

# 并联型共模电流补偿电路补偿特性研究

周运斌 张广洲 张凯

(华中科技大学 武汉 430074)

**摘要** 在电力电子变换器中, 开关器件的高速开关, 产生了巨大的  $dv/dt$ ,  $di/dt$ , 形成了严重的电磁干扰问题。传统的共模电流抑制技术主要依赖共模电感、电容等储能元件构成无源滤波器, 然而滤波器的体积、重量问题比较突出, 而且无源滤波器很难摆脱高频寄生参数的困扰, 因而高频滤波效果普遍不佳。有源共模补偿方式的提出, 能较好的解决这一问题。针对并联型有源共模电流补偿方式, 本文重点分析了补偿信号与实际共模电流信号出现幅值、相位、频率误差时, 对补偿效果的影响, 并提出了一种基于共模电流能量的共模噪声评价方法, 为实现共模电流的闭环补偿提供理论指导。

**关键字:** 电磁干扰 共模电流 误差 补偿效果 评估

## Study on characteristic of active parallel-connected common mode EMI filter

ZHOU Yunbing ZHANG Guangzhou ZHANG Kai

(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract** In PWM inverters, high  $dv/dt$  due to fast switching of the power devices can cause serious common mode EMI. Passive filter made of induction and capacity usually using for reducing EMI has unacceptable weight and volume. Also, the passive filter is affected by its parasitic parameter, which would reduce its capability of high frequency filtering. The active EMI filter can solve the problem effectively. Based on the active parallel-connected common mode (CM) EMI circuit, the error of the compensation current's amplitude and oscillating frequency, which can affect the circuit's compensation effectiveness seriously, is analyzed in this page. A novel appraised method for CM noisy using CM current's energy is explored, which can be the direction for the closed loop CM current compensation.

**Keywords:** EMI common mode current error compensation effect appraisal

### 1 引言

为了有效的降低了电力电子装置的体积与重量, 提高输出波形的质量, IGBT 等高速功率开关器件的开关频率不断提高。然而, 这些开关器件在开关过程中, 会产生巨大的  $dv/dt$ ,  $di/dt$ , 形成了严重的电磁干扰, 其频率从十几 KHz, 到几十 MHz, 严重超出了 EMC 标准的要求。由于变换器输入端一般都有较大的 LC 滤波器, 所以差模 EMI 在总 EMI 中并不占主导地位。共模电流由于其频率高, 流通过程复杂, 在总的 EMI 中通常占据主导地位。此外, 共模电流所流经的回路面积远比差模大, 因此共模电流同时还是高频辐射干扰的主要原因。所以共模

EMI 成为开关变换器 EMI 治理的主要对象<sup>[1]</sup>。

目前, 运用在实际中的 EMI 解决方案仍然主要依赖共模电感、电容等储能元件构成无源滤波器。出于操作安全等原因, 对共模电容的大小严格的限制, 因此共模电感不能太小, 因此体积、重量问题比较突出。无源滤波的另一个缺点是很难摆脱高频寄生参数的困扰, 因而高频滤波效果普遍不佳。另外, 无源滤波电路一旦投入运行其参数就不易改变, 灵活性和适应性很差<sup>[2]</sup>。

由于以上原因, 基于对消思想的共模 EMI 抑制方案, 引起了人们更多的兴趣, 在有源共模电流补偿领域进行了许多研究。目前基于对消思想的共模 EMI 抑制方案主要有:

1) 基于电路平衡思想的共模电压抑制技术, 如 Annette von Jouanne 提出的双桥逆变器 (DBI)

2) 方案<sup>[3]</sup>, 和 Alexander L. Julian 提出的四桥臂逆变器方案<sup>[4]</sup>。

3) 基于串联补偿的共模电压抑制技术, 如日本学者 Satoshi Ogasawara 等人提出的有源共模噪声抑制方法, 其系统机构如[5]中所述。

4) 基于并联补偿的共模电流抑制技术, 如 Yo-Chan Son 和 Seung-Ki Sul 在[6]中提出的“射极跟随器+对地电容”拓扑。

基于电路平衡思想的共模电压抑制技术结构复杂, 硬件成本高, 而且只能针对特定的场合, 不具有通用性。串联补偿也只适用于主要考虑共模噪声对负载影响的场合。基于并联补偿思想的共模电流抑制技术结构简单, 且适用于各种电路<sup>[2]</sup>。

目前文献报道的并联共模电流补偿技术, 多采用模拟开环控制。因此, 补偿信号与实际共模电流相比不可避免存在相位滞后, 和波形差异。然而共模电流频率从几十 KHz 到几十 MHz, 即使是微秒级的滞后或是波形差异, 都会对补偿后的共模电流波形产生非常大的影响。解决这一问题较好的方法是采用数字闭环控制算法控制共模补偿电路。

数字化共模电流补偿问题可以等效为复杂波形拟合, 及复杂波形前沿对准两个问题。因此, 需要总结出共模电流补偿效果与波形及相位误差之间的关系, 以便通过检测补偿后的共模电流, 调整补偿波形的幅值, 频率及相位。

本文通过仿真, 分析了补偿波形与实际共模电流波形出现幅值, 频率, 相位等误差时, 补偿后共模电流的频谱特征。本文选取共模电流频谱的最大值和平均值作为补偿效果评价指标, 给出了共模电流频谱的最大值和平均值随幅值, 频率, 相位等误差变化时的变化趋势图, 总结了变化规律。且总结出的规律适合于实际的控制, 为日后实现数字化闭环补偿提供了一些理论依据。

## 2 并联共模电流补偿具体形式

并联型共模电流补偿电路经典结构如图 1 所示。根据应用的场合不同, 可分为桥臂互补和增设补偿电路 (如图 1 (b) 所示) 两种。如图 1 (a) 所示, 若单相全桥逆变器采用双极性调制, 则可利用桥臂对管同时开通关断的特性, 通过精确调整对管驱动脉冲的前沿及脉宽, 来保证桥臂中点电位同时跳臂, 以互相对消产生的共模电流。若是单相半桥逆变器, 单极性

调制下的单相全桥逆变器或是三相逆变器则需要每个桥臂增设一个如图 1 (b) 所示的补偿电路, 通过增设补偿电路产生与桥臂互补的共模电流信号。

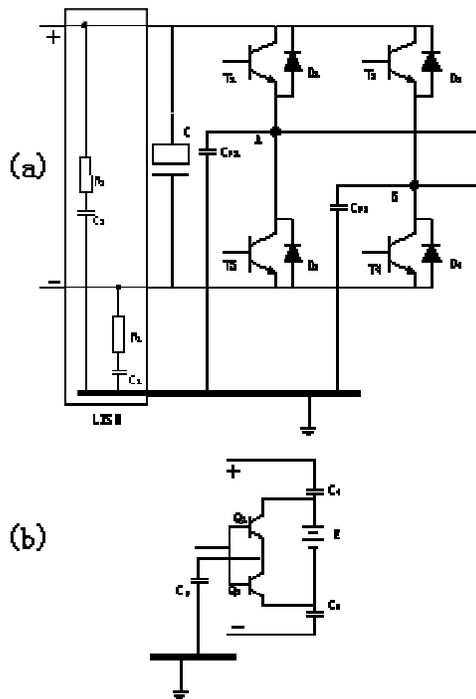


图 1 并联共模电流补偿电路结构

## 3 仿真模型

IGBT 的高速开关, 在桥臂中点产生了巨大的  $dv/dt$ , 且桥臂中点存在很大的对地电容, 从而形成了对地充放电电流, 高频地电流通过电源线, 及负载对地电容对负载形成共模干扰。考虑到共模电流流经路径上的线路杂散电感、线路共模滤波电感及路径上的一些阻尼因素, 共模电流可以认为是一个方波激励下的 RLC 二阶欠阻尼振荡电路的电流响应。

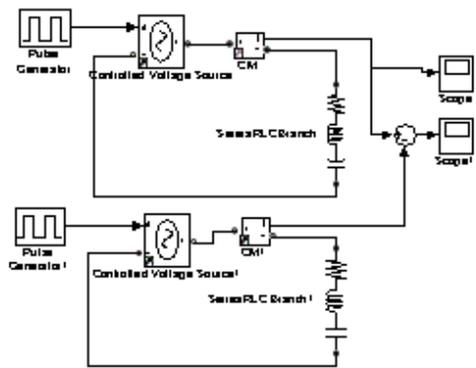


图 2 仿真电路

如图 2 所示, 在 Matlab 仿真中, 采用一个方波

信号激励一个 RLC 二阶欠阻尼振荡电路，取电路的电流响应模拟实际电路的共模电流信号。补偿信号也用相同的方法获得，改变 RLC 数值的大小即可改变补偿信号的幅值和自由振荡频率，调整方波激励滞后（超前）时间则可调整补偿信号滞后（超前）的时间。

仿真时，为了减少计算时间，加快仿真速度，取激励方波频率  $f=8\text{KHz}$ ，占空比 50%， $V=100\text{V}$ ， $L=1\text{mH}$ ， $C=1\text{nF}$ ， $R=150\Omega$ 。则 RLC 网络自由振荡频率  $f=160\text{KHz}$ ，其在方波激励下的电流波形如图 3 所示。其频谱图如图 4 所示。

常见的共模电流分析方法是将其共模电流采样后，做快速傅立叶变换 (FFT)，然后将结果以频谱图的方式显示出来，供分析人员进行分析。由于仍需要人做最后的分析判断，这种方法不适合用于微处理控制。因此需要给出一套新的评价标准，使之能适用于基于微处理器的数字控制。本文选取共模电流能量作为共模干扰大小的评价标准，并通过比较共模电流频谱及其能量，说明共模电流能量能有效反应共模噪声水平。

#### 4 单纯波形滞后对补偿效果的影响

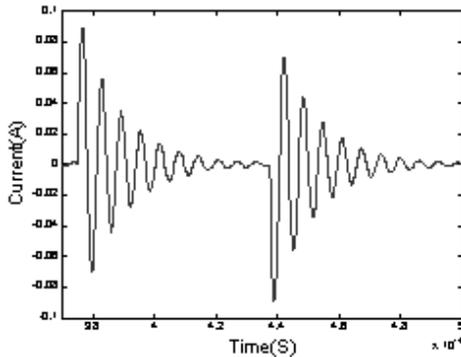


图 3 模拟共模电流波形

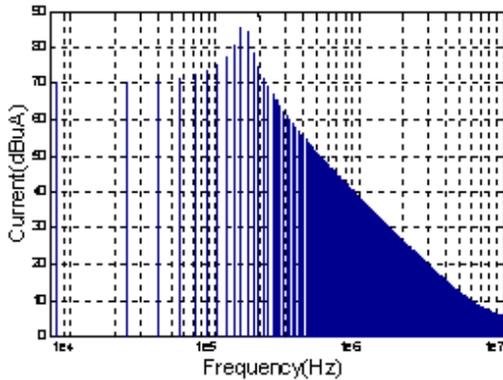


图 4 模拟共模电流波形频谱

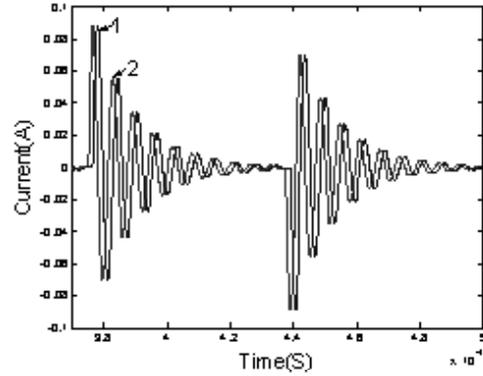


图 5 共模电流及滞后的补偿电流

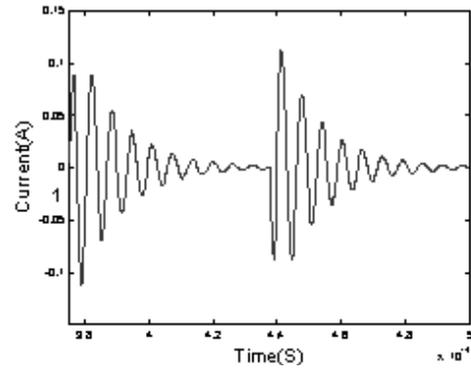


图 6 补偿后共模电流波形

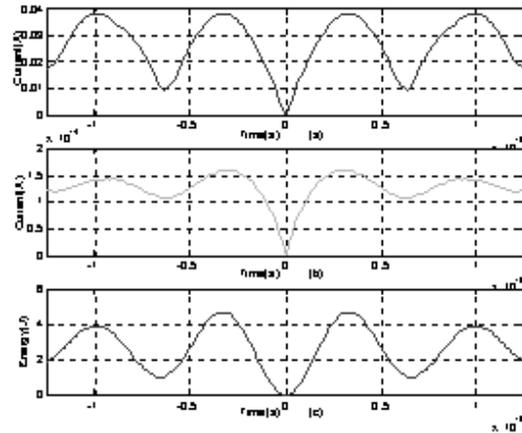


图 7 共模电流频谱最大值 (a)、平均值 (b) 及能量 (c) 随滞后时间变化规律

由于反馈电路，信号调理电路的延时，补偿电流很可能会滞后与实际共模电流，因此首先考虑补偿波形滞后实际共模电流波形对补偿效果的影响。如图 5 所示，共模电流为电流 2，补偿电流为电流 1，后者滞后前者。两电流进行抵消后的共模电流波形如图 6 所示。连续调整滞后时间，使滞后时间在共模电流两个自由振荡周期内均匀变化 80 步，对补偿后的共模电流做 FFT 分析，其频谱最大值和

平均值随滞后时间变化规律如图 7(a)、(b)所示。补偿后共模电流能量 ( $\varepsilon = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} |g[n]|^2$ ,  $g[n]$  为信号  $n$  时刻的值) 随滞后时间变化规律如图 7(c) 所示。考虑到如果采用数字控制策略, 有可能造成补偿波形超前实际波形, 所以对补偿电流超前实际电流的情况也做了相似的仿真研究, 其规律亦在图 7 中给出。可以看出当滞后时间为  $kT$  ( $k=0,1,2,3,\dots, T$  为 RLC 网络自由振荡周期) 时, 补偿后共模电流能量及频谱的最大值、平均值同时达到极小值; 当滞后时间为  $\frac{k}{2}T$  时, 三者同时达到极大值。这与补偿后共模电流的变化规律是一致的, 从而说明取共模电流能量来评估共模干扰的严重程度是可信的。从图中可进一步看出, 滞后时间在  $kT \sim \frac{k+1}{2}T$  变化时, 共模电流能量及频谱的最大值、平均值是单调变化的, 进一步说明共模电流能量与共模噪声有相同变化规律。

## 5 补偿波形失真后时间滞后对补偿效果的影响

在实际补偿电路中, 由于检测电路的失真, 补偿电路中半导体器件带宽的限制, 补偿波形与实际共模电流波形不可能完全一致。因此, 补偿波形的失真与时间滞后是同时发生的, 必须考虑两者同时存在条件下对共模电流补偿效果的影响。为了便于分析, 补偿波形的失真可以简化为补偿波形幅值误差, 与自由振荡频率的误差。

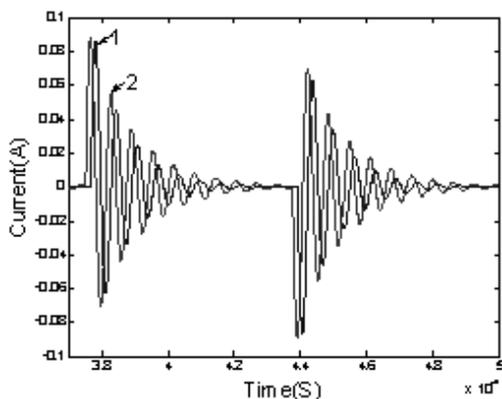


图 8 共模电流及幅值失真后的补偿电流

首先考虑补偿波形幅值与实际共模电流幅值不一致条件下, 调整补偿波形滞后(超前)时间, 对补偿效果的影响。将补偿电流产生电路中  $R$  的值加大为  $200 \Omega$ , 共模电流与补偿电流波形如图 8 所

示, 电流 2 为共模电流, 电流 1 为补偿电流, 后者幅值明显小于前者。图 9 为补偿后的共模电流。连续调整滞后时间, 使其按前述步长均匀变化, 对补偿后的共模电流做 FFT 分析, 其频谱最大值和平均值随滞后时间变化规律如图 10(a)、(b) 所示, 其能量的变化规律如图 10(c) 所示。比较可以发现, 补偿后共模电流的能量与其频谱最大值、平均值变化规律一致, 变化规律与幅值没有失真情况下相同, 只是各个点的幅值有所差别。说明补偿信号幅值的失真只影响补偿后共模噪声水平, 而对共模噪声变化规律没有影响。

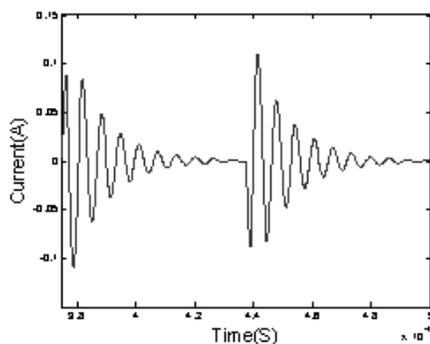


图 9 幅值失真情况下, 补偿后共模电流

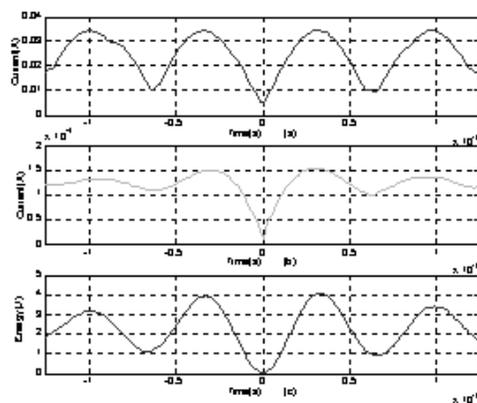


图 10 幅值失真时, 补偿后共模电流频谱最大值(a)、平均值(b)及能量(c)随滞后时间变化规律

当补偿电流的自由振荡频率与共模电流频率产生误差时, 补偿电流滞后时间不同对补偿效果的波形亦不同。将补偿电流自由振荡频率增大为  $176 \text{ KHz}$  (即  $R=150 \Omega, L=1 \text{ mH}, C=0.818 \text{ nF}$ ), 共模电流与补偿电流波形如图 11 所示, 电流 1 为共模电流, 电流 2 为补偿电流, 图 12 为补偿后的共模电流。由图 12 可知, 当频率出现误差时, 补偿后的共模电流的波形与前述两种情况明显不同, 已不是单纯的衰减振荡波形。连续调整滞后时间, 使其按前述规律均匀变化, 对补偿后的共模电流做 FFT 分析, 其频谱最大值和平均值随滞后时间变化规律如

图 13 (a)、(b) 所示, 能量变化规律如图 13 (c) 所示。图 14 给出了补偿后共模电流的频谱图。由图可知, 频谱平均值的最小值仍然在滞后时间为 0 时出现, 而最大值及能量的最小值却不是, 且其他极大值与极小值出现的时间两者也不相同。共模电流能量及频谱最大值、平均值波形不再按原点对称。这主要是因为补偿后共模电流频谱已经不是单峰值, 而出现了多个峰。振荡频率的变化严重影响了补偿后共模干扰的变化规律。

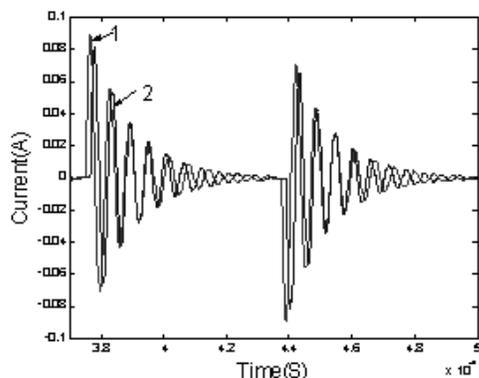


图 11 共模电流及自由振荡频率失真后的补偿电流

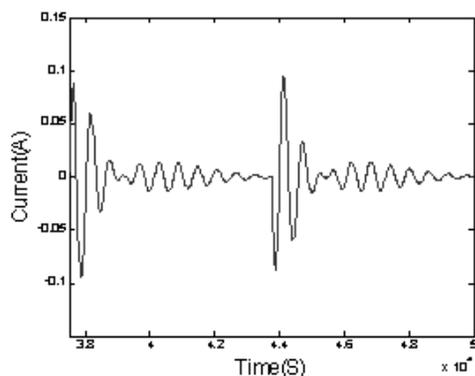


图 12 自由振荡频率失真情况下, 补偿后共模电流

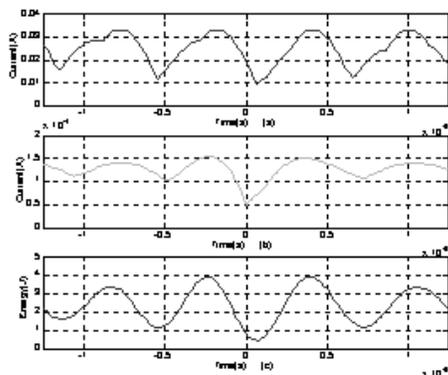


图 13 自由振荡频率失真时, 补偿后共模电流频谱最大值 (a)、平均值 (b) 及能量 (c) 滞后时间变化规律

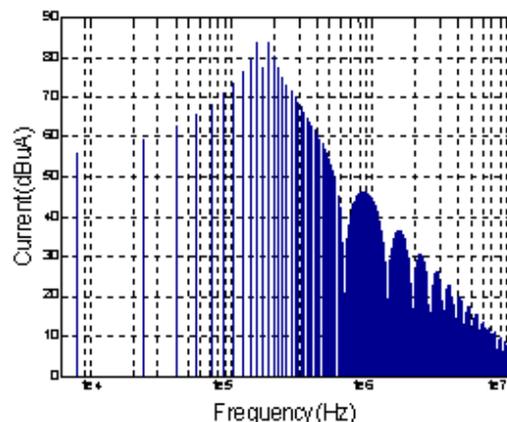


图 14 自由振荡频率失真情况下, 补偿后共模电流频谱图

## 6 结论

本文通过 Matlab 仿真, 研究了不同条件下共模补偿电流波形滞后对共模补偿效果的影响, 重点分析了补偿电流与共模电流完全相同时, 幅值出现误差时, 自由振荡频率出现误差时, 共模电流补偿效果与补偿电流滞后时间之间的关系。文章给出了各种情况下的共模电流, 补偿电流及补偿后共模电流波形。本文还提出了一种根据共模电流能量来评价共模干扰大小的方法。并给出了在各种情况下, 共模电流能量及频谱的最大值、平均值与补偿电流滞后时间的关系图, 通过三者之间的比较, 说明该方法能有效的反应共模干扰的大小。

而且本文提出的基于共模电流能量的评估算法, 无需借助 FFT, 从而大大减小计算量, 适合于基于微处理器的数字控制, 对将来实现共模电流数字化闭环补偿有较强的理论指导意义。

## 参考文献

- [1] Pei Xuejun, Kai Zhang, Yong Kang, Chen Jian. Analytical estimation of common mode conducted EMI in PWM inverter. IAS'04, 2004.
- [2] 姜艳姝, 陈希有, 徐殿国, PWM 逆变器输出有源滤波技术及其发展, 电气传动, 2002 年第 2 期.
- [3] A.V.Jouanne and H.Zhang, "a dual-bridge Inverter Approach to Eliminating Common mode Voltages and Bearing and Leakage Currents", IEEE-PESC'97, vol.1, pp.1276-1280
- [4] Alexander L. Julian, "Elimination of Common-Mode Voltage in Three-Phase Sinusoidal Power Convert

- ers", IEEE trans. on Power Electronics, Vol.14, NO.5.
- [5] Satoshi Ogasawara, Hirofumi Akagi, "Circuit Configurations and Performance of the Active Common Noise Canceler for Reduction of Common-mode Voltage Generated by Voltage-source PWM Inverter, IEEE IAS2000
- [6] Yo-Chan Son and Seung-Ki Sul, " A Novel Active Common-mode EMI Filter for PWM Inverter", IEEE-APEC2002. vol.1, pp.545-549, Mar. 2002

(上接第6页)

- [5] Tan, Cher Ming; Tseng, King-Jet Using power diode models for circuit simulations - a comprehensive review IEEE Transactions on Industrial Electronics Vol. 46 No. 3 1999 pp 637-645.
- [6] Kang, X.; Caiafa, A.; Santi, E.; Hudgins, J.L.; Palmer, P.R Parameter extraction for a power diode circuit simulator model including temperature dependent effects Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC Vol. Mar 10-14 2002 pp 452-458.
- [7] Strollo, A.G.M.; Napoli, E.; Frateli, L. and Gianini, G. Automation Parameter Extraction Technique for Pi N Diode Circuit Model International Conference on Microelectronics Volume:1 14-17 Sept. 1997 Pages:269-272.
- [8] 王道洪, PIN 功率二极管模型参数辨识及有效性

(上接第11页)

- [2] Basu, M.; Das, S.P.; Dubey, G.K.; Experimental investigation of performance of a single phase UPQC for voltage sensitive and non-linear loads Power Electronics and Drive Systems, 2001. Proceedings. 2001 4th IEEE International Conference on , Volume: 1 , 22-25 Oct 2001 Page(s): 218 -222
- [3] 张秀娟, 李晓萌, 姜齐荣等 (Zhang Xiujuan, Li Xiaomeng, Jiang Qirong, et al). 动态电压调节器 (DVR) 的设计与性能测试 (Main Circuit Design and Performance Tests of Dynamic

#### 作者简介

周运斌 (1982-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 电力电子装置 EMI。  
张广洲 (1973-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 电力电子装置 EMI。  
张凯 (1972-), 男, 副教授, 研究方向: 电力电子与电力传动控制技术, 电力电子装置 EMI。

注: 本项目得到台达电力电子科教发展基金的资助; 该文章经作者本人同意, 转载自“2005年台达电力电子新技术研讨会论文集”。

验证。上海大学硕士论文 2004年3月

- [9] Allard, B.; Garrb, H.; Mi, Wei; Ammous, K.; Morel, H. Switching Parameter Maps-a New Approach to the Validity Domain of Power Device Models. P ESC'03 IEEE 34<sup>th</sup> Annual Conference, Vol.3, 15-19 June. Pages 1220-1225.

#### 作者简介

高艳霞 女, 1958年生, 副教授, 研究方向: 电力电子与电力传动。  
王道洪 男, 1977年生, 硕士, 研究方向: 电力电子与电力传动。  
陈伯时 男, 1928年生, 博士生导师, 研究方向: 电力电子与电力传动。

注: 本项目得到台达电力电子科教发展基金的资助; 该文章经作者本人同意, 转载自“2004年台达电力电子新技术研讨会论文集”。

Voltage Regulator) 电力电子技术 (Power Electronics), 2002, 26 (19): 32-35

- [4] 杨潮, 韩英铎, 马维新 (Yang Chao, Han Yingduo, Ma Weixin). 单相串联电压质量补偿器控制器的研究 (Control Method of Single Phase Series Voltage Quality Compensator), 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2002, 26 (15): 45-48

注: 本项目得到台达电力电子科教发展基金的资助; 该文章经作者本人同意, 转载自“2005年台达电力电子新技术研讨会论文集”。