

三电平大功率通用变频器的研制

周京华, 周 皓, 袁奎星, 李正熙
(北方工业大学, 北京 100041)

摘要:三电平逆变器的拓扑结构成熟, 输出电压谐波含量低, 所以广泛用于高电压大功率场合。在此, 阐述了三电平大功率通用变频器的主回路设计、控制回路构成, 以及控制软件编制; 给出了一种基于滞环比较的中点电压平衡控制方法, 以及该装置在工业现场运行的相关结果。通过对实际输出电压的频谱分析, 得出了三电平逆变器输出电压的谐波特性, 并概括了其谐波分布的一般规律。现场运行结果表明, 该变频器的输出波形良好, 性能可满足要求。

关键词:变频器; 逆变器; 谐波

中图分类号: TN773

文献标识码: A

文章编号: 1000-100X(2008)04-0015-03

Development of General Three-level Large Power Frequency Converter

ZHOU Jing-hua, ZHOU Hao, YUAN Kui-xing, LI Zheng-xi

(North China University of Technology, Beijing 100041, China)

Abstract: Owing to mature topological structure and low harmonic content of output voltage, three PLL level inverter has been applied widely in large power and high voltage applications. This paper expatiates the design method of main circuit, the constitution of control circuit and the control program's design of general three-level high voltage transducer. A control method of neutral point voltage balance based on relay comparison is proposed, and the operation results at locale industry are given. The harmonic characteristic of the three-level inverter's output voltage is educed and the general rules of the harmonic distribution are summarized. The results indicate that the transducer achieves a good waveform, and the requirement of performance is satisfied.

Keywords: frequency converter; inverter; harmonics

Foundation Project: Supported by Surface Found of Beijing Municipal Education Commission(No.KM200710009004)

1 引言

在实际工业中, 因装置容量的规模越来越大, 而在能量变换中起关键作用的功率器件所能承受的通断电压和通态电流, 因受现有功率半导体制作水平的限制, 而促使人们从逆变拓扑结构上展开了研究, 以满足实际需要。自日本长冈科技大学的南波江章(A.Nabae)等人于 1980 年在 IEEE 工业应用年会上提出三电平中点箝位式结构以来, 这种拓扑结构就广泛用于实际工业中^[1]。与普通两电平逆变器相比, 三电平逆变器的优点是: ①在直流母线电压一定的情况下, 开关器件的耐压等级减小 50%; ②在同等开关频率下, 三电平逆变器的输出电压谐波含量降低 50%; ③采用相同功率等级的开关器件, 输出功率可提高一倍。

针对轧钢机, 研制了 690 V/600 kW 大功率变频器, 其主电路采用三电平二极管箝位式拓扑结构; 开关器件采用 IGBT; 驱动信号的传输采用光纤; 调制方式为三电平空间电压矢量 PWM(SVPWM)。装置中

采用了有效的中点电压平衡措施, 有过流、短路等保护功能。同时, 根据对三电平变频器输出电压阶梯波形的分析, 得出了三电平逆变器输出电压的谐波特性, 概括了谐波分布的一般规律, 所得结论对于调制策略的应用具有实际的指导意义。

2 主回路的组成

研制的变频器装置采用三电平逆变器拓扑结构。图 1 为三电平大功率通用变频器系统结构框图。

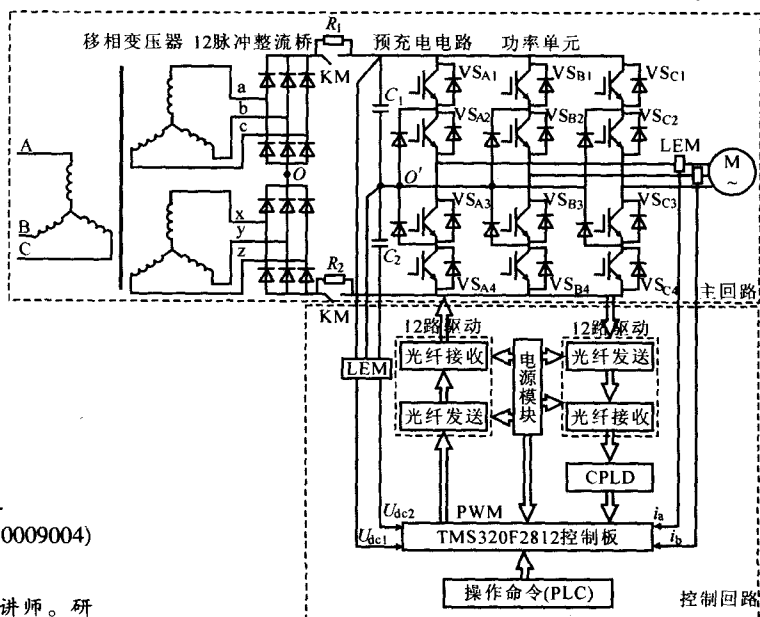


图 1 三电平大功率通用变频器系统结构图

基金项目: 北京市教委面上项目基金资助(KM200710009004)

定稿日期: 2008-01-02

作者简介: 周京华(1974-), 山西新绛人, 博士, 讲师。研究方向为电力电子及电气传动。

主回路由下述4部分构成。

(1)移相变压器 为降低输入谐波电流,移相变压器实行多重化设计,两套次级绕组,分为两个不同的相位组,分别采用星形和三角形联结,构成相位相差30°且大小相等的两组电压,并加到整流桥上。这样5,7次谐波在变压器的初级侧将会有180°的相移,能够相互抵消,因此可减少电网的谐波污染。

(2)12脉冲整流桥 为减少直流侧的电压脉动,整流部分采用了12脉冲二极管整流桥。

(3)预充电环节 在变频器启动时,为防止滤波电容C₁和C₂在合上电源开关通电的瞬间产生过大的充电电流,在整流器和滤波电容C₁与C₂间的直流回路中串入限流电阻R₁和R₂。待母线电压建立起来后,交流接触器KM闭合,从而切掉R₁和R₂,以免因长期接入R₁和R₂而影响变频器的正常工作。

(4)功率单元 采用12个可关断功率半导体器件IGBT和6个箝位二极管。在直流侧含有两个相同的电容,由于箝位二极管的存在,使得每个电容上的电压被限制在U_d/2。

3 控制回路的组成

图2为控制系统结构。该回路由下述3部分组成。

(1)DSP控制板与PLC可编程控制器 设计了以TMS320F2812和可编程逻辑器件CPLD为核心的DSP控制板,其DSP作为主控制芯片。它的ADC转换模块接收检测电路传来的电流和电压的模拟值,事件管理器模块产生12路两相互补、死区可调的PWM波,通过CAN通信设置系统参数。CPLD对由驱动电路传回的12路故障信号以及由检测电路传过来的主电路过压和过流信号进行故障综合,并送到DSP的功率模块保护中断输入PDPINTA和PDPINTB,触发功率单元保护中断,以封锁PWM信号,并且输出故障信号对驱动电路进行硬件保护。PLC接收高压合闸/分闸信号和电机启动/停止信号,通过继电器送入DSP对电机进行顺序控制。

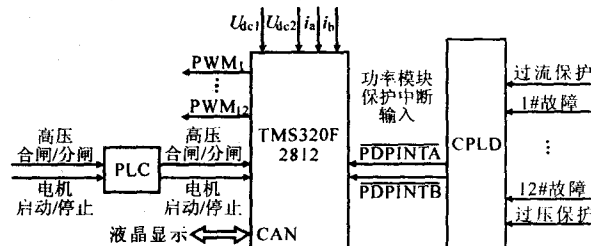


图2 控制系统结构图

(2)驱动电路 采用带短路保护功能的M57962L驱动模块驱动IGBT。DSP输出的PWM控制信号通过光纤传到驱动模块上,并通过光纤接收M57962L的短路保护故障信号。

(3)检测电路 使用DSP的ADC转换模块通过霍尔元件对电机的直流母线电压、定子电流进行采

样。霍尔信号还被引入过流和过压保护电路中,用以检测主电路是否过压或过流。

4 控制软件的功能

控制系统软件采用模块化设计,每种功能都划分为相应的功能块。该控制软件主要由主程序模块、滞环控制空间电压矢量调制(SVPWM)模块及其他控制功能模块组成。其中,主程序模块完成系统初始化;由于SVPWM调制模块对时间要求最高,因此安排在优先级最高且最快的定时器T₁中断中,主要作用是产生SVPWM的控制信号,以实现逆变器的控制;所有其他控制功能模块包括参数扫描、给定积分器、定子电流分解、转差补偿、最大电流限制、U/f曲线、顺序控制、通讯等均安排在定时器T₂中断中的不同时段。下面对主要功能模块进行说明。

(1)高性能U/f控制 为了改善开环U/f的转矩控制特性,提高系统的机械特性硬度,需实现变频器的“挖土机”特性。高性能U/f控制包括最大电流限制、转差补偿、IR降补偿和U/f曲线^[2]。图3示出高性能U/f控制框图。图中,对定子三相电流进行了有功电流i_d、无功电流i_q的分解计算,其中i_d的大小直接反映了负载的轻重。将i_d引入到转差补偿中,实现对负载的转矩控制,提高电机的机械特性硬度。最大电流限制采用对允许最大电流进行PI调节,降低运行频率,以实现即使在重载条件下变频器也不会跳闸。U/f曲线是U/f控制方式的核心,它的设置是否恰当,直接关系到电机运行性能的好坏。该系统采用标幺值设立了线性和二次曲线型两类U/f曲线,以满足不同工况下的需要。

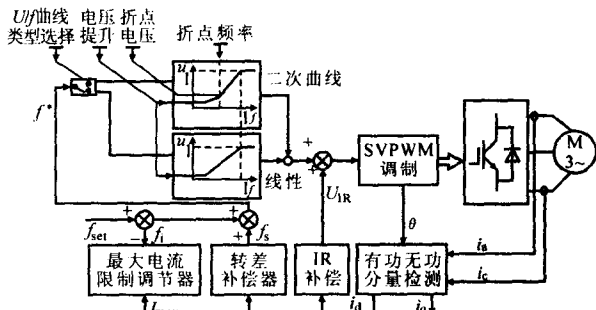


图3 高性能U/f控制框图

(2)SVPWM模块 三相三电平逆变器有27种开关状态,其中有效电压矢量为19种,对三电平逆变器各种开关状态进行分析,可得结论^[3]:①零矢量和最大矢量对中性点电流无影响;②中矢量所对应的开关状态对中性点电流有影响;③小矢量所对应的两种冗余开关状态对中性点电流的影响是相反的,可根据其引入中性点电流的符号,分正开关状态即P状态和负开关状态即N状态。规定电机绕组的电流方向为电流由逆变器流向电机为正;反之为负。规定中性点电流抽出为正;反之为负。根据中性点电流的方向,合理

选择小矢量位于 P, N 状态, 以平衡中点电位。设 i_o 为中点电流, h 为滞环宽度, 当 $U_{dc1} - U_{dc2} > h, i_o < 0$ 或者 $U_{dc1} - U_{dc2} < h, i_o > 0$ 时, 合成参考电压矢量的小矢量选 P 状态; 当 $U_{dc1} - U_{dc2} > h, i_o > 0$ 或者 $U_{dc1} - U_{dc2} < h, i_o < 0$ 时, 合成参考电压矢量的小矢量选 N 状态。

(3) 顺序控制 在程序模块中, 整个控制板的控制软件完全依靠顺序控制来协调各模块之间的关系。同时, 顺序控制也反映了电机起动所遵循的物理过程, 提供了变频器的运行状态, 并作为控制板与 PLC 配合工作的接口, 提供给 PLC 故障、报警、运行等状况, 同时也根据 PLC 的开关量输入来进入不同的状态, 控制其他模块的执行。顺序控制把当前变频器的工作状态分为 9 种: 0 为初始化工作状态; 1 为禁止合闸状态; 2 为故障状态; 3 为允许合闸状态; 4 为预允电状态; 5 为允许启车状态; 6 为运行状态; 7 为正常停车状态; 8 为安全停车状态。顺序控制有机地控制了电机的运动过程, 协调了控制回路与主回路的工作关系, 提高了设备运行的安全性与可靠性。

(4) 给定积分器 在 U/f 控制方式中, 不能让阶跃信号直接加到 U/f 曲线上, 否则供给电机的电压和频率就是阶跃的, 将造成很大的冲击电流。为避免这种情况的发生, 必须在频率给定通道中加入给定积分器, 使阶跃频率的给定按指定斜率上升, 以达到减少冲击的目的。

这里设置了一种能通过参数任意设置加减速时间、圆弧时间, 在任何给定频率下都能实现指定的 S 形加减速曲线给定积分器。图 4 给出系统实现给定积分器后实测的 S 形加减速曲线和加速度曲线。

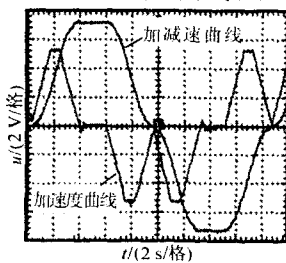


图 4 S 形曲线和加速度曲线

5 实验结果及分析

研制的三电平大功率通用变频器技术指标: 交流额定输出电压为 690 V; 交流额定输出电流为 660 A; 交流额定输出功率为 600 kW; 输出频率为 1~50 Hz; 功率因数大于 0.95; 加减速时间为 10~1 000 s 可设定。图 5 示出变频器在开关频率即载波频率为 10 kHz 下运行时的实际输出波形。由图 5a, c 可见, 输出相电压 u_{ao} 为三电平, 谐波含量主要集中在一次载波频率处, 谐波主要是载波倍数的谐波及其边带谐波。值得注意的是, 对于三相逆变器, 在线电压中, 因为调制波发生了相移, 谐波含量也发生了相移, 所以一部分载波倍数的边带谐波会被抵消掉, 这是三

相系统固有的特性, 与采用何种调制策略无关。同时, 由于在三相系统中所采用的载波是相同的, 相电压中存在的载波及载波倍数的谐波在线电压中相互抵消了。这一点从图 5b, d 中也可得到验证。由图 5b, d 可见, 输出线电压 u_{ab} 为五电平, 载波及载波倍数的谐波同相位, 且相互抵消, 故在线电压波形中的总谐波含量大大减小; 由图 5e 可见, 输出电流 i_o 的波形平稳, 谐波含量小, 接近于正弦波; 由图 5f 可见, 直流侧输出电容电压 U_{dc1} 和 U_{dc2} 保持恒定, 且纹波非常小, 母线上电容电压均保持了很好的平衡性, 采用提出的中点电位平衡控制方法后, 可满足电容电压平衡的要求。

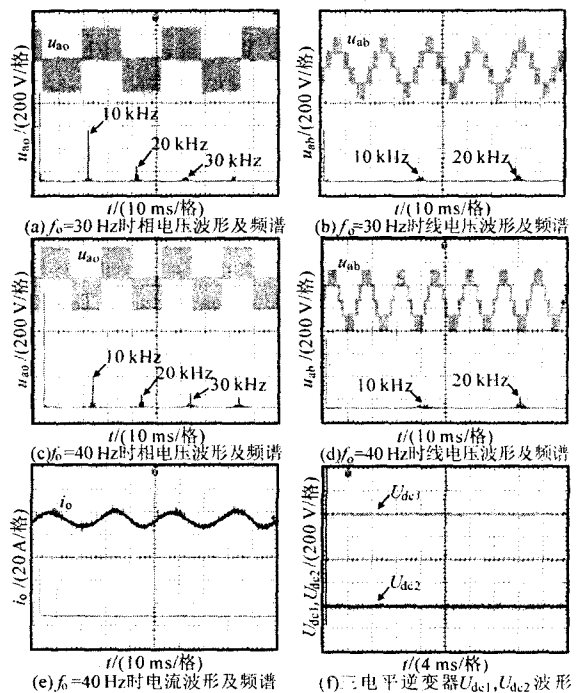


图 5 实验波形及其频谱

6 结束语

研制出 690 V/600 kW 通用大功率变频器, 并对其进行了实验运行。结果表明, 该设备具有良好性能, 对于研制大功率变频器具有很强的实践指导意义。

参考文献

- [1] Y H Lee, R Y Kim, D S Hyun. A Novel PWM Scheme for a Three-level Voltage Source Inverter with GTO Thyristors[J]. IEEE Trans. on Industry Appl., 1996, 32(2): 260-268.
- [2] Nobuyoshi Mutoh. Tripless Control Method for General-Purpose Inverter[J]. IEEE Trans. on Industry Appl., 1992, 28(5): 1031-1037.
- [3] Amit Kumar Gupta, Ashwin M, Khambadkone. A Simple Space Vector PWM Scheme to Operate a Three-Level NPC Inverter at High Modulation Index Including Over-modulation Region with Neutral Point Balancing[J]. IEEE Trans. on Industry Appl., 2007, 43(3): 751-760.