

文章编号:1007-6735(2013)02-0152-05

基于储能与氢气发生器的光伏并网功率控制

邹罗建¹, 刘士荣¹, 宁康红², 周啸波², 吴舜裕¹

(1. 杭州电子科技大学 自动化学院, 杭州 310018; 2. 浙江省电力设计院, 杭州 310012)

摘要: 考虑光伏发电具有间歇性, 用蓄电池储能系统和氢气发生器来调节并网功率, 以提高光伏并网运行的稳定性. 在光伏发电系统中安装一个高纯度氢氧发生器来产生氢气. 用 PSCAD/EMTDC 对具有储能单元的光伏发电系统进行了建模和仿真. 结果表明: 在光照强度变化的情况下, 采用四象限变流器控制的蓄电池储能系统能够快速平滑光伏发电系统输出的有功功率的波动.

关键词: 光伏模型; HHOG; 蓄电池模型; 功率波动

中图分类号: TK 91; N 94 **文献标志码:** A

Grid-connected Control of Photovoltaic with Hydrogen Generator Based on Energy Storage System

ZOU Luo Jian¹, LIU Shi Rong¹, NING Kang Hong², ZHOU Xiao Bo², WU Shun Yu¹

(1. School of Automation, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China;

2. Zhejiang Electric Power Design Institute, Hangzhou 310012, China)

Abstract: Considering the intermittent property of photovoltaic generation, the battery energy storage system combined with hydrogen generator were used to adjust the grid-connected power for improving the stability of photovoltaic grid-connected operation. The hydrogen generator was installed in photovoltaic generation system to generate high purity hydrogen. The photovoltaic generation system including energy storage unit were modeled and simulated using PSCAD/EMTDC. The simulation results verify that the battery energy storage system adopting four-quadrant converter control is able to quickly smooth the fluctuation of active power output of photovoltaic generation system.

Key words: photovoltaic model; HHOG; battery model; power fluctuation

近年来, 在全球变暖和化石燃料枯竭的背景下, 光伏发电作为可再生能源具有大规模开发和商业化前景, 其应用越来越广泛. 光伏发电的输出功率取决于光照强度和温度, 而光照强度和温度具有间歇性

和不确定性, 这导致了其输出功率波动. 不确定波动的光伏发电接入电网, 当光伏发电渗透率较高时, 就会影响电网运行稳定性和电能质量^[1]. 由于化石燃料不断减少, 近年来氢能受到越来越多的关注. 氢能

收稿日期: 2012-12-24
基金项目: 浙江省科技计划重大专项重点资助项目(2009C11020)
第一作者: 邹罗建(1986-), 男, 硕士研究生. 研究方向: 微电网运行与控制. E-mail: zlj sword@163.com
通讯作者: 刘士荣(1952-), 男, 教授. 研究方向: 新能源电力与智能微电网技术、智能机器人与智能控制. E-mail: liuzhirong@hdu.edu.cn

因其便于运输和保存,已经成为燃料电池发电的主要原料,是未来清洁能源的主要载体^[2]. 蓄电池储能系统(battery energy storage system, BESS)可以降低光伏和风电等可再生能源的间歇性对系统的影响,并使系统具有一定的可预测性和可调度性^[3].

笔者提出了一种基于蓄电池储能与高纯度氢气发生器的光伏并网系统结构,高纯度氢氧发生器作为可控负荷. 在建立了各主要元件的 PSCAD/EMTDC 仿真模型基础上,设计了并网系统的能量管理策略,最后在 PSCAD/EMTDC 中建立了系统仿真模型,对系统的动态响应进行仿真分析.

1 系统模型

提出的系统模型如图1所示. 该系统主要包含光伏发电单元、高纯度氢氧发生器(high-purity hydrogen and oxygen generator, HHOG)、储能蓄电池单元、负荷等. 本系统中光伏阵列通过最大功率跟踪控制器(maximum power point tracking, MPPT)获得最大功率,再通过光伏逆变器并入配电网;HHOG需要恒定的功率,在光伏发电功率较大时启动,可以看作冲击负荷;储能采用蓄电池装置,基于前馈解耦控制的四象限变流器可实现有功功率的双向流动,采用一级DC/AC变换器,这有利于简化系统,提高可靠性. 图1中 P_{PV} 表示光伏发电单元的输出功率, P_{BESS} 表示蓄电池储能系统吞吐的功率, P_h 表示HHOG系统吸收的功率, P_G 表示注入电网的功率,PCC为并网点.

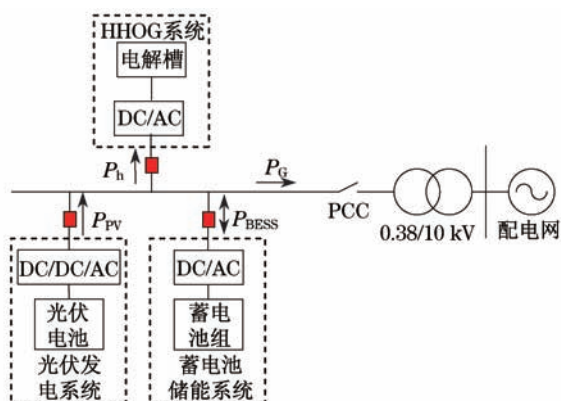


图1 系统仿真模型

Fig.1 System simulation model

2 光伏发电系统

2.1 光伏阵列仿真模型

考虑到光伏电池的输出特性受温度和辐射强度

的影响,采用一般工况下的工程计算方法. 假定在标准辐射强度 $S_{ref} = 1\ 000\ W/m^2$,标准温度 $T_{ref} = 25\ ^\circ C$ 下,短路电流为 I_{sc} ,开路电压为 U_{oc} ,最大功率点电流和电压分别为 I_{max} 和 U_{max} ,则当光照强度为 S ,温度为 T 时,光伏阵列端电压为 U ,其对应点电流为 I 时,光伏阵列输出功率为 P ^[4-5],即

$$I'_{sc} = I_{sc} S(1 + \alpha(T - T_{ref}))/S_{ref} \quad (1)$$

$$U'_{oc} = U_{oc}(1 - \gamma(T - T_{ref})) \cdot \ln(1 + \beta((S/S_{ref}) - 1)) \quad (2)$$

$$I'_{max} = I_{max} S(1 + \alpha(T - T_{ref}))/S_{ref} \quad (3)$$

$$U'_{max} = U_{max}(1 + \gamma(T - T_{ref})) \cdot \ln(1 + \beta((S/S_{ref}) - 1)) \quad (4)$$

$$C_2 = (U'_{max}/U'_{oc} - 1)[\ln(1 - I'_{max}/I'_{sc})]^{-1} \quad (5)$$

$$C_1 = (1 - I'_{max}/I'_{sc})\exp[-U'_{max}/(C_2 U'_{oc})] \quad (6)$$

$$I = I'_{sc}(1 - C_1\{\exp[U/(C_2 U'_{oc})] - 1\}) \quad (7)$$

$$P = UI \quad (8)$$

式中, α , β , γ 为系数,其典型值分别为 $\alpha = 0.002\ 5/^\circ C$, $\beta = 0.5$ 和 $\gamma = 0.002\ 88/^\circ C$. 式(1)~式(8)一般用于表示单个光伏组件,可以扩展到表示由 M 个组件并联, N 个组件串联的光伏阵列特性. 光伏阵列的表达式为

$$I_A = I_{sc,M} M \{1 - C_1 [\exp(U_A / (N C_2 U_{oc,M})) - 1]\} \quad (9)$$

$$P_A = U_A I_A \quad (10)$$

其中

$$C_1 = (1 - I_{max,M}/I_{sc,M})\exp(-U_{max,M}/C_2 U_{oc,M}) \quad (11)$$

$$C_2 = ((U_{max,M}/U_{oc,M}) - 1)/\ln(1 - (I_{max,M}/I_{sc,M})) \quad (12)$$

式中, U_A , I_A 分别为光伏阵列的输出电压和输出电流; $U_{max,M}$, $I_{max,M}$, $U_{oc,M}$, $I_{sc,M}$ 分别为组件的最大功率点电压、电流、组件的开路电压、短路电流.

2.2 并网侧功率控制

图2(见下页)所示为DC/AC逆变器控制框图. DC/AC逆变器主要完成跟踪控制直流母线电压的恒定,而能量是从直流母线电容中抽取再经过逆变馈送到电网. 并网逆变器的控制方法一般采用 dq 坐标系下实现,并采用双闭环控制,即电压外环控制和电流内环控制. 电压外环控制,即将升压后的直流电压 $U_{dc,ref}$ 与实际直流电压 U_{dc} 比较后,再经过PI控制器得到 d 轴电流参考值 $I_{d,ref}$. 电流内环控制,即将电压外环得到的 dq 轴电流与实际电流信号比较,根据差值迅速调整. 一般仍用PI调节器,并在电流内环中增加前馈解耦制,以减少电网电压对控制系统的影响. 图2中 L 为滤波电感, U_d 和 U_q 分别为三相电压 U_{abc} 的 d 轴和 q 轴分量. 当 $I_{q,ref} = 0$ 时,光伏发电单元输出无功功率为0,实现单位功率因数控制.

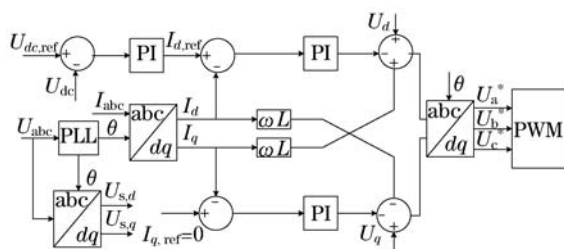


图2 DC/AC控制框图

Fig.2 Control block diagram of DC/AC

3 氢氧发生器系统

3.1 氢氧发生器模型

HHOG的系统如图3所示^[6]。其中包含二极管整流电路、降压电路以及模拟氢气发生器的电解槽。电解槽由电阻和直流电压源组成。电解槽的规格见表1, HHOG由单个电解槽电池组成。

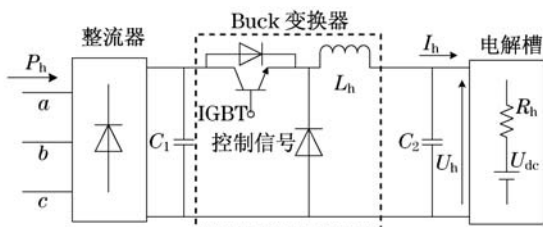


图3 HHOG系统图

Fig.3 HHOG system diagram

表1 电解槽电池规格

Tab.1 Specifications of electrolyzer cell

参数名称	数值
额定功率 P/kW	44.1
额定电压 U_e/V	107.5
氢气量 $\text{gH}/(\text{N} \cdot \text{m}^{-3})$	7.5
电阻 R/Ω	0.031
直流电压源电压 U_{dc}/V	94.8

3.2 HHOG单元的控制

HHOG的控制系统必须确保提供氢气发生器需要的恒定功率。图4为Buck变换器控制块，参考输出功率 $P_{h,ref}$ 与HHOG单元的实际输出功率 P_h 的差值，经过PI控制器，再与三角载波信号比较，产生Buck变换电路IGBT的控制信号。

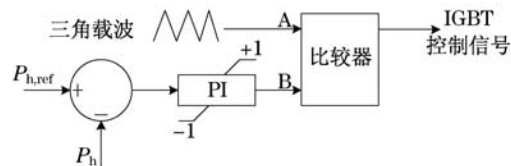


图4 Buck变换器控制块

Fig.4 Control block of buck converter

阻组成^[7]，其表达式为

$$U_b = U_0 - R_b I_b - K \frac{Q}{Q - \int_0^t I_d dt} + A \exp(-B \int_0^t I_d dt) \quad (13)$$

其中， U_b 为蓄电池的空载电压； U_0 为蓄电池的恒定电压； R_b 为蓄电池内阻； I_b 为蓄电池输出电流； K 为极化电压； Q 为蓄电池的容量； A 为指数区域幅值； B 为指数区域时间常数的倒数； t 为时间。

4.2 蓄电池储能系统

蓄电池储能系统主要由蓄电池组、四象限运行变流器、控制装置组成，可以等效为四象限运行变流器模型和蓄电池组等效电路两部分。能量双向流动的四象限运行变流器可实现交流系统与直流侧的蓄电池组之间的能量交换，采用PQ解耦控制可以实现有功和无功的分别调节。基于前馈解耦控制的四象限变流器控制器结构图如图5所示^[8-9]。其中， I_d 和 I_q 分别为流入馈线三相电流的d轴和q轴分量。有功功率参考值 P_{ref} 和无功功率参考值 Q_{ref} 与 U_d 的商，经过PI控制器后分别得到d轴电流参考值 $I_{d,ref}$ 和q轴电流参考值 $I_{q,ref}$ ，再通过前馈解耦控制解耦，进而控制逆变器。

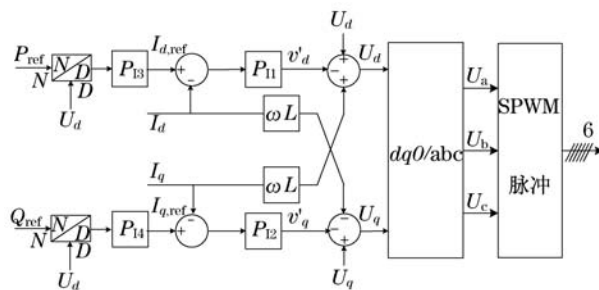


图5 四象限变流器控制器结构图

Fig.5 Block diagram of four-quadrant converter controller

4 蓄电池储能系统

4.1 蓄电池组模型

蓄电池组模型由一个受控电压源和一个定值内

5 系统仿真

在EMTDC/PSCAD建立了图1所示的仿真模型，光伏发电单元在 $S = 1000 \text{ W/m}^2$ ， $T = 25^\circ\text{C}$ 标

况下的有功功率为 200 kW,无功功率为 0,实现单位功率因数控制;HHOG 的额定功率为 44.1 kW;蓄电池储能系统的额定容量为 100 kWh.

系统能量管理策略为光伏阵列工作在 25℃ 下,设定流入配电网的 P_G 功率为 130 kW,当光伏发电功率大于 145 kW 时,开启 HHOG.如图 6~11 所示.

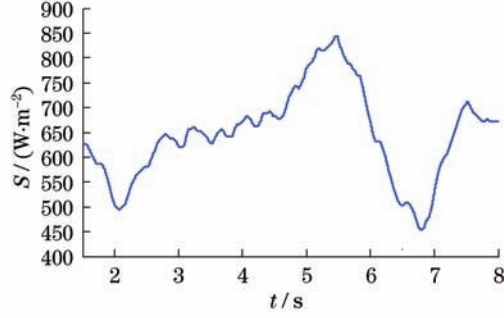


图6 光照强度
Fig.6 The radiation

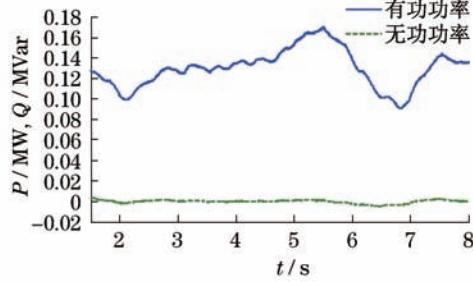


图7 光伏发电系统输出有功功率和无功功率
Fig.7 Active power and reactive power of PV

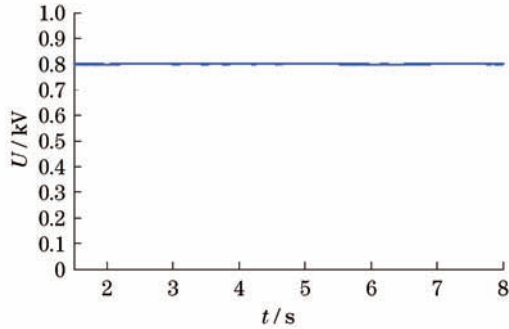


图8 直流母线电压
Fig.8 DC bus voltage

图 6~11 分别给出了光照强度 S 的变化曲线、光伏发电系统输出的有功功率 P_{PV} 和无功功率 Q_{PV} 曲线、电解槽端电压 U_h 曲线、电解槽电流 I_h 曲线、HHOG 吸收的功率 P_h 曲线、光伏发电系统输出的有功功率 P_{PV} 和注入电网的有功功率 P_G 以及蓄电池储能系统吞吐的有功功率 P_{BESS} 曲线.

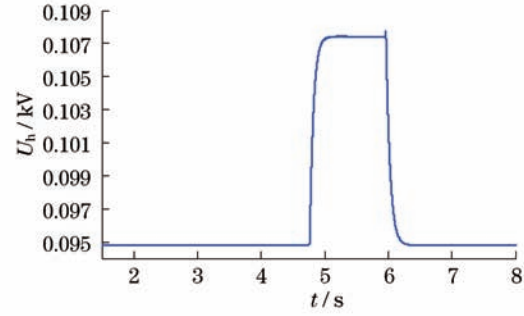


图9 电解槽端电压
Fig.9 Terminal voltage of Electrolyzer

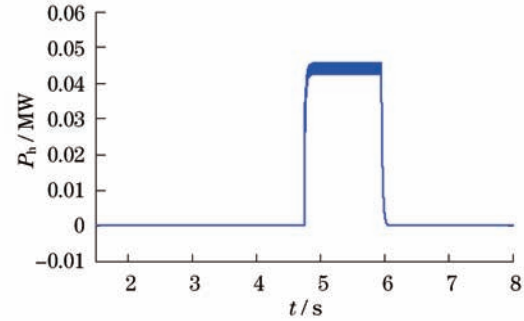


图10 HHOG 吸收的功率
Fig.10 Input power of HHOG

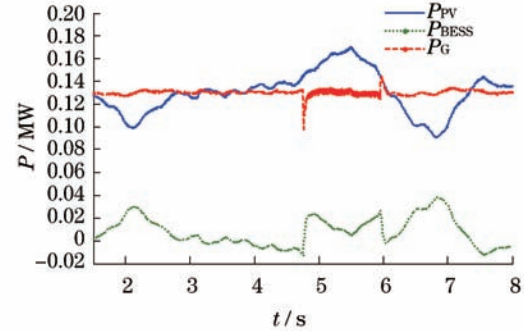


图11 蓄电池储能系统平滑光伏有功功率
Fig.11 Smoothing photovoltaic active power by BESS

图 6 为光照强度,从图 7 可以看出,当光照强度变化时,通过最大功率跟踪控制可以得到对应光照强度下的最大输出功率,且无功功率输出为 0,实现单位功率因数控制.

从图 8 可以看出,通过并网侧逆变器电压环控制,直流母线电压能够很好地维持在 800 V,使光伏阵列发出的有功功率通过逆变器全部输出.

从图 9~10 可以看出,当光伏输出功率大于 145 kW 时,HHOG 系统开启,电解槽端电压能够快速达到 107.5 V,吸收的功率约为 44 kW.

从图 11 可以看出,光伏发电系统在为加入储能

蓄电池系统时,光伏输出功率波动较大;在光伏发电系统出口处加入储能蓄电池系统后,储能蓄电池能够快速吞吐光伏输出功率的波动部分,使注入电网的功率明显平滑.当 HHOG 系统开启时,其对电网有一定的功率冲击,但影响不大.

6 结束语

储能蓄电池利用单级 DC/AC 变换器实现功率调节,简化了系统结构.建立了含氢氧发生器的储能光伏并网系统模型,仿真结果表明,氢氧发生器能够准确地模拟其需要的恒定功率.在光照强度变化时,采用四象限变流器控制的蓄电池储能系统能够快速平滑光伏发电系统输出的有功功率的波动.

参考文献:

- [1] 裴玮,盛鹏,孔力,等.分布式电源对配网供电电压质量的影响与改善[J].中国电机工程学报,2008,28(13):152-157.
- [2] Penner S S. Steps toward the hydrogen economy [J]. Energy, 2006, 31(1): 33-46.

- [3] 唐西胜,邓卫,李宁宁,等.基于储能的可再生能源微网运行技术[J].电力自动化设备,2012,32(3):99-103.
- [4] 孙自勇,宇航,严干贵,等.基于 PSCAD 的光伏阵列和 MPPT 控制器的仿真模型[J].电力系统保护与控制,2009,37(19):61-64.
- [5] 姚致清,张茜,刘喜梅.基于 PSCAD/EMTDC 的三相光伏并网发电系统仿真研究[J].电力系统保护与控制,2010,38(17):76-81.
- [6] Shihhido S, Takahashi R, Murata T, et al. Stabilization of wind energy conversion system with hydrogen generator by using EDLC energy storage system [J]. Electrical Engineering in Japan, 2009, 168(3): 10-18.
- [7] Tremblay O, Dessaint L A, Dekkiche A A. A generic battery model for the dynamics simulation of hybrid electric vehicles [C] // Proceedings of the 2007 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Arlington: 2007, 284-289.
- [8] 张步涵,曾杰,毛承雄,等.电池储能系统在改善并网风电场电能质量和稳定性中的应用[J].电网技术,2006,30(15):54-58.
- [9] 姚勇,朱桂萍,刘秀成.电池储能系统在改善微电网电能质量中的应用[J].电工技术学报,2012,27(1):85-89.

(编辑:金虹)

(上接第 151 页)

参考文献:

- [1] 郑小映,陈金贤.有交易成本的期权定价方法[J].系统工程,2008,18(5):13-16.
- [2] Ralf H, Alexander K, Micheal W. Physically guided animation of trees[J]. Comput Graph Forum, 2009, 28(2):523-532.
- [3] 吴恩华.图形处理器用于通用计算的技术、现状及其挑战[J].软件学报,2004,15(10):1493-1540.
- [4] 吴恩华,柳有权.基于提醒处理器(GPU)的通用计算[J].计算机辅助设计与图形学学报,2004,16(5):601-612.
- [5] nVidia Company. CUDA Programming Guide: CUDA

[EB/OL]. (2010-8-23)[2010-10-14]. http://www.nvidia.com/object/cuda_home.html.

- [6] 张舒,褚艳丽.GPU 高性能计算之 CUDA[M].北京:水利水电出版社,2010.
- [7] 孙世新,卢光辉,张艳,等.并行算法及其应用[M].北京:机械工业出版社,2005.
- [8] 邓仰东.Nvidia CUDA 超大规模并行程序设计训练课程:性能提升[EB/OL]. (2009-02-19)[2010-03-11]. http://cuda.csdn.net/client/CUDA_lecture.Rar.
- [9] 左颖睿,张启衡,徐勇,等.基于 GPU 的并行优化技术[J].计算机应用研究,2009,26(11):4115-4118.

(编辑:金虹)