

ITER 高压大功率整流器控制系统的优化设计

黄连生, 傅鹏

(中科院等离子体物理研究所, 合肥 230031)

摘要: 为了满足 ITER 高压大功率整流器对控制精度、快速响应及高可靠性的要求, 对控制系统进行优化设计。从同步处理、移相控制及同步触发 3 个关键环节对控制系统进行优化: 使用直接耦合同步方法, 提高同步精度, 由此提高了整流器开环控制精度; 基于高速 cPCI 总线传输控制信号及高速 DSP 作移相处理单元, 提高了系统的动态响应特性及系统集成度; 采用高同步性的光触发技术, 提高了整流器的均流性能。对该控制系统做了长期测试, 验证了控制系统的优良性能及高可靠性。

关键词: 整流器; 同步信号; cPCI 总线; 实时网络; 反射内存; 同步触发

中图分类号: TL62, TL62+3 文献标志码: A 文章编号: 1003-6520(2010)07-1785-07

Optimization Design of Control System of ITER High-voltage Power Converter

HUANG Lian-sheng, FU Peng

(Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: In order to meet the requirements of the control precision and fast response and high reliability of ITER high voltage high power rectifiers, the design of control system was optimized. We discussed the optimization design of control system by optimizing phase reference and phase shifting control and synchronous triggering: direct coupling synchronization improved the accuracy of synchronization and the open loop control accuracy; the cPCI bus based control signal and high speed DSP based phase shift process unit improved the dynamic response of the system and integration rate of system; high performance synchronization with laser trigger technology enhanced the current sharing performance of the rectifier. Long time test application to this control system verifies the excellent performance and high reliability of the mentioned control system.

Key words: SCR; phase reference; cPCI bus; real time network; RFM net; synchronous triggering

0 引言

ITER(international thermonuclear experimental reactor)是多国合作的国际可控热核聚变研究项目^[1], 中国、欧盟、印度、俄罗斯、日本、韩国和美国于 2006 年正式签署合作协议, 使 ITER 项目进入具体实施阶段。ITER 高压大功率整流器系统接至高压电网, 由此向极向场环节、等离子电流产生、位形控制和加热驱动等脉冲性负载提供能量^[2,3]。

目前在整流装置采用的控制方案是模拟控制与数字控制相结合, 复杂控制算法在工业计算机内实现, 移相控制则通过模拟装置完成, 触发信号采用大功率功放管放大后并联触发。这种方案在 EAST 装置成熟应用, 但存在控制精度不高, 系统结构复杂、集成度低, 超导线圈相互耦合导致晶闸管开通不可靠等问题。因此, 本文需要对控制系统重新优化设计, 设计结构简单、集成度高、能适应复杂电磁环

境同时满足 ITER 系统性能指标的控制系统的, 以适应 ITER 大功率整流器的对控制精度、响应速度及高可靠性需求。

1 ITER 整流器

ITER 高压大功率整流器设计输出功率 90 MW, 结构如图 1 所示, 采用 6 英寸晶闸管作为开关器件, 每个桥臂由 8 个晶闸管并联使用以提高电流输出能力及过载能力。整流变压器原边电压 69 kV, 副边线电压 1.38 kV。整流器采用 4 象限有环流运行模式, 输出直流电压 ± 2 kV, 输出直流电流 ± 45 kA。整流器负载是相互耦合的超导线圈, 属于典型的大电感、强耦合负载。

2 直接耦合同步方案

2.1 同步方案的优化

晶闸管相控整流器采用移相控制技术, 移相控制的前提是准确获取三相线交流电压的自然过零点。针对移相过零点获取即同步处理, 已经提出过很多中处理方法^[4-6]。目前工业界普遍采用三相同步变压器按规定组别接至整流变压器原边实现同步

基金资助项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2007ID200)。

Project Supported by National Basic Research Program of China (973 Program) (2007ID200)。

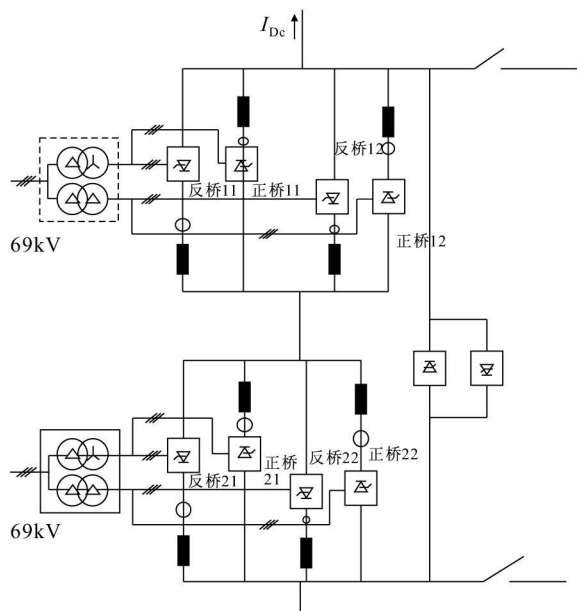


图1 ITER整流器结构

Fig. 1 Structure of ITER converter

的同步方案。

利用三相同步变压器可以获得稳定的同步信号,但是存在同步精度不高、需要人工定相的问题。特别是在整流器输出大电流情况下,由于整流变压器漏感及母排电感,会导致同步电压与整流桥进线电压相位发生较大偏移。如果直接从整流变压器副边、整流器进线端获取同步信号,同步相位不受变压器漏感及进线电感的影响,因此要获得高的同步精度必须从整流桥交流进线端获取同步。

2.2 直接耦合同步实现

直接从整流桥进线端获取同步信号,见图2。该点获取同步具有一下特点:同步信号基波相位准确,但谐波含量大,同步电压值高。针对直接耦合同步存在上述特点,优化设计了同步信号处理单元,同步单元工作原理见图3。同步处理由补偿分压、带通滤波、过零比较、光信号输出4个单元组成。

1) 补偿分压单元:用于直接从高压处获取峰峰值为 $[+5\text{V}, -5\text{V}]$ 的低压交流信号,补偿分压需要控制元件参数精度在0.1%,以提高分压精度。

2) 带通滤波:用于滤除谐波,设计中心频率为50 Hz,通带为47~53 Hz,具体滤波器设计参考文献^[7-10]。所设计的滤波器取得优良的滤波效果,同步测试波形如图4所示。

3) 过零比较:将滤波后的三相交流同步信号进行过零比较处理,产生3个频率为50 Hz,占空比为50%的同步脉冲。

4) 光信号输出:将过零比较产生的同步脉冲信号转换为光脉冲信号输出,进入控制系统。采用这

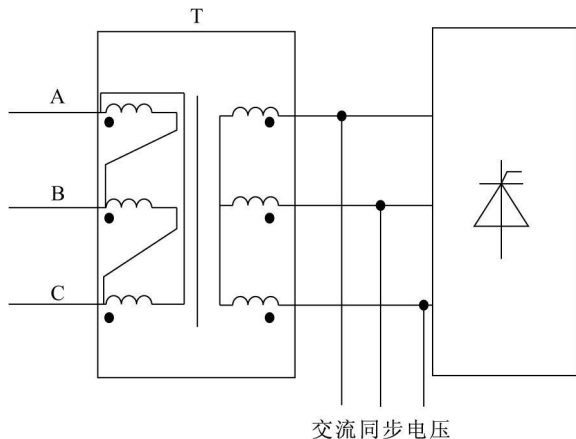


图2 直接耦合同步

Fig. 2 Secondary phase reference

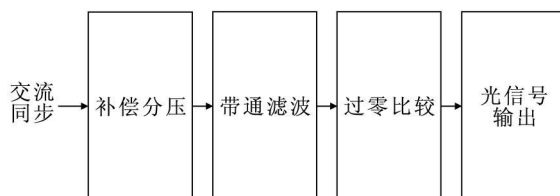
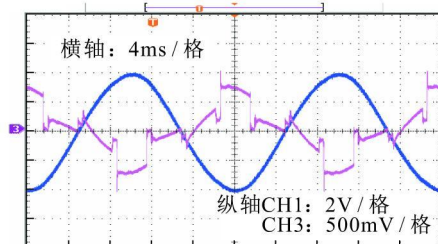
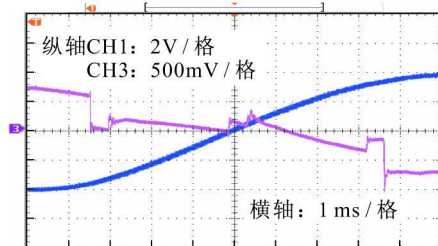


图3 同步处理原理

Fig. 3 Scheme of secondary phase reference



(a) 整流输出电流15kA条件下滤波效果



(b) 同步过零点

注: CH3为滤波器输入信号,该信号来自整流桥进线端;CH1为滤波器输出信号,标准同步信号

图4 同步测试

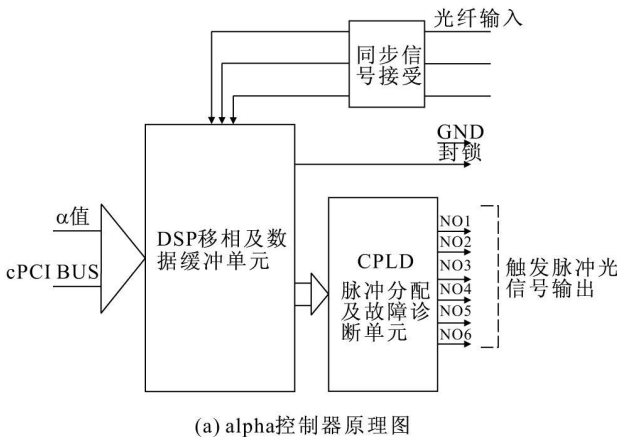
Fig. 4 Testing of phase reference

种方案可将同步点的高压与控制系统的低压完全隔离,保证控制系统安全。

3 基于 cPCI 总线技术的控制系统

3.1 基于 cPCI 总线的 alpha 控制器

移相控制的核心是将控制输出量转变成触发脉冲, 这种触发脉冲包含了以同步过零点为起点的角度值。基于 cPCI 总线技术^[11,12]的 alpha 控制器原理如图 5 所示, 数字 alpha 控制器有以下核心部分:



(a) alpha 控制器原理图

1) cPCI 总线接口: 采用 cPCI 32 位总线标准, 实现控制量的快速传输, 设计传输控制量仅需要一个 cPCI 指令, 传输延时 $\leq 5 \mu s$ 。

2) 高速 DSP 移相: 采用 TI 公司 150 MPS 的高速 DSP 芯片 TMS320F2812 作为移相单元, 单元内采用计数器计数方式作移相控制, 控制角与计数值的关系为 $\alpha = \frac{N}{M} \times 180^\circ$, 其中 M 是 $10 \text{ ms} (180^\circ)$ 的总计数值, N 是对应某一 α 值下的计数值。DSP 总过数据缓冲电路接收来自 cPCI 总线的控制数据, 一个控制数据 32 位, 包涵了 α 值、脉冲封锁、控制模式、上位计算机程序状态等信息, DSP 将此信息解析后输出相应的控制脉冲或进行脉冲封锁。

3) 同步信号接收: 通过光纤接收器接收光同步信号, 对同步信号需要做相序鉴别、脉冲变换等处理, 输出给 DSP 做定时器的启动信号。

4) 脉冲分配及故障诊断单元: 设计逻辑电路, 对 DSP 输出的窄脉冲信号进行展宽及高频调制到 $15 \sim 20 \text{ kHz}$, 通过功率放大由光纤输出。同时设计逻辑电路来监视 DSP 状态, 并监视输出脉冲, 保证不丢脉冲、乱脉冲。一旦发生上述故障立即做故障处理, 封锁脉冲输出, 同时产生一故障信号输出。

常用的模拟 alpha 移相控制器采用电压量作为控制信号, 采用压控振荡及倍频锁相等技术产生触发脉冲信号。因此模拟 alpha 控制器可用一个惯性环节及纯滞后环节表示为

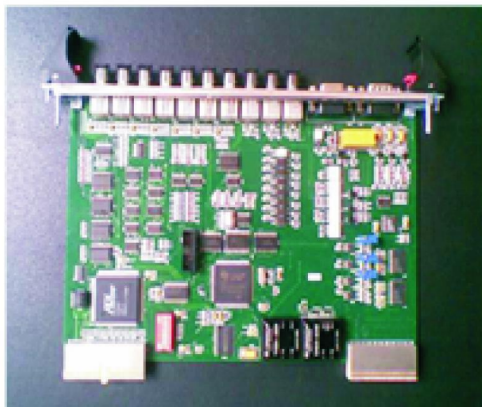
$$G_{\text{alpha}}(s) = \frac{k_1}{\tau_1 s + 1} \cdot \frac{k_2}{\tau_2 s + 1} e^{-\tau_s} \quad (1)$$

式中, τ_1 为工业计算机 D/A 卡控制量输出及信号变换环节的时间常数; τ_2 为压控振荡环节的时间常数; τ 为相控整流固有的纯滞后时间, $\tau_{\text{max}} = 1.67 \text{ ms}$ 。

基于 cPCI 总线技术的数字 alpha 控制器, 1 个 cPCI 总线周期为 $5 \mu s$, 时间极小, 可忽略不计。基于高速 DSP 的数字移相单元采用定值计数方式, 因此该移相单元没有惯性环节特性。因此数字 alpha 控制器可以表示为

$$G_{\text{alpha}}(s) = e^{-\tau_s} \quad (2)$$

对比式 (1)、(2) 可看出, 采用数字 alpha 控制器只具



(b) alpha 控制器照片

图 5 数字 alpha 控制器

Fig. 5 Digital alpha controller

有固定滞后特性, 没有惯性环节存在, 提高了系统的动态响应性能。

3.2 控制单元配置

基于 cPCI 的数字 alpha 控制器是 ITER 整流器控制的核心模块, 采用所设计的 alpha 控制器组建控制系统, 原理如图 6 所示。

在一个 cPCI 标准控制计算机内可通过不同配置满足整流器的不同控制需求。针对 ITER 整流器, 8 个 6 脉波三相整流桥组成, 因此需要配 8 个 Alpha 控制器, 同时配一块 A/D 采集卡采集电压、电流、冷却水温度、冷却水压力等模拟量信号用于闭环控制及系统保护, 配置一块 DI/DO 卡可采集数字量信号及输出数量信号。数字量信号输入有: 整流器熔断器状态信号、母排是否过热信号、开关状态信号; 数字量输出信号有: 旁通桥触发信号、控制系统状态信号等。

对一个大功率整流器来说, 需要协调控制多个三相 6 脉波整流器工作。在模拟控制中, 对 alpha 控制器之间的协调通过电缆线传输不同的控制电压信号给各个 alpha 控制器, 电信号在传输过程容易收到干扰, 电信号受电路中电感、电容等参数影响,

往往需要加入低通滤波器,因此不能实现多控制器的快速切换及协调。在工业界常用的基于现场总线、串口通讯、以太网通讯的多控制器协调中,而现场总线带宽通常约 1 MHz,总线传输需要对控制信息进行封装标识,数据利用率低,传输延时大,串口通讯同样存在上述缺陷;以太网具有高带宽特点,但以太网传输要稳定可靠则需要引入应答机制,这个机制容易造成无效数据量剧增,传输延时急剧加大,所以现场总线、串口通讯、以太网通讯不能实现多个控制器之间的快速切换及谢太哦。基于 cPCI 总线的 alpha 控制器之间通过同一条高速总线实现数据传输与切换,总线时钟高达 66 MHz,两个控制指令延时缩短至 10 μ s,8 个控制卡的命令能在 80 μ s 内准确送达,因此可以非常方便实现各 alpha 控制器之间的协调与切换。这种快速协调与切换功能对大功率整流器特别是 ITER 这种有环流运行的大功率整流器来说非常有利,因此基于 cPCI 总线控制模式的控制系统具有很大的优势。

采用两台相同配置的 cPCI 控制单元,两台控制单元互为热备份,实现控制系统的冗余控制方案,提高控制系统的长期可靠性。冗余切换通过反射内网络实现。

3.3 控制系统实时网络

ITER 整流器有 12 套,每套整流器负载——超导电感线圈之间是相互强耦合,需要对 12 套整流器进行实时的协调控制。因此,需要建立一个高速、高带宽的网络来满足 12 套整流器之间数据交换的需求。对实时以太网、现场总线、反射内存网络等工业网络实验测试后^[13-15],选择了反射内存网络作为实时网络,网络硬件设备采用美国 GE 公司的反射内存设备。反射内存实时控制网络是整流器控制系统的网络层,所有实时控制节点均在这一层网络上。

GE VMIC 反射内存是支持环形、星形的高速复制的共享内存网络,VMIC 反射内存实时网是一个实时的,基于内存的网络系统,其所有的工作都是由硬件完成的,没有软件的开销,再加上采用光纤传输介质,因此可以达到数十 Mbyte 的数据传输率和百 ns 级的数据传输延迟,更重要的是这种网络的传输延迟是确定和可以预期的,这是传统的网络难以达到的。能支持 256 个节点的互连。工作速率为 2.1 G 波特率。网络中的下一个反射内存板接收到这个新数据,其本地内存将在 400 ns 内被更新。

在每个需要实时通信的节点上插入 VMIC 反射内存卡,在每块卡上都有自己独立的局部内存,它通过局部内存映射将网卡上的局部内存映射到主机内存,用户读写网卡上的数据就如同读写主机内存

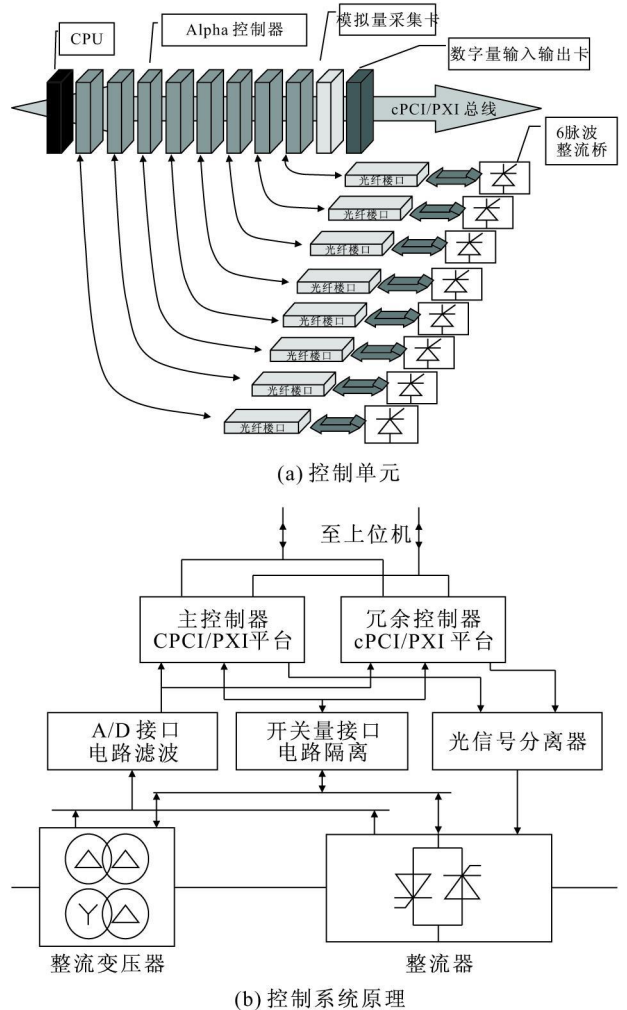


图 6 控制系统

Fig. 6 Control system

上的数据一样快速方便。另外,每块反射内存卡又通过网络内存映射,将分布在节点卡上的局部内存,映射到一个虚拟的全局内存,即每个节点在写入本地节点卡的数据同时也写入所有其他节点卡的内存。用户对本地节点内存的读写相当于对全局内存进行读写,而这个全局内存是所有分布节点都可共享的,从而实现了分布节点间的实时数据通信。通过这种方式,所有的节点能透明地并确定地传送中断、消息或者数据块到其它的节点。

ITER 电源系统需要控制节点 12 个,6 个主控节点及 6 个冗余控制节点。每个控制节点使用一块共享内存卡 VMIPMC-5565,各节点之间通过共享内存交换机 VMIA CC-5595 构成星形网络,这个网络在物理结构上是星形网络,在逻辑结构上是环形网络。VMIA CC-5595 具有故障节点自动旁通功能,当网络中任意节点出现故障时,可以将故障节点自动旁通,保证数据在正常节点间传输,从而保证整个实时网络的安全。每个节点需要传输的数据量大

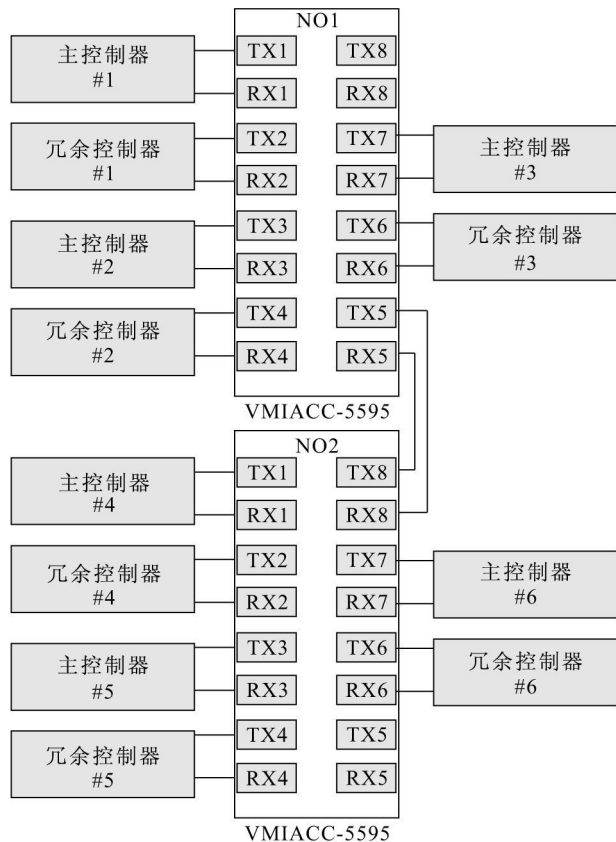
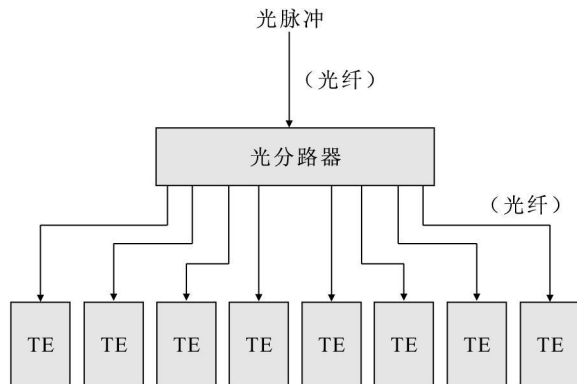
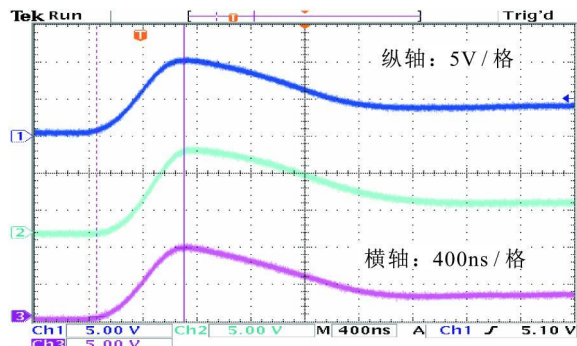


图 7 控制网络
Fig. 7 Control net



(a) 原理



(b) 一致性测试波形

图 8 同步触发

Fig. 8 Synchronous triggering

约 2 Mbyte, 根据共享内存工作机制可计算出总数据量为 24 Mbyte, 共享内存卡 VMIPCF 5565 容量是 128 MB, 满足要求。

实时控制网络如图 7 所示, 采用两台交换机 VMIACC-5595, NO1 交换机负责连接 3 台整流器的主控节点和冗余控制节点共 6 个节点, 分别是: Main controller^{#1}、Redundancy controller^{#1}、Main controller^{#2}、Redundancy controller^{#2}、Main controller^{#3}、Redundancy controller^{#3}; NO2 交换机负责连接另外 3 台整流器的 6 个控制节点, 分别是: Main controller^{#4}、Redundancy controller^{#4}、Main controller^{#5}、Redundancy controller^{#5}、Main controller^{#6}、Redundancy controller^{#6}。两个交换机通过接口互联, 从而实现了控制网络的组建。

4 整流器高压隔离、同步触发

ITER 大功率整流器输出电流极大, 而且要求整流器能承载 80 ms 短路电流冲击, 因此 ITER 整流器采用 8 个 6 英寸型号晶闸管并联使用。

功率器件的并联应用需要解决功率器件之间的动态及静态均流问题。通常在整流器设计过程已考虑这个问题, 合理设计结构及增加均流电感等方式

可将整流器均流系数 > 0.8。

对控制触发信号从以下两方面进行优化, 可以进一步提高均流性能: ①提高并联触发信号一致性; ②增强触发电流, 缩短触发脉冲上升时间。

并联功率器件触发信号一致性能提高器件开通的一致性, 通常使用的并联方案是一个大功率功放输出级并联输出给各个并联功率模块提高触发信号。这种方案的缺点在于: 触发信号需要与主电路隔离, 而用于隔离的光耦器件存在大的分散性, 根据实验测试标明隔离电压 > 5 kV 的光耦器件开通时间差可达几百 μs, 这显然造成信号一致性差。

优化设计采用光纤输出方案^[16,17], 可极大提高同步性, 将分散时间缩短至 ns 级, 方案原理如图 8 (a) 所示。一路触发信号通过光纤发射模块转变成光脉冲信号, 光脉冲信号经多模光纤分路器均匀分成 8 路光信号输出, 由于光纤分路器是无源器件, 光路均分完全采用光学器件实现, 因此各路光信号输出一致。均分后的光信号输入到每个晶闸管的 TE 模块。TE 模块即是晶闸管触发及监视模块, 安装在 TE 模块上的是高灵敏光纤接收器, 因此可保证各个 TE 板上的光纤接收器几乎同时接收到光信号, 而 TE 板光电转换后级采用高速比较器及三极



(a) 控制机柜



(b) 光电式同步触发

图 9 控制系统照片

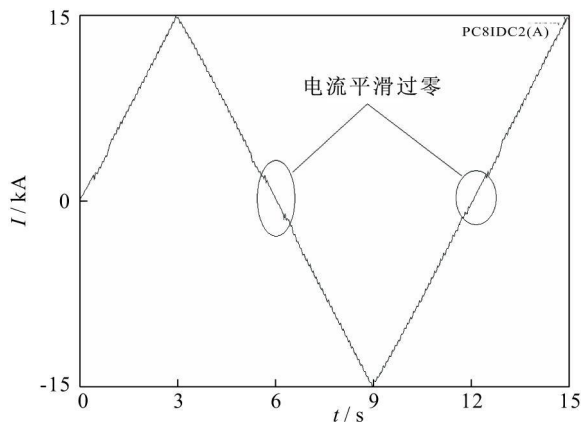
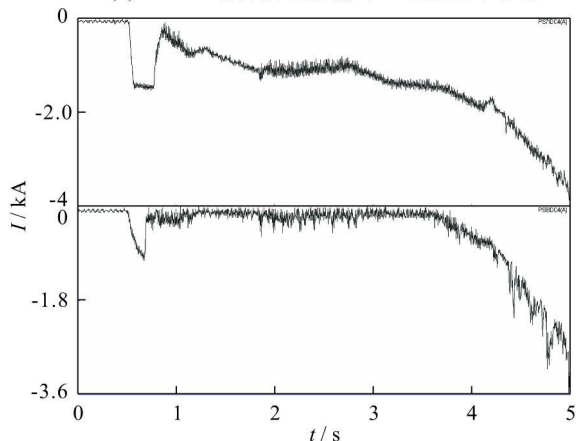
Fig. 9 Photos of control system

管功率放大,这保证了各 TE 板最终输出的触发信号非常一致。

实验测试表明,控制触发功率在安全范围内,增大触发电流至 3.0 A,晶闸管开通时间缩短至 $< 10 \mu\text{s}$;将触发脉冲上升时间控制在 $< 1 \mu\text{s}$,晶闸管开通时间大大缩短。这都有利于晶闸管的快速开通,从而使并联晶闸管一致开通,提高均流特性。因此,TE 脉冲功放输出电压设计 $> 24 \text{ V}$,带负载电流峰值 3 A,脉冲上升时间 $< 1 \mu\text{s}$,测试实际带载波形如图 8(b)。

5 控制系统样机测试

设计的整套控制系统安装调试完毕,控制系统照片如图 9 所示,并进行对比测试。测试主要考察以下方面:①控制系统在高压、大电流环境下的长期

(a) $\pm 15 \text{ kA}$ 锯齿波电流输出,电流过零平滑

(b) 整流器环流电流输出

图 10 实验测试波形

Fig. 10 Testing of Control system

稳定性;②整流器输出特性;③整流器环流运行性能。

控制系统安装在 EAST 极向场电源系统,控制 PS8 电源。从 2008 年 10 月开始进试验测试,期间参与两次聚变实验,连续运行 4 个月,控制系统工作正常,稳定可靠。

实验中,该控制系统控制的整流器输出响应快速,电流过零平滑,实验波形如图 10(a)。该控制系统控制的 PS8 电源直流环流跟踪较好,环流值控制在设定目标,如图 10(b)所示。

6 结论

本文对控制系统进行优化设计,达到系统设计目标:

a) 直接耦合同步方案实现零相位差同步,从而提高了系统精度。

b) 高速 ePCI 总线传输控制信号及高速 DSP 实现移相控制,将响应时间缩短至 $100 \mu\text{s}$ 以下,提高了系统响应速度。

c) 高同步性的光纤触发方案实现,保证触发脉冲到达时刻严格一致,提高了整流器的均流性能。

d) 系统采用工业标准 cPCI 总线, 系统开放、稳定、可靠, 能适应高电压大电流复杂电磁环境运行。

该系统可以作为一种标准控制系统推广于工业界大功率整流器控制应用。

参 考 文 献

[1] Aymar, Robert. ITER project[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1997, 25(6): 1187-1195.

[2] Benfatto I, Mondino P L, Roshal A, et al. AC/DC converters for the ITER poloidal field system[C] // Proceedings- Symposium on Fusion Engineering. Ibaraki ken, Japan: [S. l.], 1995: 658-661.

[3] Roshal A, Bareyt B, Benfatto I, et al. ITER coil power supply [C]. Proceedings Symposium on Fusion Engineering. Ibaraki ken, Japan: [S. l.], 1995: 248-251.

[4] 董业庄. 相位控制电路 TC787 和 TC788 的研究及其应用[J]. 电力电子技术, 1994, 28(3): 44-49.
DONG Ye zhuang. The development and applications of phase control integrated circuits TC787, TC788[J]. Power Electronics, 1994, 28(3): 44-49.

[5] 冯广义, 张 光, 李 宏. 相序自适应全数字智能化晶闸管触发器[J]. 电力电子技术, 2003, 37(5): 82-83.
FENG Guang yi, ZHANG Guang, LI Hong. A full digital and intelligent SCR trigger with phase self adaption[J]. Power Electronics, 2003, 37(5): 82-83.

[6] 杜海江, 石新春. 相序相位自适应相控整流器原理分析及实现[J]. 电工技术学报, 2005, 20(2): 105-109.
DU Hai jiang, SHI Xin chun. Analysis and realization of phase controlled rectifier with phase sequence and phase self adaption [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(2): 105-109.

[7] 黄连生, 傅 鹏, 陈滋健, 等. 晶闸管整流器同步电压滤波研究[J]. 电力电子技术, 2008, 42(2): 14-15.
HUANG Liar sheng, FU Peng, CHEN Zi jian, et al. Research on the filter of firing synchronization for thyristor controlled rectifier[J]. Power Electronics, 2008, 42(2): 14-15.

[8] 陆明达. 开关电容滤波器的原理与设计[M]. 北京: 科学出版社, 1986: 11-27.

[9] Baher H. Selective linear phase switched capacitor filters modelled on classical structures[J]. IEEE Journal of Solid state Circuits, 1986, 21(1): 31-39.

[10] MAXIM. Programmable universal and Bandpass filters rev3 [M]. MAXIM, 1998.

[11] 马鸣锦. PCI, PCFX 和 PCI Express 的原理及体系结构[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
MA Ming jing. The theory and structure of PCI&PCFX&PCI Express[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007.

[12] McFarland A R, Newport D F, Atkins B, et al. A Compact PCI based event routing subsystem for PET and SPECT data acquisition[C] // Nuclear Science Symposium Conference Record. [s. n.]: IEEE, 2006: 3091-3093.

[13] 阳宪惠. 工业数据通信与控制网络[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
YANG Xi ar hui. Industrial communication and control net [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.

[14] 郑 锐, 傅 鹏, 何诗英. 反射内存网在 EAST 极向场电源控制系统中的实现[J]. 化工自动化及仪表, 2009, 36(3): 64-66.
ZHENG Rui, FU Peng, HE Shi ying. Realization of reflective memory network in poloidal field power supply control system of EAST[J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2009, 36(3): 64-66.

[15] 肖登明, 徐 欣, 刘奕路. 基于 Internet 的频率监控网 (FNET)[J]. 高电压技术, 2001, 27(2): 39-41.
XIAO Deng ming, XU Xing, LIU Yi lu. Internet based frequency monitoring network (FNET)[J]. High Voltage Engineering, 2001, 27(2): 39-41.

[16] 黄连生, 傅 鹏, 王林森, 等. 光纤通讯技术在晶闸管触发系统中的应用[J]. 电力电子技术, 2007, 41(11): 44-46.
HUANG Liar sheng, FU Peng, WANG Lin sen, et al. Applications of optical fiber in the thyristor trigger system[J]. Power Electronics, 2007, 41(11): 44-46.

[17] 杨达亮, 陈军灵. 基于 DSP 和光纤技术的高压设备在线监测系统[J]. 高电压技术, 2006, 32(7): 58-60.
YANG Da liang, CHEN Jun ling. On line monitoring system based on DSP and optical fiber technology for high voltage equipment[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(7): 58-60.



HUANG Liar sheng
Ph. D. candidate

黄连生
1983—, 男, 博士生
2005 获中南大学自动化专业学士学位。目前正在中科院等离子体物理研究所攻读博士学位, 主要从事大功率整流电源控制方面研究工作
E mail: wanshi@ipp. ac. cn



FU Peng
Ph. D., Professor

傅 鹏
1962—, 男, 博士, 研究员, 博导
毕业于华中科技大学电力系统及其自动化专业, 1998 年至 2000 年在德国等离子体研究所从事博士后研究工作。曾作为学者访问日本、欧盟、俄罗斯等许多国家。中科院等离子体物理研究所聚变电源学术带头人。日前主要从事国家九五重大科学工作托卡马克电源及其控制系统的研究课题, 和超导聚变装置 HT-7、EAST、ITER 电源系统及

控制的研究

收稿日期 2010-03-02 修回日期 2010-06-09 编辑 任 明