دانشکده مهندسی برق

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق–قدرت

عنوان:

طراحی و ساخت کوره القایی
با سیستم کنترل حلقه بسته فرکانس رزونانس

دانشجو :

محمد مهدی طاهری

۸۶۱۱۸۰۰۵

اساتید راهنما:

دکتر رفیعی

دکتر رمضانپور

تابستان ۱۳۸۹

بسم الله الرحمن الرحیم

چکیده

هدف اصلی این پروژه کنترل رزونانس در یک کوره القایی است به این معنا که در راه اندازی سیستم بتواند فرکانس رزونانس را پیدا کرده و در آن نقطه به کار خود ادامه دهد و همچنین اگر به هر دلیلی همچون تغییر قطعه کار یا اثرات دمایی؛ در حین کار فرکانس رزونانس تغییر کرد باید بتواند آن را دنبال کند. روش اصلی مد نظر؛ روش جاروب فرکانسی و قرار گرفتن در نزدیکی نقطه رزونانس بر اساس پاسخ فرکانسی (نمودار بود) پارامتر های مدار رزونانسی (در این جا آرایش تانک موازی به همراه سلف سری) همچون ولتاژ دو سر تانک می باشد. پاسخ های فرکانسی مدار در محیط نرم افزار تحلیلگر مدار (pspice) شبیه سازی شده و معیار کنترل قرار گرفته اند.

همان طور که خواهیم دید نتایج عملی و آزمایشگاهی تطابق بالایی با نتایج شبیه سازی دارند.

یک بخش اساسی پروژه ساخت منبع تغذیه ای است که بتواند توان مورد نیاز را در فرکانس بالا تولید نماید بهتر است طراحی این مبدل طوری صورت گیرد که از روش سوییچینگ نرم مبتنی بر سوییچ زنی در جریان صفر[1] به منظور حداقل کردن تلفات کلید زنی استفاده شود. البته همان طور که خواهیم دید این امر به قابلیت مدار رزونانسی خروجی نیز بستگی دارد.

از مدار رزونانسی به منظور ماکزیمم کردن ضریب توان از دید مبدل و همچنین قابلیت توان دهی بالاتر و بالا بردن راندمان استفاده می شود.

به دلیل این که با قرار دادن قطعات کار مختلف در کوره ، فرکانس تشدید سیستم تغییر می کند ، سیستم کنترلی حلقه بسته ای برای تنظیم فرکانس در فرکانس رزونانس مدار (به طور تقریبی) طراحی شده است.

کلید واژه: کوره القایی ، جریان فوکو ، هیسترزیس ، سوییچینگ نرم.

[1] Zero Current switching

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست شکل‌ها ..... ه

فصل ۱- مقدمه ۱

۱-۱- پیشگفتار ۱

۱-۲- تاریخچه ۲

۱-۳- کاربردهای گرمایش القایی ۵

۱-۳-۱- کاربرد کوره القایی تحت خلا ۷

فصل ۲- اصول عملکرد کوره های القایی رزونانسی ۹

۲-۱- آرایش های رایج مدار رزونانسی در کوره القایی ۹

۲-۱-۱- آرایش سری ۹

۲-۱-۲- آرایش موازی ۱۰

۲-۱-۲-۱- مدار معادل ۱۱

۲-۲- تطبیق امپدانس ۱۴

۲-۳- خصوصیات اجزای مدار رزونانس ۱۵

۲-۳-۱ کویل مولد میدان در کوره ها و گرم کننده های القایی ۱۵

۲-۳-۲- خازن های مدار رزونانسی کوره القایی ۱۸

فصل ۳- کنترل رزونانس ۲۰

۳-۱- نمای کلی سیستم ۲۰

۳-۲- روشهای ردیابی حلقه بسته فرکانس تشدید ۲۲

۳-۲-۱ روش جاروب فرکانس ۲۲

۳-۳- روش حلقه قفل شونده فاز ۲۶

۳-۳-۱- حلقه قفل شونده فاز دجیتالی در مدار تشدید ۲۶

۳-۳-۲- مدل ریاضی ۲۹

۳-۴- روش یکی سازی جریان سلف و خازن ۳۱

۳-۵- روشهای کنترل توان ۳۲

۳-۵-۱ تغییر سطح ولتاژ DC مبدل ۳۲

۳-۵-۲ مدولاسیون پهنای پالس ۳۲

۳-۵-۳- مدولاسیون تراکم پالس ۳۳
۳-۵-۴ تغییر فرکانس مبدل ۳۳
۳-۵-۵- تغییر مقدار سلف تطبیق امپدانس ۳۴
۳-۵-۶- ترانس تطبیق امپدانس ۳۴
۳-۵-۷- کنترل جابجایی فاز ۳۵

فصل ۴- شبیه سازی مدار تشدید ۳۶

۴-۱- مدار رزونانسی ترکیبی(*LCLR*) ۳۶
۴-۱-۱- مدل سازی مدار ۳۷
۴-۱-۲- شبیه سازی مدار ایده آل ۳۸
۴-۲- شبیه سازی مدل واقعی تر(غیر ایده آل) مدار رزونانس ترکیبی ۵۰
۴-۳- اضافه کردن خازن سری با سلف تطبیق امپدانس ۵۷

فصل ۵- ساخت ۵۹

۵-۱- مزایا و ویژگی های مدار قدرت پروژه : ۵۹
۵-۲- ویژگی های سیستم کنترل پروژه: ۶۰
۵-۳- تشریح سخت افزار ۶۰
۵-۳-۱- مقدمه ۶۰
۵-۳-۲- شمای کلی سخت افزار ۶۲
۵-۳-۳- سخت افزار بخش کنترل ۶۴
۵-۳-۳-۱- آشنایی با پردازنده های ARM ۶۴
۵-۳-۳-۲- قابلیت های ARM PWM ۶۵
۵-۳-۳-۳- فیدبک های ولتاژ و جریان ۶۵
۵-۳-۳-۴- اندازه گیری ولتاژ و جریان لینک DC ۶۵
۵-۳-۳-۵- مدار اندازه گیری جریان خروجی و ولتاژ سلف کار ۶۷
۵-۳-۳-۶- اندازه گیری فاز ۶۸
۵-۳-۳-۷- صفحه نمایش ۶۸
۵-۳-۳-۸- صفحه کلید ۶۹
۵-۳-۳-۹- اتصال USB ۶۹
۵-۳-۳-۱۰- روشهای انتقال اطلاعات در USB ۷۰
۵-۳-٤- بخش قدرت ۷۱
۵-۳-۴-۱- باس DC ۷۱
۵-۳-۴-۲- بخش اینورتر (شامل سوئیچ های قدرت و دیود های هرزگرد) ۷۳

۵-۳-۴-۳- مقادیر نامی و حد بارگذاری ۷۴
۵-۳-۴-۴- سیگنال های خروجی خطا ۷۴
۵-۳-۴-۵- تغذیه های بخش کنترل مدول قدرت ۷۵
۵-۳-۴-۶- ضربه گیر یا اسنابر ۷۷
۵-۳-۴-۷- اجزای مدار کوره ۷۹
۵-۴- واسط بخش کنترل و قدرت ۸۱
۵-۴-۱- ایزولاسیون ۸۱
۵-۴-۲- تولید زمان های مرده (Dead time generation) ۸۵
۵-۵- نرم افزار ۸۶
۵-۵-۱- توضیح برنامه میکروکنترلر ۸۶
۵-۵-۲- توضیح Process_Main ۸۷
۵-۵-۳- شرح تابع ()mode_control ۹۱
۵-۵-۴- توضیح تابع search_freq ۹۳
۵-۵-۵- شرح تابع ()sens_Process ۹۴
۵-۶- پیاده سازی نرم افزار کامپیوتر ۹۷

فصل ۶- نتایج آزمایشگاهی ۹۸

۶-۱- نتایج آزمایشگاهی مداری کوره ۹۸
۶-۲- نتایج آزمایشگاهی مدار با خازن سری ۱۰۶
۶-۳- نتایج آزمایشگاهی تعقیب فرکانس رزونانس با تغییر بار ۱۰۸

نتیجه گیری و پیشنهادات ۱۱۲

فهرست مراجع ۱۱۴

واژه نامه فارسی به انگلیسی ۱۱۶

واژه نامه انگلیسی به فارسی ۱۱۸

ضمیمه الف: شکل و نحوه کار با دستگاه ۱۲۰

نمایی از کوره در حال کار ۱۲۱
نحوه کار با دستگاه ۱۲۱
توضیح گزینه ها ۱۲۳
زمان حرارت دهی: ۱۲۳
مدت زمان خاموشی مبدل در هنگام وقوع خطا: ۱۲۳

تأخیر در تشخیص خطای جریان خروجی:..... ۱۲۳
زمان خاموش تریستور در هنگام تشخیص وقوع خطا:..... ۱۲۴
انتخاب خازن سری:..... ۱۲۴
مودهای کاری دستگاه..... ۱۲۴

فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۱: روند کاهش ناخالصی آلیاژها در صنعت [3]	۸
شکل ۳-۱: بلوک دیاگرام سیستم ساخته شده در پروژه	۲۱
شکل ۵-۱: بلوک دیاگرام سیستم ساخته شده در پروژه	۶۱
شکل ۶-۱: آرایش مدار رزونانس ترکیبی	۹۸
شکل ۰-۱: نمایی از درون دستگاه	۱۲۰
شکل ۰-۲: نمایی از پانل روبروی دستگاه	۱۲۱
شکل ۰-۳: نمایی از کوره در حال کار	۱۲۱
شکل ۰-۴: منوی اصلی	۱۲۲
شکل ۰-۵: منوی دستورات	۱۲۲
شکل ۰-۶: منوی تنظیمات	۱۲۳

فصل ۱– مقدمه

۱–۱– پیشگفتار

کوره های القایی در مقایسه با کوره های سوخت فسیلی دارای مزایای فراوانی از جمله دقت بیشتر، عدم تماس با قطعه کار؛ آلایندگی کمتر زیست محیطی و تلفات گرمایی کمتر و نتیجتا راندمان بالاتر و ... هستند. همچنین در کوره هایی که در آنها از روشهای دیگر ، غیر القاء استفاده می شود ، اندازه کوره بسیار بزرگ بوده و زمان راه اندازی و خاموش کردن آنها طولانی است .

در این روش شعله ای جهت تولید حرارت وجود ندارد و گرما بسته به نیاز در درون یا سطح قطعه کـار (از نوع هادی جریان الکتریکی) ایجاد می گردد.

اساس کار این روش بر مبنای تلفات ناشی از پدیده جریان گردابی[۱] که موسوم به تلفات فوکو[۲] مـی باشـد استوار است. همان طور که می دانیم عبور شار مغناطیسی از فلزات هادی سبب تشکیل حلقه های جریان گردابی حول خطوط شار می گردد که عبور این جریان ها سبب تلفات گرمایی می گردد.

به طور خلاصه و بر اساس تصور رایج می توان گفت عبور جریـان از یـک سـیم پـیچ و اسـتفاده از میـدان مغناطیسی برای ایجاد جریان در هسته سیم پیچ ، اساس کار کوره های القـایی را تشـکیل مـی دهـد .(در آینده در این باره کاملا بحث می کنیم که نمی توان غالبا قطعه کار را به عنوان هسته فرض کرد بلکـه بـه عنوان طرف ثانویه اتصال کوتاه شده ترانسفورماتور فرض می شود) .

در این کوره ها از حرارت ایجاد شده توسط تلفات فوکو برای ذوب فلزات یا هرگونه عملیات حرارتی دیگر همچون آبکاری یا سخت کاری و شکل دهی یا ..... استفاده می شود .[۱]

در این پایان نامه ابتدا در فصل اول (همین فصل) به بیان کلیاتی راجع به کوره القایی و مزایا و کاربرد آن پرداخته؛ در فصل دوم اصول عملکرد و آرایش های رایج مدار های رزونانسی کوره القایی را معرفی کرده و همچنین برخی جزییات کاربردی المان های مدار (رزونانس) کوره را تشریح می کنیم.

در فصل سوم که بخش اصلی این پایان نامه است با اتکا بر مطالب فصول قبلـی بـه بیـان مبنـای تئـوری روش های کنترل حلقه بسته رزونانس کوره علی الخصـوص روش هـای پیـاده شـده در ایـن پـروژه مـی پردازد. همچنین در پایان این فصل مطالبی راجع به کنترل توان کوره بیان خواهد شد.

در فصل چهارم شبیه سازی و دریافت پاسخ فرکانسی مدار رزونانسی مد نظر برای کوره در دو حالت ایده آل و واقعی انجام شده است.

---

[1] Eddy current

[2] Foucault loss

در فصل ۵ به ترتیب سخت افزار پیاده شده در این پروژه اعم از مدار قدرت اینورتر و بخش های واسطه و مدارات الکترونیکی اندازه گیری و .. ..تشریح شده اند.
نهایتا در فصل ۶ نتایج آزمایشگاهی آورده شده و با نتایج حاصله شبیه سازی مقایسه شده اند.
و در ضمیمه الف شکل و جزییات کار با دستگاه آورده شده است.

۱-۲- تاریخچه

نخستین کوره القایی که مورد بهره برداری قرار گرفت از شبکه اصلی قدرت تغذیه میشد و هیچگونه تبدیل فرکانسی صورت نمی گرفت . با توجه به اینکه افزایش فرکانس تغذیه کوره موجب کاهش ابعاد آن و بالا رفتن توان (تلفات) می شود ، برای رسیدن به این هدف ، در ابتدا منابع تغذیه موتور ژنراتوری مورد استفاده واقع گردید .

هر چند با این منابع می توان فرکانس را تا حدودی بالا برد ، ولی محدودیت فرکانس و عدم قابلیت تغییر آن و در نهایت عدم تطبیق سیستم تغذیه با کوره ، دو عیب اساسی این سیستمها به شمار میرفت . با توجه به این معایب ورود عناصر نیمه هادی به حیطه صنعت موجب گردید منابع تغذیه استاتیک جایگزین منابع قبلی شوند .

در سال ۱۸۳۱ میلادی مایکل فارادی[1] با ارائه این مطلب که اگر از سیم پیچ اولیه ای جریان متغیری عبور کند ، در سیم پیچ ثانویه مجاورش نیز جریان القاء میشود ، تئوری گرمایش القایی را بنا نهاد . علت اصلی این پدیده القاء ، تغییرات شار در مدار بسته ثانویه است که از جریان متناوب اولیه ناشی می شود . نزدیک به یکصد سال این اصل در موتورها، ژنراتورها ، ترانسفورماتور ها ، وسایل ارتباط رادیویی و ... بکار گرفته می شد و هر اثر گرمایی در مدارهای مغناطیسی به عنوان یک عنصر نا مطلوب شناخته می شد .

در راستای مقابله با اثرات حرارتی در مدارهای مغناطیسی و الکتریکی از سوی مهندسین گامهای موثری برداشته شد . آنها توانستند با مورق نمودن هستهِ مغناطیسی موتورها و ترانسفورماتورها ، مقاومت مسیر گردابی را افزایش داده و جریان فوکو را که عامل تلفات حرارتی بود کم نمایند .

به دنبال آزمایشات فارادی ، قوانین متعددی پیشنهاد شد . قوانین لنز[2] و نیومن[3] نشان دادند که جریان القاء شده با شار القایی مخالفت کرده و به طور مستقیم با فرکانس متناسب می باشد . از این اصل بعد ها جهت معلق نگه داشتن قطعه کار در درون کویل کوره استفاده شد (البته نه در کاربرد های ذوب) فوکو در سال ۱۸۶۳ در مقاله ای تحت عنوان "القاء جریان در هسته[4]" نظریه ای راجع به جریان فوکو ارائه داد

[1] Faraday
[2] Lenz
[3] Newman
[4] The Induction Of Current in Cores

و در رابطه با انتقال انرژی از یک کویل به یک هسته توپر بحث نمود .

در اواخر قرن نوزدهم استفاده از تلفات فوکو و هیسترزیس بـه عنـوان منبـع گرمـایش القـائی از طـرف مهندسین مطرح شد . همچنین در اوایل قرن بیسـتم در کشـورهای فرانسـه ، سـوئد و ایتالیـا بـر اسـاس استفاده از خازنهای جبران کننده توان راکتیو پیشنهاداتی برای کوره های القایی بدون هسـته ارائـه شـد . در این پیشنهادات بیشتر ذوب فلزات در فرکانسهای میانی مورد نظر بود .

دکتر نورث روپ[1] ایده کوره با فرکانس میانی را برای موارد صنعتی گسترش داد . در روزهای نخستین ، بر اثر نبود امکانات از جمله خازنهای با ظرفیت کافی و قابل اطمینان ، توسـعه و پیشـرفت متوقـف شـد . بعدها در سال ۱۹۲۷ کمپانی کوره های الکتریکی[2] نخستین کوره الکتریکی با فرکانس میانی را در شـفیلد انگلستان و به منظور آهنگری و گرمادهی موضعی فلزات جهت اتصال به یکدیگر ، نصب کرد .

بعد از این ، تعداد و اندازه این کوره ها رو به افزایش گذاشته است . لازم به ذکر است کـه مزیتهـای دیگـر کوره های القایی همچون دقت زیاد برای گرم کردن تا عمق مورد نظر و حـرارت دادن نـواحی سـطحی در طی پیشرفتهای بعدی (در سالهای جنگ جهانی دوم) بیشتر آشکار شد . در گرمایش القایی عدم نیاز بـه منبع خارجی گرم کننده ، تلفات گرمایی کمتر شده و تمیزی شرایط کار تامین می گـردد . در ایـن روش همچنین نیازی به تماس فیزیکی بار و کویل نبوده و علاوه بر این چگالی توان بالا در مدت زمان گرمـایش کم به آسانی قابل دسترس می باشد .

نخستین کوره القایی که مورد بهره برداری قرار گرفت از شبکه اصلی قدرت تغذیه می شد که بنوبـه خـود گام موفقی در استفاده از توان الکتریکی جهت عملیات حرارتی بحساب می آمد در این کوره ها هیچ گونـه تبدیل فرکانسی صورت نمی گرفت. با توجه به اینکه افزایش فرکانس تغذیه کوره موجب کـاهش ابعـاد آن و بالا رفتن توان (تلفات در قطعه کار) می شود لذا محدودیت فرکانس و عدم قابلیت تغییر آن و در نهایت عدم تطبیق سیستم تغذیه با کوره ، دو عیب اساسی این سیستمها به شمار می رفت.

از آنجائیکه تلفات فوکو و هیسترزیس با فرکانس نسبت مسـتقیم(مربعـی) دارنـد وهمچنـین ابعـاد کویـل کوره با بالا رفتن فرکانس کاهش می یابد، مهندسین به فکر تغذیه کوره در فرکانسـهای بـالاتر از فرکـانس شبکه قدرت افتادند . اولین قدم در این راه استفاده از فرکانسهای دو برابر و سه برابر کـه از هارمونیکهـای دوم و سوم بدست می آمدند، بود.

این هارمونیکها بر خلاف طبیعت مخرب خود در این نوع کاربرد سودمند تشخیص داده شدند. پائین بودن راندمان در استفاده از هارمونیکهای فوق موجب گردید طراحان روش دیگری را مورد استفاده قرار دهند.

در این مرحله سیستم موتورـژنراتور توسعه یافت که با استفاده از این سیستم توانستند فرکانس تغذیـه را

[1] Northrop

[2] Electrical Furnace CO. [EFCO.]

تا صدها هرتز افزایش دهند. در کوره های القایی افزایش فرکانس باعث کاهش عمق نفـوذ جریـان القـایی می گردد لذا در عملیات حرارتی سطحی که سختکاری سطح فلز ، مورد نظر می باشد از کوره های القایی با فرکانس بالا استفاده می شود.[۱]

با ورود عناصر نیمه هادی قدرت مانند تریستورها ، ترانزیستورها و ماسفت ها به حیطه صنعت محـدودیت فرکانس و عدم تغییر آن، در تغذیه کوره ها مرتفع شد .

از لحاظ سیستم قدرت می توان سیستمهای القایی را به چهار گروه اساسی تقسیم نمود:

الف) سیستمهای منبع[۱]

در این سیستمها که فرکانس کار آنها بین ۵۰ تا ۶۰ هرتز و ۱۵۰ تا ۵۴۰ هرتـز مـی باشـد احتیـاجی بـه تبدیل فرکانس نیست و با توجه به فرکانس کار ، عمق نفوذ جریان زیاد بوده و حدود ۱۰ تا ۱۰۰ میلیمتر می باشد . همچنین مقدار توان لازم تا حدود چند صد مگا وات نیز می رسد .

ب) سیستمهای موتورــژنراتور[۲]

فرکانس این سیستمها از ۵۰۰ هرتز تا ۱۰ کیلو هرتز می باشد . در ایـن سیسـتمها تبـدیل فرکـانس لازم بوده و این عمل بوسیله ژنراتورهای کوپل شده با موتورهای القایی صورت مـی پـذیرد . همچنـین در ایـن سیستمها توان به وسیله ماشینهای ۵۰۰ کیلو وات تامین می گردد و برای بدست آوردن توانهـای بـالاتر ، از سری کردن ماشینها استفاده می شود . عمق نفوذ در این سیستمها به خاطر بالاتر بودن فرکانس نسبت به سیستمها منبع ، کمتر بوده و در حدود ۱ تا ۱۰ میلیمتر است .

ج) سیستمهای مبدل نیمه هادی[۳]

در این سیستمها فرکانس در محدوده *HZ* ۵۰۰ تا *KHZ* ۱۰۰ بوده و تبدیل فرکـانس بـه طـرق گونـاگونی صورت میپذیرد . در این سیستمها از سوئیچهای نیمه هادی استفاده می شود(در سیستم های قدیمی تـر از تقویت کننده های لامپی استفاده می شد). و توان مبدل بستگی به نـوع کـاربرد آن تـا حـدود *MW* ۲ می تواند برسد.

د) سیستمهای فرکانس رادیویی[۴]

فرکانس کار در این سیستم در محدوده *KHZ* ۱۰۰ تا *MHZ* ۱۰ می باشد . از این سیسـتمها بـرای عمـق نفوذ جریان بسیار سطحی، در حـدود ۰/۱ تـا ۲ میلیمتـر اسـتفاده مـی گـردد و در آن از روش گرمـایی متمرکز با سرعت تولید بالا استفاده میگردد.

---

[1] **Supply Systems**

[2] **Motor-Generator Systems**

[3] **Solid-State Converter Systems**

[4] **Radio-Frequency System**

واضح است که در این کاربرد ها از کلید های نیمه هادی قدرت استفاده نمی شود و این محدوده فرکانسی از حوزه کاربردهای کلید زنی قدرت خارج است. به این منظور از تقویت کننده های ترانزیستوری و در کاربردهای قدیمی از تقویت کننده های لامپی استفاده می شد. واضح است که به دلیل راندمان پایین در تقویت کننده های آنالوگ معمولا برای توان خروجی محدودیت داریم.

در این حالت نیاز به سیستم های خنک کاری ترانزیستور ها و یا لامپ ها اجتناب ناپذیر است.

بسته به میزان توان خروجی و راندمان مبدل ممکن است ناچار به استفاده از سیستم خنک کاری با آب باشیم.

امروزه به دلیل مزایایی همچون راندمان بالا و کاهش ظرفیت منابع تغذیه و نیاز به افزایش جریان در کویل مولد میدان و .... استفاده از مدار های رزونانسی بسیار رایج است.

استفاده از مدار های رزونانس سری و موازی هر کدام مزایا و معایب خود را دارند و بسته به کاربرد مورد استفاده قرار می گیرند.

در حالت ایده آل در مداری که در رزونانس خود قرار گرفته باشد توان راکتیو مورد نیاز کویل مولد میدان تماما توسط خازن رزونانس جبران سازی شده و از منبع تغذیه (اینورتر) دریافت نمی گردد. فلذا جریان انتقالی به مدار رزونانسی کوره تماما توان حقیقی را از منبع انتقال می دهد و قطر کابل واصل بین منبع و کوره کاهش می یابد. همچنین کلید زنی مبدل (منبع) در این حالت از نوع نرم می باشد چرا که اختلاف فاز بین ولتاژ و جریان منبع در این حالت صفر است.

۱-۳- کاربردهای گرمایش القایی

در یک نگاه کلی گرمایش القایی برای هر حالتی که بخواهیم یک ماده هادی جریان الکتریسیته را گرم یا ذوب کنیم قابل استفاده است و محدودیت آن تنها در هدایت الکتریکی قطعه کار موردنظر است.

در این روش می توان قطعه کار را به گونه ای تمیز و بدون تماس و به گونه ای کنترل شده گرم کرد.

در این جا برای نمونه چند نمونه از کاربردهای فرایند گرمایش القایی در صنعت را ذکر می کنیم.

یک کاربرد گرمایش القایی، بسته بندی و سیل بندی کردن بطری ها در صنایع داروسازی و صنایع غذایی است این فرایند به این صورت است که فویلی از ماده هادی که حاوی چسبی است که بر اثر ذوب شدن می چسبد، بر روی درب پلاستیکی بطری پیچیده می شود و پس از وارد شدن و عبور از محفظه گرمایش چسب ذوب شده و به همراه فویل و درب پلاستیکی عمل درزبندی درب بطری در برابر هوا و مایع درون آن انجام می گیرد.

کاربرد دیگر این روش در خالص سازی و پاکسازی لامپ های گازی و لامپ های خلاء و لامپ های شتابدهنده الکترون از ناخالصی های گازی درون آن ها (همچون لامپ تلویزیون) می باشد.

روند کار به این گونه است که حلقه ای از ماده ای هادی در داخل تیوپ خلا قرار می گیرد و وقتی که عملیات حرارت دهی القایی صورت می گیرد ماده هادی به صورت بدون تماس گرم می گردد و مواد شیمیایی روکش شده بر روی آن با گازهای درون تیوپ واکنش می دهد و بدین صورت گازهای باقیمانده درون لامپ خلاء را جذب می کند و بر خلوص خلاء می افزاید.

ماهیت بدون تماس بودن گرمایش القایی موجب استفاده از آن در کاربردهای حساس و ظریف بدون ریسک آلودگی قطعه کار می گردد. مثلاً قسمتهای فلزی تجهیزات پزشکی را می توان درون محفظه بسته بدون تماس با اجسام دیگر استریل کرد.

کاربرد دیگر این فرایند در صنعت ساخت نیمه هادی می باشد که از آن به عنوان تخلیص ناحیه ای نام برده می شود. در این فرایند سیلیکون توسط ناحیه مذاب متحرکی خالص سازی می شود.[۲]

همچنین غذاپزهای مبتنی بر این روش امروزه به صورت تجاری در بازار لوازم خانگی به وفور یافت می شوند.

سخت کاری و آبکاری سطحی برای دندانه های دنده و چرخ دنده و میل لنگ موتورهای احتراقی و اره ها و سایر ابزارهای ماشین کاری(فرزها و لایه بردارها و ...) شفت های محرک دوار و میله های مارپیچ فرمان (screw bar) بدنه برخی اجسام همچون موتورها و .... از کاربردهای رایج می باشند. چرا که حرارت دهی سطحی در روش القایی به سرعت و به گونه ای یکنواخت صورت می گیرد.

سایر کاربردهای رایج شامل ذوب، آهنگری و شکل دهی (فورج) فلزات ، جوش، لحیم، و اتصال سطحی لوله ها و اتصال و ثابت کردن قطعات در یکدیگر به طریقه انبساطی و حرارتی[1] و ... می باشد.[۱]

همچنین در برخی موارد جهت نگه داشتن مواد مذاب به حالت مایع درون بوته های مواد مذاب از روش گرم کردن پیاپی استفاده می شود که غالبا گرم کننده های این روش با فرکانس شبکه کار می کنند.

یکی از کاربردهای نوین و تحول ساز این روش که اخیرا در بخشهای مختلف از جمله پزشکی و ساخت قطعات و ... بسیار مورد توجه قرار گرفته ایجاد پروفیل حرارتی معین در ساختار جسم با الگوی زمانی تعریف شده می باشد.

آن چه در این تحقیق انجام می پذیرد تنها گرمایش است و هدف ما کنترل حلقه بسته فرکانس روزنانس جهت کار کوره در نقطه بهینه آن می باشد. مطالعه و بررسی دقیق رفتار دمایی مواد مختلف و تسلط کامل بر این بحث مستلزم آشنایی با علوم مواد فلزی و متالورژی می باشد ولی تنها بخش الکتریکی کوره های القایی مد نظر ما است.

[1] Shrink fit(fix)

۱-۳-۱- کاربرد کوره القایی تحت خلا

چون از تراکم گاز در خلا به شدت کاسته می شود و روش همرفت در انتقال گرما از بین می رود، گرما می تواند از دو روش رسانش و تابش منتقل شود.

برای گرمادهی قطعه ای فلزی در خلا روش های مختلفی وجود دارد. یکی از روش ها، گرمادهی مقاومتی[1] قطعه است به این صورت که قطعه کار را با گذراندن مستقیم جریان الکتریکی از آن گرمادهی می کنند. روش دیگر گرم کردن قطعه کار با روش تابش گرمایی است به این ترتیب که مثلا المنتی را در مجاورت قطعه کار از طریق گذراندن جریان الکتریکی گرم می کنند و سپس انرژی گرمایی از طریق تابش به قطعه کار منتقل می شود. ولی یکی از بهترین روش ها، روش گرمادهی القایی است.

کوره های القایی تحت خلا کاربردهای فراوانی دارند یکی از کاربردها گرم کردن آلیاژی خاص از آهن است فلزات موجود در این آلیاژ در دمای بالا با مولکول های هوای باقی مانده در محفظه خلا واکنش می دهد و با جذب هوای باقی مانده به ایجاد خلا بهتر در محفظه کمک می کند.

از کوره های القایی برای ذوب مواد فلزی در خلا نیز استفاده می شود. کوره های القایی ذوب تحت خلا معروف به کوره های VIM[2] هستند.

نیاز به داشتن قطعاتی از جنس آلیاژهای خاص، که دارای ویژگیهای مطلوبی مانند استحکام و تافنس بالا، عمر خستگی زیاد، خواص فیزیکی بهتر و ضریب اطمینان بالاتر هستند، مورد توجه میباشد. از همین رو محققین پی به نیاز خود برده و در صدد دستیابی به آن برآمدند.

آنها این خواص را در نوعی از آلیاژها با عنوان « آلیاژهای تمیز» پیدا کرده اند. این آلیاژها به خاطر دارا بودن نسبت استحکام به وزن عالی، ارزش افزوده بالایی دارند و مجموعه خواص فوق، نیروی محرکه ای برای تحقیق در جهت تولید آلیاژهای تمیزتر، از طریق ابداع و بکارگیری روش های ذوب پیشرفته تر می باشد.

اصطلاح تمیز برای آلیاژها، یک نسبت است که به معنی پایین بودن میزان عناصر ناخالصی مضر نظیر اکسیژن، گوگرد، فسفر، نیتروژن، هیدروژن و دربعضی موارد کربن به کار میرود. این تعریف را می توان به یک آلیاژ فولاد تمیز و یا یک سوپر آلیاژ غیر آهنی نسبت داد؛ درشمشها نیز واژه تمیز، به پایین بودن میزان آخالهای غیرفلزی و بطورعمده آخالهای اکسیدی وسولفیدی اشاره دارد.

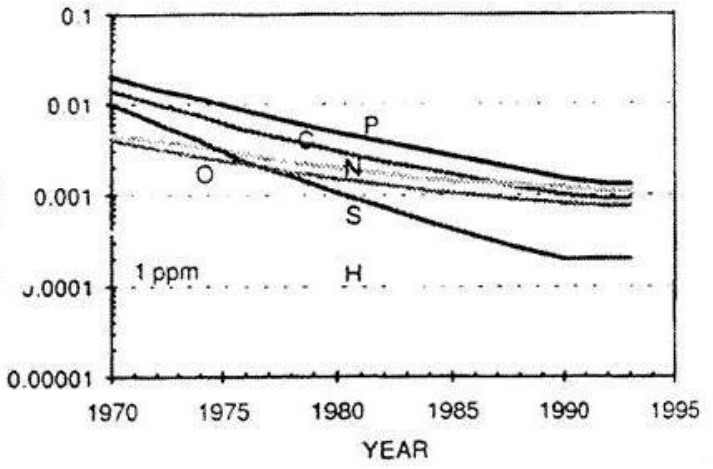
تولید آلیاژهای تمیز در شرایط معمولی امکان پذیر نبوده و از این رو استفاده از تکنولوژیهای نوینی به منظور کاهش ناخالصیهای این مواد توسعه یافته است، بطوریکه میزان ناخالصیها بصورت روزافزونی در حال تقلیل است و گواه این بیان نمودار تصویر شده در شکل ۱-۱ می باشد.

---

[1] Resistance heating

[2] Vacuum Induction Melting

ذوب القایی تحت خلا یکی از بهترین روشهایی است که به مدد آن می توان، آلیاژهای تمیز و به بیان بهتر آلیاژهای با مقادیر ناخالصی کمتر را تولید کرد. [۳]



شکل ۱-۱: روند کاهش ناخالصی آلیاژها در صنعت [3]

ذوب القایی تحت خلا یکی از بهترین روشهایی است که به مدد آن میتوان، آلیاژهای تمیز و به بیان بهتر آلیاژهای با مقادیر ناخالصی کمتر را تولید کرد.

فصل ۲– اصول عملکرد کوره های القایی رزونانسی

به دلیل وجود جریان بالا و همچنین توان راکتیو کویل کار در اغلب کوره های القایی از خازن جهت جبران سازی جریان سلفی بالا به طور سری یا موازی با کویل استفاده می شود.
در حالت بهینه اگر کویل کوره القایی در رزونانس با خازن مذکور قرار گیرد مزیت های بسیاری از جمله بالا رفتن ضریب توان و کاهش جریان راکتیو دریافتی از شبکه و تلفات کلید زنی مبدل و بالا رفتن راندمان و ... حاصل می گردد. البته این حالت در فرکانس رزونانس مدار رخ می دهد اما در سایر فرکانس ها نیز؛ جبران سازی توسط خازن صورت می گیرد.

۲–۱– آرایش های رایج مدار رزونانسی در کوره القایی

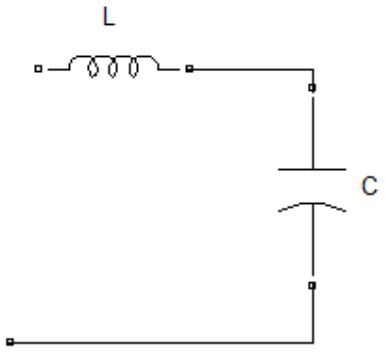
همانطور که می دانیم و قبلا هم ذکر شد امروزه در کوره های القایی عمدتاً از آرایش مدارهای رزونانسی استفاده می گردد این ترکیب دارای مزایای متعددی است. اگر یک مدار رزونانسی در فرکانس رزونانس خود کار کند غالباً دارای ضریب توان بالا می باشد همچنین می توان کلیدزنی منبع را به صورت نرم از نوع ولتاژی[۱] یا جریانی[۲] انجام داد. این امر منجر به کاهش تلفات کلیدزنی اینورتر کاهش استرس حرارتی و ولتاژی کلیدها و نهایتاً افزایش طول عمر آنها می گردد.
همچنین در مدارهای روزنانسی شکل موج جریان خروجی اینورتور سینوسی کامل خواهد بود که منجر به کاهش پدیده تداخل الکترومغناطیسی نیز می گردد، که این پدیده در توان های بالا از اهمیت بالایی برخوردار است.[۴]

۲–۱–۱– آرایش سری[۳]

در رزونانس سری همانطور که گفتیم جریان کویل سینوسی است که همه این جریان از منبع توان (اینورتر) می گذرد که این خود نقص بزرگی برای این آرایش محسوب می گردد.
همچنین در این حالت به دلیل بالابودن جریان؛ ولتاژ کویل می تواند بسیار بیشتر از ولتاژ منبع گردد مخصوصاً در حالت بی باری کوره و کویل این امر بسیار متحمل است و اگر ضریب کیفیت مدار بالا باشد (مقاومت کویل کم باشد) ولتاژ افزایش بیشتری یافته فلذا ممکن است به خازن رززونانس صدمه وارد گردد.[۵]

[1] Zero Voltage Switching (Zvs)
[2] Zero Current Switching (Zcs)
[3] Series Resonant Tank Circuit

با افزایش ولتاژ کویل می توان به توان های بالاتر دست یافت که مستلزم گذشتن جریان های بزرگتر از منبع می باشد. لذا اغلب در این آرایش، کویل تعداد دور بالایی با چندین آمپر (جریان نسبتا کم) دارد. بدین ترتیب ولتاژ افزایش یافته ولی جریان در حد قابل قبولی قرار می گیرد.



شکل ۲-۱: آرایش رزونانسی سری

۲-۱-۲- آرایش موازی[1]

در این آرایش کویل موازی با خازن رزونانس قرار دارد و در این حالت جریان کویل سینوسی ونسبتا بالا بوده و که از رزونانس با خازن حاصل می شود و تنها بخش کمی از جریان کویل (بخش مربوط به توان حقیقی) توسط اینورتر تامین می گردد.

اگر در رزونانس کامل قرار داشته باشیم جریان بار دیده شده توسط اینورتر نیز سینوسی خواهد بود. این خواص در رزونانس موازی سبب بالارفتن ضریب توان بار اینورتر می گردد چرا که جریان اینورتر غالباً صرف تولید توان حقیقی می گردد و این امتیاز مهمی برای کوره القایی است چرا که غالباً در کوره ها ضریب توان کم است. (ضریب توان از دید شبکه) به خصوص در توان های بالا این موضوع بسیار مهم است.

دلیل این موضوع همان طور که گفتیم کاهش قابل ملاحظه هارمونیک های جریانی دریافت شده از سمت شبکه و همچنین عدم دریافت توان راکتیو از شبکه می باشد.

همچنین در این حالت به دلایل فوق، تلفات انتقال کم می باشد و می توان کوره و منبع را در فاصله دور از هم قرار داد.

کویل های به کار رفته در این روش اغلب تعداد دور کم با هادی های ضخیم مس (لوله تو خالی) دارند که در آن ها جریان های بزرگ (چند صد یا چند هزارآمپر) جاری است که برای نایل شدن به آمپر دور مورد نیاز و متعاقباً توان مدنظر، الزامی است.

[1] Parallel Resonant Tank Circuit

همچنین به دلیل جریان بالا و فرکانس بالای آن در این حالت تلفات دی الکتریکی خازن و پدیده اثر پوستی و ... خنک کاری کویل و خازن با آب در این آرایش رایج است.

در این آرایش در حالت بی باری کویل (بدون حضور قطعه کار) جریان کمی از اینورتر دریافت می گردد که در حالت روزنانس تنها صرف تلفات بخشهای مختلف می گردد.

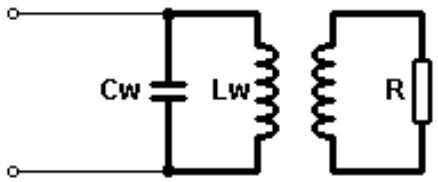
با ورود قطعه کار به درون کویل ، حالت رزونانس مدار کمی از بین می رود و میرا می شود و جریان منبع (دریافت شده توسط تانک موازی) افزایش می یابد (به عبارت دیگر ضریب کیفیت مدار کاهش یافته و ولتاژ تانک نیز کاهش می یابد) چرا که در این حالت اساسا مشخصه مدار تغییر کرده و فرکانس رزونانس آن تغییر می یابد.

در صورتی که بخواهیم مدار در حالت رزونانس کار کند باید سیستم کنترل فرکانس رزونانس جدید را یافته و فرکانس منبع را به فرکانس جدید تغییر دهد .

۲-۱-۲-۱- مدار معادل

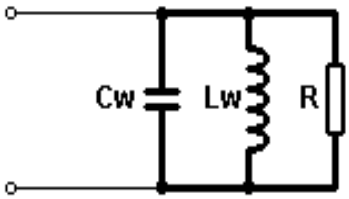
همانطور که در مقدمه نیز اشاره کردیم کوره القایی بر اساس عمل ترانسفورمری (القای متقابل) کار می کند به این معنی که مجموعه کویل و قطعه کار درون آن را می توان همانند ترانسفورماتوری با اولیه کویل کوره و ثانویه ۱ دور که اتصال کوتاه شده است درنظر گرفت. (همان طور که می بینیم در این جا نیز بر خلاف تصور رایج قطعه کار را همانند هسته فرض نکردیم بلکه ترانس را با هسته هوایی فرض کرده و قطعه کار را یک دور اتصال کوتاه با مقاومت تلفاتی قطعه کار بسته به جنس آن در نظر گرفتیم) .

پس می توان برای آرایش موازی ساختار زیر را تصور کرد:



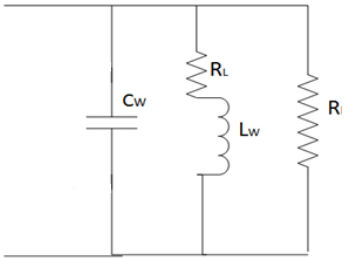
شکل ۲-۲: آرایش موازی وانتقال توان از طریق عمل ترانسفورمری

که با انتقال به طرف دیگر ترانس مدار به صورت شکل ۲-۳ درمی آید .



شکل ۲-۳: مدار معادل انتقال یافته در آرایش موازی

در یک مدل جامع تر می توان تلفات اهمی کویل را لحاظ کرد که در این صورت مدار معادل به صورت شکل ۲-۴ در می آید.



شکل ۲-۴: آرایش موازی با در نظر گرفتن مقاومت سلف کار

می توان مدل مداری تلفات قسمتهای مختلف را با هم تلفیق کرده و به صورت یک عنصر اهمی فشرده در نظر گرفت.

$$Y_{Tot} = \mathrm{j}C_w.\omega + \frac{1}{R_L + \mathrm{j}L_w.\omega} + \frac{1}{R} \qquad (۱-۲)$$

$$Y_{COIL} = \frac{1}{R_L + jL_w\omega} = \frac{R_L - jL_w\omega}{(R_L)^2 + (L_w\omega)^2}$$

$$= \frac{R_L}{(R_L)^2 + (L_w.\omega)^2} \quad - \frac{jL_w\omega}{(R_L)^2 + (L_w.\omega)^2} \qquad (۲-۲)$$

همانطور که ملاحظه می شود می توان مقاومت سری در کویل کوره را نیز به صورت المانی موازی لحاظ کرد.

$$Y_{COIL} = \frac{R_L}{(R_L)^2 + (L_w.\omega)^2} - \frac{jL_w.\omega}{(R_L)^2 + (L_w.\omega)^2}$$

$$Z_{COIL} = \frac{(R_L)^2 + (L_w.\omega)^2}{R_L} \quad \| \quad j\frac{(R_L)^2 + (L_w.\omega)^2}{L_w.\omega} \qquad (۳-۲)$$