用于电能质量分析的模拟电网信号发生器设计

谢 倩[1]，陈劲操[2]

（1.东南大学电气工程学院，江苏 南京 210096；2.南京理工大学动力工程学院，江苏 南京 210094）

摘要：针对现有的电能质量信号发生装置普遍存在的体积大、结构复杂、功能单一、难以实现大功率等缺点，采用电力电子技术和计算机控制技术，设计了一种基于 ARM7 控制器、主电路用电力电子器件实现的电能质量信号发生器。采用单相交-直-交为主电路结构、正弦脉宽调制（SPWM）为逆变控制策略，并通过闭环控制实现电压的稳定输出。制作了一台单相原理样机进行波形测试，实验结果验证了所采用的控制策略以及软硬件设计的正确性。样机可以按照要求灵活输出电压跌落、电压骤升、电压凹陷、电压中断以及电压谐波等多种电能质量信号波形，具有体积小、结构简单、能实现大功率等特点，可用于实验、教学等场合。

关键词：电能质量；信号发生器；正弦脉宽调制（SPWM）；ARM7 嵌入式系统；闭环控制

Design of a generator producing simulated signals of the power grid for power quality analysis

XIE Qian[1]，CHEN Jin-cao[2]

（1. School of Electrical Engineering，Southeast University，Nanjing 210096，China；
2. School of Power Engineering，Nanjing University of Science and Technology，Nanjing 210094，China）

Abstract：With the help of power elctronics technique and computer control technology, a power quality generator based on ARM7 controller and power electronics components is designed to overcome the common disadvantages of existing power quality generators，such as huge size，intricate structure，simple functions and low power．The single-phase AC-DC-AC structure，control tactic of sinusoidal pulse width modulation（SPWM）and closed-loop control to achieve stable output voltage are adopted．Moreover，a single-phase prototype machine is designed and waveforms are tested．The results of the experiment validate the control tactic，software and hardware design．The prototype machine can generate various kinds of power quality waveforms，such as voltage sags，swells，notches，interruptions and harmonics．It can be applied in teaching and experiments because of its advantages such as small size，simple structure and possibility of achieving high power．

Key words：power quality；signal generator；sinusoidal pulse width modulation（SPWM）；ARM7 embedded system；closed-loop control

中图分类号： TM76 文献标识码：A 文章编号： 1674-3415(2010)16-0137-06

0 引言

在现代电网中，各种冲击性和非线性负荷不断增加，使得电网电压、电流波形发生畸变，造成电网的“污染”。另一方面，目前在高科技和信息行业中存在大量对电能质量敏感的设备，这使得人们对供电质量和供电可靠性提出了更高的要求[1]。为了解决上述两方面之间的矛盾，一般采取两类办法来改善电能质量：一是在用户和电网间安装一些用户电力设备，如有源电力滤波器、动态电压恢复器等[2-3]；二是测试负载设备在受到电能质量干扰时的工作情况，以改进负载装置的设计方案，提高其抗扰动能力。

以上两类办法，都需要一种能够模拟产生各种电能质量信号的装置，用于测试控制设备解决电能质量问题的能力，以及负载设备的抗扰动能力，从而为采取合适的技术措施来减小电压波形畸变所带来的危害提供依据。但目前常见的模拟产生电能质量信号的方式具有体积大、结构复杂、功能单一、难以实现大功率等缺点[4-8]。

为了克服这些缺点，本文将电力电子技术与计算机控制技术相结合，设计了一种基于ARM7控制器、主电路用电力电子器件实现的电能质量信号发生器。该装置能按要求产生电压跌落、电压骤升、

电压凹陷、电压中断以及电压谐波等多种电能质量信号波形，并且能实现大功率。

1 系统总体结构

系统主要由实现交-直-交变换的主电路、滤波电路、驱动电路、信号调理电路、控制电路以及 PC 组成。由于 ARM 处理器体积小、功耗低、成本低而性能好，因此采用 32 位 ARM7 嵌入式系统作为系统的主控单元，芯片型号为 LPC2131。

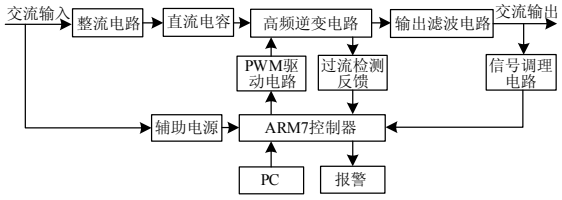

图1 系统结构图

Fig.1 Structure of the system

图1即为系统的结构图。该装置的工作原理为：用户将所需电能质量信号的具体情况通过操作界面输入PC机，所需信号的信息下载到控制器中，由控制器产生PWM脉冲信号，并经驱动电路触发逆变电路的各功率开关（如绝缘栅双极晶体管IGBT或电力场效应晶体管等），逆变器的输出信号经滤波电路滤去高频分量，就可以得到所需要的电能质量信号波形。为了稳定输出电压波形，系统采用信号调理电路将输出的交流电压转换成0～3 V之间的电压值信号，控制电路对该信号进行A/D转换，并根据一定的调制算法来实时调整SPWM信号的脉宽，从而实现了闭环控制。

2 系统硬件设计

硬件电路设计主要包括功率主电路设计、嵌入式系统设计、驱动及保护电路设计、滤波电路设计以及信号调理电路设计。

2.1 功率主电路设计

本系统功率主电路由整流电路、大电容和单相全桥电压型逆变电路构成，结构如图2所示。

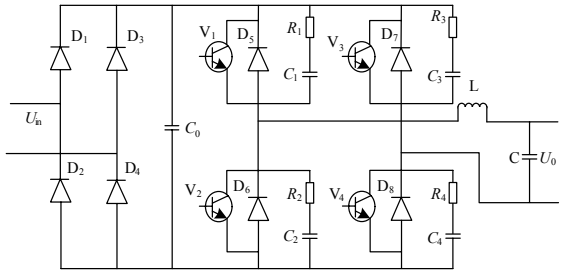

图2 功率主电路原理图

Fig.2 Principle of main circuit

图2中，大电容C_0起到高频滤波的作用，从而为逆变侧提供稳定的直流电压输入。逆变电路一般采用IGBT作为功率开关器件，它既具有MOSFET的开关速度快、输入阻抗高、所需驱动功率小且驱动电路简单等特点，又具有GTR的容量大和阻断电压高的优点。并联二极管D_5～D_8给交流侧向直流侧反馈无功能量提供了通道，并起到使负载电流连续的作用。在IGBT的集射极间并接RC吸收网络，可降低开关应力，吸收IGBT关断产生的浪涌电压。

2.2 嵌入式系统设计

嵌入式系统以Philips公司的ARM7微控制器LPC2131为核心。LPC2131内部具有8 KB的片内静态RAM和32 KB的片内Flash程序存储器，47个通用I/O口，2个32位定时器，6路输出的PWM单元和1个8路10位的A/D转换器[9]，外接晶振、复位和供电电路即可接成最小嵌入式系统。

2.3 驱动及保护电路设计

本文的驱动电路以日本富士公司开发的 IGBT 及功率 MOSFET 驱动保护集成模块 EXB841 为核心。EXB841 模块的最高运行频率为 40 kHz，输入信号经内部光电隔离，有过流保护电路和过流保护输出端，可单电源供电，内部提供栅源电压自举电路，最大延时为1.5 μs[10]。

图3为驱动及保护电路图。与EXB841的6引脚连接的二极管可检测功率管的饱和压降，用来完成过流保护功能，稳压管VZ_1（+3.3 V）用于降低过流保护阈值[11]。当检测到功率管过流后，5引脚变为低电平，光耦TLP521输出低电平，通过与门封锁控制信号输人，同时使四输人与门74LS21输出低电平，触发功率驱动保护中断，完成相应的保护处理[12]。稳压管VZ_3（+15 V）和VZ_4（+5 V）用于防止栅射极出现过电压，栅射极电阻R_{GS}用于防止栅射极断路。在栅极串接100 Ω左右的阻尼电阻可以减小寄生振荡。C_1和C_2用来平抑因电源接线阻抗引起的供电电压变化，而不是作为电源滤波。

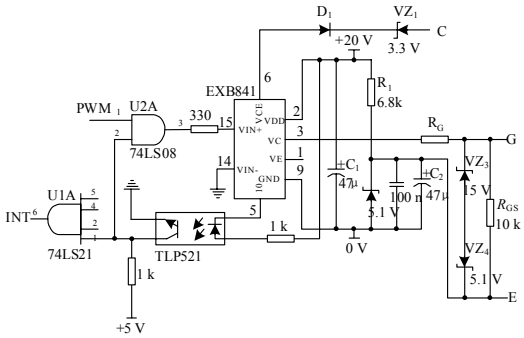

图3 驱动及保护电路

Fig.3 Drive and protection circuit

2.4 滤波电路设计

由于输出电能质量信号波形不仅是正弦波的特点，需要滤波器能够通过一定范围的较高频率谐波，故要求输出滤波器有较宽的频域[13]。如果需要通过15次谐波，截止频率必须大于750 Hz，考虑裕度后选择900 Hz作为截止频率。图4为本文采用的Γ型滤波器。

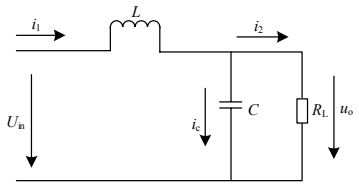

图4 Γ型滤波器

Fig.4 Filter of Γ type

负载电阻如式（1）所示：

$$R_{\mathrm{L}}=\frac{U_{\mathrm{o}}^2}{P} \tag{1}$$

其中：U_{o}为输出交流额定电压；P为额定容量。

特性阻抗 ρ 与负载阻抗的关系为：ρ=（0.5～0.8）R_{L}。L、C的计算式如式（2）和式（3）所示：

$$L=\frac{\rho}{2\pi f_{\mathrm{c}}} \tag{2}$$

$$C=\frac{1}{2\pi f_{\mathrm{c}}\rho} \tag{3}$$

由式（1）～式（3）计算得到的理论值仅为设计参考值，实取参数应进行适当修改。选定参数后可计算出截止频率 $f_{\mathrm{c}}=1/(2\pi\sqrt{LC})$。如果此截止频率大于 900 Hz，那么滤波器的参数设计就是符合设计要求的，它能通过 15 次以下的谐波。

2.5 信号调理电路设计

信号调理电路原理如图5所示。该电路将逆变器的输出交流电压转换成0～3 V之间变化的电压值信号，送到控制芯片的A/D转换口。由于在电力电子装置中，对电压电流信号采集的精度要求很高，所以现在常选用霍尔元件。

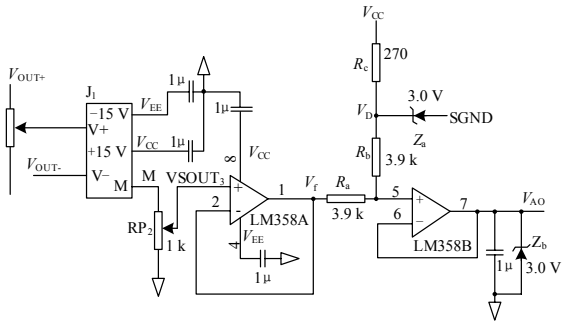

图5 信号调理电路

Fig.5 Signal conditioning circuit

图5中，通过选择电位器RP_2的阻值使传感器的输出电压V_{f}范围为−3～+3 V。电阻R_{a}、R_{b}、R_{c}与LM358构成直流偏置电路。由图5可以得到式（4）：

$$V_{\mathrm{AD}}=\frac{R_{\mathrm{b}}V_{\mathrm{f}}}{R_{\mathrm{a}}+R_{\mathrm{b}}}+\frac{R_{\mathrm{a}}V_{\mathrm{D}}}{R_{\mathrm{a}}+R_{\mathrm{b}}} \tag{4}$$

当 V_{D}=3.0 V，R_{a}=R_{b}时，式（4）化为V_{AD}=1.5+$\frac{V_{\mathrm{f}}}{2}$。这样经过调理电路后，输出电压 V_{AO} 的值在 0～3 V 之间，满足 ARM 芯片 AD 采样的电压要求。稳压管 Z_{a} 的作用是保证该处电压不超过 3 V 以保护 ARM 微处理器。

3　逆变控制策略

本文采用正弦脉宽调制（SPWM）作为逆变电路的控制策略。为便于软件实现和死区时间的生成，本系统采用的正弦脉宽单极性调制方式如下：在正半周期，图2中的V_4一直导通，V_2、V_3一直关断，V_1受SPWM信号控制；在负半周期，V_3一直导通，V_1、V_4一直关断，V_2受SPWM信号控制。功率管V_1～V_4的开关状态和逆变器输出波形如图6所示。图6中，u_{c}表示载波，u_{r}表示调制波，u_{g1}～u_{g4}分别表示V_1～V_4的通断状态，高电平表示导通，低电平表示关断。

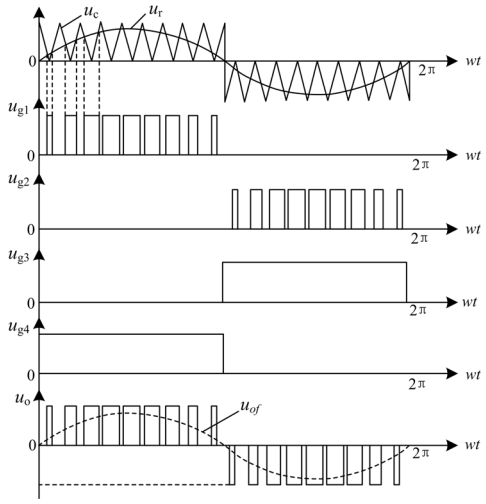

图6 功率管工作状态及输出波形

Fig.6 States of switches and output waveforms

本文采用工程上应用较广的规则采样法作为SPWM波的软件生成方案。与自然采样法相比，该方法有意消除了两个波形交点出现的任意性，脉冲宽度和前后沿位置均可精确计算，并事先确定，便于软件设计[14]。其原理如图7所示。脉宽表达式见式（5）：

$$\delta_i = t_{AB} = mT_c \sin\frac{2\pi(i-0.5)}{n} \quad (5)$$

其中：$m=U_{rm}/U_{cm}$为调制比；T_c为载波周期；$n=f_c / f_r$为频率调制比。本文中每半个正弦波周期内的采样点数为50，故i=1，2，…，50。

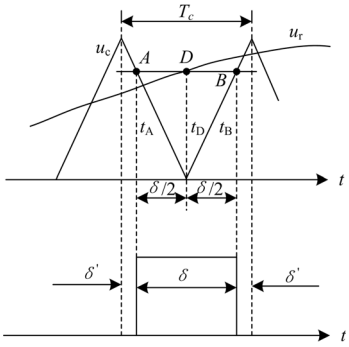

图7 规则采样法原理图

Fig.7 Principle of uniform sampling

由于逆变电路输出电压滤波后的基波幅值随着脉宽 δ_i的变化而变化，所以如果要稳定或调整逆变器的输出电压值，就必须调整脉宽 δ_i。而式（5）表明：要想调整脉宽 δ_i，可以通过调整调制比m来实现。因此，逆变器输出电压的基波幅值可由调制比m来调整。这是本文软件设计的基本思想。

4 系统软件设计

本文软件设计完成的目标是产生 SPWM 信号，控制系统输出的交流电压稳定和实现故障保护功能。主流程如图 8 所示。

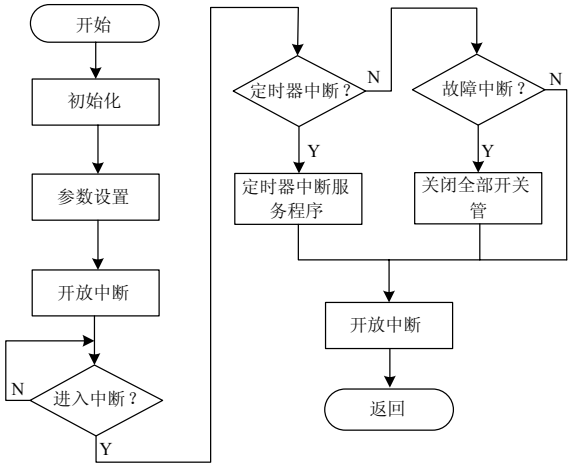

图 8 主流程图

Fig.8 Main program flow chart

由图 8 可见，软件部分主要包括初始化程序、外部中断服务程序和定时器中断服务程序三部分。

初始化程序包括系统时钟初始化、管脚功能初始化、外部中断初始化、定时器初始化以及中断控制初始化。

外部中断服务程序流程如图9所示，它负责过流等故障的处理。由于故障一般是很恶劣的运行状态，为了避免系统反复中断，一旦产生中断则关断PWM输出，并产生声光报警，程序进入死循环。重新启动后才开始工作。

定时器中断服务程序流程如图 10 所示，它负责电压采样控制、数字 PI 调节以及 SPWM 脉冲的产生。对交流输出电压的采样和 PWM 波的调节要在每个开关周期执行一次。本文设计的逆变电路输出电压频率为 50 Hz，功率管的开关频率为 5 kHz，开关周期为 200 μs，则每 200 μs要执行一次波形调节，一个周期调节 100 次。定时器计时到 200 μs时，会产生中断，同时定时器自动清零并继续计时，这样定时器就会以固定的频率来产生中断。

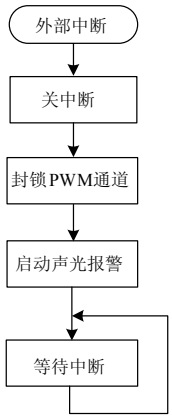

图 9 外部中断服务程序流程

Fig.9 Program flow chart of external interruptions

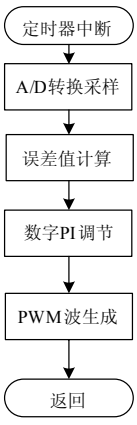

图 10 定时器中断流程图

Fig.10 Program flow chart of timer interruptions

定时器中断服务程序的核心部分是 PWM 生成环节，它的功能是产生与图 6 形状相同的信号，并

在 V_3、V_4 交替导通时设置死区时间。其流程如图 11 所示。图中，i 代表一个正弦周期内的第 i（i=1，2，…，100）个采样点。

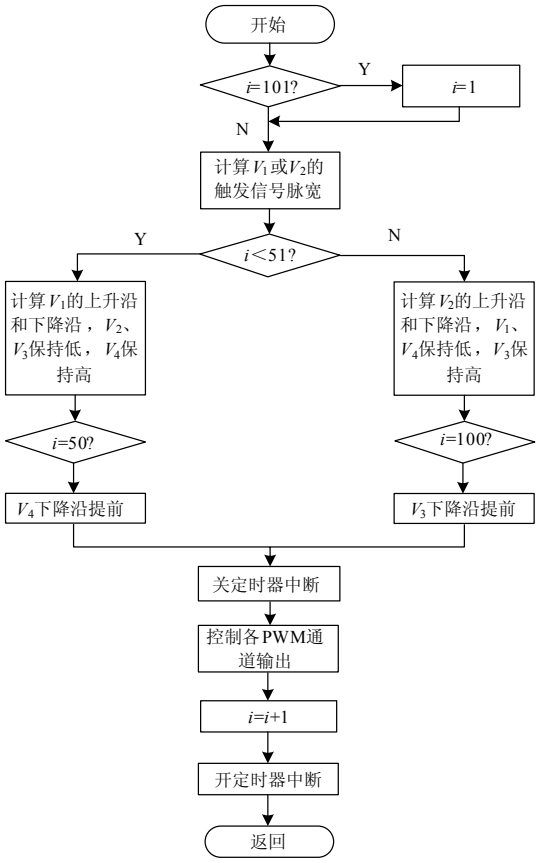

图 11 PWM 生成环节流程图

Fig.11 Flow chart of program generating PWM signals

5　实验研究

本文根据前文所述制作了电能质量信号发生装置的试验样机。结合实验室现有条件，样机容量设定为 35 W，输出交流电压为 70 V，选取 IRFI630 功率场效应晶体管为逆变电路的功率开关器件，驱动电路以 EXB841 为核心。但本文方案同样适用于大功率电能质量信号发生装置的设计。

图 12 和图 13 分别为电压每 60 ms 发生一次持续 40 ms 且幅值变化 28.6%的电压骤升和电压跌落的实验波形；图 14 为持续 1.5 ms 且下降幅值为 43%的电压凹陷；图 15 为每隔 60 ms 发生一次持续 40 ms 的电压短时中断；图 16 为基波叠加 28.6%的三次谐波的实验波形。通过改写程序，样机能输出基波加一定含量的 15 次以下（本文设计的滤波器能滤除 15 次以上的谐波分量）的任意次谐波的波形。

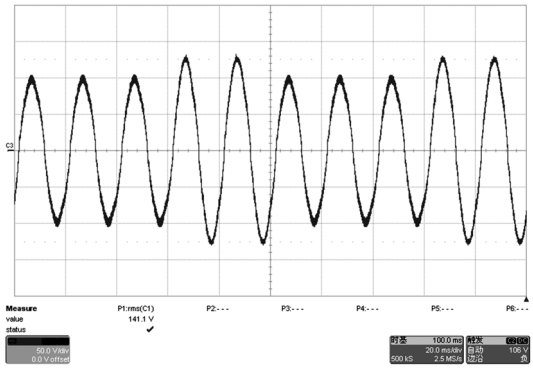

图 12 电压骤升

Fig.12 Voltage swells

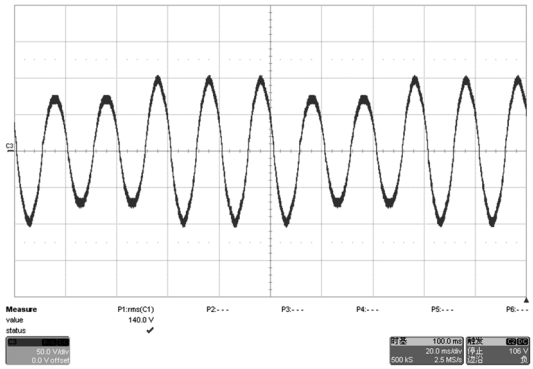

图 13 电压跌落

Fig.13 Voltage sags

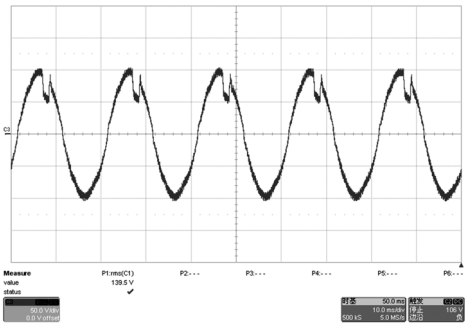

图 14 电压凹陷

Fig.14 Voltage notches

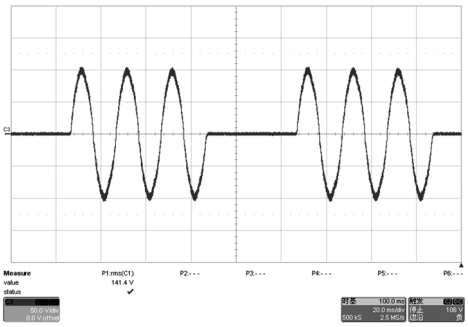

图 15 电压中断

Fig.15 Voltage interruptions

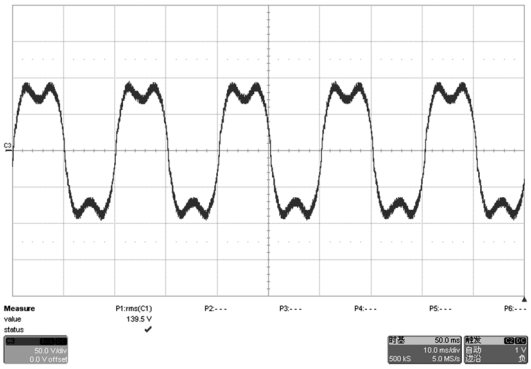

图 16 电压谐波（基波加 28.6%的三次谐波）

Fig.16 Voltage harmonics（AC output containing 28.6% third harmonic）

6 结论

本文提出了一种以电力电子技术作为研究出发点、以大功率高速开关管和 ARM7 控制核心作为硬件基础的电能质量信号发生装置的设计方案。与文献[6]相比，结构简单；与文献[4]相比，容易将功率做大；与文献[7]相比，精度高，通用性好，克服了功能单一的缺点。实验结果表明，本文设计的装置能按照要求输出多种不同类型、不同大小的模拟电网信号，如电压跌落、电压骤升、电压凹陷、电压中断以及电压谐波等，效果理想，可用于实验、教学等场合，从而为电能质量的研究提供需要的干扰波形，有较大的实际意义。本文所述方案同样适用于三相电能质量信号发生装置的设计，具有较好的通用性和拓展性。

参考文献

[1] 蒋平，赵剑锋，唐国庆. 电能质量问题及其治理方法[J]. 江苏电机工程，2003，22（1）：16-18.
JIANG Ping，ZHAO Jian-feng，TANG Guo-qing. Research of the problems of electric power quality and their management methods[J]. Jiangsu Electrical Engineering，2003，22（1）：16-18.

[2] 章艺. 电能质量的分析与测量[J]. 测控技术，2000，19（8）:63-65.
ZHANG Yi. Analysis and measurement of the quality of electric energy[J]. Measurement and Control Technology，2000，19（8）:63-65.

[3] 肖国香，刘进军，王兆安. 电能质量控制技术的发展[J]. 江苏机械制造与自动化，2001（1）：10-13.
XIAO Guo-xiang，LIU Jin-jun，WANG Zhao-an. Development in control technique of power quality[J]. Jiangsu Machine Building and Automation，2001（1）：10-13.

[4] 王笃亭，郑宇平，林庆海. 基于 DSP 的数字式电力系统任意谐波发生器的设计[J]. 仪器仪表用户，2006，13（3）：152-153.
WANG Du-ting，ZHENG Yu-ping，LIN Qing-hai. Design of digital harmonic wave generator based on DSP[J]. Electronic Instrumentation Customer，2006，13（3）：152-153.

[5] Chung Y H，Kwon G H，Park T B，et al. Voltage sag and swell generator with thyristor controlled reactor[C]. //International Conference on Power System Technology. Kunming(China): 2002:1933-1937.

[6] 张香真. 电能质量干扰发生器试验装置的研究[D]. 保定：华北电力大学，2003.
ZHANG Xiang-zhen. Research on power quality disturbances generator testing facility[D]. Baoding：North China Electric Power University，2003.

[7] Collins E R，Jr Morgan R L. A three-phase sag generator for testing industrial equipment[J]. IEEE Transactions on Power Delivery，1996，11（1）：526-532.

[8] 陈剑，廖斌，潘莉，等. 周波跌落模拟器的研制[J]. 电子设计应用，2004，31（3）：19-21.
CHEN Jian，LIAO Bin，PAN Li，et al. Development of the cycle sag simulator[J]. Electronic Design and Application World, 2004，31（3）：19-21.

[9] 周立功，张华，等. 深入浅出 ARM7——LPC213x/214x[M]. 北京：北京航空航天大学出版社，2005.
ZHOU Li-gong，ZHANG Hua，et al. Simple interpretation of ARM7——LPC213x/214x[M]. Beijing：Beihang University Press，2005.

[10] 张青，康勇，陈坚. IGBT驱动模块EXB841剖析[J]. 电气传动，1994（4）：42-44.
ZHANG Qing，KANG Yong，CHEN Jian. Analysis of IGBT drive module EXB841[J]. Electric Drive，1994（4）：42-44.

[11] 邹江峰，张亚迪，吴云亮，等. IGBT及其驱动模块EXB841在混合滤波器设计中的应用[J]. 电源技术应用，2007，10（9）：36-37.
ZOU Jiang-feng，ZHANG Ya-di，WU Yun-liang，et al. Application of IGBT and drive module EXB841 in the hybrid filter design[J]. Power Supply Technologies and Applications，2007，10（9）：36-37.

[12] 高志强，沈煜. 基于DSP的单相特定次谐波抑制型混合电力滤波器的设计[J]. 电气传动，2006，36（12）：32.
GAO Zhi-qiang，SHEN Yu. Design of single phase hybrid power filter for specific harmonic suppression based on DSP[J]. Electric Drive，2006，36（12）：32.

[13] 赵剑锋，王浔，潘诗锋. 大功率电能质量信号发生装置设计及实验研究[J]. 电力系统自动化，2005，29（4）：41-44.

（下转第 149 页 continued on page 149）

调节机组无功，确保相关参数恢复正常水平，保证机组安全稳定运行。

5　优化效果

优化后的安全约束控制策略既确保了电厂的电压安全，又满足了电网的无功调节需求。优化前后 AVC 子站对机组无功调节情况如表 1。

表 1 数据对比

Tab.1 Data comparison

机组参数	优化前		优化后	
	厂用母线电压低闭锁调节时	有功上升后	厂用母线电压低闭锁调节时	有功上升后
P / MW	449	506	456	507
Q / Mvar	−55	−59	−59	−16
U / V	6 050	5 937	6 050	6 052

由表 1 可见，优化前，当发电机的有功出力由低变高时，AVC 装置无法阻止厂用母线电压越过闭锁下限进一步下滑。优化后的 AVC 系统解决了这一问题。

6　结束语

电厂侧子站是 AVC 系统实现电厂本地无功控制调节的装置，它取代了 AVR 的后台控制功能，直接调节发电机组无功。因此，它应在确保发电机组的无功电压安全的前提下，实现电网的无功调节需求。

参考文献

[1] 广东省电力调度中心. 广东电网发电厂 AVC 自动电压控制系统技术规范(试行)[S].2007.
Guangdong Power Grid Dispatching Center. Specification for the construction of AVC substation of power plant of Guangdong power grid trial implementation[S]. 2007.

[2] 李钦，温柏坚. 广东电网电厂 AVC 子站建设研究[J]. 电力系统保护与控制，2008，36（21）：38-42.
LI Qin，WEN Bai-jian. Research of the construction of AVC substation of power plant of Guangdong power grid[J]. Power System Protection and Control，2008，36（21）：38-42.

[3] 张继芬，危剑鸣，杨耿杰，等. 电网自动电压控制在大型火电厂的设计与实现[J]. 电力设计，2005（1）：60-65.
ZHANG Ji-fen，WEI Jian-ming，YANG Geng-jie，et al. Design and realization of automatic voltage control for power plant[J]. Electric Power Survey & Design，2005（1）：60-65.

[4] 唐建惠，张立港，赵晓亮. 自动电压控制系统(AVC)在发电厂侧的应用[J]. 电力系统保护与控制，2009，37（4）：32-35.
TANG Jian-hui，ZHANG Li-gang，ZHAO Xiao-liang. Application of the auto-voltage-control in power plants[J]. Power System Protection and Control，2009，37（4）：32-35.

[5] 雷春明，张晓东. 华能岳阳电厂AVC在DCS中的实现[J]. 华中电力，2007，20（3）：57-59.
LEI Chun-ming，ZHANG Xiao-dong. The practice of AVC based on the DCS of Huaneng Yueyang power station[J]. Central China Electric Power，2007，20（3）：57-59.

收稿日期：2009-12-31；　修回日期：2010-04-18

作者简介：

谢　锋（1971−），男，工程师，工学硕士，主要从事发电厂电气设备维护工作；Email：xiefeng001@126.com

王学民（1971−）男，工程师，本科，主要从事电力系统及其自动化工作。

（上接第 142 页　continued from page 142）

ZHAO Jian-feng，WANG Xun，PAN Shi-feng. Design and experimental study of high-power power quality signal generator[J]. Automation of Electric Power Systems，2005，29（4）：41-44.

[14] 王兆安，黄俊. 电力电子技术[M]. 北京：机械工业出版社，2000.
WANG Zhao-an，HUANG Jun. Power electronics[M]. Beijing：China Machine Press，2000.

收稿日期：2009-09-09

作者简介：

谢　倩（1988−），女，硕士研究生，研究方向为电力电子技术及其在电力系统中的应用；E-mail: susyqian@163.com

陈劲操（1956−），男，教授，研究方向为电能质量控制及测试技术。