

具有同步发电机特性的储能型光伏并网发电系统研究

徐华电[†], 苏建徽, 施永, 王一丁, 杜燕

(合肥工业大学 教育部光伏系统工程研究中心, 安徽 合肥 230009)

摘要: 基于虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)控制的并网逆变器可以对电网的频率和电压起到一定的支撑作用. 但是, 仅由光伏供电的逆变器难以模拟同步发电机的特性. 本文提出一种具有同步发电机特性的储能型光伏并网发电系统, 并给出了相应的VSG控制策略、DC-DC控制策略以及协调控制方法; 建立了系统的小信号模型, 分析了参数取值对动态性能和稳定性的影响. 仿真结果不但表明该系统具有同步发电机特性, 可实现光伏阵列的最大功率跟踪(maximum power point tracking, MPPT)和储能的充放电控制; 而且验证了理论分析的正确性.

关键词: 光伏; 储能; 虚拟同步发电机; 协调控制

引用格式: 徐华电, 苏建徽, 施永, 等. 具有同步发电机特性的储能型光伏并网发电系统研究. 控制理论与应用, 2018, 35(7): 1021 – 1028

中图分类号: TM464 文献标识码: A

Research on grid-connected photovoltaics-energy storage system with synchronous generator characteristics

XU Hua-dian[†], SU Jian-hui, SHI Yong, WANG Yi-ding, DU Yan

(Research Center for Photovoltaic System Engineering of Ministry of Education, Hefei University of Technology, Hefei Anhui 230009, China)

Abstract: The Grid-connected inverter based on virtual synchronous generator (VSG) has capacity to support the frequency and voltage of electric power system. However, it is difficult to simulate the characteristics of synchronous generators for inverters only powered photovoltaics (PV). This paper proposed a grid-connected PV-energy storage system which mimics the characteristics of synchronous generator, and presented control tactics, including VSG control strategy, DC-DC control strategy and coordinated control strategy. A small signal model was established in order to analyze effects of the parameters on dynamic performance and stability. The simulation results not only indicated that the system has the characteristics of synchronous generator, track maximum power point of the PV cells and control charge and discharge of the energy storage flexibly; but also verify the correctness of the theoretical analysis.

Key words: photovoltaics; energy storage; virtual synchronous generator; coordinated control

Citation: XU Huadian, SU Jianhui, SHI Yong, et al. Research on grid-connected photovoltaics-energy storage system with synchronous generator characteristics. *Control Theory & Applications*, 2018, 35(7): 1021 – 1028

1 引言(Introduction)

随着光伏、风能等可再生能源的广泛利用, 越来越多的分布式发电(distributed generator, DG)系统接入到传统电力系统. 相比于基于同步发电机的集中式发电系统, 基于逆变器的DG系统虽然控制灵活、响应迅速, 但是缺乏惯性和阻尼特性^[1-2]. 同步发电机的转动惯量和阻尼特性对于保持电力系统的频率稳定性具有重要作用, 然而, DG渗透率的日益提高, 导致电力

系统中同步发电机装机容量比例不断降低、系统的惯性和阻尼相对减弱、旋转备用相对减少, 这给电力系统的稳定运行带来严峻的挑战^[3-4].

为了提高含高渗透率DG电力系统的惯性与阻尼、增强其抑制频率波动的能力、改善逆变器与电网之间的兼容性, 众多学者提出了虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)的概念^[5-10]. VSG技术的主要思想是通过控制算法使得逆变器模拟同步机

收稿日期: 2017-07-25; 录用日期: 2018-01-08.

[†]通信作者. E-mail: xuhuadian@163.com; Tel.: +86 18788836933.

本文责任编辑: 杨萃.

国家重点研发计划项目(2017YFB0903503), 台达环境与教育基金会《电力电子科教发展计划》重大项目(DREM2015002), 中央高校基本科研业务费专项资金资助(JZ2016HGBZ1023).

Supported by the National Key Research and Development Program of China (2017YFB0903503), Grants from the Power Electronics Science and Education Development Program of Delta Environmental & Educational Foundation (DREM2015002) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (JZ2016HGBZ1023).

的外特性,尤其是频率特性.为使逆变器具有同步发电机的频率特性,不仅要求其控制算法具有模拟同步发电机转子的惯量的功能,而且需为逆变器配备储能装置,以吞吐模拟同步发电机转子动能变化所需的电能.目前VSG的研究多是以逆变器直流侧可提供或者存储足够的能量(如稳定的直流电压源等)为前提的^[1,4,6-11],而仅以光伏供电的逆变器显然是不满足这一条件的.随着光伏并网发电系统容量和数量的增加,使其具有同步发电机特性对于电网的稳定运行具有重要意义.

目前,可再生能源电站中储能的功能定位主要有两种^[12]:一是抑制可再生能源电站的并网功率波动^[13-15];二是控制电站与储能系统配合运行,使其出力满足给定发电出力曲线要求,从而达到电站可经济调度的目的^[16-17].而对于如何利用储能使得分布式发电系统具有同步发电机特性的研究仍较少.

文献[18-19]虽指出利用储能模拟同步发电机转子动能变化,但并未对储能及可再生能源的控制方法进行研究.文献[20]将储能作为光伏发电的后备,使得分布式发电系统可运行于并网和离网两种模式,但逆变器采用的依然是PQ和下垂控制,不具备同步发电机特性.文献[21-22]在光伏逆变器交流侧并联基于VSG控制的储能逆变器,增加了系统的惯性,但是并没有使光伏并网逆变器本身具有同步发电机特性.文献[23]分析了光储发电系统中的VSG控制,但仍是将光伏阵列和储能等效为直流电压源进行研究的,忽视了对储能充放电的控制,电池荷电状态(state of charge, SOC)波动较大,易引起深度充放电缩短电池寿命.

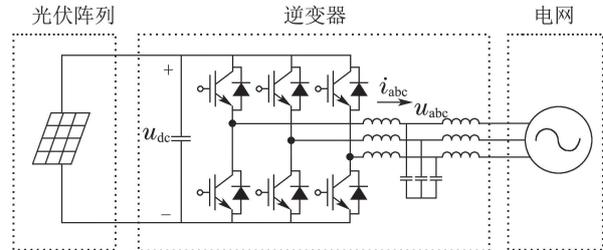
为使光伏发电系统自身模拟同步发电机特性以及实现对储能充放电的控制,本文研究了一种具有同步发电机特性的储能型光伏并网发电系统.首先,给出储能型光伏并网发电系统的硬件结构,在此基础上,研究了系统中逆变器、储能的控制方法,并提出一种协调控制策略,使储能型光伏并网系统具有同步发电机特性的同时,也能够灵活控制储能的充放电功率、实现对光伏阵列的最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT);然后,建立了系统的数学模型,并分析了参数大小对其动态性能和稳定性的影响;最后,通过仿真对所提控制方法和分析结果进行了验证.

2 储能型光伏并网发电系统结构(The structure of the grid-connected PV-energy storage system)

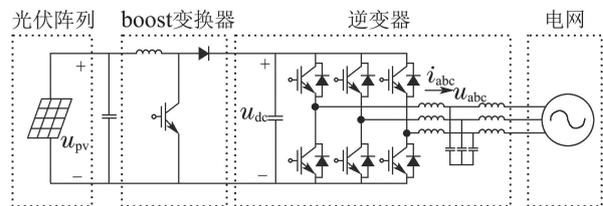
2.1 传统光伏并网发电系统结构(The structure of conventional grid-connected PV generator)

图1所示,为常用的两种传统光伏并网发电系统结构示意图.其中,单级式光伏发电系统中光伏阵列直接接到逆变器直流侧,如图1(a)所示,光伏阵列产生的

电能仅通过DC/AC单级变换就馈入电网,逆变器在实现电能变换和并网功能的同时,还需完成MPPT.两级式光伏并网系统的电路为双级功率变换电路,如图1(b)所示,其前级采用boost变换器完成直流侧光伏阵列输出电压的升压功能以及MPPT;后级为并网逆变器,实现电能变换和并网功能;且boost变换器与逆变器的控制相互独立.



(a) 单级式光伏发电系统



(b) 两级式光伏发电系统

图1 传统光伏并网发电系统结构示意图

Fig. 1 Structures of conversational grid-connected PV system

传统光伏并网发电系统的逆变器控制一般由直流电压外环和有功、无功电流内环组成^[24],对外体现为电流源特性.由于没有储能装置,系统输出有功功率只能跟随光伏阵列产生的功率,具有间歇性和波动性.逆变器输出频率为锁相环得到的电网频率,不具有惯性和阻尼特性.因此,传统光伏发电系统,无论是单级式还是两级式,均无法为电网提供频率支撑.

2.2 储能型光伏并网发电系统结构(The structure of the grid-connected PV-energy storage system)

储能型光伏并网发电系统的结构如图2所示,硬件部分包括光伏阵列、储能装置、双向DC-DC变换器(本文以buck/boost为例)、逆变器及其滤波电路.光伏阵列直接连接到逆变器直流母线,与带buck/boost变换器的储能装置并联,能量由基于VSG控制的逆变器馈入电网.

控制系统主要分为3个部分:协调控制单元、DC-DC控制单元以及VSG控制单元.协调控制单元一方面负责搜寻光伏阵列的最大功率点电压 U_{MPP} ,并将其作为直流母线电压指令值 $U_{dc,ref}$ 传递给DC-DC控制单元,由DC-DC控制单元根据指令控制直流母线电压,从而完成对光伏阵列的MPPT.另一方面,给

定VSG无功指令的同时, 根据给定的功率指令, 调整VSG的输出功率, 以控制储能的充放电功率, 从而实现调整储能SOC的目的. VSG控制单元实现逆变器对同步发电机特性的模拟以及对功率指令的跟踪.

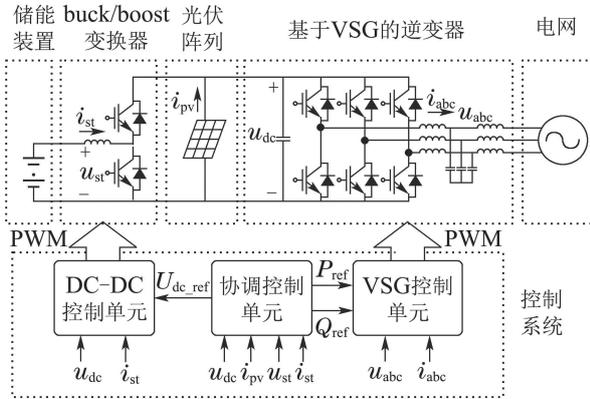


图 2 储能型光伏并网发电系统结构示意图

Fig. 2 Structure of grid-connected PV-energy storage system

相比于传统光伏并网发电系统, 储能型光伏并网发电系统具有以下特点: ① 储能装置具有能量缓冲作用, 可使逆变器输出功率不必与光伏功率相等, 不但能减弱并网功率的波动性与间歇性, 而且满足了逆变器模拟同步发电机转子惯量的基本条件; ② 储能型光伏并网发电系统中的逆变器采用VSG控制, 模拟了同步发电机特性, 可实现自同步并网, 无需锁相环检测电网的频率与相位; ③ 除了控制DC-DC变换器和逆变器, 本文还设计了协调控制策略, 控制储能的充放电功率, 从而实现调整储能SOC的目的; ④ 通过模拟同步发电机特性, 储能型光伏并网发电系统对外体现为电压源特性, 且具有频率惯性及阻尼频率偏移的能力.

3 储能型光伏并网发电系统控制策略(The control strategies for the grid-connected PV-energy storage system)

3.1 DC-DC控制策略(The control strategy for the DC-DC converter)

DC-DC控制策略的目标是控制直流母线电压跟踪协调控制单元给定的指令值 $U_{dc.ref}$, 且在系统工作时, 可以通过控制buck/boost变换器电感电流来控制储能装置的充放电. 因此, DC-DC控制策略采取直流母线电压外环、电感电流内环的控制方式控制buck/boost变换器, 如图3所示, 其中, 电压外环使用比例-积分(proportional integral, PI)调节器, 电流内环使用比例调节器. 当直流母线电压升高时, 双向变换器工作在buck模式, 储能充电; 当直流母线电压降低时, 双向变换器工作在boost模式, 储能放电.

值得注意的是, 储能装置通过稳定直流母线电压, 不仅可以实现MPPT功能, 更重要的是使VSG能够模拟同步发电机转子惯量. 假设光伏阵列输出功率不变, 当扰动使VSG频率降低时, 并网逆变器模拟同步发电

机转子释放能量的过程, 增发有功功率; 这使得直流母线电压降低, 而储能为稳定直流母线电压而放电, 反之亦然. 此时, 储能的能量变化就模拟了同步发电机转子动能的增减.

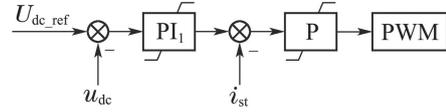


图 3 DC-DC控制策略

Fig. 3 Control strategy for DC-DC converter

为使系统正常运行, 储能需始终维持直流母线电压不低于逆变器逆变成功的最低电压. 一方面, 要求储能的最大放电功率不小于基于VSG控制的逆变器的短时最大输出功率; 另一方面, 频率偏移及光伏功率波动等过程中, 当光伏阵列产生能量小于逆变器的输出能量时, 储能的可输出电能要足以弥补它们之间的缺额; 而当光伏阵列产生能量大于逆变器的输出能量时, 储能应具有足够的空间存储多余的电能.

3.2 VSG控制策略(The control strategy for VSG)

通常, VSG的控制算法需根据给定的数学模型计算出同步发电机在当前状态下的输出电流或电压, 并将其作为指令, 控制逆变器跟踪该指令, 从而达到模拟同步发电机外特性的目的. 本文采用同步发电机数学模型如下:

$$L_s \frac{di_{abc}}{dt} = e_{abc} - u_{abc} - R_s i_{abc}, \quad (1)$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = \frac{P_m - P_e}{\omega} - D(\omega - \omega_0), \quad (2)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega, \quad (3)$$

其中: L_s 和 R_s 分别为同步发电机同步电感和电阻, e_{abc} , u_{abc} 和 i_{abc} 分别为同步发电机三相内电势、端电压以及输出电流; J 为同步发电机转子惯量, ω 为电角频率, P_m 和 P_e 分别为同步发电机机械功率和电磁功率, D 为阻尼系数, ω_0 为电网额定角频率, θ 为电角度; 且

$$e_{abc} = E[\sin \theta \quad \sin(\theta - 2\pi/3) \quad \sin(\theta + 2\pi/3)]^T,$$

$$P_e = e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c.$$

VSG控制策略如图4所示, 将滤波器电容电压 u_{abc} 视作端电压, 根据式(1)-(3)计算出同步发电机在该状态下的输出电流 $i_{abc.ref}$, 并作为逆变器输出电流 i_{abc} 的指令值. 为了更好的模拟同步发电机特性, 逆变器必须无静差且迅速地完成了对指令电流 $i_{abc.ref}$ 的跟踪. 因此, 本文利用模型解算出的角度 θ , 在同步坐标系下对逆变器进行控制; 同时, 将电容电压 u_{abc} 作为前馈量, 以提高VSG控制系统的准确性和快速性.

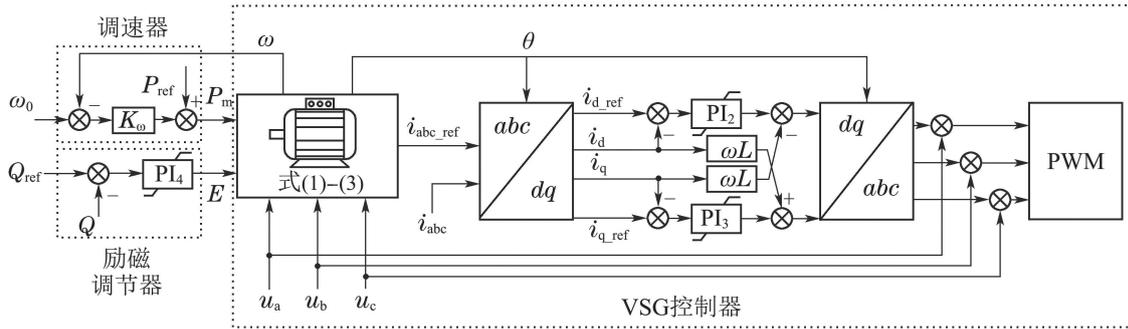


图4 VSG控制策略

Fig. 4 Control strategy for VSG

需要说明的是, 由于调速器中调频系数 K_ω 和阻尼系数 D 对于频率调节的作用基本相同^[11], 因此本文忽略调速器, 即 P_{ref} 与 P_m 等值, 并通过调节 D 来补偿它的作用。

与电网并联的VSG, 不仅要向电网输出有功功率, 还要具备输出给定无功功率的能力. 在传统同步发电机组中, 调节励磁电流, 即电动势就可以调节无功功率. 根据这一现象, 本文模拟励磁调节器特性, 将VSG无功指令值 Q_{ref} 与实际值 Q 之差作为PI调节器的输入, 通过调整电动势 E , 实现并网运行时无功功率的无差闭环控制。

3.3 协调控制策略(The coordinated control strategy)

协调控制单元的任务主要有两个: 一是确定光伏阵列的最大功率点电压 U_{MPP} ; 二是控制储能的充放电功率, 以调整储能的SOC。

协调控制单元如图5所示, MPPT算法得到的最大功率点电压 U_{MPP} 经过限幅环节后作为buck/boost变换器的电压指令值, 以满足逆变对直流侧电压的要求; VSG无功功率指令 Q_{ref} 直接给定, 有功功率指令 P_{ref} (即 P_m)由协调控制策略得到. 根据充放电功率指令值 $P_{st.ref}$ ($P_{st.ref} > 0$ 放电, $P_{st.ref} < 0$ 充电)与实际值 p_{st} 的偏差, PI调节器对VSG的“机械功率” P_m 进行调节, 并网逆变器按同步发电机特性改变其输出功率, 从而控制 p_{st} 跟踪 $P_{st.ref}$. 为方便起见, 本文假定储能的SOC处于最佳范围内, 并设定 $P_{st.ref}$ 为0. 此时, 储能仅在动态过程中弥补光伏阵列与VSG之间功率的不平衡, 而稳态时维持SOC恒定. 在实际中, $P_{st.ref}$ 则由能量管理系统根据SOC的变化进行调整。

下面以光照强度增加的情况为例, 对控制 p_{st} 的过程进行详细分析: 光照强度增加后, 光伏功率增大; 此时, VSG输出功率不变, 直流母线电压升高; 而buck/boost变换器为了维持直流母线电压恒定, 必然会对电池进行充电, 即 $p_{st} < 0$; 那么, $P_{st.ref} - p_{st}$

> 0 , 从而使得PI调节器输出 P_m 增加, 根据同步发电机原理可知, VSG输出功率逐渐增加; 光伏功率稳定后, 随着VSG输出功率的增加, 充电功率 $|p_{st}|$ 会逐渐减小, 直至 $p_{st} = P_{st.ref} = 0$.

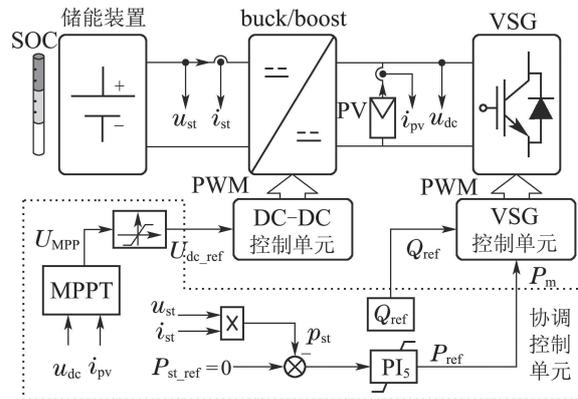


图5 协调控制策略

Fig. 5 Coordinated control strategy

可见, 协调控制策略能够控制 p_{st} , 从而调整储能的SOC, 可避免深度充放电缩短电池寿命。

在上述控制策略下, 系统的动静态性能与开关频率、同步发电机模型参数、控制器参数等有密切关系. VSG控制的本质为电流环控制, 已有较多文献对其进行了分析. 本文假设VSG控制策略使得并网逆变器对外呈现出同步发电机特性, 接下来在此基础上分析同步发电机模型参数、协调控制器参数以及VSG运行状态对系统性能的影响。

4 系统建模与性能分析(Modeling and performance analysis)

4.1 系统小信号建模(The small-signal model of the system)

对式(2)-(3)标幺化后得到其小信号模型为^[25]

$$\frac{d\Delta\delta}{dt} = \frac{d\Delta\theta}{dt} - \omega_0 = \omega_0\Delta\omega, \quad (4)$$

$$\frac{d\Delta\omega}{dt} = \frac{1}{J}(S_E\Delta\theta + D\Delta\omega), \quad (5)$$

其中: $\omega, J, D, P_e, \theta$ 为式(2)–(3)对应量的标么值; δ 为同步发电机功角, 单位rad; 整步功率因数 $S_E = \frac{dP_e}{d\delta}$. 同步发电机模型参数一定时, S_E 与同步发电机的运行状态有关. 设光伏阵列、储能以及VSG的功率输出方向为正方向, 忽略直流母线电容的能量变化, 由能量守恒可知光伏阵列功率 p_{pv} , p_{st} 与 P_e 满足 $p_{pv} + p_{st} = P_e$, 则其小信号模型为

$$\Delta p_{pv} + \Delta p_{st} = \Delta P_e. \quad (6)$$

因此, 式(4)–(6)即为储能型并网光伏发电系统的小信号模型, 对应的框图如图6所示.

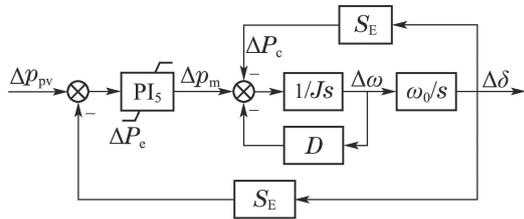


图 6 小信号模型框图

Fig. 6 Diagram of small signal model

4.2 系统性能分析(Performance analysis for the system)

利用系统的小信号模型可以分析储能型光伏并网发电系统的动、稳态特性. 根据图6得到VSG功角的小信号闭环传递函数为

$$\frac{\Delta \delta}{\Delta P_{pv}} = \frac{\omega_0(K_{p5}s + K_{i5})}{Js^3 + Ds^2 + \omega_0 S_E(K_{p5} + 1)s + \omega_0 S_E K_{i5}}, \quad (7)$$

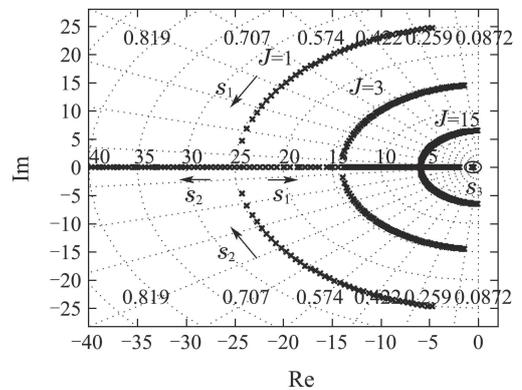
式中: K_{p5} 和 K_{i5} 分别为协调控制器PI调节器的比例系数、积分系数.

图7(a)为 $J = 1, 3, 15, D$ 从10增加到200时系统根轨迹簇. 可以看出, 系统共有3个特征根, 其中: s_3 为实根, 其位置主要由控制器参数 K_{p5}, K_{i5} 决定, 几乎不受 J 和 D 取值的影响; s_1 和 s_2 为一对共轭复根, 随着 D 的增大, 它们的变化趋势如图中箭头所示. 当 J 增大时, s_1 和 s_2 逐渐靠近虚轴, 系统的响应速度降低, 暂态分量衰减速度减小, 调节时间增大; 阻尼振荡频率减小, 峰值时间延迟. 当 J 增大至一定程度时, 系统的动态性能和稳定性均会下降, 甚至出现失稳现象. 而随着 D 的增加, s_1 和 s_2 逐渐远离虚轴, 且阻尼增大, 此时系统的稳定性和动态性能都得到了改善; 但是, 当进一步增大 D 时, s_1 和 s_2 由虚根变为实根, 并在实轴交汇后分离, 系统呈现出过阻尼特性, 此时若再增大 D , 则 s_1 趋向原点, 导致系

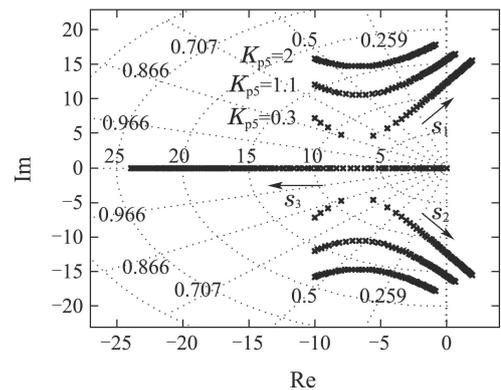
统稳定裕度减小.

图7(b)为 $K_{p5} = 0.3, 1.1, 2, K_{i5}$ 从0.1变化到50时系统根轨迹簇. 由图可知, 增大 K_{p5} , 系统的阻尼减小, 超调增大, 自然频率增加. K_{i5} 增加时, 实根 s_3 远离原点, 同时 s_1 和 s_2 逐渐靠近虚轴, 系统的动态性能得到一定程度的改善; 当进一步增大 K_{i5} 时, s_1 和 s_2 更加靠近虚轴, 甚至会成为主导极点, 系统的稳定裕度和响应速度降低; K_{i5} 过大时, s_1 和 s_2 将会越过虚轴进入右半平面, 导致系统失稳.

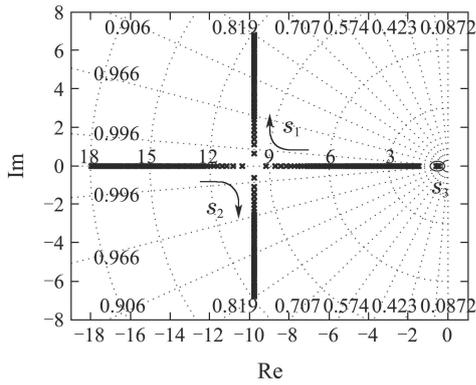
整步功率因数 S_E 反映了同步发电机维持同步运行的能力, 即静态稳定的程度. 在 L_s 和 R_s 确定的情况下, S_E 的大小与电动势 E 、功角 δ 有关. 换言之, 同步发电机的运行状态决定了 S_E 的大小. 图7(c)为 S_E 从0.5到2变化的根轨迹, 沿箭头方向为 S_E 增大方向. 同样地, s_3 为实根, 其位置主要由控制器参数 K_{p5} 和 K_{i5} 决定. 在 S_E 较小时, s_1 和 s_2 为实根, 系统呈现过阻尼特性, 且动态响应速度较慢; 当 S_E 增大至一定程度, s_1 和 s_2 变为共轭复根, 系统开始呈现出欠阻尼特性; 而随着 S_E 继续增大, 表征暂态分量衰减速度的实部基本保持不变, 但是阻尼下降, 自然频率增加. 这与文献[26]的结论是相同的, 说明了VSG与同步发电机在该方面的一致性, 也为参数 L_s 和 R_s 的优化提供了基础.



(a) J 和 D 变化时系统的特征根分布



(b) K_{p5} 和 K_{i5} 变化时系统的特征根分布



(c) S_E 变化时系统的特征根分布

图7 不同参数变化时系统的特征根分布

Fig. 7 Root locus with different parameters values

5 仿真验证(Simulation and verification)

为了验证上述原理、建模及分析的正确性, 本文在MATLAB/Simulink环境下搭建了相应的仿真模型, 并进行了仿真实验. 下面介绍有关参数, 并对仿真实验进行分析.

5.1 仿真参数(Parameters for simulation)

本文储能系统为25节PS-121100型铅酸蓄电池串联; 光伏阵列采用文献[27]所述模型. 其他参数如表1所示. 本文需要研究光伏功率波动对于系统的影响, 而MPPT方法性能的优劣则非本文的重点. 因此, 仿真过程中所采用的MPPT控制方法为电导增量法^[24].

表1 仿真参数

Table 1 Parameters for simulation

参数	数值	单位
额定容量 S_n	20	kVA
额定频率 f_n	50	Hz
额定输出电压 U_n	380	V
开关频率 f_s	10	kHz
直流侧电容 C_{dc}	300	μ F
滤波电感 L_1	1.2	mH
滤波电容 C	20	μ F
滤波电感 L_2	0.8	mH
同步电阻 R_s	0.002	p.u.
同步电感 L_s	0.5	p.u.
电网电阻 R_g	0.01	Ω
电网电感 L_g	0.5	mH

5.2 仿真结果(Simulation results)

光照强度增加时, VSG频率 f 、逆变器输出功率 P_o 、光伏阵列输出电流 i_{pv} 、直流侧电压 u_{dc} 以及储能输出电流 i_{st} 5个关键量的响应曲线如图8所示. 由图8可以看出, 增大光照强度后, 光伏阵列的输出电流迅速上升, 导致其输出功率迅速增大; 为控制

直流母线电压, 储能系统充电, 吸收能量. 同时, MPPT搜寻最大功率点电压 U_{MPP} , buck/boost变换器控制母线电压完成对 U_{MPP} 的跟踪, 使得光伏阵列运行在最大功率点. 协调控制单元以储能充放电功率等于0为目标, 在储能充电时, 增大VSG的“机械功率” P_m ; 并网逆变器依照同步发电机特性增加馈入电网的能量. 最终, 使系统达到储能充放电功率为0、直流母线电压跟踪 U_{MPP} 、逆变器模拟同步发电机特性3个控制目标. 值得一提的是, 光伏功率突变时, 逆变器的输出功率变化平滑. 可见, 储能和VSG还可对入网功率波动起到一定的平抑作用.

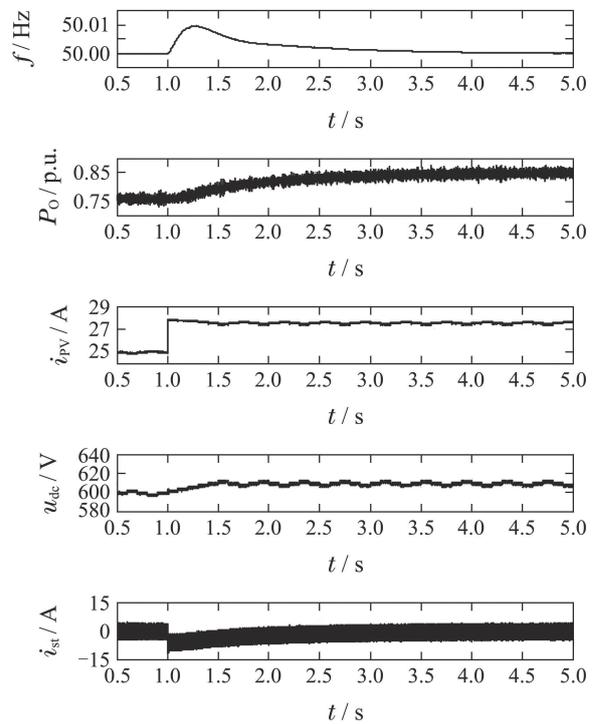


图8 光照强度增加时关键量响应曲线

Fig. 8 Responses of the key quantities when the light intensity steps

图9所示, 为在公共连接点处投切10 kW负载投切时关键量响应曲线. 负载在1.05 s投入, 输出功率增加, VSG频率降低; 直流母线电压产生短暂波动, 但是储能系统会迅速使其恢复; 储能模拟同步发电机转子在转速降低时的能量变化—存储的能量减少, 放电以向外输出功率. 可以看出, 动态过程中, VSG频率平滑变化, 没有发生突升、突降的现象. 同样地, 负载在2.5 s切除后, VSG频率虽有波动, 但变化平滑, 且经一段时间后恢复到额定值. 因此, 本文所提储能型光伏并网系统具有同步发电机频率支撑的特性.

参数取不同值时, 光伏功率扰动下VSG的频率响应曲线如图10所示. 可以看出, 增大 J , 频率响应的调节时间、超调增加, 且出现振荡现象, 系统的快速性和稳定性降低; 增大 D , 频率响应的阻尼增加, 振荡减

弱, 快速性和稳定性得到一定程度的改善. 增加 K_{p5} , 频率响应的阻尼减小, 出现振荡现象, 超调增大; 此时若增加 K_{i5} , 则阻尼进一步减小, 振荡更加强烈, 且调节时间增大. S_E 增大, 阻尼振荡频率增加, 峰值时间提前; 阻尼比减小, 超调增大; 调节时间没有显著差距. 可见, 仿真结果与系统性能分析的结论一致.

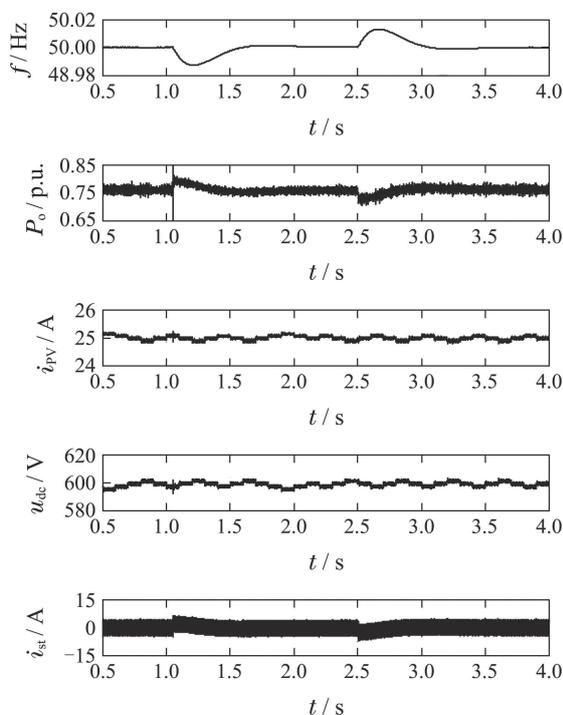


图 9 负载投切时关键量响应曲线

Fig. 9 Responses of the key quantities when load is switched

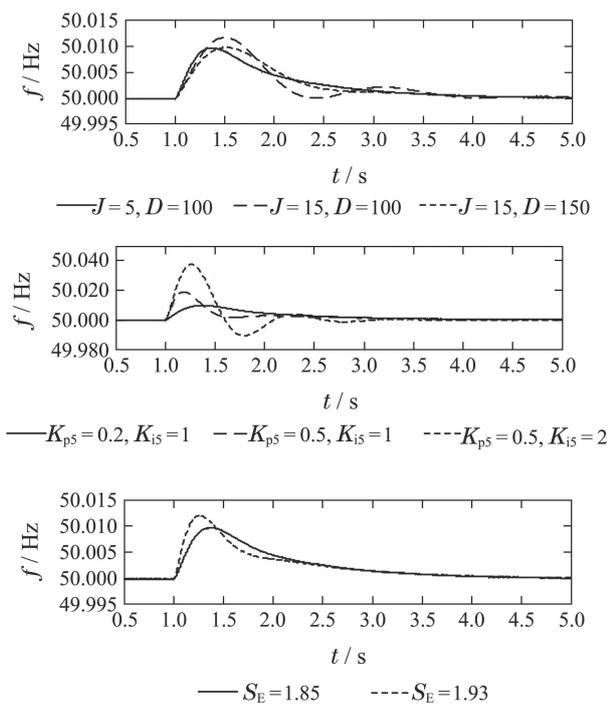


图 10 不同参数下 VSG 频率响应曲线

Fig. 10 Frequency responses with different values of parameters

本文模拟励磁调节器特性, 通过调整电动势 E , 实现并网无功功率的无静差跟踪. 图 11 所示为无功功率指令阶跃后 VSG 无功功率和电动势 E 响应曲线. 可以看出, 无功功率指令阶跃后, E 得到调整, 最终使无功功率实际值无静差的跟踪给定值. 因此, 本文所提系统具有向电网输送给定无功功率的能力.

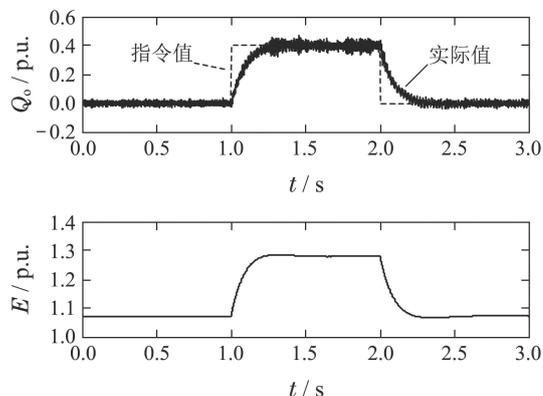


图 11 VSG 无功功率及电动势响应曲线

Fig. 11 Responses of VSG reactive power and electromotive force

6 结论(Conclusions)

本文研究了一种具有同步发电机特性的储能型光伏并网发电系统, 包括硬件结构与控制策略, 建立了系统的数学模型, 并分析了主要参数对系统稳定性与动态性能的影响. 仿真结果不但验证了分析结果的正确性, 而且表明了所提控制策略能够模拟同步发电特性、可实现最大功率跟踪, 且兼具控制储能充放电的能力, 并得到以下结论: 1) 所提控制策略使得光伏发电系统的接口逆变器能够模拟同步发电机特性, 从而具有频率惯性及阻尼频率偏移的能力, 可有效提升电网对分布式光伏并网系统的接纳能力; 2) 所提控制策略可控制储能充放电功率、调整储能的 SOC, 为吞吐模拟同步发电机转子动能变化所需的电能提供了条件, 而且可有效避免深度充放电对储能寿命的影响; 3) 所提控制策略不仅可跟踪光伏阵列的最大功率以提高发电效率, 而且还能平抑光伏系统并网功率的波动.

参考文献(References):

- [1] LÜ Zhipeng, SHENG Wanxing, ZHONG Qingchang, et al. Virtual synchronous generator and its applications in micro-grid [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(6): 2591 – 2603. (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(6): 2591 – 2603.)
- [2] ZENG Zheng, SHAO Weihua, RAN Li, et al. Mathematical model and strategic energy storage selection of virtual synchronous generators [J]. *Automation of Electric Power System*, 2015, 39(13): 22 – 31. (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.)
- [3] ZHENG Tianwen, CHEN Laijun, CHEN Tianyi, et al. Review and prospect of virtual synchronous generator technologies [J]. *Automa-*

- tion of Electric Power System, 2015, 39(21): 165 – 175.
(郑天文, 陈来军, 陈天一, 等. 虚拟同步发电机技术展望 [J]. 电力系统自动化, 2015, 39(21): 165 – 175.)
- [4] ALIPOOR J, MIURA Y, ISE T. Power system stabilization using virtual synchronous generator with alternating moment of inertia [J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2015, 3(2): 451 – 458.
- [5] European FP6 project workshop, VSYNC project workshop [EB/O–L]. Netherland: VSYNC Commission, 2011[2013–3–15]. <http://www.vsync.eu/>.
- [6] ZHONG Q C, WEISS G. Synchronverters: inverters that mimic synchronous generators [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, 58(4): 1259 – 67.
- [7] CHEN Y, HESSE R, TURSCHNER D, et al. Improving the grid power quality using virtual synchronous machines [C] //2011 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG). Malaga, Spain: IEEE, 2011: 1 – 6.
- [8] D'ARCO S, SUUL J A, FOSSO O B. Control system tuning and stability analysis of virtual synchronous machines [C] //2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Denver, USA: IEEE, 2013: 2664 – 2671.
- [9] YANG Xiangzhen, SU Jianhui, DING Ming, et al. Voltage control strategies for microgrid with multiple inverters [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 32(7): 7 – 14.
(杨向真, 苏建徽, 丁明, 等. 面向多逆变器的微电网电压控制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 32(7): 7 – 14.)
- [10] XU Huadian, SU Jianhui, YANG Xiangzhen, et al. Analysis of influences of equating ways and filter circuits for virtual synchronous generator-based inverter [J]. *Control Theory & Applications*, 2017, 34(8): 1053 – 1061.
(徐华电, 苏建徽, 杨向真, 等. 虚拟同步机逆变器等效方式及滤波电路影响分析研究 [J]. 控制理论与应用, 2017, 34(8): 1053 – 1061.)
- [11] DU Yan, SU Jianhui, ZHANG Liuchen, et al. A mode adaptive frequency controller for microgrid [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(19): 67 – 76.
(杜燕, 苏建徽, 张榴晨, 等. 一种模式自适应的微网调频控制方法 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(19): 67 – 76.)
- [12] DING Ming, XU Ningzhou, BI Rui. Modeling of BESS for smoothing renewable energy output fluctuations [J]. *Automation of Electric Power System*, 2011, 35(2): 66 – 72.
(丁明, 徐宁舟, 毕锐. 用于平抑可再生能源功率波动的储能电站建模及评价 [J]. 电力系统自动化, 2011, 35(2): 66 – 72.)
- [13] HONG Haisheng, JIANG Quanyuan, YAN Yuting. An optimization control method of battery energy storage system with wind power fluctuations smoothed in real time [J]. *Automation of Electric Power System*, 2013, 37(1): 103 – 109.
(洪海生, 江全元, 严玉婷. 实时平抑风电场功率波动的电池储能系统优化控制方法 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 103 – 109.)
- [14] JIANG Ping, XIONG Huachuan. A control scheme design for smoothing wind power fluctuation with hybrid energy storage system [J]. *Automation of Electric Power System*, 2013, 37(1): 122 – 127.
(蒋平, 熊华川. 混合储能系统平抑风力发电输出功率波动控制方法设计 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 122 – 127.)
- [15] WU Zhenwei, JIANG Xiaoping, MA Huimeng, et al. Wavelet packet-fuzzy control of hybrid energy storage systems for pv power smoothing [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(3): 317 – 324.
(吴振威, 蒋小平, 马会萌, 等. 用于混合储能平抑光伏波动的小波包—模糊控制 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(3): 317 – 324.)
- [16] ZHAO Shuqiang, LIU Dazheng, XIE Yuqi, et al. Scheduling strategy of energy storage in wind-solar-battery hybrid power system based on dependent-chance goal programming [J]. *Automation of Electric Power System*, 2015, 39(14): 30 – 36.
(赵书强, 刘大正, 谢宇琪, 等. 基于相关机会目标规划的风光储联合发电系统储能调度策略 [J]. 电力系统自动化, 2015, 39(14): 30 – 36.)
- [17] LI Q, CHOI S S, YUAN Y, et al. On the determination of battery energy storage capacity and short-term power dispatch of a wind farm [J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2011, 2(2): 148 – 158.
- [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*, 2017, 8(5): 2268 – 2277.
- [19] MENG Jianghui, SHI Xinchun, WANG Yi, et al. Control strategy of der inverter for improving frequency stability of microgrid [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2015, 30(4): 70 – 79.
(孟建辉, 石新春, 王毅, 等. 改善微电网频率稳定性的分布式逆变器电源控制策略 [J]. 电工技术学报, 2015, 30(4): 70 – 79.)
- [20] FUENTE D V D L, RODRÍGUEZ C L T, GARCERÓ G, et al. Photovoltaic power system with battery backup with grid-connection and islanded operation capabilities [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, 60(4): 1571 – 1581.
- [21] WANG Zhenxiong, YI Hao, ZHUO Fang, et al. A hardware structure of virtual synchronous generator in photovoltaic microgrid and its dynamic performance analysis [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(2): 444 – 453.
(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.)
- [22] CHEN Maoxin, LI Lan. Energy storage photovoltaic inverter based on virtual synchronous generator [J]. *Electrotechnical Application*, 2015, 34(16): 51 – 54
(陈毛欣, 李岚. 基于虚拟同步发电机的储能型光伏逆变技术 [J]. 电气应用, 2015, 34(16): 51 – 54.)
- [23] HE Daqing. Control of photovoltaic-based micro-grid with virtual synchronous generator [J]. *Electrical & Energy Management Technology*, 2015(10): 46 – 50.
(何大清. 光储发电系统的虚拟同步发电控制 [J]. 电器与能效管理技术, 2015(10): 46 – 50.)
- [24] ZHANG X, CAO R X. *Solar Photovoltaic Grid-connected Power Generation And Its Inverter Control* [M]. Beijing: China Machine Press, 2010.
- [25] LI G Q. *Power System Transient Analysis* [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2007.
- [26] KUNDUR P. *Power System Stability and Control* [M]. New York: McGraw-Hill, 1994.
- [27] SU Jianhui, YU Shijie, ZHAO Wei, et al. Investigation on engineering analytical model of silicon solar cells [J]. *Acta Energetica Sinica*, 2001, 22(4): 409 – 412.
(苏建徽, 余世杰, 赵为, 等. 硅太阳能电池工程用数学模型 [J]. 太阳能学报, 2001, 22(4): 409 – 412.)

作者简介:

徐华电 (1990–), 男, 博士研究生, 目前研究方向为新能源利用与分布式发电技术, E-mail: xuhuadian@163.com;

苏建徽 (1963–), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为新能源利用与分布式发电技术、电力变换控制技术、直流输电技术, E-mail: su.chen@126.com;

施永 (1985–), 男, 博士, 讲师, 目前研究方向为分布式发电与电力电子技术, E-mail: shiyongmail@yeah.net;

王一丁 (1989–), 男, 博士研究生, 目前研究方向为无刷双馈电机控制技术, E-mail: aaa77781@126.com;

杜燕 (1978–), 女, 博士, 副教授, 目前研究方向为新能源利用与分布式发电技术, E-mail: dydf@sina.com.