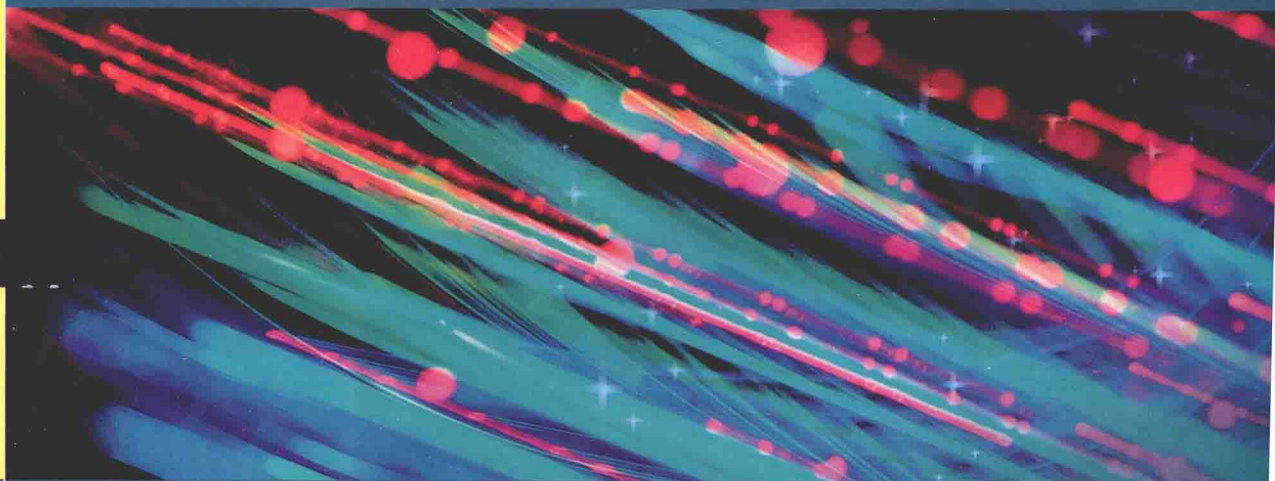


电子工程技术丛书

中频电源维修入门 与故障检修100例

● 周志敏 纪爱华 编著



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

电子工程技术丛书

中频电源维修入门与 故障检修 100 例

周志敏 纪爱华 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书结合国内中频电源使用与维修技术现状,在概述中频电源基础知识的基础上,系统地讲述了中频电源维修基础知识、晶闸管保护及集成触发电路、绝缘栅双极晶体管特性及驱动电路、维修中频电源常用电工仪器仪表、中频电源故障检查方法、中频电源检测及故障处理实例,供维修人员在实际工作中查阅。

本书内容新颖实用、文字通俗易懂,是刚刚从事中频电源维修人员的必备读物,也可作为职业技术学院电器维修专业、中频电源维修培训班学员和教师的参考书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

中频电源维修入门与故障检修 100 例 / 周志敏,纪爱华编著. —北京:电子工业出版社,2015.8
(电子工程技术丛书)

ISBN 978-7-121-26424-5

I. ①中… II. ①周…②纪… III. ①中频电源—维修 IV. ①TM910.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 138324 号

策划编辑:富 军

责任编辑:李 蕊

印 刷:涿州市京南印刷厂

装 订:涿州市京南印刷厂

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:13.75 字数:352 千字

版 次:2015 年 8 月第 1 版

印 次:2015 年 8 月第 1 次印刷

印 数:3000 册 定 价:39.80 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltts@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010) 88258888。

前 言

中频电源广泛应用于各种金属材料及五金工具、机械零部件感应热处理（淬火、退火、回火）、局部或整体透热、熔炼、热锻、热镦、钎焊和烧结等领域，其性能的优劣直接关系到整个生产过程的安全性和可靠性及产品质量。中频电源自问世以来就引起了国内外中频电源界的普遍关注，现已成为具有发展前景和影响力的一项高新技术产品。现代中频电源以其低损耗、高效率、电路简捷等显著优点而得到了广泛应用。

近年来随着我国高端机械制造产业的高速发展，中频电源的应用日益广泛。尽管中频电源已采用多种新型部件和优化结构，但从目前的元器件技术水平和经济性考虑，仍不可避免采用寿命相对较短的元器件。与此同时，中频电源还会受到安装环境、调试和使用过程中各种因素的影响，不可避免地发生各类故障，为此中频电源故障诊断技术和维修越来越引起人们的关注。

本书结合国内中频电源使用和维修中存在的问题，为满足刚从事中频电源维修人员的需求，系统地讲解了中频电源维修必备的基础知识，阐述了中频电源维修的基本方法和技能，以便读者掌握中频电源维修工作所必需的基础知识和实际操作技能。书中列举的中频电源维修实例具有普遍性和实用性，对故障检修实例的分析深入浅出，注重细节和方法，具有较强的实用性和可操作性。该书集基础知识、维修方法、维修实例于一体，读者可以此为“桥梁”，系统全面地了解和掌握中频电源维修知识及操作技能。

参加本书编写的有周志敏、纪爱华、周纪海、纪达奇、刘建秀、顾发娥、刘淑芬、纪和平、纪达安、陈爱华等。本书在编写过程中无论是资料的收集，还是技术信息的交流，都得到了国内中频电源研发公司、生产商、专业维修中频电源公司及从事中频电源售后服务的工程技术人员的大力支持，在此表示衷心的感谢。

由于时间短，加上编者水平有限，书中错误之处在所难免，敬请读者批评指正。

编著者

目 录

第1章 概述	1
1.1 中频电源的发展历程及发展趋势	1
1.1.1 中频电源的优点及发展历程	1
1.1.2 中频电源的应用领域及发展趋势	4
1.2 中频电源的结构及工作原理	7
1.2.1 中频电源的结构	7
1.2.2 晶闸管中频电源的工作原理	9
第2章 中频电源维修基础知识	15
2.1 常用电气电子元器件	15
2.1.1 常用电气元器件	15
2.1.2 常用电子元器件	25
2.2 光电耦合器	29
2.2.1 光电耦合器的分类及特性	29
2.2.2 光电耦合器的检测	33
第3章 晶闸管应用电路	38
3.1 晶闸管的结构及特性	38
3.1.1 晶闸管的结构及型号	38
3.1.2 晶闸管的特性	39
3.1.3 晶闸管的技术参数及选择	41
3.1.4 晶闸管的测量方法	44
3.2 晶闸管保护电路	50
3.2.1 晶闸管过流及过压保护电路	50
3.2.2 晶闸管缓冲电路	54
3.3 晶闸管集成触发电路	55
3.3.1 TC782A 集成触发器	55
3.3.2 TC787/TC788 集成触发电路	57
3.3.3 KC04、KC41C 组成的三相集成触发电路	61
第4章 绝缘栅双极晶体管的特性及驱动电路	64
4.1 绝缘栅双极晶体管及 IR 系列 IGBT 模块	64

4.1.1	绝缘栅双极晶体管 (IGBT)	64
4.1.2	IR 系列 IGBT 模块	66
4.2	智能功率模块 (IPM)	69
4.2.1	IPM 的结构与特性	69
4.2.2	富士电机的 R 系列 IPM	73
4.3	功率集成电路	75
4.3.1	IR2110 功率集成电路	76
4.3.2	IR2130 功率集成电路	78
4.3.3	IR2233 功率集成电路	80
4.3.4	HL601A 厚膜集成电路	82
4.3.5	TLP250 集成驱动器	83
4.3.6	EXB 系列集成驱动器	85
4.3.7	UC3842 电流型驱动器	90
第 5 章	维修中频电源常用电工仪器仪表	93
5.1	常用电工仪表	93
5.1.1	万用表的基础知识及使用技巧	93
5.1.2	万用表的正确使用	96
5.1.3	MF50 型万用表	99
5.1.4	DT-830 型数字式万用表	105
5.1.5	兆欧表的工作原理及类型	108
5.1.6	兆欧表的正确使用	111
5.1.7	BC2000D 数字兆欧表	114
5.2	示波器	118
5.2.1	普通示波器	118
5.2.2	双踪示波器	121
5.2.3	XJ4241 型双踪示波器	123
5.3	中频电源维修中的测量技术	128
5.3.1	电路常用元器件的测试	128
5.3.2	半导体器件的测试	136
5.3.3	电压的测量	146
5.3.4	电流的测量	150
第 6 章	中频电源故障检查方法	152
6.1	中频电源故障分类与维修流程	152
6.1.1	中频电源故障分类	152

6.1.2 中频电源维修流程	155
6.2 中频电源故障诊断技术与检查方法	158
6.2.1 中频电源故障诊断技术与维修原则	158
6.2.2 中频电源故障检查方法	164
第7章 中频电源检测及故障处理实例	173
7.1 中频电源故障后检测及调试	173
7.1.1 中频电源故障后检测	173
7.1.2 中频电源调试	178
7.2 中频电源故障处理实例	182
参考文献	211

第 1 章

概 述

1.1 中频电源的发展历程及发展趋势

1.1.1 中频电源的优点及发展历程

1. 中频电源的优点及分类

1) 中频电源的优点

中频电源是用电力半导体元器件组成的一种静止变频电源,是通过晶闸管将工频(50Hz)变换为中频(400Hz~200kHz)的静止变频技术。它有两种变频方式:交—直—交变频和交—交变频。与传统的电源发电机组相比,它具有控制方式灵活、输出功率大、效率高、变化运行频率方便、噪声低、体积小、质量轻、安装简便、操作维修容易等优点,在建材、冶金、国防、铁道、石油等行业获得了广泛的应用。中频电源效率高、可变频。现代中频电源采用的主要技术及优点如下。

(1) 现代中频电源的启动方式采用他激转自激形式的扫频式零压软启动方式,在整个启动过程中,频率调节系统和电流、电压调节闭环系统时刻跟踪负载的变化,实现理想的软启动,这种启动方式对晶闸管冲击小,有利于延长晶闸管的使用寿命,同时具有轻、重负荷均易启动的优点,尤其是炼钢炉满炉、冷炉时均可轻易启动。

(2) 现代中频电源的控制电路采用微处理器恒功率控制电路,加装逆变 Φ 角自动调节电路,在运行过程中,随时自动监控电压、电流、频率的变化情况,并由此判断出负载的变化,自动调整负载阻抗的匹配,恒功率输出,从而达到节时、节电、提高功率因数的目的,节能明显,电网污染小。

(3) 现代中频电源的控制电路采用 CPLD 软件设计,其程序输入由计算机来完成,脉冲精度高,抗干扰,反应速度快,调试方便,具有截流、截压、过流、过压、欠压、缺相等多项保护功能,由于各电路元器件始终工作在安全范围内,因而大大提高了中频电源的使用寿命。

(4) 现代中频电源能自动判断三相进线相序,无须分辨 A、B、C 相序,调试极为方便。

(5) 现代中频电源的电路板制作全部采用波峰自动焊接,无虚焊现象,各种调节系统全部采用无触点式电子调节,无故障点,故障率极低,操作极为方便。

2) 中频电源的分类

中频电源按采用的滤波器不同,可分为电流型和电压型。电流型采用直流平波电抗器

滤波,可获得较平直的直流电流,负载电流为矩形波,负载电压近似正弦波;电压型采用电容器滤波,可获得较平直的直流电压,负载两端的电压为矩形波,负载电源近似为正弦波。

中频电源按负载谐振方式可分为并联谐振式、串联谐振式和串并联谐振式三种。电流型常用于并联和串并联谐振逆变电路;电压型则大多用于串联谐振逆变电路。

2. 中频电源技术的发展历程及技术现状

1) 中频电源技术的发展历程

纵观我国感应加热用中频电源的发展历史,可把其发展概括为20世纪70年代的开发研究期、80年代的成熟应用期、90年代的大范围推广期和20世纪末期的提高性能期。

(1) 20世纪70年代为众多单位参与的开发研究期。我国应用电力半导体器件研制感应加热用中频电源的历史可追溯到20世纪70年代,1963年我国第一只晶闸管问世,在1970年我国开发出了快速晶闸管,1972年我国许多单位都开始了晶闸管中频电源的研究。这个时期应用的核心器件为快速晶闸管,其控制电路为由众多分立元器件构成的多块控制板组成的插件箱结构。同时,由于晶闸管制作工艺技术的限制,决定了主电路结构,快速晶闸管的阻断耐压不够高,由两只或三只晶闸管串联构成逆变桥臂,所应用的快速晶闸管的数量为8只或12只,因而晶闸管需要采用均压网络。由于这个时期晶闸管的关断时间不能太短,所以决定了中频电源的输出频率不高;又因为这个时期快速晶闸管的动态参数 du/dt 和 di/dt 不是很高,导致了系统中限制 du/dt 及 di/dt 的网络庞大而复杂。在此阶段由于整个晶闸管可靠性还很不理想,决定了这一阶段中频电源多是实验室产品,在工业中应用很少。

(2) 20世纪80年代的成熟应用期。到1980年以后,由于国产晶闸管制造工艺的长足进步及技术引进,其可靠性获得了很大的进步,因而中频电源逐步从实验室进入了工业生产实际应用中。这一时期的晶闸管中频电源逆变桥已逐步从多只快速晶闸管串联向单只晶闸管过渡,但输出工作频率仍然不是很高,多在2.5kHz以下,要获得4kHz或8kHz的输出频率仍不得不使用倍频等复杂控制技术。

这一时期晶闸管中频电源的启动方案多为带有专门充电环节的撞击式启动方案,且控制板为多块小控制板构成的插件箱式结构。整个控制系统通常由12块控制板构成(6块整流触发板、2块逆变脉冲板、1块正电源板、1块负电源板、1块保护板、1块调节板),在这一时期快速晶闸管国产水平关断时间最快为35 μ s,而阻断电压最高不超过1600V,平均电流最大为500A,由此决定了对功率容量超过350kW的感应加热采用中频电源时不得不采用多只快速晶闸管并联的方案。

80年代初,人们将现代半导体微集成加工技术与功率半导体技术进行结合,相继开发出一大批全控电力电子半导体器件(GTR、MOSFET、SIT、SITH及MCT等),为全固态超音频、高频电源的研制打下了坚实的基础。

(3) 20世纪90年代的大范围推广应用期。经历了前述两个时期,我国的晶闸管中频电源技术已较成熟。国产快速晶闸管制造工艺采用中子辐照等使关断时间进一步缩短,从35 μ s左右降到25 μ s左右,甚至20 μ s以下;阻断电压已从1600V上升到2000V左右;快速晶闸管的容量进一步提高,单管容量已从500A增加到1000A;控制技术已有撞击式启动、零压启动、内/外桥转换启动等方案,感应加热中频电源的功率容量已从几十千瓦增加到500kW,甚至1000kW。

(4) 20 世纪末期的提高性能期。1998 年之后,国内开发单机容量 1000kW 以上的中频电源,推动了快速晶闸管制造水平的进一步提高,国内已能生产单管电流容量达 2000A、2500A 的快速晶闸管元器件,但关断时间对 1500A 以上的晶闸管仍然很难降到 $20\mu\text{s}$ 以下。为了解决大中频电源的重炉启动问题,开发出了第五代中频电源控制板,即不要同步变压器的自对相和相序自适应的扫频启动板,使晶闸管中频电源的性能和水平上了一个很高的档次。

为了解决电网的污染问题,提高效率,借助于 IGBT 及 MOSFET 制造水平的提高、容量的扩大和成本的下降,中变频电源已在小容量领域从晶闸管向以 IGBT 和 MOSFET 为主功率器件的高频电源过渡(工作频率范围为 $20\sim 200\text{kHz}$),并已批量投入工业生产中应用。

2) 中频电源技术现状

目前国产中频电源都采用并联谐振型逆变器结构,因此在研究和开发更大容量的并联逆变中频电源的同时,研制结构简单、易于频繁启动的串联逆变中频电源是国内中频感应加热装置领域有待解决的问题。尤其是在熔炼、铸造应用中,串联逆变中频电源易实现全工况下恒功率输出(有利于降低电能损耗)及一机多负载功率分配控制,更值得推广应用。

我国中频电源就其技术现状可以概括为以下几点。

(1) 以晶闸管为主功率器件的中频电源已覆盖了工作频率为 8kHz 以下的所有领域,其单机功率容量分 50kW、160kW、250kW、500kW、1000kW、2000kW、2500kW、3000kW 几种,工作频率有 400Hz、1kHz、2.5kHz、4kHz、8kHz 几种。

(2) 中频电源中三相全控整流桥的触发器采用集脉冲形成、保护、功率放大、脉冲整形于一体的单一大板结构(内含逆变桥的脉冲产生与功放和调节器)。

(3) 中频电源中三相整流桥的晶闸管触发器已从采用同步变压器,需现场调试校正相序的控制模式向不用同步变压器的具有相位自适应功能的触发器过渡。

(4) 晶闸管中频电源的启动方式已从撞击式启动、零压启动、内外桥转换启动过渡到扫频启动,其控制技术已从电压或电流闭环调节进步到恒功率控制,从而使中频电源的控制效果更好,提高了中频电源的使用效率。

(5) 中频电源用快速晶闸管的单管容量已达 2500A/2500V,其最短关断时间已达 $15\mu\text{s}$,与中频电源配套的无感电阻高频电容等制造技术得到了长足的进步,为晶闸管中频电源的设计、制造提供了极大的方便。

(6) 晶闸管中频电源的零部件及配套件,如散热器、熔断器、电抗器、控制板,已标准化、系列化、批量生产化,给晶闸管中频电源的制造商及维护人员带来了极大的方便。

(7) MOSFET 和 IGBT 等全控型功率半导体器件的容量已日益扩大,与 IGBT 及 MOSFET 配套的驱动器和保护电路已系列化和标准化,给中频和超音频中频电源的设计、制造奠定了技术基础。以 IGBT 和 MOSFET 为主功率器件的中频电源,其单机容量在 200kW 以内,工作频率范围基本上都为 $20\sim 200\text{kHz}$,超过 20kHz 的中频电源基本上都是采用 MOSFET。但目前 MOSFET 的额定参数限制了中频电源功率的提升,虽然可采用直接将 MOSFET 并联,或将 MOSFET 构成逆变桥,再多个逆变桥并联的方案,但却使主电路和控制电路复杂,可靠性下降。为此采用 IGBT 和 MOSFET 为主功率器件的中频电源,仍是需要进一步研究的课题。

(8) 国内单机容量在 500kW 以上的中频电源的功率器件基本上是晶闸管电源,但工作

频率最高不超过 8kHz，容量最大已达 4000kW。单机容量达 6000kW 的晶闸管中频电源正在开发中。从电路的角度来考虑中频电源的大容量化，可将大容量化技术分为两大类：一类是器件的串、并联；另一类是多桥或多台电源的串、并联。在器件的串、并联方式中，必须认真处理串联器件的均压问题和并联器件的均流问题，由于器件制造工艺和参数的离散性，限制了器件的串、并联数目，且串、并联数越多，装置的可靠性越差。多台电源的串、并联技术是在器件串、并联技术基础上进一步再容量化的有效手段，借助于可靠的电源串、并联技术，在单机容量适当的情况下，可简单地通过串、并联运行方式得到大容量装置，每台单机只是装置的一个单元（或一个模块）。

(9) 在超音频（10 ~ 100kHz）范围内，由于晶闸管本身开关特性等参数的限制，给研制该频段的电源带来了很大的技术难度。而在欧美，由于 SIT 存在高通态损耗（SIT 工作于非饱和区）等缺陷，其高频功率器件以 MOSFET 为主。随着 MOSFET 功率器件的模块化、大容量化，MOSFET 高频感应加热电源的容量得到了飞速发展。西班牙采用 MOSFET 的电流型感应加热电源制造水平达 600kW、400kHz；德国在 1989 年研制的电流型 MOSFET 感应加热电源水平达 480kW、50 ~ 200kHz；比利时 Inducto Eiphiac 公司生产的电流型 MOSFET 感应加热电源水平可达 1000kW、15 ~ 600kHz。浙江大学在 20 世纪 90 年代研制出 20kW、300kHz MOSFET 高频电源，已被成功应用于小型刀具的表面热处理和飞机涡轮叶片的热应力考核。

(10) 中频电源的逆变器主要有并联逆变器和串联逆变器，串联逆变器输出可等效为一低阻抗的电压源，当两电压源并联时，相互间的幅值、相位和频率不同或波动时将导致很大的环流，以至逆变器件的电流产生严重不均，因此，串联逆变器存在并机扩容困难的问题。而并联逆变器输入端的直流大电抗器可充当各并联逆变器之间的电流缓冲环节，使得输入端的 AG/DG 或 DG/DG 环节有足够的时间来纠正直流电流的偏差，达到多机并联扩容的目的。晶体管化超音频、高频电流多采用并联逆变器结构，并联逆变器易于模块化、大容量化是其中的一个主要原因。

(11) 中频电源的负载对象各式各样，而中频电源逆变器与负载是一有机的整体，一般采用匹配变压器连接中频电源和负载感应器，高频、超音频电源用的匹配变压器从磁性材料到绕组结构正在得到进一步的优化改进，同时，从电路拓扑上可以用三无源元器件代替二无源元器件，以取消变压器，实现高效、低成本匹配。

(12) 现在的中频电源的冷却方式多为水冷却，存在着水管结垢、水压很高、冷却效果不佳等缺陷，造成晶闸管的过热损坏，为此，冷却方式及晶闸管热保护方案仍需进一步完善。

1.1.2 中频电源的应用领域及发展趋势

1. 中频电源应用领域

中频电源主要应用于金属工业，其主要用途是金属加工前的预热、热处理、焊接和熔炼。除此之外，在其他方面也有广泛的应用，如油漆处理、黏结处理和半导体制作等。

1) 金属加工前的预热

中频感应加热广泛用于锻造和挤压工艺，如对钢材、铝合金和钛、镍等稀有金属进行加工前预热。通常，工件都是呈圆形、方形或圆角方形的棒料。对钢件而言，由于感应加热工艺的加热速度高，从而产生的氧化皮数量最少，因此能使材料的损耗减少到最

低程度。

2) 热处理

中频感应加热可用于钢材的表面淬火、穿透淬火、回火和焖火,其主要优点是能控制加热部位。

(1) 感应淬火:它是最常用的感应热处理方法,它能增强材料的机械强度和耐磨性能。

(2) 感应回火:尽管回火的应用不如淬火普遍,但回火可以使钢的延展性增强并且不易断裂。

(3) 感应焖火:其应用也不如淬火普遍,但它可以恢复钢、铝合金及其他金属的柔韧性和延展性。

3) 熔化

中频感应加热可用于熔化优质钢和有色金属(如铝、铜合金)。同其他方法相比,感应加热的优点是熔化均匀,同时可以延长坩埚寿命。

4) 焊接

高频感应焊接可以节能,这是因为加热能量集中在焊点上。最常见的应用途径是高速焊管,它充分利用了局部加热和易于控制这两个特点。

5) 有机涂层的固化

中频感应加热可以用来固化有机涂层,如金属底部加热,同时给金属喷涂有机涂料。使用这种方法,可以避免产生涂层缺陷。典型的应用实例是把金属片涂料涂抹在金属表面,然后加热金属熔化镀涂并固化。

6) 黏结

有些汽车部件,如离合器片和闸瓦的黏结,就像涂层固化方法一样,通过中频感应加热使金属达到某一温度,用胶黏剂使两者迅速黏结起来。

7) 半导体制作

单晶硅和锗的生成常用中频感应加热的方法,逐区精炼、逐区致匀。半导体中掺杂质及半导体材料的外延也都采用了感应加热工艺。

8) 镀锡

通常在钢板上镀锡时,镀层不均匀,表面粗糙无光泽。如果把钢板通过中频感应加热到 230°C ,可以使原有的锡层再次熔化流动,使得镀锡层均匀,表面有光泽。

9) 烧结

中频感应加热广泛地应用于碳化物成品的烧结,因为在可控气氛中,采用中频感应加热的方法能在石墨曲瓶颈或感受器中对碳化物施加 2550°C 的高温。其他黑色金属和有色金属的烧结加工也可以用类似的方法,无论有没有气体保护措施。

2. 中频电源的发展趋势

随着电力电子功率器件的大容量化、高频化,电子技术装置的控制由模拟向数字化、智能化发展,中频感应加热电源的发展趋势呈现以下几个方面的特点。

(1) 中频感应加热电源主要采用晶闸管,中频电源的需要催生了新的功率器件,而新的器件又反过来促进了中频电源的发展。中频电源由于对功率器件、相关元器件及布线、结构、接地、屏蔽都有要求,一般很难把功率做大、频率做高,因此,实现感应加热中频电源仍有许多应用基础技术需要进一步探讨。特别是新型大功率器件的问世,将进一步促进感应加热中频电源的发展。

(2) 大容量化。从电路原理角度来看, 感应加热中频电源的大容量化, 如几十兆瓦、几百兆瓦, 都是可以实现的, 但事实上大功率中频电源要受制于目前电力电子功率开关器件的限制。目前解决中频电源大容量化, 有以下技术途径:

① 基于功率器件的串、并联方式。功率器件串联增加耐压水平, 并联解决大电流问题, 这种方法主要是要处理好串联器件的均压问题和并联器件的均流问题。由于电子器件制造工艺和参数离散性, 所以功率器件只能进行有限的串、并联。串、并联功率器件太多, 装置的可靠性就无法保证。现在工业现场运行的 1000kW (1MW) ~ 10MW 的感应中频电源大多采用的是功率器件的串、并联技术。

② 中频电源的整流桥电路或逆变桥电路的桥与桥之间的串、并联。整流桥的并联可以增大中频电源的电流输入, 整流桥串联可以提高整流输出电压, 两者都对改善谐波有利。一般情况下, 整流桥串、并联数越多, 对改善谐波越有好处。整流桥的并联要解决的是各桥的均流问题, 串联解决的是各桥间的均压问题。多逆变桥的串、并联也是常采用的技术, 比单纯的功率器件串、并联提高功率更有实际意义。事实上, 超大功率中频电源都是采用逆变桥组成的复合逆变桥路技术, 即把原来逆变桥看作一个模块或单元, 利用这些模块或单元组成新的逆变桥路。这样无疑增加了控制电路的复杂性和难度, 可以采用计算机控制技术达到这种电路需要的同电压、同电流、同相位、同频率等特殊参数条件的控制需求, 最终达到功率输出更大化。

(3) 目前, 以晶闸管为主功率器件的中频电源仍然不会退出历史舞台, 仍将垄断大功率 (几千千瓦以上) 中频电源领域, 将是 10 吨、12 吨、20 吨炼钢或保温的主流设备。小功率晶闸管中频电源 (功率容量小于 1000kW) 将随着对效率及炼钢质量的要求不断提高, 而逐渐减小使用量, 但它们在淬火、弯管等领域仍将使用一段时间。

(4) 主功率器件为 IGBT 及 GTO 的感应加热用中频电源将与主功率器件为晶闸管的中频电源展开激烈的竞争并逐渐缩小前者的市场份额。中频 (频率为 10 ~ 30kHz) 领域使用的中频电源将以 IGBT 为主要器件, 其单机容量将随着 IGBT 自身容量的不断扩大而不断扩大, 并获得越来越大的使用范围。高频 (频率高于 100kHz) 领域的感应加热电源将以 MOSFET 为主要器件, 伴随着 MOSFET 制造工艺的不断进步和突破, 以 MOSFET 为主功率器件的高频电源将获得广泛的应用, 其容量将不断扩大。

(5) 感应加热用中频电源的冷却技术将获得较大突破, 将解决水冷方式在使用中带来的漏水、水质处理等不便, 但这之间也许要经过很长的时间。感应加热用中频电源的配套件将不断进步, 更加标准化、系列化, 给高中频电源的制造和维修带来更大的方便。

(6) 感应加热用中频电源的单机功率容量将不断扩大, 有望突破 10MW, 其工作频率将越来越高。与感应加热用中频电源配套的限制电网干扰、保证电网绿色化的 EMI 抑制技术、功率因数校正技术将获得广泛应用, 并进一步改善中频感应加热电源的输出波形和效率。SIT 及 SITH 这些器件将在我国中频电源领域获得应用, 并填补我国至今没有自行开发应用这些器件制作的中频感应加热电源的空白。中频感应加热电源的启动方式、控制技术将再获得突破, 并进一步提高这类电源的性能, 采用新型控制策略的中频电源将获得大范围应用。

1.2 中频电源的结构及工作原理

1.2.1 中频电源的结构

1. 感应加热对晶闸管中频电源的要求

1) 感应加热炉对晶闸管中频电源的输出功率要求

晶闸管中频电源的输出功率必须满足感应加热炉的最大功率，还要考虑输出功率能方便调节，这是因为通常感应加热炉的坩埚在熔炼数十炉后就损坏了，必须重新修筑坩埚炉衬，而新的坩埚炉衬筑好后必须对其进行低功率烘炉，通常烘炉是从10%~20%的额定功率开始，然后每隔一定时间升高10%功率，直至额定功率。再则，在熔炉过程中，当炉料熔化后，必须对炉料的成分进行化验，而化验期间为使炉料熔化后沸腾剧烈，这时中频电源必须减小输出功率，使炉料保温。鉴于以上情况，所以要求晶闸管中频电源能在10%~100%额定输出功率的范围内方便的调节。

2) 感应加热炉对晶闸管中频电源的输出频率要求

感应加热炉的电效率与频率之间是相关联的，从电效率出发可以决定晶闸管中频电源的输出频率，称这一频率为 f_0 。感应器实际上是一个电感线圈，而为了要补偿线圈的无功功率，在线圈的两端并联电容，这就组成了LC振荡回路。当晶闸管逆变器的输出频率 f 等于感应加热炉回路的固有振荡频率 f_0 时，则此时回路的功率因数等于1。感应加热炉内将得到最大的功率。从以上可以看出，回路的固有振荡频率与 L 和 C 的数值有关，一般补偿电容 C 的值是固定不变的，而电感 L 则因炉料的磁导率变化而变化，比如炼钢时，冷炉钢的磁导率 μ 很大，所以电感 L 较大，而当钢的温度超过居里点时，钢的磁导率 $\mu=1$ ，所以电感 L 减小，因而感应加热炉回路的固有振荡频率 f_0 将变大。为了使感应加热炉在熔炼过程中始终能得到最大的功率，要求晶闸管中频电源的输出频率 f 能随着 f_0 的变化而变化，始终保持频率自动跟踪。

2. 晶闸管中频电源的基本结构

晶闸管中频电源由可控或不可控整流器、滤波器、逆变器及一些控制和保护电路组成，如图1-1所示。工作时，三相工频交流电经整流器整成脉动直流，经滤波器变成平滑直流送到逆变器，逆变器采用晶闸管作为电子开关，将直流电转变成频率较高的电流供给负载。在中频感应加热炉中，中频电流是通过感应线圈把能量输送给负载的，而感应线圈往往就是逆变器中的一个部件。因此，中频电源负载的功率因数很低。为了提高功率因数，需要

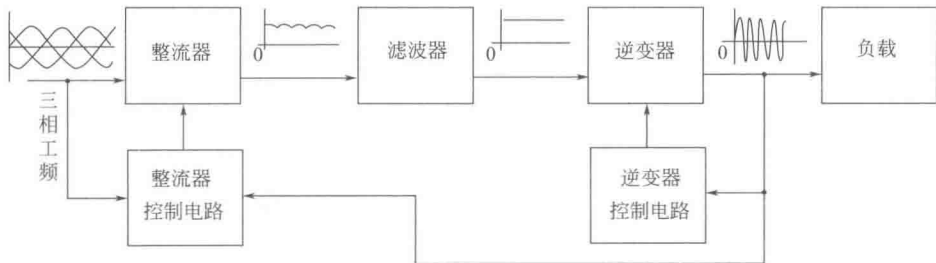


图 1-1 中频电源的基本结构框图

由补偿电容器向感应加热负载提供无功能量。实际中,补偿电容器与感应线圈串联、并联或串/并联联合使用,据此可把逆变器分成以下三种。

(1) 当补偿电容器与感应线圈在逆变器中组成串联谐振时,称为串联逆变器。串联逆变器的电压是感应线圈电压的函数,逆变器的电流与线圈电流相同。

(2) 当补偿电容器和感应线圈在逆变器中组成并联谐振时,称为并联逆变器。并联逆变器的电压与感应线圈电压相同,而逆变器的电流则比感应线圈电流小得多,前者是后者的函数。并联逆变器的性能更接近中频发电机组,在感应加热炉中应用较广。

(3) 综合了串联和并联逆变器特点的串/并联逆变器。

此外,还有能提高工作频率的倍频逆变器,这些都是无源逆变器,因为它们都能把变成的交流电能送回电源。

实际上,无源逆变器的电路结构繁多,分类方法也很多。例如,按逆变器输出的相数,可分为单相、三相和多相;按线路结构,可分为对称和不对称;或桥式和非桥式等。用于感应加热的逆变器的电路结构主要有单相桥式并联、串联、串/并联和倍频逆变电路。这些电路各具特点,不可能明确划分它们的应用范围,更不能简单地比较它们的优、缺点。

与其他结构的逆变器相比,串联逆变器具有以下优势。

(1) 串联逆变器电路流经感应线圈中的电流 I_L 接近有功电流,因此 I_L 很小, I_L 在感应线圈电阻中造成的电损耗很小。经理论计算及实验检测,感应加热炉的功率因数可以达到 0.98 ~ 1,采用串联逆变器感应加热炉可节电 10% 以上。

(2) 串联逆变电路可以做到从冷料到锻打温度 1250℃,全过程都能保持满功率,大大提高了运行效率,熔化率最高。

(3) 串联逆变电路要求输入为恒压源,采用大电容量 C_d 滤波,首先使三相工频输入电流保持正弦波,而且中频电流在直流端全部被 C_d 旁路,串联逆变器的功率调整在逆变桥实现,可控整流角均在 0°,没有整流换相缺口,对电网无任何干扰。

(4) 因三相整流桥在运行中整流角均在 0°,所以其直流电压均为最大值。大容量的 C_d 直接并入直流端,自动将电网功率因数保持在 0.98 ~ 1 之间。

(5) 串联逆变电路的启动成功率为 100%,因流经逆变晶闸管的电流为正弦波,所以不存在晶闸管的开通与关断问题,即逆变不会换流失败,不存在启动问题。

3. 中频电源对晶闸管的触发电路要求

1) 触发信号要有足够的功率

为使晶闸管可靠触发,触发电路提供的触发电压和触发电流必须大于晶闸管产品参数提供的控制极触发电压与触发电流值,即必须保证具有足够的触发功率。例如, KP50 要求触发电压不小于 3.5V,触发电流不小于 100mA; KP200 要求触发电压不小于 4V,触发电流不小于 200mA。但触发信号不许超过规定的控制极最大允许峰值电压与峰值电流,以防损坏晶闸管的控制极。在触发信号为脉冲形式时,只要触发功率不超过规定值,允许触发电压或触发电流的幅值在短时间内大大超过铭牌规定值。

2) 触发脉冲必须与主回路电源电压保持同步

为了保证电路的品质及可靠性,要求晶闸管在每个周期都在相同的相位上触发。因此,晶闸管的触发电压必须与其主回路的电源电压保持固定的相位关系,即实现同步。实现同步的办法通常是选择触发电路的同步电压,使其与晶闸管主电压之间满足一定的相位关系。

3) 触发脉冲要有一定的宽度,前沿要陡

为使被触发的晶闸管能保持在导通状态,晶闸管的阳极电流在触发脉冲消失前必须达到擎住电流,因此,要求触发脉冲应具有一定的宽度,不能过窄。特别是当负载为电感性负载时,因其中电流不能突变,更需要较宽的触发脉冲,才可使晶闸管可靠导通。例如,单相整流电路,电阻性负载时脉冲宽度应大于 $10\mu\text{s}$,电感性负载时则应大于 $100\mu\text{s}$;在三相全控桥中,采用单脉冲触发时脉宽应大于 60° (通常取 90°),而采用双脉冲触发时,脉宽为 10° 左右即可。此外,很多晶闸管电路还要求触发脉冲具有陡的前沿,以实现精确的触发导通控制。

4) 触发脉冲的移相范围应能满足主电路的要求

触发脉冲的移相范围与主电路的形式、负载性质及变流装置的用途有关。例如,单相全控桥电阻性负载要求触发脉冲移相范围为 180° ,而电感性负载(不接续流管时)要求移相范围为 90° 。三相半波整流电路电阻性负载时要求移相范围为 150° ,而三相全控桥式整流电路电阻性负载时要求移相范围为 120° 。

1.2.2 晶闸管中频电源的工作原理

晶闸管中频电源是一种静止变频装置,利用晶闸管元器件将三相工频交流电整流为直流电,经电抗器滤波后,成为一个恒定的直流电流源,再经单相逆变桥,把直流电流逆变成一定频率的单相中频电流,负载是由感应线圈和补偿电容器组成的。主要应用于感应加热、感应熔炼及其他需要中频电源供电的场合。由于它具有整机效率高、质量轻、噪声小、启停迅速而且对电网无冲击、频率自动跟踪负载参数变化、功率调节方便等一系列优点,因此它正在逐步取代中频发电机组。KGPS 型晶闸管中频电源主电路采用“交流—直流—交流”变换方式,由三相全控桥式整流电路、电感滤波电路、并联逆变电路组成。晶闸管元器件用水冷却,其控制系统由集成电路组成,性能稳定、可靠。启动采用先进的零电压方式,安全、方便、维修简便、经济,特别适用于金属熔炼、加热及热处理工况。

1. 工作原理

交—直—交变换器主电路框图如图 1-2 所示,整流器采用三相桥式全控整流电路,逆变器采用单相桥式逆变电路,负载为并联谐振形式,直流滤波环节为大电感滤波,以满足并联逆变器的输入要求。

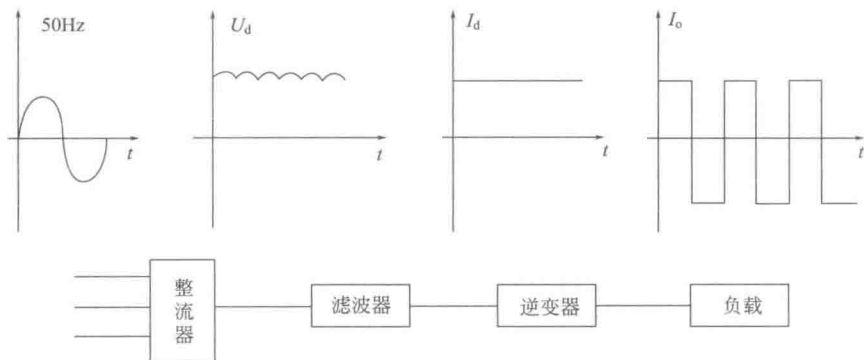


图 1-2 交—直—交变换器主电路框图

1) 整流电路

(1) 中频电源对整流电路的要求。中频电源整流电路的负载是逆变器,逆变器输出有

功率是由整流电路提供的，要求整流电路的直流输出电压在规定的范围内能连续平滑可调（0~513V）。中频电源的负载变化很大，整流电路应自动限制输出电压。通常是采用在负载端取出电流、电压信号来改变整流移相控制角，从而完成截流、截压控制。

整流电路对具有过电压和过电流保护的电路采用移相控制角为 150° ，使直流输出负压形成有源逆变。直流电抗器是有源逆变的一个重要条件，大部分中频电源采用三相全控桥式整流电路。因为它的输出电压调节范围大，而移相控制角的变化范围小，所以有利于系统的自动调节。其输出电压的脉动频率较高，可以减轻直流滤波环节的负担。

对整流电路还有一个要求：当逆变器运行失败时，能把存储在电抗器中的能量通过整流电路返回到工频电网，使逆变得得到保护，即为有源逆变。

（2）三相桥式全控整流电路。三相桥式全控整流电路如图 1-3 所示。三相桥式全控整流电路的输出电压为：

$$U_d = 2.34 U_2 \cos \alpha \quad (1-1)$$

式中 U_d ——输出直流电压平均值；

U_2 ——电网相电压；

α ——触发移相角。

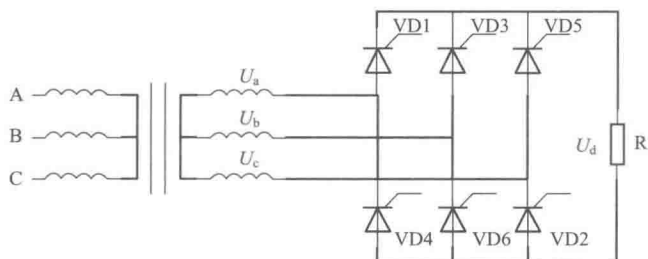


图 1-3 三相桥式全控整流电路

图 1-4 给出了在不同 α 角下三相桥式全控整流电路的输出电压的波形（在感性负载和电流非断续状态下），其中 $\alpha > 90^\circ$ 的状态称为整流的逆变工作状态，其实质是负载向电网反馈能量。整流触发电路采用数字集成电路构成，所采用芯片的型号、功能及有关说明见表 1-1。

表 1-1 采用芯片的型号、功能及有关说明

编 号	名 称	型 号	用 途
U101	4 运放	LM324	限幅放大
U102、U103	4 异或门	CD4070	过零检测及整形
U104 ~ U106	2 输入或非门	CD4001	或非逻辑
U107 ~ U109	14 级二进制串行计数器	CD4020	分频
U110 ~ U112	双时基电路	556	脉冲整形调制
U113	单时基电路	555	产生调制脉冲

（3）中频电源对整流触发电路的要求。

① 脉冲的频率和相位。在三相桥式全控整流电路中共用 6 只晶闸管元器件，因此要求触发电路提供 6 路周期性触发信号（ V_{g1} 、 V_{g2} 、 V_{g3} 、 V_{g4} 、 V_{g5} 、 V_{g6} ），而且 6 路触发脉冲的相位关系是依次互差 60° 。