

单相单级光伏发电实验系统中电流控制策略研究

于晶荣, 邹勇军, 王一军, 杨建, 吴伟标

(中南大学信息科学与工程学院, 湖南长沙 410083)

摘要: 为了抑制单相单级光伏实验系统输出电流中的低频谐波成分, 提出了一种基于比例谐振控制的新方法。通过改进控制器结构, 能够有效避免控制器对参考电流中低频谐波信号的放大; 比较了新型电流控制方法与标准电流控制方法频率域特性。分析表明, 新型电流控制方法在抗谐波扰动方面具有更好的性能。最后, 给出了新型电流控制器参数的一般设计步骤, 并通过仿真和实验验证了电流控制方法的正确性和有效性。

关键词: 单相单级光伏系统; 比例谐振控制器; 控制器结构; 优化设计

中图分类号: TM615; TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-4956(2012)12-0039-05

Research on current control strategy in single-phase single-stage PV power generation system

Yu Jingrong, Zou Yongjun, Wang Yijun, Yang Jian, Wu Weibiao

(School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: To restrain low order harmonic component of output current for the single-phase PV system, a novel control strategy based on proportional resonant control is proposed. By modifying the structure of the controller, the proposed controller can avoid low order harmonic amplifying. Compared with traditional controller, the new current control strategy has good characteristics in restraining harmonic disturbance. Finally, general design steps for the new current controller are displayed, and the simulation and experimental results verify the correctness and effectiveness of the design.

Key words: single-phase single stage photovoltaic system; proportion and resonant controller; controller structure; optimal design

目前, 光伏产业是世界上增长速度最快的领域之一, 近几年每年平均增速都达到了 50% 以上^[1-2]。单相单级光伏发电系统因具有成本低、配置灵活等特点, 在小容量光伏系统中具有良好的应用前景。

单相单级光伏发电系统存在交流输出电流中低次谐波含量高的问题。针对该问题, 本文提出了一种简便有效的控制器设计方法。该方法不仅能够消除输出电流中的低频谐波成分, 而且还具有良好的控制性能和稳态裕度。

1 单相单级光伏系统拓扑结构

单相单级光伏发电系统拓扑结构如图 1 所示^[3-4]。图中, U_{dc} 为直流侧的光伏发电产生的电压, C_d 为滤波电容, U_g 为电网电压, R_1 、 R_2 为电感 L_1 和 L_2 的等效电阻。

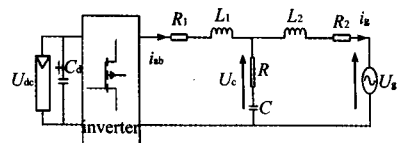


图 1 单相单级光伏系统拓扑结构图

2 光伏系统低频谐波分析

为快速稳定地跟踪到光伏电池的最大功率点, 单相光伏系统通过电压外环控制逆变器直流侧电压, 使其直流电压实际值等于最大功率点跟踪算法所确定的

收稿日期: 2012-03-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(61104047); 湖南省自然科学基金项目(11JJ5035)

作者简介: 于晶荣(1981—), 女, 辽宁丹东, 博士, 讲师, 主要研究方向: 新能源发电技术, 电能质量分析与控制技术。

E-mail: jingrong_yu@126.com

参考给定值。电压外环的响应速度相对比较慢,控制对象主要是低频成分(一般小于 10 Hz),对于电压外环控制我们使用常规 PI 控制器就能满足要求。

设电网电压的表达式为

$$U_g(t) = U_m \sin \omega t \quad (1)$$

式中 U_m 为电网电压峰值。

通常要求光伏并网逆变器输出近似单位功率因数电能,则光伏电流的表达式为

$$i_g(t) = I_m \sin \omega t \quad (2)$$

式中 I_m 为电网电流峰值,则输入到电网的功率为

$$P_g(t) = U_g i_g = \frac{U_m I_m}{2} (1 - \cos 2\omega t) \quad (3)$$

由(3)式可以看出,系统输出功率的直流成分由光伏电池提供,交流成分由功率解耦电容 C_d 提供,因此电容电压 U_{dc} 会在一个直流成分的基础上叠加一个近似二次谐波成分,此二次谐波的幅值约为

$$\Delta U_c \approx \frac{P_{pv}}{2\omega V_{dc} C_d} \quad (4)$$

式中 P_{pv} 为光伏电池的输出功率, V_{dc} 为 U_{dc} 的直流成分。

直流侧二次谐波成分 $\Delta U_c \sin 2\omega t$ 经过电压外环 PI 控制器的调节后,参考电流幅值也会形成一个二次谐波,此二次谐波再经 PLL 锁相器与电网电压同步以后就会合成一个三次谐波成分。可见电流内环的参考给定信号含有大量的三次谐波成分,电压外环的比例系数越大,则参考电流的三次谐波电流也越大,同时电网电压的谐波畸变还会引起更高次的谐波电流。可见,如果不采取有效的抑制措施,输出电流的谐波畸变率将不能满足电能质量标准的要求。

3 比例谐振控制

光伏发电系统中,电流内环要快速准确跟踪正弦参考信号。这种情况下,常规 PI 控制无法消除稳态误差,使得控制精度无法满足要求。增大增益系数虽然能减少稳态误差,但有可能放大噪声并引起系统不稳定^[5-6]。比例谐振控制在某一个固定频率(谐振频率)上可实现近似无穷大增益,在此频率外无限衰减。因此,若电流内环采用比例谐振控制,可以很好地跟踪到频率相对固定的参考电流信号。

比例谐振跟踪控制器的传递函数为

$$G_{PR} = k_p + \frac{2k_1 s}{s^2 + \omega_n^2} \quad (5)$$

其中, ω_n 为谐振角频率^[7], k_1 为积分系数, k_p 为比例系数。

比例谐振控制器在实际应用中具有以下缺点:比例谐振控制器在谐振频率处实现增益无穷大,由于受数

字控制器(特别是定点数字处理器)精度的影响,所以实现上比较困难;当电网频率偏移时,增益大幅降低,控制器将会失效。

鉴于比例谐振控制器的上述问题,研究人员提出了准比例谐振控制器^[8-10],它的传递函数为

$$G_{PR} = k_p + \frac{2k_1 \xi \omega_n s}{s^2 + 2\xi \omega_n s + (\omega_n)^2} \quad (6)$$

可以看出,准比例控制器在谐振频率处的积分系数由 k_1 决定,同时由于阻尼系数 ξ 的存在,因此提高了谐振频率附近的通频带。本文将准比例谐振控制器分为 2 个部分来分析,即:

$$G_{PR} = k_p + H_1 \quad (7)$$

$$H_1 = \frac{2k_1 \xi \omega_n s}{s^2 + 2\xi \omega_n s + \omega_n^2} \quad (8)$$

常规电流控制器如图 2 所示。图中 v_c 为控制信号; H_1 为针对基波电流设计的谐振控制器; H_2 为针对谐波抑制要求设置的谐波补偿器,且 $H_2 = \sum_{n=3}^h \frac{2k_1 \xi n \omega_0 s}{s^2 + 2\xi n \omega_0 s + (n\omega_0)^2}$, n 为谐波次数, h 为最高谐波次数; i_{ref} 为电流控制内环的参考电流, i_{ab} 为光伏系统交流侧实际输出电流,即流过电感 L_1 的电流。

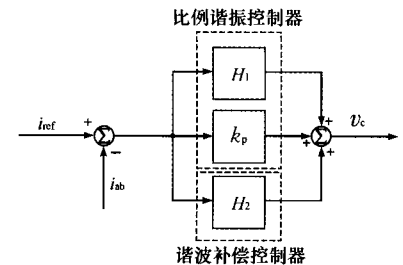


图 2 常规电流控制方法结构框图

根据分析,光伏系统最大功率点跟踪控制的输出直流参考信号包含有二次谐波成分,该二次谐波导致电流内环的参考信号含有大量的三次谐波成分。若采用常规控制器结构,参考电流中的三次谐波电流将被跟踪,这种低频谐波分量是输出滤波器无法滤除的,因此将使得光伏系统的交流侧输出电流存在较大的谐波畸变。

4 新型电流控制器结构与参数设计

为避免光伏系统对参考电流中的低次谐波成分的放大,本文提出一种基于比例谐振控制的新型控制器结构。新型控制器结构如图 3 所示。

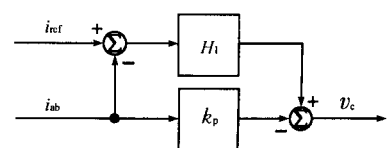


图 3 新型控制器结构框图

新型控制器中,比例谐振器 H_1 完成对参考电流的基波成分的精确跟踪;比例控制 k_p 能够对参考电流的高频成分进行有效抑制。

在新型电流控制方法下,参考电流到输出电网电流(流过电感 L_2 的电流)之间的传递函数为

$$G_r(s) = \frac{G_{PR}(s)PW(s)G_d(s)G_{vg}(s)}{1 + H_1(s)} \quad (9)$$

其中, $H_1(s) = G_{PR}(s)PW(s)G_d(s)G_{vi}(s)$; $G_{vg}(s)$ 为逆变器输出电压到电网输出电流之间的传递函数; $G_{vi}(s)$ 为逆变器输出电压到逆变器输出电流之间的传递函数; $PW(s) = V_{dc}/V_m$, 为脉宽调制(PWM)放大倍数, V_m 为三角载波幅值; $G_d(s) = e^{-j\omega_c T_d}$, 为 PWM 控制延时。

4.1 比例系数设计

控制系统中,反馈控制的比例系数 k_p 越大则系统的稳态误差越小,同时系统的带宽也越大。因此,通常要求在满足系统稳定的条件下比例系数越大越好。

在 PWM 控制系统中,一个基本的限制条件是参考电压的变化率应小于三角载波的变化率,则有:

$$\frac{k_p V_{dc}}{L} \leq \frac{V_m}{T_n} \Rightarrow k_p \leq \frac{2f_n L V_m}{V_{dc}} \quad (10)$$

式中, V_{dc} 为直流侧电压的直流分量, f_n 为三角载波频率, L 为输出滤波器等效电感,且 $L = L_1 + L_2$ 。

但是,由于没有考虑系统相角裕度,按照式(10)设计比例系数还不够。本文中系统的开环传递函数为 $(H_1 + k_p)PW(s)G_d(s)G_{vi}(s)$, 系统的相角为

$$\begin{aligned} & \angle(H_1 + k_p)PW(s)G_d(s)G_{vi}(s) = \\ & \angle\left(\frac{2k_1\xi\omega_n\omega_c j}{\omega_n^2 - \omega_c^2 + 2\xi\omega_n\omega_c j} + k_p\right)e^{-j\omega_c T_d} + \angle G_{vi} = \\ & -\omega_c T_d + \angle\left(\frac{2k_1\xi\omega_n\omega_c j}{\omega_n^2 - \omega_c^2 + 2\xi\omega_n\omega_c j} + k_p\right) + \angle G_{vi} \end{aligned} \quad (11)$$

由于系统的截止角频率 ω_c 比较大, $\angle G_{vi} \approx -90^\circ$, 而 $\angle\left(\frac{2k_1\xi\omega_n\omega_c j}{\omega_n^2 - \omega_c^2 + 2\xi\omega_n\omega_c j} + 1\right) \approx 0$ 。所以,系统的相角裕度为

$$\gamma \approx 90^\circ - \omega_c T_d \quad (12)$$

从式(12)可以看出,相角裕度只与截止频率 ω_c 及延时时间 T_d 有关。截止频率越大则相角裕度越小,反之,截止频率越小则相角裕度越大。由于 ω_c 远大于比例谐振控制器的谐振频率,因此在截止频率 ω_c 处的幅值增益约为 k_p , 因此系统的截止频率由 $G_{vi}(s)$ 及比例系数 k_p 决定,在输出滤波器确定的情况下,截止频率由 k_p 决定, k_p 越大则截止频率越高,反之则截止频率越低。同时相角裕度受系统延时的影响,延时越大则相角裕度越小,延时越小相角裕度越大。

万方数据

通常,一个好的控制系统要求开环相角裕度在 $40^\circ \sim 60^\circ$ 之间,由(12)式可以得到:

$$\omega_c = \frac{90^\circ - \gamma}{T_d} \quad (13)$$

$$k_p \frac{V_{dc}}{V_m} |G_{vi}(\omega_{cmax}j)| = 1 \quad (14)$$

所以有

$$k_p = \frac{V_m}{V_{dc} |G_{vi}(\omega_c j)|} \quad (15)$$

4.2 准比例谐振控制器参数的设计

4.2.1 阻尼系数的设计

考虑到电网频率会发生偏移,按照分布式发电标准的要求,当电网频率 f 满足 $49.3 \text{ Hz} \leq f \leq 50.5 \text{ Hz}$ 时,属于正常的频率变动范围,如果超出此范围,则分布式发电系统立即停止供电。

设电网频率漂移 $\pm 0.5 \text{ Hz}$ 时,

$$|H_1(\omega_n + n\pi)| = \frac{k_1}{\sqrt{2}} \quad (16)$$

式中, n 为谐波次数,则

$$\xi = \frac{2\pi\omega_0 \pm \pi^2}{2\omega_0(\omega_0 \pm \pi)} \quad (17)$$

式中, ω_0 为电网电压基波角频率, π 相对于 ω_0 很小,因此可以舍去。

根据电网基波周期 T_0 , 有

$$\xi = 0.5T_0 = 0.01 \quad (18)$$

4.2.2 积分系数的设计

比例谐振控制器的积分系数会对系统的截止频率和相角产生一定的影响,但影响不是很大。

系统的相对稳定性与积分系数的关系如图 4 所示(积分系数按箭头方向逐渐增大)。可以看出,积分系数越大则系统的截止频率越高,同时相角裕度也越小,当 $k_1 = 175$ 时,这时相角裕度为零,可见积分系数不能超过一定的范围,否则会引起系统不稳定。从图 4 中还可以看出,尽管积分系数会影响系统的稳定,但是系数的可调节范围比较宽。

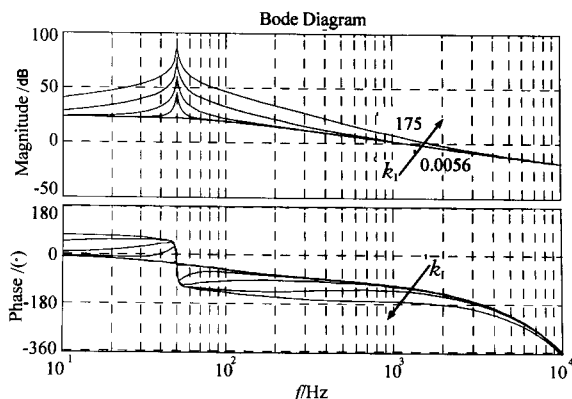


图 4 积分系数与系统相对稳定性的关系

同时,由于系统含有大量低次谐波,因此在设计积分系数时,应考虑参考信号的前向通道能否有效抑制低次谐波。

参考信号前向通道的传递函数为

$$G_I(s) = H_1(s)PW(s)G_d(s)G_{vi}(s) \quad (19)$$

传递函数 $G_I(s)$ 对三次谐波的抑制能力如图 5 所示。

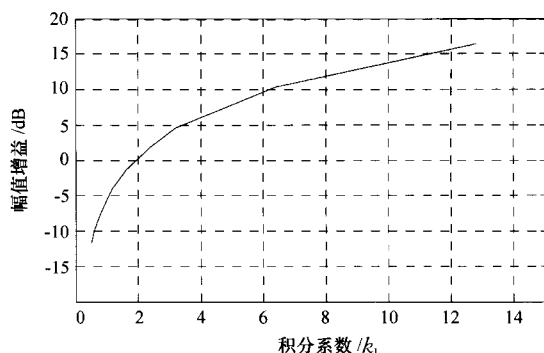


图 5 积分系数对三次谐波幅值增益的影响

从图 5 可以看出,前向通道的三次谐波增益随着积分系数的增大而增大,为了能够有效抑制参考信号

的三次谐波,三次谐波的幅值增益应小于 -3 dB。从图 6 中可以得知积分系数应满足 $k_i < 1.6$ 。在满足有效抑制三次谐波的前提下,积分系数应越大越好,因为积分系数越小,则误差电流下降速度越慢,有可能引起电压外环振荡。

根据上述原理,可以得出电流控制方法参数设计的一般步骤:

(1) 考虑系统延时对系统相角裕度的影响,在满足相角裕度的前提下,确定系统的最大截止角频率,根据式(15)确定系统的比例系数;

(2) 根据比例谐振控制谐振带宽的要求设置阻尼系数;

(3) 根据积分系数对系统稳定性的影响及控制器对低次谐波的抑制能力和对误差电流的控制速度来确定积分系数的大小。

5 仿真结果

本文设计了一套 160 W、直流侧工作电压约为 30 V、输出为 12 V 的单相单级光伏系统,LCL 滤波器的参数选择如表 1 所示。仿真结果如图 6—图 8 所示。

表 1 LCL 滤波器参数

逆变器侧电感 L_1/mH	电网侧电感 $L_2/\mu\text{H}$	电容 $C/\mu\text{F}$	阻尼电阻 R/Ω	R_1/Ω	R_2/Ω
0.4	4.4	88.5	0.074	0.1	0.1

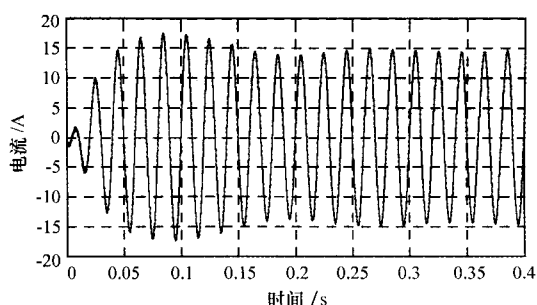


图 6 并网电流仿真波形 ($k_p=0.1, k_i=1.4$)

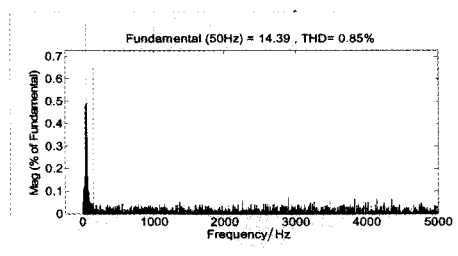


图 7 并网电流谐波畸变分析

图 6 为并网电流输出波形,可以看出,在电压外环万方数据

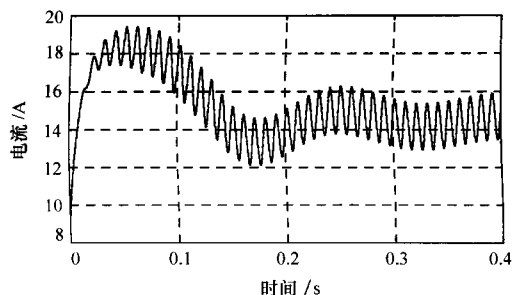


图 8 电压外环控制输出参考电流幅值

调节的作用下,输出电流的幅值发生了变化。从图 7 仿真图上可以看出,系统输出电流谐波畸变率小于 5%,三次谐波含量只有 0.8 A,满足并网标准的要求。图 8 为电压外环控制输出,可以看出电压外环含有大量二次谐波成分。图 9 为误差电流变化趋势图,从图中可以看出在稳态条件下,误差电流小于 1 A,并且具有良好的动态效果。

6 实验结果

为了验证该电流控制策略的正确性进行了实验。控制系统采用 DSP + FPGA 结构,DSP 芯片采用 TI

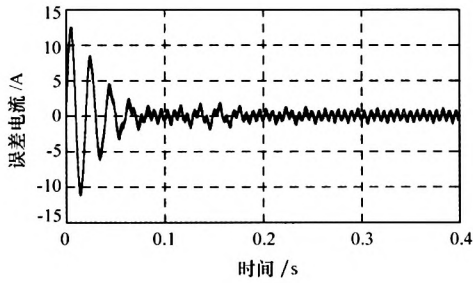


图9 误差电流变化趋势

公司的 32 位定点 TMS320F28335, FPGA 采用 ALTERA 公司的可编程器件 EP2C8T144C8N; 光伏系统的控制频率为 10 kHz。单相单级光伏系统拓扑结构见图 1, 控制算法的实现流程如图 10 所示。

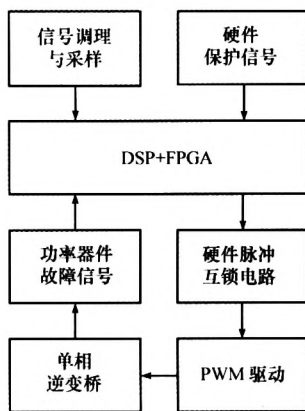


图10 控制系统流程框图

该实验平台的光伏电池部分由 2 块 100 W 的光伏电池并联组成, 光伏电池的开路电压在天气晴朗的情况下在 36~38 V 之间, 短路电流在 4~6 A 之间, 最大功率输出点电压 29~30 V, 并且会随温度的变化而变化, 在阳光很强烈的情况, 实际最大输出功率在 140~150 W 之间。实验结果如图 11 所示, 电网电压与电网电流的功率因素为 1, 符合设计的最终要求。

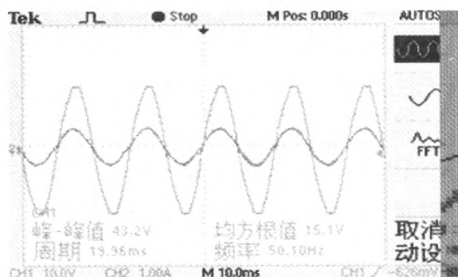


图11 光伏系统电网电压与电流图

7 结束语

为改善电力电子和新能源发电等课程的实验条件, 构建了一套单相单级光伏发电实验系统。为抑制单相光伏并网逆变器输出电流中的低频谐波成分, 提出了一种基于比例谐振控制的新型电流控制结构, 并总结出简单有效的参数设计方法: 从系统的相角裕度出发设计控制器的比例系数, 从控制器的谐振带宽出发设计了比例谐振控制器的阻尼系数, 从控制器对三次谐波的抑制能力出发设计了积分系数。最后。仿真和实验均验证了本文所提电流控制方法的正确性和有效性。

参考文献(References)

- [1] 耿亚新, 周新生. 太阳能光伏产业的理论及发展路径[J]. 中国软科学, 2010(4): 19-28.
- [2] 刘飞. 三相并网光伏发电系统的运行控制策略[D]. 武汉: 华中科技大学图书馆, 2008.
- [3] Liserre M, Blaabjerg F, Hansen S. Design and Control of an LCL-filter Based Three-Phase Active Rectifier[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005, 41(5): 1281-1291.
- [4] Liserre M, Teodorescu R, Blaabjerg F. Stability of Photovoltaic and Wind Turbine Grid-Connected Inverters for a Large Set of Grid Impedance Values[J]. IEEE Transactions on power electronics, 2006, 21(1): 263-271.
- [5] Castilla M, Miret J, Matas J. Control Design Guidelines for Single-Phase Grid-Connected Photovoltaic Inverters With Damped Resonant Harmonic Compensators[J]. IEEE Transactions on industrial electronics, 2009, 56(11): 4492-4501.
- [6] Castilla M, Miret J, Matas J. Linear Current Control Scheme With Series Resonant Harmonic Compensator for Single-Phase Grid-Connected Photovoltaic Inverters[J]. IEEE Transactions on industrial electronics, 2008, 55(7): 2724-2733.
- [7] Zmood D N, Holmes D G. Stationary Frame Current Regulation of PWM Inverters With Zero Steady-State Error[J]. IEEE Transactions on power electronics, 2003, 18(3): 814-822.
- [8] Ho B M T, Henry Shu-Hung Chung. An Integrated Inverter With Maximum Power Tracking for Grid-Connected PV Systems[J]. IEEE Transactions on power electronics, 2005, 20(4): 953-962.
- [9] Koizumi H, Mizuno T, Kaito T, et al. A novel microcontroller for grid connected photovoltaic systems[J]. IEEE Trans Ind Electron, 2006, 53(6): 1889-1897.
- [10] Bialasiewicz J T, Muljadi E. Simulation based analysis of renewable energy systems[J]. IEEE Trans Ind Electron, 2009, 53(4): 1137-1143.

作者: [于晶荣](#), [邹勇军](#), [王一军](#), [杨建](#), [吴伟标](#), [Yu Jingrong](#), [Zou Yongjun](#), [Wang Yijun](#),
[Yang Jian](#), [Wu Weibiao](#)
作者单位: [中南大学信息科学与工程学院, 湖南长沙, 410083](#)
刊名: [实验技术与管理](#) PKU
英文刊名: [Experimental Technology and Management](#)
年, 卷(期): 2012, 29(12)

参考文献(10条)

1. [耿亚新, 周新生](#) 太阳能光伏产业的理论及发展路径[期刊论文]-[中国软科学](#) 2010(4)
2. [刘飞](#) 三相并网光伏发电系统的运行控制策略[学位论文] 2008
3. [Liserre M;Blaabjerg F;Hansen S](#) [Design and Control of an LCL-filter Based Three-Phase Active Rectifier](#) 2005(05)
4. [Liserre M;Teodorescu R;Blaabjerg F](#) [Stability of Photovoltaic and Wind Turbine Grid-Connected Inverters for a Large Set of Grid Impedance Values](#) 2006(01)
5. [Castilla M;Miret J;Matas J](#) [Control Design Guidelines for Single-Phase Grid-Connected Photovoltaic Inverters With Damped Resonant Harmonic Compensators](#) 2009(11)
6. [Castilla M;Miret J;Matas J](#) [Linear Current Control Scheme With Series Resonant Harmonic Compensator for Single-Phase Grid-Connected Photovoltaic Inverters](#) 2008(07)
7. [Zmood D N;Holmes D G](#) [Stationary Frame Current Regulation of PWM Inverters With Zero Steady-State Error](#) 2003(03)
8. [Ho B M T;Henry Shu-Hung Chung](#) [An Integrated Inverter With Maximum Power Tracking for Grid-Connected PV Systems](#) 2005(04)
9. [Koizumi H;Mizuno T;Kaito T](#) [A novel microcontroller for grid connected photovoltaic systems](#) 2006(06)
10. [Bialasiewicz J T;Muljadi E](#) [Simulation based analysis of renewable energy systems](#) 2009(04)

引用本文格式: [于晶荣](#), [邹勇军](#), [王一军](#), [杨建](#), [吴伟标](#), [Yu Jingrong](#), [Zou Yongjun](#), [Wang Yijun](#), [Yang Jian](#), [Wu Weibiao](#) [单相单级光伏发电实验系统中电流控制策略研究](#)[期刊论文]-[实验技术与管理](#) 2012(12)