

DOI: 10.7667/PSPC151586

光伏电源利用直流-同步电机并网控制方法的研究

孙颖, 张建成

(华北电力大学电力工程系, 河北 保定 071003)

摘要: 针对光伏并网逆变器存在故障率高、谐波含量大、控制复杂等问题, 提出一种实用的光伏电源利用直流-同步电机并网的方案。该光伏并网系统中光伏电源为直流电机供电, 直流电机带动同步电机同轴旋转, 实现直流与交流电能之间的转换。并网控制系统包括光伏阵列最大功率跟踪控制、电机转速控制和同步电机端电压控制, 当自动装置检测和判断同步电机满足并网条件时合闸并网。光伏系统并网后, 同步电机的输出功率跟随光伏阵列输出功率的变化而变化。MATLAB/Simulink 仿真验证了该并网方案的可行性, 该方案得到的并网电压、电流波形质量好, 能够同时向电网提供有功和无功功率, 有利于改善电网功率因数。

关键词: 光伏发电; 直流电机; 同步电机; MPPT 控制; 并网控制

A study on the control method of photovoltaic grid connected with AC and DC motor

SUN Ying, ZHANG Jiancheng

(Dept of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: According to the shortcomings of photovoltaic grid connected inverter with high failure rate, high harmonic content, and complex control, a utility method of photovoltaic grid connected with DC-synchronous motor is proposed. Photovoltaic supply power is for DC motor in this photovoltaic grid connected system, and DC motor drives synchronous motor coaxial rotation, which realizes the conversion between DC and AC power. The grid connected control system includes maximum power point tracking control, motor speed control and synchronous motor terminal voltage control. The photovoltaic grid connection can be achieved when synchronous motor meets grid conditions. When connected to grid, the output of synchronous motor varies with the output of the photovoltaic. Simulative results verify the feasibility of the method based on MATLAB/Simulink. The grid voltage and current waveform are good, and active and reactive power can be provided to improve the power factor of the grid.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51177047).

Key words: photovoltaic power generation; DC motor; synchronous motor; MPPT control; grid-connected control

0 引言

近年来, 世界经济飞速发展, 人类对能源的需求量日益增加, 传统能源的日渐枯竭和环境污染等问题逐渐成为全球关注的热点。太阳能作为一种清洁的可再生能源具有取之不尽、用之不竭的特点, 因此受到人们的广泛关注。在解决能源危机、改变能源结构的过程中, 光伏发电越发受到世界各国的重视。随着光伏产业的迅猛发展, 光伏发电系统正在由独立运行向并网发电运行方向发展, 光伏系统

的并网发电技术也逐渐成为光伏发电系统稳定运行的关键环节^[1-4]。

目前, 光伏电源的并网大多通过逆变器实现, 逆变器自身的工作特点决定其存在故障率高、谐波含量大和控制复杂等问题, 且逆变器的并网运行存在诸多问题。文献[5]指出, 逆变器具有强非线性, 导致其在一定条件下会表现出复杂的不规则行为, 从而对系统的稳定性和正常并网运行产生影响。文献[6-7]指出, 电网电压不对称时, 并网电流中出现的负序分量和谐波分量会使逆变器输出直流电压, 对逆变器的稳定运行和并网的电能质量产生影响, 这种影响在多台逆变器并联的情况下更为明显。文献[8-9]指出, 阻止电流谐波注入电网是获得高质量

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51177047); 河北省科技计划项目(16214504D)

入网电流的关键。文献[10-11]指出, 逆变器输出电流中的直流分量会对逆变器自身的正常工作产生影响, 对其直接负载造成损害, 并导致配电网变压器饱和, 产生偶次谐波, 损害电网负载。文献[12]指出, 相对于奇次谐波, 并网逆变器产生的偶次谐波会对电网造成更大危害。文献[13]指出, 逆变器同一桥臂上开关管的死区, 变压器铁芯磁饱和, 开关管的通态压降以及电网电压的失真等会使并网逆变器产生低次谐波, 对电网电能质量造成影响。文献[14-16]指出, 在并网逆变器控制过程中, 电流参考信号是通过电网电压的锁相得到的, 因此, 电网背景谐波会对并网逆变器的电能质量造成严重影响。与逆变器相比, 电机成本低、寿命长, 且直流电机具有优异的调速性能, 对转速的控制易于实现^[7], 同步电机输出的有功和无功功率便于调节, 有利于改善电网功率因数^[18-19], 因此, 本文提出光伏电源利用直流电机和同步电机实现并网的方案, 由直流电机带动同步电机运转, 实现直流电能与交流电能之间的转换。光伏电源采用该方案并网时电能质量不受电网背景谐波的影响, 对有功和无功功率便于调节, 且高压、大容量电机制造技术成熟, 运行维护成本低。

1 光伏并网系统结构

光伏电源利用直流-同步电机并网系统结构如图1所示。

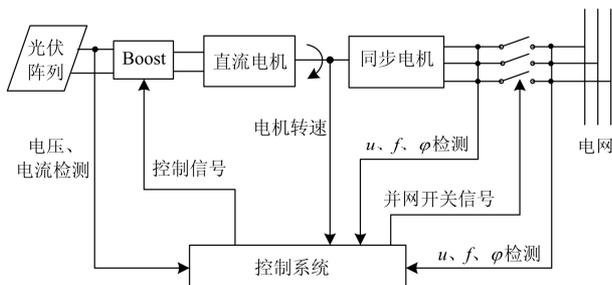


图1 光伏并网系统结构图

Fig. 1 Structure of photovoltaic grid-connection system

由图1可见, 该光伏并网系统由光伏阵列、Boost升压电路、直流电机、同步电机和控制系统组成。控制系统实现光伏阵列的最大功率点跟踪(Maximum Power Point Tracking, MPPT)控制、电机转速控制、同步电机励磁控制以及判断并网开关状态的功能。光伏阵列输出的直流电能经过直流电机转换为机械能, 带动同步电机同轴旋转, 完成电机并网系统的启动过程, 由自动装置检测和判断, 当同步电机端电压幅值、频率、相位与电网侧一致时并网开关合

闸, 实现光伏发电系统与电网的互联。

2 MPPT 控制

光伏电池的输出功率与工作环境如光照强度、负载和温度等因素密切相关。在不同的外界条件下, 光伏电池可运行在不同且唯一的最大功率点上。光伏发电系统中, 利用MPPT控制使光伏电池在工作环境发生变化时维持最大功率点输出是提高系统效率的重要方式。本文选用扰动观察法对光伏发电系统进行MPPT控制, 通过周期性改变光伏电池的端电压来寻找最大功率运行点, 若电压变动后光伏电池输出功率增大, 则电压朝同一方向继续变动; 反之, 若电压变动后光伏电池输出功率减小, 则在下一周期中令电压朝相反方向变动, 直至找到最大功率点为止。通过控制Boost电路中IGBT的开关状态实现光伏阵列的最大功率输出运行。控制原理如图2所示。

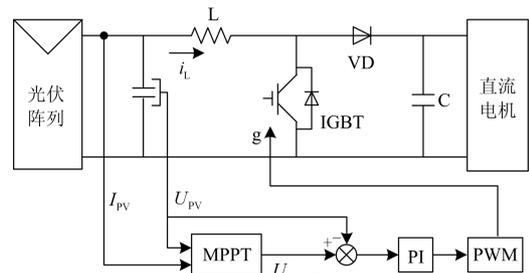


图2 MPPT控制框图

Fig. 2 MPPT control system

图中: I_{PV} 为光伏电池输出电流; U_{PV} 为光伏电池端电压; U_{PV_ref} 为经过最大功率跟踪后得到的光伏电池输出端电压参考值; g 为经过控制器后得到的IGBT门极触发信号。

3 光伏并网控制系统

光伏并网控制系统的目标是调节同步电机端电压幅值、相位和频率与电网侧一致, 实现光伏发电系统的并网运行。

3.1 同步电机端电压控制

3.1.1 电压幅值控制

不计饱和时, 同步电机的电压平衡方程式为

$$U = E - I \cdot r_a \quad (1)$$

式中: U 为电机端电压; E 为电动势; I 为定子电流; r_a 为定子内阻。

相电动势有效值为

$$E = 4.44 f N \phi \quad (2)$$

式中: E 为同步电机相电动势有效值; f 为频率; N

为一相绕组匝数； ϕ 为磁通。

当电机频率和绕组匝数一定时，同步电机电动势与磁通量成正比。因此，通过调节励磁电压改变定子磁通可以实现对电机端电压值的控制。励磁控制原理如图 3 所示，图中 U_{ref} 为同步电机端电压幅值参考值， U 为同步电机端电压幅值实测值， U_f 为电机励磁电压。

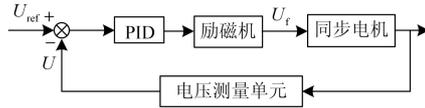


图 3 同步电机励磁控制结构图

Fig. 3 Structure of excitation control system

同步电机端电压幅值参考值与实测值的差值经过励磁调节器将信号发送给励磁机，从而改变励磁机的输出电压，达到通过调节励磁电压控制同步电机端电压幅值的目的。

3.1.2 相位控制

同步电机并网时的相位与电网相位不同则并网时会产生较大冲击电流，造成对发电机和电网的冲击，通过对电机频率进行微调，追踪电网相位，使电机相位与电网相位一致。

3.2 频率及有功功率控制

同步发电机转速与频率的关系为

$$f = \frac{np}{60} \quad (3)$$

式中： n 为电机转速； p 为电机极对数。

当极对数一定时，电机频率与转速值成正比。

因此，通过调节电机转速可以实现对电机输出电能频率的控制。该光伏并网系统中，同步电机由直流电机拖动，实现同轴旋转，因此通过调节直流电机转速能够实现对同步电机频率的控制。

直流电机在额定励磁下，电枢回路电压方程为

$$\begin{cases} U_a = Ri_a + E \\ E = C_e \cdot n \end{cases} \quad (4)$$

式中： U_a 为直流电机端电压； R 为电枢电阻； i_a 为电枢电流； E 为电动势； C_e 为电动势常数。

整理得到电机转速方程为

$$n = \frac{U_a - I_a R}{C_e} \quad (5)$$

可见，通过调节直流电机端电压可以实现对转速的无级平滑调节。

直流电机的端电压调节通过 Boost 电路实现，因此，Boost 电路同时实现 MPPT 功能和电机转速

控制功能。直流电机转速控制原理如图 4 所示。

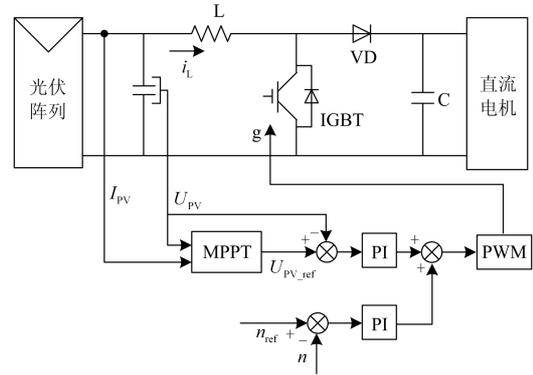


图 4 电机转速控制框图

Fig. 4 Structure of speed control system

图 4 中 n_{ref} 为电机转速参考值， n 为电机转速实测值，两转速的差值经过 PI 调节器的输出与 MPPT 控制的 PI 调节器输出叠加后作为 PWM 信号发生器的输入，得到 Boost 电路中 IGBT 的开关信号，从而在 Boost 电路中同时实现 MPPT 功能和电机转速控制功能。

直流电机的电磁功率为

$$P_e = T_e \cdot \omega \quad (6)$$

式中： P_e 为电磁功率； T_e 为电磁转矩； ω 为电机角速度。

电磁转矩与电枢电流的关系为

$$T_e = C_T \cdot I_a \quad (7)$$

电枢电流与电机端电压的关系为

$$I_a = \frac{U_a - E}{R} \quad (8)$$

因此得到电磁功率与电机端电压的关系为

$$P_e = C_T \cdot \omega \cdot \frac{U_a - E}{R} \quad (9)$$

光伏系统并网后，电机转速受到电网频率牵制而稳定在同步速，此时直流电机电动势和角速度均为常数，则电磁功率与电机端电压成正比。直流电机的端电压与经 MPPT 控制得到的光伏阵列输出功率成正比变化，因此，当光伏系统并网后，Boost 电路实现 MPPT 的同时也实现了直流电机端电压的调节。同步电机的输出功率会跟随光伏阵列的输出功率变化而变化。

4 仿真分析

在 MATLAB/Simulink 平台下分别对光伏电源利用直流-同步电机并网系统和光伏电源利用逆变器并网系统进行建模仿真。由于电机制造技术成熟，不受容量限制，光伏电源利用电机并网的方式在高

压、大容量情形下更为有利, 因此, 仿真仅对该并网方案的原理进行验证, 其在大容量情形下同样适用。设定光伏阵列容量为 5.6 kW, 直流电机选用永磁电机, 参数如下: $P_N=5.8$ kW, $U_N=500$ V, $n_N=1\ 500$ r/min, $R_a=3.5$ Ω , $L_a=0.039\ 2$ H, $C_T=3$ 。同步电机参数如下: $P_N=5.5$ kW, $U_N=400$ V, $f_N=50$ Hz, $n_N=1\ 500$ r/min。光伏系统交流有功负载为 1 kW。光伏阵列初始光照度设定为 $1\ 000$ W/m², 在 2 s 时光照度变为 900 W/m²。

电机从静止状态开始启动, 当自动准同期装置判断电机满足并网条件时, 并网开关合闸。仿真结果如下图所示。

由图 5 可见, 光伏阵列经过最大功率跟踪控制后在 0.3 s 实现最大功率输出, 在 2 s 光照度降低后, 光伏阵列的输出功率降低并迅速稳定在新的最大功率点运行, MPPT 达到了较好的控制效果。

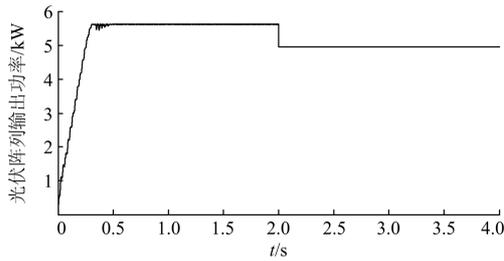


图 5 光伏阵列输出功率

Fig. 5 Output of photovoltaic

由图 6 可见, 电机转速在 0.56 s 时上升到同步速, 此时光伏发电系统并网开关合闸, 实现光伏系统的并网发电运行。

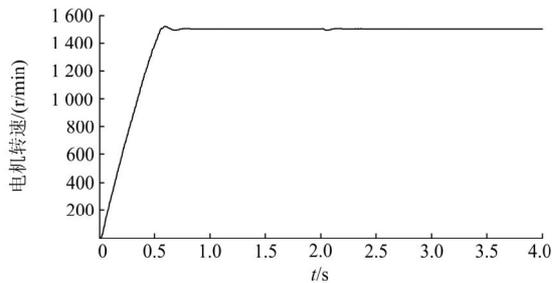
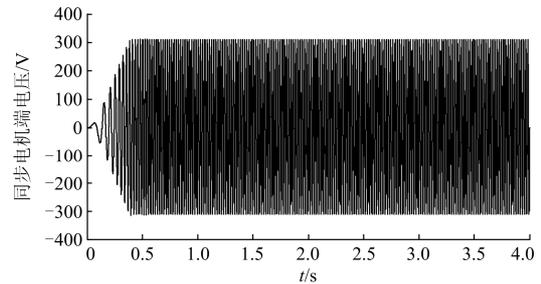


图 6 电机转速

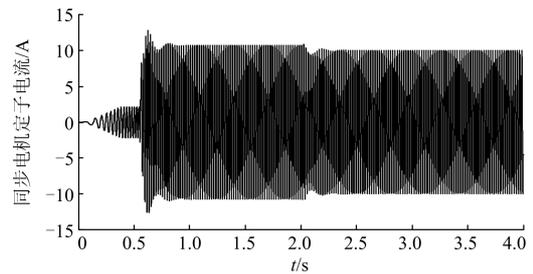
Fig. 6 Motor speed

由图 7 可见, 在励磁控制系统作用下同步电机定子端电压幅值在 0.4 s 时上升到整定值并一直维持不变。励磁控制达到了较好的控制效果。

由图 8 可见, 光伏系统采用直流-同步电机并网方式时得到的并网电流波形平滑, 波形质量好, 对电网没有谐波污染, 而逆变器并网方式下得到的并网电流波形中谐波含量较高, 对电网电能质量造成影响。



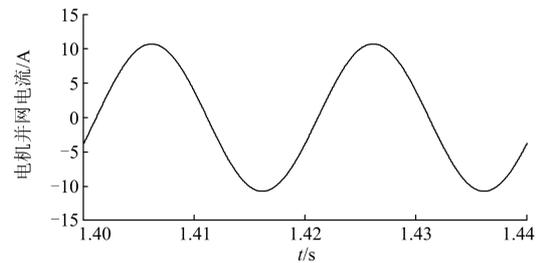
(a) 同步电机定子一相端电压



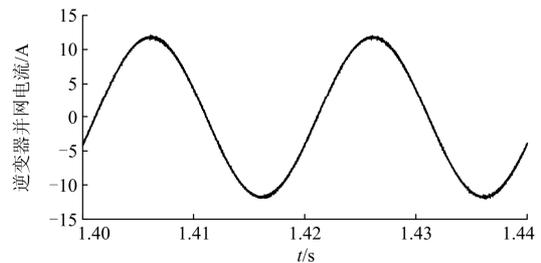
(b) 同步电机定子一相电流

图 7 并网电压、电流仿真波形

Fig. 7 Simulative results of grid voltage and current



(a) 直流-同步电机并网电流局部放大图



(b) 逆变器并网电流局部放大图

图 8 两种并网方式下并网电流局部放大波形

Fig. 8 Amplification waveforms of grid current in different grid-connected modes

由图 9 可见, 并网前同步电机输出有功功率为 1 kW, 与光伏系统的交流有功负载平衡, 在 0.56 s 并网开关合闸后光伏系统开始并网发电运行, 光伏系统向电网侧输送功率, 在 2 s 光伏阵列输出功率降低后, 同步电机输出有功功率下降并稳定在新的功率输出运行。

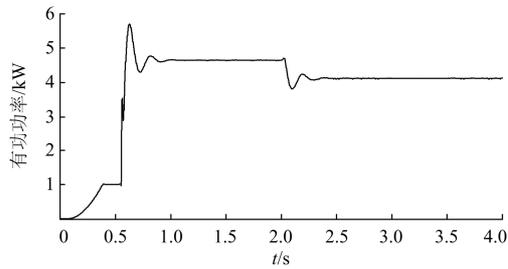


图 9 同步电机输出有功功率

Fig. 9 Output active power of synchronous motor

由图 10 可见, 光伏系统并网前同步电机不发出无功功率, 在 0.56 s 光伏系统并网后同步电机开始向电网输送无功功率, 在 2 s 光伏阵列输出功率变化后, 同步电机输出无功功率升高并稳定在新的功率输出运行。

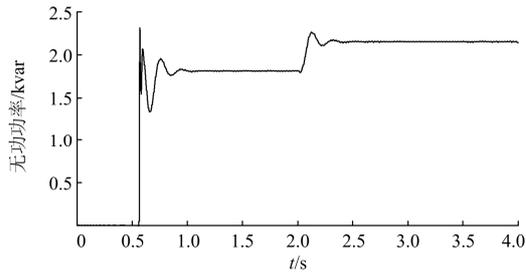


图 10 同步电机输出无功功率

Fig. 10 Output reactive power of synchronous motor

5 结论

针对光伏并网逆变器存在故障率高、谐波含量大和控制复杂等问题, 本文提出了光伏电源利用直流-同步电机并网的方案。根据同步电机的并网条件, 分别调节同步电机的端电压幅值、相位和频率与电网侧一致, 实现光伏系统的并网运行。并网后, 同步电机输出功率跟随光伏阵列输出功率的变化而变化。通过仿真结果可以看出, 光伏系统采用该方案并网时得到的并网电压、电流波形质量好, 对电网没有谐波污染, 且既可以向电网提供有功功率又可以提供无功功率, 有利于改善电网功率因数。

参考文献

[1] 张明光, 陈晓婧. 光伏并网发电系统的低电压穿越控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(11): 28-33.
ZHANG Mingguang, CHEN Xiaojing. A control strategy of low voltage ride-through for grid-connected photovoltaic power system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(11): 28-33.

[2] 青桃, 汪颖, 江智军, 等. 光伏发电系统并网点谐波电压波动特征孤岛检测法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(12): 9-14.
QING Tao, WANG Ying, JIANG Zhijun, et al. An islanding detection method for photovoltaic power generation system using fluctuation characteristic of point of common coupling harmonic voltage[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(12): 9-14.

[3] 杨秋霞, 刘大鹏, 王海臣, 等. 光伏并网发电与电能质量调节统一控制系统[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 69-74.
YANG Qiuxia, LIU Dapeng, WANG Haichen, et al. A combined control approach for grid-connected photovoltaic and power quality regular systems[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 69-74.

[4] 巢睿祺, 王杰. 太阳能光伏并网系统的控制与仿真[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(2): 81-87.
CHAO Ruiqi, WANG Jie. Control and simulation of the grid-connected solar photovoltaic system[J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(2): 81-87.

[5] 周林, 龙崦平, 张密, 等. 带 LCL 滤波器的单相并网逆变器低频振荡现象分析[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(1): 67-79.
ZHOU Lin, LONG Yanping, ZHANG Mi, et al. Analysis of low frequency oscillation in single-phase grid-connected inverter with LCL filter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(1): 67-79.

[6] 林永朋, 陶顺, 肖湘宁. 电压不平衡条件下并网逆变器的直流电压控制[J]. 电网技术, 2015, 39(6): 1643-1649.
LIN Yongpeng, TAO Shun, XIAO Xiangning. DC voltage control of grid-connected inverters under imbalanced voltage[J]. Power System Technology, 2015, 39(6): 1643-1649.

[7] 翦志强, 司徒琴. 三相电压不对称跌落光伏并网逆变器控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(14): 126-130.
JIAN Zhiqiang, SITU Qin. Control method of photovoltaic grid-connected inverter under three-phase voltage unbalanced dips[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(14): 126-130.

[8] 邱晓明, 王明渝, 胡文翠. LLCL 滤波的单相光伏并网逆变器控制技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(10): 74-79.
QIU Xiaoming, WANG Mingyu, HU Wencui. LLCL filter based single-phase photovoltaic grid-connected inverter control strategy[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(10): 74-79.

- [9] 李伟峰. 一种低谐波畸变的平滑光伏并网控制策略研究[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(12): 113-117.
LI Weifeng. Research on smooth modulation strategy with low harmonic distortion for active power filter of PV grid-connection[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(12): 113-117.
- [10] 杨亮, 苏剑, 刘海涛, 等. 单相并网逆变器的直流分量抑制策略[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(4): 145-150.
YANG Liang, SU Jian, LIU Haitao, et al. DC component suppression strategy for single-phase grid-connected inverter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(4): 145-150.
- [11] 陈堃, 陈昌旺, 刘涤尘. 光伏并网逆变器输出电压直流分量的瞬时补偿策略[J]. 电网技术, 2013, 37(11): 3080-3085.
CHEN Kun, CHEN Changwang, LIU Dichen. Instantaneous compensation strategy of DC component in output voltage of photovoltaic grid-connected inverters[J]. Power System Technology, 2013, 37(11): 3080-3085.
- [12] 赵紫龙, 周敏, 瞿兴鸿, 等. 基于改进空间矢量脉宽调制的电压源型换流器偶次谐波抑制[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(8): 112-122.
ZHAO Zilong, ZHOU Min, QU Xinghong, et al. Even-order harmonic suppression for voltage source converters based on improved space vector PWM method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(8): 112-122.
- [13] 杨立永, 刘伟鹏, 陈智刚, 等. 单相光伏并网逆变器低次谐波抑制研究[J]. 电力电子技术, 2015, 49(1): 70-73.
YANG Liyong, LIU Weipeng, CHEN Zhigang, et al. Research on mitigation of low order harmonics in the grid-connected single-phase photovoltaic inverter[J]. Power Electronics, 2015, 49(1): 70-73.
- [14] 王鹿军, 张冲, 吕征宇. 电网谐波背景下单相并网逆变器的锁相方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(14): 107-112.
WANG Lujun, ZHANG Chong, LÜ Zhengyu. Phase-locked loop for single phase grid-connected inverters in a harmonic distorted grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(14): 107-112.
- [15] 王学华, 阮新波, 刘尚伟. 抑制电网背景谐波影响的并网逆变器控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(6): 7-14.
WANG Xuehua, RUAN Xinbo, LIU Shangwei. Control strategy for grid-connected inverter to suppress current distortion effected by background harmonics in grid voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(6): 7-14.
- [16] 赵贵龙, 曹玲玲, 祝龙记. 基于光伏并网逆变系统的改进锁相环设计[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 108-112.
ZHAO Guilong, CAO Lingling, ZHU Longji. Improved PLL design of PV grid inverter system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 108-112.
- [17] 张红莲, 刘崇伦. 交直流调速控制系统[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [18] 范国伟, 韩玉婷, 史彦. 同步电机原理及应用技术[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2014.
- [19] 刘取. 电力系统稳定性及发电机励磁控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.

收稿日期: 2015-09-07; 修回日期: 2015-11-27

作者简介:

孙颖(1992-), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为光伏发电与并网技术; E-mail: sunying5330@163.com

张建成(1965-), 男, 博士研究生导师, 教授, 研究方向为新型储能技术和可再生能源发电控制技术。E-mail: zhang_jiancheng@126.com

(编辑 张爱琴)