式(15),可估算光伏最大功率 P_{est} :

$$P_{est} = V_m I_m = \begin{cases} \frac{V_m k_{lsc} (r^*\% + a_3) I_{r^*\%}}{(a_0 - a_1)r^*\% + a_0 a_3 + a_2} & r^*\% \leq 0.1 \\ \frac{V_m k_{lsc} I_{r^*\%}}{a_4 r^*\% + a_5} & r^*\% > 0.1 \end{cases} \quad (16)$$

2.2 递推收敛过程分析

式(16)中,需要 $r^*\%$ 和对应的电流 $I_{r^*\%}$,才能估算最大功率 P_{est} ,但是, $r^*\%$ 对应的电流 $I_{r^*\%}$ 为未知信息。为启动算法,可以将当前采样电流 I_{pv} 代替 $I_{r^*\%}$ 代入式(16),计算 P_{est} 。但由于 $I_{pv} \neq I_{r^*\%}$,因此,该估算值为非准确值。该算法与所提VSG控制结合后,具有潜在收敛特性。最大功率估计原理如图7所示,结合图7说明 P_{est} 迭代收敛过程。

图7中的曲线为光伏阵列 $P-I$ 特性曲线的下山段,对应于光伏阵列 $P-V$ 特性曲线的上山段。

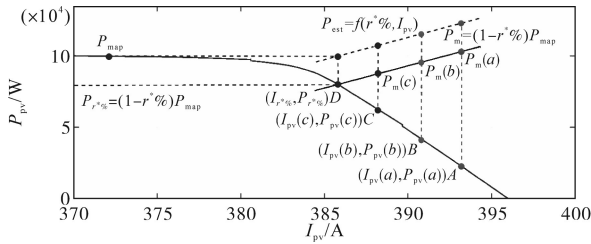


图7 最大功率估计原理

Fig.7 The iterative principle of maximum power estimation method

1) 初始工作点为 $A(I_{pv}(a), P_{pv}(a))$, 位于目标功率点 $D(I_{pv}^*, P_{pv}^*)$ 的右侧。此时 $P_{pv}(a) < P_{pv}^*$, 而 $I_{pv}(a) > I_{pv}^*$ 。式(16)表述的估算功率 P_{est} 为单调递增函数。因此, 最大光伏功率估计值 $P_{est}(a)$ 大于实际最大可用功率 P_{map} , 如图7所示, 此时, 虚拟机械功率 $P_m(a) > P_{r\%}^*$ 。

2) 考虑光伏电压跟踪控制速度很快, $P_{pv}(a)$ 和 $P_e(a)$ 近似相等。由于 $P_m(a) > P_e(a)$, 即可认为 $P_m(a) > P_{pv}(a)$, 受转子运动控制环节的影响, 在下一个控制周期 b 中, 虚拟电磁功率 $P_e(b)$ 将增大, 即 $P_e(b) > P_e(a)$ 。显然, $P_e(b)$ 更接近目标功率点 D , 见图7中点 B 。

3) 相应的, $I_{r\%} < I_{pv}(b) < I_{pv}(a)$, 再次由式(16)计算控制周期 b 的 $P_{est}(b)$, $P_{map} < P_{est}(b) < P_{est}(a)$ 。同理, 由于式(16)是单调递增函数, $P_{r\%} < P_m(b) < P_m(a)$, $P_m(b)$ 更接近目标功率 $P_{r\%}^*$ 。由于 $P_m(b) > P_e(b)$, 所以在下一个控制周期 c 中, 受转子运动模拟控制环节的影响, $P_e(c)$ 继续增加, 见图7中 C 点。

基于上述分析, 在VSG控制过程中最大功率估计值 $P_{est}(i)$ 不断增大, 直到 $P_{est}(i) = P_{map}$, 即 $P_{est}(i) = P_{r\%}^*$ 。同时, $P_m(i)$ 持续减少, 而 $P_e(i)$ 持续增加, 光伏系统功率最终收敛到目标功率点 D 。如果初始运行点位于目标点左侧, 分析过程类似。

3 仿真分析

为了验证所提VSG控制策略的有效性, 构建了如图8所述的光柴孤岛微电网模型。该孤岛微电网容量配置如表1所示。

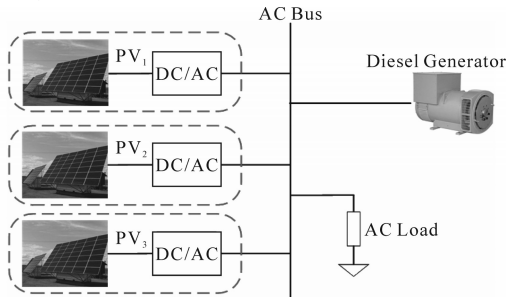


图8 光柴孤岛微电网模型

Fig.8 Diesel-PV islanded microgrid model

表1 孤岛微电网容量配置

参数	额定功率	额定电压/V	额定频率/Hz
柴油机	480 kW	380	50
PV ₁	100 kW	380	50
PV ₂	100 kW	380	50
PV ₃	100 kW	380	50
AC 负荷	650 kW+120 kvar	380	50

3.1 “自发”惯性响应验证

首先, 验证所提控制策略提供的惯性支撑。为了消除下垂控制对惯性响应效果的干扰, 禁用所提VSG方法中的下垂控制, 只提供惯性响应。与光伏不参与调频控制进行仿真对比。

外部环境为标准条件 ($S=1\ 000\ \text{W/m}^2$, $T=25\ ^\circ\text{C}$)。光伏发电最初保留20%的减载功率(最大功率为300 kW), 负载在30 s时增加60 kW, 导致频率下降。仿真结果如图9所示。

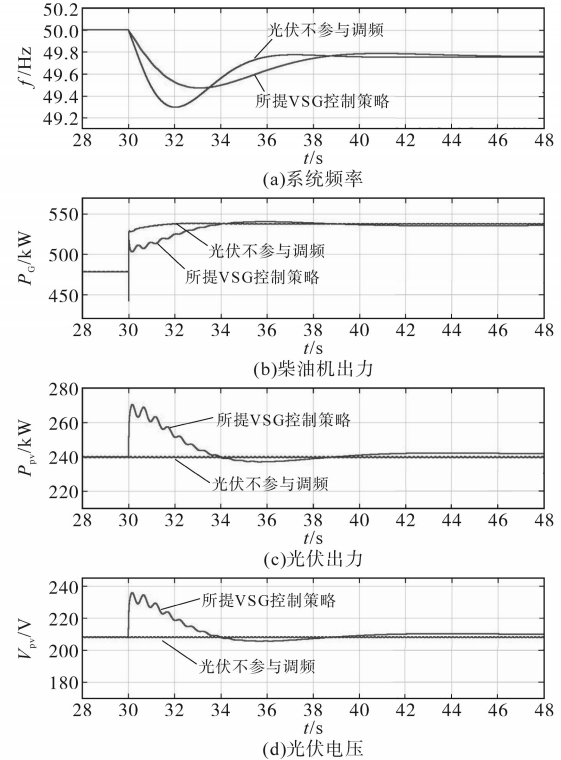


图9 惯性验证的仿真结果

Fig.9 Simulation results for inertial validation

当负荷突增时, 所提控制策略能够为系统提供惯性支撑, 减小了频率变化率, 提高系统频率最低点。当光伏不参与调频时, 最低点频率为49.3 Hz; 当光伏参与系统频率响应时, 最低点频率为49.47 Hz。由于光伏发电系统供惯性支撑, 二者系统稳定频率相同, 均为49.76 Hz。所提策略提供惯性支撑, 改善了微电网的频率控制。

3.2 调频效果验证

文献[21]提出了一种有功备用式光伏发电控

制(power reserve control VSG, PRC-VSG)。类似控制框图也可在文献[13-14, 17-18]中发现。文献[21]中PRG-VSG策略控制框图如图10所示。图10中, ω_g 来自锁相环的电网频率测量值, T_w 为wash-out滤波器时间常数, P_{de} 为减载功率。 $d\omega_g/dt$ 通过wash-out滤波器获得。

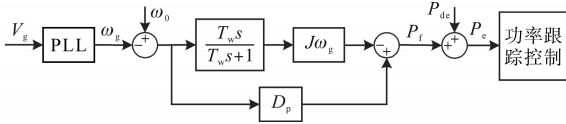


图10 文献[21]中PRC-VSG策略控制框图

Fig.10 PRC-VSG strategy control diagram in reference [21]

本文所提VSG控制策略与PRC-VSG控制策略和光伏不参与调频策略进行对比,3种调频策略中下垂系数 D_p 为40,惯性常数 J 为1.06。

3.2.1 标况下负载突增

外部环境为标准测试条件,光伏最初预留20%减载功率(最大功率为300 kW),负载在30 s时增加60 kW,导致频率下降。仿真结果如图11所示。

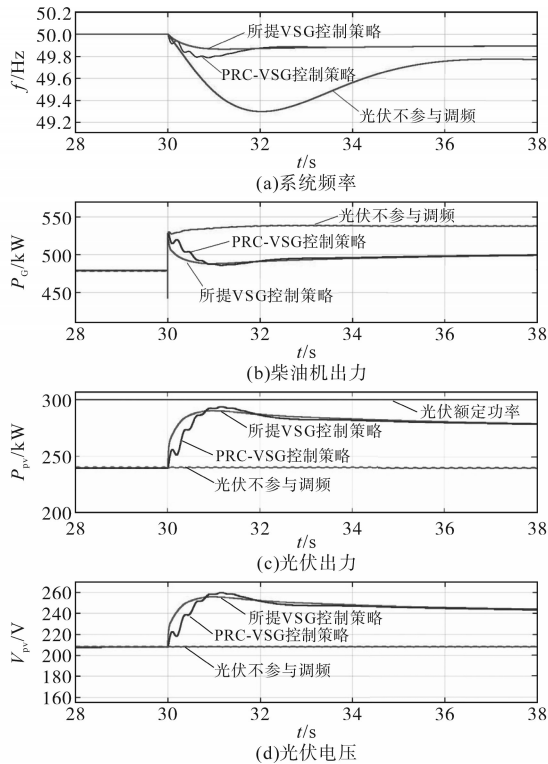


图11 负载突增时的系统仿真结果

Fig.11 Simulation results of load suddenly increase

图11中,在30 s前,光伏发电的总输出功率为240 kW,光伏减载20%功率。当 $\Delta f = 0$ 时,光伏系统以减载模式运行。30 s后,受负荷增加影响,系统频率降低。

对于光伏不调频系统,其输出功率保持在240 kW。系统频率最低点为49.3 Hz,稳定频率

为49.76 Hz。频率调节完全取决于柴油机,柴油机的功率随频率下降而增加,稳态功率为540 kW。

对于PRC-VSG光伏系统,随系统频率的降低,光伏系统会产生更多的有功来支持频率。光伏最终稳态功率为279 kW。微电网稳态频率为49.89 Hz,比无光伏调频系统高0.13 Hz。而频率最低点为49.79 Hz,比无光伏调频的高0.49 Hz。注意到,调频暂态过程中出现功率和频率振荡。

对于本文所提VSG控制方法,由于相同下垂控制回路,频率稳态值与PRC-VSG策略相同。然而,由于惯性响应产生机理不同,调频暂态过程不同。本文方法的最低频率为49.86 Hz,比PRC-VSG高0.07 Hz。所提VSG控制策略的输出功率和频率显现更平滑的暂态过程。

PRC-VSG控制策略的惯性响应取决于 $d\omega_g/dt$ 。锁相环输出频率 ω_g 经过wash-out滤波器获得 $d\omega_g/dt$,如图12所示。

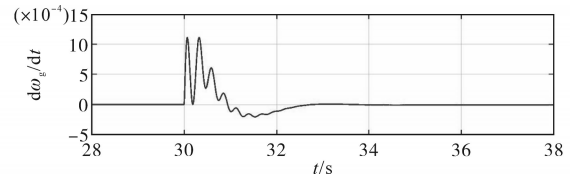


图12 PRC-VSG控制策略中 $d\omega_g/dt$

Fig.12 $d\omega_g/dt$ in the PRC-VSG control strategy

图12曲线显示了较为强烈的振荡。 $d\omega_g/dt$ 测量受滤波器延迟和衰减的影响,进而影响控制性能。相比较,本文所提VSG控制策略的惯性响应基于模拟转子运动方程,不需要 $d\omega_g/dt$ 测量,可更好模拟同步发电机的惯性。光伏输出功率和频率的动态更平滑,不受锁相环和低通滤波器的动态衰减,惯性响应更好,频率最低点更高。

3.2.2 随机光照负荷

仿真模型中导入随机光照和负荷数据(持续160 s),如图13所示。

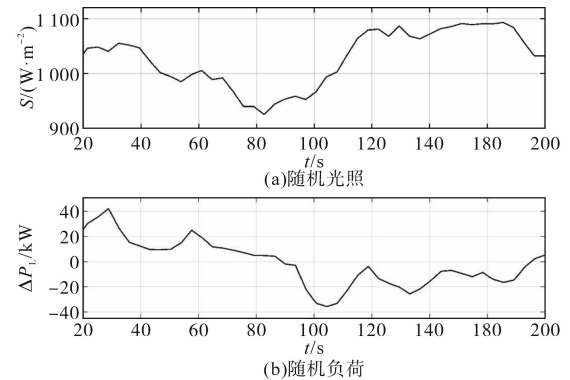


图13 随机光照负荷

Fig.13 The random load and irradiance

随机光照和负荷条件下的仿真结果如图14所示。相比于光伏不参与调频控制,两种光伏VSG控制策略下的系统频率波动更小。采用所提VSG策略、PRC-VSG策略和光伏不参与调频下的微电网最大频率偏差分别为0.09 Hz,0.15 Hz,0.23 Hz;频率均方根分别为50.017 7 Hz,50.028 5 Hz,50.045 5 Hz;均方根误差分别为0.051,0.082 5和0.132。仿真结果表明,在实际负载和辐照度条件下,采用所提出的VSG策略,系统频率偏差和波动更小,能更好地改善微电网频率响应。

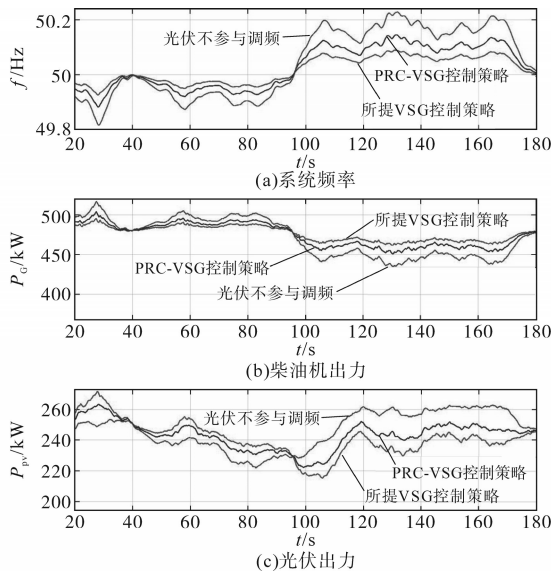


图14 随机光照负载时的仿真结果

Fig.14 Simulation results under the random load and irradiance conditions

4 结论

常规VSG技术可以提供惯性和频率支撑,但不能直接应用于光伏发电系统,尤其是单级式光伏发电系统。本文通过类比同步发电机功角特性曲线和光伏阵列 $P-V$ 特性曲线,提出了一种有功备用单级光伏发电系统VSG有功控制策略。当电网电压频率变化时,该方法将功角变化直接转换为光伏阵列电压变化,实现自发增加或减小光伏输出功率,产生惯性响应同时兼顾对直流电压控制。另外,所提最大功率点估算方法,依据当前测量光伏电流,快速估算最大功率点,无需额外的传感器和复杂估计算法。与所提VSG控制方法融合,实现有功备用控制。

但是,所提方法局限单峰值光伏系统,局部阴影场景时光伏特性曲线会出现多峰值。如何实现局部阴影下光伏有功备用VSG控制,将是后续研究工作的重点。

参考文献

- [1] 李春来,苑舜.基于阻抗在线观测的光伏逆变器控制策略研究[J].电气传动,2021,51(9):24-31.
LI Chunlai, YUAN Shun. Research on control strategy of PV inverter based on impedance on-line estimation[J]. Electric Drive, 2021, 51(9): 24-31.
- [2] 张剑云,李明节.新能源高渗透的电力系统频率特性分析[J].中国电机工程学报,2020,40(11):119-128.
ZHANG Jianyun, LI Mingjie. Analysis of the frequency characteristic of the power systems highly penetrated by new energy generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(11): 119-128.
- [3] 陈国平,李明节,许涛,等.关于新能源发展的技术瓶颈研究[J].中国电机工程学报,2017,37(1):20-26.
CHEN Guoping, LI Mingjie, XU Tao, et al. Study on technical bottleneck of new energy development[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 20-26.
- [4] 郑天文,陈来军,陈天一,等.虚拟同步发电机技术及展望[J].电力系统自动化,2015,39(21):165-175.
ZHENG Tianwen, CHEN Laijun, CHEN Tianyi, et al. Review and prospect of virtual synchronous generator technologies[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(21): 165-175.
- [5] 吕志鹏,盛万兴,刘海涛,等.虚拟同步机技术在电力系统中的应用与挑战[J].中国电机工程学报,2017,37(2):349-360.
LÜ Zhipeng, SHENG Wanxing, LIU Haitao, et al. Application and challenge of virtual synchronizer machine technology in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 349-360.
- [6] 何伟,熊俊杰,赵伟哲,等.一种虚拟同步发电机的附加阻尼控制策略研究[J].电气传动,2022,52(2):18-24.
HE Wei, XIONG Junjie, ZHAO Weizhe, et al. Research on an additional damping control strategy for virtual synchronous generator[J]. Electric Drive, 2022, 52(2): 18-24.
- [7] 徐大可,盛德刚,刘亮,等.基于自适应虚拟同步发电机系统的微网逆变器控制策略研究[J].电气传动,2021,51(13):57-63.
XU Dake, SHENG Degang, LIU Liang, et al. Research on micro-grid inverter control strategy based on adaptive virtual synchronous generator system[J]. Electric Drive, 2021, 51(13): 57-63.
- [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.
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.
- [9] 程诗尧,王芳,李雪城,等.虚拟同步发电机稳定性分析与参数设计[J].电气传动,2021,51(2):51-57.
CHENG Shiyao, WANG Fang, LI Xuecheng, et al. Stability analysis and parameter designing for virtual synchronous generator[J]. Electric Drive, 2021, 51(2): 51-57.

- [10] 严干贵,张礼珏,赵伟哲,等. 基于虚拟同步发电机的光-储调频控制策略研究[J]. 东北电力大学学报,2017,37(3):1-6.
YAN Gangui, ZHANG Lijue, ZHAO Weizhe, et al. Strategies study on frequency-modulated controlling of photovoltaic-energy storage system based on virtual synchronous generator[J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2017, 37(3): 1-6.
- [11] 黄辉,王林,魏亚龙,等. 微网中虚拟同步发电机技术研究[J]. 电气传动,2019,49(11):45-50.
HUANG Hui, WANG Lin, WEI Yalong, et al. Research on the virtual synchronous generator in microgrid[J]. Electric Drive, 2019, 49(11): 45-50.
- [12] 陈文倩,辛小南,程志平. 基于虚拟同步发电机的光储并网发电控制技术[J]. 电工技术学报,2018,33(S2):538-545.
CHEN Wenqian, XIN Xiaonan, CHENG Zhiping. Control of grid-connected of photovoltaic system with storage based on virtual synchronous generator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(S2): 538-545.
- [13] 高长伟,刘晓明,孟昭军. 分布式光伏发电系统改进虚拟同步发电机控制[J]. 太阳能学报,2021,42(2):376-382.
GAO Changwei, LIU Xiaoming, MENG Zhaojun. Improved virtual synchronous generator control strategy for distributed photovoltaic power system[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2021, 42(2): 376-382.
- [14] 颜湘武,吕佳伟,贾焦心,等. 双级式有功备用光伏虚拟同步机控制策略[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(15):61-68.
YAN Xiangwu, LÜ Jiawei, JIA Jiaoxin, et al. Two-stage active standby photovoltaic virtual synchronous machine control strategy[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(15): 61-68.
- [15] 杨慧彪,贾祺,项丽,等. 双级式光伏发电虚拟惯量控制策略[J]. 电力系统自动化,2019,43(10):87-102.
YANG Huibiao, JIA Qi, XIANG Li, et al. Virtual inertia control strategies for double-stage photovoltaic power generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(10): 87-102.
- [16] 郑天文,陈来军,刘炜,等. 考虑源端动态特性的光伏虚拟同步机多模式运行控制[J]. 中国电机工程学报,2017,37(2):454-463.
ZHENG Tianwen, CHEN Laijun, LIU Wei, et al. Multi-mode operation control for photovoltaic virtual synchronous generator considering the dynamic characteristics of primary source[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 454-463.
- [17] 张海峥,张兴,李明,等. 一种有功备用式光伏虚拟同步控制策略[J]. 电网技术,2019,43(2):514-520.
ZHANG Haizheng, ZHANG Xing, LI Ming, et al. A photovoltaic virtual synchronous generator control strategy based on active power reserve[J]. Power System Technology, 2019, 43(2): 514-520.
- [18] ZHANG X, GAO Q, HU Y, et al. Active power reserve PV virtual synchronization control technology[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2020, 6(2): 1-6.
- [19] SUBUDHI B, PRADHAN R. A comparative study on maximum power point tracking techniques for photovoltaic power systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(1): 89-98.
- [20] LI X, WEN H, ZHU Y, et al. A novel sensorless photovoltaic power reserve control with simple real-time MPP estimation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(8): 7521-7531.
- [21] BAO G, TAN H, DING K, et al. A novel photovoltaic virtual synchronous generator control technology without battery storages[J]. Energies, 2019, 12(12): 2240.

收稿日期:2022-02-15

修改稿日期:2022-03-20