

# APF-EPS 的系统构建与仿真分析

计长安, 罗亚桥, 徐斌, 胡翀, 洪伟, 石磊

(安徽省电力科学研究院, 安徽 合肥 230601)

**摘要:** APF-EPS 系统在 APF (Active Power Filter) 有源滤波器的主框架上构建 EPS (Emergency Power Supply), 实现应急供电系统的自动化管理。系统在保证供电电能质量的同时, 按需要提供紧急备用供电电源。APF-EPS 系统, 合理考虑了 APF 和 EPS 在使用时间上和性能结构上的互补性, 不仅节约硬件成本, 更能合理有效地协调 APF 和 EPS, 增强了系统的实用性。给出了 APF-EPS 系统的构建框架, 并进行了仿真分析。

**关键词:** 电能质量; APF-EPS; 有源滤波器; 应急电源;  $i_p-i_q$ ; 空间矢量调制

## System structure and emulation analysis of APF-EPS

Ji Chang-an, Luo Ya-qiao, Xu Bin, Hu Chong, Hong Wei, Shi Lei

(Anhui Electric Power Research Institute, Hefei 230601, China)

**Abstract:** APF-EPS has an emergency power supply(EPS) based on active power filter(APF) and implements the automation management for emergency supply. The system ensures the quality of power supply and provides emergency back-up power supply according to the need at the same time. APF-EPS system has rationalized the APF and EPS, which have complementarities in working time and capability structure, not only economizing the hardware cost, but also harmonizing APF and EPS, and strengthening the practicability. In the paper, the APF-EPS system framework are constructed, and a simulation analysis is conducted.

**Key words:** power quality; APF-EPS; active power filter; emergency power supply;  $i_p-i_q$ ; SVPWM

中图分类号: TM761 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)05-0102-05

## 0 引言

近数十年以来, 大量晶闸管、数字电路的非线性负荷使用, 使公用电网的谐波污染日益严重, 谐波污染不仅会降低发电、输电和用电设备的效率, 影响电器设备的正常运行, 严重时还将威胁到供电系统的稳定与安全运行<sup>[1]</sup>。图 1 为实测富山变 10 kV 电压总畸变率已高达 8%左右, 而 1984 年的国家标准《公用电网谐波》中允许 10 kV 额定电压的电压总谐波畸变率为 4%。本着“谁污染, 谁治理”的原则, 随着中国绿色能源运动深入, 低压侧的谐波治理, 必将提到日程。APF 有源滤波器作为一种主动型的谐波补偿装置, 能动态跟踪补偿随机的谐波电流, 克服传统 LC 无源滤波装置的不足, 具有高度的可控性和快速响应性, 应用前景广阔<sup>[2-3]</sup>。

EPS 储能逆变应急电源, 为事故照明、消防设施、应急装置和设备供电, 建立一套符合消防规范的独立供电回路系统。该系统能在一定时间内替代

发电机构成第二电源, 为单电源供电用户提供保障<sup>[4]</sup>。

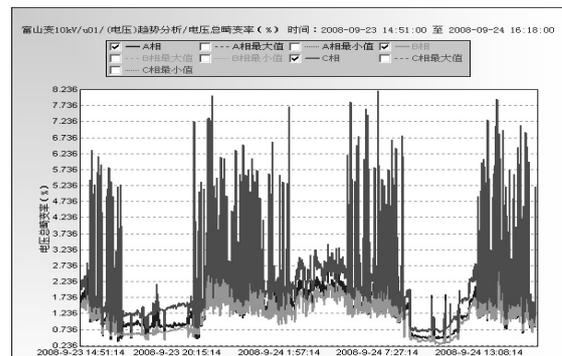


图 1 富山变 10 kV 电压总畸变率

Fig.1 Voltage THD of Fu-shan transformer substation

APF-EPS 系统集成了 APF 和 EPS, 不仅充分利用了硬件, 而且通过软件的设置 (根据用户需要), 合理选择蓄电池容量, 达到较高的性价比; 同时, 对不同容量的蓄电池, 调节充电参数, 延长蓄电池

使用寿命。

### 1 系统原理及构建

系统的构建原则: 在 APF 的主框架上搭建 EPS, 铅酸免维护蓄电池接口为扩展接口, 系统装配图参见图 2。

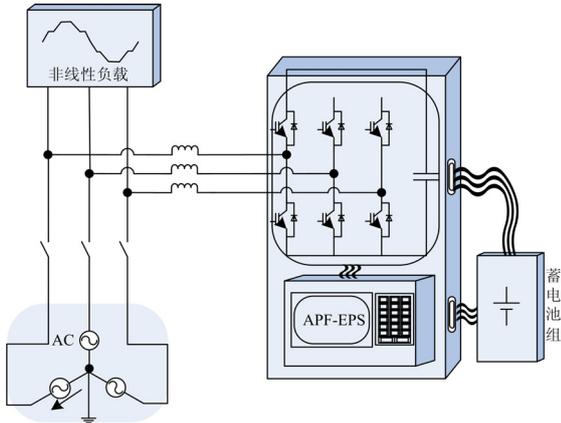


图 2 APF-EPS 系统装配图

Fig.2 APF-EPS system assembly drawing

#### 1.1 APF 结构组成及原理

以 APF 为主框架, 典型并联型有源滤波器的主电路拓扑接线参见图 3。

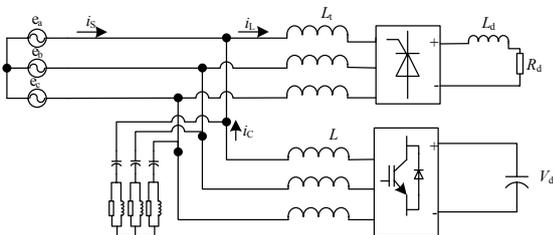


图 3 APF 主电路拓扑

Fig.3 APF main circuit topology

原理框图参见图 4。

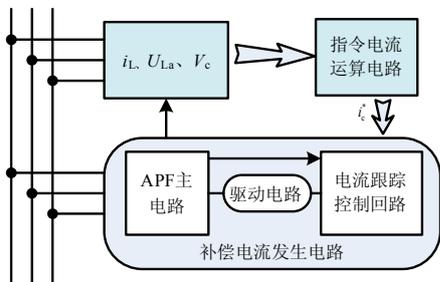


图 4 APF 原理框图

Fig.4 APF principle block diagram

APF 的原理框图由指令电流运算电路和补偿电流发生电路组成, 指令电流运算电路, 参见图 5。计算负荷电流中的谐波分量, 并形成直流侧的  $V_c$  电

压, 作为稳定的逆变直流源和 EPS 的充电电压。指令电流运算电路的原理为基于瞬时无功功率理论的  $i_p-i_q$  检测法, 相比于 FFT 检测方法、小波变换提取基波分量方法、自适应电流检测方法、基于瞬时无功理论的 p-q 法等谐波电流检测方法, 基于瞬时无功功率理论的  $i_p-i_q$  检测方法实时性好, 计算量少, 在电源电压畸变时及三相电压不对称时, 都能准确检测谐波电流<sup>[5]</sup>。

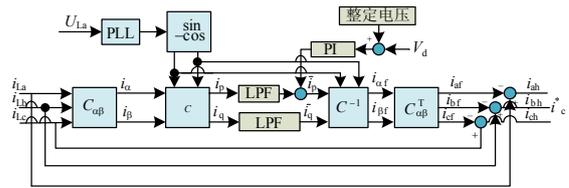


图 5 指令电流运算电路

Fig.5 Instruction current operation circuit

瞬时无功功率理论的  $i_p-i_q$  检测方法: 将三相电路中的相电流  $i_{La}$ 、 $i_{Lb}$ 、 $i_{Lc}$  变换到两相正交的  $\alpha-\beta$  坐标上:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{La} \\ i_{Lb} \\ i_{Lc} \end{bmatrix},$$

$$\text{令 } C_{\alpha\beta} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$$

用锁相环得到电源电压频率  $\omega$ , 正余弦发生电路生成与电源电压同相位的正余弦信号, 组成矩阵  $C$ , 计算瞬时有功电流  $i_p$  和瞬时无功电流  $i_q$ 。

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \omega t & \sin \omega t \\ \sin \omega t & -\cos \omega t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix},$$

$$\text{令 } C = \begin{bmatrix} \cos \omega t & \sin \omega t \\ \sin \omega t & -\cos \omega t \end{bmatrix}$$

将瞬时有功电流和瞬时无功电流分解为直流分量和交流分量:

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{i}_p + \tilde{i}_p \\ \bar{i}_q + \tilde{i}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{i}_p \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tilde{i}_p \\ \tilde{i}_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{i}_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \tilde{i}_q \end{bmatrix}$$

经过低通滤波后, 得到直流分量, 再通过上述过程的逆变换得到负载电流的基波分量:

$$\begin{bmatrix} i_{af} \\ i_{bf} \\ i_{cf} \end{bmatrix} = C^{-1} C_{\alpha\beta}^T \begin{bmatrix} \bar{i}_p \\ \bar{i}_q \end{bmatrix}$$

所以, 指令电流  $i_c^*$  为:

$$i_c^* = \begin{bmatrix} i_{ah} \\ i_{bh} \\ i_{ch} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{La} \\ i_{Lb} \\ i_{Lc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i_{af} \\ i_{bf} \\ i_{cf} \end{bmatrix}$$

补偿电流发生电路包括了电流跟踪控制电路、驱动电路和 APF 主电路。电流跟踪控制电路采用空间矢量调制 (SVPWM)，其直流电压利用率高、谐波畸变率低、动态响应快且易于数字实现<sup>[6-9]</sup>。

在不计死区，逆变桥上、下桥臂的开关状态是相反的，分别用  $S_a$ 、 $S_b$ 、 $S_c$  (取值 1 或 0) 表示，三桥臂有 8 种对应的二进制状态其逆变器的输出电压如表 1 (表中的电压值以  $v_d$  归一化)。

表 1 开关模式与输出电压  
Tab.1 Switch mode and export voltage

	$S_c S_b S_a$	$u_a$	$u_b$	$u_c$
$U_1$	001	2/3	-1/3	-1/3
$U_2$	010	-1/3	2/3	-1/3
$U_3$	011	1/3	1/3	-2/3
$U_4$	100	-1/3	-1/3	2/3
$U_5$	101	1/3	-2/3	1/3
$U_6$	110	-2/3	1/3	1/3
$U_7$	111	0	0	0
$U_0$	000	0	0	0

将  $u_a$ 、 $u_b$ 、 $u_c$  转换至空间矢量正交  $\alpha-\beta$  坐标系，得出  $u_\alpha$  和  $u_\beta$ ：

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix}$$

8 种逆变器的输出在  $\alpha-\beta$  坐标系中分布及三维空间电压矢量  $\alpha-\beta$  在平面的投影如图 6。

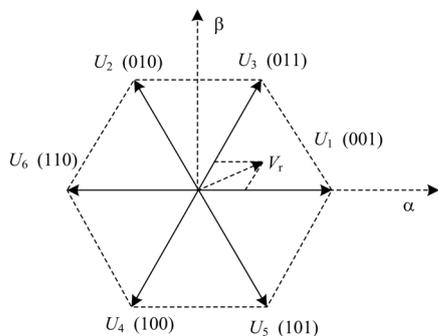


图 6 空间矢量的扇区分布  
Fig.6 The sector distributing of space vector

SVPWM 控制逆变器的 8 种基本电压组合逼近给定的任意电压矢量，有源滤波器跟踪的三相电压，

在  $\alpha-\beta$  坐标系中必落在其上某一扇区内  $V_r$ ，如图 6 可以用相邻两个有效矢量与零矢量去等效合成，零矢量的选择应使开关状态的变化尽可能少。

指令电流与逆变器的实际输出电流形成偏差量通过 PI 控制作为逆变器的输入信号，使产生的补偿电流跟随指令电流。

### 1.2 EPS 结构组成及原理

当负荷要求较高的供电保障时，对无双电源 ATS (Automatic Transfer Switching Equipment) 的用户单位，EPS 可作为应急供电系统。EPS 主要由充电部分、蓄电池组、逆变部分、控制检测部分及人机交互部分组成，参见图 7。

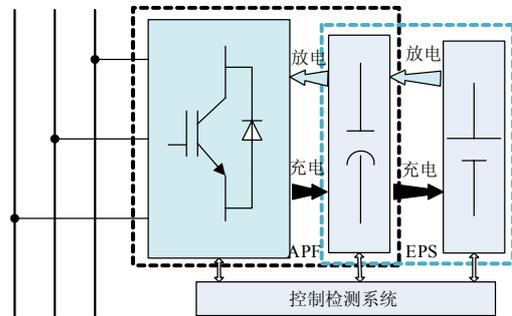


图 7 EPS 原理框图

Fig.7 EPS principle block diagram

充电部分：APF 的直流侧电容提供充电的直流电压，直流电压的整定值可通过 PI 调节，考虑 APF 直流侧的电压建立需要一定时间，蓄电池组在经过适当的延时后接入充电回路。

蓄电池组：选用免维护的铅酸蓄电池，为确保 EPS 系统使用效率和使用寿命，EPS 的额定功率的选取，考虑负载功率约为 EPS 额定功率的 70% 左右。

逆变部分：逆变器部分采用空间矢量脉宽调制，与传统的 SPWM 相比，SVPWM 电流畸变率小，直流侧电压利用率高，适合数字化实现。

控制检测部分：合理控制充电过程的进行和放电过程的切换；检测控制和人机交互部分所需的参变量。

人机交互部分：人机交互部分，根据负载需要进行 EPS 额定功率的选择设置，确定铅酸免维护蓄电池组的容量，设定蓄电池组延时接入时间和 PI 参数值。显示监测参变量，在供电状态下，同时显示剩余参考供电时间。

### 1.3 APF-EPS 结构优化

蓄电池充电方法优化：APF-EPS 中直流侧整定电压作为蓄电池组的充电电源，可采用双标三阶段浮充法优化充电过程，双标三阶段充电过程符合铅酸蓄电池的特性，较好地维护蓄电池<sup>[10]</sup>。当系统进

入浮充备用状态后可以选择是否继续保持浮充状态,浮充状态能防止蓄电池的自放电,但会消耗极少的电力。

直流侧电压等级确定:考虑 APF 直流侧电压的建立并满足充电电压的精确控制,可适当降低 APF-EPS 的充电电压;在 APF-EPS 的放电过程中,为满足交流侧的电压等级,直流侧的电压需要提高

到一定等级。电压等级的实现可在控制检测系统回路中实现。

## 2 仿真结果及分析

在 Matlab 中建立 APF-EPS 系统的模型,如图 8,图中参数均为仿真参数。

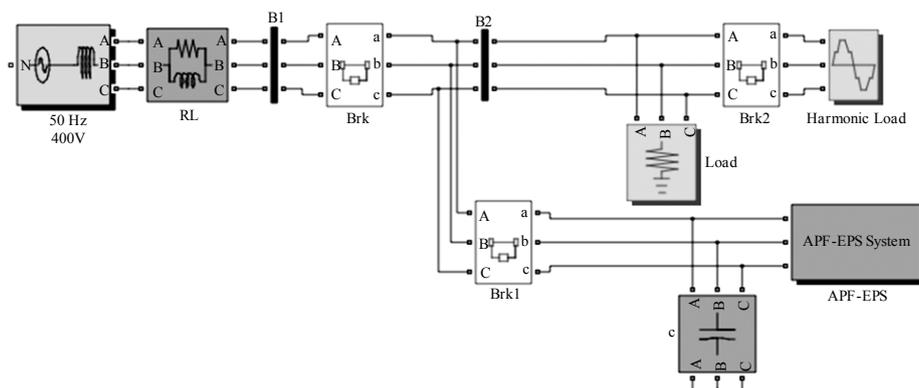


图 8 系统仿真模型

Fig.8 System simulation model

仿真时间设定为 2 s。0~1 s 时仿真:交流电源提供电压,谐波负荷在系统中产生大量谐波,APF-EPS 在 0.1 s 后并入系统,对谐波进行滤波;1~2 s 时仿真:交流电源故障,APF-EPS 提供系统供电,切除大的谐波源,对应急系统进行供电。仿真结果及分析如下:

0.1 s 后,APF-EPS 并入系统,对谐波负荷产生的谐波进行有源滤波,谐波补偿下的电压电流曲线如图 10,此时的谐波总畸变率,电压 THD 为 1.48%,电流 THD 为 0.47%,参见图 11,谐波的畸变率大大下降。

在第一仿真阶段 0~1 s 时间内:0~0.1 s 内,APF-EPS 未并入系统滤波,谐波状况下的电压电流曲线如图 9,此时的谐波总畸变率,电压 THD (Total harmonic distortion)为 24.12%,电流 THD 为 5.67%。

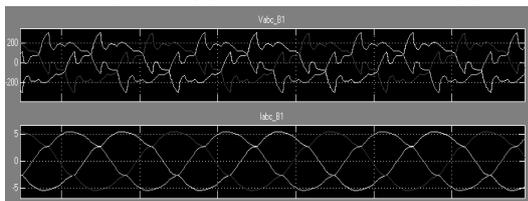


图 9 谐波下的电压电流曲线

Fig.9 Voltage and currents curve under harmonic component

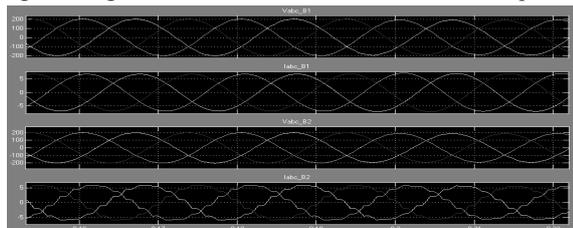


图 10 谐波补偿下的电压电流曲线

Fig.10 Voltage and current curves under harmonic compensation

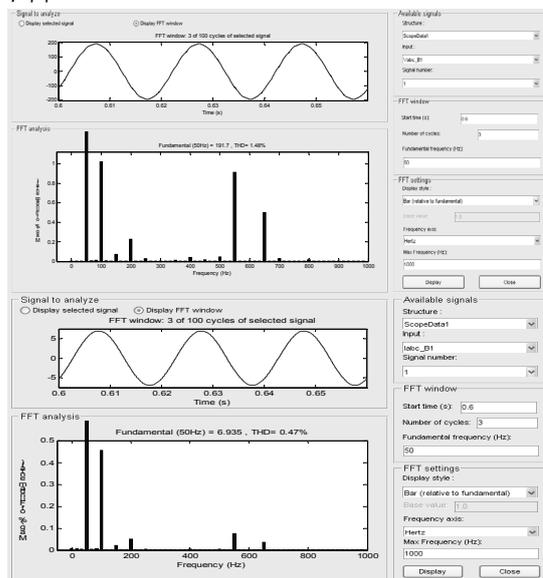
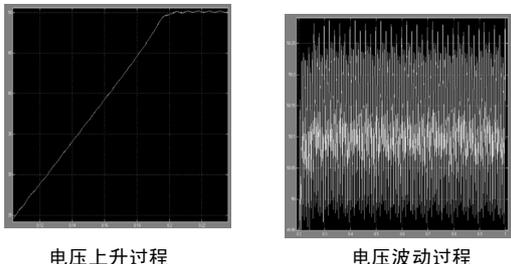


图 11 谐波补偿下电压电流畸变分析

Fig.11 The distortion analysis of voltage and current under harmonic compensation

直流侧电压建立参见图 12,在逐步上升到整定电压后,进入 PI 调节,电压有小幅度的波动,如

50 V 的直流侧电压, 电压 PI 调节的振幅可达 0.25 V, 适当调节 PI 参数, 实现对蓄电池进行精确充电控制。



电压上升过程                      电压波动过程

图 12 直流侧电压建立

Fig.12 The erecting voltage of DC

在第二仿真阶段 1~2 s 时间内: 仿真交流电源故障, APF-EPS 为系统供电, 此时系统切除了大的谐波源。应急系统的电压和电流在 0.01 s 内即可提供稳定的三相交流电源, 仿真结果如图 13。

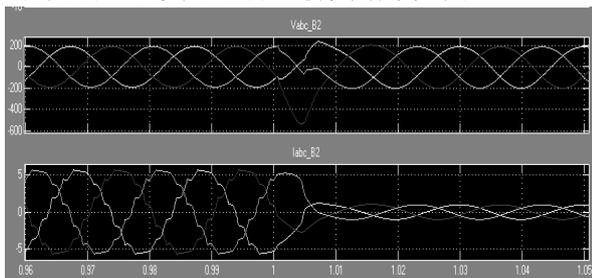


图 13 APF-EPS 充放电切换

Fig.13 The charging and discharging switch of APF-EPS

### 3 小结

APF-EPS 系统, 合理考虑了 APF 和 EPS 在使用时间上和性能结构上的互补性, 将二者结合在一起, 不仅可以简化结构, 节约硬件成本, 更能统一有效地协调 APF 和 EPS, 使系统工作更加合理。

### 参考文献

[1] 王兆安, 杨君, 刘进军, 等. 谐波抑制和无功功率补偿 (第 2 版) [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.

[2] Dixon J, del Valle, Y, Orchard M, et al. A Full Compensating System for General Loads, Based on a Combination of Thyristor Binary Compensator, and a PWM-IGBT Active Power Filter[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2003,50(5): 982-989.

[3] El-Habrouk M, Darwish M K, Mehta P. Active Power Filter: a Review[J]. IEE Proceeding-Electric Power Application, 2000, 147 (5): 403-413.

[4] 李建明. EPS 的工作原理[J]. UPS 应用, 2006(11): 29-37.

LI Jian-ming. Operating Principle of EPS[J]. UPS Applications, 2006(11): 29-37.

[5] 唐蕾, 陈维荣. 瞬时无功功率理论坐标变换的推导及谐波电流检测原理分析[J]. 电网技术, 2008, 32 (5): 66-69.

TANG Lei, CHEN Wei-rong. Deduction of Coordinate Transform for Instantaneous Reactive Power Theory and Analysis on the Principle of Harmonic Current Detection Method[J]. Power System Technology, 2008, 32 (5): 66-69.

[6] 郭自勇, 周有庆, 刘宏超, 等. 一种基于电压空间矢量的有源滤波器滞环电流控制新方法[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27 (1): 112-116.

GUO Zi-yong, ZHOU You-qing, LIU Hong-chao, et al. A Novel Hysteresis Current Control Method for Active Power Filter Based on Voltage Space Vector[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27 (1): 112-116.

[7] 姜俊峰, 刘会金, 陈允平, 等. 有源滤波器的电压空间矢量双滞环电流控制新方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (10): 82-86.

JIANG Jun-feng, LIU Hui-jin, CHEN Yun-ping, et al. A Novel Double Hysteresis Current control Method for Active Power Filter with Voltage Space Vector[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24 (10): 82-86.

[8] 蒋祖立, 陈冲, 许思猛. 空间矢量 PWM 在有源滤波器中的应用[J]. 电气应用, 2007, 26 (10): 55-57.

JIANG Zu-li, CHEN Chong, XU Si-meng. Application of Space Vector PWM in Active Power Filter[J]. Electrotechnical Application, 2007, 26 (10): 55-57.

[9] 田治礼, 张家胜. SVPWM 在并联有源电力滤波中的应用研究及仿真[J]. 黑龙江工程学院学报: 自然科学版, 2007, 21 (2): 61-64.

TIAN Zhi-li, ZHANG Jia-sheng. The Applied Research and Simulation of SVPWM in Parallel APF[J]. Journal of Heilongjiang Institute of Technology: Natural Science Edition, 2007, 21 (2): 61-64.

[10] 计长安, 张秀彬, 赵兴勇, 等. 基于模糊控制的风光互补能源系统[J]. 电工技术学报, 2007, 22 (10): 178-184.

JI Chang-an, ZHANG Xiu-bin, ZHAO Xing-yong, et al. Complementary Wind-Solar Power System Based on Fuzzy Control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22 (10): 178-184.

收稿日期: 2009-03-11;            修回日期: 2009-08-18

作者简介:

计长安 (1973-), 男, 博士, 工程师, 从事电能质量方面的工作。E-mail: changanji@163.com