

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.180963

光伏虚拟同步发电机建模与仿真研究

任自盼, 鲁宝春, 赵亚龙, 刘晓敏, 张茹雪, 孙丽颖

(辽宁工业大学电气工程学院, 辽宁 锦州 121001)

摘要: 为提高光伏虚拟同步发电机建模的准确性, 给出了计及光伏输出最大功率点跟踪、储能、并网逆变器于一体的光伏虚拟同步发电机的建模方法。首先, 考虑光伏阵列及蓄电池储能的输出特性, 分直流和交流两部分建模, 得到其各自的输出功率数学模型。其次, 结合光伏输出最大功率点跟踪和储能的双环控制, 提出一种分层协调的虚拟同步发电机控制策略, 给出光伏虚拟同步发电机四种运行模式, 并综合交直流输出特性, 获得光伏虚拟同步发电机四模式运行的等效输出静态模型。最后, 通过 Matlab/Simulink 平台搭建了光伏虚拟同步发电机的仿真模型。仿真结果验证了所建模型的准确性及控制策略的有效性。

关键词: 光伏虚拟同步发电机; 分层协调; 模式运行; 静态模型

Research on modeling and simulation of photovoltaic virtual synchronous generator

REN Zipan, LU Baochun, ZHAO Yalong, LIU Xiaomin, ZHANG Ruxue, SUN Liying

(College of Electrical Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, China)

Abstract: In order to improve the accuracy of PV virtual synchronous generator modeling, the modeling method of photovoltaic virtual synchronous generator integrating the maximum power point tracking, energy storage and grid-connected inverter is presented. Firstly, considering the output characteristics of photovoltaic array and battery energy storage, modeling is divided into DC part and AC part to obtain their respective output power mathematical models. Secondly, combining the maximum power tracking of PV output and the dual-loop control of energy storage, a hierarchical and coordinated virtual synchronous generator strategy is proposed, and four operating modes of photovoltaic virtual synchronous generator are given, then by synthesizing the DC/AC output characteristics, the equivalent static model of the four modes operation of the photovoltaic virtual synchronous generator is obtained. Finally, the simulation model of the photovoltaic virtual synchronous generator is built through the Matlab/Simulink platform, the simulation results verify the accuracy of the model and the effectiveness of the control strategy.

This work is supported by Fundamental Scientific Research Fund for Universities of Liaoning Education Department (No. JFL201715401) and Natural Science Foundation of Liaoning Province (No. 2015020076).

Key words: photovoltaic virtual synchronous generator; hierarchical coordination; mode operation; static model

0 引言

随着化石能源的枯竭、生态环境的日益恶化, 清洁、可再生的分布式光伏发电成为人类应对能源危机和环境污染的重要手段之一, 近年来越来越受到重视^[1]。而并网逆变器作为光伏发电与电网的电力电子接口, 其响应速度快、惯性小、零阻尼的特点, 使光伏发电成为一种即插即用的发电单元。若

采用适当的并网逆变器控制策略, 使逆变电源从外特性上模拟同步发电机的调频与调压特性^[2], 将减小分布式发电的不利影响, 提高含高渗透率新能源的电网稳定性。故借鉴传统电力系统的运行经验, 将同步发电机的外特性移植到光伏发电单元中, 使光伏发电具有与传统同步发电机近似的调频与调压特性。基于此, 光伏虚拟同步发电机(Photovoltaic Virtual Synchronous Generator, PV-VSG)的概念应运而生。为了提高逆变器的输出惯性, 在光伏发电直流侧配置储能单元, 然后, 通过模拟同步发电机组的机电暂态特性, 使逆变电源具有同步发电机的惯量、

基金项目: 辽宁省教育厅高校基本科研项目资助(JFL201715401); 辽宁省自然科学基金(2015020076)

阻尼、调频、调压等外特性^[4], 从而有效提高光伏逆变电源的并网友好性。

近年来, 国内外学者基于同步发电机的不同阶动态模型对 VSG 进行建模, 文献[5-11]基于同步发电机的动态模型对 VSG 进行建模分析与控制, 直流侧用直流源代替, 主要是模拟传统同步发电机 (Synchronous Generator, SG) 的调速器工作原理, 未考虑光伏及储能输出特性。文献[12-13]考虑了光伏源的动态输出特性, 但是未考虑 PV-VSG 的有功无功能量传输行为。文献[14-15]基于分层控制策略, 考虑了光伏、蓄电池的输出特性, 但底层控制方法不具备虚拟惯性环节和阻尼特性。文献[16]提出一种适应于微电网的分层协调控制策略, 虽基于 VSG 策略, 但侧重于解决微电网的频率稳定问题。而光伏虚拟同步发电机控制的难点在于光伏输出 MPPT、储能和并网逆变器的协调策略^[17]。目前在 PV-VSG 建模上通常将电源侧用直流源代替且并未考虑分层协调控制, 导致其建模不准确。

本文首先考虑了光伏阵列及蓄电池储能的输出特性, 分直流和交流两部分建模, 得到其各自的输出功率数学模型。其次, 结合光伏输出 MPPT 控制和储能的双环控制, 提出一种分层协调的虚拟同步发电机策略, 从而得出光伏虚拟同步发电机四种运行模式。然后, 综合交直流输出特性, 获得光伏虚拟同步发电机四模式运行的等效输出静态模型。最后, 在 Matlab/Simulink 平台上验证了该模型的准确性及控制策略的有效性。

1 PV-VSG 总体建模思路

将光伏阵列视为 PV-VSG 的原动机, 为 PV-VSG 直流侧提供功率; 蓄电池储能及其双向变换器 (Power Conversion System, PCS) 视为虚拟转动惯量, 作为 PV-VSG 的热备用; 并网逆变器视为 PV-VSG 的能量转换器, 虚拟调速器和虚拟励磁调压视为 PV-VSG 的控制器, 建立了 PV-VSG 与 SG 结构上的对立统一性, 然后得到 PV-VSG 与 SG 近似的有功、无功综合输出静态模型, PV-VSG 的结构框图如图 1 所示。

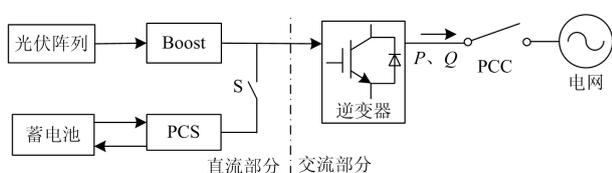


图 1 PV-VSG 的结构框图

Fig. 1 Block diagram of PV-VSG

2 PV-VSG 直流侧的建模

2.1 光伏阵列的建模

1) 光伏电池模型

光伏虚拟同步发电机的原动机是光伏电池, 通过光伏效应, 将光能直接转化为直流电, 其最基本的单元是光伏电池, 一定数量的光伏电池串并联构成了阵列, 作为 PV-VSG 直流侧功率输入, 光伏电池的物理等效模型如图 2 所示。

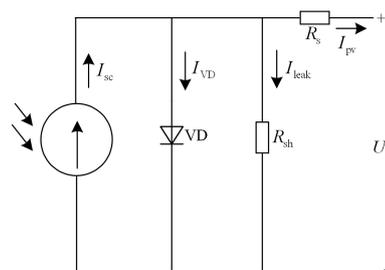


图 2 光伏电池的物理等效模型

Fig. 2 Physical equivalent physical model of PV cell

在标准电池温度和光照条件下的光伏电池电压电流输出特性方程为

$$I_{pv} = I_{sc} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(U_{pv} + I_{pv}R_s)}{AKT} \right) - 1 \right] - \frac{U_{pv} + I_{pv}R_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

式中: U_{pv} 、 I_{pv} 为光伏电池的输出电压、输出电流; I_{VD} 为 PN 结的总扩散电流; I_{leak} 为漏电流; I_{sc} 为光伏电池内部光生电流; I_0 为光伏电池在无光照时的饱和电流; q 为电子电荷, 1.6×10^{-19} C; R_s 为光伏组件的串联电阻; R_{sh} 为漏电阻; A 为常数因子; K 为波尔兹曼常数, 1.38×10^{-23} J/K; T 为绝对温度。

通过光伏电池的串、并联组成的光伏阵列的输出功率表达式^[18]为

$$P = \left\{ N_p I_{sc} - N_p I_0 \left[\exp \left(\frac{q}{AKT} \left(\frac{U_{pv}}{N_s} + \frac{I_{pv}R_s}{N_p} \right) \right) - 1 \right] - \frac{N_p}{R_{sh}} \left(\frac{U_{pv}}{N_s} + \frac{I_{pv}R_s}{N_p} \right) \right\} U_{pv} \quad (2)$$

式中, N_p 、 N_s 分别为串、并联的电池数目。

2) 最大功率跟踪

由于光伏阵列输出特性受到光照强度、温度等因素的影响, 因此提高 PV-VSG 的发电效率就需要进行 MPPT 控制, 追踪光伏电池最高电压电流值, 使系统以最大功率输出。本文采用增量电导法^[19]获取光伏侧的输出功率, 光伏阵列运行在最大功率点

(U_m, I_m) 处, 此时在任意光照强度、任意温度下的最大输出功率表达式为

$$\begin{cases} \frac{dP}{dU} = I + U \frac{\Delta I}{\Delta U} = 0 \\ P_m = U_m I_m \end{cases} \quad (3)$$

2.2 蓄电池储能的建模

储能单元及其 PCS 视为 PV-VSG 的虚拟转动惯量, 同步发电机由于原动机具有较大的机械惯性, 而 PV-VSG 的虚拟转动惯量依靠储能释放电能来提供短时的频率支撑。本文利用蓄电池储能大大提高了 PV-VSG 平抑功率波动的能力。

1) 蓄电池模型

蓄电池内部的电化学反应是一个非常复杂的非线性过程, 本文采用蓄电池的通用模型^[20], 由一个受控电压源 E 和一个常值内阻 R_b 组成, 其等效电路如图 3 所示。蓄电池作为直流侧的热备用, 当光伏出力缺额过大时, 蓄电池增加输出功率, 从而保证 PV-VSG 持续给电网输送功率。

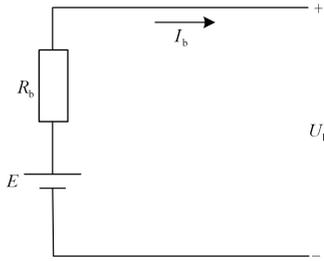


图 3 蓄电池的等效模型

Fig. 3 Equivalent model of battery

蓄电池输出电压表达式为

$$U_b = E_0 - H \frac{C_{\max}}{C_{\max} - Q_c} + A \exp(-BQ_c) - I_b R_b \quad (4)$$

$$Q_c = \int_0^t \eta I_b(\tau) d\tau \quad (5)$$

式中: E_0 为蓄电池的内电势; C_{\max} 为蓄电池的最大容量; Q_c 为放电量; I_b 为蓄电池的充放电电流; R_b 为蓄电池的内阻; η 为充放电效率; A 、 B 、 H 均为拟合参数, 可通过蓄电池的放电特性曲线得到^[20];

$H \frac{C_{\max}}{C_{\max} - Q_c}$ 用于放电特性的额定特性区。

蓄电池的输出功率表达式为

$$P = (E_0 - H \frac{C_{\max}}{C_{\max} - Q_c} + A \exp(-BQ_c) - I_b R_b) I_b \quad (6)$$

2) 变流器 PCS

本文对变流器采用双环控制, 外环为电压环,

控制蓄电池直流侧的电压恒定, 满足系统充放电要求; 内环为电流环, 控制蓄电池储能的电流恒定。两个开关管采用互补 PWM 控制, PCS 双环控制框图如图 4 所示。

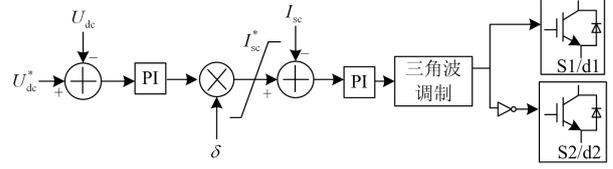


图 4 PCS 双环控制框图

Fig. 4 Dual-loop control diagram of PCS

3 PV-VSG 交流侧的建模

1) 逆变器的模型

同步发电机的电气部分与并网逆变器的数学模型相同, 因此将并网逆变器视为 PV-VSG 的能量转换模块, 有功功率基于 MPPT 控制, 以确保 PV-VSG 最大功率输出; 无功功率采用逆变器的脉宽调制控制; 本文采用电压型并网逆变器, 其拓扑结构如图 5 所示。

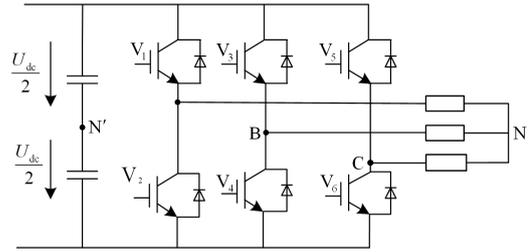


图 5 并网逆变器的拓扑结构

Fig. 5 Topology of grid-connected inverter

对三相桥式逆变电路的输出电压进行定量分析, 以 A 相为例, 将输出电压 u_A 用傅里叶级数展开得

$$u_A = \frac{2U_{dc}}{\pi} (\sin \omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \frac{1}{7} \sin 7\omega t + \dots) = \frac{2U_{dc}}{\pi} \left(\sin \omega t + \sum_n \frac{1}{n} \sin n\omega t \right) \quad (7)$$

式中, $n = 6k \pm 1$, k 为自然数。A 相输出电压有效值的表达式为

$$E_A = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u_A^2 d\omega t} = 0.471U_{dc} \quad (8)$$

假设三相电压平衡且并网三相电路平衡, 忽略系统损耗等效电阻 R , A 相等效电路如图 6 所示, 令逆变器的 A 相输出电压为 \dot{E}_A , 相位为参考相位, 电网侧电压为 \dot{U} , \dot{E}_A 和 \dot{U} 之间的夹角为 δ , 则 PV-VSG 与电网侧交换的有功、无功功率表达式为

$$\begin{cases} P = \frac{0.471U_{dc}U}{X} \sin \delta \\ Q = \frac{0.471U_{dc}U}{X} \cos \delta - \frac{(0.471U_{dc})^2}{X} \end{cases} \quad (9)$$

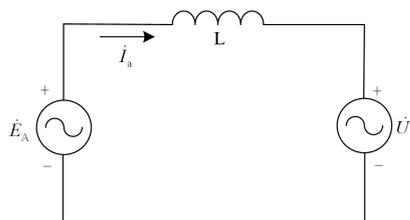


图 6 等效电路

Fig. 6 Equivalent circuit

2) 控制器系统模型

PV-VSG 控制系统包括上层中心控制器和底层控制器。上层中心控制器实现 PV-VSG 运行模式的选择及切换、底层控制器选择、控制器参考值计算和蓄电池充放电管理。底层控制器包括逆变器控制

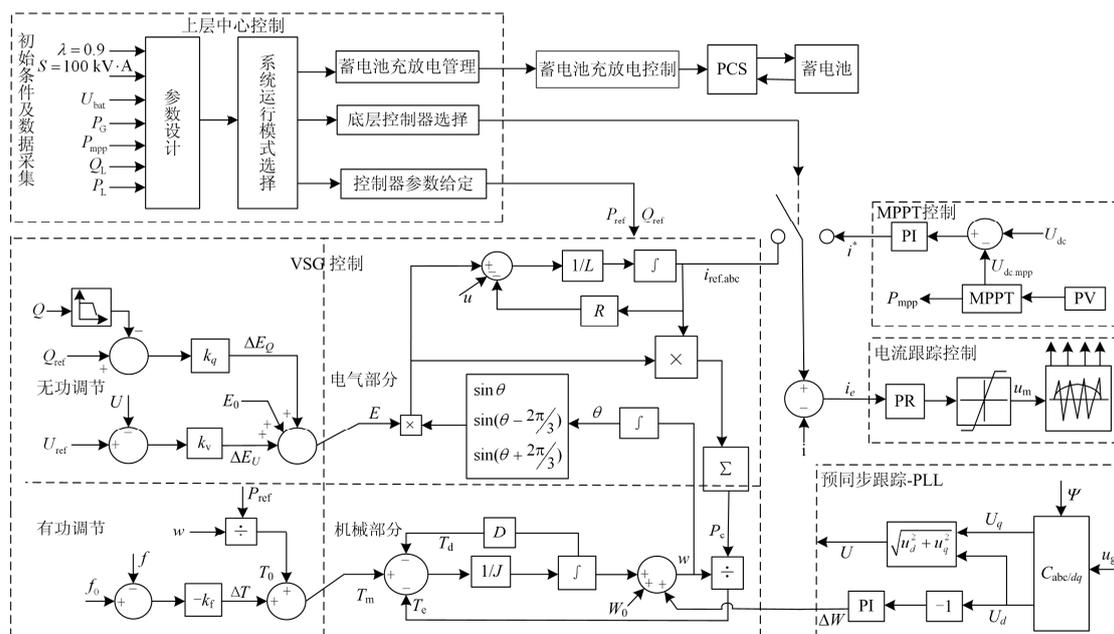


图 7 PV-VSG 的分层控制框图

Fig. 7 Hierarchical control block diagram of PV-VSG

3) 调相模式(即固定无功模式)。逆变器以额定功率 S 运行, 底层基于 VSG 控制, 只发出无功功率, 逆变器的无功可控容量为

$$Q = \begin{cases} \pm \sqrt{S^2 - (P_{pv}^{rat})^2} & P_{pv} \neq 0 \\ S & P_{pv} = 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中: P_{pv} 为光伏并网有功功率; P_{pv}^{rat} 为光伏额定并网有功功率; S 为并网逆变器的容量。

器和蓄电池充放电控制器。逆变器有功功率控制采用 MPPT 控制与 VSG 控制两种方法, 逆变器无功功率控制采用 VSG 控制, 从而实现 PV-VSG 与 SG 不同工况下的对立统一。PV-VSG 分层控制框图如图 7 所示。其中 λ 为并网点功率因数, S 为逆变器容量, U_{bat} 为蓄电池端口电压, P_G 和 Q_G 为并网点电网供电功率, P_L 和 Q_L 为负荷功率, P_{mpp} 为光伏阵列可输出最大有功功率, u_g 为电网电压, u 为机端电压, $i_{ref,abc}$ 为 PV-VSG 输出电流指令。

PV-VSG 四模式运行的协调控制策略如下。

- 1) 正常励磁模式。逆变器运行在单位功率因数下, 采用光伏 MPPT 控制, 即 $P=P_{mpp}$, $Q=0$ 。
- 2) 过励磁模式。此模式分两种工况, 工况一, $P_{mpp} < P_{max}$ (P_{max} 为逆变器可输出的最大有功功率), 逆变器运行在 MPPT 模式, 并输出少量无功功率; 工况二, $P_{mpp} > P_{max}$, 逆变器运行在 VSG 模式, 此时 $P_{ref}=P_{max}$, $Q_{ref}=\Delta Q$ (ΔQ 为规定的并网点功率因数计算出电网需要逆变器输出的期望无功功率)。

4) 进相模式。当负荷过轻, 逆变器输出电压大于并网点的过电压阈值, 逆变器运行在进相模式, 采用 VSG 控制, 逆变器吸收无功功率以避免并网点过电压, 此时 $P > 0$, $Q < 0$ 。

4 PV-VSG 的静态模型及仿真验证

4.1 PV-VSG 的静态模型

综合 PV-VSG 直流侧与交流侧的输入与输出间

的能量行为, 借鉴一种建立光伏并网发电系统综合模型的新方法^[21], 在电路等效思想的基础上, 得到 PV-VSG 的等效静态模型, 如图 8 所示。

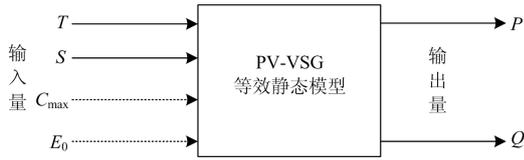


图 8 PV-VSG 的等效静态模型

Fig. 8 Equivalent static model of PV-VSG

1) 正常励磁模式下, 有功功率与无功功率的表达式为

$$\begin{cases} P = U_m I_m \\ Q = 0 \end{cases} \quad (11)$$

2) 过励磁模式与进相模式下, 有功功率与无功功率的表达式为

$$\begin{cases} P = \frac{0.471U_d U}{X} \sin \delta \\ Q = \frac{0.471U_d U}{X} \cos \delta - \frac{(0.471U_d)^2}{X} \end{cases} \quad (12)$$

3) 调相模式下, 有功功率与无功功率的表达式为

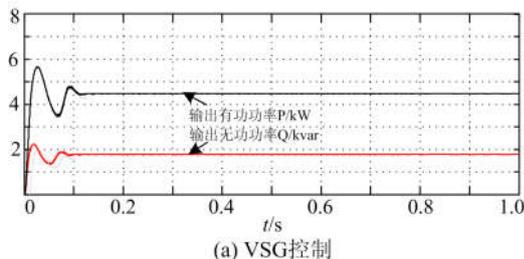
$$\begin{cases} P = 0 \\ Q = \frac{0.471U_d U}{X} - \frac{(0.471U_d)^2}{X} \end{cases} \quad (13)$$

式中: U 为电网侧电压; U_d 为 PV-VSG 直流侧电压; δ 为逆变器输出端电压与电网侧的相角差; X 为逆变器输出侧到电网间的等效电抗; U_m 、 I_m 为光伏直流侧的最大输出电压、电流, 经 MPPT 算法得到; C_{max} 、 E_0 分别为热备用蓄电池的容量、蓄电池的工作电压。

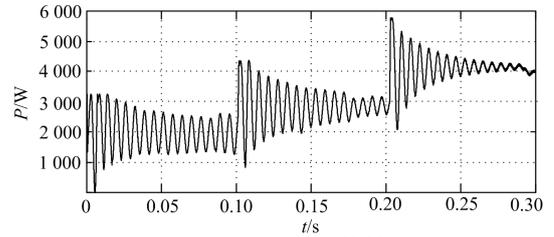
4.2 PV-VSG 模型的仿真及验证

1) PV-VSG 光伏直流侧的仿真验证

通过 Matlab/Simulink 建立光伏阵列的仿真模型, 令初始温度为 25°C , 光照强度在 $600\sim 1000\text{ W/m}^2$ 之间变化。在有、无 MPPT 控制下的光伏阵列输出功率如图 9 所示, 仿真对比得出, MPPT 控制提高了 PV-VSG 的发电效率, 在任意光强、任意温度下, 使 PV-VSG 以最大功率输出。



(a) VSG 控制



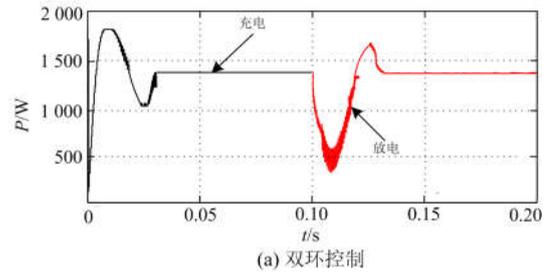
(b) 无 MPPT 控制

图 9 光伏阵列的输出功率

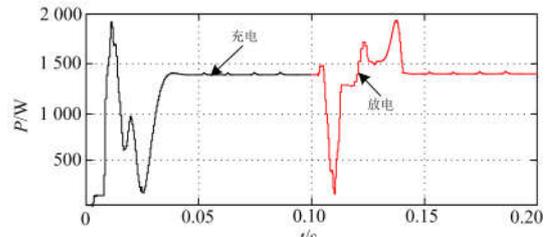
Fig. 9 Output power of PV array

2) 蓄电池直流侧的仿真验证

令蓄电池的容量为 1500 W , A 取 0.66 , B 取 2884.61 , H 取 0.33 。变流器 PCS 采用双环控制, 通过与电压单环对比, 得出本文采用的双环控制具有输出功率稳定且稳定范围宽的特点, 验证了所建模型能有效地反映蓄电池直流侧的输出功率。在充放电状态下蓄电池的输出功率波形如图 10 所示。



(a) 双环控制



(b) 电压单环控制

图 10 在充放电状态下蓄电池的输出功率

Fig. 10 Output power of battery in charge and discharge state

3) 蓄电池功率平抑的仿真验证

在 PV-VSG 未加入蓄电池和加入蓄电池两种工况下, 0.4 s 时突增负载, 对比 PV-VSG 输出有功及无功功率输出波形, 如图 11 所示。验证了 PV-VSG 配置蓄电池储能具有功率平抑、增加系统惯性的优势。

4) 四模式运行下交流侧的仿真验证

系统仿真参数: 电网侧的额定电压为 380 V , 额定频率是 50 Hz , 外界温度为 25°C , 光照强度为 1000 W/m^2 。本文建立 PV-VSG 的静态模型, 因此只对其有功及无功功率的输出作详细分析与对比。验证了本文所提出的协调控制策略优于基于传统的

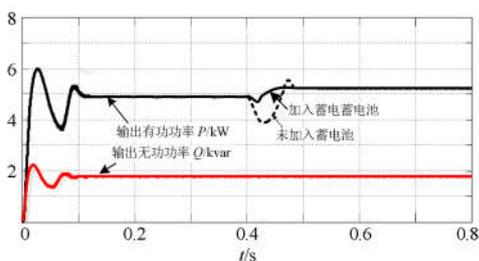
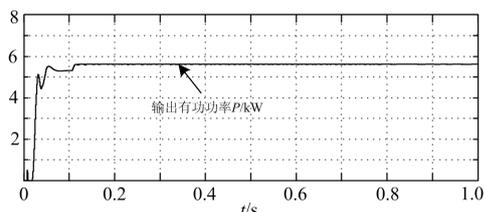


图 11 负载突增时的 PV-VSG 功率输出

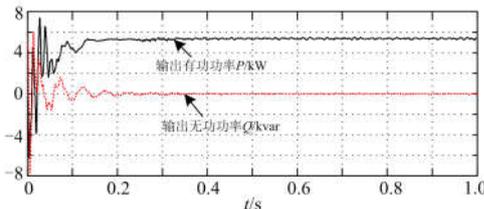
Fig. 11 Output power of PV-VSG when load surges

PQ 控制, 输出功率具有响应速度快、超调量小、输出稳定度高的特点, 仿真验证了所建 PV-VSG 模型的准确性。

① 正常励磁模式。仿真对比波形如图 12 所示, PV-VSG 的上层中心控制切换到 MPPT 控制, 此时 PV-VSG 相当于一个 P 节点, 能较快地输出稳定的有功功率, 使光伏高效率的被电网消纳。



(a) 在 MPPT 控制



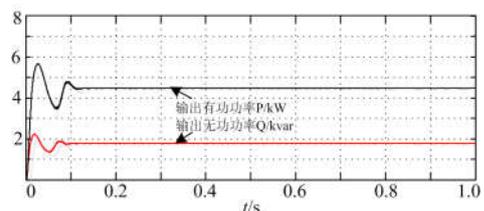
(b) PQ 控制

图 12 正常励磁模式 ($P > 0, Q = 0$)

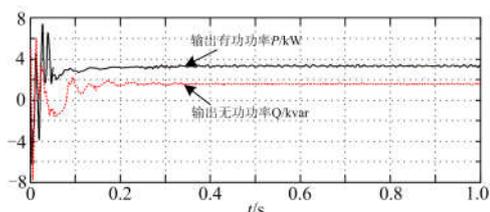
Fig. 12 Normal excitation mode ($P > 0, Q = 0$)

② 过励磁模式。仿真对比波形如图 13 所示, 上层中心控制切换到 VSG 控制, 此工况下 PV-VSG 相当于一个 PQ 节点, 输出给定的有功功率, 同时输出无功功率。

③ 调相模式。仿真对比波形如图 14 所示, 上层中心控制逆变器以额定功率 S 运行, 只发出无功功率, 此工况下 PV-VSG 相当于一个 Q 节点, PV-VSG 视为无功补偿装置来稳定并网点电压。



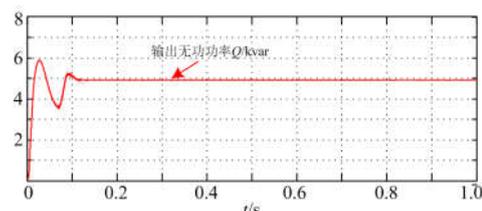
(a) VSG 控制



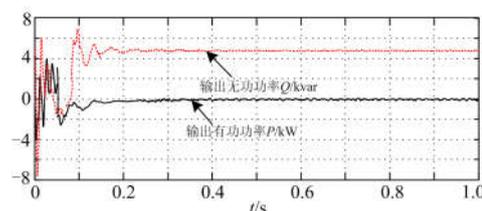
(b) PQ 控制

图 13 过励磁模式 ($P > 0, Q > 0$)

Fig. 13 Over-excitation mode ($P > 0, Q > 0$)



(a) VSG 控制

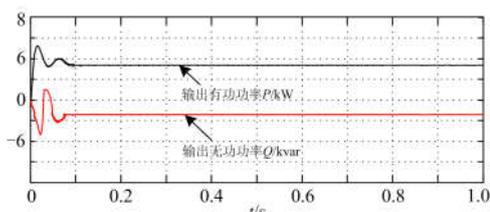


(b) PQ 控制

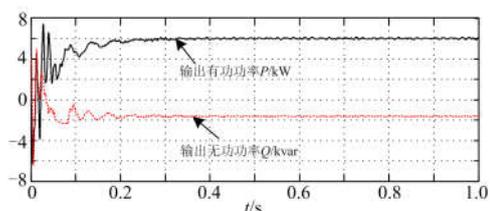
图 14 调相模式 ($P = 0, Q > 0$)

Fig. 14 Phase modulation mode ($P = 0, Q > 0$)

④ 进相模式。仿真对比波形如图 15 所示, 上层中心控制切换到 VSG 控制, PV-VSG 吸收多余的无功功率, 但同时继续发出有功功率, 此工况下 PV-VSG 相当于一个 PQ 节点。



(a) VSG 控制



(b) PQ 控制

图 15 进相模式 ($P > 0, Q < 0$)

Fig. 15 Leading phase mode ($P > 0, Q < 0$)

5 结论

为提高光伏虚拟同步发电机建模的准确性,本文考虑了光伏阵列及蓄电池储能的输出特性,分直流和交流两部分建模,得到其各自的输出功率数学模型;结合光伏输出 MPPT 控制和储能的双环控制,采用一种分层协调的虚拟同步发电机策略,得到 PV-VSG 四种运行模式,解决了光伏虚拟同步发电机的控制难点;综合交直流输出特性,获得光伏虚拟同步发电机四模式运行的等效输出静态模型;通过 Matlab/Simulink 平台验证了 PV-VSG 仿真模型的准确性和控制策略的有效性。

参考文献

- [1] 吴恒, 阮新波, 杨东升, 等. 虚拟同步发电机功率环的建模与参数设计[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(24): 6508-6518.
WU Heng, RUAN Xinbo, YANG Dongsheng, et al. Modeling of the power loop and parameter design of virtual synchronous generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(24): 6508-6518.
- [2] 陶亮, 程军照, 王文玺, 等. 虚拟同步发电机参数设计及优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(12): 128-135.
TAO Liang, CHENG Junzhao, WANG Wenxi, et al. Methods of parameter design and optimization in virtual synchronous generator technology[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(12): 128-135.
- [3] 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 technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(21): 165-175.
- [4] 高海力, 谭建成. 大型光储联合虚拟同步发电机技术综述[J]. 电气技术, 2018, 19(1): 1-4.
GAO Haili, TAN Jiancheng. The overview of the VSG technology of grid connected large-scale PV-storage hybrid system[J]. Electrical technology, 2018, 19(1): 1-4.
- [5] 程启明, 张宇, 谭冯忍, 等. 基于 Washout 滤波器的虚拟同步发电机新型控制方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(16): 51-57.
CHENG Qiming, ZHANG Yu, TAN Fengren, et al. Research on new control method of virtual synchronous generator based on Washout filter[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(16): 51-57.
- [6] ZHONG Q C, WEISS G. Synchronverters: inverters that mimic synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(4): 1259-1267.
- [7] 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 micro-grids[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(11): 28-34.
- [8] GAO C, LIU X, CHEN H. Research on the control strategy of distributed energy resources inverter based on improved virtual synchronous generator[J]. SCI Rep, 2017, 7(1).
- [9] 孔剑虹, 姜学朴, 吴江宁, 等. 梯度因子估计虚拟同步发电机阻尼的配置方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(9):103-109.
KONG Jianhong, JIANG Xuepu, WU Jiangning, et al. Damping configuration of the virtual synchronous generator using gradient factor estimation[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(9):103-109.
- [10] 王磊, 张琛, 李征, 等. 双馈风电机组的虚拟同步控制及弱网运行特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(13): 85-90.
WANG Lei, ZHANG Chen, LI Zheng, et al. Virtual synchronous generator control for DFIG wind turbines and its operation characteristics in weak grid[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(13): 85-90.
- [11] 王思耕, 葛宝明, 毕大强. 基于虚拟同步发电机的风电场并网控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(21): 49-54.
WANG Sigeng, GE Baoming, BI Daqiang. Control strategies of grid-connected wind farm based on virtual synchronous generator[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(21): 49-54.
- [12] 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.
- [13] 王振雄, 易皓, 卓放, 等. 应用于光伏微网的一种虚拟

- 同步发电机结构及其动态性能分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 444-453.
- WANG Zhenxiong, YI Hao, ZHUO Fang, et al. A hardware structure of virtual synchronous generator in photovoltaic micro-grid and its dynamic performance analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 444-453.
- [14] 米阳, 吴彦伟, 符杨, 等. 独立光储直流微电网分层协调控制[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(8): 37-45.
- MI Yang, WU Yanwei, FU Yang, et al. Hierarchical coordinated control of island DC micro-grid with photovoltaic and storage system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(8): 37-45.
- [15] 肖朝霞, 樊世军, 杨庆新. 基于分层控制策略的光伏-蓄电池系统动态提高并网点功率因数[J]. 电工技术学报, 2016, 31(7): 107-117.
- XIAO Zhaoxia, FAN Shijun, YANG Qingxin. Dynamically improving the power factor of PCC using photovoltaic-battery generation system based on hierarchical control strategy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(7): 107-117.
- [16] 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 micro-grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(22): 77-85.
- [17] 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): 349-359.
- LÜ Zhipeng, SHENG Wanxing, LIU Haitao, et al. Application and challenge of virtual synchronous machine technology in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 349-359.
- [18] 茆美琴, 余世杰, 苏建徽. 带有MPPT功能的光伏阵列Matlab通用仿真模型[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(5): 1248-1251.
- MAO Meiqin, YU Shijie, SU Jianhui. Versatile Matlab simulation model for photovoltaic array with MPPT function[J]. Journal of System Simulation, 2005, 17(5): 1248-1251.
- [19] CIOBOTARU M, TEODORESCU R, BLAABJERG F. Control of single-stage single-phase PV inverter[J]. EPE Journal, 2005, 16(3): 20-26.
- [20] TREMBLAY O, DESSAINT L A, DEKKICHE A I. A generic battery model for the dynamic simulation of hybrid electric vehicles[C] // Vehicle Power and Propulsion Conference, September 9-12, 2007, Arlington, TX, USA: 284-289.
- [21] LU B, WANG J, GUAN W. A new method to establish the comprehensive model of grid-connected photovoltaic generating electricity system[J]. ICIC Express Letters Part B Applications an International Journal of Research & Surveys, 2013, 4: 1347-1352.

收稿日期: 2018-07-31; 修回日期: 2018-09-01

作者简介:

任自盼(1992—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统的稳定性分析与控制; E-mail: 2660707894@qq.com

鲁宝春(1964—), 男, 教授, 硕士生导师, 研究方向为电力系统的稳定性分析与控制。E-mail: lubaochun1@163.com

(编辑 许威)