

# 独立光伏系统中超级电容器蓄电池有源混合储能方案的研究

唐西胜<sup>1,2</sup>, 齐智平<sup>1</sup>

(1. 中国科学院电工研究所, 北京 100080; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 超级电容器与蓄电池混合使用, 可以充分发挥蓄电池能量密度大和超级电容器功率密度大、循环寿命长的优点, 大大提升储能系统的性能。针对独立光伏系统的特点, 设计了一种有源式混合储能方案, 建立了系统的模型和控制环节。实验结果表明, 在光伏发电功率和负载功率脉动时, 蓄电池能够工作在优化的充放电状态, 并能够有效地减少充放电小循环次数。对解决光伏等可再生能源系统中的储能问题, 具有现实可行性。

**关键词:** 独立光伏系统; 蓄电池; 超级电容器; 混合储能

中图分类号: TK51

文献标识码: A

文章编号: 1003-3076(2006)03-0037-05

## 1 引言

独立光伏系统, 尤其是中小功率系统, 一般以蓄电池作为储能装置。但蓄电池存在一些难以克服的缺点, 如循环寿命短、功率密度低、维护量大等。目前, 蓄电池约占系统造价的 20% ~ 25%, 由于光伏系统工作条件的特殊性, 导致蓄电池过早的失效或容量损失, 进一步加大了光伏系统的成本。

作为储能器件在能量密度和功率密度上的有效结合, 超级电容器具有诸多优点, 如功率密度高、循环寿命长、充放电效率高和无需维护等, 正受到越来越多的关注。文[1~5]介绍了超级电容器在电动汽车、分布式能源系统、UPS 电源、电能质量控制以及移动电子设备等领域的应用或研究。超级电容器的能量密度相对于蓄电池较低, 目前还很难实现大容量的电力储能, 如果将二者混合使用, 使蓄电池能量密度大和超级电容器功率密度大、循环寿命长的特点相结合, 无疑会大大提升储能系统的性能。文[6~10]针对脉动负载, 就超级电容器对混合储能系统在峰值功率增强、运行时间延长、内部损耗降低等方面进行了研究。

在光伏等可再生能源领域, 超级电容器蓄电池混合储能具有较大的应用价值和发展潜力, 可以解决蓄电池单独储能时功率密度低、使用寿命短等问

题, 提高储能系统的技术性能和经济性能。目前, 相关的研究或应用还很少。本文设计了一种用于独立光伏系统的有源式并联储能方案, 建立了系统的模型, 提出了相应的控制方法和策略; 通过模型和实验, 分析了混合储能系统在光伏发电功率波动, 以及负载功率脉动时, 系统对蓄电池的保护作用。

## 2 系统结构

光伏发电受气候和环境的影响很大, 发电功率具有不稳定性和不可预测性的特征。为了提高发电利用率, 光伏常常工作于最大功率跟踪(MPPT)方式, 这种发电功率的不稳定性就更加明显了, 主要表现为输出电流的波动。充电电流过大, 蓄电池会发生极化现象, 会使极板活性物质脱落, 还会使温升和出气加重, 导致容量损失或失效。同样, 大电流放电会使蓄电池极板弯曲变形, 过大的电压跌落还会导致蓄电池的不正常关断。此外, 由于光伏发电功率的间断或不足, 蓄电池经常处于充放电小循环或小电流充放电状态中, 加快了老化进程, 缩短了循环使用寿命。

在光伏与蓄电池之间配置一定容量的超级电容器, 并通过并联控制器控制超级电容器向蓄电池的能量流动过程。这样, 可以充分发挥超级电容器功率密度大的优点, 优化蓄电池的充放电电流; 还可以

收稿日期: 2005-11-17

基金项目: 国家高科技研究发展计划(863 计划)资助项目(2002AA516020)

作者简介: 唐西胜(1975-), 男, 江苏籍, 博士研究生, 研究方向为电力系统及其自动化;

齐智平(1958-), 女, 北京籍, 研究员/博导, 研究方向为电力系统及其自动化。

利用超级电容器的储能能力,避免蓄电池的充放电小循环的发生,或减少发生的次数。

采用超级电容器蓄电池混合储能的独立光伏系统,如图 1 所示。主要由光伏阵列、充电控制器、并联控制器、超级电容器、蓄电池和负载等组成。

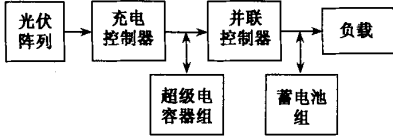


图 1 混合储能独立光伏系统结构示意图

Fig.1 Scheme of stand-alone PV system with hybrid energy storage

其中,充电控制器对光伏阵列的输出能量进行控制,根据系统的实际状态,以一定的方式向后级供电,包括 MPPT 方式、限流方式和恒压方式。系统中配置一定容量的超级电容器,除了作为能量储备装置外,还对光伏的输出能量进行滤波,优化蓄电池的工作环境(包括充电电流和放电电流)。蓄电池直接接负载,作为系统主要的能量储备装置。并联控制器是超级电容器向蓄电池传递能量的控制环节,对其控制的目的,就是使蓄电池处于较理想的工作状态,并使充放电循环次数最少。

由于并联控制器的不同,系统具有不同的实现方案。一般地,并联控制器可以分为无源式控制器和有源式控制器。在无源式储能结构中,超级电容器通过二极管向蓄电池或负载供电,结构简单,但不具有可控性。在有源式储能结构中,超级电容器通过 DC/DC 变换器实现对蓄电池或负载的能量传输。本文将针对有源式储能结构,进行分析、设计和验证。

### 3 模型分析

根据文[11],可以将超级电容器和蓄电池等效为电容与其等效内阻的串联结构。由于主要研究系统的动态响应特性,它们的并联等效内阻可忽略不计。并联控制器采用非隔离降压型(BUCK)结构。系统的等效模型如图 2 所示,电路参数见表 1。其中,R 为负载的等效阻抗。

设定 BUCK 工作于电感电流连续状态,以电感电流  $I_L$  和蓄电池电压  $U_b$  作为状态变量,开关管占空比为 D,应用状态平均法,可得系统的状态平均方程:

$$\begin{cases} \frac{dI_L}{dt} = -\left(\frac{D}{L}R_c + \frac{RR_b}{L(R+R_b)}\right)I_L - \frac{RU_b}{L(R+R_b)} + \frac{D}{L}U_c \\ \frac{dU_b}{dt} = \frac{R}{C_b(R+R_b)}I_L - \frac{U_b}{C_b(R+R_b)} \end{cases} \quad (1)$$

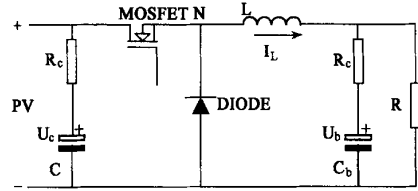


图 2 系统等效模型

Fig.2 Simplified system model

表 1 电路参数

Tab.1 Circuit parameters

参数	值	单位
功率变换器电感 $L$	0.15	mH
超级电容器容值 $C$	1000	F
超级电容器电阻 $R_c$	0.01	$\Omega$
超级电容器电压 $U_c$	30	V
蓄电池电阻 $R_b$	0.2	$\Omega$
蓄电池容量 $C_b$	15000	F
蓄电池电压 $U_b$	15	V

对基本状态施加扰动,令瞬时值  $d = D + \hat{d}$ ,  $i_L = I_L + \hat{i}_L$ ,  $u_c = U_c + \hat{u}_c$ ,  $u_b = U_b + \hat{u}_b$ , 得到暂态方程,变换至  $s$  域。可得系统的输出—控制传递函数:

$$\frac{\hat{I}_L(s)}{\hat{d}(s)} = \frac{[sC_b\alpha + 1](U_c - R_c I_L)}{s^2 LC_b\alpha + s(L + C_b\beta) + DR_c + R} \quad (2)$$

$$\frac{\hat{U}_b(s)}{\hat{d}(s)} = \frac{R(U_c - R_c I_L)}{s^2 LC_b\alpha + s(L + C_b\beta) + DR_c + R} \quad (3)$$

其中,  $\alpha = R + R_b$ ,  $\beta = DRR_c + DR_b R_c + RR_b$ 。

系统是两阶的,其极点为:

$$s = -\frac{L + C_b\beta}{2LC_b\alpha} \pm \sqrt{\left(\frac{L - C_b\beta}{2LC_b\alpha}\right)^2 - \frac{R^2}{LC_b\alpha^2}} \quad (4)$$

由式(4)可见,系统的两个极点始终位于坐标的左半平面,因此,开环系统是稳定的。设置系统参数如表 1 所示,图 3 为开环系统波特图,其相角裕度为  $90.45^\circ$ 。

### 4 控制环节设计

系统中,超级电容器位于充电控制器和并联控制器之间,因此,两个控制器具有较强的独立性。对系统的控制可以分别通过充电控制器和并联控制器实现。

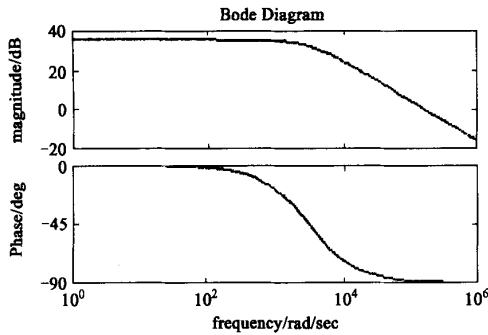


图 3 开环系统波特图

Fig.3 Bode diagram for open loop system

对充电控制器的控制过程主要由超级电容器组的端电压决定的,在一些情况下也会受到蓄电池组电压电流情况的制约。为了充分发挥光伏的发电利用率,充电控制器一般工作在 MPPT 方式;初始充电时,由于超级电容器经过长时间放置后端电压会较低,此时要对充电控制器的输出电流进行限制,以保护器件和电路的安全;当超级电容器充电到接近最高工作电压处时,要对充电控制器进行恒压输出控制,避免超级电容器过压损坏。

并联控制器对蓄电池的影响较大,要综合考虑多方面的因素,如系统的容量配置、气候条件、蓄电池型别以及负载等。在设计控制方案时,针对独立光伏系统的特点,重点考虑了由于日照量变化所导致的光伏发电功率波动,以及负载功率脉动对蓄电池的影响。

图 4 所示为系统的控制流程。检测蓄电池的端电压,当其高于设定的高压保护值时,并联控制器以涓流输出或恒压输出的方式工作。检测超级电容器组的端电压,当其低于设定的额定值而且蓄电池的电压也较低时,断开负载,超级电容器只给蓄电池充电;当蓄电池电压较高时,则减小超级电容器和并联控制器的输出电流。当蓄电池的端压高于设定的保护值且超级电容器的端压也较高时,充电控制器从 MPPT 方式中退出,转到限流输出方式。

正常状态下,充电控制器工作于 MPPT 方式,并联控制器工作于恒流输出方式。实时检测负载的电流值,并与优化的蓄电池充电电流值相加,其和作为并联控制器输出电流的参考值,与并联控制器的实际输出电流相比较,得到误差信号,经过 PI 调节器、限幅、比较等环节,得到驱动控制并联控制器的 PWM 信号,其控制模型如图 5 所示。其中  $I_b$  为并联

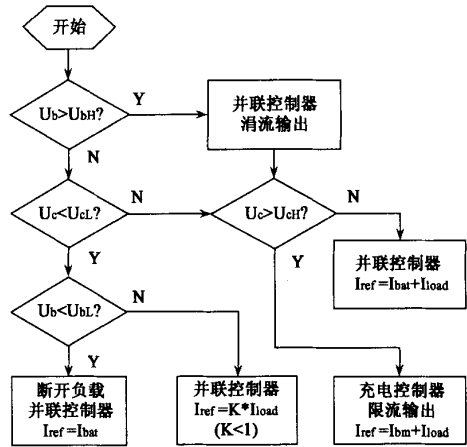


图 4 系统的控制流程图

Fig.4 Flow chart of control loop

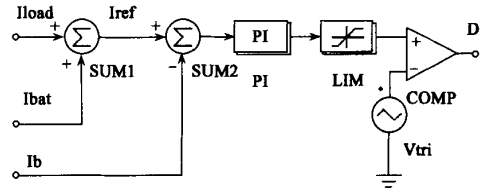


图 5 并联控制器的控制模型

Fig.5 Control model of parallel controller

控制器的输出电流。

采用这种控制策略,可以充分发挥超级电容器的储能能力和高功率密度的特性。当光伏发电功率很大时,超级电容器将会吸收大部分充电电流;当负载功率脉动时,超级电容器又会通过并联控制器输出脉动电流。蓄电池始终保持平稳的充电状态,几乎不会受光伏发电量和负载功率脉动的影响。

在上述控制模型中,只采用比例控制器就可以达到很好的控制效果。图 6 所示为比例系数  $K_p$  分别为 0.1、1 和 10 时闭环系统的波特图。可以看出,当比例系数  $K_p$  较小时,系统具有一定的稳态误差。随着  $K_p$  增大,闭环系统的稳态误差控制在很小的范围内,系统带宽也提高了。当  $K_p = 10$  时,系统稳态误差为 0,带宽提高到了约为  $10^6$  Hz。

合理设置并联控制器的启动电压和停止电压,可以有效地减少蓄电池的充放电小循环次数。设置停止电压  $U_{stop}$  小于启动电压  $U_{start}$ ,则当光伏发电中断或很低时,超级电容器放电直至端电压降到  $U_{stop}$  为止,延长了并联控制器的工作时间,使光伏对蓄电池的影响变小。式(5)给出了极限情况下系统的延

长工作时间。其中,  $W$  为超级电容器组的平均输出功率。

$$t = \frac{C(U_{start}^2 - U_{stop}^2)}{2 \cdot W} \quad (5)$$

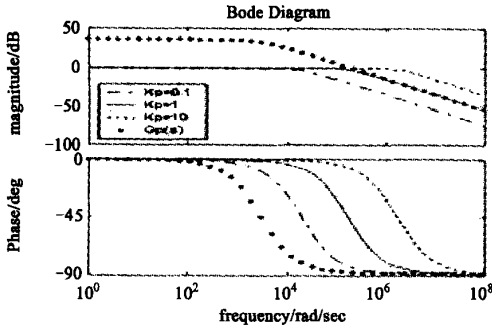


图 6 闭环系统波特图

Fig.6 System bode diagram for close loop system

### 5 实验及结果

本文构建了超级电容器蓄电池混合储能的独立光伏系统。采用单晶硅太阳能电池板, 3 块串联, 功率为 225W<sub>p</sub>。其它参数如表 1 所示。采用了 NI 公司的数据采集系统 DAQ6023E 和 LABVIEW 软件, 采集相关参数, 并用 MATLAB 描绘其波形。

图 7 所示为系统的工作过程。初始时, 由于超级电容器的端压较低, 没有达到并联控制器的启动电压, 此时光伏的输出电能只给超级电容器充电; 随着充电的继续, 超级电容器组端压不断上升, 当达到一定的设定值时, 并联控制器启动 (125s), 输出恒定的电流给蓄电池充电; 当有负载投入时 (525s), 并联控制器实时检测负载的电流, 在一定的电流限定值下, 加大输出电流的参考量, 使系统在满足负载用电要求的前提下, 蓄电池的充电电流不受影响; 当光伏停止发电时 (815s), 并联控制器继续工作, 向负载提供电能, 并给蓄电池充电; 当超级电容器的端压下降到设定的下限值时, 并联控制器停止工作 (2253s), 由蓄电池单独对负载供电。

设置并联控制器的启动电压  $U_{start}$  为 15.4V, 停止电压  $U_{stop}$  为 14.6V, 则在极端状态下, 蓄电池能够继续 10 小时率充电约 815s。本实验中, 当光伏停止发电后, 并联控制器能够继续工作约 24 分钟。

图 8 所示为日照量变化时系统的响应, 可以看出, 当光伏发电量出现较大幅度波动时, 超级电容器利用功率密度大的特点, 通过吸收电流或释放电流,

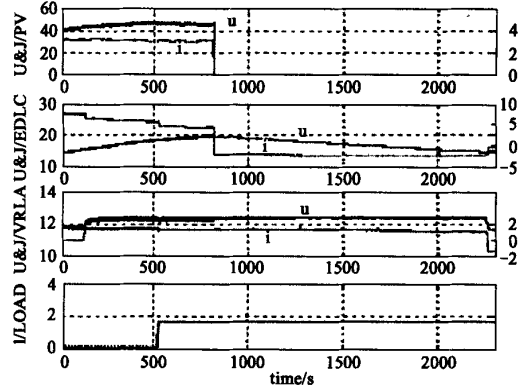


图 7 系统工作过程

Fig.7 Operating process of the system

使充电控制器的端电压保持平稳, 几乎不受光伏发电波动的影响。此时, 蓄电池的充电电流具有很好的平稳性。

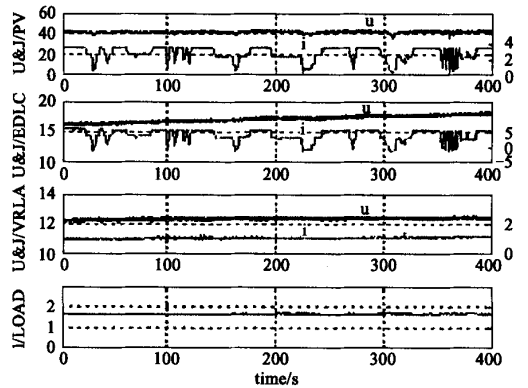


图 8 日照量变化时系统响应

Fig.8 System response with varying irradiation

图 9 所示为负载功率脉动时系统的响应。当负载功率突然增加时, 超级电容器通过并联控制器及 toward 负载提供脉动功率, 使蓄电池几乎不受影响。

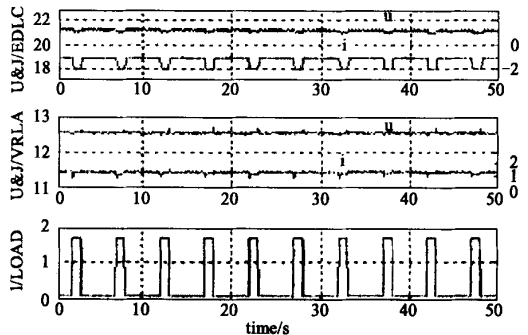


图 9 负载功率脉动时系统的响应

Fig.9 System response with varying load power

在脉动负载开始工作时,蓄电池的充电电流略有降低(在本实验中下降了约0.2A),原因是并联控制器的惯性作用,主要是由电感器引起的。

由实验可以看出,采用超级电容器蓄电池混合储能,提高了储能装置的功率输出能力,可以减少蓄电池单独储能时为提高功率能力而必须增加的容量;优化了蓄电池的工作过程,减少了充放电小循环,可以避免蓄电池的过早失效和容量损失。由于超级电容器和并联控制器的寿命很长,在原系统的结构基础上,通过增加少量投资,就可以实现系统性能的提高,具有较好的经济性。

## 6 结论

超级电容器与蓄电池混合储能,可以使储能系统的性能得到较大程度的改善,在光伏等可再生能源发电系统中具有较好的应用。本文针对独立光伏系统,设计了一种超级电容器蓄电池有源式混合储能并联控制器,提出了相应的控制策略。实验结果表明,并联控制器对蓄电池具有较好的保护作用,能够在光伏发电功率大幅波动和负载功率脉动时,使蓄电池始终处于优化的充放电状态。此外,由于超级电容器的储能能力和并联控制器的控制作用,可以减少蓄电池由于光伏发电功率间断或很低时所导致的充放电小循环,延长了使用寿命。这种混合储能系统结构简单,控制灵活,对解决光伏等可再生能源系统中的储能问题,具有现实意义。

### 参考文献 (References):

- [1] Barker P P. Ultracapacitors for use in power quality and distributed resource applications [A]. 2002 IEEE Power Eng. Society Summer Meeting [C]. Chicago, USA, 2002. 316-320.
- [2] Pay S, Baghzouz Y. Effectiveness of battery-supercapacitor combination in electric vehicles [A]. IEEE Bologna Power Tech. Conf. [C]. Bologna, Italy, 2003.6.
- [3] Monai T, Takano I, Nishikawa H, et al. A collaborative

operation method between new energy-type dispersed power supply and EDLC [J]. IEEE Trans. on Energy Conversion, 2004, 19(3): 590-598.

- [4] Casadei D, Grandi G, Rossi C. A supercapacitor-based power conditioning system for power quality improvement and uninterruptible power supply [A]. Proc. IEEE ISIE 2002 [C]. 2002. 1247-1252.
- [5] Akiyama K, Nozaki Y, Kudo M, et al. Ni-MH batteries and EDLCs hybrid stand-alone photovoltaic power system for digital access equipment [A]. INTELEC 2000 [C]. Phoenix, USA, 2000. 387-393.
- [6] Smith T A, Mars J P, Turner G A. Using supercapacitors to improve battery performance [A]. 2002 PESC [C]. Cairns, Australia, 2002. 124-128.
- [7] Dougal R A, Liu Shengyi, Ralph E White. Power and life extension of battery-ultracapacitor hybrids [J]. IEEE Trans. on Components and Packaging Technologies, 2002, 25(1): 120-131.
- [8] Gao L, Dougal R A, Liu S. Power enhancement of an actively controlled battery/ultracapacitor hybrid [J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2005, 20(1): 236-243.
- [9] Zheng J P, Jow T R, Ding M S. Hybrid power sources for pulsed current applications [J]. IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, 2001, 37(1): 288-292.
- [10] Brandhorst H W, Zheng Chen. Achieving a high pulse power system through engineering the battery-capacitor combination [A]. 16th Annual Battery Conf. on Applications and Advances [C]. CA, USA, 2001. 153-156.
- [11] Miller J R. Development of equivalent circuit models for batteries and electrochemical capacitors [A]. 14th Annual Battery Conf. on Applications and Advances [C]. CA, USA, 1999. 107-109.
- [12] 杨海柱,金新民 (Yang Haizhu, Jin Xinmin). 并网光伏系统最大功率点跟踪控制的一种改进措施及其仿真和实验研究 (Research on improved measure of MPPT control and its experiment in a grid-connected photovoltaic system) [J]. 电工电能新技术 (Adv. Tech. of Elec. Eng. & Energy), 2006, 25(1): 63-67.

## Study on an actively controlled battery/ultracapacitor hybrid in stand-alone PV system

TANG Xi-sheng<sup>1,2</sup>, QI Zhi-ping<sup>1</sup>

(1. Institute of Electrical Engineering Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China;

2. Graduate School of Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China)

**Abstract:** Sound performance can be attained through battery/ultracapacitor hybrid, which makes the best of the

(下转第 67 页, cont. on p.67)

- emission level) [D]. 成都: 四川大学 (Chengdu: Sichuan University), 2003.
- [9] Wilsun Xu. Direction method cannot be used for harmonic source detection [A]. IEEE Power Eng. Society Summer Meeting [C]. Seattle, USA, 2000. 873-876.
- [10] Wilsun Xu, Xian Liu. An investigation on the validity of power-direction method for harmonic source determination [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2003, 18(1): 214-219.
- [11] Chun Li, Wilsun Xu. A 'critical impedance'-based method for identifying harmonic sources [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2004, 19(2): 671-678.
- [12] T Pyzalski. Utilization of the voltage rate to localization of harmonic sources in a power system [A]. IEEE MELECON [C]. Dubrovnik, Croatia, 2004. 1091-1094.
- [13] 吴笃贵, 徐政 (Wu Dugui, Xu Zheng). 电力系统谐波状态估计技术的发展与展望 (Development of the harmonic state estimation for the power system) [J]. 电网技术 (Power System Tech.), 1998, 22(1): 75-77.
- [14] Maged Najjar. A hybrid nonlinear-least squares estimation of harmonic signal levels in power system [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1991, 6(1): 282-288.
- [15] Haili Ma, Adly Girgis. Identification and tracking of harmonic sources in a power system using a Kalman filter [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1996, 11(3): 1659-1665.
- [16] A P Sakis Meliopoulos, Fan Zhang. Power system harmonic state estimation [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1994, 9(3): 1701-1709.
- [17] 吴笃贵, 徐政 (Wu Dugui, Xu Zheng). 基于相量量测的电力系统谐波状态估计 (I) (PMU-based harmonic state estimation for power system) [J]. 电工技术学报 (Trans. Electrotechnical Society), 2004, 19(2): 64-68.
- [18] R K Hartana. Harmonic source monitoring and identification using neural networks [J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1990, 5(4): 1098-1104.
- [19] Wheimin Lin, Chienhsien Wu. Multiple harmonic source detection for power system with cascade correlation network [A]. IEEE International conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies [C]. HK, 2004. 746-751.

## A survey on location method for harmonic sources in power system

XU Zhi-xiang<sup>1,2</sup>, HOU Shi-ying<sup>1,2</sup>, LV Hou-yu<sup>1,2</sup>, ZHANG Ke<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. The Key Laboratory of High Voltage Engineering and Electrical New Technology, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** The study of the harmonic source location plays an important part in the supreme power system with complicated loads. The methods which are being used at present are analyzed and discussed. Some opinions on the developing study of the location of the harmonic source are brought forward.

**Key words:** power system; harmonic source location; equivalent model; harmonic state estimation

(上接第41页, cont. from p.41)

characteristics of high energy density of battery and high power density and long circle life of ultracapacitor. An actively controlled hybrid structure was put forward and utilized in a stand-alone PV system. The model and control loop of the system were set up. Experiment results exhibited that the current of the battery is quite smooth when PV power and load power varied quickly. The small charge and recharge cycles due to irradiation variation can be reduced effectively through proper ultracapacitor bank configuration. The hybrid energy storage in PV system can become economical for the reasons that the battery capacity can be reduced for the purpose of high power requirement and that the life of the battery can be lengthened due to reduced small charging and recharging cycles. Something valuable and practical can be attained from this paper to solve the energy storage problem in stand-alone PV system and other regeneration energy systems.

**Key words:** stand-alone PV system; battery; ultracapacitor; hybrid energy storage