

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191500

基于稳压控制的独立光储微电网控制策略研究及仿真分析

徐玉琴, 方楠

(华北电力大学电气与工程学院, 北京 102206)

摘要: 独立光储发电系统不与大电网连接, 仅靠系统控制策略保障电能质量, 目前仍具有电能质量较差、系统不稳定的问题。以提高系统电能质量、增强系统稳定性为目的, 提出一种基于稳压控制的控制策略。对于储能系统, 在通过逆变器前首先进行稳压控制, 再通过逆变器的双环控制结构维持系统的电压与频率恒定。光伏电池在逆变器前采取最大功率点跟踪(Maximum Power Point Tracking, MPPT)及稳压控制, 并采用空间矢量脉宽调制(Space Vector Pulse Width Modulation, SVPWM)的恒功率控制策略(PQ control)维持稳定输出。在 Matlab/simulink 环境下进行仿真测试, 验证控制策略的有效性。

关键词: 稳压控制; SVPWM; 双环控制结构; 恒功率控制

Control strategy research and simulation analysis of an independent optical storage microgrid based on voltage stabilizing control

XU Yuqin, FANG Nan

(College of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: An independent optical storage power generation system is not connected with the large power grid, and only relies on the system control strategy to ensure power quality. At present, it still has the problems of poor power quality and system instability. In order to improve power quality and enhance the stability of the system, this paper proposes a control strategy based on voltage stabilizing control. For the energy storage system, the voltage and frequency of the system are kept constant before the inverter is adopted, and then the voltage and frequency of the system are kept constant through the double loop control structure of the inverter; the photovoltaic cell adopts MPPT and voltage stabilizing control before the inverter, and uses the PQ control strategy of SVPWM modulation to maintain stable output. The simulation test is carried out in the Matlab/simulink environment to verify the effectiveness of the control strategy.

This work is supported by Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 2018ZD01) and Youth Science Fund of National Natural Science Foundation of China (No. 51807059).

Key words: voltage stabilizing control; SVPWM; double loop control structure; PQ control

0 引言

独立光储系统不依赖大电网, 仅利用储能装置的充放电特性及逆变器的控制策略维持系统的电能稳定, 是一种典型的微电网架构, 广泛应用于我国的偏远地区和小型商业区^[1]。但由于微电源出力不稳定、功率平衡调节难度大、电能质量难以维持稳定等技术问题, 独立光储系统的稳定性难以满足标

准^[2-3]。因此, 研究微电网控制策略, 改善系统电能质量与系统稳定性具有重大意义。

针对微电网逆变器的控制策略, 已经取得了部分研究成果, 文献[4]对系统采用对等控制策略, 逆变器采用下垂控制, 并结合虚拟同步机算法, 减少下垂控制缺少转动惯量等缺点对系统的影响; 文献[5]分别进行孤岛运行模式下对等控制策略与主从控制策略的理论分析与仿真测试, 并对电压电流双环控制的参数进行设计; 文献[6]针对传统下垂控制只有在线路阻抗为感性时才能正确控制的缺点, 提出一种改进下垂控制策略, 并进行了仿真论证; 文献[7]采用一种混合控制策略, 令光伏储能模块采用

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目资助(2018ZD01); 国家自然科学基金青年科学基金项目资助(51807059)

主从控制，再加入多个下垂单元采用对等控制，最后通过建立仿真模型验证策略的正确可行；文献[8-10]在微电网的运行控制中考虑电动汽车接入的影响；文献[11-14]针对传统光伏逆变器控制策略存在的问题提出了改进方案；文献[15-16]通过优化逆变器调制策略，提高逆变器控制性能；文献[17-18]针对微电网运行策略对系统故障恢复能力的影响进行了相关阐述；文献[19-22]通过优化微网运行方式，采用两种运行方式结合或分层控制的方法，提高系统运行稳定性和微网在孤岛和并网两种状态下平滑切换的能力。

本文以独立运行的光储联合系统为研究对象，提出一种基于稳压控制与混合调制的微电网主从控制策略，针对输出波动大的光伏电池，通过 DC/DC 变换器在直流侧稳定电压，采取恒功率控制策略稳定输出功率，并通过 SVPWM 调制提高电压利用率；针对储能电池，采取恒压恒频控制(VF control)平抑波动，提供系统的电压与频率支撑。通过 Matlab/Simulink 仿真，论证本文提出控制策略对改善系统电能质量与提高系统稳定性的有效性。

1 独立光储系统结构

独立光储系统结构如图 1 所示，由光伏电池、储能装置、DC/DC 变换器、逆变器与负荷组成。其中交流母线电压设计为居民用电的标准电压 220 V。

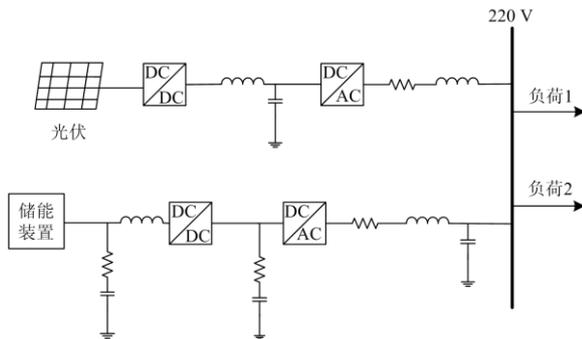


图 1 独立光储系统结构

Fig. 1 Structure of independent optical storage system

光伏受天气影响，具有随机性，间歇性^[23]，无法直接使用。因此，需通过 DC/DC 变换器^[24]实现整流升压，并采取最大功率点跟踪策略(MPPT)保证功率的最大输出；再通过具有成熟控制策略的逆变器，输出符合居民用电标准的稳定电压。但是在独立系统中，靠光伏逆变器的单一控制策略无法保证输出电压的稳定，因此需要依靠储能装置的控制策

略为光伏逆变器提供稳定的电压及频率支撑，才能保持整个系统的稳定。

2 独立光储系统的协调控制策略

本文提出一种改进的主从控制策略，针对储能电池，首先通过 DC/DC 变换器实现稳压控制，再采取 VF 控制策略，为系统提供恒定的电压及频率支撑；光伏电池首先通过 DC/DC 变换器实现 MPPT 及稳压控制，再通过逆变器 PQ 控制策略实现功率的恒定输出。

2.1 储能系统及其逆变器控制策略

2.1.1 双向 DC/DC 变换器稳压控制

储能系统在逆变器前加入一个双向 DC/DC 变换器，不仅能够保证能量的双向传输，还通过稳压控制策略，将输出电压 U_{dc} 控制在固定值，保证输出的稳定。

本文采用电压外环、电流内环控制策略，如图 2 所示。将直流电压 U_{dc} 作为外环控制变量，令参考值 U_{dc_ref} 与实际值作差后通过 PI 控制器，限幅后得到内环电流参考值 I_b_ref ，与电流 I_b 作差后再采用 PI 控制器得到 PWM(Pulse Width Modulation)发生器的输入信号。

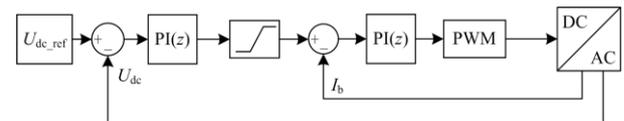


图 2 储能系统稳压控制原理

Fig. 2 Voltage stabilizing control principle of energy storage system

2.1.2 VF 控制策略

VF 控制旨在通过对 PWM 信号的控制，实现输出电压与频率恒定的目的^[25]。在独立运行的光储发电系统中，储能逆变器可采用 VF 控制策略为系统提供电压与频率支撑。

本文通过电压电流双环控制结构实现逆变器的恒压恒频控制，基本工作原理如图 3 所示。首先获取三相输出电压 U_{abc} ，利用软件锁相环获得参考相角后通过派克正变换得到 dq 轴上的电压分量 U_d 、 U_q 。在电压外环中，将参考电压 U_{d_ref} 、 U_{q_ref} 与实际电压分量作差，对误差采取比例积分控制，再添加电容解耦环节 $-\omega C U_q$ 与 $\omega C U_d$ 以提高控制响应速度，得到内环电流控制需要的参考电流 I_{d_ref} 与 I_{q_ref} 。由分析可得式(1)。

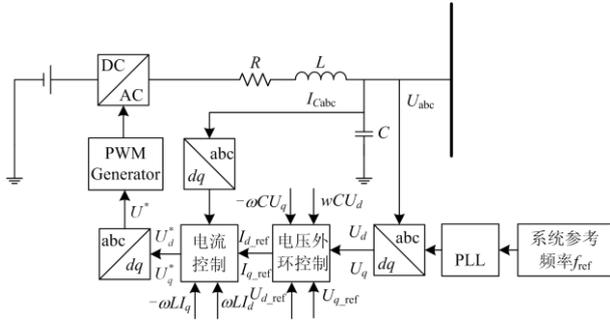


图3 VF控制策略双环控制结构

Fig. 3 Dual loop control structure of VF control strategy

$$\begin{cases} I_{d_ref} = (U_{d_ref} - U_d)(k_{p1} + \frac{k_{i1}}{s}) - \omega CU_q \\ I_{q_ref} = (U_{q_ref} - U_q)(k_{p2} + \frac{k_{i2}}{s}) + \omega CU_d \end{cases} \quad (1)$$

再将参考电流与由 I_{Cabc} 派克正变换后得到的 dq 轴分量作差, 同样使用比例积分控制, 并加入 ωLI_d 与 $-\omega LI_q$, 得到调制信号 U^* , 将 U^* 派克反变换后输入 PWM 发生器中, 得到逆变器的 PWM 控制信号。据此可得式(2)。

$$\begin{cases} (R + Ls)I_d = (I_{d_ref} - I_d)(k_{p3} + \frac{k_{i3}}{s}) \\ (R + Ls)I_q = (I_{q_ref} - I_q)(k_{p4} + \frac{k_{i4}}{s}) \end{cases} \quad (2)$$

再根据电容特性与电路关系得式(3)。

$$\begin{cases} U_d = \frac{I_d}{Cs} \\ U_q = \frac{I_q}{Cs} \end{cases} \quad (3)$$

联合式(1)一式(3)即可得到实际输出电压 U 与参考电压 U_{ref} 的函数关系。

2.2 光伏电池及其逆变器控制策略

2.2.1 MPPT 控制

MPPT 旨在通过某种方式监测并控制光伏电池的输出电压及输出电流, 使光伏每时刻的输出功率达到最大。本文采用改进扰动观测法^[26]实现最大功率点跟踪。

传统扰动观测法通过给予输出电压微小扰动, 观测输出功率变化趋势的方式不断调整输出电压, 使输出功率达到最大。改进扰动法在此基础上, 将步长固定的特点进行修改, 每一次的步长都基于本次扰动如上次扰动的功率差 ΔP 进行改变, 以提高优化速度及扰动准确性, 如图4所示, 其中 c 为用

于限制步长的常数。

2.2.2 光伏逆变器稳压及 PQ 控制策略

由于光伏发电的不稳定性, 每时每刻的最大功率也是不断变化的。但是作为系统的分布式电源, 如果每时刻输出的功率在不断变化, 对电力系统的稳定性会造成巨大的影响。因此对于光伏电池逆变器, 需采取控制策略保证输出功率的恒定。本文采取可输出恒定功率的 PQ 控制策略, 并采用能提高电压利用率的 SVPWM 调制实现^[27-29]。

在不计逆变器有功损耗及电网电压定向的条件下, 根据功率理论, 可得到式(4)。

$$\begin{cases} U_{dc} I_{dc} = P = \frac{3}{2} v_d i_d \\ Q = \frac{3}{2} v_d i_q \end{cases} \quad (4)$$

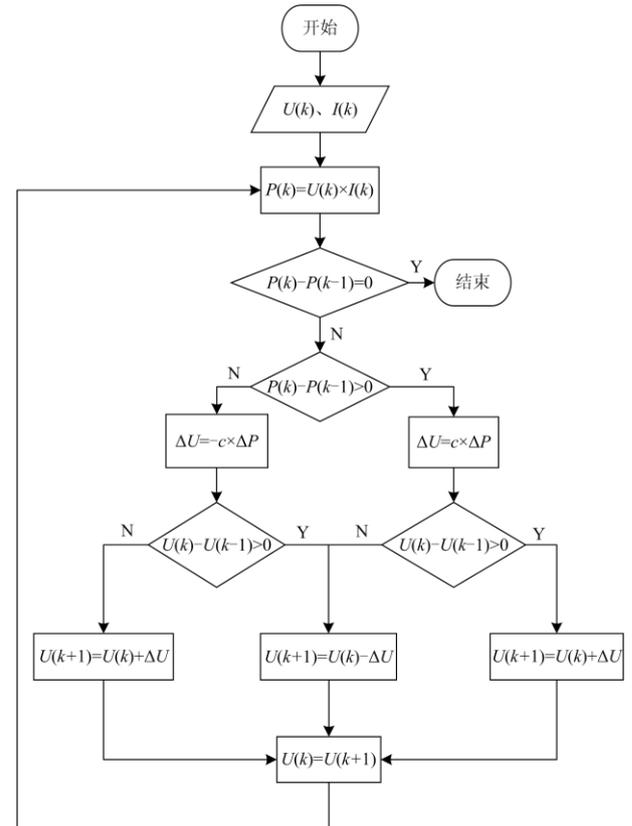


图4 改进扰动观测法

Fig. 4 Improved disturbance observation method

在理想情况下 v_d 恒定, 只需要通过控制交流侧电流即可控制输出功率。本文 PQ 控制依然采用电压电流双环结构, 如图5所示。首先令直流侧母线电压 u_d 与参考电压 u_{d_ref} 做差, 令差值进行 PI 控制, 得到参考直流电流 i_{d_ref} 如式(5)所示。

$$i_{d_ref} = (k_{p1} + \frac{k_{i1}}{s})(u_{d_ref} - u_d) \quad (5)$$

由于设定电网电压定向, 则输入参考轴电流 $i_{q_ref}=0$ 。将参考电流与实际交流侧电流做差后进行 PI 控制, 并加入电网电压前馈补偿和 dq 轴交叉耦合项补偿, 得到交流侧输出参考电压 u^* , 经 Clark 变换后通过 SVPWM 调制, 得到逆变器的控制信号如式(6)所示。

$$\begin{cases} u_d^* = (k_{p2} + \frac{k_{i2}}{s})(i_{d_ref} - i_d) - \omega L i_q + v_d \\ u_q^* = (k_{p3} + \frac{k_{i3}}{s})(0 - i_q) + \omega L i_d + v_q \end{cases} \quad (6)$$

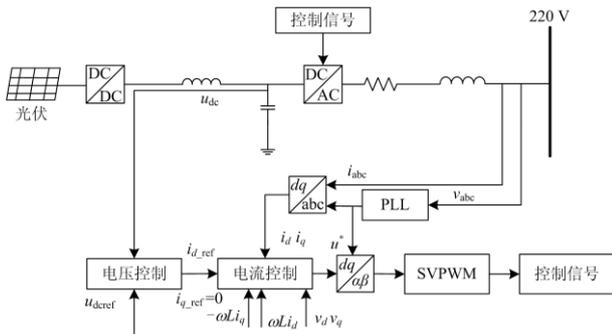


图 5 PQ 控制双环结构

Fig. 5 PQ control double loop structure

3 基于 Simulink 的仿真及结果分析

3.1 储能系统稳压控制策略仿真测试

在 Matlab/Simulink 环境下进行仿真论证, 选取铅酸蓄电池模型, 将参考电压设为 700 V, 设置电容值为 1 mF, 电感值为 5 mH。按照上述控制策略搭建 DC/DC 变换器及其控制模块, 设置仿真时间为 1 s, 测量输出电压, 如图 6 所示, 通过稳压控制模块的调节, 输出电压在 0.05 s 左右便稳定在了 700 V, 稳定效果良好。

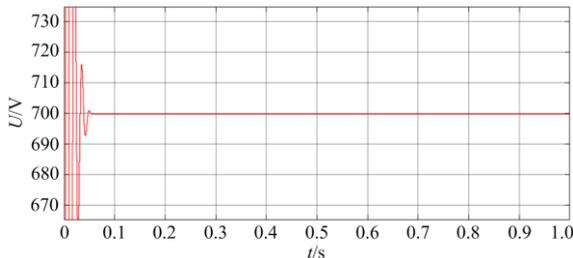


图 6 稳压控制电压波形图

Fig. 6 Voltage waveform of voltage stabilizing control

3.2 MPPT 仿真测试

本文采用 8 并 8 串光伏阵列进行 MPPT 仿真验证, 设置光照强度为 2 kW/m², 温度为 30 °C, 电感

L 取 1 μ H, 电容 C 取 100 μ F, 仿真时间设为 1 s。仿真结果如图 7 所示, 在不到 0.01 s 的时间内, MPPT 便实现了精确的最大功率跟踪, 跟踪速度良好; 为验证环境改变时跟踪的灵敏度, 设置 1.5 kW/m², 20°C 为仿真初始条件, 在 0.3 s 时提高光强至 2 kW/m², 在 0.7 s 时提高温度至 30°C, 仿真结果如图 8 所示, 外界条件改变时, 在不到 0.01 s 的时间内 MPPT 便实现了准确跟踪, 灵敏度极高。

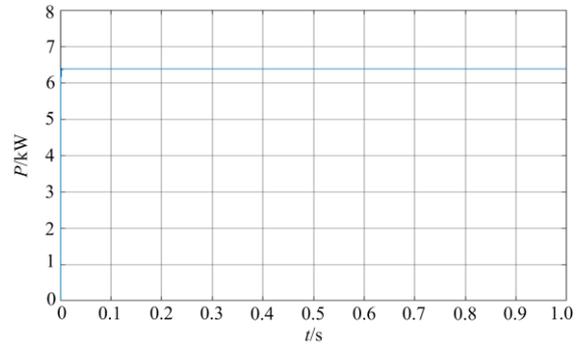


图 7 MPPT 跟踪速度测试

Fig. 7 MPPT tracking speed test

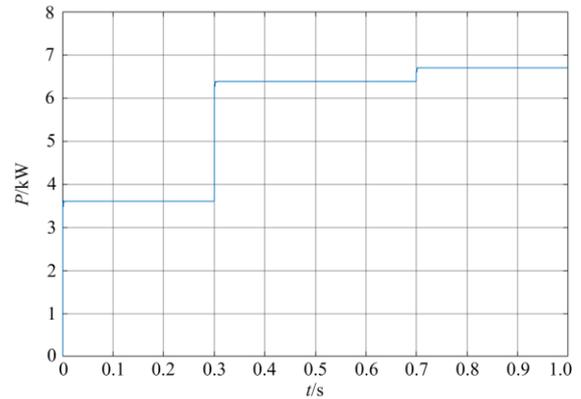


图 8 MPPT 跟踪灵敏度测试

Fig. 8 MPPT tracking sensitivity test

3.3 逆变器控制策略仿真测试

根据逆变器控制策略分析, 在 Simulink 平台搭建独立光储系统仿真模型。

联立式(1)一式(3)与式(4)一式(6)可得 VF 控制与 PQ 控制的双环传递函数。设定储能逆变器参数: C 为 1.5 mF, L 为 0.6 mH; PI 控制器参数会影响系统响应速度与稳定时间, 本文基于传递函数与经验法^[15], 首先参考传递函数给定控制参数初值, 通过仿真测试, 观测控制效果, 最终实现 PI 参数的整定与优化, 得到电压外环 PI 参数 $k_p=1\ 000$, $k_i=100$; 电流内环 PI 参数 $k_p=500$, $k_i=100$; 同理, 设定光伏

逆变器参数: R 为 0.1Ω , L 为 0.2 mH , 通过经验法得到电压外环 PI 参数 $k_p=0.5$, $k_i=10$; 电流内环 PI 参数 $k_p=30$, $k_i=300$ 。设定光照充足, 光伏电池的输出功率大于 10 kW ; 储能电池容量为 350 A h 。VF 控制的参考电压设为 220 V , 参考频率设为 50 Hz ; PQ 控制的参考有功设为 10 kW , 参考无功功率设为 0 。

为验证模型在负荷发生改变时的稳定能力, 设置初始负荷为 20 kW , 当仿真 1 s 时再并入一个 8 kW 的负荷; 设置仿真时间为 3 s 。

PQ 控制输出功率监测结果如图 9 所示, 在仿真初始系统处于调整阶段, 输出功率发生一定的波动, 在不到 0.2 s 的时间内完成调节, 维持稳定状态; VF 控制输出功率监测结果如图 10 所示, 在光伏输出功率波动时储能系统随时改变输出, 维持系统稳定; 在 1 s 时改变负荷, 由于 PQ 恒功率控制维持 10 kW 的稳定输出, 储能系统及时增加输出功率, 保证系统稳定。

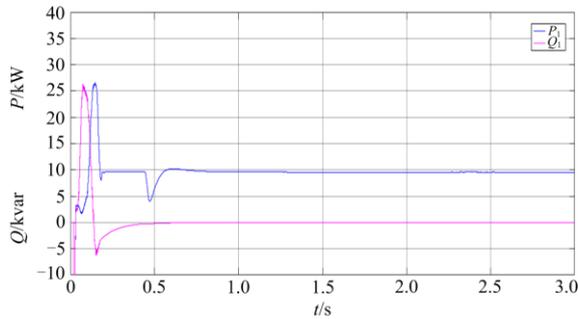


图 9 PQ 控制输出功率监测

Fig. 9 PQ control output power monitoring

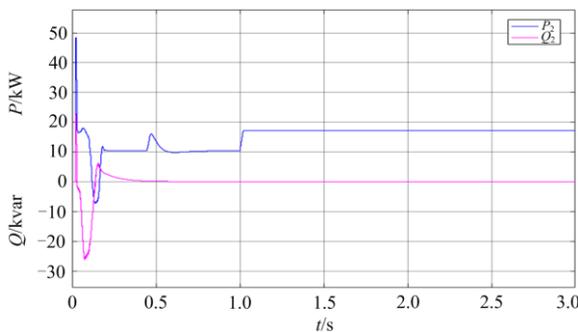
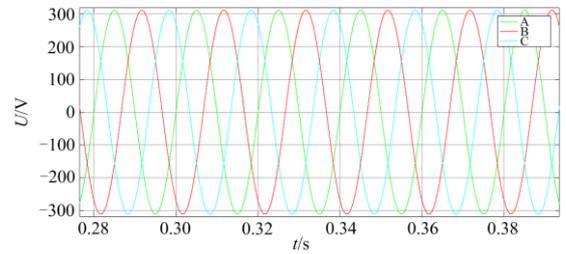


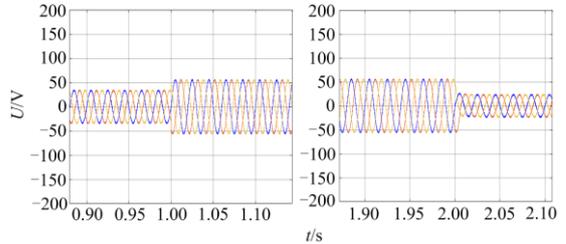
图 10 VF 控制输出功率监测

Fig. 10 VF control output power monitoring

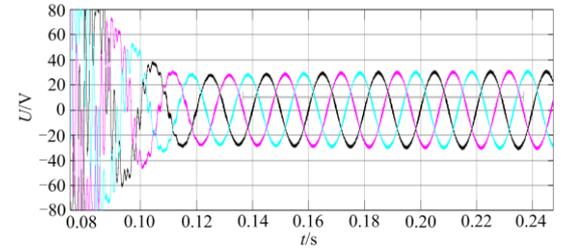
系统电压波形、储能逆变器电压波形及光伏逆变器输出电流波形截取图如图 11 所示。在 VF 控制策略的调控下, 系统电压保持稳定, 不因负荷的改变而产生波动; 光伏逆变器输出电流稳定。



(a) 系统电压波形截取图



(b) 储能逆变器输出电流波形截取图



(c) 光伏逆变器输出电流波形截取图

图 11 系统电压波形、储能逆变器输出电流波形及光伏逆变器输出电流波形截取图

Fig. 11 Screenshot of system voltage waveform, energy storage inverter output voltage waveform and photovoltaic inverter output current waveform

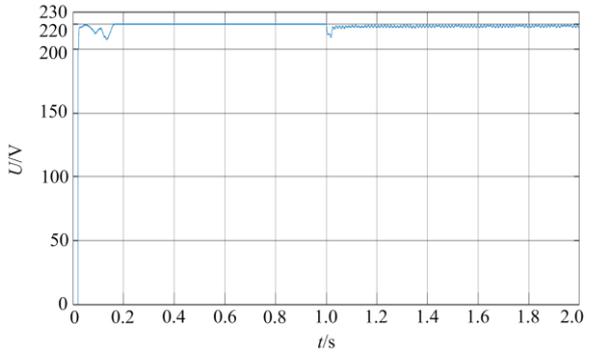
3.4 电压稳定性测试

为验证模型的稳压能力, 以 20 kW 为原始负荷, 不断增大仿真 1 s 时的接入负荷, 记录测试结果如表 1 所示。其中, P_a 为增加负荷, V_0 为初始稳定电压, V_f 为电压降落最大值, K 为电压波动率, t 为电压降落到稳定的时间, V_1 为稳定后电压。部分仿真波形如图 12 和图 13 所示, 其中横坐标表示仿真时间, 纵坐标表示电压有效值。

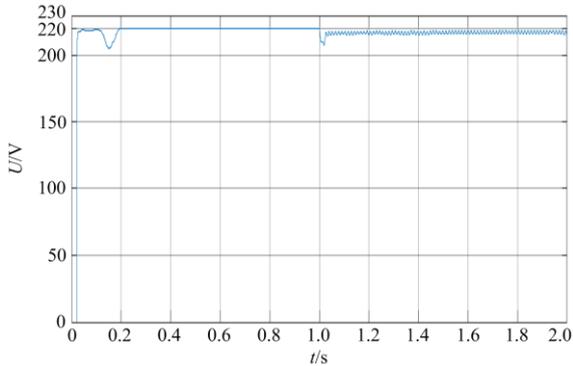
表 1 电压稳定测试结果

Table 1 Voltage stability test results

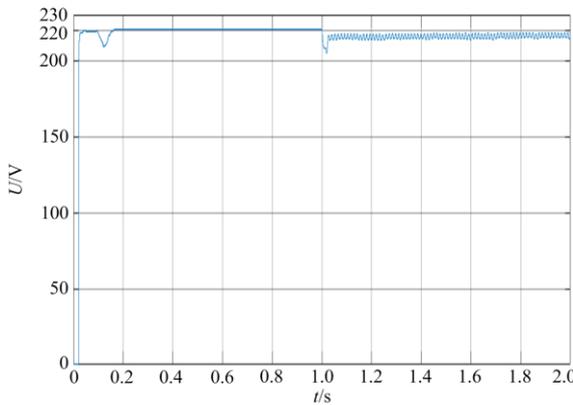
P_a/kW	V_0/V	V_f/V	K	t/s	V_1/V
80	220.2	5.1	-2.32%	0.022	220.2
90	220.2	7.7	-3.50%	0.024	219.5~220.2
100	220.2	10.2	-4.63%	0.026	217~219.3
110	220.2	12.9	-5.86%	0.026	215~218.2
120	220.2	15.3	-6.95%	0.027	213~217
130	220.2	17.7	-8.04%	0.027	211~216
140	220.2	20.6	-9.36%	0.03	209.7~216.5
150	220.2	23.8	-10.81%	0.03	208.6~215.3



(a) 负荷增加100 kW



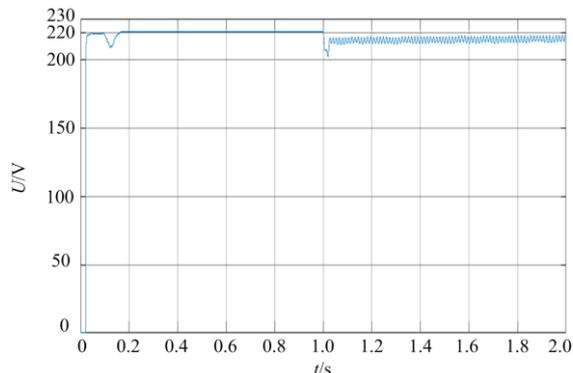
(b) 负荷增加110 kW



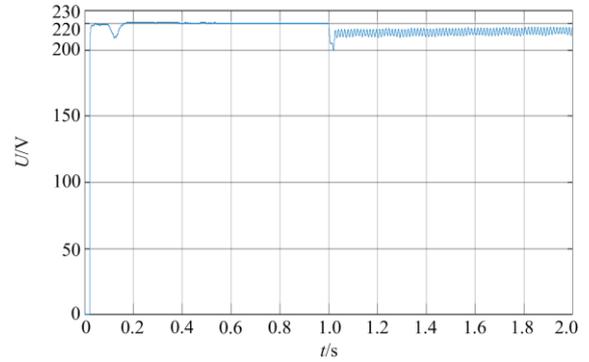
(c) 负荷增加120 kW

图 12 负荷增加电压波动曲线 1

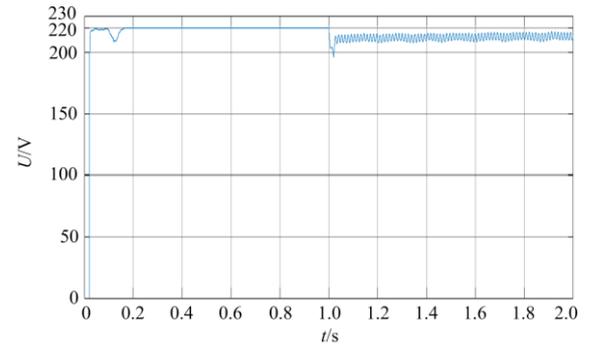
Fig. 12 Load increase voltage fluctuation curve 1



(a) 负荷增加130 kW



(b) 负荷增加140 kW



(c) 负荷增加150 kW

图 13 负荷增加电压波动曲线 2

Fig. 13 Load increase voltage fluctuation curve 2

由仿真结果可得，负荷变化率不超过 300%时，电压暂降都能够在一个周波内恢复到电压允许范围。且在功率变化不超过 120 kW 时，电压暂降仍能够保持在基准电压 220 V 的±7%。

稳定性测试实验说明，在本文所提控制策略下，对于各种敏感性负载，负荷变化均不会造成设备损坏，电能质量能够符合要求，因此本文所提策略的暂态稳定性良好。

4 结论

本文针对独立运行的光储发电系统电能质量差，电压不稳定的特点，提出一种基于稳压控制的主从控制策略，使储能系统和光伏系统通过逆变器前的电压都被稳定在参考值，减少输入电压的波动对控制策略的影响。

通过 Matlab/Simulink 建模仿真测试，证明基于该策略建立的模型能够很好地维持电压稳定，提高电能质量，同时在负荷波动率不超过 300%的条件下系统可迅速恢复稳定，暂态稳定性良好。

参考文献

[1] 李森, 胡钢, 赫卫国, 等. 光储微电网建模仿真研究[J]. 信息技术, 2017(12): 57-63.

- LI Sen, HU Gang, HE Weiguo, et al. Research on modeling and simulation of optical storage microgrid[J]. Information Technology, 2017(12): 57-63.
- [2] 刘强, 周林, 郭珂. 微电网的动态特性及控制策略分析[J]. 电力建设, 2014, 35(6): 31-37.
- LIU Qiang, ZHOU Lin, GUO Ke. Dynamic characteristics and control strategy analysis of microgrid[J]. Electric Power Construction, 2014, 35(6): 31-37.
- [3] 孟明, 陈世超, 赵树军, 等. 新能源微电网研究综述[J]. 现代电力, 2017, 34(1): 1-7.
- MENG Ming, CHEN Shichao, ZHAO Shujun, et al. Review of new energy micro grid research[J]. Modern Electric Power, 2017, 34(1): 1-7.
- [4] 李政. 孤岛运行模式下微网控制策略研究[D]. 南宁: 广西大学, 2018.
- LI Zheng. Research on micro network control strategy under island operation mode[D]. Nanning: Guangxi University, 2018.
- [5] 郑晨东. 光伏发电模式下微电网控制策略研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2017.
- ZHENG Chendong. Study on micro grid control strategy under photovoltaic power generation mode[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2017.
- [6] 张潮. 离网模式下逆变器接口的控制策略[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- ZHANG Chao. Control strategy of inverter interface in off grid mode[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
- [7] 陈浩敏, 习伟, 熊雄. 微电网孤岛运行下混合控制策略研究[J]. 电器与能效管理技术, 2017(18): 42-47.
- CHEN Haomin, XI Wei, XIONG Xiong. Research on hybrid control strategy of micro grid in island operation[J]. Electrical Appliances and Energy Efficiency Management Technology, 2017(18): 42-47.
- [8] 赵兴勇, 贺天云, 陈浩宇, 等. 多功能逆变器在微电网储能系统中的应用[J]. 电网与清洁能源, 2019, 35(1): 36-43.
- ZHAO Xingyong, HE Tianyun, CHEN Haoyu, et al. Application of multifunctional inverter in microgrid energy storage system[J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35 (1): 36-43.
- [9] 杨俊, 刘秀良, 刘丽娟, 等. 计及电动汽车充电站的微电网综合控制研究[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(3): 71-78, 86.
- YANG Jun, LIU Xiuliang, LIU Lijuan, et al. Research on integrated control of microgrid considering electric vehicle charging station[J]. Power System and Clean Energy, 2018, 34(3): 71-78, 86.
- [10] 赵兴勇, 王帅, 吴新华, 等. 含分布式电源和电动汽车的微电网协调控制策略[J]. 电网技术, 2016, 40(12): 3732-3740.
- ZHAO Xingyong, WANG Shuai, WU Xinhua, et al. Micro grid coordinated control strategy including distributed power supply and electric vehicle[J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 3732-3740.
- [11] 赫亚庆, 王维庆, 王海云, 等. 光伏逆变器改进控制策略的稳定性研究[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(8): 60-66.
- HE Yaqing, WANG Weiqing, WANG Haiyun, et al. Study on stability of improved control strategy for photovoltaic inverter[J]. Power System and Clean Energy, 2018, 34(8): 60-66.
- [12] 屠亚南, 于艾清, 薛花, 等. 基于指数变步长电导增量法的光伏最大功率点跟踪[J]. 中国电力, 2018, 51(11): 132-138.
- TU Yanan, YU Aiqing, XUE Hua, et al. Photovoltaic maximum power point tracking based on exponential variable step conductance increment method[J]. Electric Power, 2018, 51(11): 132-138.
- [13] 朱武, 刘雅娟. 大型光伏电站谐波谐振机理研究[J]. 中国电力, 2018, 51(3): 121-130.
- ZHU Wu, LIU Yajuan. Study on harmonic resonance mechanism of large photovoltaic power station[J]. Electric Power, 2018, 51(3): 121-130.
- [14] 易映萍, 罗海, 胡四全. 小功率光伏并网逆变器控制策略的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(4): 64-68.
- YI Yingping, LUO Hai, HU Siqian. Study on control strategy of small power photovoltaic grid connected inverter[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4): 64-68.4.
- [15] SAID-ROMDHANE M B, NAOUAR M W, SLAMA-BELKHODJA I. Systematic design method for PI controller with virtual resistor-based active damping of LCL filter[J]. Global Energy Interconnection, 2018, 1(3): 319-329.
- [16] 马星河, 马亚光, 许丹, 等. 基于空间矢量的三电平间接矩阵变换器简化策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(13): 70-76.
- MA Xinghe, MA Yaguang, XU Dan, et al. Study on simplified strategy of three-level indirect matrix converter based on space vector[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(13): 70-76.
- [17] WANG Jiaren, XIE Ning, WU Wenxian, et al. Resilience enhancement strategy using microgrids in distribution network[J]. Global Energy Interconnection, 2018, 1(5): 537-543.

[18] MARTIN-MARTÍNEZ F, SÁNCHEZ-MIRALLES A, RIVIER M. A literature review of micro-grids: a functional layer based classification[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 62: 1133-1153.

[19] 艾欣, 邓玉辉, 黎金英. 微电网分布式电源的主从控制策略[J]. 华北电力大学学报: 自然科学版, 2015, 42(1): 1-6.
AI Xin, DENG Yuhui, LI Jinying. Master-slave control strategy of micro grid distributed generation[J]. Journal of North China Electric Power University: Natural Science Edition, 2015, 42(1): 1-6.

[20] 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 independent optical storage DC micro grid[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(8): 37-45.

[21] 张明锐, 王佳莹, 宋柏慧, 等. 微网系统稳定运行及模式平滑切换研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(20): 7-15.
ZHANG Mingrui, WANG Jiaying, SONG Baihui, et al. Study on stable operation and mode smooth switching of microgrid system[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(20): 7-15.

[22] TANG Xisheng, HU Xiao, LI Ningning, et al. A novel frequency and voltage control method for islanded microgrid based on multi-energy storages[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(1): 410-419.

[23] 杨向真, 苏建徽, 丁明, 等. 微电网孤岛运行时的频率控制策略[J]. 电网技术, 2010, 34(1): 164-168.
YANG Xiangzhen, SU Jianhui, DING Ming, et al. Frequency control strategy of micro grid island operation[J]. Power System Technology, 2010, 34(1): 164-168.

[24] 江锐, 江涛, 许蕾. 光伏并入配电网的逆变器控制策略研究[J]. 电气技术, 2017(12): 81-85.
JIANG Rui, JIANG Tao, XU Lei. Research on inverter control strategy of photovoltaic integrated into distribution network[J]. Electrical Technology, 2017(12): 81-85.

[25] 邱首东, 李辉. 光储微电网孤岛运行控制策略研究[J]. 电工技术, 2017(3): 142-144.
QIU Shoudong, LI Hui. Research on island operation control strategy of optical storage micro grid[J]. Electrical Technology, 2017(3): 142-144.

[26] 宋雨桐, 瞿谊, 孙野, 等. 基于变步长扰动观察法的MPPT仿真研究[J]. 农业网络信息, 2018(4): 34-37.
SONG Yutong, QU Yi, SUN Ye, et al. MPPT simulation research based on variable step size disturbance observation method[J]. Agricultural Network Information, 2018(4): 34-37.

[27] 蔡军. 基于SVPWM的三相光伏并网逆变器的研究[D]. 葫芦岛: 辽宁工程技术大学, 2013.
CAI Jun. research on three-phase photovoltaic grid connected inverter based on SVPWM[D]. Huludao: Liaoning University of Engineering and Technology, 2013.

[28] 许军, 周文华, 郑绍陆. 基于电网电压矢量定向的双闭环光伏并网逆变系统的研究[J]. 电子器件, 2017, 40(2): 446-450.
XU Jun, ZHOU Wenhua, ZHENG Shaolu. Research on double closed-loop photovoltaic grid connected inverter system based on grid voltage vector orientation[J]. Electronic Devices, 2017, 40(2): 446-450.

[29] 张胜权. 三相光伏并网逆变器控制策略研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.
ZHANG Shengquan. Study on control strategy of three-phase photovoltaic grid connected inverter[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2013.

收稿日期: 2019-12-03; 修回日期: 2020-02-23

作者简介:

徐玉琴(1964—), 女, 硕士, 教授, 研究方向为电力系统及其自动化; E-mail: xyq@ncepu.edu.cn

方楠(1997—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统及其自动化。E-mail: 759099746@qq.com

(编辑 周金梅)