

# 混合能量存储在光电微能源中应用\*

何永泰<sup>1,2</sup>, 黄文卿<sup>1</sup>, 张玉春<sup>3</sup>

(1. 楚雄师范学院物理与电子科学系, 云南 楚雄 675000 2. 北京理工大学 光电学院, 北京 100081 ;  
3. 新疆吐鲁番鄯善火车站镇吐哈油田公司供水供电处, 新疆 鄯善 838202)

**摘要:** 在光电微能源供电的无线传感器节点中, 光电微能源的输出效率决定了传感器节点工作的稳定性和对环境的适应能力。光电微能源的输出效率与光伏电池输出转换效率和能量存储管理方案等有关。本文中, 根据光伏电池的  $V-I$ 、 $V-P$  特性和能量存储器件的存储特性, 通过研究能量存储对光伏电池输出效率的影响, 提出利用混合能量存储结构, 提高光伏电池输出效率的“窗口”控制法。实验证明, 利用混合能量存储结构, 不仅提高了光伏电池的输效率, 而且, 通过并联方式为传感器节点供电, 能有效减小对能量存储器峰值功率密度的要求。  
**关键词:** 混合能量存储, 微能源, 传感器节点, 太阳能

中图分类号: TP247

标识码文献: B

文章编号: 1001-1390(2009)07-0017-05

## Application of Hybrid Energy Storage in Solar Micro-power Supply

HE Yong-tai<sup>1,2</sup>, HUANG Wen-qing<sup>1</sup>, ZHANG Yu-chun<sup>3</sup>

(1. Department of physics and electron, Chuxiong Normal University, Chuxiong 675000, China.  
2. School of Information Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China.  
3. TuHa Oilfield CO. Department of Water and Electric Supply, Shanshan 838202, Xinjiang, China)

**Abstract:** In wireless sensor nodes integrated with solar micro-power supply, the output efficiency of the solar micro-power supply determines node's the stability and the adaptability to the environment. The output efficiency of solar micro-power system relate to the conversion efficiency of solar cells, scheme of energy storage and management, etc. In the study, based on  $V-I$  and  $V-P$  characteristics of the solar cells and storage characteristics of energy storage devices, we propose the “window” control method to control the maximum output power of the solar cells by using structure of hybrid energy storage. Experimental results show that the method of hybrid energy storage is not only to improve output efficiency of solar cells, but also to reduce the requirement of peak value power density for energy storage devices.

**Key words:** hybrid energy storage, micro-power supply, sensor nodes, solar energy

### 0 引言

随着无线传感器网络技术的发展, 其在工业控制、农业管理、环境监测和军事领域的应用日益扩大。传统的干电池供电方式对无线传感器网络应用的限制越来越突出。为传感器节点寻求一种新的供能方式成为了无线传感器网络发展的必然要求。与温差电池和压电转换器相比, 光伏电池具有最大的转换效率(硅光伏电池可达 14%~18%) 和转换功率密度  $15\text{mW}/\text{cm}^2$ , 因此, 转换太阳能为无线传感器节点供电得到了应用研究。在传感器节点 Prometheus<sup>[2]</sup> 和 Helimote<sup>[3]</sup> 中最早利用光电微能源为无线传感器节点供电。中国科学院电工研究所介绍了光伏-温差微能

源系统为传感器节点供电的设计<sup>[4]</sup>。但是, 在光电微能源系统设计中, 如何优化系统设计和提高系统的能量转换效率等问题还需要进一步研究。在本文中, 根据光伏电池的  $V-I$ 、 $V-P$  特性和能量存储器的存储特性, 通过研究能量存储器对光伏电池输出效率的影响, 提出了利用超级电容和聚合物锂离子电池构成的混合能量存储结构提高光伏电池输出功率的“窗口”控制法。在混合能量存储结构中, 利用超级电容大的充放电次数特性作为能量缓存器, 承担由于光伏电池输出不稳定导致的频繁的充电和放电, 减小频繁的充电和放电对能量存储器的影响。

### 1 能量存储对光伏电池输出效率的影响

在光电微能源中, 由于光伏电池输出的不稳定,

\*国家自然科学基金资助项目(50677068)

作为能量存储和功率变换的能量存储器是必不可少的。对于光伏电池,能量存储器可视为一个带自偏压  $E_b$  的负载<sup>[5]</sup>。能量存储器对光伏电池输出的影响如图1所示。

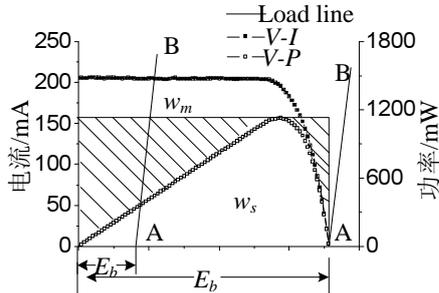


图1光伏电池的输出与能量存储器的关系

Fig.1 Relationship of the output energy of solar cells and energy storage devices

从图1中,可以看出,在光伏电池给能量存储器充电的过程中,随着存储器端电压的增加,  $E_b$  逐渐增大,负载线AB从左向右移,直至  $E_b$  达到光伏电池的输出开路电压  $V_{co}$ ,负载线全部移出,充电结束。若将能量存储器存储的能量  $W_s$  和光伏电池最大功率点对应的输出能量  $W_m$  进行比较,有:

$$\frac{W_s}{W_m} = \frac{P_{storage} \cdot t}{P_{MPP} \cdot t} = \frac{P_{storage}}{P_{MPP}} \quad (1)$$

理想情况下(不考虑能量存储器的存储损失)光伏电池的实际输出效率约为光电转换效率的53%。图1中,阴影区所对应的能量未被利用。由此,可以看出,在光电微能源系统中,存储器存储光伏电池输出能量的过程,是影响光伏电池输出效率的主要因素之一。

## 2 混合能量存储光电微能源工作原理

### 2.1 光伏电池输出特性

为了减少能量存储器对光伏电池输出效率的影响。在文献[6,7]中,基于开路电压法介绍了两种在光电微能源中实现光伏电池最大功率点跟踪(MPPT)的方法。它们分别利用BUCK变换电路作为光伏电池与能量存储器的接口,由微处理器构成跟踪控制器。但是,由于BUCK变换电路转换效率较低,而且,控制电路复杂,其自身功耗较大(为几十毫瓦)。对提高光电微能源的输出效率,作用不明显。由12个单体光伏电池串联组成,面积为150mm×67mm,最佳输出电压为5.8V(标准条件下)的光伏电池阵列,利用开路电压法MPPT和直接为能量存储器(聚合物锂离子电池)充电的结果如图2所示。

从图2中,可以看出,在小功率光电微能源系统中,利用利用最大功率点跟踪MPPT技术对微能源系

统能量转换效率的提高作用不明显。因此,在小功率光电微能源系统中,需要研究一种新的提高光伏电池输出效率的新方法。

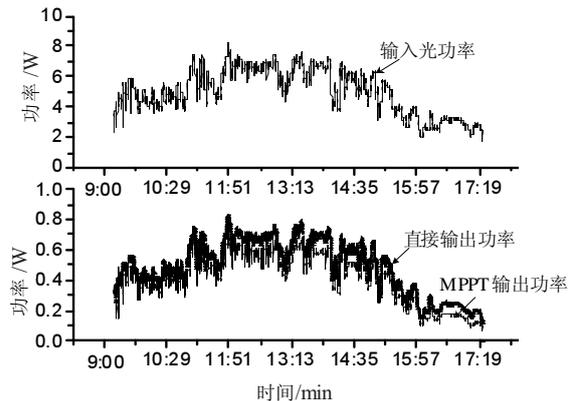


图2 MPPT对微光伏电池输出影响

Fig.2 Effect of MPPT in micro-power solar cells

笔者记录在一天内(北京 2008.4.19),太阳辐照度变化如图3所示。

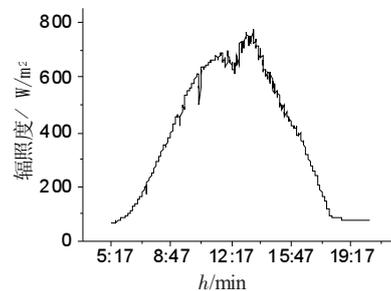


图3 太阳辐照度的分布图(北京 2008.4.19)

Fig.3 Irradiance distribution map

由12个PN结串联组成,面积为150mm×67mm的光伏电池,在一天中绝大部分时间(7:30-16:30)随太阳辐照度、温度的变化,光伏电池最大输出功率点的变化主要集中在V-P特性的一个较小的区域中,如图4中光伏电池输出电压在4.8V-5.8V的阴影区,这个区域我们称它为最大功率区。将光伏电池工作点控制在最大功率区,提高光伏电池输出效率的方法称为“窗口”控制法。

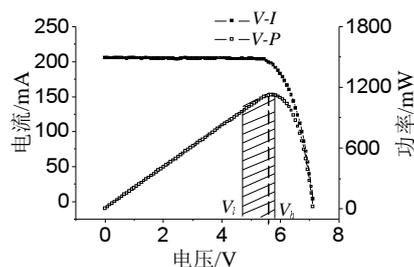


图4 光伏电池最大功率区

Fig.4 Section of maximum power for solar cells

## 2.2 混合能量存储光电微能源组成

在小功率光电微能源系统中,为简化光伏电池最大输出功率控制。根据超级电容器和聚合物锂离子电池能量存储特性,为了控制光伏电池工作在最大输出功率区,设计了一种利用混合能量存储结构提高光伏电池输出功率方案。混合能量存储光电微能源组成如图5所示。

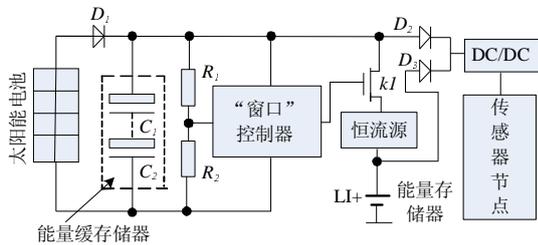


图5 混合能量存储光电微能源组成结构

Fig.5 Framework of solar micro-power supply with hybrid storage

在混合能量存储光电微能源中,利用超级电容器的高充放电周期,作为能量缓存器直接与光伏电池的输出端并联。由于超级电容器输出端的内阻很小(0.01~0.03Ω),超级电容器端电压变化特性直接影响光伏电池的输出电压特性,  $V_c \approx V_s$ 。通过控制超级电容器的充放电过程,控制光伏电池的输出电压  $V_s$  在最大输出功率区变化,提高光伏电池的输出效率。另一方面,利用超级电容器输出功率密度大的特性,作为功率变换器,在“窗口”控制器控制下,为能量存储器充电。

## 2.3 混合能量存储光电微能源工作原理分析

在“窗口”控制器控制下,混合能量存储光电微能源具有能量缓存、“窗口”控制和并联供电三种主要工作状态,其对应的等效电路模型如图6所示。

### (1) 能量缓存状态

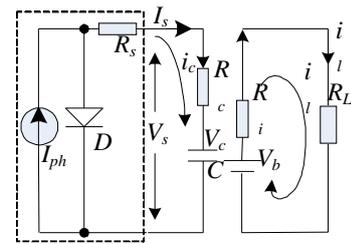
当超级电容器电压  $V_c$  小于光伏电池最大功率区下限电压  $V_l$  时,光电微能源工作在能量缓存状态,等效电路如图5(a)所示。光伏电池只为超级电容器充电,并为传感器节点供电。超级电容器电压变化如下:

$$V_c = V_{start} + C \int_{t_0}^{t_1} i_c dt = V_{start} + C \int_{t_0}^{t_1} i_s dt \quad (2)$$

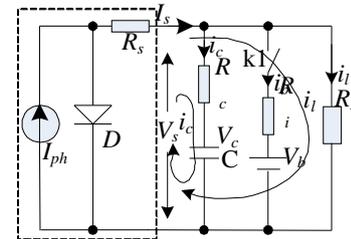
式中  $V_{start}$  为超级电容器初始电压,  $i_c$  为超级电容器充电电流,  $i_s$  为光伏电池的输出电流。

### (2) “窗口”控制状态

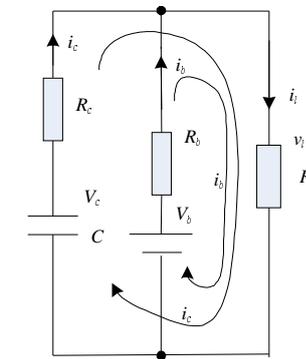
当超级电容器电压  $V_c \geq V_l$  时,光电微能源工作在“窗口”控制状态,其等效电路模型如图5(b)所示。若  $V_c$  增加,开关  $k_1$  断开,光伏电池给超级电容器充电和



(a) 能量缓存等效模型



(b) “窗口”控制等效模型



(c) 并联供电等效模型

图6 混合能量存储光电微能源等效电路模型

Fig.6 Circuit equivalent model of solar micro-power supply with hybrid storage

传感器节点供电,超级电容器电压变化下:

$$V_c = V_{start} + C \int_{t_0}^{t_1} i_c dt \quad (3)$$

当超级电容器电压  $V_c$  达到光伏电池最大功率区的上限电压  $V_h$  时,开关  $k_1$  导通,光伏电池与超级电容器一起给能量存储器充电和节点供电,实现能量存储。同时,超级电容器放电,电压下降,其变化规律如下:

$$V_c = V_h - C \int_{t_2}^{t_3} (i_b - i_s) dt \quad (4)$$

式中  $i_b$  为能量存储器的充电电流。

随着电容器放电,光伏电池电压逐渐下降。当  $V_c = V_l$  时,开关  $k_1$  断开,光伏电池又开始为超级电容器充电,光电微能源重复“窗口”控制状态。将光伏电池的工作点控制在最大输出功率区。

(3) 并联供电状态

在夜间或阴雨天,能量存储器与超级电容器混合并联为传感器节点供电,并联供电的等效电路模型如图5(c)所示。对于无线传感器节点脉冲式负载特性,为了简化其分析过程,传感器节点的电流*i<sub>i</sub>(t)*可近似表示如下:

$$i_i(t) = I_l \sum_{k=0}^{N-1} [\Phi(t-kT) - \Phi(t-(k+D)T)] \quad (5)$$

式中 *I<sub>l</sub>* 为电流幅值;  $\Phi(t)$  为单位阶跃函数; *D* 为传感器激活状态的占空比; *T* 为周期。

经戴维南定律及拉式变换后,可得时间域的输出电压 *v<sub>l</sub>(t)* 为:

$$v_l(t) = V_b + \frac{R_b}{R_b + R_c} (V_c - V_b) e^{-\beta t} - R_b I_o \sum_{k=0}^{N-1} \left[ \left( 1 + \frac{R_b}{R_b + R_c} e^{-\beta(t-kT)} \right) \Phi(t-kT) - \left( 1 - \frac{R_b}{R_b + R_c} e^{-\beta(t-(k+D)T)} \right) \Phi(t-(k+D)T) \right] \quad (6)$$

由此,可得能量存储器和超级电容器支路的电流 *i<sub>b</sub>(t)*、*i<sub>c</sub>(t)* 分别为:

$$i_b(t) = \frac{1}{R_b} [V_b - v_l(t)] \quad (7)$$

$$i_c(t) = i_l(t) - i_b(t) \quad (8)$$

能量存储器输出峰值电流为:

$$I_{b,peak} = I_l \left( 1 - \frac{R_b e^{-\beta DT}}{R_b + R_c} \cdot \frac{1 - e^{-\beta(1-D)T}}{1 - e^{-\beta T}} \right) \quad (9)$$

由此表明能量存储器输出峰值电流 *I<sub>b,peak</sub>* 减小了。同时,由于能量存储器内阻 *R<sub>b</sub>* > *R<sub>c</sub>*, 利用混合并联供电能达到减小内部损耗和延长供电时间的效果。

3 实验测试与分析

3.1 能量存储效率

光电微能源中,能量存储效率为存储器存储的实际能量 *W<sub>s</sub>* 与辐射到该电池受光面上全部光能量 *W<sub>in</sub>* 之比,即:

$$\eta_0 = \frac{W_s}{W_m} = \frac{u_0 \cdot i_0}{S \int_0^\infty F(\lambda) (hc/\lambda) d\lambda} \quad (10)$$

式中 *S* 为光伏电池的有效光照表面积; *F(λ)* 为波长 *λ* 光束的光子流密度。光伏电池的输出率  $\eta_0$  与光伏电池的光电转换效率  $\eta$  和光伏电池的工作点有关<sup>[5]</sup>。在实验中,通过测量 *V-I* 特性(图4所示),得到光伏电池直接给能量存储器充电和通过混合能量存储结构“窗口”

控制给能量存储器充电的结果,证明混合能量存储方法对提高能量存储的效率。在实验中,为了便于测量存储器存储的能量,混合能量存储方案中能量存储器利用70F超级电容器代替。在一个周期的“窗口”控制中,两种方案能量存储的结果如图7所示。

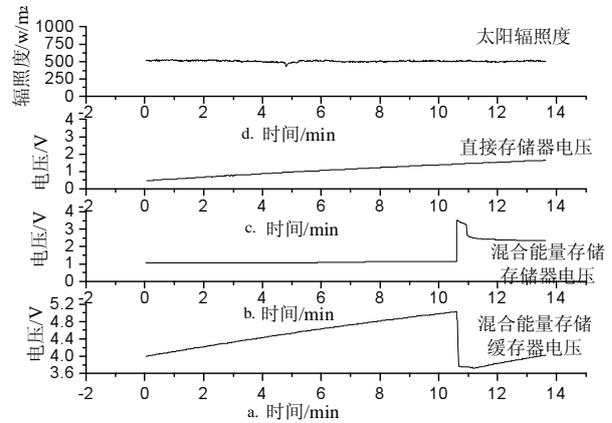


图7 不同存储方案能量存储器存储能量比较图  
Fig.7 Storage energy in different scheme of energy storage

在图7中 (a) 为混合能量存储中能缓存器电压变化图 (b) 为混合能量存储中能量存储器的电压变化图 (c) 为直接能量存储器(70F超级电容器)的电压变化图 (d) 为太阳辐照度的变化图。从图7(b)中可以看出,混合能量存储中能量存储器电压由1.05V上升到2.33V。存储能量 *W<sub>s1</sub>* 为:

$$W_{s1} = \frac{1}{2} \times 70 \times (2.33^2 - 1.05^2) = 155.1(\text{J})$$

而图7 (c) 直接能量存储中能量存储器电压0.45V上升到1.64V。存储能量 *W<sub>s2</sub>* 为:

$$W_{s2} = \frac{1}{2} \times 70 \times (1.64^2 - 0.46^2) = 87.13(\text{J})$$

由此,可以看出,利用混合能量存储光伏电池的输出能量提高近一倍。

3.2 能量存储器输出峰值电流

在超级电容和能量存储器并联为传感器节点供电时,超级电容支路和能量存储器(聚合物锂离子电池)支路电流如图8所示。

从图中,可以看出,超级电容器支路承担了传感器节点的主要峰值电流,有效减小微能源对能量器高功率密度的要求。

4 结论

总之,利用超级电容和能量存储器(聚合物锂离子电池)构成的混合能量存储结构,通过控制能光伏电池工作在最大输出功率区,能有效提高小功率光伏

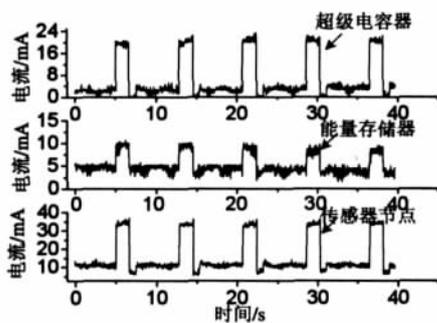


图8 并联供电电流分配图  
Fig.8 Current distribution in parallel supply

电池的输 出效率。同时通过并联为传感器节点供电有效减小对能量存储器输出功率密度的要求,减小内部损耗和延长供电时间。

### 参 考 文 献

[1] Kansal, A. Hsu, J., Srivastava, M. Raqhunathan, V. Harvesting aware power management for sensor networks [J]. Design Automation Conference, 2006.  
[2] Vijay Raghunathan, Kansal, A., Friedman, J. Design considerations for

solar energy harvesting wireless embedded systems [J]. Information Processing in Sensor Networks, Fourth International Symposium, 2005.  
[3] X. Jiang, J. Polastre, and D. E. Culler. Perpetual environmentally powered sensor networks [J] in Proceedings of the Fourth International Symposium on Information Processing in Sensor Networks, IPSN 2005.  
[4] Hongyun Yu, Yanqiu Li, Yonghong Shang, Bo Su. Design and investigation of photovoltaic and thermoelectric hybrid power source for wireless sensor networks [J], Nano/Micro Engineered and Molecular Systems, 3rd IEEE International Conference 2008.  
[5] 赵争鸣, 刘建政. 太阳能光伏发电及其应用 [M]. 北京, 科学出版社, 2005.  
[6] Brunelli Davide, Benini Luca, Moser Clemens. An Efficient Solar Energy Harvester for Wireless Sensor Nodes [J]. Design, Automation and Test in Europe, 2008.  
[7] Simjee, F.I., Chou, P.H. Efficient Charging of Supercapacitors for Extended Lifetime of Wireless Sensor Nodes [J]. Power Electronics, IEEE Transactions on. Volume 23, Issue 3, 2008.  
作者简介:  
何永泰(1970-), 男, 副教授, 博士在读, 主要从事光电技术、微纳技术及微能源等方向研究。Email: hyt\_127@yahoo.com.cn  
黄文卿, 男, 副教授, 硕士, 主要从事程序设计、电路分析等方向研究。  
收稿日期 2008-11-18  
(杨长江 编发)

(上接第 8 页)

[7] 王志群, 朱守真, 周双喜. 基于 Pisarenko 谐波分解的间谐波估算方法 [J]. 电网技术, 2004, 28(15): 72-77.  
WANG Zhi-qun, ZHU Shou-zhen, ZHOU Shuang-xi. Inter-harmonics Estimation by Pisarenko Harmonic Decomposition Method [J]. Power System Technology, 2004, 28(15): 72-77.  
[8] Tadeusz Lobos, Zbigniew Leonowicz. High-Resolution Spectrum Estimation Methods for Signal Analysis in Power Systems [J]. IEEE Transactions on. Instrum. Meas. 2006, 55(1): 219-225.  
[9] Zbigniew Leonowicz, Tadeusz Lobos and Jacek Rezmer. Advanced Spectrum Estimation Methods for Signal Analysis in Power Electronics [J]. IEEE Transactions on. industrial electronics, 2003, 50(3): 514-518.  
[10] 田伟, 王洪希, 白晶. 基于互高阶谱 MUSIC 法的间谐波检测 [J]. 继电器, 2007, 35(22): 49-52.  
TIAN Wei, WANG Hong-xi, BAI Jing. Inter-harmonics parameter estimation on crosshigh-spectrum based on MUSIC method [J]. Relay, 2007, 35(22): 49-52.  
[11] 丁屹峰, 程浩忠. 基于 Prony 算法的谐波和间谐波频谱估计 [J]. 电工技术学报, 2005, 20(10): 94-97.  
Ding Yifeng, Cheng Haozhong etc. Spectrum Estimation of Harmonics and Interharmonics Based on Prony Algorithm [J]. Transactions of china electrotechnical society, 2005, 20(10): 94-97.  
[12] 沈睿佼, 杨洪耕, 吴昊. 基于奇异值总体最小二乘法的间谐波估计算法 [J]. 电网技术, 2006, 30(23): 45-49.  
SHEN Rui-jiao, YANG Hong-geng, WU Hao. An Algorithm of Interharmonic Estimation Based on Singular Value Decomposition Total

Least Square [J]. Power System Technology, 2006, 30(23): 45-49.  
[13] 薛蕙, 杨仁刚. 基于连续小波变换的非整数次谐波测量方法 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27(5): 49-53.  
XUE Hui, YANG Rengang. A novel method for non-integer harmonics measurement using continuous wavelet transform [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(5): 49-53.  
[14] 赵成勇, 何明锋. 基于复小波变换相位信息的谐波检测算法 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(1): 38-42.  
Zhao Chengyong, He Mingfeng. A novel method for harmonic measurement using phase information of complex wavelet transform [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(1): 38-42.  
[15] 李天云, 程思勇, 杨梅. 基于希尔伯特-黄变换的电力系统谐波分析 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(4): 109-113.  
LI Tian-yun, CHENG Si-yong, YANG Mei. Power System Harmonic Analysis Based on Hilbert-Huang Transform [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(4): 109-113.  
作者简介:  
熊杰锋(1976-), 南京信息工程大学电子与信息工程学院讲师, 现为河海大学电气院博士生, 研究方向为电能质量、谐波分析。Email: jifengxiong@163.com。  
王柏林(1948-), 河海大学电气院教授、博导、博士, 主要从事自适应控制、电能质量、谐波分析等方面的研究。  
孙艳(1974-), 硕士, 江苏省地方税务局计算机中心工程师。  
收稿日期 2009-01-12  
(杨长江 编发)