

感应加热电源的负载匹配方案

高迎慧, 彭咏龙

(华北电力大学, 河北 保定 071003)

摘要: 分析了串联谐振型和并联谐振型感应加热电源的负载电路及负载匹配的重要性, 针对不同电源类型对负载匹配方案进行了研究, 介绍了多种负载匹配方法。

关键词: 感应加热电源; 负载匹配; 串联谐振型; 并联谐振型

Load Matching Schema of Induction Heating Power Supply

GAO Ying-hui, PENG Yong-long

(North China Electric Power University, Baoding Hebei 071003 China)

Abstract: The importance of load matching are analyzed. The load circuit of series resonance and parallel resonance applied in induction heating power supply are analyzed. Load matching schemas for different power supply are studied. Many load matching means used in practice are proposed

Keywords: induction heating power supply; load matching; series resonance type; parallel resonance type

中图分类号: TN86 文献标识码: A 文章编号: 0219 - 2713(2004)07 - 0426 - 05

1 概述

随着电力电子技术及器件的发展, 固态感应加热电源已在金属熔炼、透热、淬火、热处理、焊接等行业得到越来越广泛的应用。对于热处理行业的大部分负载来说, 感应加热电源设备须经过负载阻抗匹配后才能正常工作。所谓负载阻抗匹配就是为了使电源输出额定功率, 而采取的使负载阻抗等于电源额定阻抗的方法和措施。

对于一台电源设备, 其额定电压 U_N 和额定电流 I_N 取决于电源本身, 为使电源能输出额定功率, 要求有合适的负载阻抗 $Z = Z_N = U_N / I_N$ 与电源匹配, 如果 $Z \neq Z_N$, 电源与负载不匹配, 电源利用率就降低。以简单的直流电压源为例: 电源额定电压 $U_a = 400\text{ V}$, 额定电流 $I_a = 400\text{ A}$, 额定阻抗 $|Z_a| = 1\ \Omega$, 负载阻抗 $|Z| = 1\ \Omega$ 时, 电源输出额定功率; $|Z| = 0.5\ \Omega$ 时, 输出电流为 $I = U_a / |Z| = 400 / 0.5 = 800\text{ A}$, 电源过载; $|Z| = 2\ \Omega$ 时, 输出电流为 $I = U_a / |Z| = 400 / 2 = 200\text{ A}$, 电源轻载。图 1

可清楚的表明以上所说情况。

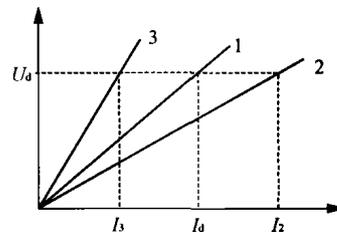


图 1 不同负载情况下的负载电流

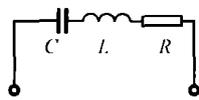
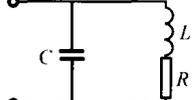
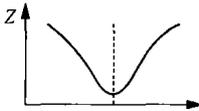
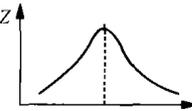
图 1 中, 线 1 表示负载与电源匹配, 线 2 表示电源重载, 线 3 表示电源轻载。电源与负载不匹配时, 为保证不损坏电源设备, 只能降额运行, 降低了电源利用率, 适当的匹配可以使电源全功率运行, 保证设备正常运转, 减少故障。在实际中, 很少有负载阻抗恰好等于电源额定阻抗的情况, 负载匹配是感应加热装置安全可靠经济运行的一个必不可少的环节, 是感应加热电源负载侧设计的重要内容。

2 负载等效电路分析

感应加热装置的感应器支路可以等效成一个

电阻和一个电感串联或并联的形式^[1]，等效的电感、电阻是感应器和负载耦合作用的结果，其值受感应器与负载耦合程度的影响。等效感应器支路是一个感性负载，功率因数很低，需加入电容器进行无功补偿，补偿电容器与感应线圈的连接方式有串联和并联两种形式，从而形成两种基本的谐振电路：并联谐振电路、串连谐振电路。为了提高效率和保证逆变器安全运行，固态感应加热电源一般工作在准谐振状态，串联谐振电路和并联谐振电路的特性，见表1。

表1 串联与并联谐振电路比较

类别	串联谐振电路	并联谐振电路
电路拓扑图		
阻抗频率特性		
谐振等效阻抗	$Z_D = R$	$Z_D = L/RC$
谐振类型	电压谐振	电流谐振

从表1可以看出，串联谐振电路在谐振状态下等效阻抗为纯电阻，并达到最小值，并联谐振电路在谐振状态下等效阻抗达到最大值，为了获得最大的电源输出功率，串联谐振电路采用电压源供电，并联谐振电路采用电流源供电，即电压源型感应加热电源必须匹配串联谐振型负载电路，电流源型感应加热电源必须匹配并联谐振型负载电路，这是电源与负载的初次匹配措施。

3 负载匹配方案分析

负载匹配方法主要分为两大类：静电耦合和电磁耦合。静电耦合主要采用无源元件，通过改变电路拓扑结构来改变负载阻抗。这一方法在一定条件下可以省去匹配变压器，因此更加经济、方便。电磁耦合主要采用匹配变压器，通过变压器变换阻抗特性进行负载匹配。下面针对不同电路形式进行分析。

3.1 并联谐振电路负载匹配方法

并联谐振电路等效阻抗 $Z_D = L/RC$ ，改变等效电路中的电容、电感、电阻的值都能改变阻抗，这一特性使并联谐振电路的阻抗匹配更加灵活。

3.1.1 匹配电容元件

根据电容元件加入的位置不同，可以分为以下3种方法，分别示意在图2、图3及图4。

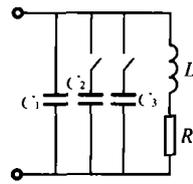


图2 匹配电容方法之一

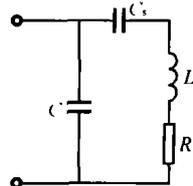


图3 匹配电容方法之二

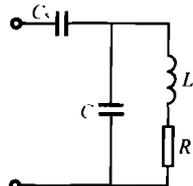


图4 匹配电容方法之三

图2等效阻抗 $Z_D = L/RC$ ，其中 $C = C_1 + C_2 + C_3$ ，通过开关的开、合可以改变电容值，从而改变负载电路等效阻抗，此法简单易行，是实践中常用方法之一，但属于有级调节，调节时要求断电。另外， C 的变化会引起电路谐振频率发生变化，负载谐振频率受工艺要求限制，当频率超出范围时应配合匹配电感的方法来抵消频率的变化。注意，所有匹配方法都应考虑频率的变化，处理方法类似，以后不再叙及。

图3等效阻抗 $Z_D = LC_s/[RC(C + C_s)]$ ，可见加入 C_s 后，阻抗成 $C_s/(C + C_s)$ 倍变化，可使原来的等效阻抗变小，适用于阻抗相对电源来说高的负载。

图4是串并联负载电路，电路仍工作在并联谐振状态，工作情况与并联谐振电路类似， C_s 的加入使容性阻抗增加。该电路优点是启动容易，通常作为晶闸管感应加热电源的起动电路，单纯作为负载匹配措施则较少使用。

3.1.2 匹配电感元件

一般分为两种情况，分别如图5及图6所示。

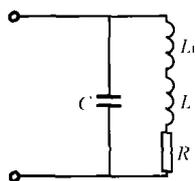


图5 匹配电感方法之一

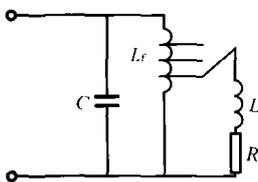


图6 匹配电感方法之二

以上两种电路形式是通过加入可变电抗器改变感应线圈支路的电感,进而改变等效阻抗值,图5串联电感的方式只能增加感应器支路的电感,图6的连接方式可以增大支路电感,也可以减小支路电感。由于并联谐振属于电流谐振,并联支路中流过谐振电流,达到电源电流的 $Q(Q = \omega_0 L/R)$ 倍,谐振电路等效电感增加会增加铜损。

感应加热电源负载匹配方法中利用电感匹配的方法可以归纳为以下几种。

——利用带铁心的多抽头电抗器,改变抽头调节电抗值,属于有级调节,调节时要求断电。由于制作工艺上的原因,抽头的数量受到限制,无法做到细调。

——采用动铁心电抗器,移动铁心与线圈的相对位置来改变电抗值,属于无级调节,调节时无须断电,可以跟随负载阻抗的变化,匹配效果好,容易组成稳定感应线圈上的电压,或恒温、恒功率自动控制系统,但铁心动作须经过一套传动系统,故障率较高,且须建立协调控制模型。

——采用动圈式变压器的形式,一次线圈与感应线圈并联,二次侧绕组自身短接,移动一次绕组与二次绕组的相对位置,便可以改变一次侧的等值电抗,属于无级调节。变压器必须采用空心变压器,一二次绕组相对位置的变化也须经过一套传动装置,故障率高,同样须建立控制模型。

——用磁饱和电抗器作为 L_1 ,通过调节直流激磁电流来改变电抗值,属于无级调节。该方法无移动、旋转部件,也无触点控制,安全可靠,维护工作量小。

——增减感应线圈的匝数。在感应线圈的几

何形状不变的条件下(感应线圈的长度和直径不变),感应线圈的电感与其匝数 N 的平方成正比,当匝数 N 增减时,感应线圈的电感 L 和工件的等效阻抗也会相应增减,从而改变负载的等效阻抗。

——改变感应线圈与被加热工件的耦合情况。感应器与被加热工件耦合的紧密程度直接影响感应器支路等效阻抗,从而影响谐振电路等效阻抗,但是,当感应器与工件的间隙增大,耦合较松时会降低加热效率,匹配效果有限。

3.1.3 匹配电阻元件

负载匹配的根本目的是尽量使电源额定功率全部用于工件加热,也就是提高电源效率的问题,因此,在负载匹配的问题中,应结合有利于提高电源效率综合进行分析。在电路中加入电阻可方便地使负载阻抗与电源相匹配,但装置的损耗增加,加热效率降低,没有根本解决问题,不是可行的负载匹配方法。

3.1.4 匹配变压器

利用电磁耦合进行负载匹配是通过变压器的变阻抗特性实现的,这在感应加热中非常普遍,采用的电路形式主要有两种,如图7及图8所示。变压器变阻抗特性以图7为例说明如下:变压器副边电路工作在谐振状态,等效阻抗 $Z_D = L/RC$,通过变比为 $n:1$ 的变压器后,变压器原边的等效阻抗 $Z_D = n^2 L/RC$ (忽略变压器漏抗的影响),可见阻抗成 n^2 倍变化。

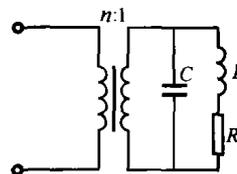


图7 利用变压器匹配方法之一

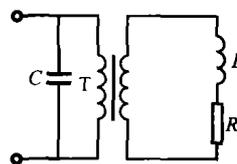


图8 利用变压器匹配方法之二

图7电路中感应器支路所需无功容量由并联电容器提供,负载电路工作在准谐振状态,匹配变压器通过少量无功功率,所需容量较小,匹配变压器原边流过电源电流,损耗不大,可以采用铁心变

压器。图 8 电路中,匹配变压器中既通过有功功率又通过无功功率,所需变压器容量较大,铁心变压器容量受铁心制造水平限制,在传输容量大时难以胜任,所以此电路通常采用空心变压器,匹配变压器原边流过谐振电流,损耗较大。

利用匹配变压器进行负载匹配时应考虑以下选择原则。

——空心变压器易实现大容量化,适合于初级补偿,减轻了对 C 的要求,但随着电压、功率的上升,其体积相应增大。铁心变压器难以实现大容量化,无功须在次级补偿,增加了 C 的选择难度。另外,空心变压器漏感大,变比不等于匝比,在设计中难以掌握,变比较大时实现困难,铁心变压器漏感小,变比等于匝比,对于极低的负载阻抗可以做成较大的匝比。

——铁心变压器的铁损正比于频率的平方,高频时发热严重,这提高了对变压器冷却系统的要求,所以高频时常采用铁淦氧磁芯或空心变压器。

——当负载工作频率较高时,为保证匹配效率要求匹配变压器漏抗尽量小,这对匹配变压器的设计提出了更高要求。

——补偿电容 C 一般放在匹配变压器高压侧,在提供无功容量一定时,可大大降低电容值,当然,这需综合考虑所选电路形式、变压器和电容的市场售价而定。

——为适应多种负载,匹配变压器应设计成多抽头变压器,但抽头数量受变压器结构的限制,对负载的调节有限,难以做到最佳匹配。随着频率的增加,多抽头变压器的设计更加困难。

——随着铜价的上升,变压器造价会不断上升,而电容价格随着电容生产技术的发展有下降趋势,另外利用匹配变压器进行负载匹配须考虑其寄生元件的影响(漏抗、寄生电容),变压器铜损的存在也会降低电源效率,所以进行负载匹配时应首选静电耦合方法。

——匹配变压器可以起到电气隔离的作用。

3.2 串联谐振电路负载匹配方法

通过对串联谐振电路负载特性的分析可知,串联谐振电路等效阻抗只与等效电阻 R 有关,改变等效电路中电容和电感值不影响等效阻抗,这一特性大大限制了串联谐振电路的负载匹配措施。

3.2.1 改变感应器与工件的耦合

在并联谐振电路匹配电感的方法中已经提到,改变感应线圈与被加热工件间的耦合程度可以改变等效电阻,此法也适用于串联谐振电路阻抗匹配。

3.2.2 负载串接

当负载阻抗小时,将数个完全相同的感应线圈和被加热工件串接起来可以增大负载等效阻抗。

3.2.3 匹配电容元件

图 9(a) 为匹配电路,该电路仍工作于串联谐振状态,即谐振时并联部分相当于感性负载,图 9(b) 为图 9(a) 的等效电路,其中

$$R_1 = \frac{R}{(1 - \omega_0^2 LC_s)^2 + \omega_0^2 C_s^2 R^2}$$

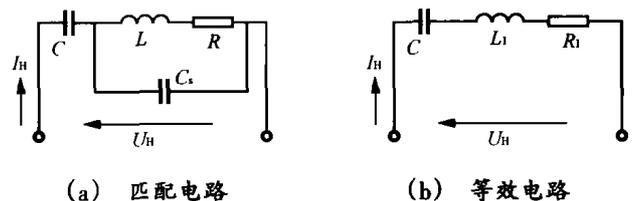


图 9 匹配电容元件

可见, C_s 的加入影响串联谐振电路等效电阻,从而影响串联谐振电路等效阻抗。在一定频率下负载的感性无功功率一定,工作在谐振状态的容性无功功率等于感性无功功率,所以要求补偿的容性无功功率容量也是一定的, C_s 的加入只是分担了一部分容性无功功率,不会因增加无功功率容量而增加成本。

3.2.4 匹配变压器

串联谐振电路受其电路形式的限制,匹配方法单一,所以在实际应用中,串联谐振电路一般利用匹配变压器实现负载匹配。利用变压器进行负载匹配的研究与并联谐振电路类似,不同的是串联谐振属于电压谐振,匹配变压器位置不同所承受电压不同。图 10 所示电路中匹配变压器原边为谐振电压,对匹配变压器绝缘要求较高。而图 11 所

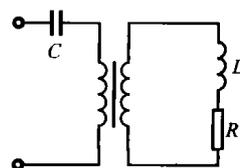


图 10 利用变压器匹配方法之三

示电路中匹配变压器承受电源电压,可以降低绝缘要求。

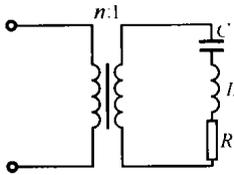


图11 利用变压器匹配方法之四

4 结语

串联谐振电路的特性决定改变等效电容和电感值不能改变谐振状态的等效阻抗,静电耦合负载阻抗匹配方案中许多不适用于串联谐振电路,串联谐振电路一般采用匹配变压器进行负载匹配。

并联谐振电路可用静电耦合和电磁耦合进行负载阻抗匹配,匹配方法灵活,对负载适应性强,

这是并联谐振型逆变电源广泛应用的原因之一。

利用静电耦合进行负载匹配是一种简单、经济的方法,而利用电磁耦合进行负载匹配也灵活方便,两种方式各有优势,在实际应用中,一种匹配方法有时难以满足多方面要求,为达到最佳匹配,可以将多种方法配合使用。

参考文献

- [1] 可控硅中频技术及其应用编写组. 可控硅中频技术及其应用[M]. 北京: 电力工业出版社, 1981.
- [2] 潘天明. 现代感应加热装置[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1996.
- [3] 潘天明. 工频和中频感应炉[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1981.

作者简介

高迎慧(1976-),女,华北电力大学电气工程系电力电子与电力传动专业2002级研究生。

彭咏龙(1966-),副教授,现从事电力电子技术教学及科研工作。

创造品质——先检者明,先行者利

——美国福禄克公司及福禄克网络公司、哈希公司、雷泰(中国)公司
携手全国六城市巡展

日前,丹纳赫集团公司旗下子公司美国福禄克公司、福禄克网络公司、哈希公司和雷泰(中国)公司以“创造品质——先检者明,先行者利”为主题联合举办了全国大型巡展活动。此次活动主要涵盖新产品发布、销售工程师的培训、以及福禄克品牌全系列产品多方位的深入推介等内容。活动全程历时一个月,覆盖华北、华中、华南等主要省市地区,跨越重庆、武汉、深圳、济南、沈阳、西安等6个大中城市。邀请了当地行业协会、专家、媒体及专业人士参加。

美国福禄克公司、福禄克网络公司、哈希公司和雷泰(中国)公司组织的此次全线核心产品全国巡演活动,旨在将其在精密仪器测试行业、企业信息化建设与服务等领域的各项卓越优势与应用成果全面、纵深地向各地经销商及各行业企业终端客户充分展示,以全面推进企业网络化及精密仪器测试在全国范围的应用进程;经销商以及终端客户对福禄克全线产品进一步深刻了解,以提高各地区对福禄克产品的应用水平,同时,美国福禄

克公司也借此次巡展之机,随时随地的解决福禄克产品在使用中存在的问题,集中为企业终端用户做好贴身服务。

本次活动得到了相关政府领导及行业协会的重视和大力支持。在展会现场美国福禄克公司、福禄克网络公司、哈希公司、雷泰(中国)公司的工程师与众多参展者零距离接触,详细地介绍了行业发展趋势及新产品技术,解决在产品应用中遇到的问题。

在展会期间,美国福禄克公司副总裁黄宜植先生在接受我们的专访时说:“这次巡展我们带来了新的产品,与客户零距离接触,为客户提供在功能、性能、可靠性以及应用方面科技含量高的产品。”他接着说:“我们非常重视在中国的发展,目前中国已成为福禄克在美国本土外的全球第二大市场,部分产品在相关领域目前占80%以上的市场份额。今后我们继续提供更加完整的产品线,不断研发新产品,更好地为中国用户提供完善服务和产品。”