

谐波治理技术现状及其发展

罗 安, 吴传平, 彭双剑

(湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘 要: 从谐波主动治理、谐波被动治理两方面介绍了经典的谐波抑制技术, 分析和比较了谐波被动治理技术中的各种谐波检测、谐波控制算法; 并讨论了当前谐波治理技术的新进展, 阐述了谐波治理技术的发展趋势。

关键词: 谐波治理技术; 有源电力滤波器; 无源电力滤波器; 电能质量; 发展趋势

中图分类号: TN713; TM712

文献标识码: A

文章编号: 1671-8410(2011)06-0001-05

State of Harmonic Compensation Technology and Its Development

LUO An, WU Chuan-ping, PENG Shuang-jian

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)

Abstract: The classical harmonic suppression technologies are described from the two aspects of active harmonic suppression and passive harmonic suppression. Some main harmonic detection and harmonic control methods are analyzed and compared. Then the new technologies of harmonic suppression are discussed. Finally, the development trends of harmonic suppression technologies are stated.

Key words: harmonic compensation technology; active power filter; passive power filter; power quality; development trends

0 引言

电力系统中发电、输电、配电、用电4个环节都可能产生谐波, 如发电机三相绕组不对称、变压器铁心饱和等因素引起谐波, 但是主要谐波源还是来自用电环节, 如电弧炉、整流器、变频器等非线性负载的大量使用^[1-2]。谐波问题不仅增加了发、输、供和用电设备的附加损耗, 使设备过热, 降低设备的效率和利用率, 而且影响继电保护和自动装置的工作和可靠性, 使测量和计量仪器的指示和计量不准确, 干扰通信系统的正常工作。

为了提高电网供电的电能质量, 减少谐波污染, 人们早期利用结构简单、成本低的无源电力滤波器来抑制谐波, 但是它的缺点也相当明显, 如滤波性能受电网阻抗和频率影响严重、与电网阻抗易发生串/并联谐波。

20世纪70年代, 有源电力滤波器的概念、基本原理、拓扑结构和控制方法被提出来, 标志着谐波治理技术进入新的发展阶段。1983年, 日本长冈科技大学的Akagi H等人提出了基于 pq 分解理论的三相电路瞬时无功率理论, 为解决三相电力系统畸变电流的瞬时检测提供了理论依据, 促进了有源电力滤波器的工业应用。

我国在20世纪80年代末开始研究谐波治理技术, 进展较快, 目前在理论、技术与工程应用方面取得了丰富的研究成果与现场应用经验。谐波治理技术分为主动谐波治理技术和被动谐波治理技术, 前者从谐波源本身出发抑制谐波的产生; 后者通过配置额外谐波治理装置来实现谐波治理。

1 主动谐波治理技术

主动谐波治理是从谐波源本身出发, 使谐波源不产生谐波或降低谐波源产生的谐波。主动治理谐波的措施主要有:

(1) 采用脉冲宽度调制(Pulse Width Modulation,

收稿日期: 2011-10-08

作者简介: 罗安(1957-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事先进电能质量控制技术的教学与科研工作。

PWM)技术^[3-5]。PWM技术使得整流器产生的谐波大大降低,输入波形接近正弦波。PWM整流电路模型如图1所示,PWM整流器具有降低整流负载注入电网谐波和提高网侧功率因数等优点。

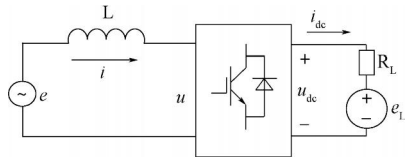


图1 PWM整流电路模型
Fig. 1 Circuit model of PWM converter

(2)增加变流装置的相数或脉冲数^[6]。改造变流装置或利用相互间有一定移相角的换流变压器,可有效减小谐波含量,其中包括多脉整流和准多脉整流技术。十二脉波整流电路如图2所示。

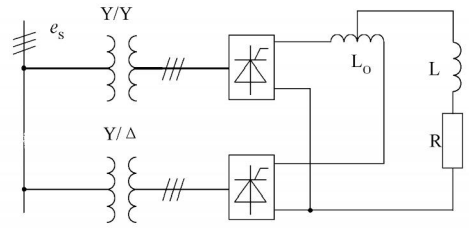


图2 十二脉波整流电路
Fig. 2 Twelve-pulse AC-DC converter

(3)高功率因数变流器。比如采用矩阵式变频器^[7]、四象限变流器等,使变流器产生的谐波减少。矩阵变换器的结构图如图3所示。

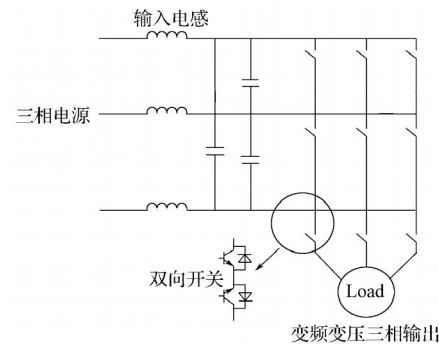


图3 矩阵变换器拓扑图
Fig. 3 Topology of matrix converter

2 被动谐波治理技术

2.1 谐波治理装置

主动治理通过改进电力电子装置的控制方式,减少其谐波的产生,而被动治理则是通过安装电能质量治理装置来抑制谐波对电网的危害。目前常用的电能质量装置有:

(1)无源电力滤波器(Passive Power Filter PPF),PPF可以吸收谐波电流,同时还可以进行无功功率补偿。

PPF又称LC滤波器,是传统的谐波补偿装置,它是由谐波电容器和电抗器组合而成的滤波装置,与谐波源并联。通常在谐波源附近或公用电网节点装设单调谐及高通滤波器,这样不仅可以吸收谐波电流,同时还可以进行无功功率补偿,运行维护也简单,因而PPF得到广泛的应用。

(2)有源电力滤波器(Active Power Filter APF),APF可以有效地起到补偿或隔离谐波的作用,并联型APF还可以进行无功功率补偿^[8]。并联型APF结构图如图4所示。与PPF相比,APF具有以下一些优点:滤波性能不受系统阻抗的影响;不会与系统阻抗发生串联或并联谐振,系统结构的变化不会影响治理效果;原理上更优越,用一台装置就能完成各次谐波的治理;实现了动态治理,能够迅速响应谐波的频率和大小发生的变化;具备多种补偿功能,可以对无功功率和负序进行补偿。

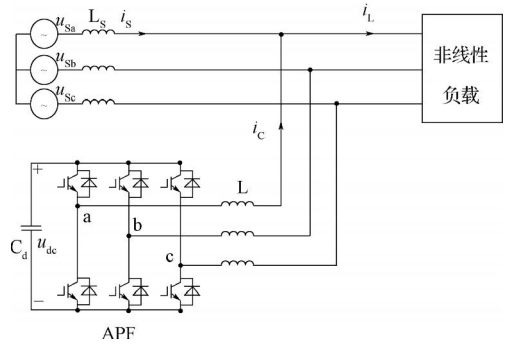


图4 APF结构原理图
Fig. 4 Topology of APF

(3)混合型有源电力滤波器(Hybrid Active Power Filter ,HAPF)。HAPF兼具PPF成本低廉和APF性能优越的优点,很适合工程应用^[9]。注入式HAPF由于注入支路的存在大大降低了有源部分的容量,使其能适用于高压配电网,并能同时实现无功补偿和谐波治理^[10]。注入式混合型有源电力滤波器的拓扑结构如图5所示。

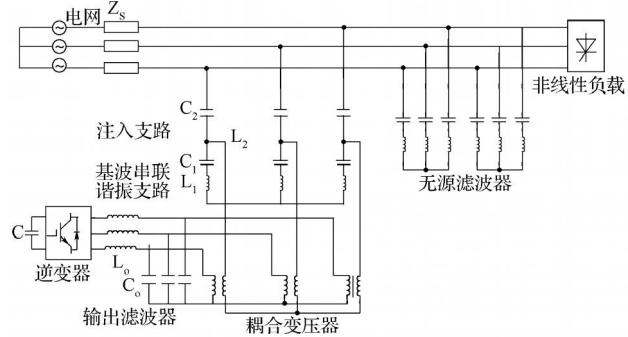


图5 HAPF拓扑结构
Fig.5 Topology of HAPF

(4)统一电能质量调节器(Unified Power Quality Conditioner ,UPQC),UPQC由串联型APF和并联型APF

组合而成,两个APF共用直流侧电容,如图6所示。串联型APF经串联变压器输出补偿电压,向电网注入交流功率,同时并联型APF也可以输出谐波补偿谐波电压。当并联型APF的变流器工作在整流状态对蓄电池进行充电时,也可以同时向电网输出滞后的或超前的无功功率,还可以输出谐波补偿电流。

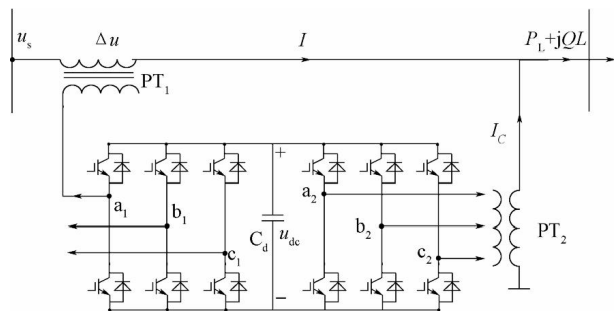


图6 统一电能质量调节器
Fig. 6 Topology of UPQC

HAPF和UPQC都属于APF的分支和发展。

2.2 谐波检测方法

谐波检测方法的实时性和精度影响有源电力滤波器的谐波治理效果。常见的谐波检测方法主要有：

(1)传统的傅立叶FFT算法。采用快速傅立叶变换,从变换后的电流信号中除去基波分量,再对余下分量进行反变换,即可得到谐波电流的时域信号。

(2)改进的傅立叶级数法。其理论依据是通过傅立叶变换计算电流基波分量,从负载电流中减去基波分量。具体做法是：通过修改主傅立叶级数方程,得到一个具有滑动窗口的回归方程,采用两个不同的循环序列来存储每个采样子周期计算的正余弦系数,新值覆盖老值,正余弦部分的总和也连续地被更新^[11]。

(3)FBD检测法^[12]。在这种方法中,把实际电路中的各相负载等效为串联在各相的等值电导,电路中的功率都消耗在这个等值电导上,没有其他的能量损失。根据等值电导对电流分解,可计算出需要补偿的电流分量。

(4)瞬时无功功率法。利用三相至两相变换的思想,将三相电压和电流变换至两相正交系统,从而计算出瞬时有功和无功功率;通过低通滤波后,得到直流分量,经变换可得到两相基波电流,再通过两相至三相反变换后,即得到基波电流,将总电流减去基波量,就可以得到谐波电流信号。

(5)同步测定法。该方法计算系统平均功率,并按一定的规则在三相内平均分配。它又可分为等功率法、等电流法和等电阻法,即把补偿分量分配到三相去,分别使补偿后的每相功率、电流或电阻相等。补偿后的电

流均为与相电压同相位的正弦波,基本消除了无功和谐波成分,并且采用同步测定法的3种途径,还可以校正功率因数,减少线路损耗,平衡线路电流。

从延时长短、计算复杂程度等方面比较了5种谐波检测方法的性能特点,如表1所示。

表1 各种谐波检测方法比较

谐波检测算法	特点
传统的傅立叶FFT算法	如果电网谐波在检测周期里有较大的波动,则会引起较大的检测误差;另外这种分析方法的延时太长。
改进的傅立叶级数法	计算时间较短,用于单相系统时更快。但需要严格的同步采样,否则有较大的计算误差
FBD法	实时性好,利用电导的定义,省去了三相-两相坐标变换环节,计算简单。
瞬时无功功率法	其优点是物理意义明确,当电网电压对称且无畸变时,各电流分量(基波正序无功分量、不对称分量和高次谐波分量)的检测电路比较简单。
同步测定法	需要进行较多的计算,时间延时较大,这些都大大地限制了它的应用范围。

2.3 谐波控制策略及其控制方法

根据控制量不同,APF谐波控制策略可分为负载谐波控制、电源谐波控制和复合控制3种^[8]。负载谐波控制策略以负载谐波电流作为控制量,这种控制方式的指令电流运算电路的输入信号来自负载电流,这是APF最基本的一种控制方式。电源谐波控制策略以电源谐波电流作为控制量,也就是控制有源电力滤波器发出相应补偿电流,最终使得电源电流成为正弦波,因此可检测电源电流,运用指令电流运算电路求出其中的谐波电流,将其作为指令电流对有源电力滤波器进行控制。将上述两种控制方式结合起来就得到复合控制方式,这种控制方式下,可对负载中的谐波电流进行较好地补偿,而且使系统具有更好的动态性能和稳定性。

APF治理谐波的性能除了跟谐波检测方法和控制策略有关外,电流控制方法的选取也起到决定性作用,常用电流控制方法主要有：

(1)线性电流控制。线性电流控制也叫正弦—三角形电流调节器或斜坡比较电流调节器,它适用于大量应用场合,尤其适用于中、低性能的传动,而且它的性能随着现代功率器件开关频率的增加而得到很大地改善。它的优点比较突出,即器件开关频率固定、控制简单、对负载参数不敏感及具有较强鲁棒性,但是含有开关频率整数次谐波。

(2)电流滞环控制。电流滞环控制是一种瞬态反馈系统,实现逆变器的输出电流跟随给定电流。它具有响应速度快,但是控制精度受环宽影响。

(3)无差拍控制。无差拍控制是根据APF的电路模型和微分方程,求出功率开关的导通时间,使得控制周

期的下一拍的电流输出等于电流参考指令,即实现无差拍控制。它数字实现简单,但受电路参数影响较大。

3 谐波治理新技术

随着工业生产过程越来越复杂,工业负载引起的不再是单一的谐波问题,需要在抑制谐波的时候补偿大量无功功率、抑制电压闪变,同时,电力电子技术的发展也促进了谐波治理新技术的涌现。

(1)工业整流负载设计与补偿一体化技术,包括:

a.高压侧整流系统补偿技术。在进行工业整流负载设计时,一方面尽量降低负载谐波含量和提高功率因数,另一方面考虑谐波与无功综合补偿,补偿方案示意图如图7所示。此种技术的特色是有载调压使整流装置触发角处于较小状态,提高功率因数,构成12脉波降低谐波。b.低压侧整流系统补偿技术。针对电解电镀用的大功率高频开关电源,前级整流结构一般采用不可控整流或者晶闸管相控整流方式,引起大量谐波,严重污染电网。传统解决方案是在公共母线侧安装无源滤波器组,一般安装谐波含量较高的5次、7次、11次、13次滤波器等,来滤除谐波、补偿一定数量的无功功率。该无源电力滤波方式具有体积大、成本高、不可控的缺点,滤波能力有限,但是其简单、可靠。现在的解决方案是采用高频PWM整流器替代不可控整流。为电解电镀提供直流电源,可有效降低网侧电流的谐波含量,提高功率因数。

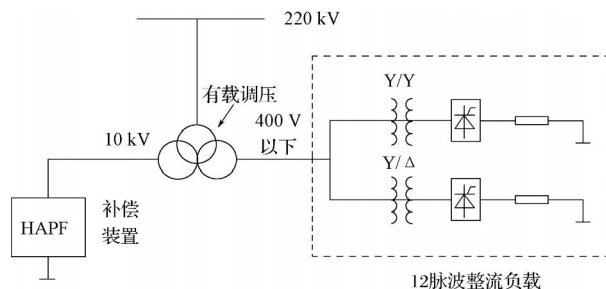


图7 工业整流负载设计与补偿一体化技术示意图

Fig. 7 Diagram of the load design and compensative united technology for industrial rectifier

(2)高压配电网谐波与无功综合动态补偿技术^[13]。

在高压配电网,混合型有源电力滤波器HAPF能进行谐波动态补偿,但无法进行大容量无功连续补偿;含晶闸管控制电抗器(Thyristor-Controlled Reactor, TCR)的静止无功补偿器(Static Var Compensator, SVC)能进行无功连续补偿,但会产生额外谐波。为此,由HAPF与SVC组成的综合补偿系统被提出来同时实现谐波和无功动态补偿功能,其结构如图8所示。TCR与PPF实现无功动态补偿, HAPF治理负载谐波和TCR产生的谐波电流,

实现谐波动态治理^[6]。

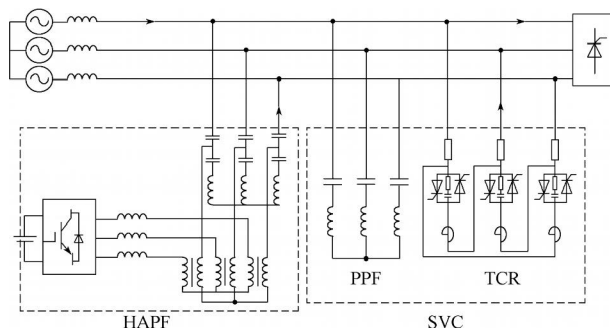


图8 HAPF与SVC联合补偿系统

Fig. 8 Combined compensation system of HAPF and SVC

(3)电气化牵引供电系统综合补偿技术^[14-15]。普通电气化铁路电能质量的主要特点是负序含量大、谐波含量丰富、功率因数低、电压波动大。集有源电力滤波器、静止同步补偿器(STATCOM)、PWM变流器(整流-逆变)功能为一体的综合补偿装置,如电气化铁路功率调节器(Railway Static Power Conditioner, RPC),能实现负序、谐波和无功综合补偿。RPC结构图如图9所示。

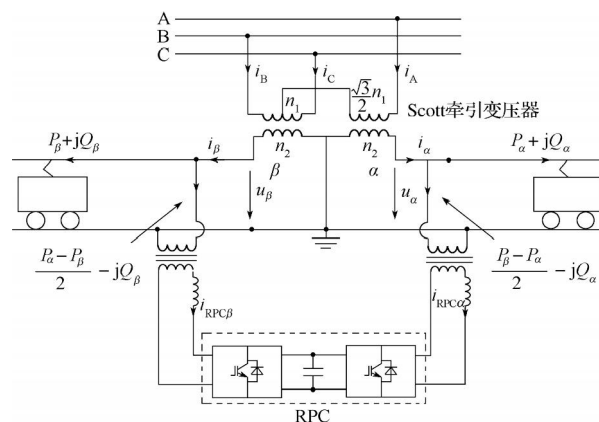


图9 RPC结构图

Fig. 9 Topology of RPC

(4)有源电力滤波器多重化技术^[16]。在低压配电网某些大功率应用场合,单个有源电力滤波器由于功率开关管的电流等级限制,无法实现大容量的谐波治理。APF并联不仅可提高容量,并且可提高等效开关频率,因而对单个开关器件的工作频率要求降低。两个APF并联运行的电路图如图10所示。

(5)多电平有源电力滤波器^[17-18]。在6 kV及以上中高压配电网大功率场合,APF由于功率开关器件电压等级限制,不能直接接入中高压配电网。因此,级联型多电平有源电力滤波器被提出,如图11所示。级联型多电平逆变器与箱位型多电平逆变器(二极管箱位型、飞跨电容箱位型)相比,具有以下优点:当输出电平数量相同时,所需要的功率器件比较少;容易实现模块化,易于扩展;基于低压小容量逆变器级联的组合方式,技术

比较成熟,容易实现。

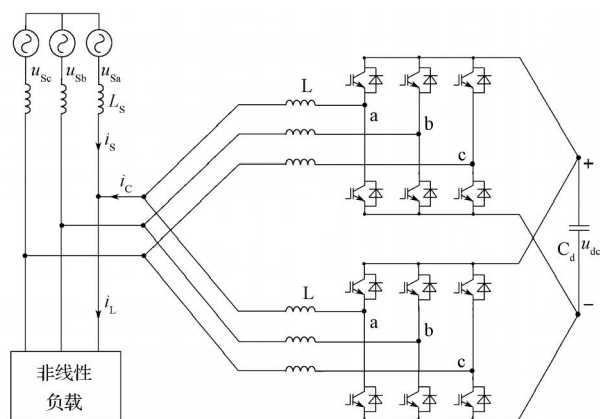


图 10 多重化 APF 结构图

Fig. 10 Topology of multiple APF

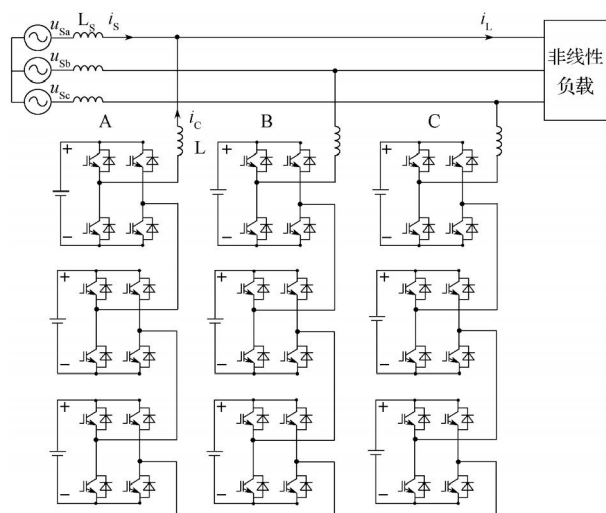


图 11 级联型 APF 结构

Fig. 11 Topology of cascade APF

4 谐波治理技术的发展趋势

工业供电质量要求越来越高、大量分布式发电接入电网、智能电网的建设和发展等因素赋予了谐波治理技术新的发展方向和内容,主要体现在以下6个方面:

(1) 谐波抑制将在谐波源处进行消除。谐波主动治理技术将会得到越来越多的重视,很多工业负载在进行规划时将采取合适的低谐波技术方案,以降低谐波带来的负面影响,以及治理谐波带来的额外成本。

(2) 中高压谐波抑制技术的进步及应用。目前我国低压配网(380 V)侧的谐波抑制技术已进入工业实用化进程,相关技术逐渐成熟。但在6 kV、10 kV等中高压配网的谐波治理技术的应用研究还须进一步完善,特别是输电系统的谐波抑制技术。

(3) 谐波抑制技术的工业化进程。谐波抑制技术的核心是电力电子器件的控制技术,而电力电子器件的

安全和可靠运行是先进谐波抑制装置工作的前提。由于工业现场环境恶劣,功率开关器件工作频率较高,电力电子器件可靠性的分析变得较为复杂。因此,电力电子装置在工业应用中的可靠性及其抗干扰设计方法值得进一步深入研究。

(4) 高次谐波抑制技术。由于有源电力滤波器输出频率带宽的限制,目前高次谐波抑制技术主要采用无源电力滤波器进行滤除。在PWM整流方式的工业场合(如高速铁路牵引供电系统),开关频率整数次及其他高次谐波含量较突出,容易引起谐振现象。由此带来高次谐波的有源抑制技术的研究。

(5) 新能源分布式发电带来的谐波污染。随着新能源分布式发电系统的建设与发展,在一定程度上缓解了负荷快速增长给集中发电机组建设的压力,同时也给电网的运行和调度及电能质量带来了一些影响,太阳能、风能分布式发电系统的谐波分布特性及其谐波治理技术有待深入探讨。

(6) 谐波抑制技术与智能电网。智能电网已被提升到国家能源战略高度,电能质量及电能可靠性作为智能电网的重要内容,谐波治理技术在智能电网中将大有作为,智能电网中的谐波抑制新技术值得深入研究与创新。

5 结语

(1) 谐波抑制技术的基础理论已形成,谐波抑制领域涌现了众多理论成果。拓扑结构、建模分析、谐波检测、控制方法、系统参数设计、稳定性分析等方面已取得了丰富的理论成果,为谐波抑制技术的实用化奠定了良好的基础;

(2) 加强谐波治理技术装备化进程。当前先进谐波治理技术应用仅侧重于配电网低压系统,中高压系统的有源滤波谐波治理装置的工程应用有待进一步推动和发展;

(3) 新时期出现新的谐波抑制问题,需要多学科知识交叉融合。电力电子技术的进步与发展,将出现新的谐波源,则新的谐波抑制技术有待于挖掘。分布式发电系统的谐波、智能电网的谐波问题等需要深入研究,谐波抑制技术需要多学科知识交叉融合,发现与研究新的谐波治理理论与技术。

参考文献:

- [1] 罗安. 电网谐波治理和无功补偿技术及装备[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [2] 郎维川. 供电系统谐波的产生、危害及其防护对策[J]. 高压技术, 2002, 28(6): 30-31, 39.

(下转第9页)

态均压性能,我们进行了均压实验。在6组晶闸管串联的高压软起动器中施加交流3 000 V电压,并通以有效值为400 A的电流,测量同相晶闸管端电压。图7所示为C相3组晶闸管的端电压。实验证明,被测高压软起动器有着良好的动态均压性能。

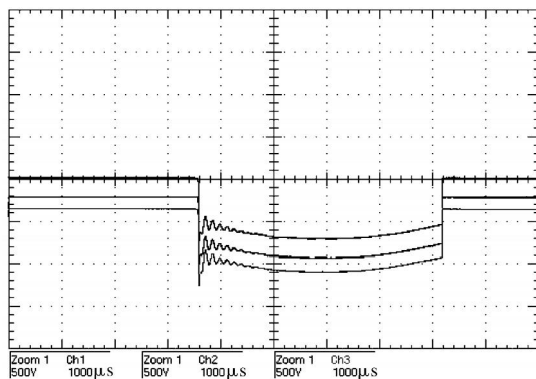


图7 C相3组晶闸管的端电压波形

Fig. 7 The voltage waveform of three groups of thyristors in phase C

4 结语

本文介绍了一种高压软起动器的光电触发系统,重点介绍了其门极驱动电路、晶闸管状态检测电路和取能电路,并针对触发脉冲性能对于高压晶闸管阀的影响、RC吸收网络对于触发的影响进行了讨论。实验结果证明了其可行性与可靠性。该系统在中国南车的高压软起动器产品中得到了批量应用,取得了良好的社会效益。

参考文献:

- [1] 杨杰. 29 kV高压晶闸管阀触发系统隔离技术和晶闸管过电压保护方法[J]. 机车电传动, 2000(2): 23-26.
- [2] 张斌. 高压晶闸管阀在牵引供电网自动过分相中的应用研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2003.
- [3] 蒋家久. 中压交流电机软启动技术问题探讨[J]. 机车电传动, 2004(3): 8-11.

(上接第5页)

- [3] 杨德刚, 刘润生, 赵良炳. 三相高功率因数整流器的电流控制[J]. 电工技术学报, 2000, 15(2): 83-87.
- [4] 裴迅, 方宇, 王儒, 等. 三相高功率因数电压型PWM整流器控制策略[J]. 电工技术学报, 2008, 23(11): 96-102.
- [5] 陈瑶, 董亦斌, 金新民. 基于PWM整流器的SVPWM谐波分析新算法[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(13): 76-80.
- [6] 高格, 傅鹏. 可控并联十二脉波四象限运行整流电源的研制[J]. 电工技术学报, 2004, 19(4): 16-20.
- [7] 朱建林, 张建华, 郭有贵, 等. 过调制矩阵变换器的电压传输特性及谐波分析[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(10): 110-113.
- [8] 王兆安, 杨君, 刘进军, 等. 谐波抑制与无功功率补偿[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [9] 李圣清, 何伟华, 罗飞, 等. 串联混合型有源电力滤波器对三相负载谐波源补偿特性的研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(34): 115-119.
- [10] 涂春鸣, 罗安, 汤赐, 等. 注入式混合型有源电力滤波器的控制算法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(24): 52-58.
- [11] 祁才君, 陈隆道, 王小海. 应用插值FFT算法精确估计电网谐波参数[J]. 浙江大学学报, 2003, 37(1): 112-116.
- [12] 王杰, 郑建勇, 梅军, 等. 基于FBD法的谐波检测方法和低通滤波器的优化设计[J]. 电测与仪表, 2010, 47(7): 50-55.
- [13] Luo An, Shuai Zhikang, Zhu Wenji, et al. Combined System for Harmonic Suppression and Reactive Power Compensation[J]. IEEE Trans. on Ind. Electron, 2009, 56(2): 418-428.
- [14] 吴传平, 罗安, 徐先勇, 等. 采用V/v变压器的高速铁路牵引供电系统负序和谐波综合补偿方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(16): 111-117.
- [15] 皮俊波, 姜齐荣, 魏应冬. 一种基于链式结构UPQC的电气化铁路同相供电方案研究[J]. 电力设备, 2008, 9(10): 4-9.
- [16] Asiminoaei L, Aeloiza E, Enjeti P N, et al. Shunt active-power-filter topology based on parallel interleaved inverters[J]. IEEE Trans. on Ind. Electron, 2008, 55(3): 1175-1189.
- [17] Xiao P, Venayagamoorthy G K, Corzine K A. Seven-level shunt active power filter for high-power drive system[J]. IEEE Trans. on Power Electron., 2009, 24(1): 6-13.
- [18] 刘庆丰, 王华民, 冷朝霞, 等. 采用波形合成法的级联型多电平逆变器谐波控制[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(6): 69-73.