

基于虚拟同步发电机的光-储调频控制策略研究

严干贵,张礼珏,赵伟哲,张 钰

(东北电力大学 电气工程学院,吉林 吉林 132012)

摘 要: 太阳能光伏发电作为一种可再生能源发电在电网中渗透率不断升高,与此同时,对于系统稳定性的影响也越来越不得忽视。首先,对光伏发电系统输出特性进行分析。针对光伏并网发电在遇到频率波动时不具备惯性和调频能力的问题,提出了应用储能补偿系统的调频需求,通过对储能逆变器采用虚拟同步发电机控制策略,使光-储作为一整体对外具备类似同步发电机特性,同时该系统还拥有保证光伏对外输出功率稳定的能力。最后,利用 PSCAD/EMTDC 仿真验证了所提出调频控制策略的有效性。

关 键 词: 虚拟同步发电机;光伏;储能;调频;控制策略

中图分类号: TM615;TM464;TM732

文献标识码: A

随着世界各国对能源的需求量逐步增高,化石能源短缺,环境问题日益凸显^[1-2]。光伏发电凭借其节能、环保、稳定等优点得到大力发展。

然而,光伏渗透率水平不断增高,为了维持电力供需平衡,同步发电机的容量需要相对减少。这导致了较低的系统惯性,而光伏并网基于电力电子并网单元动态响应速度快,无惯性补充^[3]。当系统负荷变化发生频率不稳定时,不具备像同步发电机一样对电网有频率支撑能力。文献[4]提出增大或降低光伏电池直流电压,使光伏电池输出功率偏离最大功率点运行,从而减载运行。当系统频率跌落时,降低或增高电压使光伏增加出力,但该方法没考虑到运行经济性,实用性不强。为使光伏发电系统具备同步机特性,有学者提出利用储能来提供功率支持,并提出虚拟同步发电机控制方法^[5-8]。

文献[9-10]建立了虚拟同步发电机(Virtual Synchronous Generator, VSG)数学模型,并对其控制策略及特性研究。文献[11-12]提出采用储能作为备用进行虚拟同步发电机控制,从而使储能表现为频率补偿器。当电网电压出现三相不平衡时,文献[13]对不平衡原因及存在的问题进行探讨,并应用VSG平衡控制方法解决。

为使光-储系统在储能自身荷电状态的限制内接入系统具备同步发电机的虚拟惯量,由于频率波动时发电机转子释放动能较小,所以配置较少储能容量即可得到该效果。文献[14]经过计算,提出通过合理的储能控制,配置5%的风电场额定容量即可达到同步发电机的惯性。

本文首先从光伏电池输出特性曲线切入对光伏发电特性进行研究,按照最大功率追踪运行,提高了运行经济性;然后提出虚拟同步发电机控制策略,并应用于储能并网系统;最后利用 PSCAD/EMTDC 进行了仿真验证。结果表明,该方法保证系统频率稳定,功率调节性能良好,并使系统惯量得到有效补偿。

收稿日期:2016-08-20

基金项目:吉林市科技局杰出青年人才培养计划(20156407)

作者简介:严干贵(1971-),男,博士,教授,主要研究方向:风力发电、柔性交流输电技术。

电子邮箱: yangge@nedu.edu.cn(严干贵);546381684@qq.com(张礼珏);420577454@qq.com(赵伟哲);191601980@qq.com(张钰)

1 光伏发电系统特性

光伏发电具有永久、绿色、灵活、迅速等优点。基本原理是根据光生伏特效应,利用光伏电池板将太阳能转化为电能。光伏电池等效电路,如图 1 所示。其中, I_{pv} 和 V_{pv} 为光伏电池输出电流和电压,光生电流 I_{pc} 与光伏电池温度及光伏电池接收的有效光照强度成正比。

在日照强度 $S_B = 1\,000\text{ W/m}^2$, 电池温度 $T_B = 25\text{ }^\circ\text{C}$ 的标准条件下,根据开路电压 V_{oc} 、短路电流 I_{sc} 、最大功率点电压 V_m 、最大功率点电流 I_m 可以得出光伏电池输出特性的方程为

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

将最大功率点电压、电流参数代入式(1)得:

$$C_1 = \left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right) \exp\left(-\frac{V_m}{C_2 V_{oc}} \right), \quad (2)$$

$$C_2 = \left(\frac{V_m}{V_{oc}} - 1 \right) \left[\ln\left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right) \right]^{-1}. \quad (3)$$

当辐照度和参考温度均发生改变时,就不在适用了,应该重新确定 I'_{sc} 、 V'_{oc} 、 I'_m 、 V'_m 。

图 2(a)、图 2(b) 分别为光伏电池电压 - 电流、功率 - 电压输出特性曲线。

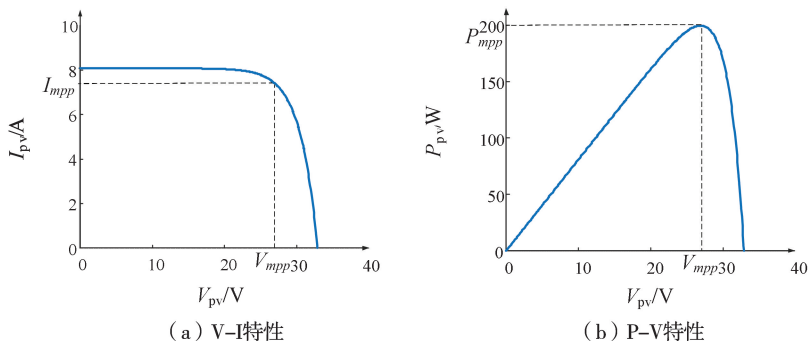


图 2 光伏电池输出特性曲线

P_{mpp} 为确定光照强度及温度条件下,光伏电池能够输出的最大功率。 V_{mpp} 为最大功率点电压, I_{mpp} 为最大功率点电流。由图 2(a) 和图 2(b) 可知,光伏电池的输出电流随着电压的增加先基本保持不变再迅速减小;输出功率随着输出电压的增加先增后减,为一条单峰曲线, $P-V$ 、 $I-V$ 特性曲线均具有明显的非线性特征。

一般来说,系统工作点并不一定是光伏阵列最大功率输出点,而是或大或小偏离极值点,这时系统是低效率的。若可追踪光伏电池最大功率点,便可有效提高系统发电的整体效率。采用 Boost 变换器和 MPPT 控制可以使工作点保持在最大功率点,即图 2(b) 中单峰曲线的极值点 P_{mpp} 。该方法不受外界环境影响,通过独立控制光伏阵列输出电压和电流

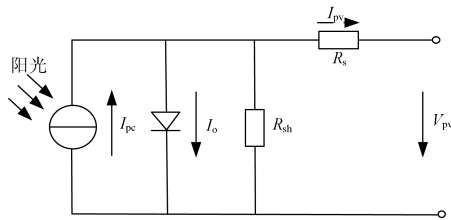


图 1 光伏电池等效电路

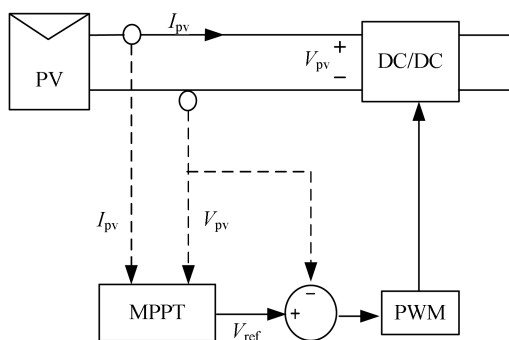


图 3 MPPT 示意图

实现。应用有效 MPPT 控制,便可使系统时刻运行在最大功率点处,对于系统功率稳定输出、提高运行效率有重要的意义。光伏电池 MPPT 示意图,如图 3 所示。

2 虚拟同步发电机控制策略

同步发电机转子具备的惯性和机组调频能力是保证系统频率稳定的关键特性。由于光伏并网逆变器动作快,无转动惯量应对频率波动不能有效地调控。通过配置储能单元使光-储并联运行连入电网,整体具备同步发电机的特性。光伏发电机组时刻运行在最大功率输出下,根据系统的调频需求,独立控制储能并网逆变器的有功功率输出,作为常规发电机组的备用容量,在功率不平衡时,吸收或释放能量。即可使光伏-储能系统拥有惯性,又可以保证光伏功率输出效率,同时具备同步发电机的调频特性。图 4 为光-储系统并网等效结构图。

2.1 虚拟惯量控制

同步发电机的转子运动方程为

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e = \frac{P_m}{\omega} - \frac{P_e}{\omega}, \quad (4)$$

式中: J 为同步发电机转动惯量; ω 为机械角速度,当极对数为 1 时,机械角速度与电网电角速度相等; T_m 为机械转矩; $T_m = P_m/\omega$; P_m 为机械功率; T_e 为电磁转矩; $T_e = P_e/\omega$; P_e 为电磁功率。

转子运动方程模拟同步发电机的机械部分,当系统频率发生变化时,虚拟发电机转子向外输出功率为

$$\Delta P_1 = -J\omega \frac{d\omega}{dt}, \quad (5)$$

式中: ΔP_1 为模拟转子释放能量的输出功率, J 决定系统惯性的。当电网频率下降时,虚拟同步发电机释放“转子动能”以获取能量来补充功率,保持系统稳定。当频率上升时,吸收功率。

2.2 有功调节

根据发电机输出随负荷变化而做出动作,相应系统频率对比额定值会有偏差。将系统频率偏差成比例有功功率增量加入到转子侧有功功率控制环节,此过程为同步发电机调速器动作的一次调频。

$$\Delta f = -k_f \Delta P, \quad (6)$$

式中: k_f 为下垂系数。

由公式(6)可得到单个机组调节方程为

$$\Delta P = -\frac{\Delta f}{\sigma\% f_N} P_N, \quad (7)$$

式中: $\sigma\%$ 为同步发电机组调差系数; P_N 为机组额定容量。

在频率发生变化的同时,若光照强度也发生变化,会对于系统的稳定和功率的输出有很大影响,优化后的一次调频功率输出为

$$\Delta P_2 = P_{pv_N} + \Delta P - P_{pv}, \quad (8)$$

其中: P_{pv_N} 为额定情况下光伏输出的功率; P_{pv} 光伏实际输出功率。

通过同步发电机转子惯性和一次调频特性的模拟,可以得到光-储系统输出有功功率为

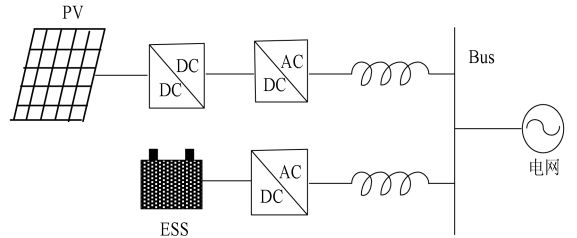


图4 储系统并网等效结构图

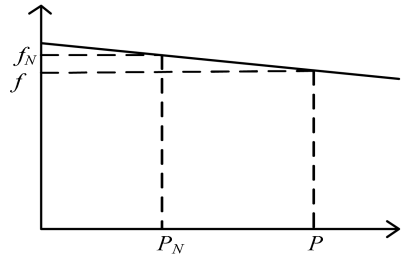


图5 $P-f$ 特性曲线

$$P = P_{pv} + \Delta P_1 + \Delta P_2. \quad (9)$$

当系统频率发生跌落时,光伏保持 MPPT 运行,储能作为光伏的辅助电源进行动作,释放出 $\Delta P_1 + \Delta P_2$ 的有功功率,不同的 k_f 反映同步发电机的调速器性能,决定了储能功率输出。其中发电机转子释放的功率与频率的变化率成正比,即为暂态过程中释放,若系统频率变至稳定值后,稳态时 $\Delta P_1 = 0$ 。光-储作为整体表现出类似于具备调频能力的同步发电机特性,使系统中的能量平衡并增加了惯性。

根据瞬时功率理论,系统的瞬时有功功率和无功功率为

$$\begin{cases} p = \frac{3}{2}(u_d i_d + u_q i_q), \\ q = \frac{3}{2}(u_d i_q - u_q i_d), \end{cases} \quad (10)$$

基于电网电压定向时, $u_q = 0$ 。上式简化为

$$\begin{cases} p = \frac{3}{2}u_d i_d, \\ q = \frac{3}{2}u_d i_q, \end{cases} \quad (11)$$

不考虑电压波动, u_d 为定值。所以有功、无功电流指令为

$$\begin{cases} i_{d_ref} = \frac{2(\Delta P_1 + \Delta P_2)}{3u_d}, \\ i_{q_ref} = 0. \end{cases} \quad (12)$$

VSG 控制框图,如图 6 所示。当系统频率发生变化时,不同调差系数决定机组功率响应,调差系数越小,对于输出提升越明显。相同调差系数,机组额定容量越大,对于系统功率补充能力越强。常规汽轮发电机组 $\sigma\%$ 取值为 3 至 5。一般情况下,频率波动范围不超过 ± 0.2 Hz,考虑到储能系统上、下调整容量的调频需求和经济性,通过配置光伏系统额定容量 10% 的储能容量即可满足效果。

综上所述,通过模拟发电机转子释放能量以及一次调频,对于频率稳定性具备良好的控制力。通过不改变原有光伏控制避免了一系列机组间协调、配合的问题,显著提升了光-储系统的运行可靠性;同时对于光伏受外界变化储能也能做出相应的补充,从而提升了电网对光伏发电在接纳性。

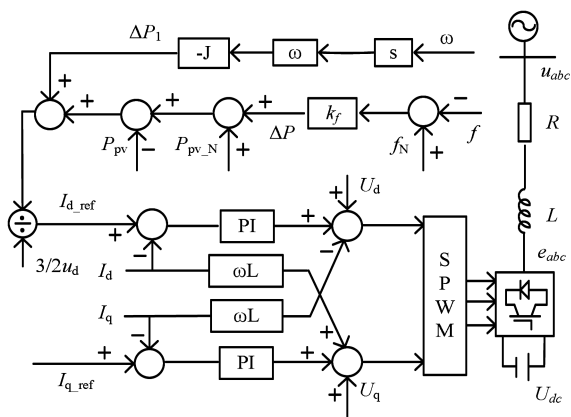


图 6 控制策略

3 仿真分析

本文对光伏发电特性和储能 VSG 控制模型进行研究的同时,应用 PSCAD/EMTDC 平台仿真验证。

光伏并网逆变器采用常规的电压电流双环控制,开关频率 f_s ,光伏电池输出最大功率追踪采用扰动观测法。储能并网系统采用本文提出的虚拟同步发电机控制策略,光-储并联于交流母线处,共同接入无限大功率电源。系统参数,如表 1 所示。

P_{pv} 曲线为光伏并网机组运行时的功率输出,在 0.5 s 时机组稳定, $P_{pv}=4.11\text{ kW}$, 此时频率为 50 Hz, 储能不启动 $P_{ess}=0$ (发出功率为正, 吸收功率为负)。直至 1 min 时, 频率跌落至 49.8 Hz, 储能快速接入并输出功率为 0.8 kW。至 2 min 由于外界光照强度由 $1\,000\text{ W/m}^2$ 下降至 950 W/m^2 , 光伏输出功率下降至 3.85 kW。从仿真结果图 7(b)、图 7(c) 中清楚的可以看出, 储能输出功率升高 0.26 kW, 对于频率跌落时光照强度的下降储能快速增加出力使并网总功率保持恒定, 从而保证了调频的功率需求。当 3 min 时频率恢复至 50 Hz, 储能减少频率波动相应的输出, 同时为使光-储系统对外输出功率稳定在 P_{pv_N} , 储能应对光照强度降低的功率输出继续保持作用。接下来两秒内又做了对于频率上升时的模拟, 在光照强度恒定时, 对于频率的上升储能吸收一部分能量, 同样保证了功率稳定。

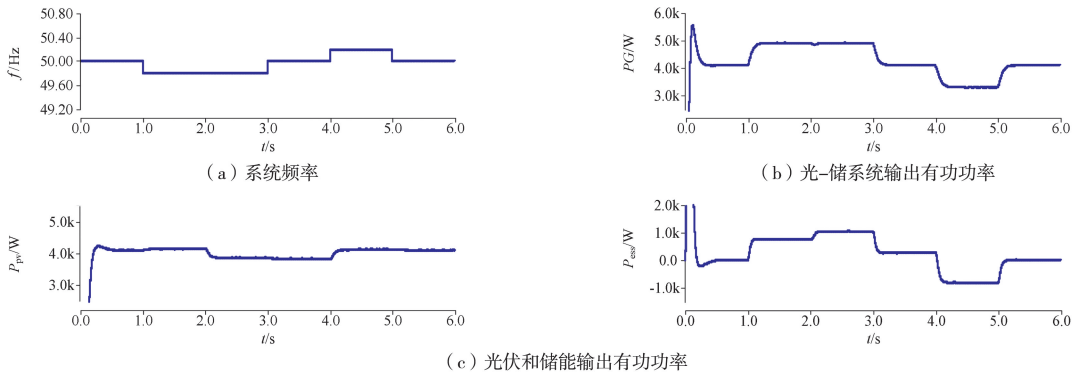


图 7 仿真结果

通过模拟系统频率在 1 s 时发生跌落, 分别应用本文提出的虚拟同步发电机控制策略和传统的下垂控制方法进行仿真对比, 仿真结果如图 8。结果表明, 通过在频率跌落时, 虚拟同步发电机控制策略模拟发电机转子释放动能, 提高了在暂态过程中的输出, 有效地增加系统惯性, 表现出优于传统下垂控制的调频性能。

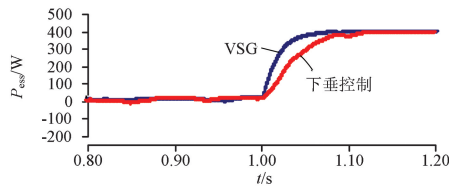


图 8 仿真对比

采用虚拟同步发电机控制策略的作用下, 储能单元当频率变动时功率输出响应迅速, 对于外界频率的变化响应准确, 对每一次频率波动都在 0.2 s 内介入, 表现出较强的可靠性。在电网频率骤升后降低了有功出力, 系统的动态过程呈现出类似于同步发电机的特性, 较好的提高了并网逆变器的运行性能。

4 结 论

近年来, 太阳能光伏发电得到了广泛的关注, 不仅是因为它作为绿色能源逐步补充了短缺的化石能源发电, 而且也是因为当大规模接入电网时, 不具备惯性和调频能力的特点, 使电网的稳定性得到挑战。本文提出在光伏发电并网中加入储能单元, 作为一个整体模拟同步发电机的特性。通过应用虚拟同步发电机控制策略对储能单元逆变器控制, 避免了传统光伏逆变器不具备调频特性的劣势, 同时也使其具备调节光伏输出不稳定的能力, 提高了电网对于光伏并网的接纳性。通过仿真分析, 验证了虚拟同步发电机控制策略的在频率波动情况下的有效性。

参 考 文 献

- [1] 孙向东,任碧莹,张琦,等. 太阳能并网发电技术[M]. 北京:电子工业出版社,2014.
- [2] K. R. Bullock. Carbon reactions and effects on valve-regulated lead-acid(VRLA) battery cycle life in high-rate, partial state of charge cycling[J]. Journal of Power Sources,2010,195(14):4513-4519.
- [3] 段双明,郭阳,任俊,等. 含分布式电源的低压直流配电网研究综述[J]. 东北电力大学学报,2015,35(6):1-7.
- [4] C. Rahmann,A. Castillo. Fast frequency response capability of photovoltaic power plants:The necessity of new grid requirements and definitions[J]. Energies,2014,7(10):6306-6322.
- [5] J. Driesen,K. Visscher. Virtual synchronous generators[C]//Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century,2008 IEEE. IEEE,2008:1-3.
- [6] K. Sakimoto,Y. Miura,T. Ise. Stabilization of a power system with a distributed generator by a virtual synchronous generator function[C]//Power Electronics and ECCE Asia (ICPE & ECCE),2011 IEEE 8th International Conference on. IEEE,2011:1498-1505.
- [7] J. Alipoor,Y. Miura,T. Ise. Power system stabilization using virtual synchronous generator with alternating moment of inertia[J]. Emerging and Selected Topics in Power Electronics,IEEE Journal of,2015,3(2):451-458.
- [8] 李介夫,王光,李卫国,等. 一种利用混合储能系统平抑风光功率波动的控制策略[J]. 东北电力大学学报,2014,34(5):32-38.
- [9] 邓玉辉,艾欣,段正阳,等. 基于虚拟同步发电机技术的并网逆变器的建模与仿真研究[J]. 中国电业,2015(4):33-36.
- [10] 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.
- [11] U. Delille,B. Francois,G. Malarange. Dynamic frequency control support by energy storage to reduce the impact of wind and solar generation on isolated power system's inertia[J]. Sustainable Energy,IEEE Transactions on,2012,3(4):931-939.
- [12] N. Soni,S. Doolla,M. C. Chandorkar. Improvement of transient response in microgrids using virtual inertia[J]. Power Delivery,IEEE Transactions on,2013,28(3):1830-1838.
- [13] 陈天一,陈来军,汪雨辰,等. 考虑不平衡电网电压的虚拟同步发电机平衡电流控制方法[J]. 电网技术,2016,40(3):904-909.
- [14] 刘巨,姚伟,文劲宇,等. 一种基于储能技术的风电场虚拟惯量补偿策略[J]. 中国电机工程学报,2015,35(7):1596-1605.

Strategic Studies on Frequency-modulated Controlling of Photovoltaic-Energy Storage System Based on Virtual Synchronous Generator

Yan Gangui,Zhang Lijue,Zhao Weizhe,Zhang Yu

(Electrical Engineering College,Northeast Electric Power University,Jilin Jilin 132012)

Abstract: As a kind of renewable-energy-based power generation, photovoltaic power generation has been increasingly used for power system. And meanwhile, more attention is paying to the effect of system stability. The paper began with analysis of the output characteristics of photovoltaic system. In view of the absence of inertia of grid-connected photovoltaic power generation in the event of frequency fluctuation, the ideas to make up for the system virtual inertia with the stored energy were presented in the paper. By using the controlling strategies for virtual synchronous generator to the energy storage inverter, the integrated photovoltaic-storage system would work as a whole the same way with the synchronous generator. And meanwhile, it would maintain the stable output PV power of the integrated photovoltaic-storage system. At last, PSCAD/EMTDC simulation was used to verify the effectiveness of making up for the virtual inertia through the controlling strategies presented in the paper.

Key words: Virtual synchronous generator; Photovoltaic; Energy storage; Frequency regulating; Control strategy