

高效数字式空冷感应加热电源

上海巴玛克电气技术有限公司 李南坤

主要内容: 本文通过分析现行感应加热产品普遍存在效率低、可靠性差等问题的原因, 引入一种高效率数字式全空冷感应加热电源, 并介绍其关键技术和节能情况。

关键词: 感应加热电源、数字式、效率、可靠性

一. 前言

感应加热电源广泛应用于金属热处理、淬火、透热、熔炼、焊接、热套、电真空器件去气加热、半导体材料炼制、塑料热合、烘烤和提纯等场合, 利用在高频磁场作用下产生的感应电流引起导体自身发热而进行加热。感应加热与气体燃烧加热或者通电加热相比, 具有显著节能、非接触、速度快、效率高、工序简单、容易实现自动化等显著优点。

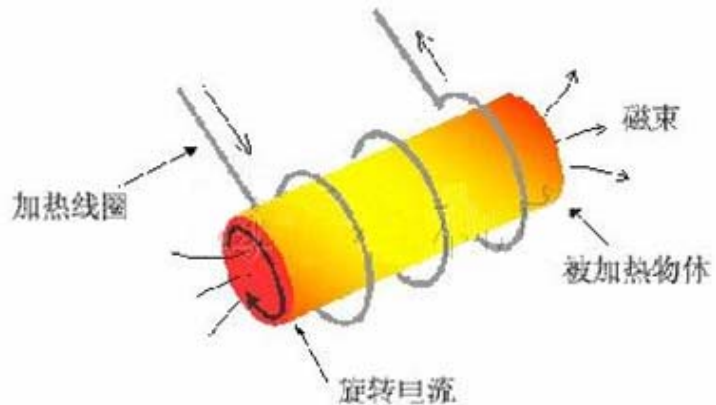


图 1. 感应加热原理示意图

感应加热电源主要由逆变器、谐振单元、变压器和感应器组成。其中逆变器是一个交—直—交的变频器, 将工频交流电能变换成为几千至几百千赫兹的高频电能。谐振单元和变压器一端连接逆变器, 另一端连接感应器, 将高压变成隔离的低压并进行阻抗匹配。加热时, 感应器中流过强大的高频电流, 在导体内产生感应电流, 因此导体迅速被加热。

逆变器所需的高频逆变器件决定了装置的形式, 它经历了从电子管、晶闸管到目前普遍采用 IGBT 的发展历程。早期的感应加热设备以大功率真空电子管为核心构成单级自激振荡器, 把高压直流电能转换成高频交流电能, 由于电压变换环节较多、电子管转换效率低, 设备的总体效率一般在 50% 以下, 水和电能的消耗非常大。与电子管设备相比, 晶闸管式感应加热设备的效率大为提高, 达到 90% 左右, 但其谐振频率较低、逆变换流部分相当复杂、损耗仍然较大, 且功率因数低。而采用 IGBT 或 MOSFET 的感应加热设备总体效率在 90% 以上, 谐振频率可达数百千赫兹, 且结构大为简化, 设备可靠性、功率因数等其它品质均得以提高。

二. 目前产品普遍存在的问题及原因

虽然采用 IGBT 取代晶闸管和电子管已经取得了很大的进步, 但目前大多数生产厂商研制生产的感应加热电源设备仍然存在一些普遍问题, 这些问题主要表现为:

- 效率较低、电能和冷却水消耗大
- 功率元件 IGBT 容易损坏
- 输出变压器容易损坏
- 冷却水回路故障较多
- 功率因数较低、谐波污染大
- 设备可靠连续运行性能欠佳

这些问题主要是因为设计上的缺陷所致，现针对这些问题探讨其原因：

- ◆ 目前同类产品的输出变压器均采用水冷结构，变压器线圈由铜管绕制，高频工作时，涡流损耗非常大，因此效率较低，冷却水消耗大。
- ◆ 由于输出变压器、IGBT、谐振电容器均采用水冷结构，不仅损耗较大，而且容易发生因为铜管结垢堵塞导致变压器和功率器件烧毁，也容易发生漏水导致故障范围扩大等问题；此外，由于水路并联支路很多，系统无法保证每一支路均具有断水保护功能。
- ◆ 由于控制电路不能适应各种变化工况，使得功率元件 IGBT 脱离过零软开关状态，因此开关损耗增加、并经常导致 IGBT 过热损坏。
- ◆ 部分产品采用软开通、硬关断(或带缓冲的硬关断)电路，因此 IGBT 损耗大，且在过载情况下 IGBT 容易损坏。
- ◆ 设备在过压、欠压、过载、感应圈短路或部分短路、功率元件过热等情况下控制电路不能起到有效限制和保护作用，导致设备损坏。
- ◆ 控制电路抗干扰能力差，系统运行不稳定或保护限制功能容易误动作，设备可靠性差。
- ◆ 整流后直接采用大容量电力电容滤波，无滤波电感或直流侧 IGBT 斩波电路，因此功率因数低，输入电流谐波大；如采用电力电解电容，还有发热、串联均压问题、寿命较短等缺陷。

三. 新型数字式空冷产品的关键技术

一种新型高频感应加热电源主回路如下图所示，该产品为全数字式控制结构，在中央处理器 DSP 的控制下，功率器件 IGBT 工作在零电流开关状态；且直流侧也采用 IGBT 斩波电路，这有效提高了设备功率因数、减少输入谐波；此外，该产品通过多种措施降低系统损耗、提高效率，使得设备可以采用全空冷结构，并消除设备来自水系统的故障；基于这种结构，设备的工作频率为 1KHz—100KHz。

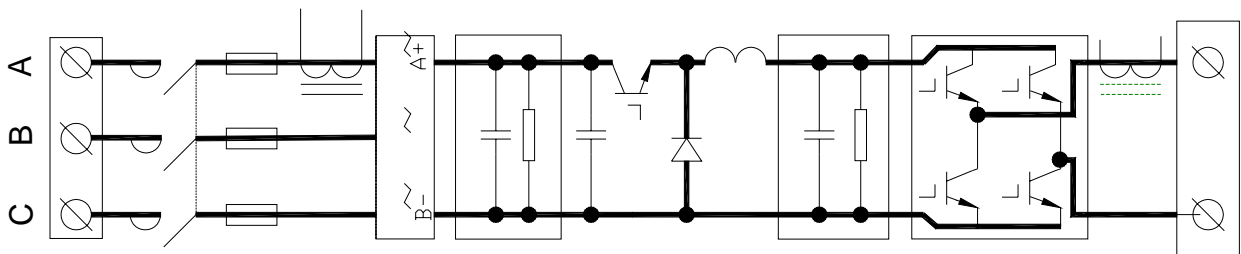


图2. 新型高频感应加热电源主回路图

1. 准确可靠的过零软开关 IGBT 逆变

高频感应加热电源一般均采用谐振软开关控制，可以大为降低 IGBT 开关损耗，且实现自动跟踪谐振频率。

有的产品直流侧没有 IGBT 斩波电路，这是一种软开通硬关断电路，或者是带缓冲的硬关断电路。这种电路的关断损耗较大。采用直流侧 IGBT 斩波电路后，可以实现完全的软开通软关断，并将开通损耗和关断损耗均降至最低。

传统控制电路采用锁相环跟踪系统谐振频率，但谐振频率较高时，影响频率跟踪的离散参数比较突出，频率较高时，锁相环精度不够，容易出现脱离软开关的状态，因此开关损耗增大，严重时导致 IGBT 损坏。

举例说明：如果在信号传输回路中产生 1uS 的误差，高频状态下就会产生非常大的开关损耗，如输出频率为 40KHz，输出电流 180A RMS 时，1uS 的时间加上 0.75uS 的死区时间的实际角度为 25.2

度，此时硬开关电流为 108A，查 IGBT 性能曲线表，在 40KHz 的开关频率下，IGBT 损耗将在 1200W 左右，与准确的软开关相比，损耗增加 1 倍以上，因此，在这种情况下，IGBT 容易损坏。

因此，提高控制的准确度是保证 IGBT 安全运行的前提条件。

新型高频感应加热电源采用 DSP 进行跟踪控制，凭借 DSP 的快速处理能力，可根据不同工况进行跟踪补偿，使系统准确度大幅度提高，谐振频率和相位的跟踪误差大为降低。此外，系统采用的快速 IGBT 驱动电路也有助于更准确快速的高频软开关电路的实现。

2. 空冷输出变压器

传统水冷输出变压器主要存在两大缺陷：一是损耗大、二是容易损坏。由于水冷变压器线圈由铜管绕制，在高频运行时，其涡流损耗非常大，损耗的能量均由水带走，这使得系统效率降低。此外，水冷变压器容易发生水管结垢堵塞烧毁变压器的现象。因此，为提高输出变压器的可靠性，降低损耗，需研制空冷输出变压器。

设计空冷变压器时，首要的问题是降低导线的涡流损耗，降低铁心的涡流损耗和磁滞损耗，因此，导线采用多根细漆包线并绕的方法，铁心采用低损耗铁氧体磁心，并选取适当的磁通密度。此外，绕组和铁心通风冷却结构、降低变压器漏抗也是空冷高频变压器必须考虑的问题。

3. DSP 运行控制

在新型高频感应加热电源中，DSP 的作用举足轻重，不但要保证准确可靠的过零开关 IGBT 逆变，还有比较多的事务需实时处理：

- 采集各种信号用于控制
- 显示操作界面处理
- 提供各种运行控制方式
- 在各种工况下均保证完善的限制保护措施
- 用户接口，包括通讯的处理
- 参数设置、事件和事故的管理

因此，合理分配资源，制定一定的优先级别，才能保证各项任务有序地执行。

4. 完善的限制保护措施

在感应加热设备中，由于负载工况比较复杂，完善的限制保护措施必不可少，但“完善的限制保护措施”绝不能为了保护设备而降低设备运行可靠性，如果电网稍有波动或者负载发生变化时设备就保护退出运行，这样可靠运行就大打折扣，不是完善的限制保护措施。

完善的限制保护措施应该是在有相当大的抗扰动前提下，当较大扰动发生时，设备启动限制程序，但继续保持安全运行，扰动消除后，设备即恢复正常运行，如此设备得以不间断连续运行，可靠性大为提高；只有在超出设备承受能力的情况下，设备才强制保护退出运行。

感应加热电源中，由于工件在不同温度下的涡流特性很不一致，且工况变化情况较多，因此限制保护程序非常重要，既要保证设备安全运行，又要适应各种变换工况，提供可靠的连续运行能力。

5. 提高控制电路抗 EMI 能力

虽然 IGBT 工作在过零开关状态，但高频工作时，仍需尽量提高 IGBT 开关速度，降低损耗，因此电路的 dv/dt 和 di/dt 均很高，其电磁干扰很大。微处理器电路和快速信号处理电路对电磁干扰也相当敏感，快速准确的频率与相位跟踪也对 EMI 提出更高要求。因此，在高频感应加热电源中，尤其对于全数字式产品，提高控制电路的抗 EMI 能力是系统稳定运行的保障。

四. 各种类型感应加热电源产品性能比较

目前，感应加热电源主要存在电子管式、晶闸管式、MOSFET 式、IGBT 式，而新型数字式空冷 IGBT 式是在后者基础上发展起来的改进型产品。这些类型的产品均各有优缺点，在某些场合均有它们的适用对象。

电子管式是最早的感应加热电源产品，目前除了 100KHz 以上高频外，已逐步被其它类型产品替代；晶闸管式目前在超大功率领域仍具有优势；MOSFET 式目前仅适用于小功率场合，如做成大功率，则并联的功率器件太多，系统稳定性下降；随着 IGBT 器件的容量和性能的快速发展，IGBT 式感应加热电源是这些年发展最快的产品，有代替传统晶闸管式和电子管式的趋势。

项目	电子管式	晶闸管式	MOSFET 式	IGBT 式	空冷 IGBT 式
综合可靠性	较低	一般	较高	一般	较高
综合故障率	高	较高	较低	较高	较低
装置效率(包括变压器)	50%以下	90%左右	90%左右	90%左右	95%左右
工件热效率	40%以下	68%左右	75%左右	75%左右	80%左右
功率因数	较高	较低	较高	较高	高
高压	有	无	无	无	无
水系统	复杂	复杂	一般设计为小功率、空冷结构	复杂	仅感应器水冷
用水量	很高	较高		较高	低
维护	复杂	较复杂	较简单	较复杂	简单
易损部件	电子管	无	无	电解电容	无
适用场合	频率 100KHz 以上	频率 5KHz 以下,大功率	频率 500KHz 以下,小功率	频率 1-100KHz, 功率 0-1000KW 各种场合	

注：工件热效率是指工件上实际获得的功率与装置输入功率之比，影响工件热效率的因素较多，包括工件材料、频率、感应器与工件的形状等，在此提供的数据仅供参考。

五. 节能分析

1、感应加热与非感应加热方式相比

● **与油气燃烧加热相比：**由于油气燃烧加热是被动加热，而感应加热是主动加热，因此效率相差非常大，分别比较被加热工件的能量效率，感应加热的电热效率是油气燃烧热效率的 4 倍左右，节能在 50% 以上。因此感应加热大为降低金属加工过程中的能耗，而且还具有改善工作环境、减少污染、提高生产效率等社会效益。

通常，油气燃烧加热改造成为感应加热后，半年至一年内可收回投资。

● **与通电加热相比：**另一种非感应加热的方法是通过金属直接通电进行加热，这也是一种主动加热的方法，但其应用范围局限，只适用于被加热对象电阻值较大的场合，且在变压器和传输线路上的电发热损耗很大，因此效率也较低、功率因数低。另一种方法是通电间接加热，这是被动加热方法，显然效率较低。

与通电加热方法相比，感应加热方法的节能一般在 30% 以上。

2、空冷 IGBT 式感应加热与其它方式感应加热相比

● **与电子管式感应加热相比：**电子管式感应加热设备由于电压变换环节较多、电子管转换效率低，设备的总体效率一般在 50% 以下，且水和电能的消耗非常大，与电子管相比，新型空冷 IGBT 式感应加热设备节能在 40% 以上。

● **与晶闸管式感应加热相比：**由于晶闸管式的工作频率较低，被加热对象的涡流效应降低，感应器损耗增大，因此 IGBT 式在工作频率上具有优势；且晶闸管式感应加热电源逆变换流部分相当复杂，换流开关损耗大。一般情况下，与晶闸管式相比，新型空冷 IGBT 式感应加热设备节能在 10% 以上。

● **与传统 IGBT 式感应加热相比：**新型空冷式感应加热电源的 IGBT 开关损耗较小、输出变压器涡流损耗降低，与传统 IGBT 式相比，效率提升在 5% 以上。

3、四种感应加热方式能耗比较：

以工件所需功率 60KW 的感应加热电源为例，比较电子管式、晶闸管式、IGBT 式、全空冷 IGBT 式感应加热电源的耗电量，以每年平均工作 200 日，每日 6 小时计算，则全年工作 1200 小时，电费按照每度 0.80 元计算。

感应加热电源	工件功率	输入功率	装置效率	工件热效率	年耗电量	年电费
电子管式	60KW	150KW	50%	40%	180000KWH	14.40 万元
晶闸管式	60KW	88.2KW	90%	68%	105840KWH	8.47 万元
IGBT 式	60KW	80KW	90%	75%	96000KWH	7.68 万元
全空冷 IGBT 式	60KW	75KW	95%	80%	90000KWH	7.20 万元

六. 结论

1. 传统感应加热电源产品存在损耗大、电能和水的消耗大、功率因数低、水系统故障多、运行可靠性不高等缺陷。

2. 新型数字式空冷感应加热电源通过采取空冷变压器、IGBT 软开关等措施降低系统损耗，不仅提高了效率，而且消除了系统来自水系统的故障；通过采用 DSP 实现全数字式控制，不仅提高了系统跟踪和控制准确度，而且系统的可靠性和先进性也得以提高；通过直流侧 IGBT 斩波电路结构，不仅实现了逆变 IGBT 的过零开通和过零关断，而且提高了装置的功率因数。