

基于双 DSP 的双 PWM 变频器控制平台设计

尹 璐,赵争鸣,鲁 挺,袁立强,邹高域

(清华大学 电机系 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室,北京 100084)

摘要:首先通过分析双 PWM 变频器拓扑结构和现有的系统控制策略,确定了控制平台的硬件需求。采用模块化的设计方法设计了一套基于双定点数字信号处理器 TMS320F2812 的控制平台。同时,对各硬件单元的设计方法和所实现的功能分别进行了详细描述。该平台既可以作为双 PWM 变频器专用控制平台,也可以作为通用开发板使用。最后以 1 台 55 kW 的三相两电平双 PWM 背靠背变频器和 1 台 2.2 kW 的三相变频调速系统为例,验证了所提出的控制平台设计的正确性和可行性。

关键词:变频器;脉宽调制;数字信号处理器;控制平台;设计

中图分类号: TM 46

文献标识码: B

DOI:10.3969/j.issn.1006-6047.2013.11.026

0 引言

近年来,双脉宽调制(PWM)变频器以其能量双向流动、网侧额定功率因数输入、并网电流谐波含量小、直流母线电压可控等优点,在电机调速、风力发电等领域得到了广泛应用^[1-2]。目前,双 PWM 变频器的控制平台通常采用双控制板的设计方案^[3-4]。该方案对整流桥和逆变桥的功能划分明确,同时延续了传统控制平台的设计方案,硬件实现简单。但是对于需要综合控制的高性能双 PWM 变频调速系统,该方案需要实时性较高的通信和同步机制,导致在增加系统复杂性的同时降低了系统可靠性。文献[5]设计了一套双数字信号处理器(DSP)控制板,2 片 DSP 分别控制网侧整流器和电机侧逆变器;文献[6]针对磁浮开关磁阻电机的特点采用双 DSP 分别进行旋转控制和悬浮控制。这种设计方案将原有的 2 块控制板合成一块,保持了双控制板方案 DSP 功能划分明确的优点,但仍无法满足综合控制算法的需求。

双 DSP 的设计方案已经广泛应用于需要复杂计算的控制系统中。文献[7-8]采用双定点 DSP,由一片 DSP 负责采样,另一片负责指令计算和输出。文献[9-11]设计的控制平台由一块定点 DSP 负责信号

采样和外设控制,另一块浮点 DSP 负责复杂计算。

本文针对双 PWM 变频器整流桥和逆变桥这 2 个控制对象在控制上相对独立而又紧密联系的特点,提出了一种基于双定点 DSP(TMS320F2812)的双 PWM 变频器控制平台设计方法。该平台可以满足双 PWM 变频器不同控制算法对控制板的硬件需求,同时兼顾其通用性。

1 系统设计需求

三相两电平双 PWM 背靠背变频器的主电路拓扑如图 1 所示。该拓扑为双 PWM 变频器的一种基本形式,其中整流桥连接电源,逆变桥连接用电设备。由于两侧均采用全控电力电子器件,因此能量可以在变换器中双向流动,通过协调控制整流桥和逆变桥可以显著减小直流母线电容的取值。本控制平台的控制对象可以是三相系统也可以是单相系统,整流桥和逆变桥可以分别使用三电平、多电平、H 桥或 DC-DC 变换器等全控变换器代替,变换器两侧也可以均连接电源设备,其核心控制算法仍是双变换器的协调控制问题。为了便于区分,此处仍采用整流桥和逆变桥来表示 2 套变换器。

双 PWM 变频器的控制策略主要分为 2 类:分别

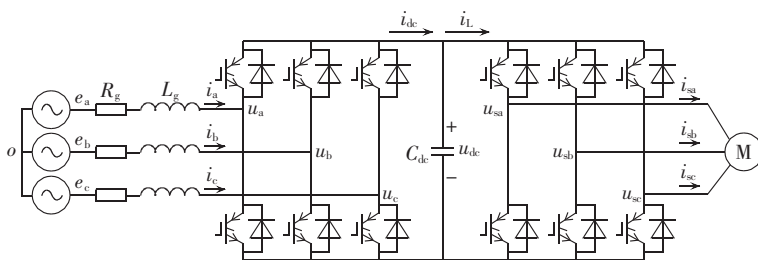


图 1 三相双 PWM 变频器基本拓扑

Fig.1 Topology of three-phase dual-PWM converter

收稿日期:2012-10-31;修回日期:2013-07-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50737002);台达环境与教育基金会电力电子科教发展计划重大项目(DREM200902)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(50737002) and Power Electronics Science and Education Development Program of Delta Environmental & Educational Foundation(DREM200902)

关注逆变桥和整流桥交流侧的控制性能,如无差拍预测控制、矢量控制、直接功率控制等;关注整流-逆变综合控制策略,目前采用较多的有负载电流前馈控制方法、直接电容电流控制、主从控制等^[12-15]。为了满足不同控制算法的硬件需要,本控制平台的 2 片 DSP 应当既可以分别控制整流桥和逆变桥,也可以由一片 DSP 同时负责整流桥和逆变桥的核心控制,另一片负责其他外围功能。同时,该平台还应具备如下功能:数据采集、计算和存储功能,PWM 信号输出与整形功能,系统故障保护与报警功能,通信功能等。

2 控制平台设计方法

2.1 DSP 选型与系统结构设计

作为双 PWM 变频器控制平台的核心器件,DSP 的选型要兼顾计算能力和外围控制功能的实现,所以本文选择 TI 公司的 TMS320F2812。它是一款低功耗的 32 位定点 DSP,主频最高达 150 MHz,存储空间大,片上外设资源丰富,既可以满足外设功能的要求,也可以满足复杂计算的要求。

双 DSP 的硬件结构框图如图 2 所示。DSP₁ 和 DSP₂ 的控制方式分为主从模式和并行模式。为了适应复杂程序的需要,在 DSP 外部使用静态随机存储器(SRAM)作为扩展内存(CYPRESS 公司的 CY7C1041)。

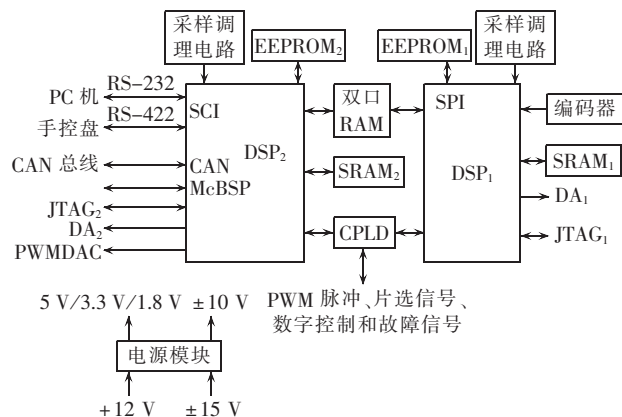


图 2 双 PWM 变频器控制平台结构框图

Fig.2 Structure of dual-PWM converter control platform

在主从模式下,DSP₁ 作为主控制器负责整流桥和逆变桥的核心控制算法,包括信号采样、坐标变换、IGBT 输出占空比计算等;DSP₂ 作为从控制器负责其他外围控制功能,包括系统保护算法、相关监测量(如电压电流有效值、系统效率等)的计算与存储、与上位机和手控盘通信等。该模式适用于整流桥和逆变桥协调控制策略,特别是当两侧的开关频率为整数倍时,2 个控制对象的控制算法可以在同一个主中断中完成,便于数据的共享与交互。

在并行模式下,DSP₁ 负责逆变桥控制,DSP₂ 负

责并网整流桥控制,2 片 DSP 分别负责整流桥和逆变桥相关信号的采样、故障检测和监测量计算,通信任务仍由 DSP₂ 完成。该模式适用于针对电网和电机的交流侧进行复杂控制或整流桥和逆变桥开关频率不匹配的情况。由于在该模式下,整流桥和逆变桥分别在 2 片 DSP 中进行控制,所以便于根据其自身特点选择完全不相关的开关频率,其控制参数仍可以通过双口 RAM 进行交互,但实时性略逊于主从模式。

另外,为了便于仿真调试,用于 DSP 仿真的 JTAG 接口也设计了 2 种模式:一种为分别单独仿真 DSP₁ 和 DSP₂,仿真器要分别接在 JTAG₁ 和 JTAG₂ 上,该模式主要在单独调试其中 1 片 DSP 时使用;另一种采用菊花链连接方式,使用 JTAG₁ 同时对 2 片 DSP 进行仿真,用于调试双 DSP 的协调工作。2 种模式通过拨码开关进行切换。

2.2 双 DSP 之间的通信

为了使 2 片 DSP 协调工作,2 片 DSP 之间需要进行快速可靠的数据交换和共享,而且不能影响其各自的运行性能。目前,DSP 之间的通信方式主要有串行通信、共享总线通信、共享存储器通信^[7]。共享存储器通信一般采用双口 RAM 等芯片作为数据交换的媒介,通过一定的读写机制实现双 DSP 之间大量数据的实时交换。与其他通信方式相比,该方式接口电路简单、数据传输速度快、可靠性高,而且 DSP 的工作受通信影响小。

本文设计的控制平台采用 8k×16 位的双口 RAM(CYPRESS 公司的 CY7C025AV)作为共享存储器。其通信采用中断方式进行,将双口 RAM 的 INT_R 和 INT_L 管脚别分与 DSP₁ 和 DSP₂ 的外部中断管脚连接,当 DSP₁ 向双口 RAM 写入数据后,向其高地址 0x3FFE 写入之前写入数据的起始地址,可以在 INT_L 管脚中产生中断信号,使 DSP₂ 进入双口 RAM 通信中断,同时根据 0x3FFE 中写入的地址读取相应数据。同样,当 DSP₂ 向双口 RAM 中写入数据后,再向其高地址 0x3FFF 写入数据的起始地址,也会通过 INT_R 在 DSP₁ 中产生中断。另外,通过查询双口 RAM 的 BUSY 管脚进行延时读写和制定内存的使用规则可以有效防止 2 片 DSP 的竞争使用现象。

2.3 PWM 信号的产生与整形电路

PWM 技术广泛应用于电力电子变换器中,因此 PWM 电路的设计是控制平台设计的重要环节。每片 TMS320F2812 具有 2 个事件管理器共 16 路 PWM 通道,其中有 6 对互锁的 PWM 通道可以直接为 6 对互锁的功率器件提供互锁的 PWM 信号,并且通过可编程死区单元设计死区。将这些 PWM 信号引入复杂可编程逻辑器件(CPLD)进行整形,包括限制最小脉宽、根据故障信息封锁脉冲、完成保护动作等。当单

个 DSP 需要输出的 PWM 信号多于 6 对时, CPLD 还可以代替 DSP 完成设置死区、增加互锁逻辑和增加互补脉冲的功能。

本控制平台采用了 ALTERA 公司的 MAX II 系列 CPLD EPM1270。该系列芯片是一款低成本、低功耗的 CPLD, 支持高达 300 MHz 的内部时钟和 3.3 V 及以下的多种逻辑电平^①。为了保证电平匹配和输出的 PWM 信号有足够的驱动能力, 此处将 CPLD 输出的 PWM 信号引入电平转换芯片 74ACT245 转为 5 V 信号。

2.4 模拟电路设计

模拟电路设计包括采样调理电路、模数转换电路(ADC)、比较电路和数模转换电路(DAC), 主要用于信号采集、故障判断和程序内部变量监控。

每片 TMS320F2812 具有 16 通道 12 位 ADC, 采样带宽最高达每秒采样点数 12.5 M, 模拟输入电压范围为 0~3 V。而在实际系统中不同传感器输出的电压或电流信号的幅值范围不同, 因此需要采样调理电路将原始信号转换为 0~3 V 的电压信号, 再经过限幅环节输入到 DSP 的 ADC 模块中。以 LEM 公司的电流传感器 LT308-S7 为例, 其输出信号为电流信号, 设计输出范围为 -150~150 mA。该信号首先经过阻值为 31 Ω 的精密电阻转换为电压信号, 而后通过运算放大电路转换为 0.047~2.953 V 的电压信号, 再输入到 ADC 模块中。另外为了提高信号采样的抗干扰性能, 本平台在 ADC 输入管脚附近接入 1 nF 的贴片电容以抑制采样回路中的毛刺。

控制平台的比较电路设计为输入的模拟信号与可调电平通过电压比较器进行比较, 得到的结果输入 CPLD, 以实现硬件保护功能。

由于数模转换电路只用于调试时监控程序内部变量, 因此为了节约成本, DA 芯片采用接插件设计, 对 2 片 DSP 分别设计对外接口。单独设计的 DA 板选用 4 通道 12 位的 DA 芯片 DAC7724, 电压输出范围为 -10~10 V。但是, 由于 DA 芯片的抗干扰能力较差, 在工业环境中经常会遇到无法使用的情况。因此本平台选取 DSP₂ 中的 4 路 PWM 输出通道, 在后面接入电感、电容滤波器组成 PWMDAC 模块, 将需要观测的量以 PWM 波的形式输出, 并通过滤波还原原有波形。该方法虽然分辨率比 DA 芯片低, 但抗干扰性能大幅提高, 适合在干扰较强的工业现场调试时使用。

2.5 数字电路设计

控制平台的数字电路设计包括保护逻辑、外围电路控制(如风扇、接触器等)、状态指示灯控制和电机速度编码器输入。为了保证对外接口的通用性, 保护逻辑输入和控制信号输出均通过电平转换芯片将

CPLD 的 3.3 V 信号转换为 5 V 信号。为了控制外接继电器, 设计了 24 V 电平的数字 I/O 通道和干接点。同时, 为了适应不同型号的光电编码器, 正交编码脉冲电路(QEP)采用光耦进行电气隔离和电平转换, 将编码器信号统一转换为 3.3 V 信号输入到 DSP₁ 的 QEP 引脚, 由此计算得到电机的实际转速。

2.6 通信电路设计

为了满足不同通信设备的需求, 本控制平台设计了多种通信接口, 包括: 串行同步外围接口(SPI)、串行异步通信接口(SCI)、区域网络控制器(CAN)、多通道缓冲串行口(McBSP)。

DSP₁ 和 DSP₂ 的 SPI 各与 1 片电可擦除可编程只读存储器(EEPROM)进行通信, 用其在系统掉电时保存相关指令设定值(如启动方式等)、故障信息、电机和主电路的辨识参数等信息。DSP₂ 中的 2 路 SCI 通道, 一路经 MAX3490 转换为 RS-422 标准接口与手控盘通信, RS-422 采用差模传输方式, 传输距离远、抗干扰能力强; 另一路经 MAX3221 转换为 RS-232 标准接口, 可以通过串口线直接与 PC 机相连而无需转接设备。为了能够进行多台变频器集群控制, 以及与其他设备进行通信, 本平台在 DSP₂ 中预留了 CAN 总线接口和 McBSP 通信接口。

2.7 电源系统设计

本控制平台的数字电路中, DSP 的内核电压为 1.8 V, CPLD、双口 RAM 和 DSP 等的外部 I/O 电压为 3.3 V, 其他数字芯片工作电压为 5 V; 模拟电路中传感器、运算放大器、比较器等元件的工作电压为 ± 15 V, DA 芯片的工作电压为 ± 10 V, 采样调理电路中还需要 0.75 V、3 V 等参考电平。另外, 为了控制一些常用继电器, 还需要 24 V 电源。

为了增强控制平台的抗干扰能力, 在电源系统设计时采取数字和模拟电路分开布局, 独立供电的模式: 数字电路由 5 V 电源供电, 模拟电路由 ± 15 V 供电, 再通过电源芯片转换为所需电平。两部分电源仅在一点通过磁珠共地, 以消除数字电路对模拟电路的干扰。为了避免接触器动作时的干扰, 24 V 电源由外部电源独立供电, 同时在电源芯片和关键控制芯片的电源引脚处布置大量不同容值的电容, 以消除电源的纹波和噪声。另外, 采用看门狗芯片 MAX706 检测 3.3 V 电源电压, 一旦电压过低立即对 DSP 芯片复位, 保护系统安全。在布线方面采用 4 层电路板设计, 表面为信号层, 中间 2 层为电源层和地层, 进一步增强抗干扰能力。

3 样机实验

将本文设计的控制平台应用于 1 台 55 kW 的三

^① Altera Corporation. MAX II device handbook. 2009.

相两电平双 PWM 背靠背变频器中。系统主电路结构如图 1 所示,整流侧与三相电网连接,逆变侧接异步电机负载。根据该系统的实际情况,对本控制平台的硬件资源进行具体分配。其中,进入调理电路的采样信号共 11 路,包括 3 路电网电压信号、3 路电网电流信号、1 路直流母线电压信号、3 路电机定子电流信号和 1 路 0.75 V 参考电平信号。通过比较电路进入 CPLD 的硬件保护信号包括 1 路电网电流过流保护信号和 1 路电机定子电流过流保护信号。由系统主电路上报的硬件故障信号包括:电网缺相故障、直流母线电压过压故障、功率模块过温故障和功

率模块过流故障。

2 片 DSP 的功能划分采用主从模式,DSP₁ 完成系统启动、运行、停机等核心控制算法,输出 6 对互锁的 PWM 信号;DSP₂ 负责系统软件保护和通信等外围功能。系统软件保护功能包括:电网电压过压和欠压保护、电网电压过频和欠频保护、直流母线电压过压保护、电网电流过流保护和电机电流过流保护。控制算法采用整流、逆变综合控制策略,控制程序流程如图 3 所示。其中,故障中断的优先级最高,其次是主中断,再次是双口 RAM 中断,通信中断的优先级最低。

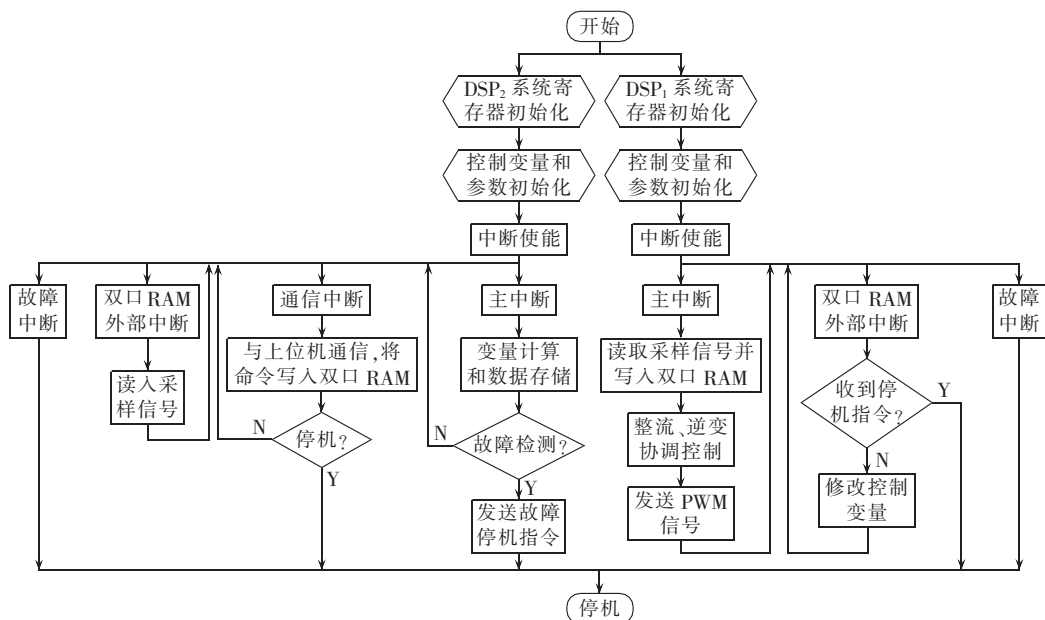


图 3 三相两电平双 PWM 背靠背变频器控制程序流程

Fig.3 Flowchart of control for three-phase two-level dual-PWM back-to-back converter

按照上述控制方法,55 kW 异步电机满载稳态运行波形如图 4 所示,图中, u_{dk} 为直流母线电压, e_a 为电网相电压, i_a 为电网相电流, i_{sa} 为电机定子相电流。可以看到,整流侧电网电压与电流基本同相位,功率因数高于 0.99,电机运行平稳,整流、逆变电流的总谐波畸变率(THD)均小于 3.5%。系统过温故障保护波形如图 5 所示,图中, u_{saN} 为逆变桥输出点与负母线的电压差经 500 kHz 滤波后的波形。由图 5

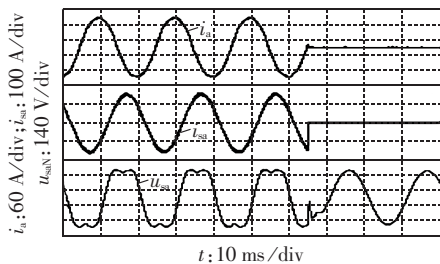


图 5 系统保护动作波形

Fig.5 Operational waveforms of system protection

可见,控制平台保护动作迅速,动作后电网电流和电机电流迅速衰减,有效保护了器件和电机的安全。

当该控制平台应用于一套 2.2 kW 的三相变频调速装置时,硬件功能分配原则与上述情况相同,电机启动波形如图 6 所示,图中, Ω 为电机转子转速, i_{sa} 为电网相电流。可以看出,电机启动平稳。因此,该控制平台可以满足双 PWM 变频器的控制需求,具有较强的可靠性和通用性。

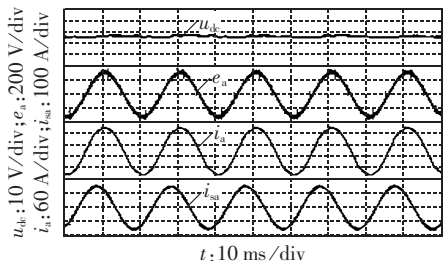


图 4 55 kW 双 PWM 背靠背系统满载稳态运行波形
Fig.4 Waveforms of 55 kW dual-PWM back-to-back converter in steady-state operation with full load

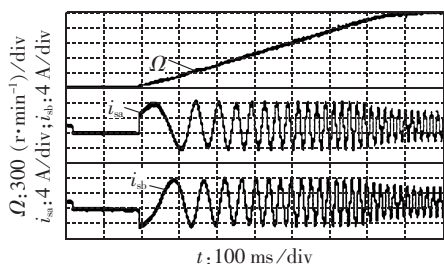


图6 2.2 kW 异步电机启动波形

Fig.6 Startup waveforms of 2.2 kW induction motor

4 结论

本文详细介绍了一种以 TMS320F2812 为控制核心的适用于双 PWM 变频器的双 DSP 控制平台设计方法。通过实验验证可知,该控制平台既可以满足双 PWM 变频器控制算法的硬件需求,又具有较强的通用性,可以根据实际系统需要灵活分配 2 片 DSP 的资源。另外,本平台利用 CPLD 灵活改变数字信号走向并对关键信号进行处理,提高了系统反应速度;同时通过合理的设计有效提高了系统抗干扰能力。

参考文献:

- [1] 周秋燕,刘文胜,曹志斌. 双 PWM 变频技术的应用研究[J]. 变频器世界,2008(7):52-54.
ZHOU Qiuyan,LIU Wensheng,CAO Zhibin. Applied research on dual-PWM frequency conversion technology[J]. The World of Inverters,2008(7):52-54.
- [2] 李时杰. 基于 Back-to-Back 变流技术的调速系统的研究[D]. 北京:中国科学院研究生院(电工研究所),2006.
LI Shijie. Research on the AC drive system with the back-to-back converter[D]. Beijing:Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences,2006.
- [3] 韦立祥. 双 PWM 三电平异步电机磁链定向调速系统研究[D]. 北京:清华大学,2000.
WEI Lixiang. Research on dual-PWM three-level flux orientation induction motor control system[D]. Beijing:Tsinghua University, 2000.
- [4] 郭金东,赵栋利,林资旭,等. 兆瓦级变速恒频风力发电机组控制系统[J]. 中国电机工程学报,2007,27(6):1-6.
GUO Jindong,ZHAO Dongli,LIN Zixu,et al. Research of the megawatt level variable speed constant frequency wind power unit control system[J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(6):1-6.
- [5] 李明水. 双 PWM 变换器负载功率前馈直接功率控制[D]. 天津:天津大学,2012.
LI Mingshui. Dual PWM converter load power feedforward direct power control[D]. Tianjin:Tianjin University,2012.
- [6] 赵楠,葛宝明. 基于双 DSP 的磁浮开关磁阻电机全数字控制器[J]. 电力自动化设备,2007,27(12):65-69.
ZHAO Nan,GE Baoming. Dual-DSP digital controller of magnetic suspending switched reluctance motor[J]. Electric Power Au-

tomation Equipment,2007,27(12):65-69.

- [7] 杨淑英,赵会亮. 基于双 DSP 控制的混合型有源电力滤波装置[J]. 电力自动化设备,2011,31(5):103-107.
YANG Shuying,ZHAO Huiliang. Hybrid APF based on dual-DSP control[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(5):103-107.
- [8] 柳懿,王向军,嵇斗. 基于双 DSP 的断路器机械特性检测装置[J]. 电力自动化设备,2011,31(5):112-116.
LIU Yi,WANG Xiangjun,JI Dou. Circuit breaker mechanical characteristic tester based on dual-DSP[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(5):112-116.
- [9] 鲁挺,赵争鸣,张颖超,等. 基于双 DSP 的电力电子变换器通用控制平台[J]. 清华大学学报:自然科学版,2008,48(10):1541-1544.
LU Ting,ZHAO Zhengming,ZHANG Yingchao,et al. General-purpose control platform based on dual DSPs for power electronic converters[J]. Journal of Tsinghua University:Science and Technology,2008,48(10):1541-1544.
- [10] 王文举,车向中. 基于双 DSP 微处理器的大功率牵引逆变器[J]. 电力电子技术,2005,39(2):45-46.
WANG Wenju,CHE Xiangzhong. High power traction inverter based on dual DSP controller[J]. Power Electronics,2005,39(2):45-46.
- [11] 许傲然,赵坤,游小杰. 双 DSP 异步电机无速度传感器控制的一种新方案[J]. 电气传动,2009,39(2):23-26.
XU Aoran,ZHAO Kun,YOU Xiaojie. Dual-DSP controller used in novel scheme of speed sensorless induction motor control[J]. Electric Drive,2009,39(2):23-26.
- [12] MALESANI L,ROSSETTO L,TOMASIN P. AC/DC/AC PWM converter with reduced energy storage in the DC link[J]. IEEE Trans on Industry Applications,1995,31(2):287-292.
- [13] GU B,NAM K. A DC-link capacitor minimization method through direct capacitor current control[J]. IEEE Trans on Industry Applications,2006,42(2):573-581.
- [14] HUR N,JUNG J,NAM K. A fast dynamic DC-link power-balancing scheme for a PWM converter-inverter system[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics,2001,48(4):794-803.
- [15] 王锋,姜建国. 风力发电机用双 PWM 变换器的功率平衡联合控制策略研究[J]. 中国电机工程学报,2006,26(22):134-139.
WANG Feng,JIANG Jianguo. Research of power-balancing combined control scheme for back to back PWM converters used in the wind generator[J]. Proceedings of the CSEE,2006,26(22):134-139.
- [16] 苏奎峰,吕强,耿庆锋,等. TMS320F2812 原理与应用[M]. 北京:电子工业出版社,2005:1-10.

作者简介:

尹璐(1985-),男,回族,北京人,博士研究生,从事光伏发电、电力电子与电机集成系统的研究工作(E-mail:yinlu183@gmail.com);

赵争鸣(1959-),男,湖南邵阳人,教授,博士,从事光伏发电、电力电子与电机集成系统的研究工作。

Control platform based on dual DSPs for dual-PWM converter

YIN Lu,ZHAO Zhengming,LU Ting,YUAN Liqiang,ZOU Gaoyu

(State Key Lab of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipments,
Department of Electrical Engineering,Tsinghua University,Beijing 100084,China)

Abstract: The topologies and existing control strategies of dual-PWM converter are analyzed and the hardware requirements of its control platform are determined,which is designed modularly with two fixed-point DSPs(TMS320F2812). The design methods of each hardware unit and its functions are described in detail. Though the control platform is designed specially for the dual-PWM converter,it can be used as a general development board. Experimental results of a 55 kW three-phase two-level dual-PWM back-to-back converter and a 2.2 kW three-phase variable-frequency speed regulation system validate the correctness and feasibility of the designed platform.

Key words: electric converters; pulse width modulation; DSP; control platform; design

(上接第 139 页 continued from page 139)

Frequency characteristics of UHVDC transmission line and its boundary

CHEN Shilong,SHU Hongchun,XIE Jing,CAI Zilong,ZHANG Wenying

(School of Electric Power Engineering,Kunming University of Science and Technology,Kunming 650500,China)

Abstract: According to the actual parameters of Yunnan-Guangdong UHVDC transmission system,the frequency-domain model of UHVDC transmission line and its boundary consisting of smoothing reactor,DC filter and PLC filter is built and the frequency characteristics of UHVDC transmission line and its boundary are analyzed. The influence of UHVDC transmission line and its boundary on the high-frequency component attenuation of fault transient signal and the influence of fault position on the high-frequency components of fault transient signal detected by relay protection are studied,which leads to following conclusion;the fault transient signal attenuation degree is relative to the distance between fault position and relay protection. When the distance is longer than $-\ln |G(j\omega)|/\alpha$,the influence of transmission line on the $\omega/(2\pi)$ -frequency component attenuation is greater than that of boundary. The simulation model with actual parameters is built and the simulative results show the validity of above conclusion.

Key words: UHVDC; UHV power transmission; DC power transmission; line boundary; frequency characteristic; fault transient signal; frequency analysis