

# 一种平抑光伏系统输出波动的储能容量优化方法

李滨, 陈姝, 梁水莹

(广西电力系统最优化与节能技术重点实验室(广西大学), 广西 南宁 530004)

**摘要:** 为了平抑含光伏系统的输出功率波动, 提出了一种基于离散傅里叶变换 (Discrete Fourier Transform, DFT) 的储能容量优化方法。该方法针对光伏发电特性和储能充放电时间响应特性, 利用 DFT 对光电输出功率偏差进行频谱分析, 在不同的时间范围内, 采取不同的控制机制, 调用相应不同类型的控制容量以补偿功率偏差。基于频谱分析结果, 结合储能系统的经济性, 确定储能系统最优容量。计算结果表明, 所提方法能够以较小的储能容量将光伏发电预测均方根误差 RMSE 由 2.2994%~10.0832%降低至 0, 大幅减小了光伏系统对电网的冲击和系统备用容量需求, 提高了电网对光伏发电的接纳能力。  
**关键词:** 储能; 光伏; 频谱分析; 离散傅里叶变换; 平抑输出

## A capacity optimization of energy storage system for output smoothing of photovoltaic station

LI Bin, CHEN Shu, LIANG Shui-ying

(Guangxi Key Laboratory of Power System Optimization and Energy Technology (Guangxi University), Nanning 530004, China)

**Abstract:** A capacity optimization of energy storage system based on discrete Fourier transform is presented to inhibit the adverse effects of photovoltaic power generation fluctuations. The method takes into account the characteristics of photovoltaic power generation and charge-discharge response time properties of energy storage system. The spectrum analysis results of photovoltaic power generation fluctuations are obtained through DFT. In different time periods, to compensate the power deviation, different control mechanisms and control capacity are in use. Based on the spectrum analysis results and combined with the economics, a capacity optimization of energy storage system can be determined. Results indicate that the root mean square error (RMSE) of photovoltaic power prediction can be reduced from 2.2994%~10.0832% to 0 by a relatively small capacity of energy storage system determined by the presented method. The method could sharply relieve the impact of photovoltaic power generation on the grid, reduce system reserve capacity requirements, and enlarge the space to accommodate photovoltaic power.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51107011) and the Scientific Research Foundation of Guangxi University (No. XBZ120037).

**Key words:** energy storage; photovoltaic; spectrum analysis; discrete Fourier transform; output smoothing

中图分类号: TM615 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)22-0045-06

## 0 引言

2013年2月27日, 国家电网公司发布《关于做好分布式电源并网服务工作的意见》, 承诺将促进光伏、风电、天然气等分布式电源并入国家电网, 提供优惠并网条件、加强配套电网建设, 优化并网流程、简化并网手续、提高服务效率等。这将进一步促进我国光伏发电系统快速发展, 对于节能减排目标起到了积极的推动作用。然而, 受光照强度、

天气情况等外界条件的影响, 光伏发电表现出来的随机性和间歇性将制约电力系统的安全稳定运行。

储能系统凭借其可充可放的运行特性, 可以有效平抑光伏发电输出功率波动, 减少其对系统的冲击。选择合理的储能容量补偿功率缺额, 可以使光伏电池尽可能按照计划曲线输出, 从而增强光伏系统的可控性。目前, 储能系统优化可再生能源发电输出的技术已经取得了一些研究成果, 其主要集中在储能装置和储能容量两方面<sup>[1-8]</sup>。文献[1-6]均提出了构建混合储能装置平抑光伏发电系统的有功功率波动。文献[7]通过优化储能容量改善输出功率波动, 所提方法简便易行, 但没有考虑储能系统与可

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51107011); 广西大学科研基金资助项目(XBZ120037)

再生能源配合的问题。文献[8]利用离散傅里叶变换对风电输出功率进行频谱分析确定储能补偿范围，在此基础上提出了储能功率及容量确定方法，为储能容量的选取提供了新的思路，但该方法未从提高可再生能源利用率的角度分析问题，更没有考虑在不同的时间范围内，储能系统应采取不同的控制机制，并调用相应不同类型的控制容量以补偿功率缺额。

综合以上问题，本文提出了一种基于离散傅里叶变换 (Discrete Fourier Transform, DFT) 的储能容量优化方法。该方法在不同的时间范围内，调用相应不同类型的控制容量以补偿系统发生的功率偏差。利用 DFT 对光电输出功率偏差进行频谱分析，确定各类型控制容量需求，并结合储能系统的经济性，选择储能最优容量。

### 1 光伏发电特性

光伏系统的输出功率受环境因素的影响较大，在常温不同光照情况下，光伏电池的伏瓦（电压-功率）特性<sup>[9]</sup>显示：光照增强，输出功率将增大；光照减弱，输出功率将减小，如图 1 所示。

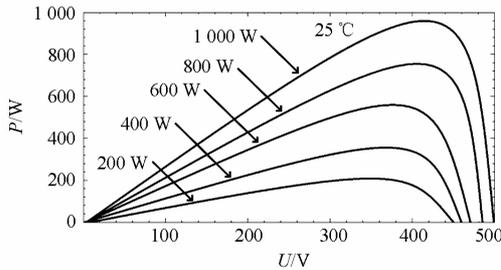


图 1 光伏电池伏瓦特性（常温不同光照情况）

Fig. 1 Volt-watt characteristics of PV cell (normal temperature and various lighting conditions)

由于光伏电池的输出功率受光照强度等外界条件的影响，而且在实际情况中，可能出现太阳光局部被遮挡等情况，即光斑效应，这将使光伏电池无法均衡吸收太阳能，导致光伏系统输出波动增大且极不稳定。选择合理的储能容量有效平抑光伏系统输出功率波动，可以提高光电转换效率，使光伏并网系统尽可能按照所要求功率输出发电。

### 2 平衡机制

同步电网中发生的任何不平衡都将引起系统频率偏移。通常，导致系统不平衡有以下三个原因：

- 1) 负荷实际值与预测值的偏差；
- 2) 发电损失或电网故障；

3) 发电实际值与预测值的偏差。

随着光伏并网容量的增大，第三类原因造成的系统不平衡现象将增加，应采取不同的控制机制以维持供需平衡。

国际上为了应对电力系统发生的不同功率扰动，提出了不同的平衡机制，如欧洲电力传输协调联盟 (Union for the Coordination of Transmission of Electricity, UCTE) 明确规定了一次控制、二次控制和三次控制的概念。一次控制利用发电机组的调速器阻止频率偏移，在频率扰动发生后 30 s 内实现相应控制容量的调用。一次控制稳定频率后，启动二次控制将频率调整为额定值，利用调频器将区域控制偏差 (Area Control Error, ACE) 降低为零，二次控制能够在扰动发生后 900 s (15 min) 内完成有效控制。三次控制则属于电力系统经济调度范畴。

综上所述，两种控制机制调用相应两种类型的控制容量，如表 1 所示。

表 1 UCTE 备用容量分类  
Table 1 Reserve classification of UCTE

序号	控制机制	备用名称	启动时间
1	一次控制	主备用	(0, 30 s)
2	二次控制	后备备用	(30 s, 15 min)

为了更精准地实现平衡控制，本文将控制机制进一步细分，并扩展至冷备用，如表 2 所示。

表 2 备用容量分类  
Table 2 Classification of reserve capacity

序号	备用名称	启动时间
1	30 s 响应备用	(0, 30 s)
2	瞬时响应备用 AGC	(30 s, 3 min)
3	10 min 旋转备用	(3 min, 10 min)
4	30 min 运行备用	(10 min, 30 min)
5	60 min 运行备用	(30 min, 60 min)
6	冷备用	(60 min, ∞)

各类型的备用容量具有特定功率值 (specific power)、上升时间 (rise time)、出力限制 (energy limited generation)、最高能量 (maximum energy) 和恢复时间 (recovery time) 等不同特点，在频域内描述备用容量，能够同时确定备用容量的需求量和供给量。对比现有备用需求的分析方法，频域内的控制容量特性描述考虑了备用容量分类以使供需相协调。

### 3 离散傅里叶方法

假设光伏输出功率是关于时间的函数  $y(t)$ ，利

用傅里叶变换将时间信号转换成频域信号。由于实际情况下,  $y(t)$  通常由离散的时间测量数据组成, 因此利用离散傅里叶变换 (Discrete Fourier Transform, DFT) 进行转换。假设连续时间信号  $y(t)$  在时间段  $NT_s$  内取每  $T_s$  秒, 样本个数  $N$ , 样本编号  $k=0,1,2,\dots,N-1$ ,  $y_k=y(kT_s)$ , DFT 定义为

$$Y(n) = \sum_{k=0}^{N-1} y_k \cdot e^{-\frac{2\pi jnk}{N}} \quad (1)$$

上式中共有  $N$  个傅里叶分量,  $n=0,1,2,\dots,N-1$ ,  $n$  和频域信号的频率  $f$  具有如式 (2) 关系。

$$f = \frac{nf_s}{N} = \frac{n}{NT_s} \quad (2)$$

式中:  $T_s$  为相邻采样点间的时间间隔, 即采样周期 (s);  $f_s=1/T_s$  为样本数据的采样频率 (Hz)。

帕塞瓦尔定理 (Parseval's theorem) 规定, 信号能量等于傅里叶分量的能量密度之和<sup>[10]</sup>。因此, 频带  $[f_1, f_2]$  内的信号能量分量可由式 (3) 得到。

$$E(f_1, f_2) = \sum_{f_1}^{f_2} |Y(f)|^2 \quad (3)$$

根据指定的频率范围  $f_1$  和  $f_2$  定义控制容量类型, 每一类控制容量的能量分量等于  $E(f_1, f_2)$ 。

$$P(f_1, f_2) = \sqrt{\sum_{f_1}^{f_2} |Y(f)|^2} \quad (4)$$

$P(f_1, f_2)$  即为定义在频率范围  $[f_1, f_2]$  内的控制容量类型的功率值。

基于离散傅里叶变换的频谱分析方法需要注意以下几个关键点:

(1) 采样定理表明, 当采样频率  $f_s$  大于信号中最高频率  $f_{\max}$  的 2 倍时, 可以避免频谱混叠, 采样之后的数字信号将完整地保留原始信号中的信息。由采样定理和离散傅里叶变换数据的对称性可知, 频谱图形以 Nyquist 频率  $f_s/2$ , 即  $k=N/2$  所对应的频率为对称轴, 两侧对称的复序列互为共轭, 模相等, 故只需要考虑 0 至 Nyquist 频率范围的幅频特性<sup>[8]</sup>。

(2) 采样点数  $N$  和采样频率  $f_s$  需相匹配, 选取时域信号相邻 2 个采样点之间的时间间隔作为采样周期  $T_s$ , 其倒数即为采样频率  $f_s$ 。采样总时段  $T$  与采样点数和采样周期/采样频率之间的关系为:  $T=NT_s=N/f_s$ 。

(3) DFT 将时域中的一个序列  $y(k)$  变换成频域中的另一个序列  $Y(n)$ ,  $k$  和  $n$  都是整数, 分别对应于时间轴和频率轴, 表示序列  $y(k)$  和  $Y(n)$  中采样值的序号, 但其没有说明  $y(k)$  和  $Y(n)$  中采样值的实

际时间和实际频率。确定实际时间轴和实际频率轴的关键在于得到采样周期  $T_s$  或采样频率  $f_s$ 。离散时间轴上任意点  $k$  所对应的实际时间为  $t=kT_s$ , 频谱图形中离散频率轴上任意点  $n$  所对应的实际频率为  $f=(f_s/N)n$ 。

(4) 由于采样定理和离散傅里叶变换数据的对称性, 只考虑 0 至 Nyquist 频率范围的幅频特性。 $Y(n)$  的模  $|Y(n)|$  表示第  $n$  个频谱分量的幅值, 并非原信号的实际幅值  $|Y(n)|_{\text{real}}$ , 利用式 (5) 和式 (6) 可得到频谱分量的实际幅值<sup>[8]</sup>。

当  $N$  为奇数时

$$|Y(n)|_{\text{real}} = \begin{cases} \frac{|Y(n)|}{N}, & n=0 \\ 2\frac{|Y(n)|}{N}, & n=1, \dots, \left\lfloor \frac{N}{2} \right\rfloor \end{cases} \quad (5)$$

当  $N$  为偶数时

$$|Y(n)|_{\text{real}} = \begin{cases} \frac{|Y(n)|}{N}, & n=0, \frac{N}{2} \\ 2\frac{|Y(n)|}{N}, & n=1, \dots, \frac{N}{2}-1 \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $\left\lfloor \frac{N}{2} \right\rfloor$  表示取  $\frac{N}{2}$  的整数部分。

## 4 算例分析

本文以国内某新能源实验室的某个额定装机容量为 3 MW 的三相屋顶光伏并网系统为例, 在晴天、多云和雨天三类天气状况下, 取其典型出力, 分别对其进行储能容量配置。图 2 为该系统的实测功率输出。

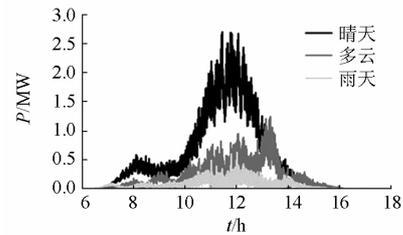


图 2 光伏并网系统实测功率输出曲线  
Fig. 2 PV system output curve

光伏发电输出功率受到多种因素影响, 很难进行准确预测, 目前, 电力调度部门均是根据经验或者历史数据对其进行预测估算。本文根据气象参数和光伏发电功率历史数据进行功率预测, 将光伏输出功率数据划分为 11 个时段, 利用式 (7) 计算出

每一个时段  $T$  时间内光伏输出功率的平均值, 将计算得到的 11 个平均值设定为光伏预测输出功率值。

$$P_p = \frac{\int_0^T P_m dt}{T} \quad (7)$$

式中,  $P_m$  为光伏输出功率实测数据。

图 3 为该系一天天的预测功率输出。

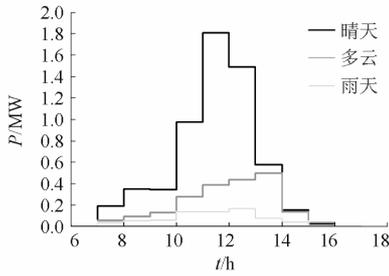


图 3 光伏并网系统预测功率输出曲线  
Fig. 3 PV system predicted output curve

由实测和预测功率输出之间的偏差得到控制功率需求曲线, 如图 4 所示。

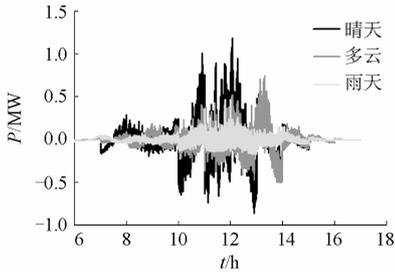


图 4 控制功率需求曲线  
Fig. 4 Control power requirements curve

利用 DFT 将图 4 所示的时间信号转换成频域信号, 如图 5 所示, 频率为 0 Hz 时达到峰值表示实测与预测功率之间存在持续恒定的偏差。

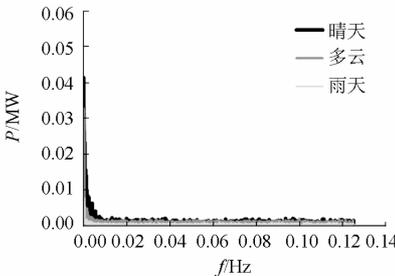


图 5 控制功率需求频谱  
Fig. 5 Spectrum of control power requirements

现有控制机制的上升时间分别为 30 s、180 s、600 s、1 800 s 和 3 600 s, 考虑到在正弦信号中, 上升时间为总时段的四分之一<sup>[11]</sup>, 分类界限为频率  $f_1 \sim f_5$ , 分别对应于 120 s、720 s、2 400 s、7 200 s 和

14 400 s。利用以上描述, 定义六类不同的控制容量:

- 1) 类型 1, 30 s 响应备用 (<30 s): 频率 1/120 Hz~无穷大;
- 2) 类型 2, 瞬时响应备用 AGC (>30 s, <3 min): 频率 1/720~1/120 Hz;
- 3) 类型 3, 10 min 旋转备用 (>3 min, <10 min): 1/2400~1/720 Hz;
- 4) 类型 4, 30 min 运行备用 (>10 min, <30 min): 频率 1/7200~1/2400 Hz;
- 5) 类型 5, 60 min 运行备用 (>30 min, <60 min): 频率 1/14400~1/7200 Hz;
- 6) 类型 6, 冷备用 (>60 min): 频率 0~1/14400 Hz。

控制容量类型根据式 (4) 中的  $f_1 \sim f_5$  边界值来确定。图 6~图 8 分别显示了在晴天、多云和雨天三类天气状况下, 光伏并网系统对各类型控制容量的需求情况。

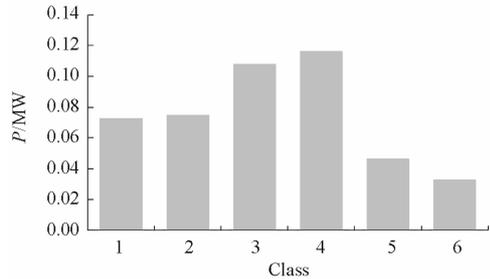


图 6 晴天时光伏系统控制容量需求  
Fig. 6 Control capacity requirements for PV system in sunny day

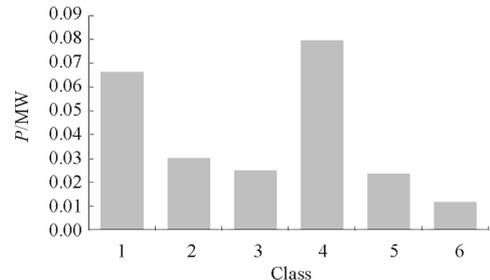


图 7 多云时光伏系统控制容量需求  
Fig. 7 Control capacity requirements for PV system in cloudy day

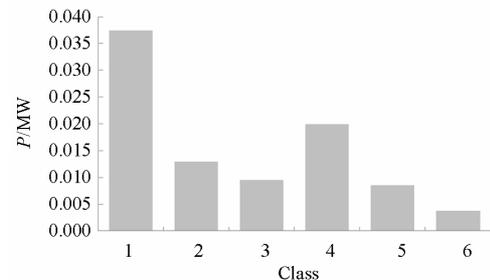


图 8 雨天时光伏系统控制容量需求  
Fig. 8 Control capacity requirements for PV system in rainy day

由图 6~图 8 可以看出, 在三类天气状况下, 光伏并网系统均需要较多的快速备用。晴天时, 光伏并网系统主要需要能够在 30 min 内实现响应以补偿功率缺额的控制容量(类型 3 和类型 4); 多云时, 系统对于类型 1 的控制容量需求增多, 此时除了需要相对较慢的控制容量, 也需要在 30 s 内即可作出反应的控制容量; 雨天时, 类型 1 的需求比例进一步增大。这是由于三类天气各自特性对光伏发电具有不同的影响, 因而产生不同的备用需求结果。

利用储能系统平抑光伏并网系统输出波动, 相当于机组提供可立即响应的备用出力, 储能系统设计容量为图 6~图 8 中前四类控制容量之和, 如表 3 所示, 晴天 0.374 4 MW, 多云 0.202 1 MW, 雨天 0.080 0 MW。储能系统额定容量分别为 0.38 MWh, 0.21 MWh 和 0.08 MWh。荷电状态的比率为 0~1。

表 3 光伏系统储能容量需求

Table 3 Energy storage capacity requirements for PV system

			MW
天气情况	备用类型	控制容量	储能容量
晴天	1	0.073 0	0.374 4
	2	0.075 4	
	3	0.108 9	
	4	0.117 1	
多云	1	0.066 7	0.202 1
	2	0.030 4	
	3	0.025 2	
	4	0.079 8	
雨天	1	0.037 5	0.080 0
	2	0.013 0	
	3	0.009 5	
	4	0.0200	

三类天气状况下的储能系统需求变化曲线如图 9 所示, 所设计储能系统可充电容量的上限为 0.38 MWh, 下限为 0 MWh。为了满足其充放电的可能性, 将充电限额区间的中间值作为充放电起始点。11 个时段中, 曲线呈上坡趋势时, 储能系统进行充电, 吸收光伏系统多出预测值的功率; 呈下坡趋势时, 储能系统进行放电, 平抑光伏系统的缺额。由图 9 可以看出, 三类天气情况下, 晴天时储能需求变化波动最大, 在 10 时 30 分左右, 其储能容量需求降至波谷, 约为 0.044 6 MWh, 12 时 35 分左右则达到波峰, 约为 0.341 6 MWh。虽然晴天储能需求波动起伏较大, 多云和雨天相对较为平缓, 但三类天气情况下的需求均在所设计储能容量范围以内, 且接近所设计储能容量, 故 0.38 MWh 的储能容量选择较为合理。

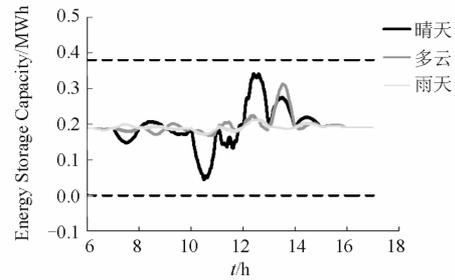


图 9 储能系统需求变化情况

Fig. 9 Energy storage system requirements

## 5 结语

本文根据光伏发电特性, 考虑到对于不同类型的功率扰动, 系统应采取不同的平衡机制, 并调用相应不同类型的控制容量, 提出了一种基于离散傅里叶变换算法的光伏系统储能容量优化配置方法。本文将所提方法应用于某个三相屋顶光伏并网系统, 仿真结果表明, 对光伏系统配置容量约为其装机容量 13% 的储能系统后, 晴天、多云和雨天三类天气状况下的光伏发电预测均方根误差 RMSE 大幅降低, 该方法能够有效平抑光伏系统输出功率波动, 较好地满足备用容量需求, 最终实现光伏并网系统按照所要求的功率输出发电。

## 参考文献

- [1] DURYEA S, ISLAM S, LAWRENCE W. A battery management system for stand-alone photovoltaic energy systems[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2001, 7(3): 37-41.
- [2] CHIANG S J, CHANG K T, YEN C Y. Residential photovoltaic energy storage system[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 1998, 45(3): 385-394.
- [3] 周林, 黄勇, 郭珂, 等. 微电网储能技术研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(7): 147-152.  
ZHOU Lin, HUANG Yong, GUO Ke, et al. A survey of energy storage technology for micro grid[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(7): 147-152.
- [4] 杨珺, 张建成, 周阳, 等. 针对独立风光发电中混合储能容量优化配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(4): 38-44.  
YANG Jun, ZHANG Jian-cheng, ZHOU Yang, et al. Research on capacity optimization of hybrid energy storage system in stand-alone wind/PV power generation system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(4): 38-44.
- [5] 鲍雪娜, 张建成, 徐明, 等. 基于混合储能的并网光伏电站有功分级控制策略[J]. 电力系统自动化, 2013,

- 37(1): 115-121.  
BAO Xue-na, ZHANG Jian-cheng, XU Ming, et al. Active power hierarchical control strategy of interconnected photovoltaic station based on hybrid energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 115-121.
- [6] 刘世林, 文劲宇, 孙海顺, 等. 风电并网中的储能技术研究进展[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(23): 145-153.  
LIU Shi-lin, WEN Jin-yu, SUN Hai-shun, et al. Progress on applications of energy storage technology in wind power integrated to the grid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(23): 145-153.
- [7] 韩涛, 卢继平, 乔梁, 等. 大型并网风电场储能容量优化方案[J]. 电网技术, 2010, 34(1): 169-173.  
HAN Tao, LU Ji-ping, QIAO Liang, et al. Optimized scheme of energy storage capacity for grid-connected large-scale wind farm[J]. Power System Technology, 2010, 34(1): 169-173.
- [8] 王成山, 于波, 肖峻, 等. 平滑可再生能源发电系统输出波动的储能系统容量优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(16): 1-8.  
WANG Cheng-shan, YU Bo, XIAO Jun, et al. Sizing of energy storage systems for output smoothing of renewable energy systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(16): 1-8.
- [9] 欧阳名三, 余世杰, 沈玉樑. 一种太阳能电池 MPPT 控制器实现及测试方法的研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2004, 18(2): 30-34.  
OUYANG Ming-san, YU Shi-jie, SHEN Yu-liang. Implementation of MPPT controller in photovoltaic array and research of testing method[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2004, 18(2): 30-34.
- [10] CARTWRIGHT M. Fourier methods for mathematicians, scientists and engineers[M]. Chichester: Ellis Horwood Limited, 1990: 77-220.
- [11] FRUNT J, KLING W L, MYRZIK J M A. Classification of reserve capacity in future power systems[C] // Proceedings of the 6th International Conference on the European Energy Market, Leuven, Belgium: IEEE 2009: 1-6.
- 
- 收稿日期: 2014-01-31; 修回日期: 2014-05-26  
作者简介:  
李 滨 (1975-), 女, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统最优化;  
陈 姝 (1988-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统最优化; E-mail: chenshu0811@126.com  
梁水莹 (1988-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统最优化。