

单相光伏并网逆变器控制技术

曹太强¹,许建平²,祁强¹,王军¹

(1. 西华大学 电气信息学院, 四川 成都 610039;

2. 西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要:把光伏电池的特性与光伏并网逆变器结合起来控制光伏电池最大功率传输,提出了用光伏电池最大功率跟踪控制的直流输出电流作为逆变器控制的瞬时参考电流的方法,该瞬时交流参考电流是以光伏电池输出的直流电流作为其峰值,以电网电压的相位和频率作为瞬时交流参考电流的相位和频率,同时为了确保逆变器的稳定性和可靠性,引入了电网电压前馈和滤波器电容电流反馈控制的方法。分析了光伏系统中DC/DC、DC/AC的拓扑电路结构及其实现最大功率并网的控制策略,并利用MATLAB/Simulink对系统进行仿真,仿真结果表明所提控制策略能实时跟踪光伏系统的最大功率点,系统能稳定可靠地向电网传输电能。

关键词:光伏电池; 并网系统; 逆变器; 滤波器; 电压前馈; 补偿; 控制; 仿真

中图分类号: TM 464

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2012)05-0133-04

0 引言

随着光伏产业的发展,光伏发电系统正由离网向并网发电发展^[1]。由于光伏阵列输出电压和功率受光照强度、环境温度和负载情况的影响,其输出特性呈非线性^[2-3]。因此,在光伏并网逆变系统中,既要控制系统的稳定性、可靠性和输出电能的质量,又要控制光伏电池最大功率传输给电网。有相关文献对光伏并网技术进行了分析和研究,但是大多仅从并网逆变器结构角度进行分析,没有把光伏电池的特性与光伏并网逆变器结合起来实现光伏并网的电能传输。文献[4-6]仅对并网逆变器中LC或LCL滤波器进行了详细的分析和研究,或者对逆变器自身的电流控制进行了大量的数学分析和理论推导,并没有从根本上解决利用光伏并网逆变器实现最大功率传输,有些文献的理论分析难以在实际工程应用中实现。基于此,本文针对光伏单相并网逆变器进行分析和研究,结合扰动观察法最大功率点跟踪控制的思想^[7],详细分析了电网电压扰动对单相逆变器输出电流和电压的影响;为了达到向电网输送稳定、可靠电流的目的,引入了并网电流、电网电压和电容电流反馈的控制方法。通过理论分析和仿真试验验证了以上研究问题的可行性。

收稿日期:2011-04-19;修回日期:2012-02-22

基金项目:四川省重点学科基金资助项目(SZD0503-09-0);四川省教育厅科研项目基金资助项目(11ZA003);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(SWJTU09ZT13);西华大学重点科研基金资助项目(Z1120940)

Project supported by the Research Fund of Sichuan Provincial Key Discipline of Power Electric Drive, Xihua University (SZD0503-09-0), the Importance Research Fund of Sichuan Provincial Education Department (11ZA003), the Fundamental Research Funds for the Central Universities Project (SWJTU-09ZT13) and the Key Research Fund of Xihua University (Z1120940)

1 单相并网电路拓扑结构和控制策略

单相光伏发电并网系统的电路结构由光伏电池、Boost DC/DC电路、逆变桥及控制电路组成^[1]。前级Boost电路通过调节占空比改变光伏阵列的输出电压,实现最大功率点电压的跟踪;后级逆变电路实现光伏电池最大功率的并网传输,图1为单相并网逆变器控制结构图。

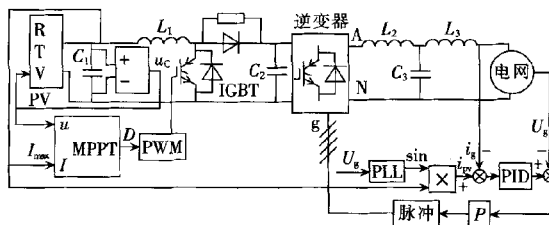


图1 单相光伏并网系统结构图

Fig.1 Structure of grid-connected single-phase PV system

图1中,主电路包括光伏阵列PV、DC/DC变换器、DC/AC逆变器、LCL滤波器及相应的控制单元^[8-9]。本文的控制思想是在Boost DC/DC电路中通过最大功率点跟踪控制方法控制开关管的占空比,从而跟踪光伏电池输出最大功率时的电池端电压 u_c ,并在DC/AC并网逆变控制中,以 i_{pv}^* 为逆变器控制的瞬时参考电流, i_{pv}^* 是以光伏电池最大功率跟踪输出的直流电流 I_{mpp} 作为其峰值,以电网电压的相位和频率作为其相位和频率。因此,该控制方法既能使并网逆变器跟踪电网的频率与相位,又能向电网实时输送最大功率,实现最大功率点跟踪;另外,为了确保控制系统的稳定,还引入了电网电压前馈控制和滤波电容电流内环控制的思想。传统的逆变器是通过LC滤波器来衰减逆变器输出电流中存在的谐波分量,

由于在大功率并网逆变器中,开关频率低,采用 LC 滤波器需要较大的电感量,电感值的增加不但提高了成本而且不利于逆变器的控制^[9-12]。为了减少并网电流中的谐波分量,同时降低电感设计,在并网逆变器设计中采用 LCL 型滤波器^[9]。

假设逆变器前端 DC/DC 输出的电压为光伏电池运行最大功率时的变换电压 U_{pv} ,同时假设逆变器是一个电压增益为 K_{pwm} 的变换器,因此,图 1 中的并网逆变器及 LCL 滤波器的模型可简化为图 2 所示电路。

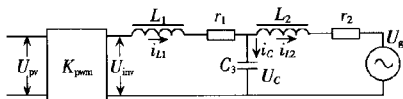


图 2 单相并网逆变器及 LCL 滤波器结构图

Fig.2 Structure of grid-connected single-phase inverter and LCL filter

由于城市电力网是一个不确定的负载系统,因此,必须考虑电力网电压扰动情况下并网逆变器能否向电网输送稳定、可靠的并网电流。电网电压前馈补偿不会改变控制系统的特性,从抑制扰动的情况看,电网电压前馈控制可以减轻反馈控制的调节难度,在工程应用中反馈控制系统的增益可以取得较小一些,这样不仅容易调试,而且有利于减小系统的跟踪误差,如图 3 所示。图中, ΔU_g 为电网扰动信号, $G_g(s)$ 为扰动补偿器, G_{DSP} 、 $G_{inv}(s)$ 、 $G_{LCL}(s)$ 分别为 DSP、逆变器和滤波器的增益函数。

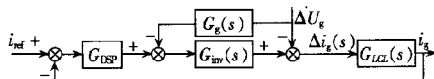


图 3 并网电压扰动控制框图

Fig.3 Control of grid-connection voltage perturbation

在图 3 中,设 $\Delta i_g(s)$ 为电压扰动时系统输出的扰动电流,它由两部分组成,即:

$$\Delta i_g(s) = \Delta i_{ig}(s) + \Delta i_{2g}(s) \quad (1)$$

$$\Delta i_{ig}(s) = \frac{G_{LCL}(s)}{1 + G_{inv}(s)G_{LCL}(s)} \Delta U_g(s) \quad (2)$$

$$\Delta i_{2g}(s) = \frac{G_g(s)G_{inv}(s)G_{LCL}(s)}{1 + G_{inv}(s)G_{LCL}(s)} \Delta U_g(s) \quad (3)$$

其中, $\Delta i_{ig}(s)$ 为扰动主通路作用时的系统输出, $\Delta i_{2g}(s)$ 为扰动补偿通路作用时的系统输出。

因此,扰动信号作用时,总输出扰动电流为 $\Delta i_{ig}(s)$ 与 $\Delta i_{2g}(s)$ 之和,即:

$$\Delta i_g(s) = \frac{G_{LCL}(s)}{1 + G_{inv}(s)G_{LCL}(s)} \Delta U_g(s) + \frac{G_g(s)G_{inv}(s)G_{LCL}(s)}{1 + G_{inv}(s)G_{LCL}(s)} \Delta U_g(s) \quad (4)$$

令扰动信号引起并网输出电流的误差为零,则:

$$E_N(s) = -\Delta i_g(s) = -\left[\frac{G_{LCL}(s)}{1 + G_{inv}(s)G_{LCL}(s)} \Delta U_g(s) + \frac{G_g(s)G_{inv}(s)G_{LCL}(s)}{1 + G_{inv}(s)G_{LCL}(s)} \Delta U_g(s) \right] =$$

$$-\frac{G_{LCL}(s) + G_g(s)G_{inv}(s)G_{LCL}(s)}{1 + G_{inv}(s)G_{LCL}(s)} \Delta U_g(s) = 0 \quad (5)$$

即有:

$$G_{LCL}(s) + G_g(s)G_{inv}(s)G_{LCL}(s) = 0 \quad (6)$$

所以,扰动补偿通路的传递函数为:

$$G_g(s) = -\frac{1}{G_{inv}(s)} \quad (7)$$

通过以上分析可知,图 3 中的 $G_g(s)$ 传递函数满足式(7)时,电网电压前馈补偿能够使扰动电流 Δi_g 为零。但是在光伏发电系统中,为了加快并网电流的响应速度以及控制并网电流的稳定性,还引入了在 LCL 滤波器中对电容 C 的电流(图 2 中电容 C_3 的电流 i_c)进行反馈控制的方法,即将并网电流 i_g 包含在电容电流内环的前向通道内,电容电流反馈能使其电网汲取电流时仍维持电容电压不变^[8]。从逆变器的输出来看,只要精确保证电容电压具有良好的正弦度,就能实时抑制电网电压波动对并网电流带来的影响。在实际应用中,由于各种非理想因素的存在,并不能实现全补偿,只能在一定的允许误差之内补偿。

结合传统逆变器的控制策略,根据图 1—3,可得电网电压扰动情况下的并网电流双环控制系统框图,见图 4。图 4 中选择电容电流 i_c 作为内环控制变量,其目的是消除输出电流中开关频率谐波电流分量,同时增加系统的稳定性^[8-11]。

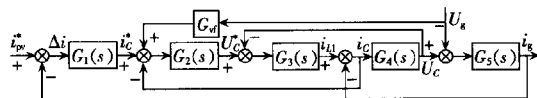


图 4 逆变器并网电流控制框图

Fig.4 Control of inverter grid-connection current

图 4 中, $G_1(s) = K_p + \frac{K_i}{s}$, $G_2(s) = K_{pwm}$, $G_3(s) =$

$$\frac{1}{L_1 s + r_1}, G_4(s) = \frac{1}{C s}, G_5(s) = \frac{1}{L_2 s + r_2}。则其传递函数为:$$

$$H(s) = \frac{i_g(s)}{\Delta i(s)} = \frac{G_1(s)G_2(s)G_3(s)G_4(s)G_5(s)}{1 + G_2(s)G_3(s) + G_3(s)G_4(s) + G_4(s)G_5(s)} \quad (8)$$

为了验证该系统的稳定性,选取 $L_1 = 6.0 \text{ mH}$ 、 $L_2 = 1.5 \text{ mH}$ 、 $C = 25 \text{ } \mu\text{F}$ 、 $r_1 = r_2 = 0.4 \text{ } \Omega$ 、 $K_p = 0.2$ 、 $K_{pwm} = 80$,对式(8)进行根轨迹分析,其根轨迹见图 5,可见,选取 $K_i = 20$ 时极点在虚轴上。因此,以并网电流为外环、电容电流为内环,电网电压前馈的闭环系统能达到稳

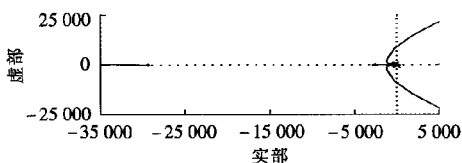


图 5 并网电流控制系统根轨迹

Fig.5 Root locus of grid-connection current control system

定。当然,仿真分析的数值与实际工况存在一定差异,在工程应用上还需要通过不断地调试 K_p 和 K_i 参数值才能使系统稳定可靠地运行。

2 仿真分析

单相并网仿真参数如下:PV 中 $t_{ref}=25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $S_{ref}=1\text{ kW/m}^2$, $I_{sc}=8.58\text{ A}$, $I_{max}=7.94\text{ A}$, $U_{out}=22\text{ V}$, $U_{max}=17.7\text{ V}$, $P_m=140.538\text{ W}$;DC/DC 变换器中 $C_1=100\text{ }\mu\text{F}$, $L_1=5\text{ mH}$, $C_2=300\text{ }\mu\text{F}$, $f_s=2\text{ kHz}$;DC/AC 逆变器中 $L_2=3\text{ mH}$, $L_3=1\text{ mH}$, $C_3=20\text{ }\mu\text{F}$, $f_s=9\text{ kHz}$, $r=0.1\text{ }\Omega$; $K_p=6$, $K_i=256$;步长 $\Delta D_1=5\times 10^{-7}\text{ s}$ 。根据所提并网电流的控制策略,利用 MATLAB/Simulink 仿真软件建立图 1 单相并网的仿真模型。

图 6 是 PV 参数、温度和光照强度都变化情况下的仿真波形,仿真时用扰动观察法在 DC/DC 变换器实现光伏电池的最大功率点跟踪,可以看出,光伏电池的输出电压、电流和功率能随温度和光照的变化而变化,并能跟踪最大功率。根据图 1,选取光伏电池模块的参数为:短路电流 $I_{sc}=14.88\text{ A}$,短路最大电流 $I_{max}=13.88\text{ A}$,开路电压 $U_{out}=354\text{ V}$,开路最大电压 $U_{max}=288\text{ V}$,其余参数不变,图 7 是光伏电池在光照强度从 $1000\text{ W/m}^2\rightarrow 200\text{ W/m}^2\rightarrow 800\text{ W/m}^2$ 变化情况下并网逆变器输出电压和电流的仿真波形。图 8 是该仿真系统的并网电流频谱图,谐波含量为 3.8% ,小于 5% ^[13]。通过仿真波形可知,逆变器输出的交流电压和交流电流随光伏电池入射光强度的变化而变化,不仅能实时跟踪光伏电池的最大功率,而且还能

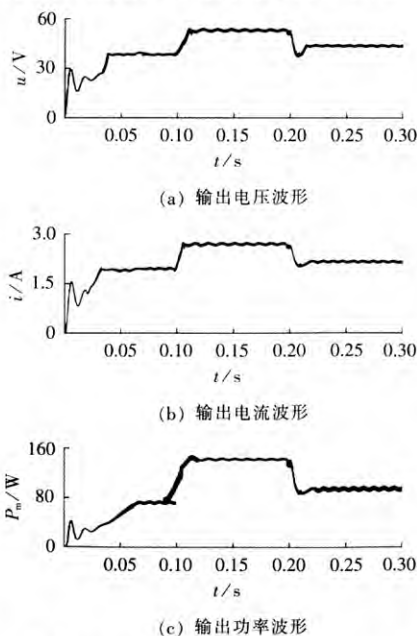


图 6 温度、光照强度变化情况下 Boost 电路电压、电流和功率输出波形

Fig.6 Voltage, current and power waveforms of Boost circuit with variable temperature and sunlight intensity

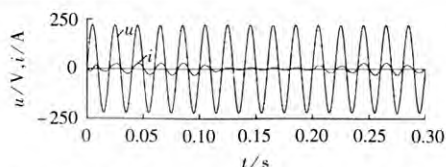


图 7 光照强度变化情况下逆变器输出电压和电流仿真波形

Fig.7 Output voltage and current waveforms of inverter with variable sunlight intensity

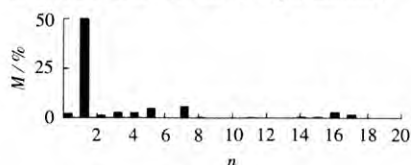


图 8 并网电流频谱图

Fig.8 Spectrum of grid-connection current

输出稳定和谐波含量低的并网电流。

3 结论

本文把光伏电池的特性与光伏并网逆变器结合起来实现光伏并网的最大功率传输,在 Boost DC/DC 电路中通过最大功率点跟踪控制方法控制开关管占空比,从而跟踪光伏电池输出最大功率时的电池端电压 u_c ;DC/AC 并网逆变控制中的瞬时参考电流 i_{pw}^* 以光伏电池最大功率点跟踪输出的直流电流 I_{max} 作为其峰值,以电网电压的相位和频率作为其相位和频率。为了抑制电网电压扰动给并网逆变器输出电压带来的影响以及控制并网电流输出的稳定性,还引入了电网电压前馈补偿和电容电流反馈控制。通过理论分析和仿真可知,所提控制方法能够使光伏电池在光照强度和温度变化时跟踪其最大功率输出。从仿真波形结果可看出,没有出现最大功率点振荡现象和局部功率最大点,在光照强度变化时能够实时把最大电流输送给电网,确保输出电流的稳定性和输出电能质量。

参考文献:

- [1] 赵清林,郭小强,郭伟扬.单相逆变器并网控制技术研究[J].中国电机工程学报,2007,27(16):60-64.
ZHAO Qinglin, GUO Xiaoqiang, WU Weiyang. Research on control strategy for single-phase grid-connected inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(16): 60-64.
- [2] 吴春华,陈国呈,丁海洋,等.一种新型光伏并网逆变器控制策略[J].中国电机工程学报,2007,27(33):103-107.
WU Chunhua, CHEN Guocheng, DING Haiyang, et al. A novel control strategy for photovoltaic grid-connected inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(33): 103-107.
- [3] 吴浩伟,段善旭,徐正喜.一种新颖的电压控制型逆变器并网控制方案[J].中国电机工程学报,2008,28(33):20-24.
WU Haowei, DUAN Shanxu, XU Zhengxi. A novel control scheme of grid-connected inverters based on voltage-controlled mode[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(33): 20-24.

- [4] 沈国桥,徐德鸿. *LCL* 滤波并网逆变器的分裂电容法电流控制[J]. 中国电机工程学报,2008,28(18):36-41.
SHEN Guoqiao,XU Dehong. Current control for grid-connected inverters by splitting the capacitor of *LCL* filter[J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(18):36-41.
- [5] 徐志英,许爱国,谢少军. 采用 *LCL* 滤波器的并网逆变器双闭环网电流控制技术[J]. 中国电机工程学报,2009,29(27):37-41.
XU Zhiying,XU Aiguo,XIE Shaojun. Dual-loop grid current control technique for grid-connected inverter using an *LCL* filter[J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(27):37-41.
- [6] 杨勇,阮毅,叶斌英,等. 三相并网逆变器无差拍电流预测控制方法[J]. 中国电机工程学报,2009,29(33):41-46.
YANG Yong,RUAN Yi,YE Binying,et al. Deadbeat predictive current control method for three-phase grid-connected inverters[J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(33):41-46.
- [7] KEREKES T,TEODORESCU R,LISERRE M,et al. Evaluation of three-phase transformerless photovoltaic inverter topologies[J]. IEEE Trans on Power Electronics,2009,24(9):2202-2211.
- [8] 张强,张崇巍,张兴,等. 风力发电用大功率并网逆变器研究[J]. 中国电机工程学报,2007,27(16):54-59.
ZHANG Qiang,ZHANG Chongwei,ZHANG Xing,et al. Study on grid-connected inverter used in high-power wind generation system[J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(16):54-59.
- [9] 曹太强,许建平,徐顺刚. 基于瞬时无功理论的单相逆变电源并联储控制技术[J]. 电力自动化设备,2011,31(5):80-83.
CAO Taiqiang,XU Jianping,XU Shungang. Parallel operation of single phase inverter based on instantaneous reactive power theory[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(5):80-83.
- [10] WU L B,ZHAO Z M,LIU J Z. A single-stage three-phase grid-connected photovoltaic system with modified MPPT method and reactive power compensation[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2007,22(4):881-886.
- [11] 曹太强,许建平,徐顺刚. 光伏发电系统 SPWM 逆变电源谐波的抑制技术[J]. 电力自动化设备,2011,31(6):20-22.
CAO Taiqiang,XU Jianping,XU Shungang. Harmonic suppression of SPWM inverter for photovoltaic power[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(6):20-22.

作者简介:

曹太强(1969-),男,四川富顺人,博士,主要从事大功率开关变换器及光伏发电、电力电子与电力传动方面的研究(E-mail:c-t-q815@163.com);

许建平(1963-),男,贵州遵义人,教授,博士研究生导师,从事电力电子与电力传动的研究;

祁强(1977-),女,青海西宁人,讲师,硕士,主要从事电机与电力拖动控制的研究;

王军(1963-),男,四川绵阳人,教授,主要从事电力电子与电力传动的研究。

Control of grid-connected single-phase photovoltaic inverter

CAO Taiqiang¹, XU Jianping², QI Qiang¹, WANG Jun¹

(1. School of Electric Information, Xihua University, Chengdu 610039, China;

2. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The maximum power transmission of photovoltaic cells is controlled by combining the characteristics of photovoltaic cell and grid-connected photovoltaic inverter together. It is proposed that, the maximum output current by the maximum power tracking control of photovoltaic cells is used as the instantaneous reference current of inverter, while the phase and frequency of the grid as its instantaneous phase and frequency. The grid-voltage feedforward control and the filter capacitive current feedback control are introduced to ensure the stability and reliability of inverter. The DC/DC and DC/AC topologic structure of photovoltaic system and its control strategy to achieve the maximum grid-connection power are analyzed in detail. The results of system simulation based on MATLAB/Simulink show that, the proposed control strategy tracks the maximum power point of photovoltaic system in real time and the system transfers power to grid stably and reliably.

Key words: photovoltaic cells; grid-connected system; electric inverters; electric filters; voltage feedforward; compensation; control; computer simulation

作者: [曹太强](#), [许建平](#), [祁强](#), [王军](#), [CAO Taiqiang](#), [XU Jianping](#), [QI Qiang](#), [WANG Jun](#)
作者单位: [曹太强, 祁强, 王军, CAO Taiqiang, QI Qiang, WANG Jun \(西华大学电气信息学院, 四川成都 610039\)](#), [许建平, XU Jianping \(西南交通大学电气工程学院 四川成都610031\)](#)
刊名: [电力自动化设备](#) 
英文刊名: [Electric Power Automation Equipment](#)
年, 卷(期): 2012, 32 (5)

参考文献(11条)

1. [赵清林;郭小强;邬伟扬](#) 单相逆变器并网控制技术研究[期刊论文]-[中国电机工程学报](#) 2007(16)
2. [吴春华;陈国呈;丁海洋](#) 一种新型光伏并网逆变器控制策略[期刊论文]-[中国电机工程学报](#) 2007(33)
3. [吴浩伟;段善旭;徐正喜](#) 一种新颖的电压控制型逆变器并网控制方案[期刊论文]-[中国电机工程学报](#) 2008(33)
4. [沈国桥;徐德鸿](#) LCL滤波并网逆变器的分裂电容法电流控制[期刊论文]-[中国电机工程学报](#) 2008(18)
5. [徐志英;许爱国;谢少军](#) 采用LCL滤波器的并网逆变器双闭环网电流控制技术[期刊论文]-[中国电机工程学报](#) 2009(27)
6. [杨勇;阮毅;叶斌英](#) 三相并网逆变器无差拍电流预测控制方法[期刊论文]-[中国电机工程学报](#) 2009(33)
7. KEREKES T;TEODORESCU R;LISERRE M Evaluation of three-phase transformerless photovoltaic inverter topologies 2009(09)
8. [张强;张崇巍;张兴](#) 风力发电用大功率并网逆变器研究[期刊论文]-[中国电机工程学报](#) 2007(16)
9. [曹太强;许建平;徐顺刚](#) 基于瞬时无功理论的单相逆变电源并联控制技术[期刊论文]-[电力自动化设备](#) 2011(05)
10. [WU L B;ZHAO Z M;LIU J Z](#) A single-stage three-phase grid-connected photovoltaic system with modified MPPT method and reactive power compensation 2007(04)
11. [曹太强;许建平;徐顺刚](#) 光伏发电系统SPWM逆变电源谐波的抑制技术[期刊论文]-[电力自动化设备](#) 2011(06)

引用本文格式: [曹太强, 许建平, 祁强, 王军, CAO Taiqiang, XU Jianping, QI Qiang, WANG Jun](#) 单相光伏并网逆变器控制技术[期刊论文]-[电力自动化设备](#) 2012(5)