

[自控·检测]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2014.05.016

感应加热电源耦合系统的控制研究

王 富, 陈辉明, 刘拓夫

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘 要:为了实现工件的梯度加热,需要采用多个感应线圈对工件进行分段加热。针对多个感应线圈之间存在功率耦合的问题,采用解耦控制策略对耦合系统进行控制。设计了两级式感应加热电源耦合系统实验样机,并对耦合系统中主机、副机的控制设计进行重点介绍。仿真分析和实验结果表明,耦合系统中主机、副机可以实现功率独立输出。

关 键 词:梯度加热;耦合系统;解耦控制;数字控制

中图分类号:TM131.41

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2014)05-0068-04

Control for the Coupling System of Induction Heating Power Supply

WANG Fu, CHEN Huiming, LIU Tuofu

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: In order to actualize gradient heating on the workpiece, multi-inductor heating the workpiece by segmented was required. Aiming at the existence of power coupling between the inductors, the decoupled control strategy was built in coupling system. A experimental prototype of two-stage induction heating power supply coupling system was designed, then the control design for the master and slave inverter was described detailedly. The simulation analysis and experimental results show that the master and slave inverter can realize output power independently.

Key words: gradient heating; coupling system; decoupled control; digital control

现如今铝合金的应用越来越广泛,行业对铝合金型材的品质要求也越来越高。等温挤压是提高铝合金型材品质的重要手段。为了实现等温挤压,需要对铝合金型材梯度加热^[1-3]。感应加热炉由于其加热效率高,加热温度控制精确等优势逐渐成为铝合金型材加工行业的主要设备。然而传统的感应加热炉,采用一个感应加热电源一个感应线圈对工件进行加热,这无法实现对工件的梯度加热。这就要求采用多个线圈对工件进行分段梯度加热。

文献[4]提出采用一个逆变器控制多个感应线圈对工件进行分段加热的方法,每个线圈配置不同的谐振电容,造成每个谐振回路的谐振频率不同,通过改变工作频率,实现输出功率调节。局限性在于不同的温度梯度需要配置不同的谐振电容。文献[5]提出改进方法,使逆变器工作在固定频率,通过调节占空比实现输出功率的调节。但没有对多个感应线圈之间的耦合问题进行分析。文献[6]首次提出采用多个逆变器同

时对工件进行分段加热的概念,并对多个感应线圈之间的耦合进行了理论分析。但并没有进行后期实验的深入探究。文献[7]提出控制线圈电流同频同相的解耦控制策略,实现多个逆变器之间的功率解耦。通过非对称占空比控制的方式实现功率调节,会导致在占空比低的时候,线圈电流畸变严重,不利于异或门锁相跟频,具有调功范围小的缺点。

在以上研究基础上,本研究提出了两级式逆变器(前级BUCK斩波调压调功,后级H桥跟频锁相)搭建感应加热电源耦合系统(含主机,副机)。通过解耦控制策略实现了两台感应加热逆变电源的功率独立输出,并且每台感应加热电源可以实现大范围调功。

1 系统整体结构与解耦控制

1.1 系统整体结构

感应加热逆变器电源耦合系统整体结构如图1所示。

耦合系统由2台感应加热逆变电源组成。2台电

收稿日期:2013-12-30;修回日期:2014-01-02

作者简介:王富(1989),男,安徽安庆人,硕士研究生,主要研究方向为感应加热逆变电源。E-mail:wf_sunny@163.com

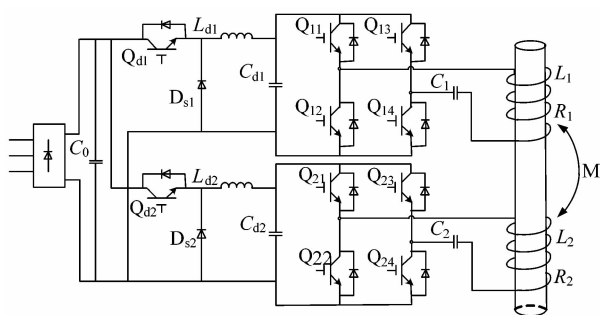


图1 系统整体结构

Figure 1 Overall structure of system

源因共同加热同一工件,感应线圈之间存在互感的原因,形成耦合系统。

每台逆变电源主电路结构为前级 BUCK 斩波电路,后级 H 桥逆变电路。前级 BUCK 斩波电路通过改变开关管的占空比实现逆变器直流侧的输入电压的调节,进而实现逆变器输出功率的调节;后级 H 桥逆变电路,主机、副机采用不同锁相内环的闭环控制方法,实现高频交流电压的输出。

1.2 解耦控制

对于耦合系统,当 2 台逆变器工作频率不同时,线圈电流的幅值会以两机工作频率的差频为频率作正弦变化,这会使感应加热电源发出很大的噪声,同时对控制线圈电流大小造成很大的困难。所以本系统中,2 台逆变器的工作频率始终相同。

为了实现对 2 台逆变器的输出功率的独立控制,需要对耦合系统进行解耦控制。文献[8]对耦合系统的解耦原理作了详细说明。

解耦原理即当主机感应线圈电流方向和副机感应线圈电流方向相同时,感应线圈之间耦合的有功功率为零。互感影响被解除,主机、副机逆变器输出的有功功率全消耗在各自感应线圈上。主机、副机感应加热电源独立输出功率。

因此,本研究所采用的解耦控制策略即是控制 2 台感应加热电源主机、副机的线圈电流相位一致。

2 控制系统设计

针对图 1 系统结构图结合解耦控制策略的要求,文中分别对 2 台感应加热电源(主机,副机)进行控制。

2.1 主机控制设计

主机感应加热电源控制系统由电流外环和 PLL 内环(锁相环)组成,电流外环通过控制前级 BUCK 的占空比 D_1 实现主机逆变器输出功率的调节,PLL 内环^[9]通过对逆变器输出电压和负载线圈电流相位进

行锁相实现主机负载谐振频率 f_0 的跟踪。

主机整体控制如图 2 所示。

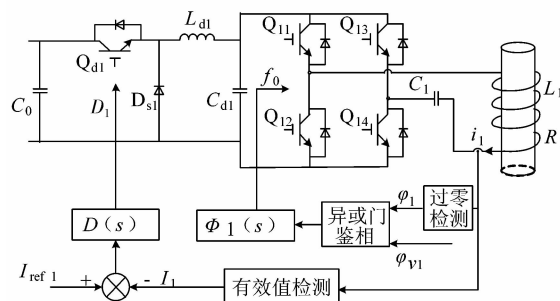


图2 主机整体控制框图

Figure 2 Control diagram of the master inverter

电流外环是通过将经过调理电路得到的负载线圈电流有效值 I_1 与给定电流值做比较,经过 PI 运算得到占空比 D_1 ,用于驱动 BUCK 开关管。

电流外环传递函数

$$D(s) = \frac{D_1}{(I_{ref1} - I_1)} = K_1 \left(1 + \frac{1}{sT_1}\right) \quad (1)$$

其中, K_1 , T_1 分别是 PI 调节器的比例和积分系数。

PLL 内环是将经过过零比较得到的负载线圈电流相位 Φ_1 与经过 90° 延迟处理的逆变器输出电压相位 Φ_{v1} 进行异或门鉴相 PD, 鉴相得到的相位差 $\Delta\Phi$, 经过低通滤波器 LPF 得到与相位差相对应的电压值 U_Φ , 送入 DSP 中进行 PI 运算, 在 DSP 中得到角频率值 ω , DSP 中算法处理类似于压控振荡器 VCO。

PLL 内环控制如图 3 所示。

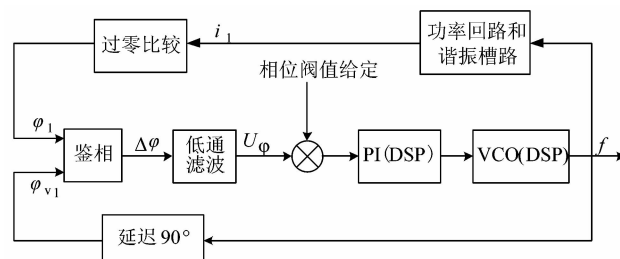


图3 PLL 内环控制框图

Figure 3 Control diagram of PLL

内环前向通道传递函数

$$\Phi_1(s) = \frac{\omega}{\Phi_{v1} - \Phi_1} = K_d K_2 K_\omega \left(\frac{1}{\tau s + 1}\right) \left(1 + \frac{1}{sT_1}\right) \quad (2)$$

其中, K_d 是鉴相环节(PD)比例系数; K_2 , T_2 分别是 PI 调节器的比例和积分系数; K_ω 是压控振荡器环节(VCO)比例系数; τ 是低通滤波环节(LPF) RC 时间常数。

得到主机 DSP 中角频率 ω 的函数表达式

由图 6 知,未加解耦控制时,增大副机电压,副机电流增大,主机电流也会增大;主机、副机电流不同相。加解耦控制,主机、副机电流波形如图 7 所示。

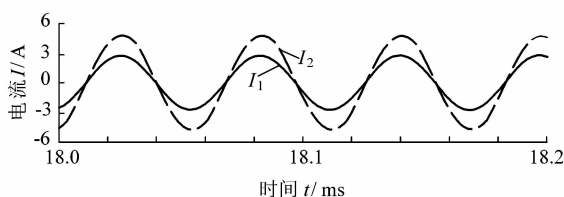


图7 $D_2 = 0.3$, 加解耦控制,
主机、副机电流波形
Figure 7 Current waveforms with
decoupled control when $D_2 = 0.3$

由图7知,加解耦控制后,增大副机电压,副机电流增大,主机电流不改变,仍与初始状态相同;主机、副机电流相位一致。

3.2 实验结果

按照图1所示结构搭建了两级式感应加热电源耦合系统样机。主副机控制电路均采用数字信号处理芯片 TMS320F28035,对文中所述进行了实验研究。

样机部分参数如下:主机负载等效电感 $L_1 = 63.0 \mu\text{H}$,等效电阻 $R_1 = 8.8 \Omega$;副机负载等效电感 $L_2 = 81.8 \mu\text{H}$,等效电阻 $R_2 = 9.6 \Omega$;串联谐振电容 $C_1 = C_2 = 1.1 \mu\text{F}$,互感 $M = 8.2 \mu\text{H}$ 。

不采用解耦控制时,主机、副机电流相位如图8所示。

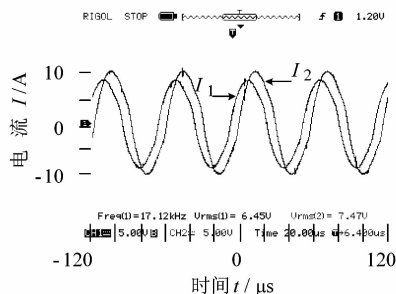


图8 未加解耦控制,主机、副机电流波形
Figure 8 Current waveforms without
decoupled control

采用解耦控制时,主机、副机电流相位如图9所示。

图8中,未采用解耦控制时,主机、副机电流相位不同,在调功过程中,两机输出会相互影响;图9中,采用解耦控制策略,在调功过程中,主机、副机电流相位

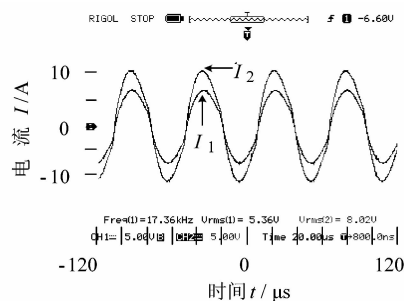


图9 加解耦控制,主机、副机电流波形
Figure 9 Current waveforms with decoupled control

始终保持一致。主副机输出功率相互独立,达到预期要求。

4 结语

本研究给出了耦合系统中主机、副机电源的控制系统设计方法和详细设计过程,对解耦控制策略在耦合系统中的应用做了仿真和实验上的验证。

仿真与实验结果表明,所设计的控制系统保证了主副机线圈电流相位同步,实现了耦合系统中的功率耦合的解耦控制,可以在梯度加热工艺中应用。

参考文献:

- [1] 刘晓辉,张振世.一种有温度梯度的感应加热设备[J].工业加热,2010,39(5):51-53.
- [2] 赵飞,耿程飞,张永亮.基于 LLC 的梯度加热电源研究[J].电源技术,2013,37(11):2044-2047.
- [3] 潘三强,徐哲,何必仕,等.基于仿真的连铸坯电磁感应加热过程温度控制研究[J].工业加热,2012,41(6):25-29.
- [4] FOREST F, LABOURÉ E, COSTA F, et al. Principle of a multi-load/single converter system for low power induction heating[J]. IEEE Transaction Power Electronics,2000,15(2):223-230.
- [5] BURDIO J M, MONTERDE F, GARCIA J R, et al. A two-output series-resonant inverter for induction heating cooking appliances[J]. IEEE Transaction Power Electronics,2005,20(4):815-822.
- [6] FUJITA H, UCHIDA N, OZAKI K. Zone controlled induction heating (ZCIH) a new concept in induction heating[C]. Nagoya: Power Conversion Conference,2007:1498-1504.
- [7] 胡程平,陈辉明.多感应器感应加热电源功率解耦控制[J].电力电子技术,2012,46(4):10-12.
- [8] 胡程平.多感应器感应加热逆变电源功率解耦控制[D].杭州:浙江大学电气工程学院,2012:13-18.
- [9] 王英.固态高频 LLC 电压型感应加热谐振逆变器研究[D].杭州:浙江大学电气工程学院,2005:108-114.
- [10] 徐德鸿.电力电子系统建模及控制[M].北京:机械工业出版社,2007:199-204.