

钢管防腐中频加热系统功率因数优化研究

方铁牛¹ 方子文²

1 4303211981****353X

2 4303212007****0219

摘要: 中频感应加热设备的加热速度快、排放小、占地小、换型快等优点,在石油天然气输送钢管行业中普遍使用。现阶段国内中频加热电源制造商主要聚焦于 400V 低压进线的小型并联谐振式中频电炉的研发生产。这类设备优势在于可直接接入工业标准电压网网络实现多设备共享,且具备显著的成本优势。然而在防腐钢管生产过程中,由于管材规格(直径 $\varnothing 2620\text{--}\varnothing 323.9$,壁厚 30mm-9.5mm)的频繁切换,导致系统功率因数波动明显(0.99-0.35),不仅造成能源浪费,还会引发电网电压波动。为解决这一问题,本研究通过优化传统并联谐振中频感应加热系统,开发出适用于 1500KW 中频电源的功率因数提升方案,经实际生产验证取得显著节能成效。

主要研究内容包括:

- (1) 解析感应加热基础理论及工作原理,重点研究负载补偿电路的运行机制。
- (2) 设计对比实验,量化分析钢管规格变化时固定/动态补偿电容对功率因数的影响。
- (3) 开展节能验证,测试不同管材参数下调整谐振电容容量的节能效果。

关键词: 电磁感应加热; 并联谐振; 谐振补偿电容; 阻抗匹配

DOI: 10.69979/3060-8767.26.02.002

1 绪论

感应加热在钢管外层防腐中的优势主要体现在将钢管直接进行加热。这种方法改善了工人的工作条件,并且使钢管的升温速度更快,温度控制更加精确且加热均匀。由于钢管没有直接接触加热线圈,不易在钢管表面造成划痕,同时对钢管表面的各种污染也小,为后续工艺和质量提供了保证,因此感应加热技术在钢管防腐行业应用非常广泛。使用中频感应加热时,只需要更换与钢管直径相匹配的感应线圈,而不必进行预热,即可开始生产。该技术便于使用,操作简便,操作工人经过简单培训,就可以进行操作,在生产过程中具有明显的优势。感应加热圈可以直接安装在钢管传送辊道中,生产时钢管连续穿过感应加热线圈,安全可靠,同时大大提高了空间的利用率和生产效率。感应加热设备主要由主机电源、谐振电容、感应加热线圈、水冷装置及水冷电缆组成,整体结构简单,维修方便,现场适应性强,只需添加简单的控制元器件即可完成自动化控制升级改造。

在国家双碳目标重压下,节能减排技术受到国家和企业日益重视。感应加热设备的电能使用效率很高,感应熔炼炉和感应透热炉对坯料的实际加热效率可达 55%,而火焰炉和其他实验炉的加热效率仅约为 30%^[1],其节能优势尤为明显。

1.1 研究的意义

并联谐振中频炉历经 40 年发展已形成成熟技术体系,凭借其高效节能特性在钢管外防腐行业广泛应用。在我国,防腐钢管在油气和水的输送上需求量很大。当前,生产这些防腐管道的企业多采用中小功率低压线并联谐振中频感应电源。然而,由于钢管的直径和壁厚变化范围大($\varnothing 2620\text{--}\varnothing 322.9\text{mm}$ 、30-9.5mm),加热所需的中频功率也随着直径和壁厚由大变小而减少,从 1500KW 降至 400KW。此外,功率因数由 0.99 降至约 0.35,这不仅增加了企业的生产成本,还影响到整个供电系统的稳定性和电压质量。在不增加企业加投资的情况下通过钢管口径和壁厚的变化动态调整并联谐振电容的容量来提高设备功率因素。

随着环保要求提升和电力基础设施完善,发展高效感应加热技术,改变制造行业耗能高的现状,符合当前发展形势,对制造业节能减排具有重要意义。针对应用广泛的并联谐振系统开展节能研究具有显著经济效益。

1.2 研究的主要内容

对于生产防腐管道的厂家目前绝大多数使用的是中小功率并联谐振中频感应电炉,由于口径和壁厚变化大($\varnothing 2620\text{--}\varnothing 322.9\text{mm}$ 、30-9.5mm),中频功率随着口径和壁厚从大到小、由厚到薄,钢管表面加热所需要的功率也从 1500KW 减少到 400KW,由于中频感应加热设备是根据输出功率大小固定设计的,由于输出功率逐步下降,导致中频感应加热设备率因数也从 0.99 下降到

0.35 左右,不但增加了制造企业的成本,也影响到整个供电系统的稳定以及电压质量。在不增加企业加投资的情况下通过钢管口径和壁厚的变化,动态调整并联谐振电容的容量来提高设备功率因素。

这篇文章重点研究中频感应加热系统的并联谐振特性,主要从以下几个方面进行探讨:

(1) 解析感应加热基础理论及工作原理,重点研究负载补偿电路的运行机制。

(2) 设计对比实验,量化分析钢管规格变化时固定/动态补偿电容对功率因数的影响。

(3) 开展节能验证,测试不同管材参数下调整谐振电容容量的节能效果。

2 感应加热基础理论及工作原理

2.1 感应加热基础理论

电磁感应加热机制是基于法拉第电磁感应定律,当交变磁场

$$\Phi = \Phi_m \sin \omega t \quad (2-1)$$

穿过导体时产生感应电动势:

$$e = -N(d\Phi/dt) = -N\omega \Phi_m \cos \omega t \quad (2-2)$$

其有效值:

$$E = 4.44Nf\Phi_m \quad (2-3)$$

式中: N 匝数; f 频率; Φ_m 磁通量。

根据电磁感应原理,对线圈通于交变电流,就会产生相同频率的交变磁场,利用交流电对需要表面防腐处理的钢管进行感应加热的原理^[3]如图 2.1 所示,感应线圈(A)通入交流电产生交变磁场,在工件(B)中感应出涡流 i_2 ,通过焦耳热效应实现加热。

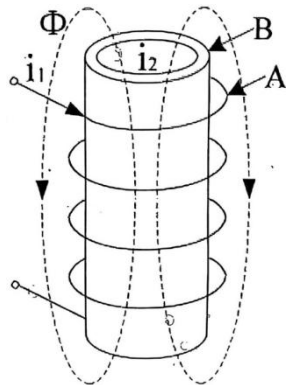


图 2.1 感应加热示意图

焦耳热效应公式:

$$Q = i^2 R t \quad (2-4)$$

i 电流; R 电阻; t 时间。

因此感应加热利用电磁感应原理,通过感应线圈把电能转换为磁场能,利用磁场将能量传递给被加热的金属工件,并在金属内部转化为热能,由于感应圈和被

加热工件不直接接触,所以电能传递过程中不存在能量损耗^[2]。

为了加快生产速度,就只能提高钢管的加热效率,那就只能使钢管中的感应电动势 e 最大化,由感应电动势公式(2-3)可知,提高感应电动势有两个方法:

(1) 只要增加钢管的交变磁通,就能增加钢管中流过的感应电流,那么就只能增加感应线圈中流过的电流。

(2) 提高电流的频率,频率控制能缩短加热时间,减少能量损耗^[4]。加热钢管的规格壁厚变薄、直径变小时,可以将中频频率提高,减少线圈电流,达到同样的加热效果;由于线圈电流减少,就会减少负载的无功损耗,提高功率因数。

2.2 感应加热的三大效应

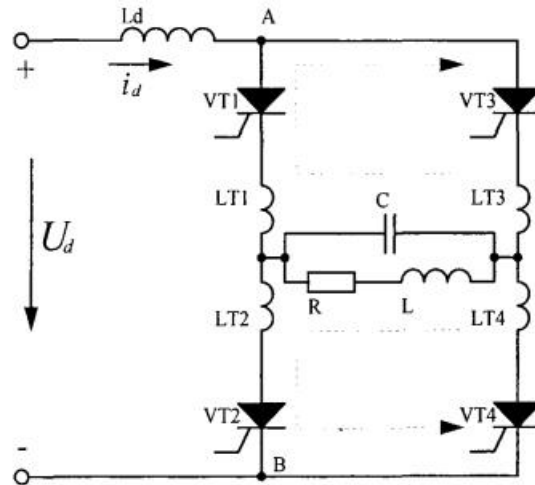
感应加热设备的三大效应。趋肤效应、临近效应和圆环效应^[2]。

感应加热是综合利用这几种效应的设备,无论表皮效应、临近效应和圆环效应,都是由于加热线圈铜管中电流过交变电流时,在加热线圈铜管周围形成的交变磁场,从而在加热线圈铜管中产生自感电动势,迫使电流发生重新分布的结果^[5]。感应加热是通过电磁感应原理,是先将输入的电转换为交变磁场的磁场能;再通过电磁感应,将交变磁场的磁场能转化为被加热钢管内部涡流的电能;最后,涡流在钢管中克服电阻做功,将涡流的电能转换为钢管的热能,来实现加热。

2.3 并联逆变电路的工作原理

在所有的逆变电路中,国内目前应用最大的是并联逆变电路,而且也是最基本的电路,因此,我们把它作为典型电路来讨论。

并联逆变电路的负载是一个谐振回路,它的谐振频率基本上略微高于中频电源的工作频率,工作略偏容性状态^[6]。其工作过程较仔细分析可分为四个过程。



2.4 并联逆变主电路

第一过程：如图 2.2 若先导通晶闸管 VT1、4，则电流 I_d 从 A 端经 VT1 到负载，再经 VT4 流向 B 端，这一阶段为中频交流电的正半周，电流的方向如图所示。此时补偿电容 C_n 两端充上了左正右负的电电压 U_a 。

第二过程：让晶闸管 VT1、4 导电半个周期，再发出触发脉冲，触发导通晶闸管 VT2、3，这时造成了四只晶闸管同时导通的“暂态短路”，但这并不会引起电源故障，因为直流电路中接有一个很大的滤波电感 L_d ，电流 I_a 不能突变。由于电容被四只晶闸管短接，其第一阶段充上的电压 U_a 就要放电，其电压极性，将促使晶闸管 VT1、4 的电流下降，而使晶闸管 VT2、3 的电流上升，直至 VT1、4 中的电流降为零，而 VT2、3 的电流上升为 I_d 。

第三过程：当换流结束后，电流经 VT2、3 反方向流过负载，电容器 C_n 两端的电压变为右正左负，此电压为第四阶段关断 VT2、3 做好准备，该阶段为中频电流的负半周。

第四过程：当晶闸管 VT2、3 导电半个周期后，再次触发 VT1、4，开始 VT2、3 与 VT1、4 的换流，其过程与第二阶段一样，所不同的是这次是将 VT2、3 中的电流换给 VT1、4，而使晶闸管 VT2、3 关断，回复到第一阶段的工作状态。

这二个半周中，负载电流 i_o 改变了方向，变成了中频交流电，如此循环往复，不断地向负载供应中频电能，使振荡持续进行。

2.5 并联逆变电路的触发引前方式

我们上面介绍了，晶闸管要能可靠关断，必须有一个触发引前时间 t_f ，其值为 $t_r + t_\beta$ ，由于 t_r 比 t_β 要小得多，因此引前时间 t_r 主要由 t_β 决定。换句话说，晶闸管所承受的反压时间 t_β 必须大于晶闸管本身的关断时间 t_q ，即 $t_\beta = K t_q$ 。式中： K 为安全系数，一般取 $K=1.5 \sim 2$ 。

上述条件是触发控制系统必须保证的。对于一个业已确定的晶闸管，其关断时间一定，那么 t_f 是否取大一点，不是更安全吗？是的，从安全的角度讲， t_f 大一些好。但是 t_f 过于大，将对负载端的功率因数产生不利的影响， $\phi = \gamma/2 + \beta$ 而 t_f 相对应的安全储备角 $\delta = \gamma + \beta$ ，所以若 t_f 选得大，意味着 ϕ 角增大，功率因数就要降低，从这一点出发 t_f 不能选得太大。考虑上述因素后，并联逆变电路的触发引前时间一般取 $t_f = 0.1 T_f (T_f = \frac{1}{f})$ 。

理论上可以使用它激方法，只要它激频率高于负载谐振回路的频率，并保证 $t_\beta > t_q$ 即可。这种控制方法对负载参数变化不大是合适的，但我们的负载随着钢管换型以后是变化的，像需要加热的防腐钢管由于规格不一，口

径从 1422 至 323.9、厚度由 30mm 至 6mm，所以我们在换型时改变它激频率，同时增减补偿电容来改变谐振回路的频率来适应它激频率。

2.6 负载谐振回路的频率特性

感应器与电容并联组成谐振回路，这种电路在某一频率下输入电流与电压相同，此时电路处于谐振状态。此时的频率称为此电路的固有频率。

在谐振时感应圈内的无功电流分量与有功电流分量之比为： $Q = \text{感应圈无功电流} / \text{感应圈有功电流}$ ， Q 常称为谐振电路的品质因素， Q 值越小，代表感应炉的无功电流越小，于是利用中频电容器补偿这部分无功功率时所需电容器的千乏数也越小，反之侧越大，以我公司新上中频 1500KW、1KHz 配套的中频电容容量为 10000Kvar 为例，得出 $Q \approx 7$ ，当这台设备的运行功率由于防腐钢管的口径和壁厚下降 500KW，感应炉的无功功率 3350Kvar。而设备的无功补偿电容容量固定不变，仍是 10000Kvar，那么此时设备处于严重的过补偿状态下运行，这也是造成设备功率因数被拉低的重要原因之一。

3 现场测试对比

3.1 现场测试

在某防腐钢管厂的现场测试中，对于一台正常工作的 1500KW 并联谐振中频电炉，其谐振电容容量为 10000Kvar，低压供电电压为 380V，频率为 1KHz。利用功率因数监测设备进行现场测量。生产规格为 1422*30mm 的钢管时，表面温度保持在 200℃，中频功率调至满载的 1500KW，功率因数达到 0.99；此规格生产完毕后，调换为 1016*22mm，钢管表面温度同样为 200℃，中频功率调到 1000KW，功率因数为 0.72；完成该型号后，再切换至 813*17.5mm，表面温度依然是 200℃，中频功率为 700KW，功率因数为 0.55；最后，切换至 406*12.5mm，钢管表面温度持续在 200℃，中频功率为 500KW，功率因数降低至 0.35。由于钢管的直径和壁厚有较大变化，运行功率的减少导致功率因数明显下降，进而拉低整个供电系统的有功功率，而无功功率损耗显著增加。

收集以上数据后，通过分析得出生产规格为 1016*22mm，运行功率 1000KW，谐振电容容量取值为 7000Kvar；生产规格 813*17.5mm，运行 700KW，谐振电容容量取值为 4900Kvar；生产规格 406*12.5mm，运行 500KW，谐振电容容量取值为 3500Kvar。

3.2 现场对比测试

根据湖南某钢管厂现场排产情况，利用我们得出的数据进行测试，设备不变，正常运行的 1500KW 并联谐

振中频感应加热设备, 谐振电容容量为 10000Kvar, 低压进线电压为 400V, 利用功率因数监测设备进行现场测试, 生产完该规格后换型为 1016*22mm, 钢管为表面温度为 200℃, 中频功率 1000KW 运行, 谐振电容容量减少 2000Kvar, 功率因数提高至 0.96; 生产完该规格后换型为 813*17.5mm, 钢管为表面温度为 200℃, 中频功率 700KW 运行, 谐振电容容量减少 4000Kvar, 功率因数为 0.91; 生产完该规格后换型为 406*12.5mm, 钢管为表面温度为 200℃, 中频功率 500KW 功率运行, 谐振电容容量减少 6000Kva, 功率因数为 0.94。

4 结论

在防腐钢管生产中, 钢管口径与壁厚的大幅变化 (Ø2620-Ø323.9、30-9.5mm) 导致中频感应电炉运行功率从 1500KW 降至 400KW, 功率因数从 0.99 骤降至 0.35, 能耗与供电稳定性问题显著。本课题针对 400V 低压进线并联谐振系统, 通过理论分析与现场实验, 提出动态调整谐振电容容量的节能方案。

研究表明, 钢管规格变化导致负载特性改变, 使谐振回路失谐, 功率因数降低。通过建立电容容量与功率因数的关系模型, 结合湖南胜利湘钢现场测试数据: 当生产规格从 1422x30mm 换型至 406*12.5mm 时, 未调整电容的功率因数从 0.99 降至 0.35; 而动态减少电容容量 (从 10000Kvar 降至 4000Kvar) 后, 功率因数回升至 0.94 左右, 验证了补偿策略的有效性。

将电容动态补偿技术针对性应用于变规格钢管加热场景, 提出基于实测数据的调整方法, 无需设备改造即可实现节能。该技术方案使企业年成本降低, 同时提升供电系统稳定性, 兼具经济效益与社会价值; 随着研

究的不断深入和技术的持续改进, 该技术将在感应加热领域发挥更大的作用, 推动行业的技术和可持续性发展。

目前研究局限于现有设备和现有的钢管规格, 随着管径朝大和厚度厚的方向发展, 未来可拓展空间更大, 结合智能算法开发自动补偿系统, 推动感应加热技术的智能化、节能化和高效化发展。

参考文献

- [1] 徐先泽, 肖雅静, 时千峰. 感应加热技术的应用及发展 [J]. 现代零部件, 2010 (3): 62-63.
- [2] 林渭勋. 可控硅中频电源 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1983, 1-38、124-128.
- [3] 杨思俊, 朱伯年. 晶闸管中频电源基础知识 [M]. 杭州: 浙江科技出版社, 1989, 3-15.
- [4] Ohtoh N, O. M., Inoue T. A method for MPPT control while searching for parameters corresponding to weather conditions for PV generation systems. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006. 53(4): p. 1055~1065.
- [5] 潘天明. 现代感应加热装置 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1996.
- [6] 管兴勇、陈建兴. 超音频电源 IGBT 驱动脉冲重合时间的控制 [J]. 电力电子技术, 2007.

作者简介: 方铁牛, 男 (1981-05-), 汉族, 湖南湘潭, 工程师, 本科学历, 主要研究钢管防腐中频加热系统功率因数优化研究方向。

方子文, 男 (2007-10-), 汉族, 高中在读, 主要学习钢管防腐中频加热系统功率因数优化研究方向。