

طراحی و ساخت دستگاه اندازه گیری مشخصه B-H مواد مغناطیسی نرم



مدیر پروژه: حسین عزیزی مقدم

مجری: رضا نصیری زرنندی

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

طراحی و ساخت دستگاه اندازه‌گیری مشخصه B-H مواد مغناطیسی نرم

مدیر پروژه: حسین عزیزی مقدم

مجری: : رضا نصیری زرنندی

انتشارات پژوهشگاه نیرو

۱۴۰۰

کد گزارش: NRI-ER-761-PEMPN18-00-L

DOI: 10.30503/nripress.2020.316

ایران. وزارت نیرو. پژوهشگاه نیرو. گروه پژوهشی ماشین‌های الکتریکی دوار
طراحی و ساخت دستگاه اندازه‌گیری مشخصه B-H مواد مغناطیسی نرم/ مدیر پروژه: حسین عزیزی
مقدم. کارفرما: پژوهشگاه نیرو، ۱۴۰۰.
۳۱۰ ص: مصور، نمودار، جدول

۱. عزیزی مقدم، حسین، همکار پروژه. ۲. محمودی تبار، فرشید، همکار پروژه. ۳.
حقی، علی، همکار پروژه. ۴. یزدانی، کمیل، همکار پروژه.



انتشارات پژوهشگاه نیرو
گروه پژوهشی ماشین‌های الکتریکی دوار

کلیه حقوق قانونی این اثر متعلق به پژوهشگاه نیرو است.

نشانی: تهران، شهرک غرب، انتهای بلوار شهید دامن، پژوهشگاه نیرو، کدپستی: ۱۴۶۸۶۱۳۱۱۳

تلفن: ۸۸۰۷۹۴۰۱-۹

نمابر: ۸۸۰۷۸۲۹۶

وبگاه: www.nri.ac.ir

پست الکترونیک انتشارات: publications@nri.ac.ir

فرم تعهدنامه اصالت اثر

اینجانب حسین عزیزی مقدم متعهد می‌شوم که مطالب مندرج در این گزارش حاصل کار پژوهشی اینجانب و همکاران به شرح زیر است و به دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این پژوهش از آن استفاده شده است، مطابق مقررات ارجاع و در فهرست منابع و مآخذ ذکر گردیده است.

کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر متعلق به پژوهشگاه نیرو است.

همکاران :

۱. فرشید محمودی تبار

۲. علی حقی

۳. کمیل یزدانی

به نام خدا
پژوهشگاه نیرو

نام گزارش: گزارش مرحله اول کد گزارش-ویرایش: PEMPN18/TO1

عنوان پروژه: طراحی و ساخت دستگاه اندازه گیری مشخصه B-H مواد
مغناطیسی نرم

مدیر پروژه: حسین عزیزی مقدم

مجری پروژه: رضا نصیری زرنندی

کارفرما: پژوهشگاه نیرو

تهیه کننده: گروه پژوهشی ماشین های الکتریکی دوار
تاریخ: ۱۴۰۰/۷/۶

پیشگفتار

مواد مغناطیسی از جمله مواد مهندسی بسیار مهمی هستند که کاربردهای وسیعی را در حوزه برق به خود اختصاص می دهند. در کاربردهای مختلف این مواد، پارامترهای مغناطیسی مانند نفوذپذیری مغناطیسی، شار پس ماند، تلفات و... برای طراحان امری ضروری می باشد. با توجه به اهمیت روز افزون تعیین برخی از مشخصه های مهم مواد مغناطیسی، محققان فناوری های بسیاری را به منظور تعیین شاخص های الکتریکی، مکانیکی و شیمیایی مواد مغناطیسی به منظور بکارگیری این مواد در صنایع مختلف ارائه داده اند. دستگاه تعیین حلقه هیستریزس و اندازه گیری تلفات ماده مغناطیسی یکی از مهم ترین اندازه گیری های است که در راستای بهینه سازی و استاندارد نمودن کاربرد مواد مغناطیسی در این صنایع معرفی شده است.

انواع مختلف این دستگاه ها قابلیت اندازه گیری و استخراج منحنی $B-H$ ، در یک رنج فرکانسی وسیعی از ۱۰ هرتز تا ۱۰ مگاهرتز را دارند. قابلیت اندازه گیری چگالی شار مغناطیسی بیشینه (B_m)، شدت میدان مغناطیسی بیشینه (H_m)، نفوذپذیری مغناطیس (μ)، تلفات هسته مغناطیسی (P_c)، فاز ولتاژ/جریان (θ)، تغییرات شار مغناطیسی (ϕ_m)، مقاومت (R)، امپدانس (Z) و اندوکتانس (L) نیز از جمله کمیت های قابل اندازه گیری توسط این دستگاه می باشند. بر همین اساس هدف این پروژه طراحی و ساخت یک نمونه دستگاه $B-H$ متر با قابلیت اندازه گیری مشخصه های مواد مغناطیسی نرم.

در این پروژه هدف اصلی بومی سازی دانش فنی طراحی و ساخت دستگاه اندازه گیری منحنی $B-H$ جهت استخراج حلقه هیستریزس و سایر کمیت های مواد مغناطیسی نرم می باشد. اجزاء کلی این دستگاه شامل مدار مغناطیسی، سنسورهای اندازه گیری، آمپلی فایر قدرت، کارت I/O و محیط نرم افزاری جهت پردازش سیگنال و استخراج مشخصه ها می باشد. در این گزارش مرحله اول این پروژه با محوریت طراحی مفهومی و طراحی تفصیلی کلیه زیر بخش ها ارائه می گردد. طراحی مدارات اندازه گیری و واحد آمپلی فایر قدرت تا حد زیادی به عملکرد مدار مغناطیسی وابسته می باشد. بر همین اساس در این گزارش تحلیل مدارات مغناطیسی برای هر یک از نمونه های مورد آزمون (هسته تروئید، اپستاین و ورق) مورد توجه ویژه قرار گرفته است. لازم به ذکر می باشد طراحی مدارات مغناطیسی بر اساس استاندارد های تدوین شده در زمینه اندازه گیری مواد مغناطیسی تطبیق داده شده است.

در مراحل ۲ الی ۴ این پروژه ساخت دستگاه اندازه گیری منحنی $B-H$ جهت استخراج حلقه هیستریزس و سایر کمیت های مواد مغناطیسی نرم می باشد. اجزاء کلی این دستگاه شامل مدار مغناطیسی، سنسورهای اندازه گیری، آمپلی فایر قدرت، محیط نرم افزاری جهت پردازش سیگنال و استخراج مشخصه ها می باشد. در پایان نتایج تست برای چند نمونه مواد مغناطیسی شامل هسته تروئید و ورق مغناطیسی مورد آزمون قرار می گیرد.

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
۱- فصل اول: مغناطیس، مواد مغناطیسی و مشخصه مغناطیسی.....	۱
۱-۱- مقدمه.....	۲
۱-۲- پیشینه تاریخی مغناطیس.....	۲
۱-۳- روابط الکترومغناطیس.....	۳
۱-۳-۱ مدار مغناطیسی.....	۵
۱-۳-۲ مدل مداری هسته مغناطیسی.....	۶
۱-۳-۳ قوانین مدار مغناطیسی.....	۷
۱-۴- انواع مواد مغناطیسی.....	۸
۱-۴-۱ مواد دیا مغناطیس.....	۸
۱-۴-۲ مواد فرو مغناطیس.....	۹
۱-۴-۳ مواد آنتی فرو مغناطیس.....	۱۰
۱-۴-۴ مواد فری مغناطیس.....	۱۱
۱-۴-۵ مواد پارا مغناطیس.....	۱۱
۱-۴-۶ مواد ابر پارامغناطیس.....	۱۲
۱-۵- مغناطیس شدگی در مواد فرومغناطیس.....	۱۲
۱-۵-۱ ساختار حوزه و منحنی مغناطیسی.....	۱۲
۱-۵-۲ حلقه هیستریزیس.....	۱۳
۱-۵-۳ تلفات انرژی ناشی از مغناطیس شدگی.....	۱۶
۱-۵-۴ تأثیر فرکانس روی تلفات هسته و حلقه هیستریزیس.....	۱۹
۱-۵-۵ تأثیر دما روی حلقه هیستریزیس.....	۲۰
۱-۵-۶ تأثیر فاصله هوایی روی حلقه هیستریزیس.....	۲۴
۱-۵-۷ تأثیر تنش مکانیکی روی حلقه هیستریزیس.....	۲۶
۱-۶- جمع بندی.....	۲۷
۲- فصل دوم: معرفی دستگاه B-H متر و بررسی سوابق بین المللی طراحی و ساخت آن در	
ابعاد صنعتی و تجاری.....	۲۸
۲-۱- مقدمه.....	۲۹
۲-۲- دستگاه B-H متر.....	۲۹
۲-۳- اصول عملکرد دستگاه B-H متر.....	۳۰
۲-۴- بررسی سوابق بین المللی طراحی و ساخت دستگاه B-H متر.....	۳۳

۵-۲- بررسی استانداردهای موجود در زمینه طراحی دستگاه B-H متر ۳۶

۱-۵-۲ استاندارد IEC 62044-3: مشخصه مغناطیسی در سطح تحریک بالا ۳۶

۲-۵-۲ استاندارد IEC 60404-2: روش‌های اندازه‌گیری خواص مغناطیسی فولاد الکتریکی نوار و ورق با استفاده از قاب
آپستین ۳۷

۳-۵-۲ استاندارد IEC 60404-3: روش‌های اندازه‌گیری خواص مغناطیسی ورق و نوار مغناطیسی با استفاده از آزمایش
یک ورق تنها ۳۷

۴-۵-۲ استاندارد IEC 60404-4: روش اندازه‌گیری dc خواص مغناطیسی مواد مغناطیسی نرم ۳۷

۵-۵-۲ استاندارد IEC 60404-5: مواد مغناطیسی دائمی (مغناطیسی سخت) - روشهای اندازه‌گیری خواص مغناطیسی
..... ۳۷

۶-۵-۲ استاندارد IEC 60404-6: روش‌های اندازه‌گیری خواص مغناطیسی مواد فلزی نرم و پودر در محدوده فرکانسی
۲۰ هرتز تا ۲۰۰ کیلو هرتز با استفاده از نمونه تروئید ۳۸

۷-۵-۲ استاندارد IEC 60404-7: روش اندازه‌گیری وادارندگی مواد مغناطیسی در یک مدار باز مغناطیسی ۳۸

۸-۵-۲ استاندارد IEC 60404-8-1: خواص منحصربه‌فرد مواد- مواد سخت مغناطیسی ۳۸

۹-۵-۲ استاندارد IEC 60404-9: روش‌های تعیین خصوصیات هندسی ورق و نوار فولادی مغناطیسی ۳۸

۱۰-۵-۲ استاندارد IEC 60404-10:2016: روش‌های اندازه‌گیری خواص مغناطیسی نوارها و صفحات فولادی الکتریکی
در فرکانس‌های متوسط ۳۸

۱۱-۵-۲ استاندارد IEC 60404-11: روش آزمون برای تعیین مقاومت عایق سطحی ورق و نوار مغناطیسی ۳۸

۱۲-۵-۲ استاندارد IEC 60404-12: راهنمای روش ارزیابی قابلیت دمای پوشش‌های عایق داخل لایه‌ای ۳۹

۱۳-۵-۲ استاندارد IEC 60404-13: روش اندازه‌گیری چگالی، مقاومت و ضریب انبساط ورق و نوار فولادی الکتریکی.. ۳۹

۱۴-۵-۲ استاندارد IEC 60404-14: روش‌های اندازه‌گیری لحظه‌ای دوقطبی مغناطیسی یک نمونه ماده فرومغناطیسی
با روش حذف یا چرخش ۳۹

۱۵-۵-۲ استاندارد GB/T 13012: روش اندازه‌گیری dc خواص مغناطیسی مواد مغناطیسی نرم ۳۹

۱۶-۵-۲ استاندارد GB/T 3658-2008: روش اندازه‌گیری ac خواص مغناطیسی مواد مغناطیسی نرم ۳۹

۶-۲- جمع‌بندی ۳۹

۳- فصل سوم: اصول طراحی و ساخت مدارهای مغناطیسی دستگاه B-H متر ۴۱

۱-۳- مقدمه ۴۲

۲-۳- اندازه‌گیری خواص مغناطیسی مواد مغناطیسی نرم فلزی و پودر با استفاده از نمونه تروئید... ۴۲

۱-۳-۲ اصول کلی اندازه‌گیری ۴۲

۲-۳-۲ اندازه‌گیری نفوذپذیری مغناطیسی و منحنی مغناطیس با استفاده از روش ولت-متر - آمپر متر ۴۴

۳-۳-۲ اندازه‌گیری تلفات ترانس ۴۷

۱-۳-۲ دستورالعمل روش طراحی اندازه‌گیری خواص مغناطیسی مواد پودر و تروئید بر اساس استاندارد IEC 60404-6 ۵۴

۳-۳- اندازه‌گیری خواص مغناطیسی نوار و ورق فولاد الکتریکی با آزمایش یک ورق ۵۶

۳-۳-۱	اصول کلی	۵۶
۳-۳-۲	تعیین تلفات کل هسته	۶۰
۳-۳-۳	دستورالعمل روش طراحی اندازه‌گیری خواص مغناطیسی ورق مغناطیسی بر اساس استاندارد IEC 60404-3	۶۱
۳-۴	روش‌های اندازه‌گیری خواص مغناطیسی نوار و ورق الکتریکی با استفاده از قاب اپستین	۶۷
۳-۴-۱	اصول کلی اندازه‌گیری ac	۶۸
۳-۴-۲	روش اندازه‌گیری تلفات کل	۷۲
۳-۴-۳	دستورالعمل روش طراحی اندازه‌گیری خواص مغناطیسی نوار و ورق الکتریکی با استفاده از قاب اپستین بر اساس استاندارد IEC 60404-2	۷۴
۳-۵	جمع‌بندی	۸۰
۴	فصل چهارم: شبیه‌سازی دینامیکی دستگاه B-H متر	۸۱
۴-۱	مقدمه	۸۲
۴-۲	شبیه‌سازی ساختار ماده مغناطیسی به شکل پودر و تروئید	۸۲
۴-۳	شبیه‌سازی ساختار ماده مغناطیسی به شکل ورق	۸۶
۴-۴	شبیه‌سازی ساختار ماده مغناطیسی با قاب اپستین	۸۷
۴-۵	جمع‌بندی	۸۹
۵	فصل پنجم: مدل‌سازی اجزا محدود B-H متر	۹۰
۵-۱	مقدمه	۹۱
۵-۲	ساختار سه مدل هسته در نظر گرفته‌شده و مدار معادل مغناطیسی آن‌ها	۹۱
۵-۳	مدل‌سازی هسته تروئید	۹۳
۵-۴	مدل‌سازی تک ورق	۹۹
۵-۵	مدل‌سازی هسته اپستین	۱۰۵
۵-۶	نحوه محاسبه تلفات هسته با استفاده از نرم‌افزار Flux	۱۰۹
۵-۷	محاسبه اندوکتانس با استفاده از Flux	۱۱۲
۵-۸	محاسبه اندوکتانس ناشی	۱۱۳
۵-۹	محاسبه اندوکتانس مغناطیس‌کنندگی	۱۱۳
۵-۱۰	محاسبه تلفات مسی	۱۱۳
۵-۱۱	تحلیل فوریه ولتاژ دو سر سیم‌پیچ اولیه	۱۱۴
۵-۱۲	بررسی اصل تعادل توان	۱۱۵

۱۱۵.....	۱۳-۵- مقایسه زمان محاسباتی در سه فریم.....
۱۱۵.....	۱۴-۵- بررسی نامتعادلی توزیع چگالی شار مغناطیسی بر روی سطح تروئید.....
۱۱۷.....	۱۵-۵- جمع‌بندی.....
۱۱۸.....	۶- فصل ششم: طراحی، شبیه‌سازی و ساخت مدار تقویت کننده توان.....
۱۱۹.....	۱-۶- مقدمه.....
۱۱۹.....	۲-۶- معرفی انواع تقویت‌کننده‌های توان.....
۱۱۹.....	۱-۲-۶- تقویت کننده خطی.....
۱۲۰.....	۲-۲-۶- تقویت کننده سوئیچینگ (کلاس D).....
۱۲۱.....	۳-۲-۶- اینورترهای چندسطحی.....
۱۲۷.....	۴-۲-۶- تکنیک‌های کلیدزنی و کنترل میدل‌های CHB متقارن و نامتقارن.....
۱۳۰.....	۳-۶- نتایج شبیه‌سازی اینورترهای چندسطحی.....
۱۳۰.....	۱-۳-۶- اینورتر چندسطحی متقارن.....
۱۳۶.....	۲-۳-۶- اینورتر چند سطحی نامتقارن.....
۱۴۳.....	۳-۳-۶- مقایسه پارامترهای مختلف در اینورترهای چند سطحی.....
۱۴۶.....	۴-۶- جمع‌بندی.....
۱۴۷.....	۷- فصل ششم: طراحی مفهومی دستگاه B-H متر و جمع بندی.....
۱۴۸.....	۱-۷- مقدمه.....
۱۴۹.....	۱-۱-۷- واحد تقویت‌کننده توان.....
۱۵۱.....	۲-۱-۷- سنسور جریان.....
۱۵۲.....	۳-۱-۷- سنسور ولتاژ.....
۱۵۲.....	۴-۱-۷- وریتور.....
۱۵۳.....	۵-۱-۷- مدارات آماده ساز سیگنال.....
۱۵۳.....	۶-۱-۷- واحد نرم‌افزاری کنترل (PC).....
۱۵۳.....	۲-۷- کلیات مدارهای مغناطیسی.....
۱۵۶.....	۳-۷- جمع‌بندی.....
۱۵۸.....	۸- فصل هشتم: ساخت مدارات مغناطیسی دستگاه B-H متر.....
۱۵۹.....	۱-۸- مقدمه.....
۱۵۹.....	۲-۸- تهیه نمونه مورد آزمایش هسته تروئید.....
۱۶۱.....	۳-۸- ساخت فریم اپشتین طبق استاندارد IEC-60404-6.....
۱۶۲.....	۱-۳-۸- یوغ فریم اپشتین وجعبه قرار گیری نمونه ها.....

۱۶۳.....	۸-۳-۲ سیم پیچی جعبه ها
۱۶۵.....	۸-۳-۳ ساخت فریم مدار مغناطیسی تک ورق
۱۷۴.....	۸-۴ جمع بندی و نتیجه گیری
۱۷۵.....	۹- فصل نهم: ساخت مدار آمپلی فایر دستگاه B-H متر.....
۱۷۶.....	۹-۱- مقدمه
۱۷۹.....	۹-۱-۱ یکسوساز و ترانس ایزوله ورودی
۱۸۱.....	۹-۲- ساخت مبدل ۶۳ سطحی CHB نامتقارن
۱۸۲.....	۹-۲-۱ نقشه نگاری مدارات
۱۸۴.....	۹-۲-۲ پیاده سازی، تست نسخه اولیه مدار اینورتر
۱۸۵.....	۹-۲-۳ پیاده سازی، تست نسخه اولیه مدار چاپر
۱۸۶.....	۹-۲-۴ پیاده سازی، تست و اصلاح مدار تشخیص خطا
۱۸۷.....	۹-۲-۵ تست تجمیعی، شناسایی و رفع ایرادات مدارات
۱۸۹.....	۹-۲-۶ ساخت سلف چاپر باک
۱۹۴.....	۹-۲-۷ پیاده سازی نسخه نهایی بخش سخت افزار بخش آمپلی فایر دستگاه B-H متر
۲۰۱.....	۹-۲-۸ مونتاژ و تست بردهای نسخه سوم
۲۰۴.....	۹-۲-۹ تست و رفع ایرادات بردها
۲۰۶.....	۹-۲-۱۰ تست تجمیعی هر طبقه و مونتاژ نهایی
۲۰۸.....	۹-۲-۱۱ برد سنسور
۲۰۸.....	۹-۳- تولید پالس اینورتر ۶۳ سطحی با استفاده از FPGA
۲۰۹.....	۹-۳-۱ نحوه برنامه نویسی برای تراشه FPGA با Xilinx ISE
۲۱۲.....	۹-۳-۲ تولید پالس PWM برای یک مازول Hbridge
۲۲۵.....	۹-۴- نتیجه گیری
۲۲۶.....	۱۰- فصل دهم: (مرحله سوم پروژه) پیاده سازی نرم افزار دستگاه B-H متر.....
۲۲۷.....	۱۰-۱- مقدمه
۲۲۷.....	۱۰-۲- پیاده سازی نرم افزار GUI دستگاه B-H متر
۲۲۸.....	۱۰-۳- مقدار دهی اولیه نرم افزار
۲۲۸.....	۱۰-۳-۱ انواع داده
۲۲۹.....	۱۰-۳-۲ کد دریافت داده
۲۳۰.....	۱۰-۴- محاسبات ابعادی هسته تحت تست
۲۳۲.....	۱۰-۵- پردازش داده ها و اندازه گیری مشخصات مغناطیسی
۲۳۳.....	۱۰-۶- فیلتر کردن سیگنالها و حذف اسپایک های ولتاژ

۲۳۵.....	۷-۱۰- محاسبه ی سیگنال شدت میدان (H)
۲۳۵.....	۸-۱۰- محاسبه سیگنال شدت میدان مغناطیسی (B)
۲۳۶.....	۹-۱۰- نمودار B-H
۲۳۷.....	۱۰-۱۰- چگالی شار ماکزیمم (Bmax)
۲۳۸.....	۱۱-۱۰- شدت میدان ماکزیمم (Hmax)
۲۳۸.....	۱۲-۱۰- محاسبه شار پس ماند (Br)
۲۳۹.....	۱۰-۱۳- محاسبه نیروی پس ماند زدای مغناطیسی (Hc)
۲۴۰.....	۱۴-۱۰- محاسبه مساحت حلقه هیستریزیس
۲۴۴.....	۱۰-۱۵- محاسبه توان
۲۴۴.....	۱۰-۱۵-۱ توان ورودی
۲۴۵.....	۱۰-۱۵-۲ تلفات مسی
۲۴۶.....	۱۰-۱۵-۳ تلفات فوکو
۲۴۶.....	۱۰-۱۶- مشخصه مغناطیس شوندگی
۲۴۹.....	۱۷-۱۰- نتیجه گیری
۲۵۰.....	۱۱- فصل یازدهم: جمعیت دستگاه و انجام تستهای نهایی و کالیبراسیون دستگاه
۲۵۱.....	۱۱-۱- مقدمه
۲۵۱.....	۱۱-۲- اندازه گیری مشخصه هسته پودر آهن
۲۶۱.....	۱۱-۳- اندازه گیری مشخصه ورق مغناطیسی با فریم اپشتین
۲۶۶.....	۱۱-۴- کالیبراسیون دستگاه
۲۶۷.....	۱۱-۵- نتیجه گیری و پیشنهادات
۲۷۰.....	۱۲- پیوست:
۲۷۶.....	۱۳- مراجع

فهرست اشکال

عنوان	صفحه
شکل ۱-۱: قانون مداری آمپر.....	۲
شکل ۱-۲: هسته مغناطیسی و مدار معادل آن (الف) - هسته مغناطیسی با سیم‌پیچ با تعداد دور N ، (ب) - مدل مداری هسته مغناطیسی [۶].....	۵
شکل ۱-۳: جریان تحریک متناظر با ولتاژ تحریک سینوسی [۶].....	۵
شکل ۱-۴: یک مدار مغناطیسی ساده [۶].....	۶
شکل ۱-۵: مدار معادل مغناطیسی، (الف): مدار مغناطیسی و (ب): مدار الکتریکی.....	۷
شکل ۱-۶: مدار مغناطیسی ساده با فاصله هوایی [۶].....	۷
شکل ۱-۷: مدار مغناطیسی سری.....	۸
شکل ۱-۸: (الف) - قسمتی از یک ماده مغناطیسی که مغناطیس نشده و قطب‌های مغناطیسی در آن جهت‌گیری نشده است، (ب) - قطب‌های مغناطیسی جهت‌گیری شده با نیروی مغناطیسی خارجی (H). ۹	۹
شکل ۱-۹: جهت دوقطبی های مواد فرو مغناطیس سخت و نرم در حضور میدان مغناطیسی.....	۱۰
شکل ۱-۱۰: دوقطبی های مغناطیسی در مواد آنتی فرومغناطیس.....	۱۰
شکل ۱-۱۱: دسته‌بندی انواع مواد مغناطیسی [۷].....	۱۰
شکل ۱-۱۲: دوقطبی های مغناطیسی در مواد فری مغناطیس.....	۱۱
شکل ۱-۱۳: جهت‌گیری حوزه‌های مغناطیسی در مواد پارا مغناطیس.....	۱۲
شکل ۱-۱۴: فرایند مغناطیس‌شدگی در یک ماده فرومغناطیس.....	۱۳
شکل ۱-۱۵: حلقه بزرگ و کوچک B-H برای یک ماده فرو مغناطیس.....	۱۴
شکل ۱-۱۶: انواع حلقه‌های هیستریزیس برای مواد مغناطیسی نرم، مواد مغناطیسی سخت استاندارد و مواد مورد استفاده برای ذخیره‌سازی اطلاعات [۸].....	۱۴
شکل ۱-۱۷: تشکیل حلقه هیستریزیس ناشی از اعمال میدان خارجی به یک ماده فرو مغناطیس و تغییر در ساختار حوزه‌ها.....	۱۵
شکل ۱-۱۸: منحنی B-H یک ماده فرو مغناطیس سخت هنگام مغناطیس‌زدایی.....	۱۵
شکل ۱-۱۹: تفاوت نمودار پسماند مواد فرومغناطیس، پارامغناطیس و ابرپارامغناطیس [۹].....	۱۶
شکل ۱-۲۰: رابطه بین شار پیوندی و جریان تحریک زمانی که جریان گردابی القا شده است (حلقه خط‌چین)، و هیستریزیس خالص که با تحریک dc حاصل شده است (حلقه خط توپر).....	۱۷
شکل ۱-۲۱: جریان گردابی در یک هسته ورقه ورقه‌ای تروئید.....	۱۸
شکل ۱-۲۲: جریان‌های گردابی، (الف) مدل کلاسیک و (ب) مدل حوزه‌ای.....	۱۸

- شکل ۲۳-۱: نمودار تغییرات تلفات هسته در فرکانس‌های مختلف [۶]..... ۱۹
- شکل ۲۴-۱: منحنی هیستریزیس اندازه‌گیری شده در Permalloy 80 در ۴۰۰، ۱۰۰۰، ۳۰۰۰ و ۶۰۰۰ هرتز dc [۱۳]..... ۲۰
- شکل ۲۵-۱: حلقه B-H فریت، ماده نوع K در ۲۵ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد..... ۲۲
- شکل ۲۶-۱: حلقه B-H فریت، ماده نوع P و R در ۲۵ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد..... ۲۲
- شکل ۲۷-۱: حلقه B-H فریت، ماده نوع F در ۲۵ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد..... ۲۳
- شکل ۲۸-۱: حلقه B-H فریت، ماده نوع W و H در ۲۵ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد..... ۲۳
- شکل ۲۹-۱: حلقه‌های هیستریزیس اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده ماده NiFe در $T=23^{\circ}\text{C}$ و $T=310^{\circ}\text{C}$ و $f=0.5\text{ Hz}$ [۱۴]..... ۲۴
- شکل ۳۰-۱: مقایسه حلقه هیستریزیس مواد مغناطیسی: (الف) بدون شکاف و (ب) با شکاف [۶]..... ۲۵
- شکل ۳۱-۱: مدار معادل نامتعادلی dc..... ۲۵
- شکل ۳۲-۱: حلقه هیستریزیس ماده مغناطیسی تحت بایاس DC..... ۲۶
- شکل ۳۳-۱: حلقه‌های هیستریزیس اندازه‌گیری شده با فولاد Fe-3%Si تحت فشار کششی تا تقریباً Mpa ۱۰۰ [۱۵]..... ۲۷
- شکل ۱-۲: دستگاه B-H متر ساخت شرکت IWATSU [۱۸]..... ۳۰
- شکل ۲-۲: پیکربندی سیستم کنترل از راه دور دستگاه B-H متر [۱۸]..... ۳۰
- شکل ۲-۳: هسته مورد آزمایش با دو سیم‌پیچی برای آنالیز B-H [۱۹]..... ۳۱
- شکل ۲-۴: اصول عملکرد B-H متر [۱۹]..... ۳۱
- شکل ۲-۵: راه‌اندازی آنالیزور B-H با بایاس DC [۱۹]..... ۳۲
- شکل ۳-۱: شماتیک نمونه مورد آزمایش و اتصالات تجهیزات اندازه‌گیری..... ۴۴
- شکل ۳-۲: توزیع شدت میدان مغناطیسی در ترانسفورماتور تروئید [۳۷]..... ۴۸
- شکل ۳-۳: اطلاعات ابعاد هندسی ترانسفورماتور با هسته تروئید [۳۷]..... ۴۹
- شکل ۳-۴: مدار معادل ترانس برای هسته تروئید..... ۵۰
- شکل ۳-۵: مدار معادل مغناطیسی ساده شده آزمایش مواد به شکل پودر و حلقه مغناطیسی..... ۵۰
- شکل ۳-۶: پیاده‌سازی محاسبات در نرم‌افزار اکسل برای آزمایش مواد پودر مغناطیسی..... ۵۴
- شکل ۳-۷: شماتیک دستگاه [۲۲]..... ۵۶
- شکل ۳-۸: ابعاد یوغ [۲۲]..... ۵۷
- شکل ۳-۹: نحوه اتصالات پنج سیم‌پیچ اولیه [۲۲]..... ۵۸

- شکل ۳-۱۰: مدار معادل مغناطیسی آزمایش ورق ۵۸
- شکل ۳-۱۱: مدار معادل ساده شده آزمایش ورق ۵۹
- شکل ۳-۱۲: مدار تعیین تلفات کل مغناطیسی [۲۲] ۶۰
- شکل ۳-۱۳: طرح ترانسفورماتور استفاده شده برای محاسبه اندوکتانس نشتی با روش Rogowski [۴۲] ۶۲
- شکل ۳-۱۴: مدار معادل ترانس برای آزمایش ورق مغناطیسی ۶۳
- شکل ۳-۱۵: پیاده سازی محاسبات در نرم افزار اکسل برای آزمایش مواد ورق مغناطیسی ۶۷
- شکل ۳-۱۶: مفصل دو لبه [۲۱] ۶۸
- شکل ۳-۱۷: قاب اپستین ۲۵ سانتی متری [۲۱] ۶۹
- شکل ۳-۱۸: مدار معادل مغناطیسی آزمایش قاب اپستین ۷۰
- شکل ۳-۱۹: مدار معادل ساده شده آزمایش قاب اپستین ۷۱
- شکل ۳-۲۰: مدار روش اندازه گیری وات متر [۲۱] ۷۱
- شکل ۳-۲۱: مدار معادل ترانس برای آزمایش ورق مغناطیسیدر قاب اپستین ۷۶
- شکل ۳-۲۲: پیاده سازی محاسبات در نرم افزار اکسل برای آزمایش قاب اپستین ۸۰
- شکل ۴-۱: تخمین منحنی مرجع B-H با استفاده از قابلیت Curve Fitting Tool ۸۲
- شکل ۴-۲: منحنی شار پیوندی ϕ بر حسب جریان I مربوط به هسته ماده مغناطیسی پودر آهن ۸۳
- شکل ۴-۳: منحنی هیستریزس نشان داده شده در کاتالوگ محصول ۸۳
- شکل ۴-۴: شماتیک مدار کلی پیاده سازی شده در نرم افزار متلب ۸۴
- شکل ۴-۵: بلوک دیاگرام مدار شبیه سازی شده در متلب ۸۴
- شکل ۴-۶: منحنی محاسبه شده در اکسل و شبیه سازی شده در Matlab برای ماده پودر مغناطیسی ۸۵
- شکل ۴-۷: بزرگنمایی حلقه هیستریزس ایجاد شده برای ماده پودر مغناطیسی با شبیه سازی متلب ۸۵
- شکل ۴-۸: مقایسه منحنی شبیه سازی شده و منحنی تخمین زده شده از کاتالوگ محصول ۸۶
- شکل ۴-۹: منحنی جریان i و شار پیوندی ϕ مربوط به هسته ماده مغناطیسی ورق M 530-50 A شرکت isovac ۸۶
- شکل ۴-۱۰: منحنی محاسبه شده در اکسل و شبیه سازی شده در Matlab ۸۷
- شکل ۴-۱۱: بزرگنمایی حلقه هیستریزس ایجاد شده برای ماده ورق مغناطیسی با شبیه سازی متلب ۸۷
- شکل ۴-۱۲: منحنی جریان i و شار پیوندی ϕ مربوط به هسته ماده مغناطیسی ورق با کد M 530-50 A شرکت isovac در قاب اپستین ۸۸
- شکل ۴-۱۳: منحنی محاسبه شده در اکسل و شبیه سازی شده در Matlab ۸۸

- شکل ۱۴-۴: بزرگنمایی حلقه هیستریزیس ایجادشده برای ماده مغناطیسی در قاب اپستین با شبیه‌سازی متلب..... ۸۹
- شکل ۱-۵: (الف) هسته تروئید (ب) هسته تک ورق (ج) قاب اپستین..... ۹۲
- شکل ۲-۵: مدار معادل الکتریکی..... ۹۲
- شکل ۳-۵: انواع مختلف هسته تروئید و مشخصات مغناطیسی آن‌ها..... ۹۳
- شکل ۴-۵: مدل سه‌بعدی تروئید همراه با سیم‌پیچی..... ۹۴
- شکل ۵-۵: (الف) توزیع چگالی شار (ب) توزیع شدت میدان مغناطیسی..... ۹۵
- شکل ۶-۵: تغییرات شدت میدان اعمال‌شده بر سطح تروئید نسبت به فاصله از مرکز..... ۹۵
- شکل ۷-۵: مدار معادل الکتریکی ترانسفورماتور..... ۹۶
- شکل ۸-۵: (الف) جریان کشیده شده از منبع (ب) جریان هسته ترانس (ج) جریان مغناطیس‌کنندگی (د) جریان در ثانویه ترانس (شرایط مدارباز)..... ۹۷
- شکل ۹-۵: (الف) ولتاژ دو سر تروئید (ب) شار سیم‌پیچ اولیه (ج) ولتاژ القاشده (د) شار القاشده..... ۹۸
- شکل ۱۰-۵: منحنی B-H پودر آهن T300-26 در فریم تروئید به‌دست‌آمده با استفاده از Flux..... ۹۸
- شکل ۱۱-۵: سیکل اصلی و حلقه‌های جزئی منحنی B-H به‌دست‌آمده از Flux..... ۹۹
- شکل ۱۲-۵: مقایسه نتایج شبیه‌سازی و کاتالوگ محصول تروئید T300-26..... ۹۹
- شکل ۱۳-۵: مدل سه‌بعدی تک ورق..... ۱۰۰
- شکل ۱۴-۵: (الف) توزیع چگالی شار (ب) توزیع شدت میدان مغناطیسی..... ۱۰۱
- شکل ۱۵-۵: (الف) جریان کشیده شده از منبع (ب) جریان هسته ترانس (ج) جریان مغناطیس‌کنندگی (د) جریان در ثانویه ترانس (شرایط مدارباز)..... ۱۰۲
- شکل ۱۶-۵: (الف) ولتاژ دو سر تک ورق (ب) شار سیم‌پیچ اولیه (ج) ولتاژ القاشده (د) شار القاشده..... ۱۰۳
- شکل ۱۷-۵: مدل B-H فولاد M530-50A به‌دست‌آمده از Flux..... ۱۰۴
- شکل ۱۸-۵: مقایسه نتایج شبیه‌سازی و کاتالوگ محصول تک ورق M530-50 A..... ۱۰۴
- شکل ۱۹-۵: مدل بزرگنمایی شده سه‌بعدی اپستین..... ۱۰۵
- شکل ۲۰-۵: (الف) توزیع چگالی شار (ب) توزیع شدت میدان مغناطیسی..... ۱۰۶
- شکل ۲۱-۵: (الف) جریان کشیده شده از منبع (ب) جریان هسته ترانس (ج) جریان مغناطیس‌کنندگی (د) جریان در ثانویه ترانس (شرایط مدارباز)..... ۱۰۷
- شکل ۲۲-۵: (الف) ولتاژ دو سر اپستین (ب) شار سیم‌پیچ اولیه (ج) ولتاژ القاشده (د) شار القاشده..... ۱۰۸

- شکل ۲۳-۵: حلقه هیستریزیس فولاد M530-50A-50Hz به کاررفته در فریم اپستین به دست آمده با استفاده از Flux..... ۱۰۹
- شکل ۲۴-۵: مقایسه نتایج شبیه سازی و کاتالوگ محصول قاب اپستین با ورق M530-50 A..... ۱۰۹
- شکل ۲۵-۵: (الف) منحنی تلفات داده شده در کاتالوگ (ب) ضرایب تلفات به دست آمده (ج) تطبیق منحنی تلفات با مدل به دست آمده..... ۱۱۱
- شکل ۲۶-۵: (الف) منحنی تلفات داده شده در کاتالوگ (ب) ضرایب تلفات به دست آمده (ج) تطبیق منحنی تلفات با مدل به دست آمده..... ۱۱۲
- شکل ۲۷-۵: تحلیل فوریه ولتاژ دو سر سیم پیچ اولیه..... ۱۱۵
- شکل ۲۸-۵: ضرایب طراحی هسته تروئید..... ۱۱۵
- شکل ۲۹-۵: نرخ توزیع غیریکنواخت چگالی شار مغناطیسی..... ۱۱۶
- شکل ۳۰-۵: توزیع شدت میدان مغناطیسی بر سطح تروئید..... ۱۱۶
- شکل ۱-۶: بلوک دیاگرام سوئیچینگ یا PWM یک تقویت کننده کلاس D..... ۱۲۱
- شکل ۲-۶: طبقه بندی اینورتر چند سطحی..... ۱۲۲
- شکل ۳-۶: شکل موج های خروجی اینورتر..... ۱۲۲
- شکل ۴-۶: شکل موج پله ای کلی مبدل های چند سطحی..... ۱۲۲
- شکل ۵-۶: اینورتر ۵ سطحی CHB [۵۱]..... ۱۲۳
- شکل ۶-۶: اینورتر سه سطحی کلمپ دیودی..... ۱۲۶
- شکل ۷-۶: اینورتر سه سطحی خازن شناور..... ۱۲۶
- شکل ۸-۶: دسته بندی تکنیک های مدولاسیون..... ۱۲۸
- شکل ۹-۶: روش PWM با آرایش فاز (PD-PWM) [۵۳]..... ۱۲۸
- شکل ۱۰-۶: روش PWM با آرایش فاز مخالف (POD-PWM) [۵۳]..... ۱۲۹
- شکل ۱۱-۶: روش PWM با آرایش فاز مخالف جایگزین (APOD-PWM) [۵۳]..... ۱۲۹
- شکل ۱۲-۶: نمایی از پیاده سازی اینورتر ۲۱ سطحی شامل ۱۰ ماژول CHB در نرم افزار متلب..... ۱۳۱
- شکل ۱۳-۶: پیاده سازی بلوک دیاگرام تولید پالس گیت مبدل های تمام پل با روش PD-PWM..... ۱۳۲
- شکل ۱۴-۶: شکل موج ولتاژ خروجی اینورتر در فرکانس ۵۰ Hz، (الف): بدون فیلتر مرتبه اول؛ (ب): با فیلتر مرتبه اول..... ۱۳۲
- شکل ۱۵-۶: اعوجاج هارمونیک کل در شکل موج ولتاژ خروجی اینورتر ۲۱ سطحی..... ۱۳۳

- شکل ۱۶-۶: شکل موج ولتاژ خروجی اینورتر در شاخص مدولاسیون ۶، (الف): بدون فیلتر مرتبه اول؛
 (ب): با فیلتر مرتبه ۱۳۳
- شکل ۱۷-۶: اعوجاج هارمونیک کل در شکل موج ولتاژ خروجی اینورتر ۲۱ سطحی با شاخص مدولاسیون ۶ ۱۳۴
- شکل ۱۸-۶: شکل موج ولتاژ خروجی اینورتر در شاخص مدولاسیون ۱۰ و فرکانس ۴۰۰ Hz، (الف): بدون فیلتر مرتبه اول؛ (ب): با فیلتر مرتبه ۱۳۴
- شکل ۱۹-۶: اعوجاج هارمونیک کل در شکل موج ولتاژ خروجی اینورتر ۲۱ سطحی با فرکانس ۴۰۰ هرتز ۱۳۵
- شکل ۲۰-۶: منحنی تغییرات توان عبوری از بار بر حسب تغییر امپدانس بار اینورتر ۲۱ سطحی ۱۳۵
- شکل ۲۱-۶: منحنی تغییرات توان عبوری از بار بر حسب تغییر بار مقاومتی در اینورتر ۲۱ سطحی ۱۳۶
- شکل ۲۲-۶: مبدل ACHB تکفاز ۱۳۷
- شکل ۲۳-۶: شکلموج مرجع و موجهای حامل در ربع سیکل برای (الف) یک مبدل دودوئی، (ب) مبدل سهسهئی و (ج) مقایسه موج مرجع با موجهای حامل ۱۳۸
- شکل ۲۴-۶: تولید پالسهای کلیدزنی برای مبدل دودوئی هفتسطحی ۱۳۹
- شکل ۲۵-۶: شکلموج هفتسطحی ولتاژ خروجی مبدل دودوئی با $N=2$ ۱۳۹
- شکل ۲۶-۶: تولید پالسهای کلیدزنی برای مبدل سهسهئی ۹ سطحی ۱۴۰
- شکل ۲۷-۶: شکلموج نهسطحی ولتاژ خروجی مبدل سهسهئی با $N=2$ ۱۴۰
- شکل ۲۸-۶: تولید پالسهای کلیدزنی برای مبدل دودوئی ۶۳ سطحی ۱۴۲
- شکل ۲۹-۶: شکلموج ۶۳ سطحی ولتاژ خروجی مبدل دودوئی با $N=63$ ۱۴۳
- شکل ۳۰-۶: شکلموج ۶۳ سطحی ولتاژ خروجی مبدل دودوئی با $N=63$ و فرکانس موج مرجع برابر ۱۰ کیلوهرتز ۱۴۳
- شکل ۳۱-۶: مقایسه THD در روشهای مختلف کلیدزنی با تغییر شاخص مدولاسیون ساختار متقارن ۱۴۴
- شکل ۳۲-۶: مقایسه FF در روشهای مختلف کلیدزنی با تغییر شاخص مدولاسیون ساختار متقارن ۱۴۴
- شکل ۳۳-۶: مقایسه CF در روشهای مختلف کلیدزنی با تغییر شاخص مدولاسیون ساختار متقارن ۱۴۴
- شکل ۳۴-۶: مقایسه THD در روشهای مختلف کلیدزنی با تغییر فرکانس در ساختارهای متقارن و نامتقارن ۱۴۵
- شکل ۳۵-۶: مقایسه FF در روشهای مختلف کلیدزنی با تغییر فرکانس در ساختارهای متقارن و نامتقارن ۱۴۵

- شکل ۳۶-۶: مقایسه شاخص CF در روش‌های مختلف کلیدزنی با تغییر فرکانس در ساختارهای متقارن و نامتقارن ۱۴۵
- شکل ۱-۷: طراحی مفهومی دستگاه B-H متر ۱۴۹
- شکل ۲-۷: برد Xilinx FPGA Spartan 6 مورد استفاده در بخش تقویت کننده توان ۱۵۰
- شکل ۳-۷: سنسور LA 55-P شرکت LEM ۱۵۱
- شکل ۴-۷: سنسور ولتاژ ACPL-C87X شرکت Avago ۱۵۲
- شکل ۵-۷: ماده مغناطیسی به شکل پودر یا تروئید ۱۵۴
- شکل ۶-۷: ماده مغناطیسی به شکل تک ورق به همراه یوغ ۱۵۵
- شکل ۷-۷: ماده مغناطیسی به شکل قاب اپستین ۱۵۶
- شکل ۱-۸: منحنی هیستریزس نشان داده شده در کاتالوگ محصول ۱۵۹
- شکل ۲-۸: نحوه سیم پیچی اولیه و ثانویه هسته تروئید ۱۶۰
- شکل ۳-۸: مدار الکتریکی پیاده شده برای به دست آوردن حلقه B-H ۱۶۰
- شکل ۴-۸: شکل جریان اولیه و ولتاژ ثانویه (الف) مشخصه تقریبی B-H ماده T300-26 مورد آزمون (ب) ۱۶۱
- شکل ۵-۸: ساختار کلی فریم اپستین ۱۶۲
- شکل ۶-۸: نقشه ساخت هر کدام از یوغ های جعبه ۱۶۳
- شکل ۷-۸ - نحوه ی اتصال دو یوغ به یکدیگر ۱۶۳
- شکل ۸-۸: لیتز کردن سیم با قطر ۰/۲۵ میلی متر و شارلاک گرفتن سیم پیچها روی یوغ های تفلنی ۱۶۴
- شکل ۹-۸: نحوه قرارگیری سیم پیچ ها در دستگاه اپستین، (ب) مدل اولیه قاب اپستین ۱۶۵
- شکل ۱۰-۸ (الف) نمایی از مدل IEC در ابعاد کوچک تر، (ب) ساختار سیم پیچی ۱۶۶
- شکل ۱۱-۸: دو مدل SST1 و SST2 ارائه شده در ابعاد کوچک ۱۶۷
- شکل ۱۲-۸ (الف) توزیع چگالی شار مغناطیسی (ب) توزیع شدت میدان مغناطیسی ۱۶۸
- شکل ۱۳-۸: نمونه ورق های فرکانس بالای ابتدائی موجود ۱۶۹
- شکل ۱۴-۸: نقشه برش ورق های فرکانس بالا ۱۶۹
- شکل ۱۵-۸: نمونه برش داده شده برای چسباندن ورق های فولاد ۱۷۰
- شکل ۱۶-۸: نمونه برش داده شده برای چسباندن ورق های فولاد ۱۷۰
- شکل ۱۷-۸: قرارگیری ورق های فولاد در قالب U شکل ۱۷۱
- شکل ۱۸-۸: قاب نهایی برای قرارگرفتن در کوره ۱۷۱

- شکل ۱۹-۸- قراردادن قاب در کوره با دمای ۸۰ درجه سانتی گراد..... ۱۷۱
- شکل ۲۰-۸- جعبه قرار گیری نمونه و سیم پیچی آن (الف) نمای جانبی (ب) نمای بالا..... ۱۷۲
- شکل ۲۱-۸- روند ساخت Fixture فریم تک ورق..... ۱۷۳
- شکل ۱-۹- ساختار کلی دستگاه B-H متر..... ۱۷۶
- شکل ۲-۹- نمایی از پیاده سازی اینورتر ۶۳ سطحی شامل ۵ ماژول CHB در سیمولینک مطلب..... ۱۷۷
- شکل ۳-۹- شکلموج ولتاژ خروجی اینورتر ۶۳ سطحی به ازای $ma=1$ ۱۷۷
- شکل ۴-۹- ترانسفورماتور ایزوله ورودی اینورتر چند سطحی..... ۱۷۹
- شکل ۵-۹- یکسوساز KBPC5004 و پکیج مورد استفاده..... ۱۷۹
- شکل ۶-۹- بردهای یکسو ساز مونتاژ شده..... ۱۸۰
- شکل ۷-۹- تست بردهای یکسوساز..... ۱۸۰
- شکل ۸-۹- ولتاژ خروجی و جریان ورودی برد یکسوساز ماژول ۱۲ ولت به ازای جریان ۱۵ آمپر..... ۱۸۱
- شکل ۹-۹- موج ولتاژ و جریان ۴۸ ولت به ازای جریان ۱۵ آمپر..... ۱۸۱
- شکل ۱۰-۹- مونتاژ ماژول های یکسوساز داخل کیس دستگاه..... ۱۸۱
- شکل ۱۱-۹- نقشه مدارات H-Bridge، Driver و تغذیه برای یک ماژول..... ۱۸۲
- شکل ۱۲-۹- نقشه مدار Chopper کاهنده و مدار کنترل ولتاژ شین..... ۱۸۳
- شکل ۱۳-۹- نقشه مدار تشخیص خطا..... ۱۸۳
- شکل ۱۴-۹- نقشه مدار ایزولاتور ولتاژ مرجع ورودی به چاپر باک..... ۱۸۴
- شکل ۱۵-۹- نمایی از پیاده سازی اینورتر بدون بار..... ۱۸۵
- شکل ۱۶-۹- پیاده سازی و تست اولیه مدار کامل اینورتر الف شکل موج ولتاژ و جریان سوئیچ و جریان بار خروجی اینورتر H-Bridge..... ۱۸۵
- شکل ۱۷-۹- نسخه دوم برد اینورتر و چاپر برای یک ماژول..... ۱۸۶
- شکل ۱۸-۹- پیاده سازی و تست مدار تشخیص خطا..... ۱۸۶
- شکل ۱۹-۹- مدار تجمیع شده..... ۱۸۷
- شکل ۲۰-۹- بررسی سیگال ها در مدار تجمیعی..... ۱۸۷
- شکل ۲۱-۹- سیگنال خروجی HCPL3120 و جریان مدار H-Bridge..... ۱۸۸
- شکل ۲۲-۹- ولتاژ خروجی چاپر باک، پالسهای کنترلی، جریان سلف ورودی چاپر..... ۱۸۸
- شکل ۲۳-۹- پاسخ مدار چاپر به ورودی مرجع پله..... ۱۸۸
- شکل ۲۴-۹- مشاهده عملکرد مدار نشخیص خطا قبل و بعد از وقوع خطا..... ۱۸۹

- شکل ۹-۲۵- مشاهده سیگنال خروجی MB3759 و پالس اعمالی به گیت ماسفت قدرت و جریان ورودی چاپر ۱۸۹
- شکل ۹-۲۶- هسته پودر آهن 52-material و نتیجه محاسبات در نرم افزار Micro Metals ۱۹۰
- شکل ۹-۲۷- تاباندن سیم های مسی عایق داز جهت تهیظ سیم لیتز ۱۹۱
- شکل ۹-۲۸- ساخت سلف هسته پود آهن مورد استاده در چاپر باک ۱۹۱
- شکل ۹-۲۹- شارلاک گیری سلفها ۱۹۲
- شکل ۹-۳۰- اندازه گیری مقادیر پارامترهای سلف های ساخته شده ۱۹۲
- شکل ۹-۳۱- نصب مقره ها و نصب سلف ها روی آن ۱۹۳
- شکل ۹-۳۲- خروجی های تست مدار H-Bridge نسخه دوم ۱۹۴
- شکل ۹-۳۳- شماتیک مدار تغذیه ۱۹۵
- شکل ۹-۳۴- PCB مدار تغذیه ماژول آمپلی فایر ۱۹۶
- شکل ۹-۳۵- شماتیک مدار H-Bridge ۱۹۷
- شکل ۹-۳۶- PCB مدار H-Bridge ۱۹۷
- شکل ۹-۳۷- شماتیک مدار چاپر ۱۹۸
- شکل ۹-۳۸- PCB مدار چاپر ۱۹۸
- شکل ۹-۳۹- شماتیک مدار رابط FPGA ۱۹۹
- شکل ۹-۴۰- PCB مدار رابط FPGA ۲۰۰
- شکل ۹-۴۱- PCB مدار خازنی چاپر ۲۰۱
- شکل ۹-۴۲- برد مونتاژ شده تغذیه به همراه ترانس ۲۰۱
- شکل ۹-۴۳- برد مونتاژ شده مدار اینورتر ۲۰۲
- شکل ۹-۴۴- برد مونتاژ شده مدار چاپر ۲۰۲
- شکل ۹-۴۵- برد مونتاژ شده مدار خازن ها ۲۰۳
- شکل ۹-۴۶- برد مونتاژ شده مدار رابط FPGA ۲۰۳
- شکل ۹-۴۷- نمایی از تمامی بردهای مونتاژ شده ۲۰۳
- شکل ۹-۴۸- تست مدار تغذیه و مدار رابط FPGA ۲۰۴
- شکل ۹-۴۹- تست مدار چاپر و اینورتر ۲۰۴
- شکل ۹-۵۰- تست مدار چاپر و اینورتر برای یک ماژول Hbridge ۲۰۵
- شکل ۹-۵۱- کانکتورهای نظامی ۲۰۶

شکل ۹-۵۲- مونتاژ نهایی بخش آمپلی فایر دستگاه B-H متر مبتنی بر اینورتر ۶۳ سطحی CHB نامتقارن.....	۲۰۷
شکل ۹-۵۳- سنسور ولتاژ و جریان سیم پیچ اولیه.....	۲۰۸
شکل ۹-۵۴- سنسور ولتاژ ثانویه.....	۲۰۸
شکل ۹-۵۵- برد Mojo V3 تولید شده توسط شرکت Alchitry (alchitry.com).....	۲۰۹
شکل ۹-۵۶- صفحه اول برنامه Xilinx ISE.....	۲۱۰
شکل ۹-۵۷- ایجاد پروژه جدید در Xilinx ISE.....	۲۱۱
شکل ۹-۵۸- مازول DCM_SP.....	۲۱۲
شکل ۹-۵۹- مازول های CLK_DIVIDER_1 و CLK_DIVIDER_2.....	۲۱۳
شکل ۹-۶۰- روند تغییرات فرکانس خروجی به ازای تقسیم فرکانس ورودی.....	۲۱۴
شکل ۹-۶۱- مازول های CARRIER_1 و CARRIER_2.....	۲۱۵
شکل ۹-۶۲- موج های CARRIER_1 ، CARRIER_2 و SIN.....	۲۱۵
شکل ۹-۶۳- مازول SIN_COUNTER.....	۲۱۶
شکل ۹-۶۴- مازول SIN_GENERATOR.....	۲۱۷
شکل ۹-۶۵- روش تولید موج سینوسی با استفاده از LUT.....	۲۱۷
شکل ۹-۶۶- مازول COMPARATOR.....	۲۱۸
شکل ۹-۶۷- نمای شماتیک کل برنامه تولید کننده پالس PWM.....	۲۱۹
شکل ۹-۶۸- خروجی PWM بدست آمده از شبیه سازی.....	۲۱۹
شکل ۹-۶۹- خروجی PWM سیگنال های PWM_1 مشاهده شده با آسیلوسکوپ به ازای موج سینوسی با فرکانس 20kHz و موج مثلثی 340kHz.....	۲۲۰
شکل ۹-۷۰- خروجی فیلتر شده سیگنال های PWM_1 و PWM_2 و تفاضل سیگنالها به ازای فرکانس موج اصلی 20KHZ.....	۲۲۰
شکل ۹-۷۱- خروجی PWM سیگنال های PWM_1 و PWM_2 به ازای موج سینوسی با فرکانس 20kHz و موج مثلثی 170kHz پس از اعمال فیلتر پایین گذر و تفاضل دو سیگنال از هم.....	۲۲۰
شکل ۹-۷۲- خروجی PWM سیگنال های PWM_1 و PWM_2 به ازای موج سینوسی با فرکانس 10kHz و موج مثلثی 114kHz پس از اعمال فیلتر پایین گذر و تفاضل دو سیگنال از هم.....	۲۲۱
شکل ۹-۷۳- خروجی PWM سیگنال های PWM_1 و PWM_2 به ازای موج سینوسی با فرکانس 100Hz و موج مثلثی 5kHz پس از اعمال فیلتر پایین گذر و تفاضل دو سیگنال از هم.....	۲۲۱

شکل ۹-۷۴ - خروجی PWM سیگنال های PWM_1 و PWM_2 به ازای موج سینوسی با فرکانس 50Hz و موج مثلثی 5kHz پس از اعمال فیلتر پایین گذر و تفاضل دو سیگنال از هم.....	۲۲۱
شکل ۹-۷۵ - خروجی PWM سیگنال های PWM_1 و PWM_2 به ازای موج سینوسی با فرکانس 50Hz و موج مثلثی 5kHz با اندیس مودلاسیون 0.5 پس از اعمال فیلتر پایین گذر و تفاضل دو سیگنال از هم.....	۲۲۲
شکل ۹-۷۶ - الگوی تولید پالس اینورتر چند سطحی.....	۲۲۲
شکل ۹-۷۷ - برد FPGA-Spartan6 مورد استفاده در این پروژه.....	۲۲۲
شکل ۹-۷۸ - ولتاژ خروجی آمپلی فایر به ازای فرکانس ۵۰ هرتز.....	۲۲۳
شکل ۹-۷۹ - ولتاژ خروجی آمپلی فایر به ازای فرکانس ۱۰۰ هرتز.....	۲۲۳
شکل ۹-۸۰ - ولتاژ خروجی آمپلی فایر به ازای فرکانس ۲۰۰ هرتز.....	۲۲۴
شکل ۹-۸۱ - ولتاژ خروجی آمپلی فایر به ازای فرکانس ۴۰۰ هرتز.....	۲۲۴
شکل ۱۰-۱ - نمای کلی طرح شبیه ساز گرافیکی B-H meter.....	۲۲۸
شکل ۱۰-۲ - هسته مورد آزمایش با دو سیم‌پیچی برای آنالیز B-H.....	۲۲۹
شکل ۱۰-۳ - قسمت input data در طرح GUI.....	۲۳۰
شکل ۱۰-۴ - قسمت Geometry calculation در GUI.....	۲۳۱
شکل ۱۰-۵ - قسمت Measurement result در GUI.....	۲۳۲
شکل ۱۰-۶ - حذف اسپایکهای سیگنال ورودی با استفاده از فلتر مدین.....	۲۳۳
شکل ۱۰-۷ - شکل موج جریان قبل و بعد از فیلتر.....	۲۳۴
شکل ۱۰-۸ - شکل موج ولتاژ قبل و بعد از حذف اسپایک.....	۲۳۴
شکل ۱۰-۹ - شکل موج ولتاژ قبل و بعد از فیلتر.....	۲۳۵
شکل ۱۰-۱۰ - نمودار B-H.....	۲۳۷
شکل ۱۰-۱۱ - نحوه محاسبه مساحت حلقه هیستریزیس.....	۲۴۲
شکل ۱۰-۱۲ - حلقه هیستریزیس به ازای جریان های مختلف.....	۲۴۷
شکل ۱۱-۱ - تست هسته تروئید T300-26.....	۲۵۱
شکل ۱۱-۲ - ولتاژ اولیه، جریان اولیه و ولتاژ ثانویه به ازای مقادیر متفاوت جریا های تحریک به ازای فرکانس کلیدزنی 10Khz و فرکانس تحریک ۵۰ هرتز.....	۲۵۲
شکل ۱۱-۳ - حلقه هیستریزیس بدست آمده از نتایج تست هسته پودر آهن به ازای جریات های تحریک مختلف به ازای فرکانس کلیدزنی 10Khz و فرکانس تحریک ۵۰ هرتز.....	۲۵۳

شکل ۴-۱۱- تاثیر افست خروجی سنسور ولتاژ بر خروجی انتگرال گیر نحاسبه شار مدار مغناطیسی... ۲۵۴

شکل ۵-۱۱- ولتاژ اولیه، جریان اولیه و ولتاژ ثانویه به ازای مقادیر متفاوت جریا های تحریک به ازای فرکانس کلیدزنی 20Khz و فرکانس تحریک ۵۰ هرتز..... ۲۵۵

شکل ۶-۱۱- حلقه هیستریزیس بدست آمده از نتایج تست هسته پودر آهن به ازای جریات های تحریک مختلف به ازای فرکانس کلیدزنی 20Khz و فرکانس تحریک ۵۰ هرتز..... ۲۵۶

شکل ۷-۱۱- ولتاژ اولیه، جریان اولیه و ولتاژ ثانویه به ازای مقادیر متفاوت جریا های تحریک به ازای فرکانس کلیدزنی 40Khz و فرکانس تحریک ۵۰ هرتز..... ۲۵۷

شکل ۸-۱۱- حلقه هیستریزیس بدست آمده از نتایج تست هسته پودر آهن به ازای جریات های تحریک مختلف به ازای فرکانس کلیدزنی 40Khz و فرکانس تحریک ۵۰ هرتز..... ۲۵۸

شکل ۹-۱۱- محاسبات GUI برای جریان ۲..... ۲۵۹

شکل ۱۰-۱۱- محاسبات GUI برای جریان ۸..... ۲۵۹

شکل ۱۱-۱۱- محاسبات GUI برای جریان ۱۵..... ۲۶۰

شکل ۱۲-۱۱- مشخصه کاتالوگ حلقه هیستریزیس هسته T300-26..... ۲۶۰

شکل ۱۳-۱۱- مشخصه مغناطیس کنندگی و نفوذ پذیری مغناطیسی و محاسبه تابع B بر حسب H و نفوذ پذیری مغناطیسی هسته..... ۲۶۱

شکل ۱۴-۱۱- تست ورق مغناطیسی M530-50 با استفاده از فریم اپشتین..... ۲۶۱

شکل ۱۵-۱۱- مشخصه حلقه هیستریزیس ورق M530-50 A در چگالی شار 1 تسلا..... ۲۶۲

شکل ۱۶-۱۱- ولتاژ اولیه، جریان اولیه و ولتاژ ثانویه تست فریم اپشتین به ازای مقادیر متفاوت جریا های تحریک به ازای فرکانس کلیدزنی 20Khz و فرکانس تحریک ۵۰ هرتز و روق M530-50A..... ۲۶۳

شکل ۱۷-۱۱- ولتاژ اولیه، جریان اولیه و ولتاژ ثانویه به ازای مقادیر متفاوت جریا های تحریک به ازای فرکانس کلیدزنی 20Khz و فرکانس تحریک ۵۰ هرتز و روق M530-50A..... ۲۶۴

شکل ۱۸-۱۱- شکل موج اعوجاجی مشخصه BH..... ۲۶۵

شکل ۱۹-۱۱- خروجی برنامه GUI به ازای جریان ۶ آمپر..... ۲۶۵

شکل ۲۰-۱۱- خروجی برنامه GUI به ازای جریان ۲ آمپر..... ۲۶۶

شکل ۲۱-۱۱- مشخصه مغناطیس کنندگی و نفوذ پذیری مغناطیسی و محاسبه تابع B بر حسب H و نفوذ پذیری مغناطیسی هسته..... ۲۶۶

فهرست جداول

عنوان	صفحه
جدول ۱-۱: فاکتورهای تبدیل واحدهای مغناطیسی [۵]	۴
جدول ۱-۲: مقایسه بین مشخصات منگنز روی و نیکل روی	۲۰
جدول ۱-۳: ویژگی‌های مغناطیسی مواد فریت منتخب	۲۱
جدول ۱-۴: مقایسه نفوذپذیری مواد	۲۱
جدول ۲-۱: مقایسه کلی از نظر قابلیت‌های موجود در دستگاه‌های B-H متر ساخته شده توسط شرکت‌های سازنده	۳۴
جدول ۲-۲: معادل فارسی حروف اختصاری	۳۶
جدول ۳-۱: ضرایب مولفه‌های مختلف اندوکتانس نشتی	۴۹
جدول ۵-۱: مشخصات طراحی هسته تروئید	۹۳
جدول ۵-۲: مشخصات طراحی فریم تک ورق	۱۰۰
جدول ۵-۳: مشخصات طراحی فریم اپشتین	۱۰۵
جدول ۵-۴: ضرایب موجود برای محاسبه تلفات هسته	۱۱۰
جدول ۵-۵: ترم‌های مختلف تلفات هسته	۱۱۲
جدول ۵-۶: اندوکتانس‌های نشتی	۱۱۳
جدول ۵-۷: اندوکتانس مغناطیس‌کنندگی	۱۱۳
جدول ۵-۸: تلفات مسی فریم‌ها	۱۱۴
جدول ۵-۹: توان تلف‌شده در بخش‌های مختلف مدار	۱۱۵
جدول ۵-۱۰: مقایسه شرایط شبیه‌سازی	۱۱۵
جدول ۶-۱: الگوی کلیدزنی سوئیچ‌ها و ولتاژ خروجی در یک اینورتر پنج‌سطحی CHB	۱۲۴
جدول ۶-۲: مقایسه سطوح مختلف اینورتر CHB و خروجی ولتاژ	۱۲۴
جدول ۶-۳: مقایسه ساختارهای متقارن و نامتقارن CHB-MLI [52]	۱۲۵
جدول ۶-۴: الگوی کلیدزنی اینورتر چند سطحی کلمپ دیودی	۱۲۵
جدول ۶-۵: الگوریتم کلیدزنی اینورتر سه‌سطحی خازن شناور	۱۲۶
جدول ۶-۶: مقایسه THD انواع روش‌های PWM [۵۳]	۱۲۹
جدول ۶-۷: خروجی مقایسه‌گرهای بین موج مرجع و موجهای حامل بالای محور زمان در مبدلهای دودوئی و سه‌سهئی	۱۳۸

جدول ۸-۶: تولید سطوح ولتاژ مختلف در نیمسیکل مثبت موج مرجع با استفاده از بردار ولتاژ لینکهای	۱۴۱
DC.....	
جدول ۷-۱: مشخصه‌های سنسور LA55-P شرکت LEM.....	۱۵۱
جدول ۷-۲: مشخصه‌های سنسور ولتاژ ACPL-C87X شرکت Avago.....	۱۵۲
جدول ۷-۳: قطعات اصلی مورد استفاده در ساخت دستگاه B-H متر.....	۱۵۳
جدول ۷-۴: مشخصات ماده مغناطیسی مورد آزمایش برای تروئید.....	۱۵۴
جدول ۷-۵: مشخصات ماده مغناطیسی مورد آزمایش برای تک ورق.....	۱۵۵
جدول ۷-۶: مشخصات ماده مغناطیسی مورد آزمایش برای قاب اپستین.....	۱۵۶
جدول ۸-۱: مشخصات هسته تروئید.....	۱۶۰
جدول ۸-۲: مشخصات فریم اپستین.....	۱۶۲
جدول ۸-۳: مشخصات طراحی SST کوچک.....	۱۶۸
جدول ۸-۴: اندازه گیری سیم پیچ اولیه نمونه هسته تروئید.....	۱۷۳
جدول ۸-۵: اندازه گیری سیم پیچ اولیه نمونه فریم SST.....	۱۷۳
جدول ۸-۶: اندازه گیری سیم پیچ اولیه نمونه فریم Epstein.....	۱۷۴
جدول ۹-۱: مشخصات اینورتر ۶۳ سطحی نامتقارن.....	۱۷۸
جدول ۹-۲: مشخصات امپدانس سلف های چاپر.....	۱۹۲
جدول ۹-۳: مقایسه کلی بین زبان VHDL و Verilog.....	۲۰۹
جدول ۹-۴: برخی فرکانس‌های ممکن موج های خروجی (سینوسی و مثلثی).....	۲۱۳

مقدمه

به منظور طراحی بهینه و ساخت ماشین های الکتریکی مطابق با استاندارد های بین المللی، شناسایی مشخصات مواد مغناطیسی مورد استفاده در این زمینه می تواند نقش کلیدی در بهبود کارایی عملکرد ماشین های الکتریکی داشته باشد، بطوریکه تعیین مشخصه های مغناطیسی مورد استفاده در مراحل مختلف توسعه دانش طراحی و ساخت ماشین های الکتریکی نیاز اجتناب ناپذیر طراحان و سازندگان می باشد. بخش اول این گزارش مقدمه ای بر مواد مغناطیسی و مروری بر مشخصه B-H مواد مغناطیسی میباشد. در فصل دوم نمونه های معتبر تجاری این محصول معرفی و مشخصات فنی آنها مورد ارزیابی قرار گرفته است. در ادامه این فصل استاندارد های طراحی دستگاه B-H متر معرفی می گردد. در فصل سوم طراحی مدار مغناطیسی برای هر یک از نمونه های مورد آزمون (هسته تروئید، اپشتین و ورق) بر اساس استاندارد ارائه می گردد. برای هر یک از نمونه ها مراحل محاسبات در برنامه EXCEL بصورت یک بسته نرم افزاری ارائه گردیده است. در فصل چهارم با هدف شبیه سازی دینامیکی دستگاه، مدار معادل مغناطیسی در محیط سیمولینک پیاده سازی می گردد و پس از شبیه سازی نتایج شبیه سازی با نتایج تحلیلی مقایسه می گردد. به منظور صحت سنجی نتایج در فصل پنجم برای هر یک از سه نوع نمونه مورد آزمون مدل اجزاء محدود پیاده سازی گردیده است. تحلیل چگالی شار، ولتاژ القایی، جریان، تلفات، اندوکتانس نشتی و مغناطیس کنندگی بر اساس مدل اجزاء محدود سه بعدی آنالیز گردیده است. در ادامه نتایج محاسبات تحلیلی، شبیه سازی دینامیکی و نتایج اجزاء محدود مقایسه و ارزیابی گردیده است. هدف از آنالیز مدار مغناطیسی استخراج یک الگوریتم محاسباتی جهت طراحی و پیاده سازی هر یک از نمونه های مورد آزمون بوده است که بصورت برنامه EXCEL ارائه گردیده است. یکی از بخشهای کلیدی دستگاه B-H متر بخش منبع تغذیه و آمپلی فایر قدرت می باشد. برای این کاربرد لازم است تا منبع تغذیه قابلیت برنامه ریزی در یک محدوده وسیع از فرکانس و ولتاژ باشد. امپدانس خروجی پایین و THD پایین از جمله مشخصه های مورد نیاز منبع تغذیه می باشد. در فصل ششم طراحی منبع تغذیه و آمپلی فایر مبتنی بر اینورتر چند سطحی و شبیه سازی آن در محیط سیمولینک مطلب ارائه گردیده است. در فصل هفتم بر اساس نتایج شبیه سازی مدار مغناطیسی و آمپلی فایر قدرت المان های مداری و لیست کلیه قطعات جهت ساخت دستگاه ارائه می گردد. در فصل هشتم مراحل ساخت مدارات مغناطیسی مورد نیاز جهت تست مواد مغناطیسی در قالب هسته تروئید، فریم اپشتین و تک ورق ارائه گردیده است. ساخت مدارات مغناطیسی بر اساس استاندارد IEC-60404-6 انجام گرفته است. یکی از اجزاء کلیدی در دستگاه B-H بخش آمپلی فایر آن می باشد. اعمال ولتاژ و جریان تحریک بدون هارمونیک و اعوجاج به مدارات مغناطیسی تاثیر مستقیم بر کیفیت نتایج تست خواهد داشت. بر همین اساس در فصل نهم مراحل مختلف پیاده سازی یک اینورتر ۶۳ سطحی نامتقارن به عنوان منبع تغذیه مورد کاربرد در این دستگاه ارائه گردیده است. در فصل دهم گزارش پیاده سازی محیط نرم افزاری به منظور ذخیره و پردازش داده های گرد آوری شده از تست ها و استخراج مشخصه های خروجی بررسی شده است. در بخش پایانی نتایج تست های انجام شده برای هر یک از سه نمونه هسته تروئید، فریم اپشتین و فریم تک ورق مورد تحلیل و آنالیز قرار گرفته است. در پایان بر اساس نتایج بدست آمده از تست های آزمایشگاهی عملکرد هر یک از نمونه های ساخته شده مورد ارزیابی قرار گرفته است.

فصل اول: مغناطیس، مواد مغناطیسی و مشخصه مغناطیسی

۱-۱- مقدمه

در این فصل ابتدا تاریخچه مغناطیس و قوانین فیزیکی مربوط به آن بررسی شده و پس از آن، اصطلاحات الکترومغناطیسی اغلب استفاده شده با روابط ریاضی مربوط به آن ارائه می‌شود. تجزیه و تحلیل و دسته‌بندی مواد مغناطیسی به همراه کاربرد هریک انجام شده و در نهایت پدیده هیستریزیس و حلقه هیستریزیس توضیح داده می‌شود.

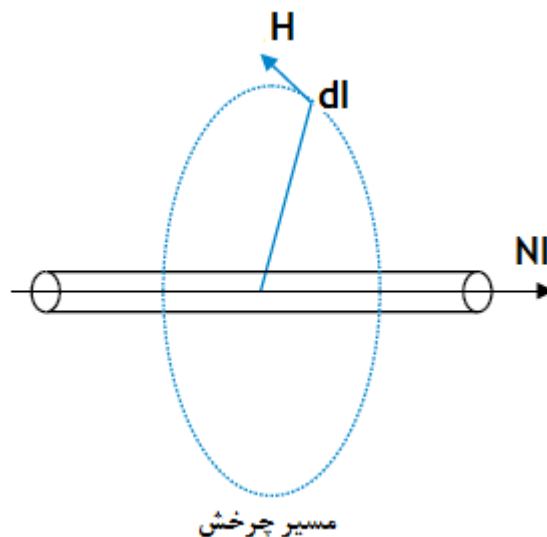
۱-۲- پیشینه تاریخی مغناطیس

مغناطیس یکی از قدیمی‌ترین پدیده‌های فیزیکی است که مشاهده شد و مورد بررسی قرار گرفت. اولین ارجاع به مغناطیس در کتاب چینی Guiguzi در قرن چهارم پیش از میلاد یافت می‌شود: "آهن‌ها آهن را جذب می‌کند [۱]". این کتاب همچنین اشاره کرد که مردم ایالت ژنگ موقعیت جغرافیایی خود را با استفاده از "اشاره گر جنوبی" می‌یابند، که به کاربرد اولیه قطب‌نما بر می‌گردد.

اولین مطالعه علمی مغناطیس توسط ویلیام گیلبرت انجام شد که تصویری واضح از میدان مغناطیسی زمین را شکل داد و حرکت سوزنی مغناطیسی ناشی از این میدان را توصیف کرد [۲]. در سال ۱۸۲۰، هانس کریستین اورستد کشف کرد که جریان الکتریکی ایجاد یک میدان مغناطیسی کرده و سیم را محاصره می‌کند و سرانجام در سال ۱۸۲۶، آمپر یکی از قوانین اساسی مغناطیس را به نام قانون مداری آمپر معرفی کرد که در رابطه (۱-۱) نشان داده شده است [۳].

$$\oint_C H \cdot dl = NI \quad (1-1)$$

رابطه (۱-۱) نشان می‌دهد که شدت میدان مغناطیسی H در یک مدار مغناطیسی بسته C توسط تعدادی از هادی‌های (N) در مدار تولید شده که هر کدام دارای جریان I می‌باشند، همان‌طور که در شکل ۱-۱ نشان داده شده است.



شکل ۱-۱: قانون مداری آمپر

مایکل فرادی در سال ۱۸۳۱ قانون اساسی دیگری از مغناطیس را کشف کرد. او اظهار داشت که تغییر شار مغناطیسی پیوندی φ در یک مدار الکتریکی، یک نیروی محرکه الکتریکی V^1 مطابق با نسبت تغییر این شار مطابق با رابطه (۱-۲) در آن القاء می‌کند.

$$V = -\frac{d\varphi}{dt} \quad (1-2)$$

که اثر القای الکترومغناطیسی نامیده می‌شود. علامت منفی در رابطه (۱-۲) اشاره به قانون لنز دارد که طبق آن، ولتاژ القا شده همیشه در جهت مخالف تغییر شار است. این نظریه در کار "رساله در مورد برق و مغناطیس" منتشر شده در سال ۱۸۷۳ به پایان می‌رسد، جایی که جیمز کلرک ماکسول مجموعه‌ای از ۲۰ معادله را پیشنهاد داده است، که بعدها به مجموعه‌ای از چهار معادلات دیفرانسیل جزئی: آمپر، فارادی و دو گاوس ساده شد [۴]. معادلات ماکسول نشان می‌دهد که چگونه میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی ایجاد شده و با هم تغییر می‌کنند، که اصولی برای همه تحلیل‌های میدان مغناطیسی و الکتریکی است.

۳-۱- روابط الکترومغناطیسی

در یک فضای آزاد، حضور میدان مغناطیسی H در منطقه‌ای به سطح A شار مغناطیسی را مطابق با رابطه (۱-۳) تولید می‌کند.

$$\varphi = \mu_0 H A \quad (1-3)$$

که در آن μ_0 نفوذپذیری فضای آزاد بوده و تقریباً برابر با $\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ می‌باشد. واحدهای φ و H به ترتیب وبر (Wb) و آمپر بر متر (A/m) هستند. چگالی شار مغناطیسی B (T یا تسلا) عموماً بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد که به صورت رابطه (۱-۴) تعریف می‌شود.

$$B = \frac{\varphi}{A} \quad (1-4)$$

از روابط (۱-۳) و (۱-۴)، می‌توان مشاهده کرد که رابطه بین شدت میدان مغناطیسی H و چگالی شار B در فضای آزاد به صورت رابطه (۱-۵) است.

$$B = \mu_0 H \quad (1-5)$$

شدت میدان مغناطیسی H و چگالی شار مغناطیسی B بیشتر به عنوان پارامترهای مغناطیسی استفاده می‌شوند. پارامترهای دیگر، برای مثال نفوذپذیری، تلفات، قطبش و مغناطیس‌شدگی همگی به B و H بستگی دارند. اگر چه سیستم بین‌المللی واحدها (SI)، T و A/m را توصیه می‌کند، بعضی از واحدها مانند G (گوس) و Oe (اورستد) براساس سیستم سانتیمتر-گرم-ثانیه (CGS) هنوز در بسیاری از کشورها به ویژه در ایالات متحده استفاده می‌شود. در فضای آزاد، شدت میدان مغناطیسی $1 Oe$ با چگالی شار مغناطیسی $1 G$ مطابقت دارد. جدول ۱-۱ فاکتورهای تبدیل بین CGS و واحدهای SI را خلاصه می‌کند.

جدول ۱-۱: فاکتورهای تبدیل واحدهای مغناطیسی [۵]

	T	A/m	G	Oe
T	1	7.958×10^5	10^4	10^4
A/m	1.257×10^{-6}	1	1.257×10^{-2}	1.257×10^{-2}
G	10^{-4}	79.58	1	1
Oe	10^{-4}	79.58	1	1

همان‌طور که در جدول ۱-۱ نشان داده شده است، یک حلقه هادی حامل جریان I ، ساده‌ترین مدار برای تولید میدان مغناطیسی است. این حلقه جریان دایره‌ای به عنوان یک دوقطبی مغناطیسی شناخته شده است. در فاصله‌های زیاد از حلقه، میدان تولید شده توسط این حلقه معادل میدان تولید شده توسط قطب‌های مغناطیسی فرضی با قدرت p در فاصله l است. ممان دوقطبی m در چنین آرایه‌ای برابر است با:

$$m = pl \quad (۱-۶)$$

که در رابطه (۱-۶) قدرت دوقطبی p به صورت رابطه (۱-۷) است.

$$p = \frac{\phi}{\mu_0} \quad (۱-۷)$$

بنابراین می‌توان یک کمیت جدید به نام مغناطیس M ، به عنوان ممان مغناطیسی در واحد حجم یک ماده جامد به صورت رابطه (۱-۸) تعریف نمود.

$$M = \frac{m}{\text{volume}} \quad (۱-۸)$$

با ترکیب روابط (۱-۴)، (۱-۶) و (۱-۷) داریم:

$$M = \frac{\phi l}{\mu_0 \text{volume}} = \frac{\phi}{\mu_0 A} = \frac{B}{\mu_0} \quad (۱-۹)$$

از روابط (۱-۵) و (۱-۹)، مشخص می‌شود که چگالی شار مغناطیسی B شامل دو بخش است: یک بخش میدان مغناطیسی در فضای آزاد $\mu_0 H$ ، و دیگری خاصیت مغناطیسی یک ماده $\mu_0 M$. بنابراین، چگالی شار مغناطیسی به عنوان جمع این دو بخش و به صورت رابطه (۱-۱۰) دیده می‌شود:

$$B = \mu_0 (H + M) \quad (۱-۱۰)$$

برای نشان دادن پاسخ مواد مغناطیسی به یک میدان مغناطیسی، از نفوذپذیری استفاده می‌شود که به صورت رابطه (۱-۱۱) تعریف شده است.

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (۱-۱۱)$$

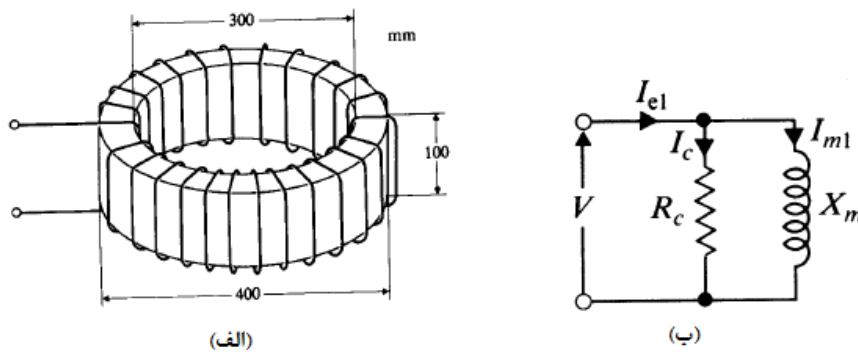
در عمل، از نفوذپذیری نسبی به جای نفوذپذیری مناسب برای حفظ خواص مغناطیسی مواد استفاده می‌شود که به شرح زیر است.

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (۱-۱۲)$$

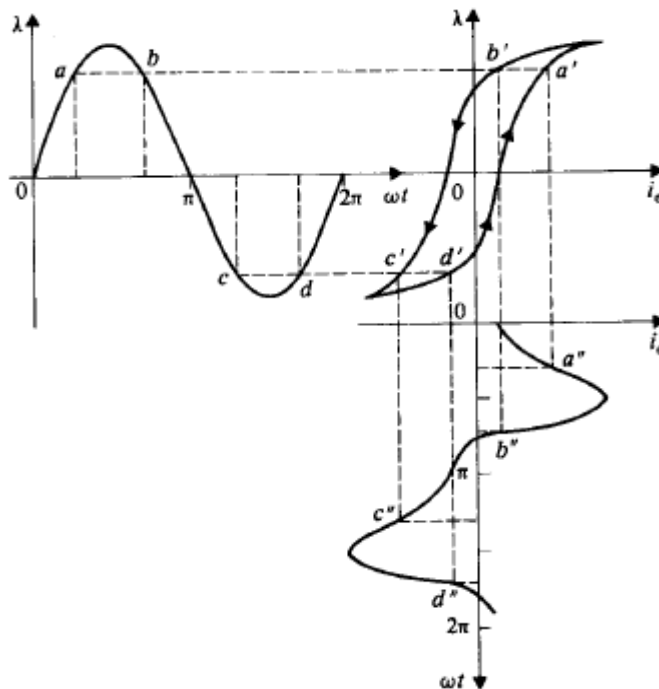
نفوذپذیری نسبی فضای آزاد یک است. در عمل مهندسی، نفوذپذیری نسبی هوا نیز به عنوان واحد مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۱-۳-۱ مدار مغناطیسی

در مدار معادل یک دستگاه الکترومغناطیسی، مدل مداری هسته مغناطیسی یک بخش ضروری است. یک هسته مغناطیسی با سیم‌پیچ یکنواخت با تعداد دور N بر روی آن در شکل ۱-۲-الف) نشان داده شده است.



شکل ۱-۲: هسته مغناطیسی و مدار معادل آن (الف) - هسته مغناطیسی با سیم‌پیچ با تعداد دور N ، (ب) - مدل مداری هسته مغناطیسی [۶]
همان‌طور که در شکل ۱-۳ نشان داده شده است، تحت یک تحریک ولتاژ سینوسی (شار پیوندی)، جریان تحریک متناظر به دلیل رابطه غیرخطی $B-H$ هسته، غیرسینوسی است. هنگامی که تنها مؤلفه اصلی جریان در نظر گرفته می‌شود، رابطه بین فازورهای ولتاژ و جریان می‌تواند با یک مقاومت (مقاومت معادل تلفات هسته) به صورت موازی با یک سلف بدون تلفات (خود القایی سیم‌پیچ) به صورت نشان داده شده در شکل ۱-۲-ب) تعیین شود.



شکل ۱-۳: جریان تحریک متناظر با ولتاژ تحریک سینوسی [۶]

۱-۳-۲ مدل مداری هسته مغناطیسی

یک ساختار ساده که شامل یک سیم‌پیچ حامل جریان با تعداد دور N و یک هسته مغناطیسی با طول متوسط l_c و مقطع عرضی A_c در شکل ۱-۴ نشان داده شده است. نفوذپذیری ماده هسته μ_c است. فرض کنید که اندازه دستگاه و فرکانس عملکرد آن به گونه‌ای است که جریان جابه‌جاشده در معادلات ماکسول نادیده گرفته می‌شود و نفوذپذیری مواد هسته بسیار زیاد است به طوری که تمام شار مغناطیسی به داخل هسته محدود می‌شود. طبق قانون آمپر خواهیم داشت:

$$\oint_C H \cdot dl = \oint_s J \cdot da \quad (۱-۱۳)$$

با توجه به رابطه (۱-۱۴) می‌توان نوشت:

$$H_c l_c = Ni \quad (۱-۱۴)$$

که در آن H_c شدت میدان مغناطیسی در هسته و Ni نیروی مغناطیسی است. شار مغناطیسی عبوری از مقطع این هسته، همان‌طور که در رابطه (۱-۴) بیان شد، از رابطه (۱-۱۵) به دست می‌آید.

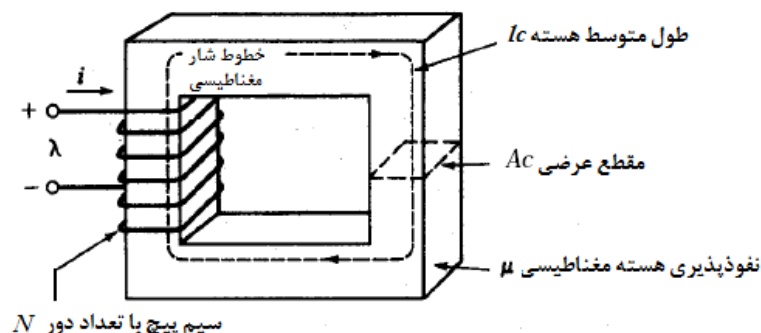
$$\varphi_c = B_c A_c \quad (۱-۱۵)$$

که در آن φ_c شار موجود در هسته و B_c چگالی شار هسته است. معادله ترکیبی ماده هسته نیز همان‌طور که در رابطه (۱-۱۱) نشان داده شد، برابر است با:

$$B_c = \mu H_c \quad (۱-۱۶)$$

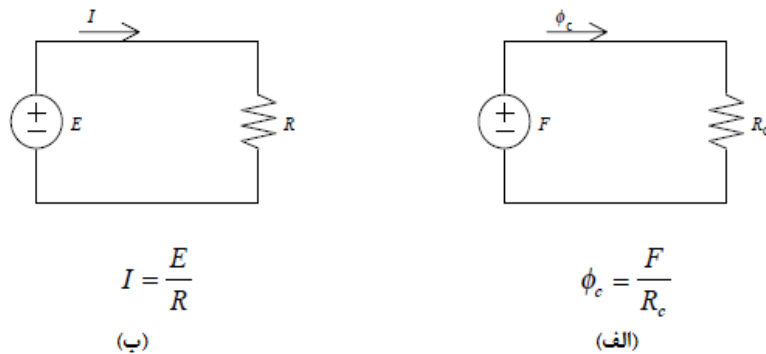
بنابراین،

$$\varphi_c = \frac{Ni}{l_c / (\mu_c A_c)} = \frac{F}{R_c} \quad (۱-۱۷)$$



شکل ۱-۴: یک مدار مغناطیسی ساده [۶]

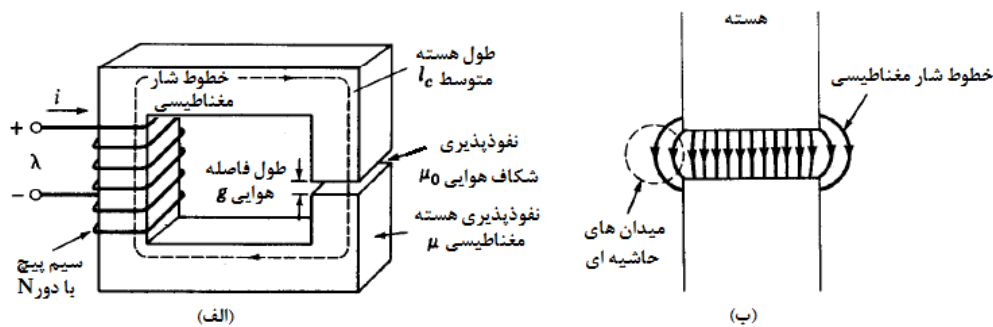
مدار مغناطیسی معادل شکل ۱-۴ در شکل ۱-۵-الف) نشان داده شده است. اگر در مدار مغناطیسی، شار مغناطیسی φ_c را معادل جریان، نیروی محرکه مغناطیسی $F=Ni$ را معادل منبع ولتاژ و $R_c=l_c/(\mu_c A_c)$ (که به عنوان رلوکتانس مغناطیسی شناخته می‌شود) معادل مقاومت در نظر گرفته شود، مدار الکتریکی آن مطابق قانون اهم در شکل ۱-۵-ب) نشان داده شده است.



شکل ۱-۵: مدار معادل مغناطیسی، (الف): مدار مغناطیسی و (ب): مدار الکتریکی

۱-۳-۳ قوانین مدار مغناطیسی

مدار مغناطیسی در بخش قبل با شکاف هوایی به طول l_g که در وسط یک پایه برش‌خورده، در شکل ۱-۶-الف نشان داده شده است. با عبور از شکاف هوایی، خطوط شار مغناطیسی تا حدودی شبیه به خطوط نشان داده شده در شکل ۱-۶-ب ظاهر می‌شوند.



شکل ۱-۶: مدار مغناطیسی ساده با فاصله هوایی [۶]

اثر میدان حاشیه‌ای همان‌طور که شکل ۱-۶-ب نشان می‌دهد، افزایش سطح مقطع مؤثر A_g شکاف هوایی است. با قانون آمپر، می‌توان رابطه (۱-۲۹) را نوشت.

$$F = Ni = H_c l_c + H_g l_g \quad (1-18)$$

که در آن:

$$H_c l_c = \frac{B_c}{\mu_c} l_c = \frac{\phi_c}{\mu_c A_c} l_c = \phi_c R_c \quad (1-19)$$

و

$$H_g l_g = \frac{B_g}{\mu_0} l_g = \frac{\phi_g}{\mu_0 A_g} l_g = \phi_g R_g \quad (1-20)$$

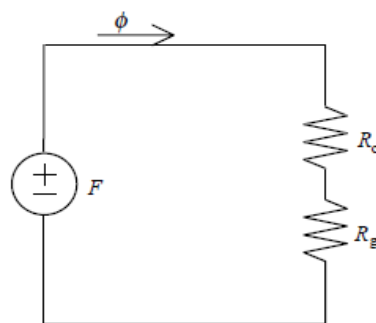
که در روابط (۱-۱۹) و (۱-۲۰)، $\phi_c = \phi_g = \phi$. با توجه به قانون گوس در مغناطیس،

$$\int_s B \cdot da = 0 \quad (۱-۲۱)$$

بنابراین،

$$F = (R_c + R_g) \phi \quad (۱-۲۲)$$

بدین معنی که مدار مغناطیسی بالا با یک شکاف هوایی همانند یک مدار الکتریکی است که در شکل ۷-۱ نشان داده شده است.



شکل ۷-۱: مدار مغناطیسی سری

علاوه بر این، اگر H_{clc} و H_{glg} به عنوان "افت ولتاژ" بر اثر مقاومت هسته و شکاف هوایی در نظر گرفته شود، معادله فوق از قانون آمپر می‌تواند به عنوان یک آنالوگ به قانون ولتاژ کیرشهف (KVL) در نظریه مدار الکتریکی مطابق با رابطه (۱-۲۳) تفسیر شود.

$$\sum R_k \phi_k = \sum F_k \quad (۱-۲۳)$$

برای مدارهای مغناطیسی غیرخطی که در آن منحنی‌های مغناطیسی غیرخطی باید در نظر گرفته شود، رلوکتانس مغناطیسی تابع شار مغناطیسی است، زیرا نفوذپذیری تابع شدت میدان مغناطیسی یا چگالی شار بوده و در این صورت روش‌های عددی یا گرافیکی برای حل مسائل غیرخطی مورد نیاز است.

۴-۱ - انواع مواد مغناطیسی

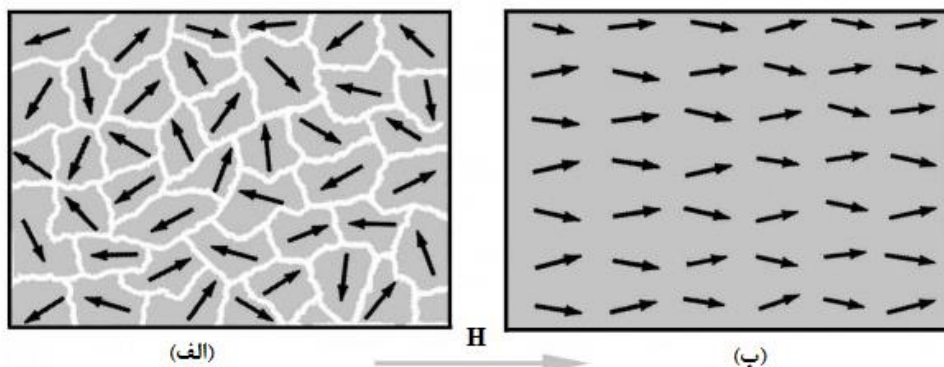
در بخش قبل روابط الکترومغناطیس و نفوذپذیری مغناطیسی شرح داده شد، انواع مواد مغناطیسی براساس مقادیر μ_r طبقه‌بندی می‌شوند که عبارتند از [۷]:

۴-۱-۱ مواد دیا مغناطیس

موادی مانند نقره، طلا و مس دارای نفوذپذیری نسبی کمی کمتر از یک هستند ($\mu_r < 1$) که این مواد، مواد دیا مغناطیس نامگذاری شده‌اند. مولکول‌ها، اتم‌ها و یا یون‌های این مواد به گونه‌ای رفتار می‌کنند که گشتاور مغناطیسی خالص آنها صفر است. اگر میدان مغناطیسی خارجی به این مواد اعمال شود، اتم‌های این مواد دارای گشتاور مغناطیسی القایی شده و جهت این گشتاور مغناطیسی خلاف جهت میدان اعمالی می‌باشد. این دسته از مواد اگر در میدان مغناطیسی قرار گیرند، مغناطش منفی از خود نشان می‌دهند، یعنی یک میدان مغناطیسی القایی در جهت مخالف ایجاد شده و توسط این میدان دفع می‌شود. کلبه‌ی موادی که فاقد الکترون فرد باشند، دیا مغناطیس هستند.

۱-۴-۲ مواد فرو مغناطیس

اگر مقدار μ_r یک ماده خیلی بیشتر از یک (بالای ۱۰۰۰) باشد، آن ماده، فرومغناطیس نامگذاری می‌شود. در این مواد بردارهای گشتاورهای مغناطیسی مجاور از نظر اندازه برابر هستند و تمایل دارند که با یکدیگر هم جهت شوند. مواد فرو مغناطیسی مثل آهن، کبالت، نیکل و فولاد از مواد مغناطیس دائمی به نام "حوزه‌ها" تشکیل می‌شوند. هنگامی که این مواد در معرض میدان مغناطیسی نیستند، قطب‌های این حوزه‌ها در همه جهتی مطابق شکل ۸-۱- (الف) قرار گرفته‌اند و هیچ‌گونه مغناطیس‌شدگی در آن قابل مشاهده نیست. چنانچه این مواد تحت فشار نیروی مغناطیسی خارجی قرار گیرند، قطب‌های این حوزه‌ها در یک خط قرار گرفته و در حالت مغناطیس‌شدگی کامل، همان‌طور که شکل ۸-۱- (ب) نشان می‌دهد، تمام قطب‌ها در یک جهت قرار می‌گیرند.



شکل ۸-۱: (الف) - قسمتی از یک ماده مغناطیسی که مغناطیس نشده و قطب‌های مغناطیسی در آن جهت‌گیری نشده است، (ب) - قطب‌های مغناطیسی جهت‌گیری شده با نیروی مغناطیسی خارجی (H)

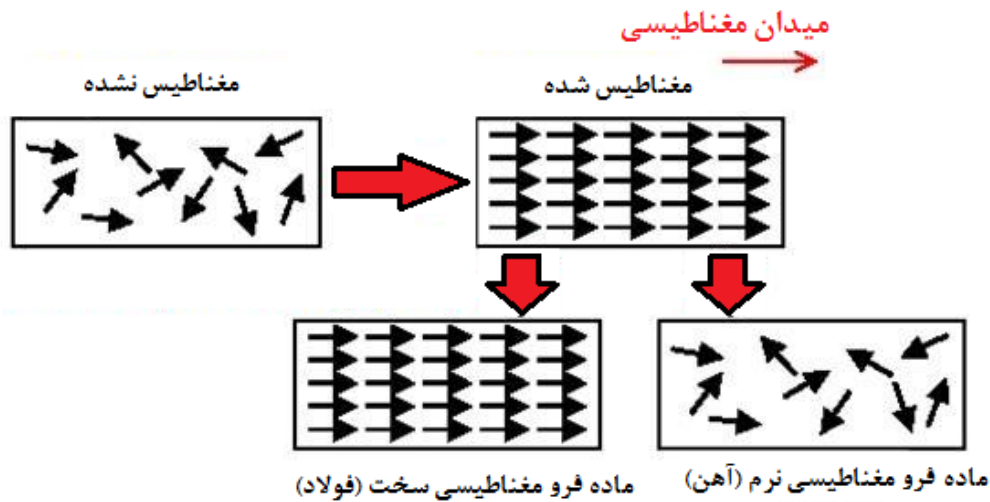
این مواد خود به دو دسته تقسیم می‌شوند:

۱-۴-۲-۱ مواد فرو مغناطیس نرم

فلزات واسطه مثل آهن، کبالت و نیکل در صورتی که خالص باشند، به آسانی آهنربا می‌شوند، ولی به آسانی هم خاصیت آهنربایی خود را از دست می‌دهند. این مواد را فرو مغناطیس نرم می‌نامند. اینگونه مواد در هسته‌های موتور الکتریکی و ترانس بکار می‌روند و چون به راحتی خاصیت مغناطیسی خود را از دست می‌دهند، در ساخت آهنرباهای غیر دائم کاربرد دارند.

۱-۴-۲-۲ مواد فرومغناطیس سخت

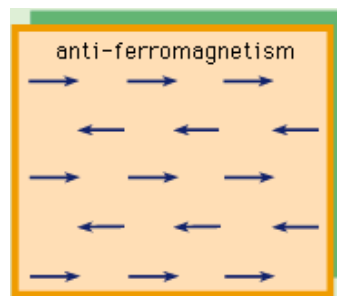
موادی مثل فولاد، به سختی آهنربا می‌شوند و به سختی هم این خاصیت را از دست می‌دهند. اینگونه مواد، فرومغناطیس سخت نامیده می‌شوند. پس از برداشتن میدان مغناطیسی خارجی، ماده فرومغناطیس سخت خاصیت آهنربایی خود را حفظ می‌کند. به همین دلیل برای ساختن آهنرباهای دائمی مناسب هستند. شکل ۹-۱ مواد فرو مغناطیسی نرم و مواد فرو مغناطیسی سخت را در حضور میدان مغناطیسی نشان می‌دهد.



شکل ۹-۱: جهت دوقطبی های مواد فرو مغناطیس سخت و نرم در حضور میدان مغناطیسی

٣-٤-١ مواد آنتی فرو مغناطیس

دسته‌ای دیگر از مواد مغناطیسی به نام آنتی فرو مغناطیس نام‌گذاری می‌شوند. در این مواد بردارهای گشتاورهای مغناطیسی مجاور از نظر اندازه برابر ولی از نظر جهت، عکس یکدیگر هستند. بنابراین یکدیگر را خنثی می‌کنند. در صورتیکه چنین ماده‌ای در میدان مغناطیسی قرار گیرد، گشتاورهای هم‌جهت با میدان تقویت می‌شوند و ماده خاصیت مغناطیسی ضعیفی از خود نشان می‌دهد. شکل ۱۰-۱ ساختار دوقطبی‌های مغناطیسی را در مواد آنتی فرومغناطیس نشان می‌دهد. با افزایش درجه حرارت، خصلت مغناطیسی این مواد افزایش می‌یابد. شکل ۱۱-۱ بعضی از انواع مواد مغناطیسی را در جدول تناوبی عناصر نشان می‌دهد.



شکل ۱۰-۱: دوقطبی‌های مغناطیسی در مواد آنتی فرومغناطیس

H			Para			Dia										He	
Li	Be										B	C	N	O	F	Ne	
Na	Mg										Al	Si	P	S	Cl	A	
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn

شکل ۱۱-۱: دسته‌بندی انواع مواد مغناطیسی، [۷]

شبیه به قانون اهم که مقاومت نسبت ولتاژ به جریان است، مفهوم مقاومت مغناطیسی، به عنوان رلوکتانس R به صورت رابطه (۱-۲۴) تعریف می‌شود.

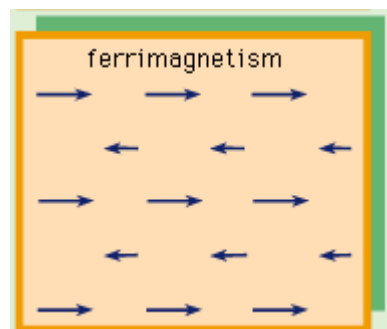
$$R = \frac{F}{\phi} \quad (1-24)$$

که در آن F نیروی محرکه مغناطیسی برابر با NI است. با توجه به روابط (۱-۱)، (۱-۴)، (۱-۱۱) و (۱-۱۲)، مقاومت مغناطیسی یک مدار مغناطیسی حلقه بسته با طول حلقه l_m و مقطع عرضی A از رابطه (۱-۲۵) به دست می‌آید.

$$R = \frac{l_m}{\mu_0 \mu_r A} \quad (1-25)$$

۱-۴-۴ مواد فری مغناطیس

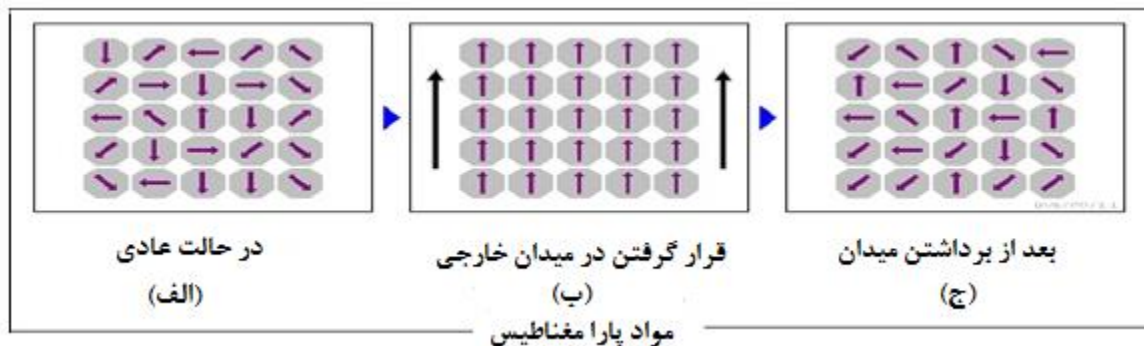
همان آنتی فرو مغناطیس است، با این تفاوت که خاصیت مغناطیسی حوزه‌ی آن کاملاً خنثی نشده است. شکل ۱-۱۲ ساختار دوقطبی‌های مغناطیسی را در مواد فری مغناطیس نشان می‌دهد.



شکل ۱-۱۲: دوقطبی‌های مغناطیسی در مواد فری مغناطیس

۱-۴-۵ مواد پارا مغناطیس

اگر مقدار ماده μ_r کمی بیشتر از یک ($\mu_r > 1$) باشد (به عنوان مثال آلومینیوم، ولفرم و پلاتین)، ماده پارا مغناطیس است. در این مواد، حرکت و جنبش دوقطبی‌ها راحت و آسان است و برخلاف مواد دیا مغناطیس، در مولکول‌ها، اتم‌ها و یا یونها گشتاور مغناطیسی کوچکی وجود دارد. شکل ۱-۱۳-الف) جهت‌گیری دوقطبی‌های مغناطیسی را در مواد پارا مغناطیس نشان می‌دهد. همان‌طور که شکل ۱-۱۳-ب) نشان می‌دهد، هنگامی که این مواد در میدان مغناطیسی قرار گیرند، بر دوقطبی‌های آن نیرو وارد شده و تعداد زیادی از آن‌ها در جهت خطوط میدان قرار می‌گیرند. این امر سبب می‌شود که این مواد به یک آهنربای قوی تبدیل شوند. اما چون حرکت و جنبش این دوقطبی‌ها سریع است، با حذف میدان مغناطیسی از این مواد، این دوقطبی‌ها به سرعت از مسیر خطوط خارج و به حالت کاتوره‌ای (بی‌نظم) قبلی که در شکل ۱-۱۳-ج) نشان داده شده است، باز می‌گردند و این مواد در خارج از خطوط میدان به سرعت خاصیت مغناطیسی خود را از دست می‌دهند. بعضی از فلزات قلیایی و یا برخی از فلزات واسطه مانند کروم، تیتانیم، تنگستن و پلاتین دارای خاصیت پارا مغناطیس هستند.



شکل ۱۳-۱: جهت‌گیری حوزه‌های مغناطیسی در مواد پارامغناطیس

۱-۴-۶ مواد ابر پارامغناطیس

یکی از خواص جالب توجه که در نانوذرات عموماً بسیار کوچک و در محدوده ذرات تک حوزه دیده می‌شود، خاصیت ابرپارامغناطیسی یا سوپراپارامغناطیسی است. خواص ابرپارامغناطیس نانو ذرات مستقیماً تحت تاثیر ناهمسانگردی مغناطیسی نانوذرات است (وابستگی خواص مغناطیسی به جهت مرجع ناهمسانگردی مغناطیسی نامیده می‌شود). این ناهمسانگردی به عنوان سدی برای تغییر جهت دوقطبی‌های (ممان) مغناطیسی است. هنگامی که اندازه نانوذرات تا حد آستانه‌ای کاهش می‌یابد، این سد برابر با انرژی فعالسازی گرمایی ($K_B T$) می‌شود. با وجود سد انرژی ناهمسانگردی کوچک، جهت مغناطیسی نانوذرات به راحتی توسط انرژی فعالسازی گرمایی و یا میدان مغناطیسی خارجی تغییر می‌کند. اگر انرژی گرمایی بیشتر از سد انرژی باشد، تمام جهات و دوقطبی‌های مغناطیسی در جهات کاتوره‌ای قرار می‌گیرند. اساساً رفتار کلی نانوذرات مغناطیسی مانند اتمهای پارامغناطیس است، اما ممان مغناطیسی بزرگی دارد. این رفتار ابرپارامغناطیس نامیده می‌شود. در ماده ابرپارامغناطیس، جهت مغناطیسی نانوذرات به جای جهت خاصی، سریعاً در حال تغییر است. همچنین دمایی که سد انرژی ناهمسانگردی مغناطیسی نانوذرات همیشه بر انرژی فعالسازی گرمایی غلبه می‌کند، دمایی بلوکه نامیده می‌شود.

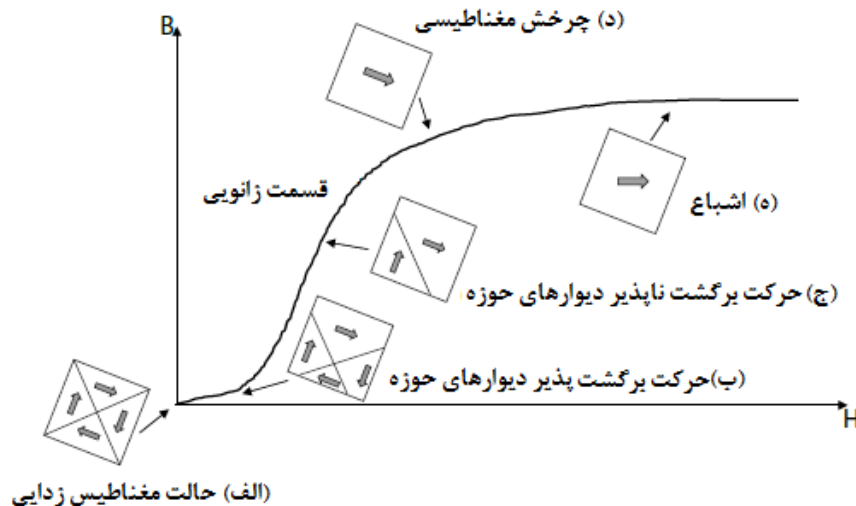
۵-۱- مغناطیس‌شدگی در مواد فرومغناطیس

۱-۵-۱ ساختار حوزه و منحنی مغناطیسی

مواد فرومغناطیسی که تحت هیچ میدان خارجی قرار نگرفته‌اند را می‌توان به تعدادی از نواحی کوچک به نام حوزه تقسیم کرد. هر حوزه خود به خود به مقدار اشباع مغناطیس می‌شود، اما جهت مغناطیسی حوزه‌های مختلف به طور تصادفی توزیع شده است، به طوری که یک نمونه به طور کلی مغناطیس خالصی ندارد. فرآیند مغناطیس کردن تبدیل نمونه از حالت چند دامنه به یک دامنه است که در همان جهت میدان خارجی اعمال شده مغناطیس می‌شود.

منحنی مغناطیسی نشان‌دهنده رابطه بین چگالی شار B و شدت میدان مغناطیسی H است. این منحنی شامل اطلاعات اساسی در مورد یک ماده مغناطیسی است که این اطلاعات معمولاً در کاتالوگ مواد ارائه می‌شود. شماتیک این فرایند در شکل ۱۴-۱ نشان داده شده است. مربع در شکل ۱۴-۱ بخشی از یک کریستال را که در آن چهار حوزه وجود دارد نشان می‌دهد. خط مرزی مشترک موجود برای جداسازی حوزه‌ها، دیوار حوزه است. در حالت تخلیه شده، همان‌طور که در شکل ۱۴-۱ (الف) نشان داده شده است، چهار حوزه مغناطیسی به طور خودبه‌خودی در جهت مخالف هستند، به طوری که خاصیت مغناطیسی خالص این بخش از کریستال صفر است. یک میدان خارجی H در شکل ۱۴-۱ (ب) اعمال شده و باعث رشد حوزه فوقانی با دامنه بیشتر از سایر دیوارهای حوزه شده است. برای یک میدان مغناطیسی کوچک، ماده بدون هیستریزیس به حالت قبلی خود باز می‌گردد، اما با اعمال میدان مغناطیسی بزرگتر، حرکات دیوارهای حوزه غیر قابل بازگشت است، همان‌طور که در شکل ۱۴-۱ (ج) نشان داده شده است. اگر میدان مغناطیسی برداشته شود، ماده به علت موقعیت جدید دیوارهای حوزه، مغناطیس باقی خواهد

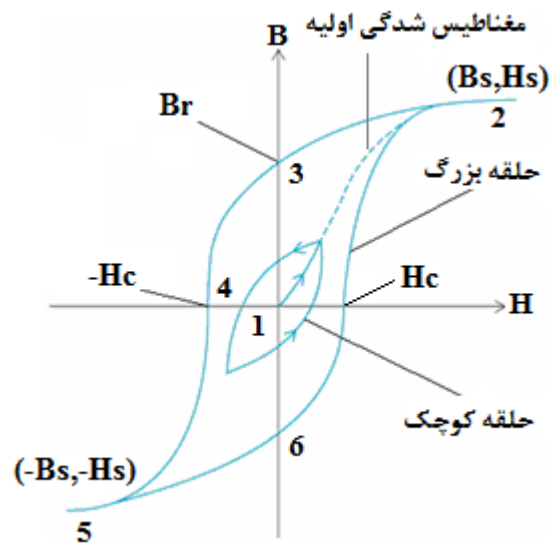
ماند (هیستریزیس ظاهر می‌شود). در شکل ۱۴-۱- (د)، هنگامی که میدان مغناطیسی بیشتر افزایش می‌یابد، دیواره‌ها به سمت راست منطقه مورد نظر حرکت می‌کنند و مغناطیس شدن با چرخش مغناطیسی انجام می‌شود. در نهایت، مغناطیس به جهت موازی با میدان اعمال شده چرخش یافته و ماده کاملاً اشباع می‌شود، همان‌طور که در شکل ۱۴-۱- (ه) نشان داده شده است.



شکل ۱۴-۱: فرایند مغناطیس‌شدگی در یک ماده فرومغناطیس

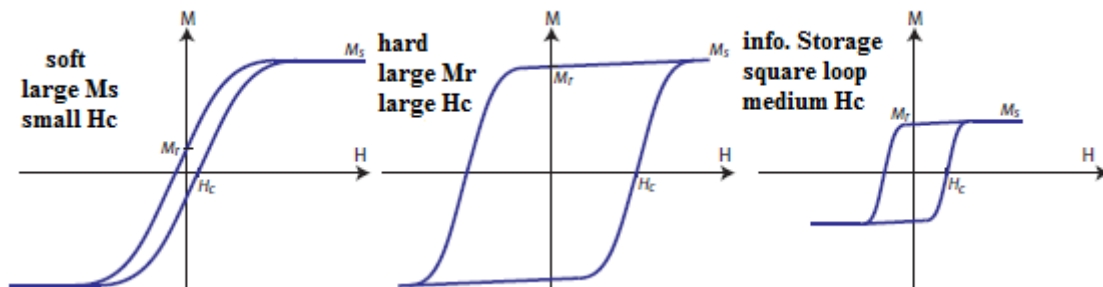
۲-۵-۱ حلقه هیستریزیس

تحت تحریک AC، حلقه هیستریزیس که به عنوان حلقه B-H نیز شناخته می‌شود، برای مواد فرومغناطیسی ظاهر می‌شود. همان‌طور که در شکل ۱۵-۱ نشان داده شده است، با شروع از حالت تخلیه ($B = 0$ و $H = 0$)، منحنی مسیر مغناطیسی اولیه را از ۱ تا ۲ (منحنی خط‌چین) طی می‌کند، در حالی که B از صفر تا نقطه اشباع (B_s, H_s) با افزایش H افزایش می‌یابد. هنگامی که H شروع به کاهش می‌کند، مسیر برگشت با منحنی مغناطیسی اولیه به علت تغییر غیر قابل برگشت مکان دیوارهای حوزه متفاوت خواهد بود. بنابراین، B هنگامی که H به صفر برسد بیشتر از صفر است. این مغناطیس‌شدگی در نقطه ۳ چگالی شار پسماند (B_r) نامیده می‌شود. برای حاصل شدن دوباره مقدار صفر چگالی شار (نقطه ۴)، یک جهت مخالف H باید اعمال شود. این نقطه نیروی وادارندگی^۱ ($-H_c$) نامیده می‌شود. اگر H بطور مداوم در جهت منفی بعد از نقطه‌ی پس ماند زدایی افزایش یابد، به نقطه‌ی ۵ متصل می‌شود. اکنون H به جهت مثبت تغییر می‌کند، مغناطیس‌شدگی به نقطه‌ی شروع ۱ باز نمی‌گردد، اما حلقه را در نقطه ۲ با مسیر ۵-۶-۲ می‌بندد. اگر ماده توسط یک میدان سینوسی H مغناطیس گردد، مغناطیس‌شدگی زیر حلقه ادامه خواهد یافت. با تغییر مقدار پیک H، یک خوشه از حلقه‌های هیستریزیس حاصل می‌شود. با اتصال تمام نقاط این حلقه‌ها، منحنی مغناطیسی AC رسم می‌شود.



شکل ۱۵: حلقه بزرگ و کوچک B-H برای یک ماده فرو مغناطیس

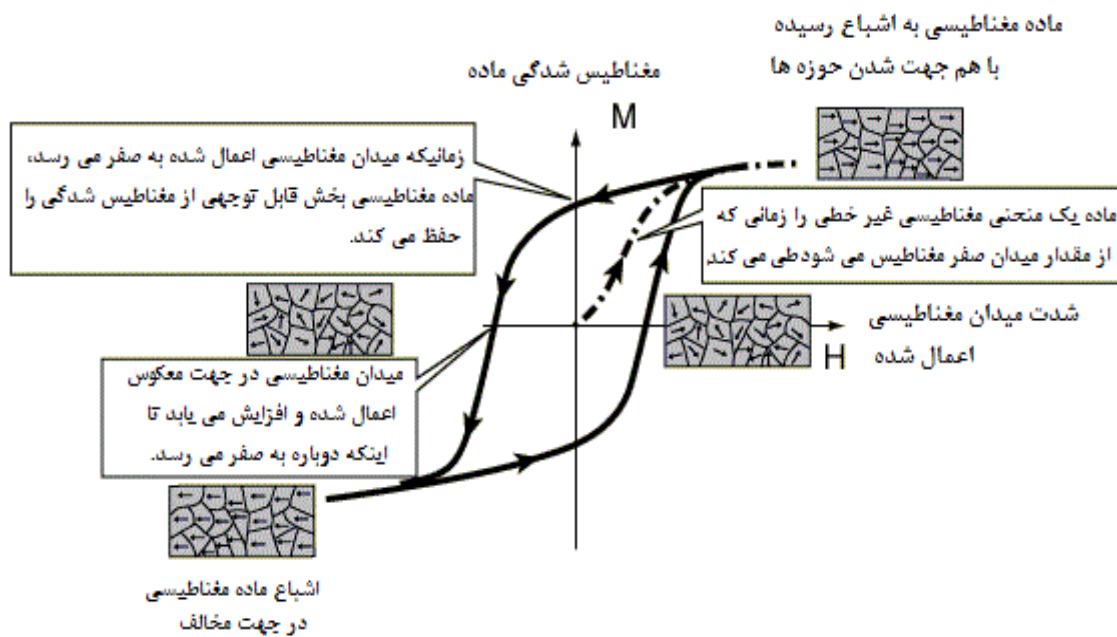
همانگونه که قبلاً ذکر شد، مواد مغناطیسی را می‌توان از نظر سختی در معکوس کردن مغناطیس‌شدگی خود، به عنوان مواد مغناطیسی سخت یا نرم و هر کدام با کاربردهای عملی مهم خودشان طبقه‌بندی کرد. یکی دیگر از کاربردهای بسیار مهم مواد مغناطیسی، در ذخیره‌سازی اطلاعات^۱ است که به برخی از ویژگی‌های مواد سخت و نرم نیاز دارد. هر یک از این‌ها با شکل‌های متفاوت حلقه هیستریزس مشخص شده است، که در شکل ۱۶-۱۷ نشان داده شده است.



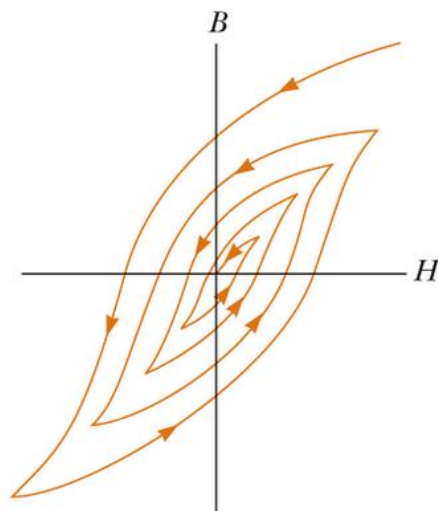
شکل ۱۶-۱۷: انواع حلقه‌های هیستریزس برای مواد مغناطیسی نرم، مواد مغناطیسی سخت استاندارد و مواد مورد استفاده برای ذخیره‌سازی اطلاعات

[۸]

به طور کلی، تشکیل حلقه هیستریزس ناشی از اعمال میدان خارجی به یک ماده فرو مغناطیس و تغییر در ساختار حوزه‌ها در شکل ۱۷-۱۸ نشان داده شده است. پس از آنکه ماده به اشباع مغناطیسی می‌رسد، میدان مغناطیسی صفر شده ولی ماده مغناطیس‌شدگی خود را حفظ می‌کند (این نشان‌دهنده حافظه مغناطیسی این مواد است). شکل ۱۸-۱۷ نیز مسیر منحنی B-H را هنگام مغناطیس‌زدایی یک ماده فرو مغناطیسی سخت نشان می‌دهد.

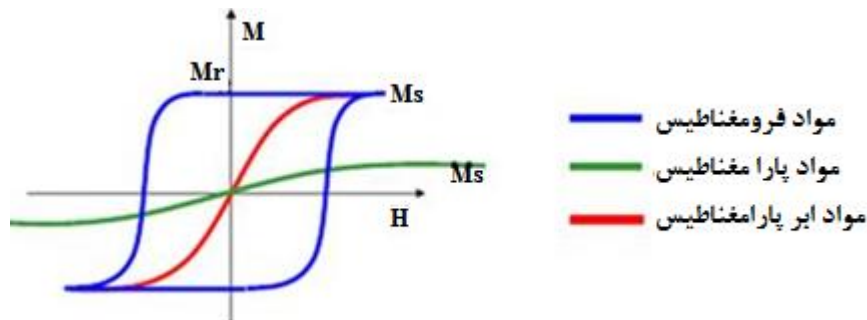


شکل ۱۷-۱: تشکیل حلقه هیستریزیس ناشی از اعمال میدان خارجی به یک ماده فرو مغناطیس و تغییر در ساختار حوزه‌ها



شکل ۱۸-۱: منحنی B-H یک ماده فرو مغناطیس سخت هنگام مغناطیس‌زدایی

یک ماده ابرپارامغناطیس هیچ حلقه هیستریزیس ندارد و میدان وادارندگی آن صفر است. نمودار تغییر وادارندگی و تعداد حوزه‌ها با اندازه ذره و تفاوت نمودار پسماند مواد فرومغناطیس، پارامغناطیس و ابرپارامغناطیس در شکل ۱۹-۱ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود وادارندگی و پسماند مغناطیسی در این مواد صفر است [۹].



شکل ۱۹-۱: تفاوت نمودار پسماند مواد فرومغناطیس، پارامغناطیس و ابرپارامغناطیس [۹]

۳-۵-۱ تلفات انرژی ناشی از مغناطیس‌شدگی

طراحی اجزای مغناطیسی قدرت، مانند ترانسفورماتور و سلف‌ها، نیاز به دانش خاصی در مورد خواص الکتریکی و مغناطیسی مواد مغناطیسی مورد استفاده در این اجزا دارد. عموماً دو خاصیت مغناطیسی dc و ac مورد توجه قرار می‌گیرند. حلقه dc هیستریزس B-H یک راهنمای بسیار مفید برای مقایسه خواص انواع مختلف مواد مغناطیسی است؛ اما مهندسین طراح به مشخصه مغناطیسی ac علاقه‌مند هستند. یکی از مهمترین مشخصه‌های AC تلفات هسته است. تلفات هسته وابسته به نوع، ضخامت، چگالی شار مغناطیسی B_{ac} ، فرکانس f و دمای عملیاتی مواد مغناطیسی است. بنابراین، انتخاب مواد مغناطیسی بر پایه دستیابی به بهترین ویژگی ماده مغناطیسی با استفاده از معیارهای استاندارد مانند هزینه، اندازه و عملکرد است [۶].

انرژی مغناطیسی W_m ، که یک نمونه مغناطیسی را از شرایط اولیه تخلیه‌شده به اشباع می‌آورد، با رابطه (۲۶-۱) محاسبه می‌شود.

$$W_m = \int_0^B H \cdot dB \quad (J \cdot m^{-3}) \quad (1-26)$$

بنابراین سطح بین منحنی مغناطیسی و محور B، اندازه چگالی انرژی است. سطح حلقه B-H میزان انرژی متناسب با محدوده محصورشده است. همان‌طور که میدان مغناطیسی خارجی به دلیل اثرات حرکت دیوار حوزه مغناطیسی با نرخ پایین و به صورت دوره‌ای تغییر می‌کند، رابطه B-H به صورت یک حلقه هیستریزس است. محدوده محصور شده توسط حلقه، تلفات توان است که به عنوان تلفات هیستریزس شناخته می‌شود، و می‌توان آن را با رابطه (۲۷-۱) محاسبه کرد.

$$P_{hyst} = \oint H \cdot dB \quad (J \cdot m^{-3}) \quad (1-27)$$

برای مواد مغناطیسی که عموماً در ساختار ماشین‌های الکتریکی مورد استفاده قرار می‌گیرند، رابطه تقریبی (۲۸-۱) موسوم به رابطه اشتینمتز^۱ جهت محاسبه تلفات هیستریزس برقرار است.

$$P_{hyst} = C_h f B_p^n \quad (1.5 < n < 2.5) \quad (W / kg) \quad (1-28)$$

که در آن C_h ثابتی است که به خواص مواد مغناطیسی وابسته است، f فرکانس تحریک، B_p مقدار چگالی شار بیشینه و n ثابت اشتینمتز^۲ است که به صورت تجربی و از روی منحنی هیستریزس B-H مواد به دست می‌آید و معمولاً توسط کارخانه سازنده

1- Steinmetz's Equation

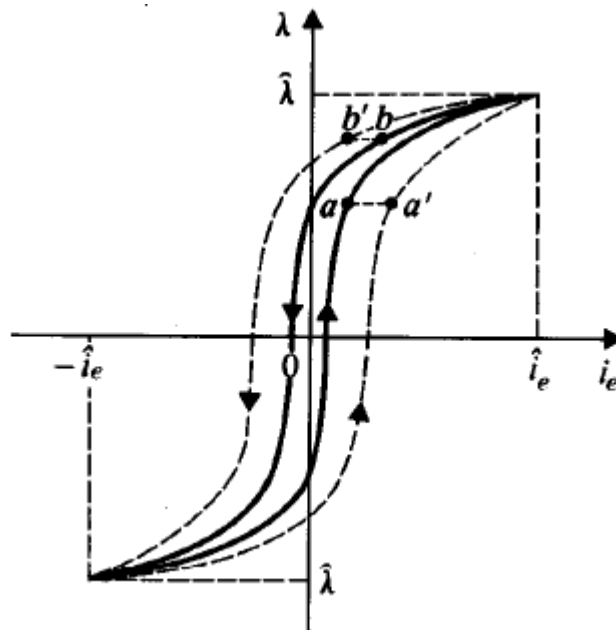
2- Steinmetz's Coefficients

اعلام می‌شود. هرچند فرمول تجربی تلفات هیستریزیس اشتینمتر که در رابطه (۱-۲۸) نشان داده شده است به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد، اما با استفاده از این فرمول، تلفات هیستریزیس با چگالی شار تغییر می‌کند که در کاربرد آن مشکلاتی را به همراه دارد [۱۰].

هنگامی که میدان تحریک توسط قانون فارادی به سرعت تغییر می‌کند، یک نیروی محرکه الکتریکی (EMF) و از این رو جریانی در هادی متصل به میدان القا می‌شود. از آنجایی که اکثر مواد فرو مغناطیسی نیز هادی هستند، جریان‌های چرخشی با میدان تحریک متغیر القا می‌شوند، از این رو تلفات توان که به عنوان تلفات جریان گردابی شناخته می‌شود توسط جریان‌های چرخشی القا شده به وجود می‌آید. در نتیجه حلقه B-H یا $\lambda-i$ بر اثر جریان‌های گردابی، همان‌طور که در شکل ۱-۲۰ نشان داده شده است، ضخیم‌تر می‌شود. تحت تحریک مغناطیسی سینوسی، میانگین تلفات جریان گردابی در هسته مغناطیسی می‌تواند به صورت رابطه (۱-۲۹) بیان شود.

$$P_{eddy} = \frac{\pi^2}{6\rho} d^2 (f B_p)^2 \quad (W / kg) \quad (1-29)$$

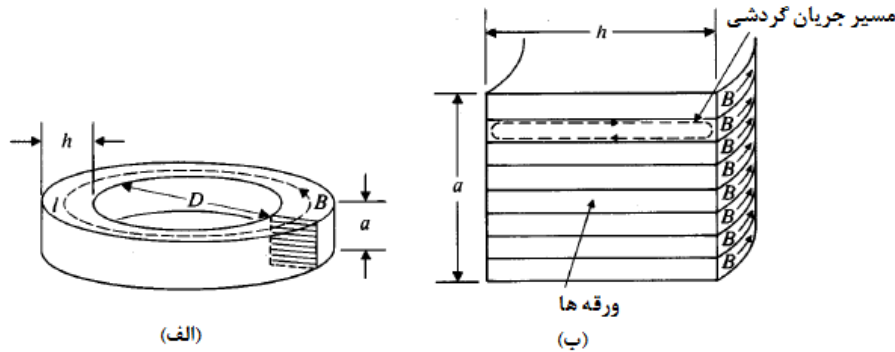
که در آن ρ مقاومت ورقه فولادی و d ضخامت این ورق است.



شکل ۱-۲۰: رابطه بین شار پیوندی و جریان تحریک زمانی که جریان گردابی القا شده است (حلقه خط‌چین)، و هیستریزیس خالص که با تحریک dc حاصل شده است (حلقه خط توپر)

از آنجایی که تلفات جریان گردابی ناشی از جریان‌های چرخشی القایی در یک هسته مغناطیسی است، یک روش مؤثر برای کاهش جریان چرخشی، افزایش مقاومت مواد است که برای مثال می‌تواند با اضافه نمودن کمی سیلیکون (Si) در فولاد حاصل شود. با این حال، سیلیکون بیش از حد باعث شکنندگی فولاد خواهد شد. فولادهای الکتریکی معمولی شامل ۳٪ سیلیکون هستند. یکی دیگر از روش‌های مؤثر و کارآمد برای کاهش جریان گردابی، ورقه ورقه‌سازی فولادهای الکتریکی است. این ورق‌های الکتریکی فولادی همان‌طور که در شکل ۱-۲۱ نشان داده شده است، به‌منظور قطع مسیر جریان گردشی با عایق الکتریکی پوشش داده می‌شوند. رابطه (۱-۲۹) برای تلفات جریان گردابی با توجه به جریان گردشی کل که در شکل ۱-۲۲

(الف) نشان داده شده است، بدست می‌آید. این رابطه برای مواد با وجود حوزه‌های مغناطیسی نادرست است. هنگامی که میدان تحریک تغییر می‌کند، دیوارهای حوزه به ترتیب حرکت می‌کنند و همانطور که در شکل ۲۲-۱ (ب) نشان داده شده است، جریان‌های گردابی محلی توسط نوسانات چگالی شار محلی (ناشی از حرکت دیوار حوزه‌ها) در ماده مغناطیسی القا می‌شوند.



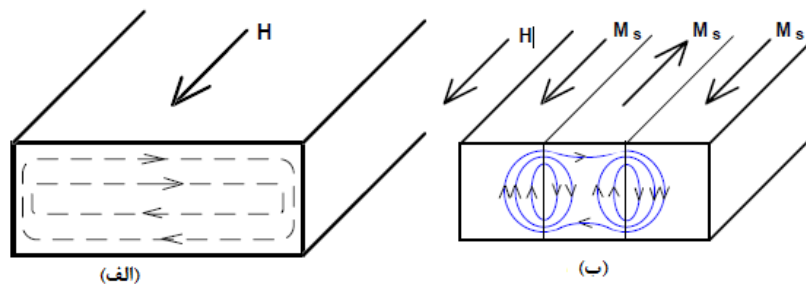
شکل ۲۱-۱: جریان گردابی در یک هسته ورقه‌ای تروئید

به طور کلی، جریان گردابی کل ناشی از جریان‌های گردابی محلی از آنچه که توسط فرمول‌بندی پیش‌بینی می‌شود، بیشتر است. این اختلاف به عنوان تلفات اضافی^۱ شناخته می‌شود که در بعضی از مواد مغناطیسی می‌تواند تا ۵۰٪ تلفات کل هسته آن باشد. تصور می‌شود که تلفات اضافی متناسب با فضای دیوار حوزه و به طور معکوس متناسب با ضخامت ورق باشد [۱۱]. از آنجایی که محاسبه متوسط تلفات جریان گردابی به طور کلی مشکل است، با تجزیه و تحلیل آماری، فرض شده است که برای اکثر مواد مغناطیسی نرم تحت تحریک میدان مغناطیسی سینوسی، تلفات اضافی با رابطه (۳۰-۱) محاسبه می‌شود.

$$P_{ex} = C_{ex} (f B_p)^{3/2} \quad (W / kg) \quad (1-30)$$

که در آن C_{ex} ثابتی است که توسط خواص مواد مغناطیسی تعیین می‌شود. بنابراین، تلفات هسته کل توسط رابطه (۳۱-۱) محاسبه می‌شود.

$$P_{core} = P_{hyst} + P_{eddy} + P_{ex} \quad (1-31)$$



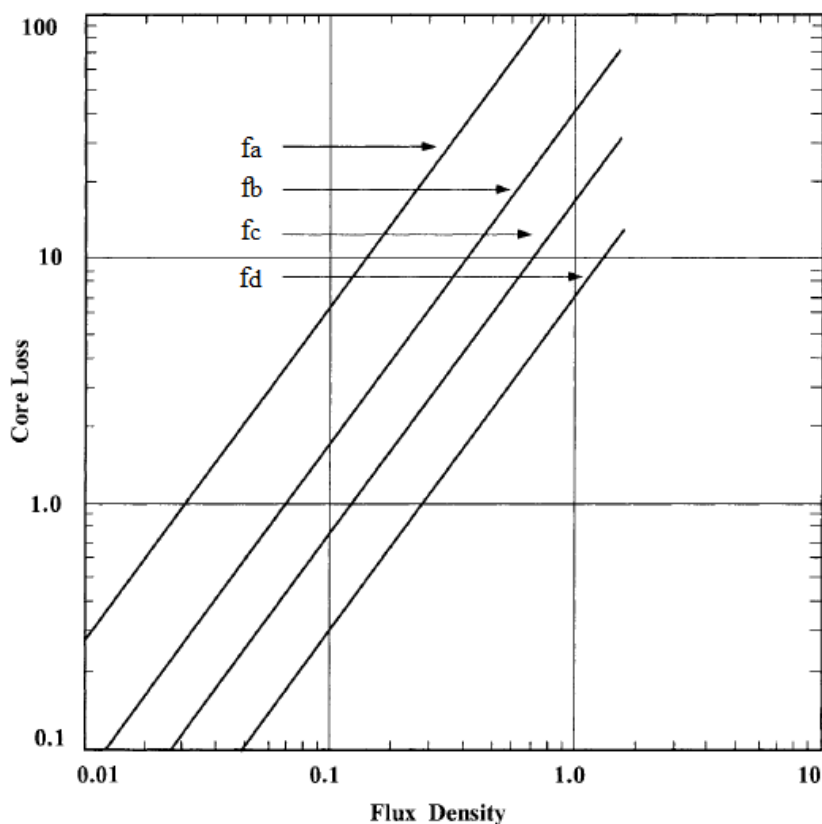
شکل ۲۲-۱: جریان‌های گردابی، (الف) مدل کلاسیک و (ب) مدل حوزه‌ای

شکل ۲۲-۱ تفکیک تلفات جریان گردابی هسته در یک صفحه معمولی و هسته فولاد دارای حوزه‌های مغناطیسی با وجود چگالی شار مغناطیسی T را نشان می‌دهد. علاوه بر این، تحت مغناطیس‌شدگی شبه استاتیکی DC، تنها تلفات هیستریزس

وجود دارد؛ اما تحت مغناطیس‌شدگی AC، حلقه B-H به علت تلفات جریان گردابی کلاسیک و تلفات اضافی، پهن‌تر خواهد شد. در نتیجه، در حالت مغناطیس‌شدگی AC تلفات توان کل بیشتر از تلفات شبه استاتیک (مغناطیس‌شدگی DC) است [۱۲].

۴-۵-۱ تأثیر فرکانس روی تلفات هسته و حلقه هیستریزیس

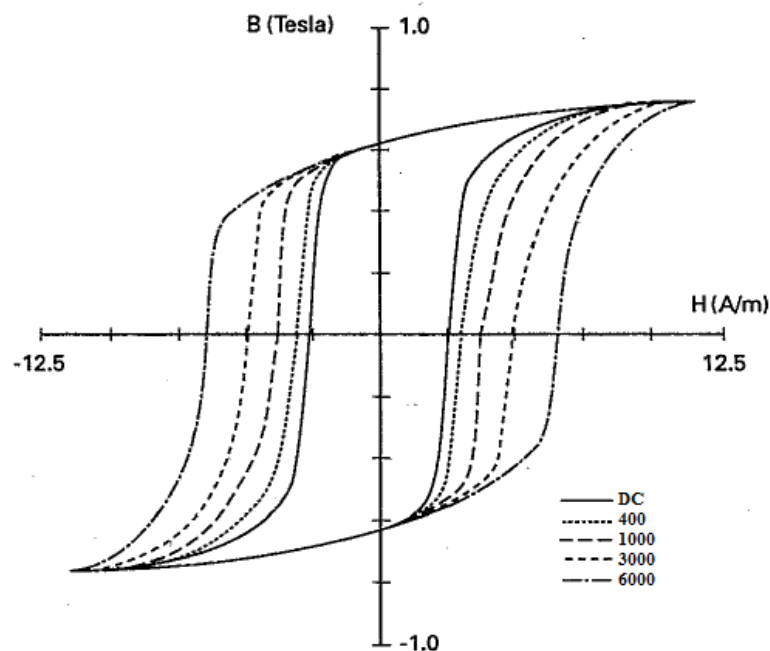
همه تولیدکنندگان از واحدهای مشابه در هنگام توصیف تلفات هسته خود استفاده نمی‌کنند. هنگام مقایسه مقادیر مختلف مغناطیسی، کاربر باید از واحدهای مختلف تلفات هسته آگاه باشد. نمودار گرافیکی تلفات هسته برحسب چگالی شار در فرکانس‌های مختلف ($f_a > f_b > f_c > f_d$) در شکل ۱-۲۳ نشان داده شده است که اطلاعات آن می‌تواند با واحد هرتز یا کیلوهرتز بیان شود. محور عمودی تلفات هسته (واحد آن وات بر پوند، وات بر کیلوگرم، میلی‌وات بر گرم یا میلی‌وات بر سانتی‌متر مربع cm^3) و محور افقی چگالی شار (واحد آن گوس، کیلوگوس، تسلا یا میلی تسلا) است [۶].



شکل ۱-۲۳: نمودار تغییرات تلفات هسته در فرکانس‌های مختلف [۶]

همانطور که شکل ۱-۲۳ نشان می‌دهد و با توجه به روابط (۱-۲۸)، (۱-۲۹) و (۱-۳۰)، در چگالی شار ثابت و با افزایش فرکانس، تلفات هسته و به تبع آن سطح منحنی هیستریزیس B-H افزایش پیدا می‌کند. پرمالوی ۸۰ یک آلیاژ نیکل آهن-مولیبدنیوم بسیار مغناطیسی است که تقریباً ۸۰٪ نیکل و ۱۵٪ آهن و ۵٪ مولیبدنیوم^۲ است. شکل ۱-۲۴ منحنی هیستریزیس DC اندازه‌گیری شده این ماده مغناطیسی را در کنار منحنی مغناطیسی در فرکانس‌های ۴۰۰، ۱۰۰۰، ۳۰۰۰ و ۶۰۰۰ هرتز نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده است، با افزایش فرکانس و به تبع آن افزایش تلفات هسته، پهنای منحنی هیستریزیس بیشتر می‌شود.

1- Permalloy 80
2- molybdenum



شکل ۲۴-۱: منحنی هیستریزیس اندازه‌گیری شده Permalloy 80 در ۴۰۰، ۱۰۰۰، ۳۰۰۰ و ۶۰۰۰ هرتز dc [۱۳]

۵-۱-۵ تأثیر دما روی حلقه هیستریزیس

در این بخش تأثیر افزایش دما روی حلقه هیستریزیس فریت^۱ که به‌عنوان یک ماده مغناطیسی پرکاربرد در صنایع الکترونیک برای ساخت هسته‌های فریتی برای سلف و ترانسفورماتور و در اجزای مختلف میکروویو استفاده می‌شوند، مورد بررسی قرار می‌گیرد. فریت‌ها مواد سرامیکی، مواد همگن هستند که از اکسیدها تشکیل شده‌اند. اکسید آهن عامل اصلی آنها است. فریت نرم را می‌توان به دو دسته عمده تقسیم کرد: منگنز روی (Mn-Zn) و نیکل روی (Ni-Zn). در هر یک از این دسته‌بندی‌ها، تغییر ترکیب شیمیایی یا تکنولوژی تولید، می‌تواند بسیاری از مواد مختلف Mn-Zn و Ni-Zn را تولید کند. دو خانواده از مواد فریت Mn-Zn و Ni-Zn مکمل یکدیگر هستند و اجازه می‌دهد فریت‌های نرم از فرکانس صوتی تا چند صد مگا هرتز استفاده شود. تفاوت اصلی بین منگنز روی و نیکل روی در جدول ۱-۲ نشان داده شده است. بزرگترین تفاوت آنها نفوذپذیری و مقاومت است که منگنز - روی دارای نفوذپذیری بالاتری بوده و نیکل روی دارای مقاومت بیشتری است. جدول ۱-۳ تعدادی از مواد فریت مرسوم که بر اساس نفوذپذیری مغناطیسی آنها دسته‌بندی شده‌اند به‌همراه شکل‌های حلقه B-H مربوطه در دو دمای ۲۵ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد.

جدول ۱-۲: مقایسه بین مشخصات منگنز روی و نیکل روی

مشخصه‌های مواد اولیه فریت					
مواد	نفوذپذیری اولیه μ_i	چگالی شار B_{max} (T)	دمای کوری ^۲ ($^{\circ}\text{C}$)	نیروی وادارندگی H_c , dc (Oe)	مقاومت ($\Omega\text{-cm}$)
منگنز روی	750-15 K	0.3-0.5	100-300	0.04-0.25	10-100
نیکل روی	15-1500	0.3-0.5	150-450	0.3-0.5	10^6

1- ferrite

2- Curie Temperature

فریت‌های نرم منگنز روی رایج‌تر بوده و بسیار کاربردی‌تر از فریت نیکل روی است. فریت منگنز روی در فرکانس کمتر از ۲ مگاهرتز مورد استفاده قرار می‌گیرد. فریت نیکل روی با خاصیت مقاومت بالا نسبت به فریت‌های نرم منگنز روی شناخته می‌شوند. به دلیل مقاومت بالا، این فریت‌ها برای کارکرد در فرکانس‌های ۱-۲ مگاهرتز تا چند صد مگا هرتز انتخاب می‌شوند. همان‌طور که جدول ۴-۱ نشان می‌دهد، نفوذپذیری ماده μ_m هنگامی که ابعاد شکاف نسبتاً بزرگ است، تأثیر کمی بر نفوذپذیری مؤثر μ_e دارد.

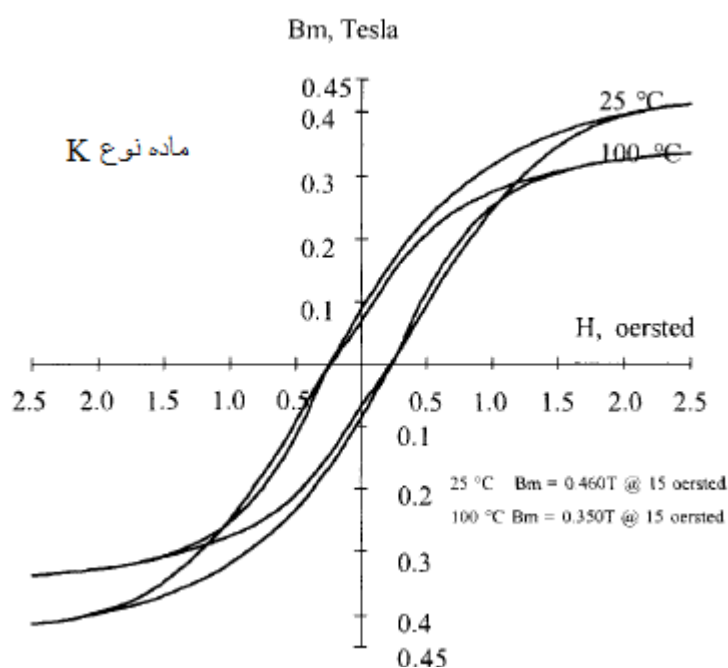
جدول ۳-۱: ویژگی‌های مغناطیسی مواد فریت منتخب

نام ماده مغناطیسی	نفوذپذیری اولیه μ_i	چگالی شار (T)	چگالی شار پسماند (T)	دمای کوری ($^{\circ}\text{C}$)	نیروی وادارندگی (Oe) H_c , dc	چگالی grams/cm^3
K	1500	0.48T	0.08T	>230	0.2	4.7
R	2300	0.50T	0.1 2T	>230	0.18	4.8
P	2500	0.50T	0.1 2T	>230	0.18	4.8
F	5000	0.49T	0.1 OT	>250	0.2	4.8
W	10,000	0.43T	0.07T	>125	0.15	4.8
H	15,000	0.43T	0.07T	>125	0.15	4.8

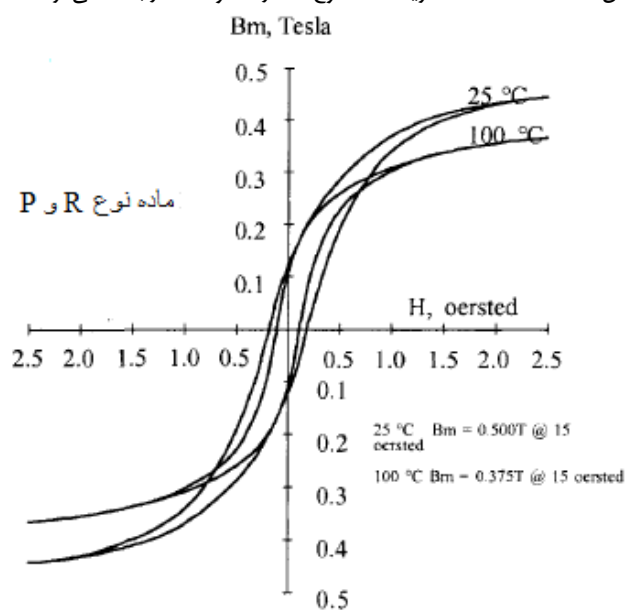
جدول ۴-۱: مقایسه نفوذپذیری مواد

ماده مغناطیسی	μ_m	Gap, inch	Gap, cm	MPL, cm	μ_c
K	1500	0.04	0.101	10.4	96
R	2300	0.04	0.101	10.4	98
P	2500	0.04	0.101	10.4	99
F	3000	0.04	0.101	10.4	100

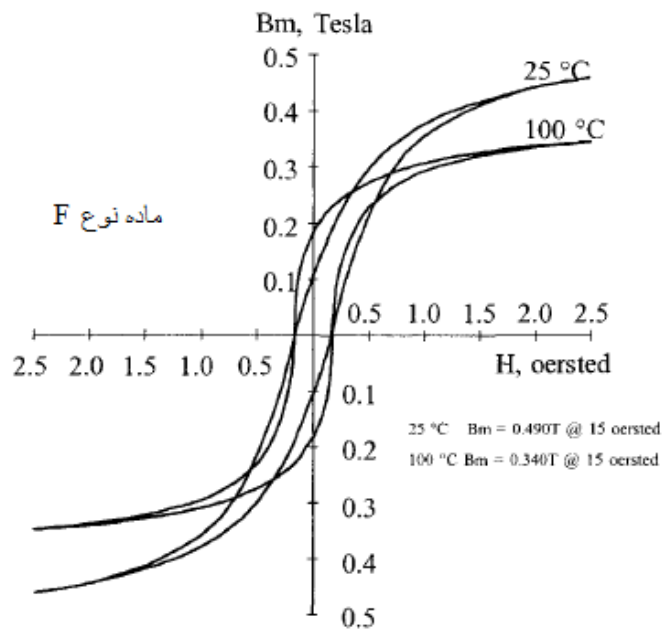
شکل ۲۵-۱، شکل ۲۶-۱، شکل ۲۷-۱ و شکل ۲۸-۱ به ترتیب منحنی‌های مغناطیسی مربوط به ماده‌های مغناطیسی نوع K, R & P, F و H & W را نشان می‌دهند [۶]. همان‌طور که در این شکل‌ها نشان داده شده است، با افزایش دمای مواد فرومغناطیس فریت، نقطه‌ی چگالی شار مغناطیسی بیشینه Bm حلقه هیستریزس در این منحنی‌ها کاهش پیدا می‌کند.



شکل ۲۵-۱: حلقه B-H فریت، ماده نوع K در ۲۵ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد

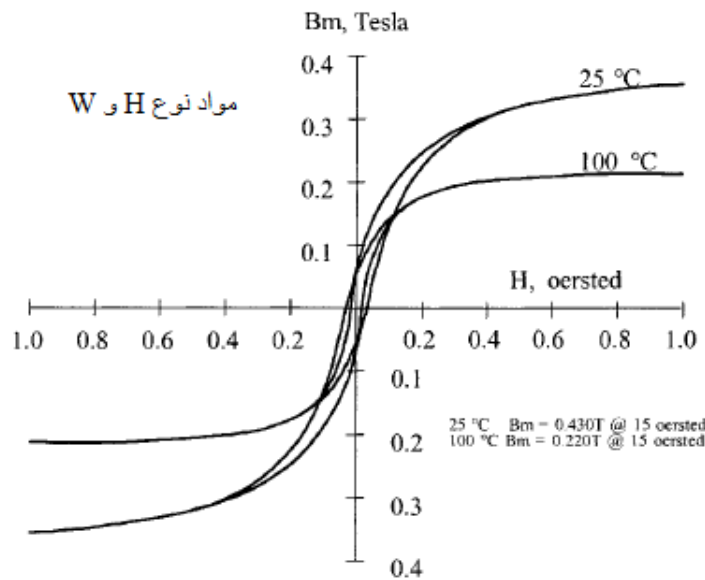


شکل ۲۶-۱: حلقه B-H فریت، ماده نوع R و P در ۲۵ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد



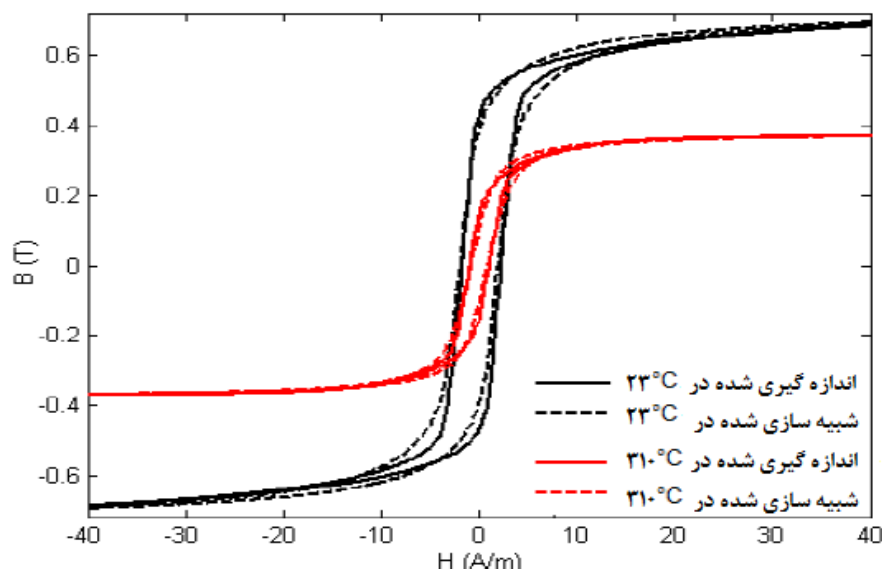
شکل ۲۷-۱: حلقه B-H فریت، ماده نوع F در ۲۵ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد

از آنجایی که فریت‌ها جزء مواد فری‌مغناطیس هستند و گزارش حاضر مربوط به اندازه‌گیری تلفات و منحنی هیستریزیس مواد مغناطیسی نرم می‌باشد، در ادامه به بررسی تأثیر افزایش دما روی مواد مغناطیسی نرم پرداخته می‌شود.



شکل ۲۸-۱: حلقه B-H فریت، ماده نوع W و H در ۲۵ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد

مرجع [۱۴] تأثیر افزایش دما را روی حلقه هیستریزیس ماده نیکل آهن^۱ (با نسبت ۲۰/۸۰) اندازه‌گیری و شبیه‌سازی نموده است. همان‌طور که شکل ۲۹-۱ نشان می‌دهد، در دمای ۳۱۰ درجه سانتی‌گراد نقطه‌ی چگالی شار مغناطیسی بیشینه B_m در منحنی هیستریزیس این ماده مغناطیسی نیز کاهش پیدا می‌کند [۱۴].

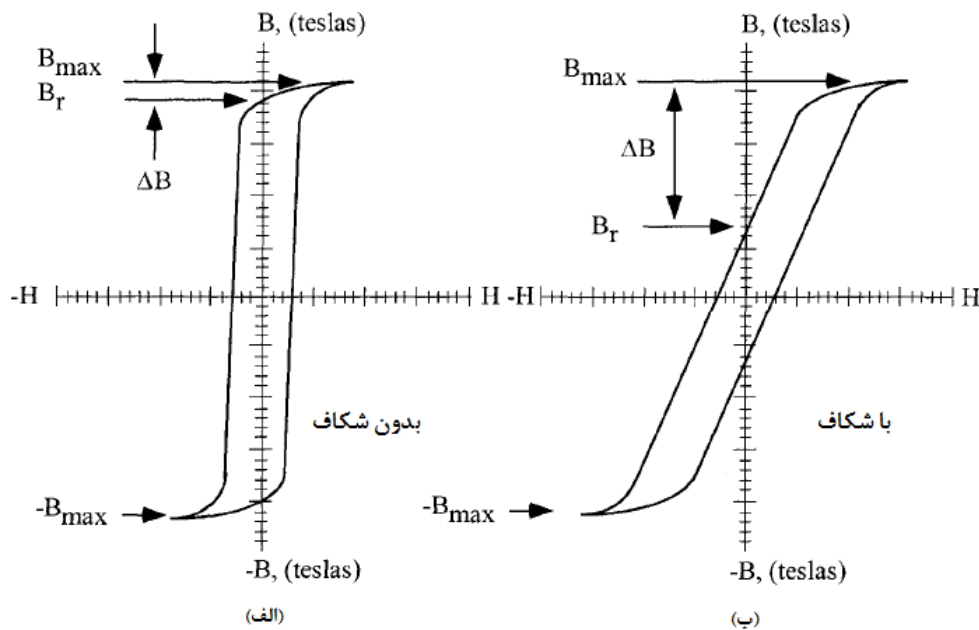


شکل ۲۹-۱: حلقه‌های هیستریزیس اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده ماده NiFe در $T=23^{\circ}\text{C}$ و $T=310^{\circ}\text{C}$ و $f=0.5\text{ Hz}$ [۱۴]

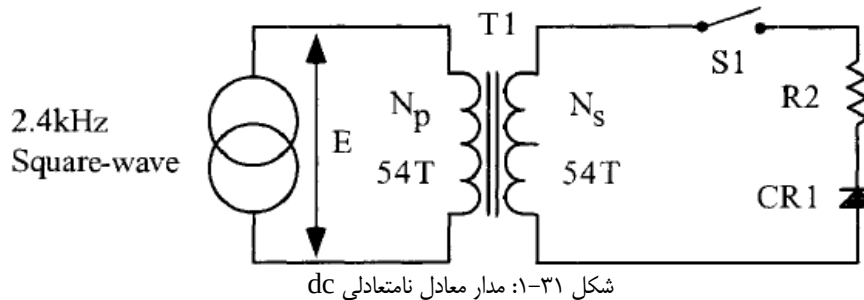
۶-۵-۱ تأثیر فاصله هوایی روی حلقه هیستریزیس

یک شکاف هوایی که به هسته وارد می‌شود، اثر تخلیه‌ای قوی در آن ایجاد می‌کند که منجر به "برش" روی حلقه هیستریزیس و کاهش قابل ملاحظه نفوذپذیری موادی که نفوذپذیری بالا دارند، می‌شود. تحریک جریان مستقیم dc نیز الگویی مشابه آن دارد. با این حال، با وجود شکاف هوایی کم بایاس هسته به میزان قابل توجهی کمتر از مشخصات مغناطیسی تأثیر می‌پذیرد. میزان تأثیر فاصله هوایی نیز به طول مسیر مغناطیسی متوسط و ویژگی‌های هسته (بدون فاصله هوایی) بستگی دارد. در شکاف هوایی یکسان، کاهش نفوذپذیری با مسیر شار مغناطیسی بزرگتر، کمتر است؛ اما در یک هسته با نفوذپذیری بالا و نیروی وادارندگی کم بیشتر مشهود است.

شکل ۳۰-۱ مقایسه‌ای بین حلقه B-H مربوط به یک هسته تروئید با شکاف و بدون شکاف را نشان می‌دهد. شکاف طول مؤثر مسیر مغناطیسی را افزایش می‌دهد. هنگامی که ولتاژ E به سیم‌پیچ اولیه N_p ترانسفورماتور اعمال می‌شود، همان‌طور که در شکل ۳۱-۱ نشان داده شده، جریان منتجه I_m ، به دلیل اینکه مدار به شدت القایی است، کوچک خواهد شد. برای یک اندازه هسته خاص، القاء حداکثر زمانی رخ می‌دهد که فاصله هوایی حداقل باشد.



شکل ۱-۳۰: مقایسه حلقه هیستریزیس مواد مغناطیسی: (الف) بدون شکاف و (ب) با شکاف [۶]



شکل ۱-۳۱: مدار معادل نامتعالی dc

هنگامی که سوئیچ S_1 بسته می‌شود، جریان DC نامتعالی در ثانویه (سیم‌پیچ N_s) جاری می‌شود و هسته در معرض نیروی مغناطیسی dc قرار می‌گیرد و نتیجه یک چگالی شار است که می‌تواند با رابطه (۱-۳۲) بیان شود.

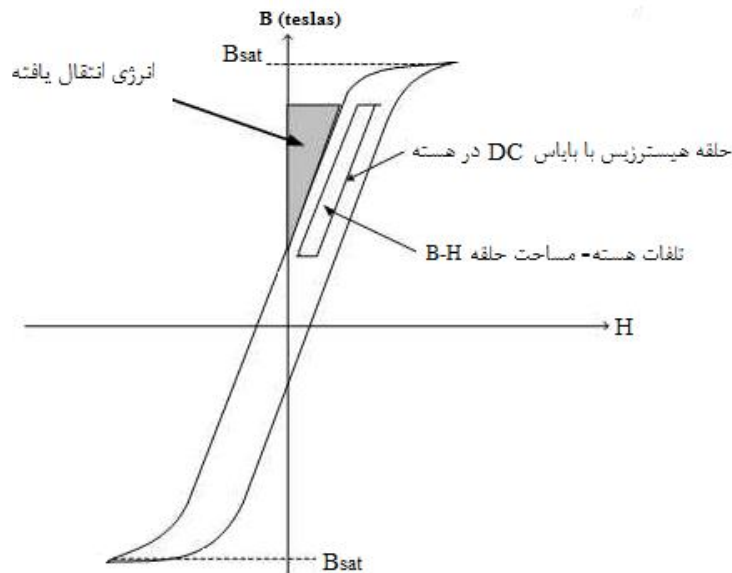
$$B_{dc} = \frac{0.4\pi N_s I_{dc} (10^{-4})}{I_g + \frac{MPL}{\mu_r}} \quad (\text{tesla}) \quad (1-32)$$

در طراحی مبدل و اینورتر، این جریان dc توسط نوسان جریان الکتریکی تکمیل می‌شود که عبارت است از:

$$B_{ac} = \frac{E(10^4)}{K_f f A_c N} \quad (\text{tesla}) \quad (1-33)$$

اگر مجموع B_{ac} و B_{dc} چگالی شار عملیاتی را به بالاترین سطح چگالی شار هسته ماده انتقال دهد، نفوذپذیری اضافی (μ_{ac})، کاهش می‌یابد. این شرایط امپدانس را کاهش و شارش جریان مغناطیسی I_m را افزایش می‌دهد. با این حال، اندازه شکاف هوایی دارای محدودیت عملی است. از آنجایی که شکاف هوایی امپدانس را کاهش می‌دهد، منجر به افزایش جریان مغناطیسی I_m می‌شود که جریانی القایی است. ولتاژ ناشی از چنین جریان‌هایی، فشار بالایی را به ترانزیستور سوئیچینگ اعمال می‌کند و ممکن

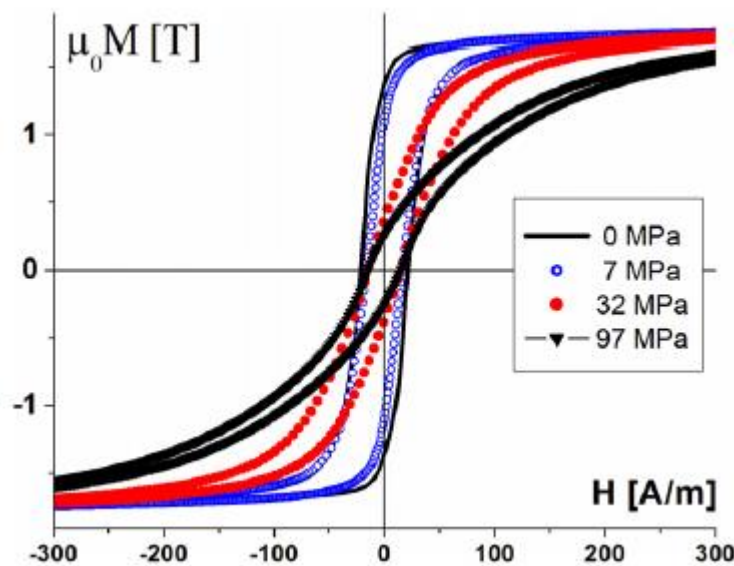
است باعث خرابی آن شود. این فشار را می‌توان با کاهش شکاف به حداقل رساند [۶]. شکل ۳۲-۱ حلقه هیستریزیس یک ماده مغناطیسی را با وجود شکاف و تحت بایاس DC هسته نشان می‌دهد که در آن سطح هاشور خورده نیز انرژی انتقال یافته از هسته ماده مغناطیسی است.



شکل ۳۲-۱: حلقه هیستریزیس ماده مغناطیسی تحت بایاس DC

۱-۵-۷ تأثیر تنش مکانیکی روی حلقه هیستریزیس

به طور خاص، فولادهای FeSi در ترانسفورماتورها و موتورهای الکتریکی استفاده می‌شوند، خواص مغناطیسی آنها تحت تابع فشار برای اهداف کاربردی بسیار مهم است. این کار به بررسی دقیق استحکام کششی حلقه‌ها و حوزه‌های هیستریزیس مغناطیسی فولاد Si/Fe-3 در میدان‌های کم و متوسط نیاز دارد ($\mu_0 M < 1.5 \text{ T}$)، زیرا این محدوده میدانی کاربردی‌تر است. در این قسمت تأثیر فشار کششی اعمال شده بر منحنی هیستریزیس فولاد Fe-3%Si، مورد مطالعه قرار گرفته است. حلقه‌های هیستریزیس نیمه استاتیک تحت فشار کششی این ماده مغناطیسی تا ۱۰۰ MPa در مرجع [۱۵] اندازه‌گیری شده است. نشان داده شده است که برای استرس‌هایی که بیش از ۵-۱۰ MPa هستند، حلقه‌ی هیستریزیس پهن که ناشی از فشار و عملکرد مغناطیس‌شدگی است با دقتی خوب و با تحریک میدان مؤثر حاصل می‌شود. تابع فشار تقریباً خطی و با شیب یک است. تابع مغناطیس‌شدگی در محدوده مغناطیسی $\pm 1/2 - 1/5 \text{ T}$ خطی بوده و به شکل میدان مغناطیسی معمولی است. شکل ۳۳-۱ حلقه‌های هیستریزیس اندازه‌گیری شده با فولاد Fe-3%Si را در فشارهای ۰ MPa، ۷ MPa، ۳۲ MPa و ۹۷ MPa نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، حلقه هیستریزیس به طور مداوم با افزایش فشار کوچک‌تر شده ولی تغییر نیروی وادارندگی در منحنی مغناطیسی کم است.



شکل ۳۳-۱: حلقه‌های هیستریزاس اندازه‌گیری شده با فولاد Fe-3%Si تحت فشار کششی تا تقریباً ۱۰۰ MPa [۱۵]

۱-۶- جمع‌بندی

در این فصل، اصطلاحات الکترومغناطیسی، یکاهای اندازه‌گیری و رابطه بین آنها ارائه شد و به دنبال آن مختصری درباره روند توسعه الکترومغناطیس بحث شد. در ادامه، مدارهای مغناطیسی و مدل مداری هسته مغناطیسی مورد مطالعه قرار گرفت و پس از آن روند مغناطیس‌شدگی در مواد فرومغناطیس با استفاده از نظریه ساختار حوزه توصیف شد. مغناطیس‌شدگی و نحوه تشکیل حلقه هیستریزاس در مواد فرومغناطیس مطالعه و ارائه شد و تأثیر عواملی همچون دما، فاصله هوایی، فرکانس و فشار مکانیکی روی حلقه هیستریزاس تحلیل و بررسی شد. همچنین تفاوت تلفات هسته با مغناطیس‌شدگی AC و یا مغناطیس‌شدگی DC نیز مورد بحث قرار گرفت. دانش پیش‌زمینه در این فصل پایه‌ای برای مطالعه، شبیه‌سازی و ساخت مدارات مغناطیسی و سنسورها و انتخاب الگوریتم‌های محاسباتی در فصل‌های بعدی فراهم می‌کند.

فصل دوم: معرفی دستگاه B-H متر و بررسی سوابق بین‌المللی طراحی و ساخت آن در ابعاد صنعتی و تجاری

۱-۲- مقدمه

در فصل قبل، اصطلاحات الکترومغناطیسی، روند مغناطیس‌شدگی در مواد فرومغناطیس و حلقه هیستریزیس مورد بحث قرار گرفت. در این فصل پس از معرفی دستگاه B-H متر با تمرکز بر ساختار اجزای تشکیل دهنده آن، سوابق بین‌المللی طراحی و ساخت این دستگاه در ابعاد صنعتی و تجاری مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در زمینه ساخت هسته مغناطیسی نرم، اندازه‌گیری شدت میدان مغناطیسی H در یک چگالی شار مغناطیسی از پیش تعیین شده B در تعیین کیفیت هسته‌های مغناطیسی تولیدشده بسیار مهم است.

از آنجاییکه فولادهای الکتریکی به ندرت برای کار در چگالی شار بالاتر از $1/75$ T طراحی می‌شوند، مشخصه آنها که توسط تولیدکنندگان ارائه شده معمولاً تا $1/8$ T اندازه‌گیری می‌شود. با این حال، چالش‌های اضافه شار زمانی که چگالی شار در یک هسته به طور موقت از مقدار نامی آن تجاوز کند وجود دارد. به عنوان مثال، می‌تواند در تقویت‌کننده‌های چهارگانه در حالت کار عادی رخ دهد. اضافه‌شار همچنین مکانیسم غالب برای ایجاد فرورزناسانس در ترانسفورماتور است [۱۶]. تلفات قابل توجه توان در چنین چگالی‌شار بالایی می‌تواند منجر به گرمای بیش از حد هسته شده و منجر به تخریب حرارتی عایق اطراف و حتی شکست ترانسفورماتورها شود. بنابراین، نیاز به اندازه‌گیری دقیق مشخصات مغناطیسی فولادهای الکتریکی و مواد فرومغناطیس در چگالی شار بالا یا به اصطلاح ناحیه اشباع برای درک بهتر رفتار هسته بسیار افزایش یافته است.

به‌طور کلی، سه هدف برای تعیین خواص مغناطیسی فولادهای الکتریکی و دیگر مواد فرو مغناطیس وجود دارد [۱۷]:

- تحقیق روی خواص مواد و بهبود عملکرد دستگاه‌ها
- مدل‌سازی عملکرد مواد تحت شرایط مغناطش مختلف، به عنوان مثال محدوده چگالی شار و حالت‌های مغناطش، به‌منظور دستیابی به مقادیر ورودی اولیه برای محاسبات عملکرد دستگاه‌های پیچیده فنی
- مشخص کردن مواد با اندازه‌گیری تلفات مغناطیسی، نفوذپذیری و ویژگی‌های B-H، برای برآورده ساختن نیازهای تجاری و برای محاسبات طراحی

به منظور مقایسه خواص مواد مغناطیسی مختلف با قابلیت ساخت مناسب، به عنوان مثال، همان مواد آزمایش‌شده در آزمایشگاه‌های مختلف، وجود استانداردهای بین‌المللی جهت تعیین دقیق شرایط آزمایش بسیار مهم است. استانداردهای IEC¹ سری 60404 تمام جنبه‌های آزمایش مواد مغناطیسی را تنظیم می‌کند. متأسفانه، استانداردهای فعلی IEC (2-60404 و 3-60404) که روش اندازه‌گیری خواص الکتریکی و مغناطیسی فولادهای الکتریکی تجاری را مشخص می‌کنند، فقط آزمون‌های تا $1/8$ T را پوشش می‌دهد.

۲-۲- دستگاه B-H متر

به‌منظور تأمین نیازهایی که مربوط به تعیین مشخصه مغناطیسی مواد می‌شود، دستگاه B-H متر نقش به‌خصوصی را ایفا می‌کند. این دستگاه بسته به نوع کاربری آن قابلیت اندازه‌گیری مشخصه‌هایی همچون چگالی شار مغناطیسی بیشینه (B_m)، میدان مغناطیسی بیشینه (H_m)، نفوذپذیری مغناطیس (μ)، تلفات هسته (P_c , P_{cv} , P_{cm})، فاز ولتاژ/جریان (θ)، تغییرات شار مغناطیسی (ϕ_m)، مقاومت (R)، امپدانس (Z)، اندوکتانس (L)، اعوجاج هارمونیکی کل (THD) و ضریب کیفیت (Q) را در یک

رنج فرکانسی وسیعی از ۱۰ هرتز تا ۱۰ مگاهرتز دارد. شکل ۱-۲- (الف) یک نمونه از این دستگاه که ساخت شرکت IWATSU است و شکل ۱-۲- (ب) واحد نمونه‌برداری این دستگاه را نشان می‌دهد.



(ب)

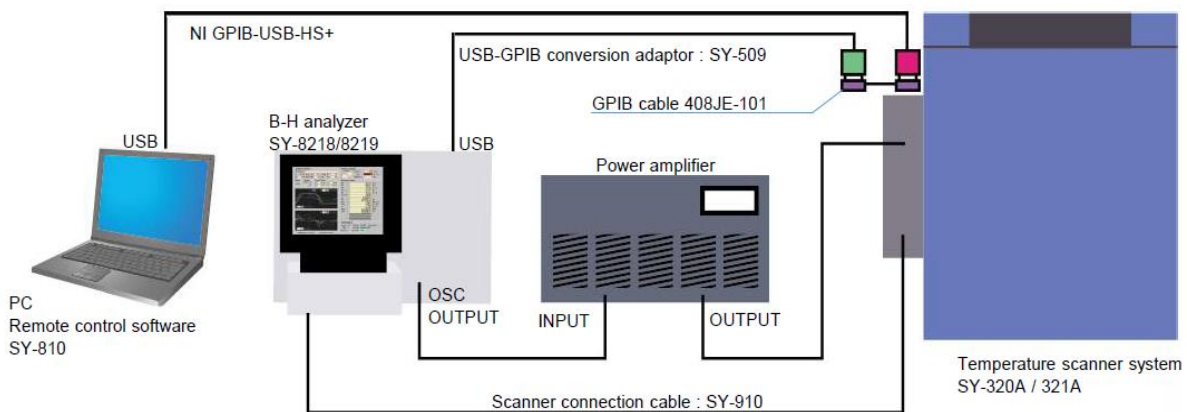


(الف)

شکل ۱-۲: دستگاه B-H متر ساخت شرکت IWATSU [۱۸]

پیکربندی کلی یک سیستم B-H متر همان‌طور که در شکل ۲-۲ نشان داده شده است، شامل چهار بخش عمده زیر است:

۱. تقویت‌کننده توان^۱
۲. B-H متر
۳. سیستم اسکنر دما^۲
۴. واحد نرم‌افزاری کنترل (PC)

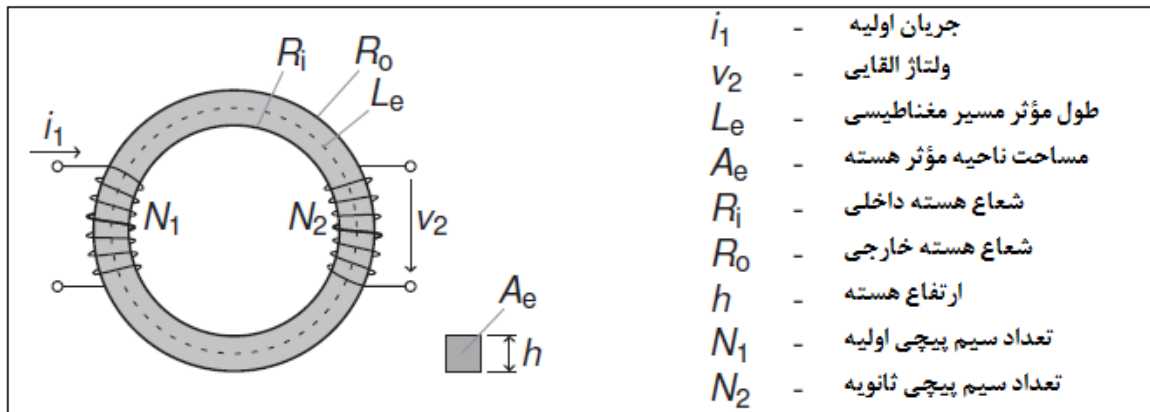


شکل ۲-۲: پیکربندی سیستم کنترل از راه دور دستگاه B-H متر [۱۸]

۳-۲- اصول عملکرد دستگاه B-H متر

اگر نمونه ماده مغناطیسی مورد آزمایش به شکل یکنواخت ساخته شده باشد، متغیرهای بیشتری را می‌توان اندازه‌گیری نمود. در مورد اجزای مغناطیسی این شکل یکنواخت می‌تواند یک هسته حلقه‌ای مانند شکل ۳-۲ باشد.

- 1- Power amplifier
- 2- Temperature scanner system



شکل ۳-۲: هسته مورد آزمایش با دو سیم‌پیچی برای آنالیز B-H [۱۹]

نمونه‌های هسته حلقه‌ای شکل دارای یک مقطع ثابت بوده و تعیین طول مسیر مغناطیسی در آن ساده است. علاوه بر پارامترهای ذکر شده حجم و وزن هسته نیز اهمیت دارد. هسته مورد آزمایش باید یک یا دو سیم‌پیچ با تعداد دور مستقل باشد. در مورد پیکربندی دو سیم‌پیچ، N_1 تعداد دورهای سیم‌پیچ تحریک/اولیه و N_2 تعداد دورهای سیم‌پیچ حس‌گر/ثانویه است.

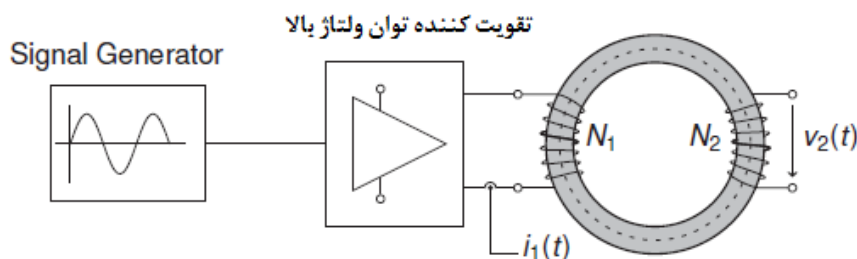
روش‌های مختلفی برای تعیین خواص مواد مغناطیسی نرم وجود دارد که بیشتر آنها براساس تنظیم دو سیم‌پیچ نشان داده شده در شکل ۴-۲ هستند. با اندازه‌گیری دقیق دو مقدار جریان اولیه i_1 و ولتاژ ثانویه v_2 می‌توان تمام خواص مغناطیسی ماده را محاسبه کرد. اساساً شدت میدان مغناطیسی H ، چگالی شار B و همچنین تلفات هسته P_c به شدت مورد توجه قرار گرفته است که این مشخصه‌ها به ترتیب از روابط (۲-۱)، (۲-۲) و (۲-۳) حاصل می‌شود [۱۹].

$$H(t) = \frac{N_1 \cdot i_1(t)}{L_e} \quad (2-1)$$

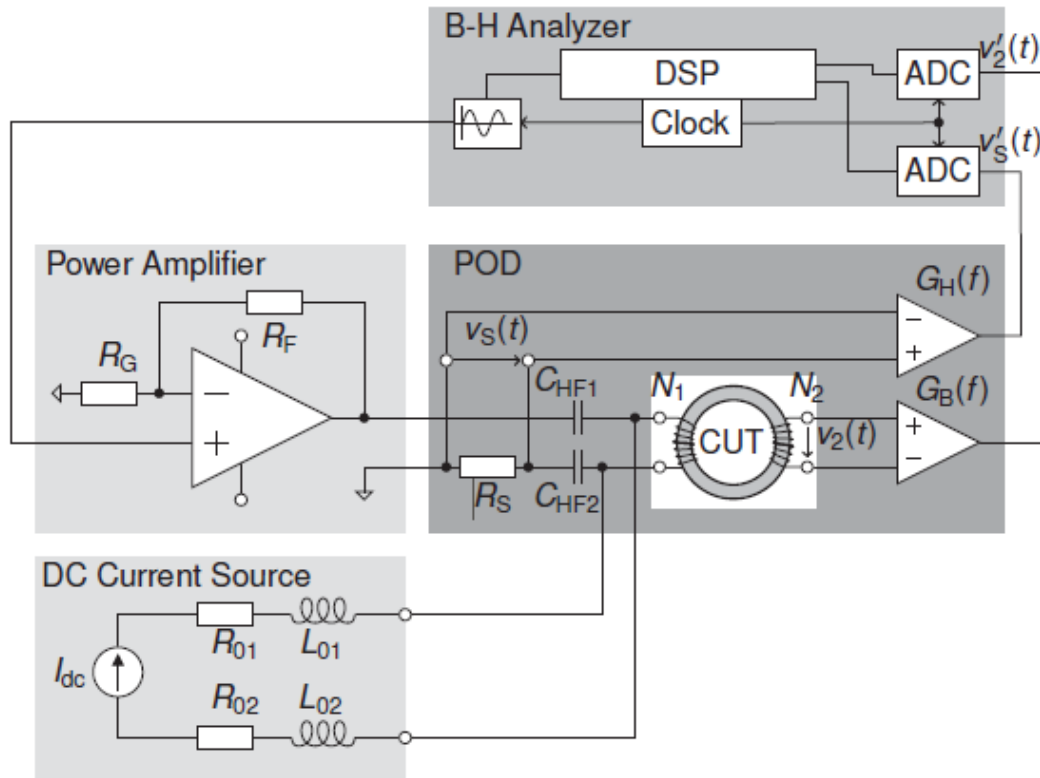
$$B(t) = \frac{1}{N_2 \cdot A_e} \cdot \int v_2(t) dt \quad (2-2)$$

$$P_c = \frac{N_1}{N_2} \cdot \frac{1}{T} \cdot \int_0^T i_1(t) \cdot v_2(t) dt \quad (2-3)$$

با دوره تناوب $T=1/f$



شکل ۴-۲: اصول عملکرد B-H متر [۱۹]



شکل ۵-۲: راه‌اندازی آنالیزور B-H با بایاس DC [۱۹]

می‌تواند براساس طرح شکل ۵-۲ ارزیابی شود:

$$V'_s(\omega) = FFT\{V'_s(t)\} \quad (2-4)$$

$$V'_2(\omega) = FFT\{V'_2(t)\} \quad (2-5)$$

$$I_1(\omega) = \frac{1}{Z_s(\omega)} \cdot \frac{V'_s(\omega)}{G_H(\omega)} \quad (2-6)$$

$$V_2(\omega) = \frac{V'_2(\omega)}{G_B(\omega)} \quad (2-7)$$

$$H(\omega) = \frac{N_1}{L_e} \cdot I_1(\omega) \quad (2-8)$$

$$B(\omega) = \frac{1}{j\omega} \cdot \frac{1}{A_e N_2} \cdot V_2(\omega) \quad (2-9)$$

علاوه‌براین، طیف توان عبوری $C(\omega)$ از این داده‌ها از رابطه (۲-۱۰) به‌دست می‌آید.

$$C(\omega) = I_1(\omega)^* \cdot V_2(\omega) = C_R(\omega) + jC_I(\omega) \quad (2-10)$$

تلفات هسته (Pc) نیز از رابطه (2-11) و به صورت حاصل جمع بخش حقیقی C_R از طیف توان عبوری در هر فرکانس محاسبه می‌شود.

$$P_c = \frac{N_1}{N_2} \cdot \sum_{\omega} C_R(\omega) \quad (2-11)$$

و تمام مقادیر وابسته به زمان با استفاده از تبدیل فوریه معکوس نسبت به مقادیر حوزه فرکانس i_1 ، v_2 ، H و B حاصل می‌شوند.

۴-۲- بررسی سوابق بین‌المللی طراحی و ساخت دستگاه B-H متر

در بخش قبل دستگاه B-H متر و اصول کارکرد آن توضیح داده شد. در این بخش به بررسی سوابق بین‌المللی ساخت این دستگاه توسط شرکت‌های مختلف پرداخته می‌شود. از آنجایی که یک دستگاه B-H متر بسته به نوع و تکنولوژی ساخت، قابلیت اندازه‌گیری پارامترهای متنوعی از جمله چگالی شار مغناطیسی بیشینه (Bm)، میدان مغناطیسی بیشینه (Hm)، نفوذپذیری مغناطیسی (μ)، تلفات هسته (Pc, Pcv, Pcm)، فاز ولتاژ/جریان (θ)، تغییرات شار مغناطیسی (mφ)، مقاومت (R)، امپدانس (Z)، اندوکتانس (L)، اعوجاج هارمونیکی کل (THD) و ضریب کیفیت (Q) را در محدوده‌های فرکانسی مختلفی دارد، در جدول ۲-۱ یک مقایسه کلی از نظر قابلیت‌های موجود و مشخصات دستگاه‌های B-H متر ساخته شده توسط شرکت‌های سازنده مختلف و بر اساس کاتالوگ‌های ارائه شده توسط این شرکت‌ها انجام شده است.

جدول ۱-۲: مقایسه کلی از نظر قابلیت‌های موجود در دستگاه‌های B-H متر ساخته شده توسط شرکت‌های سازنده

نام شرکت	مدل دستگاه	فرکانس اندازه‌گیری	توان	ولتاژ (V) و جریان (A)	روش اندازه‌گیری و استانداردهای تأیید شده	نمایش شکل موج	پارامترهای قابل اندازه‌گیری	ابعاد نمونه	نوع ماده قابل اندازه‌گیری	شکل هسته	Power Amplifire
IWATSU	SY-8232	10Hz ~ 10MHz	100V AC (90~132 V) or 200V AC (180~250 V) Approx. 800 W (100 V AC)	Output voltage ±50 V max., output current ±1 A max. (1.1 kHz) or ±4 A max. (10 Hz (optionally 1 Hz) to 1 kHz)	روش توان عبوری IEC 62044-3	منحنی B-H، جریان تحریک، ولتاژ القایی، میدان مغناطیسی،	.Hc .Hm .Br .Bm ،μa .Br/Bm, Ph, Pe ,I _{1m} ,(Pc, Pcv, Pcm) .VA ,2φm .θ , V _{2m} L ,μ″,μ′ ,μz	---	Ferrite core	E-shaped	IE-1125 3MHz, 5.2A, 140V 350 VA
	SY-8217	10 Hz ~ 5 MHz	100 to 240 V AC, approx. 400 VA (when the built-in printer is running)	---	روش توان عبوری IEC 62044-3	مقادیر پارامترها، منحنی B-H، میدان تحریک و ولتاژ القایی	.Hc .Hm .Br .Bm ,μdiff ,μa .Br/Bm, ,I _{1m} ,(Pc, Pcv, Pcm) 2φm .θ , V _{2m}	---	Ferrite core	E-shaped	IE-1125 3MHz, 5.2A, 140V 350 VA
	SY-8218	10Hz ~ 10MHz (Sinusoidal) 10Hz ~ 1MHz (Square, Duty50)	AC 100V to AC 240V, 50/60 Hz, Approx. 130 VA (max)	±140V, max ± 5.2A, max	روش توان عبوری IEC 62044-3	منحنی B-H، جریان تحریک، ولتاژ القایی، میدان مغناطیسی،	.Hc .Hm .Br .Bm Pc,) , μa .Br/Bm V _{2m} ,I _{1m} ,(Pcv, Pcm , μz .VA ,2φm .θ , Z .R .L ,tanδ ,μ″,μ′ THD ,Q	36 mm (L), min. 35 mm (W), max	Ferrite, Permalloy, Amorphous , Silicon steel sheet, Dust core	Toroid, EE core, EI core, Sheet, Powder	HSA4101-IW 10MHz, 1A, 71V 50VA HSA4014-IW 1MHz, 5.6A, 75V 200VA IE-1125B 3MHz, 5.2A, 140V 350 VA
	SY-8219	10 Hz ~1 MHz 10Hz ~ 1MHz (Square, Duty 50)									

BROCKHAUS										
---	---	Electrical steel, soft magnetic materials	---	.Br .Bm .Hc .Hm μ_a .Br/Bm μ_m ,	منحنی B-H، میدان مغناطیسی،	IEC 60404-2 IEC 60404-3 IEC 60404-10	40 A peak 100 V peak	---	3Hz – 20kHz (optional DC) optiona lfor higher harmonics 10 kHz up to 100 kHz	MPG 200 D
---	---	electrical steel in all common quality grades, thicknesses and geometries and of other soft magnetic materials	---	.Bm .Hm .Ph.Br Pc, .Hc Pcv, Pcm, μ_a .Br/Bm μ_m ,	منحنی B-H، میدان مغناطیسی،	IEC 60404-3	± 32 V ± 5 A (optional 10A)	---	12 to 100 Hz	C 510
----	---	all magnetic properties of magnetic material relevant to quality control	----	.Br .Bm .Hc .Hm Pol, μ_m , μ_a	منحنی B-H، میدان مغناطیسی، تلفات هیستریزیس،	روش تغییر شار مغناطیسی IEC 60404-3	400 μ Vs, 4, 40, 400 mVs	---	---	F 10
Up to max 4 kW	Any type of sheet	soft magnetic properties	---	.Bm .Ph .Br .Hc .Hm Pol, μ_m , μ_a	منحنی B-H، میدان مغناطیسی، تلفات هیستریزیس،	IEC 60404-3	---	---	50 or 60 Hz up to 400 Hz)	EBA Inline Tester
---	---	Hard and soft magnetic materials	---	.Br .Bm .Hc .Hm μ_a .Br/Bm μ_m ,	مقادیر پارامترها، منحنی B-H دقت منحنی B-H: $\pm 1\%$	روش جریان ثابت دوقطبی	Output voltage ± 50 V (max) Output Current ± 30 A (max)	AC100V 50/60Hz, about 1KVA	---	BH-5501
---	ring, toroid, E and U closed circuit	soft magnetic ferrites, permalloy, amorphous, nanocrystalline, iron dust core, electrical pure iron and silicon steel	----	.Br .Bm .Hm .Ph (Pc), .Hc (Pcv, Pcm, μ_m , μ_a	منحنی مغناطیسی B (H), نفوذ پذیری مغناطیسی B (H) یا (H) μ ، اطلاعات مختصری از هر منحنی	بالستیک آنالوگ و میدان مغناطیسی رفت و برگشتی GB/T 13012 GB 3656-83 GB 3657-83 GJB 937-90 IEC 60404-4 IEC 60404-7	Output voltage 0 ~ ± 50 V Output Current 0.01 mA ~ 10 A	---	---	MATS-2010SD
Default max 1.2 kVA Optional max 3 kVA	magnetic powders, single sheet testers, Toroidal	soft magnetic materials	----	.Ph .Br .Bm .Hc .Hm (Pcv, ,Pc) μ_m , μ_a Pcm,	منحنی B-H، میدان مغناطیسی، تلفات هیستریزیس، تلفات جریان گردابی	IEC 60404-2 Epstein IEC 60404-3 Single Sheet Tester	---	---	3 to 2500 Hz DC option available	HyMAC
---	industrial shapes like segments , bars, cylinders ,...	hard magnetic materials - ferrite, NdFeB or SmCo	----	.Ph .Br .Bm .Hc .Hm (Pcv, ,Pc) Pcm, μ_m , μ_a , working point	منحنی B-H، میدان مغناطیسی، تلفات جریان گردابی	IEC 60404-2 Epstein IEC 60404-3 Single Sheet Tester	---	---	3 to 2500 Hz	HyMPulse
METIS										

که در جدول ۱-۲، خط چین (---) به این معنی است که راجع به پارامتر مورد نظر، اطلاعاتی توسط شرکت سازنده ارائه نشده و پارامترهایی که با حروف اختصاری نمایش داده شده‌اند، در جدول ۲-۲ ارائه شده است.

جدول ۲-۲: معادل فارسی حروف اختصاری

حرف اختصاری	معادل	حرف اختصاری	معادل
Bm	چگالی شار مغناطیسی بیشینه	I _{1m}	جریان تحریک اولیه
Br	چگالی شار مغناطیسی پسماند	V _{2m}	ولتاژ القایی ثانویه
Hm	شدت میدان مغناطیسی بیشینه	θ	فاز
Hc	نیروی وادارندگی	2φ _m	شار نشتی مغناطیسی کل
Br/Bm	نسبت مستطیلی	VA	توان ظاهری
μ _a	نفوذپذیری نسبی	μ _z	نفوذپذیری امپدانس
μ _m	نفوذپذیری بیشینه	μ'', μ'	نفوذپذیری مجتمع
μ _{diff}	نفوذپذیری دیفرانسیل	tanδ	ضریب تلفات
THD	اعوجاج هارمونیک کل	L	اندوکتانس
Pol	قطبی‌شدگی	R	مقاومت
Ph	تلفات هیستریزیس	Z	امپدانس
Pe	تلفات جریان گردابی	Q	ضریب کیفیت
Pc, Pcv, Pcm	تلفات هسته		

۵-۲- بررسی استانداردهای موجود در زمینه طراحی دستگاه B-H متر

در این بخش به طور خلاصه، مهم‌ترین استانداردهای موجود در زمینه طراحی دستگاه B-H متر که همواره به عنوان مرجعی برای طراحی اجزای این دستگاه توسط شرکت‌های مختلف و محققان به حساب می‌آید و برخی از آنها در جدول ۱-۲ نیز ذکر شد، معرفی و بررسی می‌شود.

۱-۵-۲ استاندارد IEC 62044-3: مشخصه مغناطیسی در سطح تحریک بالا

این استاندارد روش‌های اندازه‌گیری تلفات توان و دامنه نفوذپذیری هسته‌های مغناطیسی که تشکیل یک مدار مغناطیسی بسته به منظور استفاده در سطوح تحریک بالا در سلف‌ها، چوک‌ها، ترانسفورماتورها و ادوات مشابه برای کاربردهای الکترونیک-قدرت می‌دهند را ارائه می‌دهد [۲۰].

دستگاه SY-8218 ساخت شرکت IWATSU مطابق با این استاندارد، امکان اندازه‌گیری بسیار دقیق تلفات هسته در فرکانس‌های بالا را با حداقل خطای فاز در یک طیف فرکانسی و مقاومت‌های تشخیص جریان و جبران‌سازی در مدار تشخیص و مشخصه‌های دامنه و فاز فراهم می‌کند.

۲-۵-۲ استاندارد IEC 60404-2: روش‌های اندازه‌گیری خواص مغناطیسی فولاد الکتریکی نوار و ورق با استفاده از قاب اپستین^۱

این قسمت از استاندارد IEC 60404 برای ورق و نوار الکتریکی به منظور اندازه‌گیری ac خواص مغناطیسی در فرکانس‌های تا ۴۰۰ هرتز و اندازه‌گیری‌های مغناطیسی dc کاربرد دارد. هدف از این قسمت تعریف اصول کلی و جزئیات فنی اندازه‌گیری خواص مغناطیسی ورق و نوار فولادی الکتریکی با استفاده از یک قاب اپستین است [۲۱]. دستگاه HyMAC و HyMPulse ساخت شرکت METIS به منظور تعیین خواص مغناطیسی فولادهای الکتریکی، بر اساس این استاندارد ساخته شده است.

۲-۵-۳ استاندارد IEC 60404-3: روش‌های اندازه‌گیری خواص مغناطیسی ورق و نوار مغناطیسی با استفاده از آزمایش یک ورق تنها

هدف از این بخش استاندارد، تعریف اصول کلی و جزئیات فنی اندازه‌گیری خواص مغناطیسی ورق‌های مغناطیسی با استفاده از آزمایش یک ورق است. آزمایش‌کننده تک ورق برای آزمایش نمونه‌هایی از ورق‌های مغناطیسی و با هر کیفیت، قابل استفاده است. ویژگی‌های مغناطیسی برای یک ولتاژ القایی سینوسی و برای مقادیر مشخص شده قطبش مغناطیسی و در یک فرکانس مشخص تعیین می‌شوند [۲۲]. دستگاه HyMAC ساخت شرکت METIC به منظور تعیین خواص مغناطیسی فولادهای الکتریکی، بر اساس این استاندارد ساخته شده است. شرکت METIS نیز دستگاه‌های B-H متر مدل HyMAC و HyMPulse خود را بر اساس این استاندارد طراحی نموده است.

۲-۵-۴ استاندارد IEC 60404-4: روش اندازه‌گیری dc خواص مغناطیسی مواد مغناطیسی نرم

این بخش از استاندارد IEC 60404 روش‌های اندازه‌گیری خواص مغناطیسی d.c مواد مغناطیسی نرم را در یک مدار مغناطیسی بسته با استفاده از روش‌های اندازه‌گیری حلقه یا نفوذسنج مشخص می‌کند. روش حلقه برای استفاده با نمونه‌های حلقه‌ای جامد یا ورقه‌ای و همچنین نمونه‌های حلقه‌ای که با حرارت دادن مواد تولید می‌شود، مناسب است. در این استاندارد دو روش استفاده می‌شود [۲۳].

۱. روش حلقه‌ای، به خصوص برای شدت میدان مغناطیسی بالای ۱۰ kA/m.

۲. روش نفوذسنجی برای شدت میدان مغناطیسی در رنج ۱ kA/m تا ۲۰۰ kA/m.

شرکت LINKJOIN دستگاه B-H متر مدل MATS-2010SD را بر اساس این استاندارد طراحی نموده است.

۲-۵-۵ استاندارد IEC 60404-5: مواد مغناطیسی دائمی (مغناطیسی سخت) – روش‌های اندازه‌گیری خواص مغناطیسی

آخرین ویرایش این بخش از استاندارد IEC 60404 در سال ۲۰۱۵ منتشر شده است. هدف این بخش از IEC 60404، تعریف روش اندازه‌گیری چگالی شار مغناطیسی، قطبش مغناطیسی و شدت میدان مغناطیسی است. همچنین برای تعیین منحنی مغناطیس‌زدایی و سیم‌پیچی مجدد مواد مغناطیسی دائمی، مانند موارد مشخص شده در استاندارد IEC 60404-8-1 مورد استناد قرار می‌گیرد. در این استاندارد، خواص مواد در سرتاسر حجم آنها همگن فرض می‌شود [۲۴].

عملکرد یک سیستم مغناطیسی نه تنها به خواص مواد مغناطیسی دائمی بستگی دارد، بلکه در ابعاد سیستم، به فاصله هوایی و دیگر عناصر مدار مغناطیسی نیز وابسته است. روش‌های توصیف شده در این بخش از IEC 60404 به اندازه‌گیری خواص مغناطیسی در مدار مغناطیسی بسته اشاره دارد.

1- Epstein frame

۲-۵-۶ استاندارد IEC 60404-6: روش‌های اندازه‌گیری خواص مغناطیسی مواد فلزی نرم و پودر در محدوده فرکانسی ۲۰ هرتز تا ۲۰۰ کیلو هرتز با استفاده از نمونه تروئید

این قسمت از IEC 60404 روش‌های اندازه‌گیری ac خواص مغناطیسی مواد در محدوده فرکانسی ۲۰ تا ۲۰۰ کیلو هرتز غیر از فولادهای الکتریکی و فریت‌های نرم را مشخص می‌کند. مواد تحت پوشش این بخش از استاندارد IEC 60404 شامل آلیاژهای خاصی است که در استاندارد IEC 60404-8-6 ذکر شده است، مانند مواد غیر بلوری و نانو کریستال، قطعات فشرده و متخلخل و بخش‌هایی از قالب‌های تزریق فلزی مانند موارد مندرج در IEC 60404-8-9، قطعات ریخته‌گری و مواد کامپوزیتی مغناطیسی نرم [۲۵].

هدف از این بخش تعریف اصول کلی و جزئیات فنی اندازه‌گیری خواص مغناطیسی مواد مغناطیسی نرم با استفاده از روش حلقه است. برای مواد تهیه شده به شکل پودر، یک نمونه آزمون حلقه با روش فشاری مناسب برای آن ماده تشکیل شده است. به طور معمول، اندازه‌گیری‌ها باید در دمای محیطی $(\pm 23^\circ\text{C})$ درجه سانتیگراد روی نمونه‌های مورد آزمایش تروئید که در ابتدا مغناطیسی شده‌اند، انجام شده و سپس نمونه‌ها مغناطیس‌زدایی شوند.

۲-۵-۷ استاندارد IEC 60404-7: روش اندازه‌گیری وادارندگی مواد مغناطیسی در یک مدار باز مغناطیسی

این بخش از استاندارد IEC 60404 به مواد مغناطیسی برای داشتن یک وادارندگی تا 500 kA/m اعمال می‌شود که روش اندازه‌گیری وادارندگی مواد مغناطیسی در یک مدار باز را مشخص می‌کند [۲۶]. این استاندارد توسط شرکت LINKJOIN برای دستگاه B-H متر مدل MATS-2010SD مورد استفاده قرار گرفته است.

۲-۵-۸ استاندارد IEC 60404-8-1: خواص منحصربه‌فرد مواد- مواد سخت مغناطیسی

این قسمت از استاندارد IEC 60404 حداقل مقادیر برای خواص اصلی مغناطیسی و تحمل ابعادی برای مواد مهم فنی سخت مغناطیسی (آهنرباهای دائمی) را مشخص می‌کند.

فقط برای اهداف اطلاعاتی، این بخش از استاندارد IEC 60404 مقادیری را برای چگالی مواد و محدوده ترکیبات شیمیایی آنها فراهم می‌کند [۲۷].

۲-۵-۹ استاندارد IEC 60404-9: روش‌های تعیین خصوصیات هندسی ورق و نوار فولادی مغناطیسی

این استاندارد روش‌های آزمون مورد استفاده خواص هندسی صفحات و نوارهای فولادی مغناطیسی شامل: همواری، انحنای باقی مانده، انحراف لبه، انحراف از خط برش و ارتفاع برآمدگی لبه‌های برش را مشخص می‌کند [۲۸].

۲-۵-۱۰ استاندارد IEC 60404-10:2016: روش‌های اندازه‌گیری خواص مغناطیسی نوارها و صفحات فولادی الکتریکی در فرکانس‌های متوسط

این بخش از استاندارد IEC 60404 برای نوارها و ورق‌های فولادی الکتریکی جهت اندازه‌گیری ac خواص مغناطیسی در محدوده فرکانس ۴۰۰ هرتز تا ۱۰۰۰۰ هرتز کاربرد دارد. هدف از این سند تعریف اصول کلی و جزئیات فنی اندازه‌گیری خواص مغناطیسی نوار و ورق‌های الکتریکی با استفاده از یک قاب اپستین است [۲۹].

۲-۵-۱۱ استاندارد IEC 60404-11: روش آزمون برای تعیین مقاومت عایق سطحی ورق و نوار مغناطیسی

این استاندارد بین المللی برای تعیین ویژگی‌های مقاومت عایق سطحی ورق و نوار مغناطیسی طراحی شده، یک روش اندازه‌گیری را معرفی می‌کند.

این روش برای ورق‌های مغناطیسی و نوارهای عایق شده در یک یا هر دو سطح قابل اجرا است و برای کنترل تولید در کاربرد پوشش‌های عایقی مناسب است [۳۰].

۲-۵-۱۲ استاندارد IEC 60404-12: راهنمای روش ارزیابی قابلیت دمای پوشش‌های عایق داخل لایه‌ای
این استاندارد روش‌هایی را برای ارزیابی خواص پوشش‌های عایق داخلی اعمال شده به ورق و نوار فولادی مغناطیسی در یک محدوده دمایی تا ۸۰۰ درجه سانتیگراد به عنوان مبنایی برای آزمایش معرفی می‌کند [۳۱].

۲-۵-۱۳ استاندارد IEC 60404-13: روش اندازه‌گیری چگالی، مقاومت و ضریب انبساط ورق و نوار فولادی الکتریکی

این استاندارد، روش‌هایی را برای تعیین چگالی، مقاومت و انبساط ورق و نوار فولاد الکتریکی مشخص می‌کند. این مقادیر برای ایجاد خواص مغناطیسی مواد ضروری است [۳۲].

۲-۵-۱۴ استاندارد IEC 60404-14: روش‌های اندازه‌گیری لحظه‌ای دوقطبی مغناطیسی یک نمونه ماده فرومغناطیسی با روش حذف یا چرخش

این استاندارد برای تمام مواد فرومغناطیسی و به خصوص در اندازه‌گیری لحظه‌ای دوقطبی مغناطیسی مواد مغناطیسی دائمی (مغناطیسی سخت) و اندازه‌گیری قطبش مغناطیسی اشباع خاص از مواد کاربید سیمان با استفاده از یک اتصال دهنده فلزی مغناطیسی، مناسب است [۳۳].

۲-۵-۱۵ استاندارد GB/T 13012: روش اندازه‌گیری dc خواص مغناطیسی مواد مغناطیسی نرم
این استاندارد روشی را برای استفاده در حلقه مدار مغناطیسی بسته و اندازه‌گیری نفوذپذیری مواد خواص مغناطیسی نرم dc را مشخص می‌کند. این استاندارد دو روش زیر را معرفی می‌کند: الف) روش نمونه‌گیری تروئید که شدت میدان مغناطیسی کاربردی در ۱۰ kA/m یا کمتر اندازه‌گیری می‌شود، b) روش نفوذسنجی، برای اندازه‌گیری شدت میدان مغناطیسی در محدوده بین ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ kA/m. این استاندارد یکی از استانداردهای مورد استفاده شرکت LINKJOIN برای ساخت دستگاه B-H متر مدل MATS-2010SD، است [۳۴].

۲-۵-۱۶ استاندارد GB/T 3658-2008: روش اندازه‌گیری ac خواص مغناطیسی مواد مغناطیسی نرم
این استاندارد روش آزمایش مغناطیسی موادی غیر از فولاد سیلیکون و فریت را در محدوده فرکانس ۲۰ Hz تا ۲۰ kHz مشخص می‌کند. مواد تحت پوشش این استاندارد عبارتند از: آلیاژ ویژه ذکر شده در استاندارد IEC 60404-8-6، موارد منع شده در استاندارد IEC 60404-8-9، اجزای قالب‌گیری با تزریق فلزی، ریخته‌گری و مواد کامپوزیتی مغناطیسی نرم. هدف از این استاندارد، تعریف قوانین عمومی و جزئیات فنی حلقه با یک نمونه آزمایشی از مواد مغناطیسی نرم است. در مواد پودری، برای نمونه‌ای که توسط روش اکستروژن تروئید مناسب تهیه شده است [۳۵]. خواص مغناطیسی DC مواد مغناطیسی نرم می‌تواند مطابق با نمونه‌های تروئید روش‌های اندازه‌گیری استاندارد IEC 60404-4 انجام شود. این استاندارد یکی از استانداردهای مورد استفاده شرکت LINKJOIN برای ساخت دستگاه B-H متر مدل MATS-2010SD، است.

۲-۶- جمع‌بندی

در این فصل، دستگاه B-H متر و اصول عملکرد آن معرفی شد و سوابق بین‌المللی طراحی و ساخت آن در ابعاد صنعتی و تجاری مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه یک مقایسه کلی از نظر قابلیت‌های موجود و مشخصات دستگاه‌های B-H متر ساخته شده توسط شرکت‌های سازنده مختلف و براساس کاتالوگ‌های ارائه شده توسط این شرکت‌ها صورت پذیرفت. مهم‌ترین

استانداردهای موجود در زمینه طراحی دستگاه B-H متر که در کاتالوگ شرکت‌های سازنده و مقالات موجود در این زمینه مورد استفاده و استناد قرار گرفته است نیز بررسی و مقایسه شد.

فصل سوم: اصول طراحی و ساخت مدارهای مغناطیسی دستگاه B-H متر

۱-۳- مقدمه

در فصل قبل دستگاه B-H متر با تمرکز بر ساختار اجزای تشکیل دهنده آن معرفی شد و سوابق بین‌المللی طراحی و ساخت این دستگاه در ابعاد صنعتی و تجاری مورد بررسی قرار گرفت. در این فصل به منظور شروع فرایند ساخت دستگاه B-H متر مورد نظر، به اصول طراحی و ساخت مدارات مغناطیسی مربوط به این دستگاه، بر اساس استانداردهای بین‌المللی موجود در زمینه اندازه‌گیری مشخصه‌های مواد مغناطیسی در شکل‌هایی مانند پودر، ورق، تروئید و اپستین پرداخته می‌شود.

۲-۳- اندازه‌گیری خواص مغناطیسی مواد مغناطیسی نرم فلزی و پودر با استفاده از نمونه تروئید

این قسمت با توجه به استاندارد IEC 60404-6 روش‌های اندازه‌گیری خواص مغناطیسی a.c مواد در محدوده فرکانس ۲۰ هرتز تا ۲۰۰ کیلو هرتز غیر از فولادهای الکتریکی و فریت نرم را مشخص می‌کند. مواد تحت پوشش این استاندارد شامل آلیاژهای خاص ذکر شده در فهرست IEC 60404-8-6، مواد غیر متبلور و نانو کریستال، قطعات فشرده، پخته‌شده و تزریق فلزی ارائه شده در IEC 60404-8-9، قطعات ریخته‌گری و مواد کامپوزیتی مغناطیسی است.

هدف از این بخش، تعریف اصول کلی و جزئیات فنی اندازه‌گیری خواص مغناطیسی مواد مغناطیسی نرم با استفاده از روش تروئید است. برای مواد تهیه شده در فرم پودر، نمونه تروئید مورد آزمایش با روش فشار مناسب برای آن ماده آماده می‌شود.

اندازه‌گیری‌های مغناطیسی DC بر روی مواد مغناطیسی نرم باید مطابق با روش حلقه ارائه شده در استاندارد IEC 60404-4 انجام شود. تعیین مشخصات مغناطیسی اجزای مغناطیسی نرم باید مطابق با استاندارد IEC 62044-3 انجام شود. به طور معمول، ابتدا اندازه‌گیری‌ها باید در دمای محیط (23 ± 5 درجه سانتیگراد) روی نمونه‌های مورد آزمایش تروئید مغناطیسی شده انجام شده و سپس مجدداً مغناطیس‌زدایی شوند.

۱-۲-۳ اصول کلی اندازه‌گیری

اندازه‌گیری خواص مغناطیسی مواد مغناطیسی به شکل پودر بر روی یک مدار مغناطیسی بسته به شکل تروئید با یک یا دو سیم‌پیچ انجام می‌شود.

۱-۲-۳-۱ نمونه مورد آزمایش

نمونه آزمایشی باید به شکل تروئید با مقطع مستطیلی باشد که می‌تواند به یکی از اشکال زیر تولید شود:

(الف) پیچش نوار یا سیم نازک برای تولید یک هسته تروئید

(ب) منگنه، برش لیزری یا لمینیت تروئید با برش فتوشیمیایی

(ج) فشرده‌سازی و پختن پودر، تزریق فلزی یا ریخته‌گری

در مورد مواد پودر، تولید یک نمونه آزمایشی تروئید بوسیله قالب‌گیری و تزریقی فلزی و یا با فشرده‌سازی (با حرارت در صورت لزوم) باید مطابق با توصیه‌های تولید کننده ماده مغناطیسی برای دستیابی به عملکرد مغناطیسی مطلوب مواد پودر انجام شود. برای همه انواع نمونه‌های آزمایشی، برآمدگی و لبه‌های تیز باید قبل از عملیات حرارتی برداشته شوند. در مورد ماده با نفوذپذیری بالا، ترجیح داده می‌شود نمونه مورد آزمایش در یک حلقه دو قسمتی قرار گیرد. ابعاد مورد نیاز نمونه باید بدون فشرده‌سازی نمونه آزمایشی، ثابت باشد. حلقه باید دارای ابعادی باشد به طوری که نسبت قطر بیرونی به قطر داخلی نباید بیشتر از $1/4$ و ترجیحاً کمتر از $1/25$ باشد.

برای مواد جامد و پودر فشرده، ابعاد نمونه آزمایشی، یعنی قطر بیرونی و داخلی و ارتفاع حلقه، باید با ابزار اندازه‌گیری مناسب مدرج‌شده اندازه‌گیری شود. ابعاد مربوطه در مکان‌های مختلف بر روی یک نمونه آزمایشی اندازه‌گیری شده و میانگین گرفته می‌شود. مساحت سطح مقطع نمونه آزمایشی باید از رابطه (۳-۱) محاسبه شود.

$$A = \frac{(D - d)}{2} h \quad (3-1)$$

که در آن، A مساحت سطح مقطع نمونه مورد آزمایش بر حسب m^2 ، D قطر خارجی نمونه مورد آزمایش بر حسب m، d قطر داخلی نمونه مورد آزمایش بر حسب m و h ارتفاع نمونه آزمایشی بر حسب m است.

برای یک دسته ورق یا یک هسته سیم‌پیچی شده تروئید، سطح مقطع نمونه آزمایشی باید از جرم، چگالی و مقادیر قطر داخلی و بیرونی حلقه محاسبه شود. جرم و قطر باید با وسایل مناسب مدرج اندازه‌گیری شود. چگالی باید چگالی متعارف برای ماده تولید شده توسط سازنده باشد. سطح مقطع باید از رابطه (۳-۲) محاسبه شود.

$$A = \frac{2m}{\rho \pi (D + d)} \quad (3-2)$$

که در آن، m جرم نمونه آزمایشی بر حسب kg و ρ چگالی مواد بر حسب kg/m^3 است. برای محاسبه شدت میدان مغناطیسی، از متوسط طول مسیر نمونه مورد آزمایش حاصل از رابطه (۳-۳) استفاده می‌شود.

$$l_m = \pi \frac{(D + d)}{2} \quad (3-3)$$

که در آن l_m طول متوسط مسیر مغناطیسی نمونه مورد آزمایش بر حسب متر است.

۲-۱-۲-۳- سیم‌پیچ‌ها

تعداد سیم‌پیچ‌ها و تعداد دورها بستگی به تجهیزات اندازه‌گیری و روش مورد استفاده دارد. برای اندازه‌گیری‌های خاص تلفات کل، مغناطیس‌شدگی و سیم‌پیچ ثانویه به طور معمول مورد نیاز است. در این مورد، سیم‌پیچ ثانویه باید در نزدیکترین حد ممکن به نمونه آزمایشی پیچیده شود تا اثر شار هوایی در سیم‌پیچ به حداقل برسد. تمام سیم‌پیچ‌ها باید به طور یکنواخت در طول کل نمونه آزمایش پیچیده شوند. برای اندازه‌گیری در فرکانس‌های بالاتر از فرکانس‌های قدرت، باید از عوارض مربوط به ظرفیت خازنی و سایر اثرات جلوگیری شود. باید اطمینان حاصل شود که عایق سیم در طول روند سیم‌پیچی آسیب نمی‌بیند و باعث ایجاد اتصال کوتاه به نمونه آزمایشی نمی‌شود. تست الکتریکی باید با یک دستگاه اندازه‌گیری مقاومت عایقی ac مناسب برای اطمینان از اینکه هیچ ارتباط مستقیمی بین سیم‌پیچ و نمونه مورد آزمایش وجود ندارد، انجام شود.

۳-۱-۲-۳- اندازه‌گیری دما

هنگامی که دمای سطح نمونه آزمایشی مورد نیاز است، باید با اتصال یک ترموکوپل غیرمغناطیسی کالیبره شده (به عنوان مثال ترموکوپل نوع T) به نمونه آزمایشی، دمای آن اندازه‌گیری شود. زمانی که نمونه آزمایشی بسته‌بندی شده باشد، یک سوراخ کوچک باید در داخل بسته‌بندی ایجاد شود، مراقبت از آسیب رساندن به مواد نمونه مورد آزمایش و ترموکوپل در تماس با مواد هسته ثابت الزامی است. در صورت عدم امکان، ترموکوپل باید به بسته‌بندی متصل شود و این رویه باید در گزارش آزمایش ارائه شود. ترموکوپل باید به یک ولتمتر دیجیتال متصل شود تا ولتاژ خروجی آن را اندازه‌گیری کند که می‌تواند مربوط به دمای مربوطه از میان جداول کالیبراسیون برای ترموکوپل باشد.

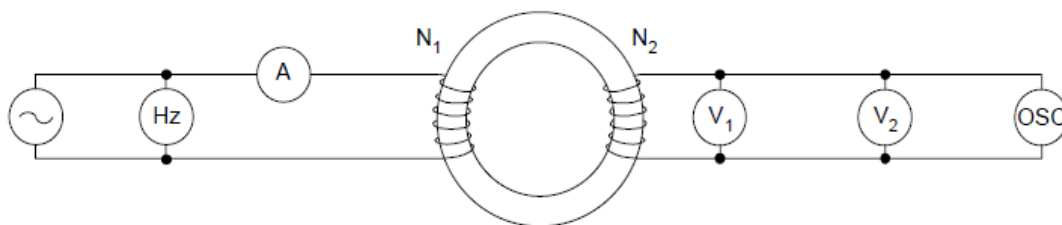
از آنجائیکه دمای نمونه آزمون بر حسب زمان پس از مغناطش تغییر می‌کند، اندازه‌گیری خواص مغناطیسی پس از زمانی که دمای مورد توافق ایجاد شد، باید انجام شود. انجام اندازه‌گیری‌ها در دمای بالا می‌تواند با قرار دادن نمونه در یک کوره مناسب برای تولید دمای مورد نیاز، انجام شود.

۳-۲-۲ اندازه‌گیری نفوذپذیری مغناطیسی و منحنی مغناطیس با استفاده از روش ولت‌متر-آمپر متر

اندازه‌گیری‌ها با استفاده از روش حلقه در فرکانس‌های معمولی از ۲۰ هرتز تا ۲۰۰ کیلوهرتز انجام می‌شود که فرکانس‌های بالاتر با عملکرد دستگاه محدود می‌شود.

۳-۲-۲-۱- دستگاه و اتصالات

نمونه آزمایش تروئید باید توسط یک سیم‌پیچ مغناطیسی N_1 و یک سیم‌پیچ N_2 پیچیده شده و تجهیزات اندازه‌گیری همان‌طور که در شکل ۳-۱ نشان داده شده است، متصل شود.



شکل ۳-۱: شماتیک نمونه مورد آزمایش و اتصالات تجهیزات اندازه‌گیری

که در شکل ۳-۱:

~ : منبع تغذیه (معمولاً تقویت‌کننده توان و یک اسیلاتور)

A: آمپر متر r.m.s یا ماکزیمم جریان، یا ولت متر r.m.s، یا ماکزیمم ولتاژ و یک مقاومت دقیق برای اندازه‌گیری جریان مغناطیسی

N_1 : سیم‌پیچ مغناطیسی

Hz: فرکانس متر

N_2 : سیم‌پیچ ثانویه

N_2 : سیم‌پیچ ثانویه

V_1 : ولت متر متوسط

OSC: اسیلوسکوپ

V_2 : ولت متر r.m.s

منبع جریان متناوب باید تغییرات ولتاژ و فرکانس را در خروجی خود به صورت جداگانه انجام دهد که در طول اندازه‌گیری بیش از $\pm 0.2\%$ از مقدار تنظیم شده تجاوز نکند. هنگام اندازه‌گیری جریان سینوسی، یک مقاومت غیر القایی باید به صورت سری با سیم‌پیچ مغناطیسی متصل شود تا تضمین کند که مقاومت مدار مغناطیسی حداقل ده برابر بزرگتر از اندوکتانس نمونه مورد آزمایش است. مدار ثانویه یک سیم‌پیچ ثانویه N_2 را به طور موازی به دو ولت متر متصل می‌کند. یک ولت متر (V_2) مقدار r.m.s، ولتاژ را و دیگری (V_1) مقدار متوسط یکسوسده ولتاژ را اندازه‌گیری می‌کند، اما گاهی اوقات در مقدار $1/111$ برابر مقدار اصلاح شده محدود می‌شود. شکل موج ولتاژ ثانویه باید با یک اسیلوسکوپ به منظور اطمینان از وجود تنها مؤلفه اصلی بررسی شود.

۳-۲-۲-۲- شکل موج ولتاژ ثانویه یا جریان مغناطیسی

برای مقایسه اندازه‌گیری‌ها، باید قبل از اندازه‌گیری‌ها توافق شود که هر یک از شکل موج ولتاژ ثانویه یا شکل موج جریان مغناطیسی بایستی سینوسی با فاکتور $1 \pm 1/111$ باشد. در مورد دوم، یک مقاومت غیر القایی به صورت سری با مدار مغناطیسی مورد نیاز است. ثابت زمانی مقاومت غیر القایی باید کم باشد تا اطمینان حاصل شود که شکل موج در محدوده مشخص شده است. مقاومت غیر القایی می‌تواند همان مقاومتی باشد که برای اندازه‌گیری جریان مغناطیسی استفاده می‌شود. کنترل شکل موج سینوسی

می‌تواند به وسیله ابزارهای دیجیتالی حاصل شود. در فرکانس‌های در محدوده ۲۰ هرتز تا ۵۰ کیلوهرتز، عامل شکل ولتاژ ثانویه می‌تواند با اتصال دو ولت‌متر با امپدانس بالا (معمولاً بزرگتر از $1\text{ M}\Omega$ موازی با 90 pF تا 150 pF) در طول سیم‌پیچ ثانویه مشخص شود. یک ولت‌متر مخصوص اندازه‌گیری مقدار r.m.s و دیگری مخصوص اندازه‌گیری مقدار میانگین یکسوسوده ولتاژ ثانویه است. مقدار نهایی از نسبت مقدار r.m.s به میانگین ولتاژ ثانویه تعیین می‌شود.

برای انتقال توان بهینه، ممکن است بهینه‌سازی تعداد دورهای سیم‌پیچی مغناطیسی برای مطابقت با امپدانس خروجی منبع توان لازم باشد که می‌تواند با رابطه (۳-۴) نشان داده شود.

$$Z = j\omega L \quad (3-4)$$

که در آن، Z امپدانس خروجی منبع توان بر حسب اهم، ω فرکانس زاویه‌ای خروجی منبع توان بر حسب رادیان بر ثانیه و L اندوکتانس مؤثر سیم‌پیچ مغناطیسی نمونه آزمایش تروئید بر حسب هانری است که از رابطه (۳-۵) محاسبه می‌شود.

$$L = \frac{N_1^2 A \mu_0 \mu_r}{l_m} \quad (3-5)$$

که در آن، N_1 تعداد دور سیم‌پیچ مغناطیسی، A سطح مقطع نمونه مورد آزمون بر حسب متر مربع، μ_0 ثابت مغناطیسی $(=4 \times \pi \times 10^{-7} \text{ H/m})$ ، μ_r نفوذپذیری ماده آزمایشی و l_m طول مؤثر مسیر مغناطیسی نمونه مورد آزمون بر حسب متر است. ممکن است نفوذپذیری نسبی ماده مغناطیسی مشخص نباشد، در این صورت نیاز به اندازه‌گیری اولیه شدت میدان مغناطیسی و چگالی شار مغناطیسی باشد که در قسمت بعد شرح داده می‌شود.

۳-۲-۲-۳- تعیین شدت میدان مغناطیسی

شدت میدان مغناطیسی که در آن اندازه‌گیری صورت می‌پذیرد، از رابطه (۳-۶) محاسبه می‌شود:

$$H = \frac{N_1 I}{l_m} \quad (3-6)$$

که در آن،

H شدت میدان مغناطیسی بر حسب آمپر بر متر،

N_1 تعداد دورهای سیم‌پیچ مغناطیسی روی نمونه،

I جریان مغناطش بر حسب آمپر و

l_m طول مسیر مغناطیسی متوسط بر حسب متر

به طور معمول، دامنه شدت میدان مغناطیسی با اندازه‌گیری مقدار r.m.s جریان مغناطیسی تعیین می‌شود. برای جریان مغناطیسی سینوسی، این مقدار صحیحی از شدت میدان مغناطیسی بیشینه را تعریف می‌کند. برای چگالی شار مغناطیسی سینوسی، این یک شدت میدان مغناطیسی بیشینه معادل را تعیین می‌کند که برای یک جریان مغناطیسی داده شده عددی پایین است. به عنوان یک جایگزین، شدت میدان مغناطیسی بیشینه را می‌توان با استفاده از آمپرتر بیشینه‌سنج و یا ولت‌متر بیشینه‌سنج و مقاومت دقیق تعیین کرد.

قبل از اندازه‌گیری، نمونه آزمایشی باید به دقت از یک مقدار شدت میدان اولیه بیشتر از ده برابر وادارندگی به صورت کاهش آرام دامنه متناظر جریان مغناطش به صفر مغناطیس‌زدایی شود. مغناطیس‌زدایی باید با فرکانس مشابه یا پایین‌تر که برای اندازه‌گیری‌ها استفاده می‌شود، انجام شود.

۳-۲-۲-۴- تعیین چگالی شار مغناطیسی

ولتاژ ثانویه باید با ولت‌متر نوع متوسط V_1 و چگالی شار مغناطیسی باید از رابطه (۳-۷) محاسبه شود:

$$|\overline{U}_2| = 4.44 f \hat{A} \hat{B} N_2 \quad (3-7)$$

که در آن:

$|\overline{U}_2|$ مقدار میانگین یکسوسده ولتاژ ثانویه بر حسب ولت،

f فرکانس بر حسب هرترتز

$\hat{B}$ چگالی شار مغناطیسی بیشینه بر حسب تسلا

A مساحت سطح مقطع نمونه مورد آزمایش بر حسب متر مربع

N_2 تعداد دور سیم‌پیچ ثانویه

بسته به سطح شدت میدان مغناطیسی و نسبت مساحت مقطع نمونه آزمایشی و سیم‌پیچ ثانویه، ممکن است لازم به اصلاح چگالی شار مغناطیسی برای شار هوایی محصور شده بین نمونه آزمایشی و ثانویه سیم‌پیچی باشد. مقدار اصلاح شده، B ، از چگالی شار مغناطیسی توسط رابطه (۳-۸) ارائه می‌شود.

$$B = B' - \mu_0 H \frac{(A' - A)}{A} \quad (3-8)$$

که در آن:

B مقدار اندازه‌گیری شده چگالی شار مغناطیسی بر حسب تسلا

μ_0 ثابت مغناطیسی ($= 4 \times \pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$)

H شدت میدان مغناطیسی بر حسب آمپر بر متر

A' مساحت سطح مقطع محصور توسط سیم‌پیچ ثانویه بر حسب متر

A مساحت سطح مقطع نمونه آزمایشی بر حسب متر مربع

۳-۲-۲-۵- تعیین دامنه r.m.s نفوذپذیری و دامنه نفوذپذیری ذاتی

برای مقادیر مربوط به شدت میدان مغناطیسی و چگالی شار مغناطیسی، دامنه r.m.s. نفوذپذیری باید از رابطه (۳-۹) و دامنه نفوذپذیری ذاتی از رابطه (۳-۱۰) محاسبه شود.

$$\mu_{a,rms} = \frac{\hat{B}}{\mu_0 \sqrt{2} \hat{H}} \quad (3-9)$$

$$\mu_{a,rms} = \frac{\hat{B}}{\mu_0 \sqrt{2} \hat{H}} \quad (3-10)$$

که در آن

$\mu_{a,rms}$ دامنه r.m.s نفوذپذیری (برای چگالی شار مغناطیسی سینوسی)

μ_a دامنه نفوذپذیری خودی (برای چگالی شار مغناطیسی سینوسی)

μ_0 ثابت مغناطیسی ($=4 \times \pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$)

$\hat{B}$ چگالی شار مغناطیسی بیشینه بر حسب تسلا

$\tilde{H}$ میزان شدت میدان مغناطیسی r.m.s بر حسب آمپر بر متر

$\hat{H}$ میزان شدت میدان مغناطیسی بیشینه بر حسب آمپر بر متر

۳-۲-۲-۶- تعیین منحنی مغناطیسی

نمونه آزمایشی همانطور که قبلاً توضیح داده شد، باید با دقت مغناطیس‌زدایی شود. با افزایش پیوسته جریان مغناطیسی، مقادیر مربوط به شدت میدان مغناطیسی و چگالی شار مغناطیسی حاصل می‌شود که از این مقادیر، منحنی مغناطیسی ترسیم می‌شود.

۳-۲-۳- اندازه‌گیری تلفات ترانس

تلفات ترانسفورماتور شامل تلفات سیم‌پیچ‌ها و تلفات هسته است. البته تلفات کمی هم در دی الکتریک عایق مواد و میدان‌های پراکنده ترانسفورماتور وجود دارد که به دلیل کوچک بودن از آن‌ها صرف نظر می‌کنیم.

۳-۲-۳-۱- تلفات اهمی ترانسفورماتور

تلفات سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور ناشی از عبور جریان از سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور است که گرچه رسانا هستند و دارای مقاومت کمی هستند، ولی همان مقاومت کم باعث ایجاد اندکی تلفات در سیم‌پیچ‌ها می‌شود. این تلفات با مقاومت سیم‌ها و مجذور جریان عبوری از آن‌ها رابطه مستقیم دارد. رابطه زیر نحوه محاسبه تلفات سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور که به تلفات اهمی نیز معروف است را بیان می‌کند.

$$P_c = R_p I_p^2 + R_s I_s^2 \quad (3-11)$$

در این رابطه R_p و R_s به ترتیب مقاومت‌های اهمی سیم‌پیچ‌های اولیه و ثانویه و I_p و I_s به ترتیب مقادیر موثر جریان‌های سیم‌پیچ‌های اولیه و ثانویه هستند. مقدار مقاومت سیم‌پیچ به طول و سطح مقطع آن و البته جنس آن وابسته است. به این ترتیب که هرچه طول سیم‌پیچ بیشتر و هرچه سطح مقطع سیم کمتر باشد، سیم‌پیچ مقاومت بیشتری از خود نشان می‌دهد.

۳-۲-۳-۲- تلفات هسته ترانسفورماتور

بخش دیگری از تلفات ترانسفورماتور مربوط به تلفات هسته آن است. تلفات هسته نیز خود شامل تلفات هیستریزیس^۱ و تلفات جریان گردابی^۲ است. همان‌طور که در فصل اول عنوان شد، هسته‌های مغناطیسی دارای شار پسماند هستند. به این معنی که پس از صفر شدن میدان مغناطیسی، شار مغناطیسی هسته صفر نمی‌شود. برای صفر کردن این شار مغناطیسی مقداری انرژی صرف می‌شود که به صورت حرارت در هسته تلف می‌گردد. این انرژی تلف شده را تحت عنوان تلفات هیستریزیس نامگذاری می‌کنیم. تلفات هیستریزیس ارتباطی با بار خروجی ترانسفورماتور ندارد و به فرکانس و جنس هسته بستگی دارد. در واقع مساحت داخل حلقه هیستریزیس، بیان‌گر تلفات هیستریزیس است که از رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$P_h = K_h f B_m^n \quad (3-12)$$

1- Hysteresis Loss

2- Eddy Current Loss

که در این رابطه K_h ثابت هیستریزیس، f فرکانس، B_m چگالی شار بیشینه هسته و n ثابت اشتینمتز ($1.5 < n < 2.5$) است. تلفات جریان گردابی یا تلفات فوکو بخشی از تلفات ترانسفورماتور را تشکیل می‌دهند. بر اثر اعمال ولتاژ به سیم‌پیچ اولیه، علاوه بر سیم‌پیچ ثانویه در هسته نیز ولتاژ القا می‌شود که در صورت رسانا بودن هسته، به ایجاد جریان‌هایی در هسته منجر می‌شود. این جریان‌ها باعث ایجاد تلفات می‌گردد. برای کاهش این جریان‌ها هسته‌های آهن را به صورت ورق در می‌آورند و سطح ورق‌ها را با ماده نارسانایی می‌پوشانند تا جریان گردابی به ورق آهن محدود شود. در فریت‌ها که نارسانا هستند، تلفات جریان گردابی بسیار محدود است. این تلفات از رابطه زیر محاسبه می‌شوند:

$$P_e = K_e f^2 B_m^2 \quad (3-13)$$

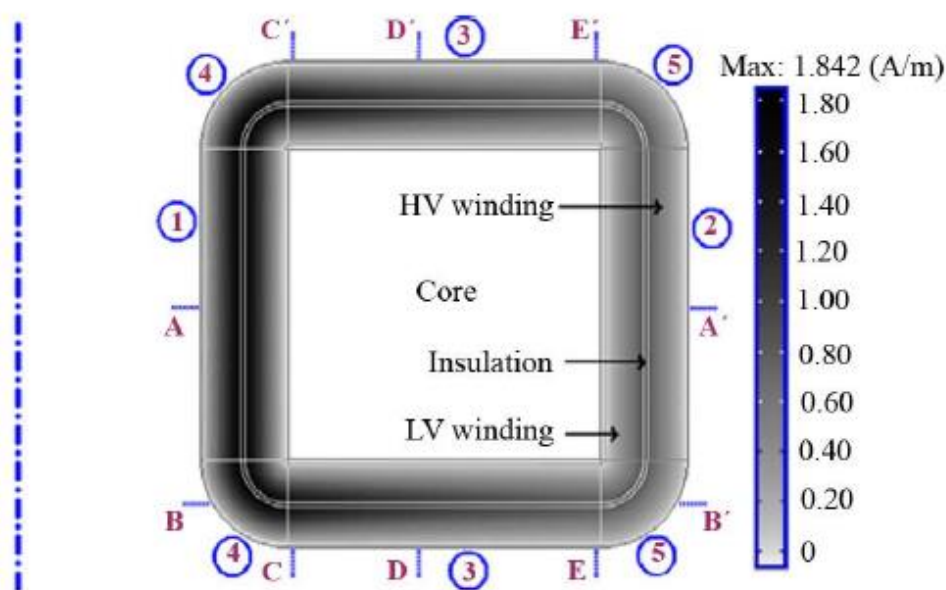
ضریب K_e که ثابت فوکو نامیده می‌شود. در این پروژه تلفات جریان گردابی با توجه به مرجع [۳۶] از رابطه (۳-۱۴) حاصل می‌گردد.

$$P_e = \frac{N^2 I^2}{2\pi} \sqrt{\frac{\omega \mu}{2\sigma}} \log \frac{R_2}{R_1} \quad (3-14)$$

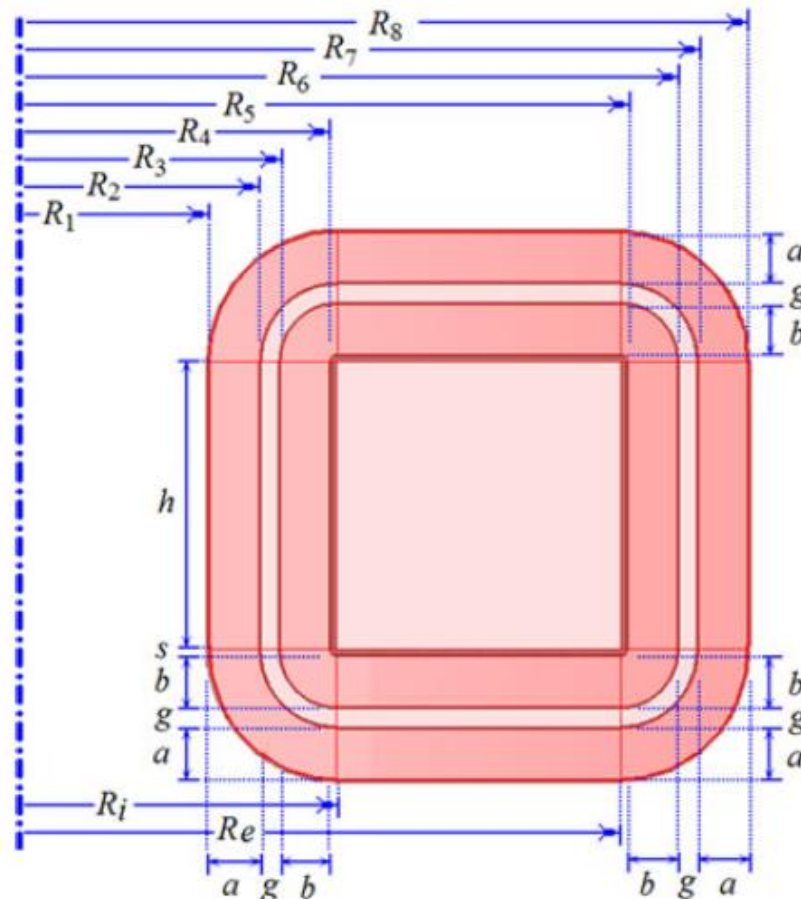
که در آن R_1 و R_2 به ترتیب شعاع بیرونی و شعاع درونی هسته تروئید، σ قابلیت رسانایی، ω فرکانس زاویه‌ای و μ نفوذپذیری مغناطیسی ماده مغناطیسی است. یکی از مهم‌ترین پارامترهای مدار معادل مغناطیسی، اندوکتانس نشتی (L_{leak}) است. به منظور محاسبه اندوکتانس نشتی مدار معادل مغناطیسی در آزمایش تروئید، همان‌طور که در مرجع [۳۷] ارائه شده است، از رابطه (۳-۱۵) استفاده می‌شود.

$$L_{leak} = L_{leak,1} + L_{leak,2} + 2L_{leak,3} + 2L_{leak,4} + 2L_{leak,5} \quad (3-15)$$

که در آن $L_{leak,i}$ اندوکتانس نشتی هر یک از نواحی پنج‌گانه نشان داده شده در شکل ۳-۲ است. به‌طور خلاصه، اندوکتانس نشتی هر قسمت با توجه به شکل ۳-۳ که شعاع هر قسمت از سیم‌پیچ فشار قوی، سیم‌پیچ فشار ضعیف و عایق بین آن دو را نشان می‌دهد، حاصل می‌شود.



شکل ۳-۲: توزیع شدت میدان مغناطیسی در ترانسفورماتور تروئید [۳۷]



شکل ۳-۳: اطلاعات ابعاد هندسی ترانسفورماتور با هسته تروئید [۳۷]

شعاع متوسط قسمت افقی از رابطه (۳-۱۶) حاصل می‌شود.

$$R_{mh} = \frac{R_i + R_e}{2} \quad (۳-۱۶)$$

شعاع متوسط هر قسمت نیز به‌طور کلی از رابطه (۳-۱۷) به دست می‌آید.

$$R_{mj} = \frac{R_j + R_{j+1}}{2} \quad (۳-۱۷)$$

با توجه به دو رابطه فوق و شکل ۳-۳، اندوکتانس نشتی هریک از ۵ ناحیه از رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$L_{leak,i} = \frac{\mu_0 N^2}{2\pi} \eta_i (\alpha_i a + \varphi_i g + \beta_i b) \quad (۳-۱۸)$$

که در آن ضرایب مختلف در جدول ۳-۱ نشان داده شده است. به طور کلی شکل ۳-۴ مدار معادل ترانس تشکیل شده از هسته مواد مغناطیسی تروئید را نشان می‌دهد. مقاومت R_1 از حاصلضرب مقاومت ویژه سیم‌پیچ (Ω/Km) در طول سیم‌پیچ حاصل می‌شود. LL_1 اندوکتانس نشتی بوده که مقدار آن با توجه به روش ارائه شده در مرجع [۳۸] محاسبه شده و R_c و L_m به ترتیب مقاومت مغناطیسی هسته و اندوکتانس هسته است که مقادیر آنها از روی تلفات محاسبه شده هسته حاصل می‌گردد.

جدول ۳-۱: ضرایب مولفه‌های مختلف اندوکتانس نشتی

ضریب				مقطع
β_i	φ_i	α_i	η_i	
$R_{m2}/3R_3^2$	$R_{m2}/2R_2R_3$	$R_{m1}/3R_2^2$	h	1
$R_{m5}/3R_6^2$	$R_{m6}/2R_6R_7$	$R_{m7}/3R_7^2$	h	2
$1/3$	1	$1/3$	$(R_e^2 - R_i^2)/R_eR_i$	3
$R_{m3}t_3/6$	$R_{m2}t_2$	$R_{m1}t_1/6$	$1/2R_2^2$	4
$R_{m5}t_3/6$	$R_{m6}t_2$	$R_{m7}t_1/6$	$1/2R_6^2$	5

که در جدول ۱-۳ ضرایب t_1 تا t_3 از رابطه (۱۹-۳) حاصل می‌شوند.

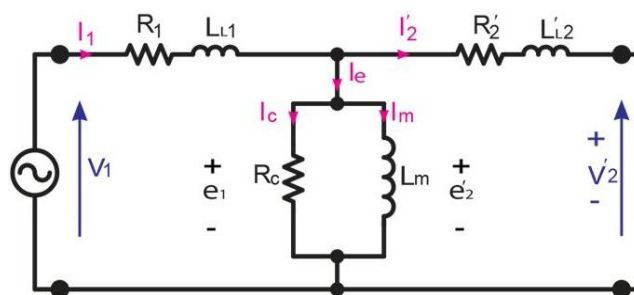
$$t_1 = 3a + 4(s + b + g)$$

$$t_2 = g + 2(s + b)$$

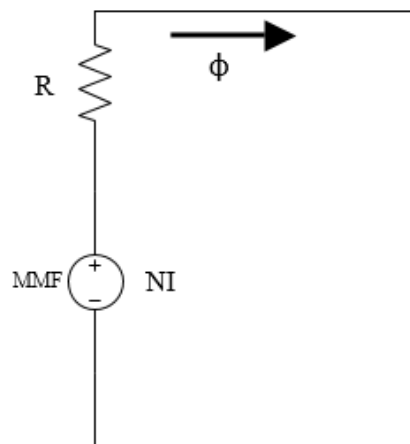
$$t_3 = 3b + 4s$$

(۱۹-۳)

در نهایت، مدار معادل مغناطیسی ترانس برای هسته تروئید در شکل ۳-۴ نشان داده شده است. شکل ۳-۵ مدار معادل مغناطیسی ساده شده آزمایش مواد مغناطیسی به شکل پودر و حلقه را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۴: مدار معادل ترانس برای هسته تروئید



شکل ۳-۵: مدار معادل مغناطیسی ساده شده آزمایش مواد به شکل پودر و حلقه مغناطیسی

در این پروژه، پودر با شماره ماده ۲۶- از کاتالوگ شرکت میکرومتال^۱ [۳۹] برای آزمایش مورد استفاده قرار گرفته است. شکل ۳-۶ نمایی از نحوه پیاده‌سازی محاسبات در نرم‌افزار اکسل برای آزمایش مواد مغناطیسی به شکل پودر و حلقه را نشان می‌دهد.

Input list		
Input	description	Amount
d (m)	inner diameter of the specimen	0.049
B (T)	peak magnetic flux density	1.38
f (Hz)	frequency	50
m (kg)	mass of the test specimen	0.233005584
ρ_v (kg/m ³)	volumetric mass density of the test material	7000
Z (Ohms)	output impedance of the power source	1
H (A/m)	saturated magnetic field strength	19681.0304
μ_0 (h/m)	magnetic constant	1.2566E-06
μ_r	relative permeability of the specimen	55.8
D/d	ratio of outer diameter to inner diameter	1.575510204
V _{p-2} (Volt)	maximum voltage in secondary of the specimen	11.91013297
δ (A/mm ²)	current density	2
n	Steinmetz's Coefficients	2.5
Kh	hysteresis Coefficients	35.18
Ke	eddy current Coefficients	13.259
calculation of Test specimen dimensions		
Output	description	Amount
D (m)	Outer diameter of the specimen	0.0772
l _m (m)	mean magnetic path length of the specimen	0.198134
A (m ²)	cross-sectional area of the specimen	0.000168
V (m ³)	volume of the specimen	3.32865E-05
h (m)	height of the test specimen	0.011914894

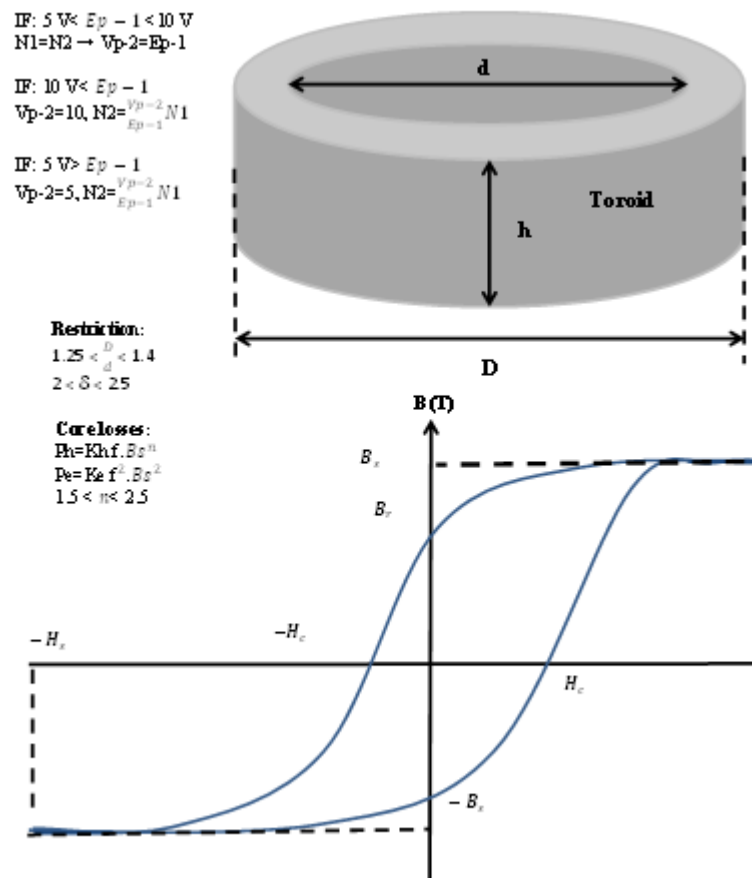
(الف)

calculation of voltage and current		
Vp-1 (Volt)	maximum voltage in output of amplifier	16.85122867
Ep-1 (Volt)	maximum voltage in primary of the specimen	11.91013297
I-max1 (A)	maximum current of the specimen	16.85122867
I-max2 (A)	maximum current of the specimen	16.85122867
calculation of magnetic properties and windings		
L (H)	effective inductance of the magnetizing ring specimen winding	0.003183699
phi-sat (Wb)	maximum magnetic flux of the specimen	0.00023184
N1	number of turns of the magnetizing winding	231.4063475
N1'	number of compensated turns of the magnetizing winding	231.4063475
N2	number of turns of the secondary winding	231.4063475
R (AT/Wb)	reluctance	15719353.97
F (A.Turn)	magnetomotive force	3899.481276
N'2	number of secondary turns based on frequency Eq.	231.4063475
calculation of specific total loss and impedance		
a (mm ²)	calculated cross-sectional area of primery winding	8.425614335
a (mm ²)	standard cross-sectional area of primery winding	10.6
Ph (W)	hysteresis loss	0.130988101
Pe (W)	eddy current loss	2.101247652
Pn (W/kg)	Sheet inherent power loss	25
P tot (W)	Total power loss of the sheet	5.8251396
A' (m ²)	cross-sectional area of winding	0.00017976
Rc (Ω)	Magnetic reluctance	52.27385452

(ب)

calculation of Leakage inductance (L0)		
a (mm)	Thickness of inner winding (mm)	5.5
b (mm)	Thickness of outer winding (mm)	5.6
g (mm)	Thickness of insulation layers (mm)	1
s (mm)	Distance between sections	0.5
R1 (mm)	Internal radius of the external winding for regions 1	36.9
R2 (mm)	Internal radius of the insulation for the vertical regions 1	42.4
R3 (mm)	Internal radius of the external winding for regions 1	43.4
R4 (mm)	Inner diameter of the specimen	49
R5 (mm)	Outer diameter of the specimen	77.2
R6 (mm)	Internal radius of the insulation for the vertical regions 2	82.8
R7 (mm)	Internal radius of the external winding for regions 2	83.8
R8 (mm)		89.3
Rm1 (mm)	mean radius of R1-R2	39.65
Rm2 (mm)	mean radius of R2-R3	42.9
Rm3 (mm)	mean radius of R3-R4	46.2
Rm4 (mm)	mean radius of R4-R5	63.1
Rm5 (mm)	mean radius of R5-R6	80
Rm6 (mm)	mean radius of R6-R7	83.3
Rm7 (mm)	mean radius of R7-R8	86.55
t1	Coefficient	44.9
t2	Coefficient	13.2
t3	Coefficient	18.8
Ri (mm)	internal radius of the toroid	49

(ج)



(د)

شکل ۳-۶: پیاده‌سازی محاسبات در نرم‌افزار اکسل برای آزمایش مواد پودر مغناطیسی

۳-۲-۱ دستورالعمل روش طراحی اندازه‌گیری خواص مغناطیسی مواد پودر و تروئید بر اساس استاندارد IEC 60404-6

در این قسمت، به منظور جمع‌بندی طراحی الگوریتم محاسباتی اندازه‌گیری خواص مغناطیسی مواد مغناطیسی نرم فلزی و پودر با استفاده از نمونه تروئید، دستورالعمل این الگوریتم بر اساس استاندارد IEC 60404-6 ارائه می‌شود.

۳-۲-۱-۱ ورودی‌های لازم برای طراحی

به منظور شروع مرحله طراحی، براساس استاندارد IEC 60404-6 و مشخصه‌های ذاتی ماده مغناطیسی، لازم است پارامترهایی به عنوان ورودی در اختیار طراح قرار گیرد. این پارامترها عبارتند از:

- جرم ماده مغناطیسی نمونه موجود بر حسب کیلوگرم ($m \text{ (kg)}$)
- قطر داخلی حلقه نمونه ساخته شده از ماده مغناطیسی به شکل پودر بر حسب متر ($d \text{ (m)}$)
- فرکانس بر حسب هرتز ($f \text{ (Hz)}$)
- امپدانس خروجی تقویت‌کننده بر حسب اهم ($Z \text{ (}\Omega\text{)}$)
- نفوذپذیری نسبی مربوط به نمونه ماده مغناطیسی (μ_r)

- چگالی ماده مغناطیسی نمونه بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب (kg/m^3)
- چگالی شار بیشینه ماده مغناطیسی نمونه بر حسب تسلا ($B_m \text{ (T)}$)
- ثابت مغناطیسی (μ_0)
- نسبت قطر بیرونی به قطر داخلی حلقه ساخته شده از نمونه مغناطیسی که بر اساس استاندارد IEC 60404-6 این نسبت بین $1/25$ تا $1/4$ است ($1/25 < D/d < 1/4$)
- چگالی جریان بر حسب آمپر بر میلی‌متر مربع ($\delta \text{ (A/mm}^2\text{)}$)
- تعیین محدوده مجاز ولتاژ ثانویه (U_{p-2})

۲-۱-۲- طراحی نمونه آزمایشی استاندارد و اندازه‌گیری مشخصات مغناطیسی

در این قسمت، با در اختیار داشتن ورودی‌های ارائه شده در بخش قبل، به طراحی مشخصات مربوط به ابعاد نمونه مغناطیسی، ولتاژ و جریان اولیه سیم‌پیچ، تعداد دور، مشخصه‌های مغناطیسی، تلفات و امپدانس مدار معادل ترانس ساخته شده پرداخته می‌شود. در مرحله اول با داشتن نسبت D/d از ورودی و مقدار قطر داخلی d ، قطر خارجی حلقه D مشخص می‌شود. متوسط طول مسیر نمونه (l_m) از رابطه (۳-۳)، سطح مقطع (A) از رابطه (۳-۲) و ارتفاع نمونه از رابطه (۳-۱) حاصل شده و به این صورت ابعاد استاندارد نمونه محاسبه می‌شود.

در مرحله دوم همان‌طور که پیش از این ذکر شد، برای انتقال توان بهینه، لازم است امپدانس مدار مغناطیسی با امپدانس خروجی منبع توان که با رابطه (۳-۴) نشان داده شده است برابر باشد. بنابراین با استفاده از امپدانس خروجی منبع توان در ورودی، اندوکتانس کل مدار مغناطیسی (L) قابل محاسبه است. بنابراین می‌توان با استفاده از رابطه (۳-۵) تعداد دور سیم‌پیچی (N_1) را محاسبه نمود.

در مرحله سوم به منظور محاسبه جریان مغناطیس‌شدگی (I_{max})، با استفاده از H_{max} محاسبه شده در ورودی از رابطه (۳-۶) استفاده می‌شود. از آنجایی که برای انتقال توان بهینه امپدانس خروجی منبع توان و امپدانس کل مدار مغناطیسی باید برابر باشد، ولتاژ بیشینه اولیه در خروجی منبع توان از رابطه (۳-۲۰) محاسبه می‌شود.

$$|U_{max}| = i_{max} \times |Z| \quad (3-20)$$

ولتاژ دو سر سیم‌پیچی اولیه نیز از رابطه (۳-۲۱) محاسبه می‌گردد.

$$|\overline{U}_1| = 4.44 f \hat{A} B N_1 \quad (3-21)$$

با توجه محدوده ولتاژ ثانویه ارائه شده در ورودی، از نسبت تبدیل ترانس که در رابطه (۳-۲۲) ارائه شده است می‌توان تعداد دور ثانویه (N_2) را تعیین نمود.

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (3-22)$$

در مرحله چهارم نیز با استفاده از رابطه (۳-۲۳) رلوکتانس مغناطیسی (R_m) و با استفاده از رابطه (۳-۲۴) شدت میدان مغناطیسی بیشینه (ϕ_m) محاسبه می‌شود.

$$R_m = \frac{L}{\mu_0 \mu_r A} \quad (3-23)$$

$$\varphi_m = \frac{N_1 I_{\max}}{R_m} \quad (3-24)$$

۳-۳- اندازه‌گیری خواص مغناطیسی نوار و ورق فولاد الکتریکی با آزمایش یک ورق

هدف از این بخش تعریف اصول کلی و جزئیات فنی اندازه‌گیری خواص مغناطیسی ورق‌های مغناطیسی با استفاده از آزمایش تک ورق است. این بخش در فرکانس‌های قدرت برای نوار و ورق مغناطیسی کاربرد دارد. آزمون تک ورق برای آزمایش نمونه‌هایی از ورق‌ها و نوارهای مغناطیسی با هر کیفیتی، قابل استفاده است. مشخصه‌های مغناطیسی برای یک ولتاژ القایی سینوسی، مقادیر بیشینه مشخص قطبش مغناطیسی و برای یک فرکانس مشخص تعیین می‌شود. اندازه‌گیری‌ها در دمای محیطی 23 ± 5 درجه سانتی‌گراد روی نمونه‌های آزمایشی که از قبل مغناطیس‌زدایی شده‌اند صورت می‌پذیرد.

۳-۳-۱ اصول کلی

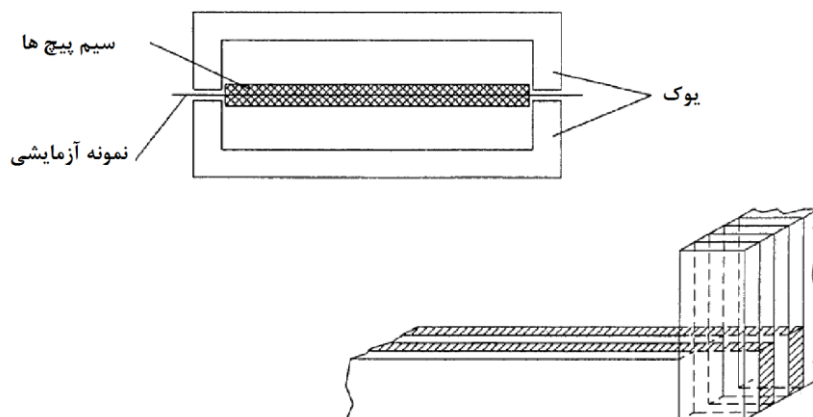
۳-۳-۱-۱ روش اندازه‌گیری

نمونه آزمایشی شامل یک نمونه از ورق مغناطیسی است و در داخل دو سیم‌پیچ قرار می‌گیرد.

- یک سیم‌پیچ اولیه خارجی (سیم‌پیچ مغناطیسی)

- یک سیم‌پیچ ثانویه داخلی (سیم‌پیچ ولتاژ)

همان‌طور که در شکل ۳-۷ نشان داده شده است، مسیر شار توسط یک مدار مغناطیسی متشکل از دو یوغ یکسان بسته می‌شود که مقطع آن در مقایسه با نمونه آزمایشی بسیار بزرگ است.



شکل ۳-۷: شماتیک دستگاه [۲۲]

برای به حداقل رساندن اثرات فشار بر روی نمونه آزمایشی، یوغ بالایی باید به گونه‌ای معلق شود. همچنین باید اطمینان حاصل شود که تغییرات دما زیر سطح معینی باشد تا باعث ایجاد استرس در نمونه آزمایشی به علت انبساط یا انقباض حرارتی نشود.

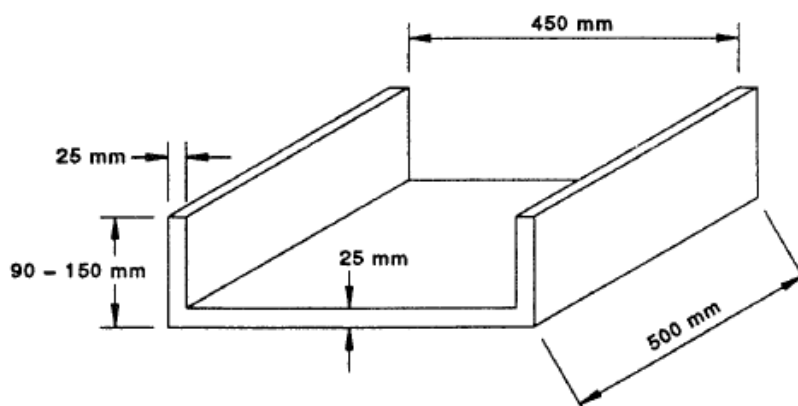
۳-۳-۱-۲ تجهیزات آزمایش

- یوغ‌ها

هر یوغ به شکل U ساخته شده از صفحات عایق فولاد سیلیکون یا آلایز آهن-نیکل است. یوغ باید دارای کمترین مقاومت بوده و تلفات کل مشخص نباید بیشتر از 1 W/kg در چگالی شار $1/5 \text{ T}$ و فرکانس 50 Hz باشد. قبل از استفاده، یوغ‌ها باید از یک چگالی شار مغناطیسی با شدت بالاتر از بیشترین چگالی شار مغناطیسی مورد استفاده از آن با دقت مغناطیس‌زدایی شوند. همان‌طور که در شکل ۳-۷ نشان داده شده است، به منظور کاهش تأثیر جریانهای گردابی و ارائه توزیع همگن‌تر از شار موجود در یوغ‌ها، آنها باید از

یک جفت هسته C یا چسباندن دسته‌ای از لمینیت‌ها ساخته شود که در این صورت گوشه‌ها باید اتصالات لب به لب داشته باشند. یوغ باید دارای قطب‌هایی با ضخامت 25 ± 1 میلی‌متر باشد. دو طرف هر یوغ باید با فاصله‌ای در حدود 0.5 میلی‌متر روی صفحه باشد و فاصله بین دو قطب مخالف نباید در هر نقطه‌ای بیش از 0.05 میلی‌متر باشد. همچنین، برای جلوگیری از ایجاد تنش‌های مکانیکی در نمونه آزمایشی، یوغ‌ها باید محکم باشند.

ارتفاع هر یوغ باید بین 90 تا 150 میلی‌متر باشد. هر یوغ باید دارای پهنای 500 ± 5 میلی‌متر و طول جانبی 450 ± 1 میلی‌متر باشد که در شکل ۸-۳ نشان داده شده است.



شکل ۸-۳: ابعاد یوغ [۲۲]

باید یک تکیه‌گاه غیر مغناطیسی و غیر هادی بین شاخه‌های عمودی یوغ و نمونه آزمایشی قرار گرفته باشد. این تکیه‌گاه باید در مرکز همان صفحه‌ای که مقابل قطب‌ها است قرار گیرد تا نمونه آزمایشی بدون شکاف در تماس مستقیم با قطب باشد. یوغ بالایی باید قابل حرکت باشد تا قابلیت جابجایی نمونه‌ی آزمون وجود داشته باشد. پس از قرار دادن نمونه، یوغ بالایی باید دقیقاً روی یوغ پایین تنظیم شود. یوغ بالایی باید بخشی از وزن خود را متعادل سازد تا نیرویی را در نمونه آزمایشی بین 100 نیوتون و 200 نیوتون ایجاد کند.

به منظور محاسبه تلفات موجود در یوغ، تلفات یوغ ساخته شده از ورق فولاد الکتریکی^۱ در واحد جرم آن در فرکانس و چگالی شارهای مغناطیسی مختلف بر اساس اطلاعات کارخانه سازنده ورق‌های این ماده در پیوست نشان داده شده است [۴۰].

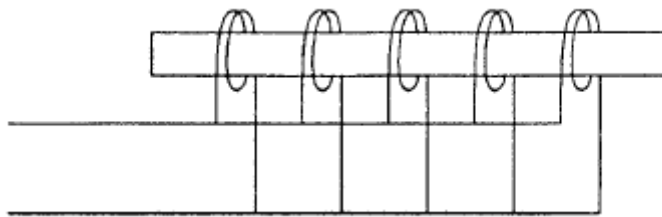
- سیم‌پیچ‌ها

سیم‌پیچ‌های اولیه و ثانویه باید حداقل 440 میلی‌متر طول داشته باشد و باید غیر هادی، بدون مغناطیس‌شدگی و به حالت مستطیلی پیچیده شود. ابعاد قالب باید به شرح زیر باشد:

- طول: 445 ± 2 mm
- عرض داخلی: 510 ± 1 mm
- ارتفاع داخلی: 5 mm
- ارتفاع: $15 \geq$ mm

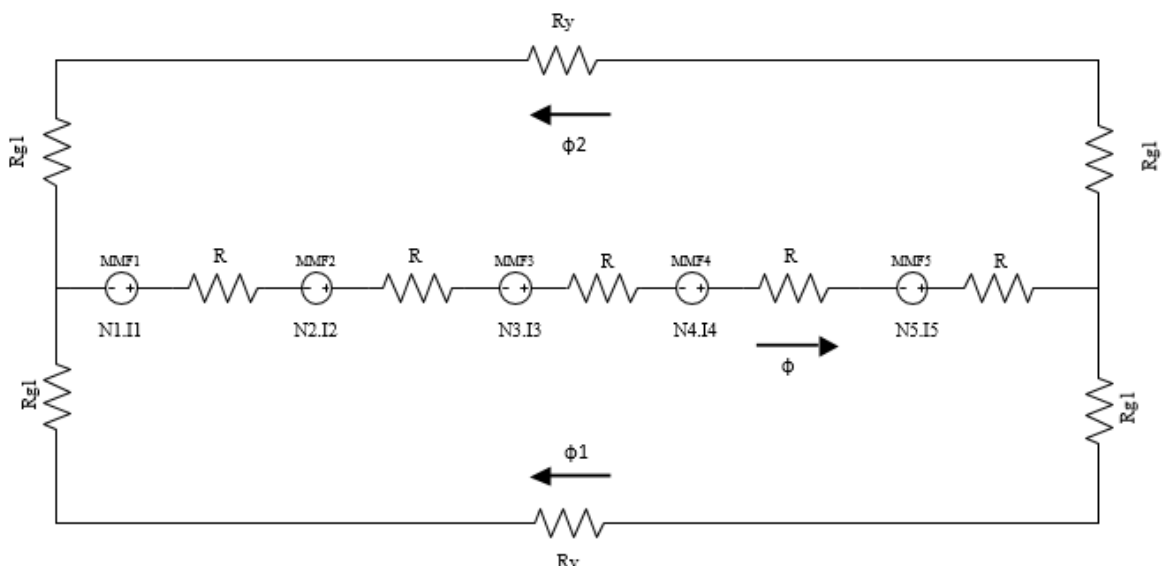
سیم‌پیچ اولیه می‌تواند ساخته شود از:

- پنج سیم‌پیچ یا بیشتر که دارای ابعاد و تعداد دور یکسان بوده و به صورت موازی در کل طول نمونه متصل شده‌اند، همان‌طور که در شکل ۹-۳ نشان داده شده است. به عنوان مثال، با پنج سیم‌پیچ، هر سیم‌پیچ می‌تواند از ۴۰۰ دور سیم مسی با قطر ۱ میلی‌متر ساخته شده و در پنج لایه پیچیده شود.
- یا یک سیم‌پیچ پیوسته و یکنواخت که کل طول را می‌گیرد. به عنوان مثال، این سیم‌پیچ می‌تواند از ۴۰۰ دور سیم مسی با قطر ۱ میلی‌متر ساخته شود که در یک یا چند لایه پیچیده شده است. تعداد دورها در سیم‌پیچ ثانویه بستگی به مشخصه‌های ابزار اندازه‌گیری دارد.

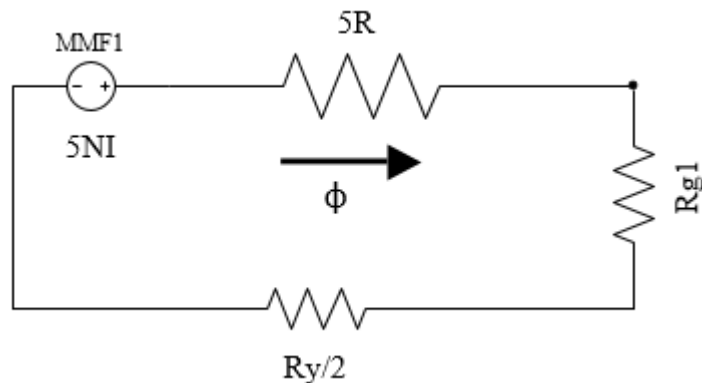


شکل ۹-۳: نحوه اتصالات پنج سیم‌پیچ اولیه [۲۲]

با توجه به روش اندازه‌گیری خواص مغناطیسی یک ورق مغناطیسی و الزامات آن، مدار معادل مغناطیسی آن با فرض استفاده از پنج سیم‌پیچ که دارای ابعاد و تعداد دور یکسان بوده و به صورت موازی در کل طول نمونه متصل شده‌اند به صورت شکل ۱۰-۳ خواهد بود. شکل ۱۱-۳ مدار معادل مغناطیسی ساده شده آزمایش یک ورق مغناطیسی را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰-۳: مدار معادل مغناطیسی آزمایش ورق



شکل ۱۱-۳: مدار معادل ساده شده آزمایش ورق

۳-۳-۱-۳- جبران سازی شار هوایی

جبران سازی برای اثر شار جریان هوا بایستی صورت پذیرد. به عنوان مثال، این جبران سازی می تواند با یک سلف متقابل حاصل شود. سیم پیچ اولیه سلف متقابل به صورت سری با سیم پیچ اولیه دستگاه آزمایش متصل می شود، در حالی که سیم پیچ ثانویه سلف متقابل به سیم پیچ ثانویه دستگاه آزمایش به صورت سری مخالف متصل می شود.

مقدار سلف متقابل باید طوری تنظیم شود که هنگام عبور جریان متناوب از سیم پیچ های اولیه در صورت عدم وجود نمونه در دستگاه، ولتاژ اندازه گیری شده بین ترمینال های غیر مشترک سیم پیچ های ثانویه نباید بیش از ۱٪ درصد از ولتاژ ظاهر شده در سیم پیچ ثانویه دستگاه آزمایش باشد. بنابراین، مقدار متوسط ولتاژ یکسو شده القایی که در سیم پیچ های ثانویه ایجاد شده است، متناسب با مقدار حداکثر قطبش مغناطیسی در نمونه آزمایشی است.

۳-۳-۱-۴- نمونه آزمایشی

طول نمونه آزمایشی نباید کمتر از ۵۰۰ میلی متر باشد. اگرچه بخشی از نمونه در خارج از طرف قطب تاثیر زیادی بر اندازه گیری ندارد، این بخش نباید طولانی تر از مقدار لازم برای تسهیل در جابجایی نمونه آزمایشی باشد. عرض نمونه آزمایشی باید تا حد ممکن بزرگ باشد و حداکثر برابر با عرض یوغ باشد. برای دقت حداکثر، حداقل عرض نباید کمتر از ۶۰ درصد عرض یوغ باشد.

نمونه آزمون باید بدون ایجاد سوراخ های بیش از حد و یا اعوجاج مکانیکی قطع شود و به صورت تخت باشد. هنگامی که یک نمونه آزمایشی بریده شود، لبه نوار به عنوان جهت مرجع گرفته می شود. ملاحظات زیر برای زاویه بین جهت برش و غلتش مجاز است:

۱°± برای صفحه فولادی grain oriented

۵°± برای صفحه فولادی non-oriented

برای صفحه فولادی non-oriented، دو نمونه باید برش داده شود، یکی موازی با جهت غلتش و دیگری عمود بر قطعه دیگر، مگر اینکه نمونه آزمون مربعی باشد که در این صورت تنها یک نمونه آزمایشی لازم است.

۳-۳-۱-۵- منبع تغذیه

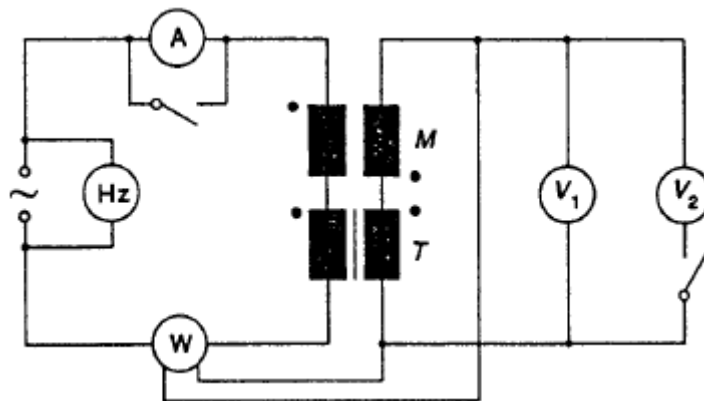
منبع تغذیه باید با امپدانس داخلی کم و از لحاظ ولتاژ و فرکانس بسیار پایدار باشد. در طول اندازه گیری، ولتاژ و فرکانس باید در $\pm 0.2\%$ ثابت نگه داشته شود. علاوه بر این، شکل موج ولتاژ القایی ناشی از ثانویه باید تا حد ممکن به صورت سینوسی حفظ شود. بهتر است که ضریب ولتاژ ثانویه در حدود $\pm 1\%$ از $1/111$ حفظ شود. می توان با استفاده از روش های مختلف، به عنوان مثال با استفاده از یک تقویت کننده با فیدبک الکترونیکی به آن دست یافت.

۳-۳-۲ تعیین تلفات کل هسته

در این قسمت، اصول اندازه‌گیری تلفات هسته با استفاده از تجهیزات اندازه‌گیری ارائه شده و همچنین تلفات هسته با استفاده از خواص مغناطیسی مواد مغناطیسی محاسبه می‌شود.

۳-۳-۲-۱ اصول اندازه‌گیری

آزمایش تک ورق با نمونه آزمایشی نشان‌دهنده یک ترانسفورماتور خالی است که تلفات کل آن توسط مدار نشان داده شده در شکل ۳-۱۲ اندازه‌گیری می‌شود.



شکل ۳-۱۲: مدار تعیین تلفات کل مغناطیسی [۲۲]

که در آن:

V_1 : اندازه‌گیری متوسط ولتاژ یکسوسده

V_2 : اندازه‌گیری ولتاژ r.m.s

M : سلف متقابل

T : قاب مورد آزمایش است.

۳-۳-۲-۲ وسایل اندازه‌گیری

- ولت‌متر نوع متوسط

ولتاژیکسو شده ثانویه دستگاه آزمایش باید با یک ولت‌متر معمولی اندازه‌گیری شود. ابزار ترجیحی یک ولت‌سنج دیجیتال با دقت $\pm 0.2\%$ می‌باشد. بار مدار ثانویه باید تا حد ممکن کوچک باشد. در نتیجه، مقاومت داخلی ولت‌متر نوع متوسط باید حداقل Ω/V ۱۰۰۰ باشد.

- ولت‌متر r.m.s

ولت‌متری است که به منظور اندازه‌گیری مقادیر r.m.s باید استفاده شود. ابزار ترجیحی یک ولت‌سنج دیجیتال با دقت $\pm 0.2\%$ است.

- اندازه‌گیری فرکانس

یک فرکانس متر با دقت $\pm 0.1\%$ باید مورد استفاده قرار گیرد.

- اندازه‌گیری توان

توان باید توسط یک وات‌متر با دقت $\pm 0.5\%$ یا بهتر در ضریب قدرت واقعی اندازه‌گیری شود. مقاومت مدار ولتاژ وات‌متر باید حداقل $100 \Omega/V$ برای تمام محدوده‌ها باشد. در صورت لزوم، باید تلفات مدار ثانویه از مقدار تلفات نشان داده شده کم شود. مقاومت الکتریکی مدار ولتاژ وات‌متر حداقل ۵۰۰۰ برابر راکتانس آن است. اگر یک دستگاه اندازه‌گیری جریان در مدار قرار داشته باشد، هنگام تنظیم ولتاژ ثانویه و اندازه‌گیری تلفات باید اتصال کوتاه شود.

۳-۳-۲-۳- اندازه‌گیری تلفات کل هسته با استفاده از مشخصات ورق مغناطیسی

همان‌طور که در بخش قبل اشاره شد، تلفات ترانس شامل تلفات اهمی و تلفات هسته بوده که تلفات هسته نیز خود شامل تلفات هیستریزیس و تلفات جریان گردابی است. در این قسمت، تلفات هیستریزیس از رابطه (۳-۱۲) و تلفات فوکو از رابطه (۳-۱۳) محاسبه می‌شود. جهت محاسبه تلفات جریان گردابی در این پروژه با توجه به مرجع [۴۱]، ثابت فوکو (ضریب K_e) برای ورق با ضخامت d و چگالی شار p_v و رسانایی الکتریکی σ از رابطه (۳-۲۵) تخمین زده می‌شود.

$$K_e = \frac{\pi^2 \sigma}{6 \rho_v} d^2 \quad (3-25)$$

۳-۳-۳- دستورالعمل روش طراحی اندازه‌گیری خواص مغناطیسی ورق مغناطیسی بر اساس استاندارد IEC 60404-3

در این قسمت، به منظور جمع‌بندی طراحی الگوریتم اندازه‌گیری خواص مغناطیسی ورق مغناطیسی با استفاده از نمونه تروئید، دستورالعمل این الگوریتم به طور خلاصه بر اساس استاندارد IEC 60404-3 ارائه می‌شود.

۳-۳-۳-۱- ورودی‌های لازم برای طراحی

به منظور شروع مرحله طراحی، براساس استاندارد IEC 60404-3 و مشخصه‌های ذاتی ماده مغناطیسی، لازم است پارامترهایی به عنوان ورودی در اختیار طراح قرار گیرد. این پارامترها عبارتند از:

- جرم ورق مغناطیسی نمونه موجود بر حسب کیلوگرم (m (kg))
- عرض ورق مغناطیسی بر حسب متر (x (m))
- طول ورق مغناطیسی بر حسب متر (y (m))
- ضخامت ورق مغناطیسی بر حسب متر (d (m))
- فرکانس بر حسب هرتز (f (Hz))
- تعداد دور سیم‌پیچ اولیه بر اساس استاندارد (N_1)
- نفوذپذیری نسبی مربوط به نمونه ماده مغناطیسی (μ_r)
- چگالی ماده مغناطیسی نمونه بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب (kg/m^3)
- چگالی شار بیشینه ماده مغناطیسی نمونه بر حسب تسلا (B_m (T))
- ثابت مغناطیسی (μ_0)
- رسانایی ورق مغناطیسی (σ)
- چگالی جریان بر حسب آمپر بر میلی‌متر مربع (δ (A/mm²))

- ثابت اشتینمتز و ثابت هیستریزیس برای محاسبه تلفات هیستریزیس (K_h, n)

۳-۳-۳-۲- طراحی نمونه آزمایشی استاندارد و اندازه‌گیری مشخصات مغناطیسی

در این قسمت، با در اختیار داشتن ورودی‌های ارائه شده در بخش قبل، به طراحی مشخصات مربوط به ابعاد نمونه مغناطیسی، ولتاژ و جریان اولیه سیم‌پیچ، تعداد دور ثانویه، مشخصه‌های مغناطیسی، تلفات و امپدانس مدار معادل ترانس ساخته شده پرداخته می‌شود. در مرحله اول با داشتن ضخامت ورق و عرض آن از ورودی، سطح مقطع ورق A مشخص می‌شود. سطح مقطع ورق بر اساس استاندارد IEC 60404-3 از رابطه (۳-۳۲) نیز قابل محاسبه است.

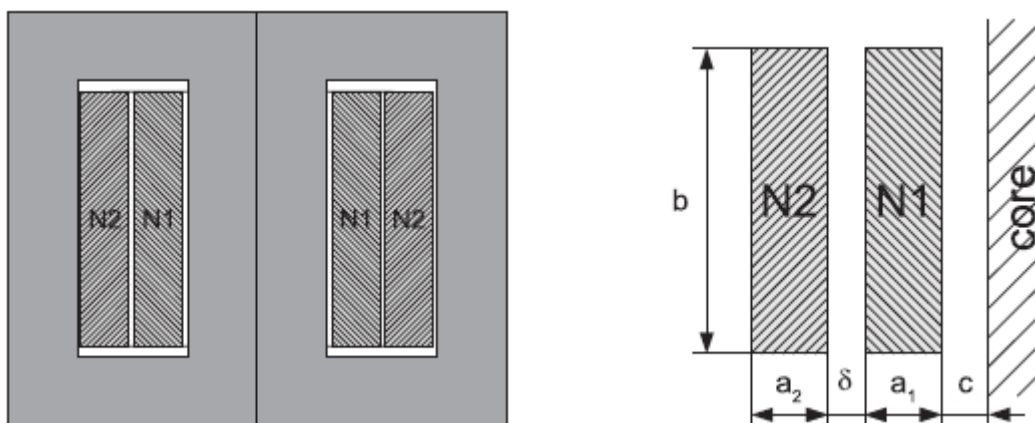
$$A = \frac{m}{l \rho_v} \quad (3-26)$$

که در آن m جرم ورق بر حسب کیلوگرم، l طول ورق بر حسب متر، ρ_v چگالی ورق بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب است. حجم ورق نیز از حاصلضرب A در طول ورق حاصل می‌شود. در مرحله دوم، اندوکتانس کل L_{tot} ، از رابطه (۳-۵) محاسبه می‌گردد. اندوکتانس پراکندگی L_{Leak} نیز از روش Rogowski ارائه شده در مرجع [۴۲] استفاده شده است و از رابطه (۳-۲۷) محاسبه شده که از اختلاف این دو اندوکتانس، اندوکتانس مغناطیسی L_m قابل محاسبه است.

$$L_{Leak} = \mu_0 \cdot N^2 \cdot l_m \cdot \lambda \cdot k_\sigma \quad (3-27)$$

که در آن L_{Leak} اندوکتانس نشتی، μ_0 نفوذپذیری مطلق، N_1 تعداد دورهای اولیه، l_m طول متوسط در هر دور برای همه سیم‌پیچ‌ها، λ ضریب رسانایی مربوطه و k_σ ضریب Rogowski (در بیشتر موارد بین ۰/۹ تا ۱) است. ضریب رسانایی λ از رابطه (۳-۲۸) محاسبه می‌شود. مدل ترانس در این حالت به صورت نشان داده شده در شکل ۳-۱۳ در نظر گرفته می‌شود.

$$\lambda = \frac{1}{b} \left(\delta + \frac{a_1 + a_2}{3} \right) \quad (3-28)$$



شکل ۳-۱۳: طرح ترانسفورماتور استفاده شده برای محاسبه اندوکتانس نشتی با روش Rogowski [۴۲]

با داشتن طول سیم‌پیچی از تعداد دور آن و مقاومت ویژه سیم، مقاومت اهمی مدار معادل R_1 حاصل می‌شود و با داشتن راکتانس مغناطیسی X_m ، جریان مغناطیس‌کنندگی از رابطه (۳-۲۹) قابل محاسبه است.

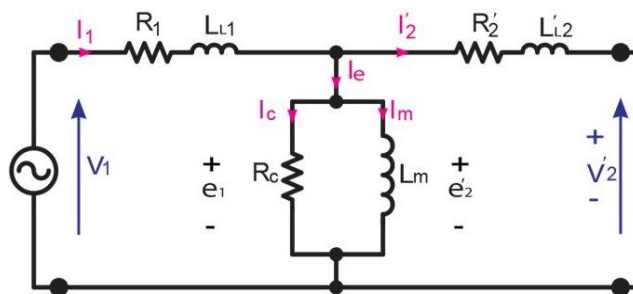
$$\frac{e_1}{X_m} = \vec{i}_m \angle -90 \quad (3-29)$$

در مرحله سوم، تلفات کل مدار مغناطیسی P_t که شامل تلفات ورق و یوغ $(P_{core} + P_{yoke})$ است محاسبه می‌گردد. تلفات هسته همان‌طور که در بخش قبل توضیح داده شد محاسبه شده و جهت محاسبه تلفات یوغ، تلفات بر واحد حجم ماده تشکیل دهنده یوغ در حجم یوغ‌ها ضرب می‌شود. به این ترتیب، مقاومت R_c از رابطه (۳-۳۰) و از آنجا i_c از رابطه (۳-۳۱) قابل محاسبه است.

$$R_c = \frac{e_1^2}{P_t} \quad (3-30)$$

$$\vec{i}_c = \frac{e_1}{R_c} \quad (3-31)$$

در نهایت جریان i_1 از جمع برداری جریان i_c و جریان i_m محاسبه می‌شود. در مرحله چهارم و پس از تعیین پارامترهای مدار معادل ترانس، به محاسبه تلفات یوغ و تعیین پارامترهای مدار معادل مغناطیسی با وجود یوغ‌ها می‌پردازیم. مدار معادل ترانس حاصل از آزمایش ورق مغناطیسی در شکل ۳-۱۴ نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۴: مدار معادل ترانس برای آزمایش ورق مغناطیسی

شکل ۳-۱۵ نمایشی از نحوه پیاده‌سازی محاسبات در نرم‌افزار اکسل را برای آزمایش ورق مغناطیسی نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که ماده مغناطیسی مورد نظر ورق فولاد الکتریکی isovac 530-50 A [۴۳] بوده و یوغ نیز از ورق‌های فولاد الکتریکی isovac 270-50 A [۴۴] تشکیل شده است که محاسبات مغناطیسی بر مبنای آن صورت پذیرفته است. لازم به ذکر است که سائز سیم‌ها بر اساس استاندارد AWG و ثابت هیستریزس و جریان گردابی در فایل اکسل ضمیمه شده است.

Input list		
Input	description	Amount
m (kg)	mass of the test specimen	0.778
f (Hz)	frequency	50
ρ_v (kg/m ³)	density of the test material	7780
x (m)	width of the test specimen	0.4
y (m)	length of the test specimen (accuracy of $\pm 0,1$ %)	0.5
N1	number of turns of the primary winding	400
μ_0 (h/m)	magnetic constant	1.2566E-06
μ_r	relative permeability of the specimen	304.93
d (m)	thickness of the sheet or diameter of the wire	0.0005
ρ ($\Omega \cdot m$)	Specific electrical resistance	0.000000311
σ	Electrical conductivity of the specimen	3215434.084
Bs (T)	peak magnetic flux density	1.67068
δ (A/mm ²)	current density	3.1
n	Steinmetz's Coefficients	1.65
Kh	hysteresis Coefficients	73
Ke	eddy current Coefficients	0.000169951
H _{sat} (A/m)	saturated magnetic field strength	4360.096129
Vp-2 (Volt)	maximum voltage in secondary of the specimen	29.6712768
calculation of Test specimen dimensions		
Output	description	Amount
A (m ²)	cross-sectional area of the specimen	0.0002
V (m ³)	volume of the specimen	0.0001
calculation of voltage and current		
Vp-1 (Volt)	maximum voltage in output of amplifier	390498+28.079
ABS(Vp)		49.45138817
Ep-1 (Volt)	maximum voltage in primary of the specimen	29.6712768
I-max1 (A)	maximum current of the specimen	501573+5.47698

(الف)

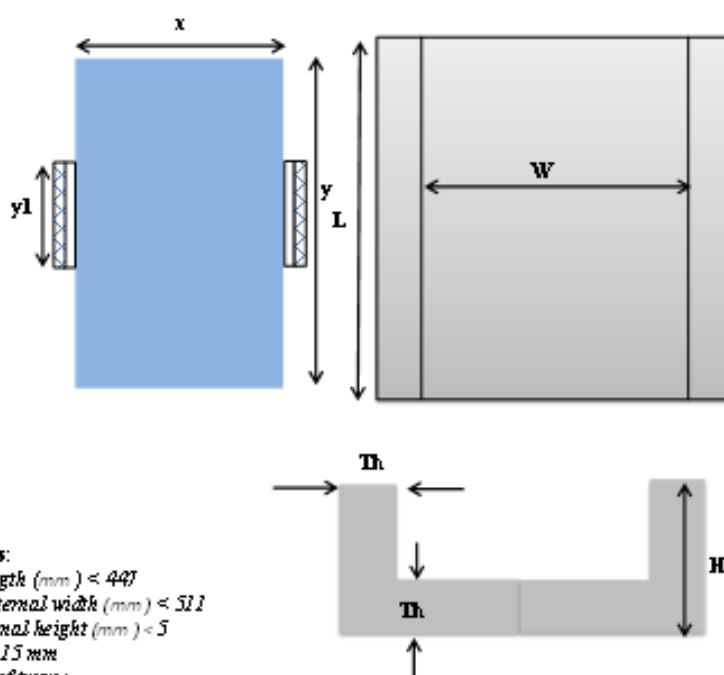
calculation of magnetic properties and windings		
L1 (H)	1 effective inductance of the magnetizing sheet specimen	0.122616012
Ltot (H)	active inductance of the magnetizing sheet specimen winding	0.024402909
phi-sat (Wb)	maximum magnetic flux of the specimen	0.000334136
N1	number of turns of the magnetizing winding	400
N2	number of turns of the secondary winding	400
R (AT/Wb)	reluctance	6524433.358
F (A.Turn)	magnetomotive force	06292+2190.79
N'2	number of secondary turns based on frequency Eq.	134.8105114
Z1(Ω)	Impedance1	308+0.12211270
Zx (Ω)	Magnetic Impedance	7846211+7.5169
Zin (Ω)	Input Impedance	784621+7.63907
calculation of specific total loss and impedance		
a (mm ²)	calculated cross-sectional area of primary winding	5502355+1.7667
a (mm ²)	standard cross-sectional area of primary winding	1.65
Ph (W/m ³)	hysteresis power loss	8512.688973
Pe (W/m ³)	eddy current power loss	1.185903788
Py (W)	Yoke power loss	2.40975
P tot (W)	Total power loss	7.006174
Pn (W/kg)	Sheet inherent power loss	5.908
Pn (W)	Total power loss of the sheet	4.596424
Rc (Ω)	Magnetic reluctance	125.6584074
Ic (A)	reluctance current	2361264750157
Im (A)	Magnetic reactance current	4769864143606
Lm (H)	Magnetic inductance	0.024014201
Xm (Ω)	Magnetic reactance	5440610993544
Pcu (W)	Total ohmic losses	130633+11.2411
Ze _q (Ω)	Total Transformer impedance	784621+7.63907
ρ (Ω/km)	Resistivity	10.44352
R1 (Ω)	Electrical resistance	1346103808

(ب)

calculation of Yoke losses and resistance		isovac 270-50
Th (m)	Thickness of the yoke	0.025
Ay (m ²)	Calculated cross-sectional area of the yoke	0.0125
μ_0 (h/m)	Magnetic constant	1.2566E-06
μ_r	Relative permeability of the yoke	60746.1615
By (T)	Peak magnetic flux density	0.02673088
Hy (A/m)	saturated magnetic field strength	0.350184856
ρ_v (kg/m ³)	density of the yoke material	7650
l (m)	Length of magnetic math of the yoke	0.63
g (m)	gap between the yoke and specimen	0.0005
Ry (AT/Wb)	reluctance of the yoke	660.2594726
Rg (AT/Wb)	air gap reluctance	31831.92742
R (AT/Wb)	reluctance of specimen	6524433.358
Phi_eq (Wb)	magnetic flux of the equal curcuit	0.000334136
e1	primary voltage of circuit	29.6712768
Py (W/kg)	Typical yoke loss	0.02
V (m ³)	Volume of two yokes	0.01575
my (Kg)	mass of the yoke	120.4875
L (H)		121.1644866
calculation of Leakage inductance		
L _{leak} (H)	Total Leakage Inductance	0.000388708
μ_0 (h/m)	magnetic constant	1.2566E-06
λ	relative leakage conductance	0.004296296
K σ	Rogowski factor	0.9
b (m)	Specific total loss range	0.45
a1 (m)	reluctance of yoke	0.0014
a2 (m)	air gap reluctance	0.0014
δ (m)		0.001
Z1 (Ω)	Impedance	4.347818973
e1 (V)		#VALUE!

(ج)

specimen size: 300 mm < x < 500 mm y ≈ 500 mm	Core losses: $P_h = K_h f \cdot B \cdot \sigma^n \text{ (W/m}^3\text{)}$ $P_e = K_e f^2 \cdot B \cdot \sigma^2 \text{ (W/m}^3\text{)}$ $1.5 < n < 2.5$ $K_e = \frac{\pi^2 \sigma}{6 \rho_p} d^2$	Yoke size: $90 < H \text{ (mm)} < 150$ $24 < T_h \text{ (mm)} < 26$ $449 < W \text{ (mm)} < 451$ $495 < L \text{ (mm)} < 505$ $100 < \text{upper yoke force (N)} < 200$



Windings:
443 < length (mm) < 447
509 < internal width (mm) < 511
3 < internal height (mm) < 5
height ≤ 15 mm
number of turns:
400 turns of copper wire 1 mm in diameter

(د)

شکل ۱۵-۳: پیاده‌سازی محاسبات در نرم‌افزار اکسل برای آزمایش مواد ورق مغناطیسی

۳-۴- روش‌های اندازه‌گیری خواص مغناطیسی نوار و ورق الکتریکی با استفاده از قاب اپستین

هدف از این بخش تعریف اصول کلی و جزئیات فنی اندازه‌گیری خواص ورق و نوار فولادی الکتریکی oriented و non-oriented با استفاده از قاب اپستین و با استناد به استاندارد IEC 60404-2 [۲۱] است. این قسمت برای اندازه‌گیری a.c خواص مغناطیسی در فرکانس‌های تا ۴۰۰ هرتز و اندازه‌گیری‌های مغناطیسی d.c کاربرد دارد.

قاب اپستین برای آزمایش نمونه‌هایی که از ورق‌های فولادی الکتریکی و نوارهایی در هر درجه استفاده می‌شود، قابل اجرا است. ویژگی‌های مغناطیسی a.c برای ولتاژهای القایی سینوسی، در مقادیر بیشینه مشخصی از قطبش مغناطیسی و در فرکانسی مشخص، تعیین می‌شود. اندازه‌گیری‌ها باید در دمای محیطی مشخص (23 ± 5 درجه سانتی‌گراد) بر روی آزمون انجام شود.

۳-۴-۱ اصول کلی اندازه‌گیری ac**۳-۴-۱-۱ اصول روش قاب اپستین ۲۵ سانتی متری**

قاب اپستین ۲۵ سانتی‌متر شامل یک سیم پیچ اولیه، یک سیم‌پیچ ثانویه و یک نمونه به‌عنوان هسته مورد آزمایش، یک ترانسفورماتور بدون بار را تشکیل می‌دهد که مشخصات آن در زیر شرح داده شده است.

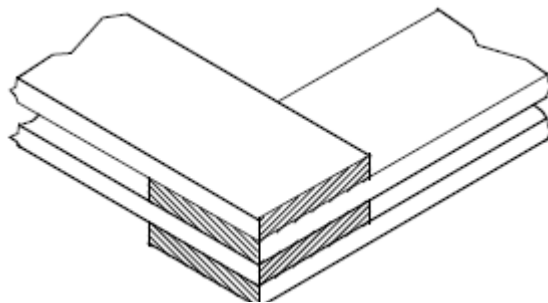
۳-۴-۱-۲ نمونه مورد آزمایش

همانطور که شکل ۱۶-۳ نشان می‌دهد، نوارهایی که مورد آزمایش قرار می‌گیرند در یک مربع جمع شده و دارای مفاصل دو لبه هستند، در نتیجه چهار شاخه از طول و مساحت مقطع مساوی را تشکیل می‌دهد. ابعاد نمونه عبارتند از:

$$b = 30 \pm 0.2 \text{ mm} \quad \text{پهنا}$$

$$280 \text{ mm} \leq l \leq 320 \text{ mm} \quad \text{طول}$$

طول نوارها باید با دامنه تغییرات $\pm 0.5 \text{ mm}$ برابر باشد.



شکل ۱۶-۳: مفاصل دو لبه [۲۱]

هنگامی که نوارها به صورت موازی یا نرمال در جهت نورد بریده می‌شوند، لبه ورق اصلی باید به عنوان جهت مرجع در نظر گرفته شود. دامنه تغییرات زیر باید برای زاویه بین جهت مشخص و واقعی برش اعمال شود.

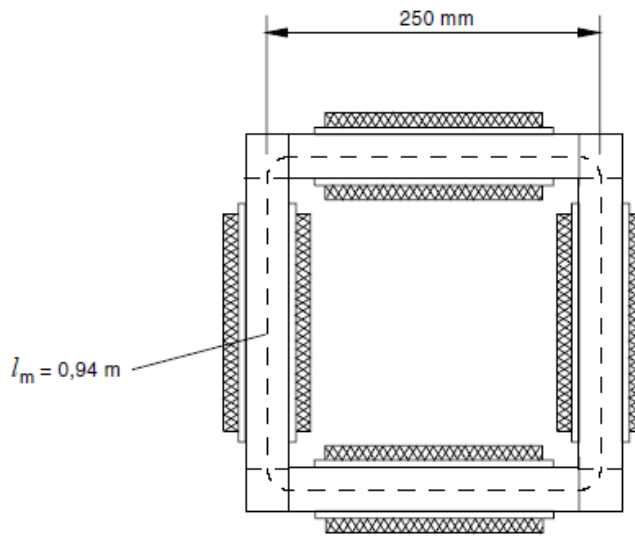
$\pm 90^\circ$ برای ورق فولاد grain oriented

$\pm 85^\circ$ برای ورق فولاد non-oriented

فقط نوار تخت استفاده شده و اندازه‌گیری باید بدون عایق اضافی انجام شود. تعداد نوارهایی که در نمونه آزمایشی مورد استفاده قرار می‌گیرد باید مضربی از چهار بوده و در استاندارد محصول مربوطه تعریف شده باشد. به هر حال، جرم مؤثر نمونه آزمایشی باید حداقل ۲۰ گرم برای ورقی به طول ۲۸۰ میلی‌متر باشد.

۳-۴-۱-۳ قاب اپستین ۲۵ سانتی‌متری

همانطور که شکل ۱۷-۳ نشان می‌دهد، قاب اپستین ۲۵ سانتیمتری (که بعد از این قاب اپستین نامیده می‌شود) باید از چهار سیم‌پیچ تشکیل شود که در آن نوارهایی که نمونه آزمایش را تشکیل می‌دهند وارد می‌شوند. یک القای متقابل برای جبران‌سازی شار هوایی همراه با قاب اپستین وجود دارد. قالب‌های سیم‌پیچی که سیم‌پیچی‌ها را پشتیبانی می‌کنند از مواد عایقی سخت، مانند کاغذ فنول ساخته شده است. آنها یک مقطع مستطیلی با عرض داخلی ۳۲ میلی‌متر دارند. ارتفاع حدود ۱۰ میلی‌متر توصیه می‌شود.



شکل ۱۷-۳: قاب اپستین ۲۵ سانتی‌متری [۲۱]

کویل‌ها باید روی یک پایه عایق و غیرمغناطیسی به شکل مربع نصب شود (شکل ۱۷-۳). طول دو طرف مربع که توسط لبه‌های داخلی نوار نمونه آزمایشی تشکیل شده است باید $220 + 1 \text{ mm}$ باشد.

هر چهار کویل باید دارای دو سیم‌پیچ باشد:

- یک سیم‌پیچ اولیه، در خارج (سیم‌پیچ مغناطیسی)
- یک سیم‌پیچ ثانویه، در داخل (سیم‌پیچ ولتاژ)

سیم‌پیچ‌ها باید به طور یکنواخت به طول حداقل ۱۹۰ میلی‌متر توزیع شوند، هر کویل دارای یک چهارم از مجموع دورها است. سیم‌پیچ‌های اولیه و سیم‌پیچ‌های ثانویه هر چهار سیم‌پیچ باید به صورت سری به هم متصل شوند. تعداد دورهای اولیه و ثانویه ممکن است با شرایط خاصی که در رابطه با منبع برق، اندازه‌گیری تجهیزات و فرکانس حاکم است، تعیین شود (به‌طور کلی تعداد کل دورهایی که استفاده و توصیه می‌شود ۷۰۰ یا ۱۰۰۰ دور است). به‌منظور کاهش اثر امپدانس سیم‌پیچ‌ها تا آنجا که امکان‌پذیر است، الزامات زیر باید رعایت شود.

$$\frac{R_1}{N_1^2} \leq 1.25 \times 10^{-6} \Omega$$

$$\frac{R_2}{N_2^2} \leq 5 \times 10^{-6} \Omega$$

$$\frac{L_1}{N_1^2} \leq 2.5 \times 10^{-9} H$$

$$\frac{L_2}{N_2^2} \leq 2.5 \times 10^{-9} H$$

که در آن

R_1 و R_2 مقاومت سیم‌پیچ‌های اولیه و ثانویه بر حسب اهم،

L_1 و L_2 اندوکتانس سیم‌پیچ‌های اولیه و ثانویه بر حسب هانری،

N_1 و N_2 تعداد کل دورهای سیم‌پیچ‌های اولیه و ثانویه هستند.

برای مثال اگر سیم‌پیچ‌هایی با مشخصات زیر استفاده شوند، این الزامات برقرار هستند:

- تعداد کل دورها: $N_1=700$ و $N_2=700$.

- سیم‌پیچ اولیه (بیرونی): هر کدام از چهار کویل حامل ۱۷۵ دور از دو سیم مسی متصل شده به صورت موازی، هر کدام با سطح مقطع $1/8 \text{ mm}^2$ ، که در کنار هم در سه لایه پیچیده شده است.
 - سیم‌پیچ ثانویه: هر کدام از چهار کویل حامل ۱۷۵ دور از دو سیم مسی متصل شده به صورت موازی، هر کدام با سطح مقطع $0/8 \text{ mm}^2$ ، که در یک لایه پیچیده شده است.
- طول مؤثر مسیر مغناطیسی l_m مدار مغناطیسی به طور معمول برابر با $0/94$ متر است. بنابراین، جرم فعال m_a ، که جرم نمونه آزمون است که فعال مغناطیسی است، توسط رابطه (۳-۳۲) حاصل می‌شود.

$$m_a = \frac{l_m}{4l} m \quad (3-32)$$

که در آن:

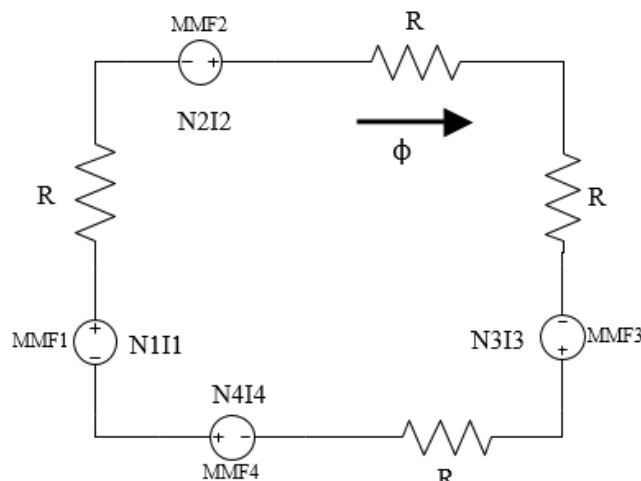
l طول نوار نمونه آزمایش بر حسب متر،

l_m طول مسیر مغناطیسی قراردادی بر حسب متر ($l_m = 0/94$)،

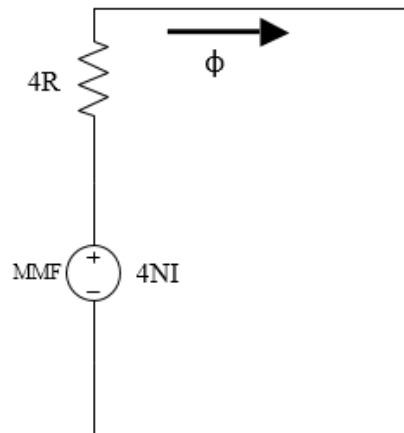
m وزن کل نمونه آزمایشی بر حسب کیلوگرم،

m_a وزن فعال نمونه آزمایشی بر حسب کیلوگرم است.

با توجه به روش اندازه‌گیری خواص مغناطیسی قاب اپستین ۲۵ سانتی‌متری و الزامات آن، مدار معادل مغناطیسی آن به صورت شکل ۳-۱۸ خواهد بود. شکل ۳-۱۹ مدار معادل ساده شده آزمایش اندازه‌گیری خواص مغناطیسی قاب اپستین ۲۵ سانتی‌متری را نشان می‌دهد.



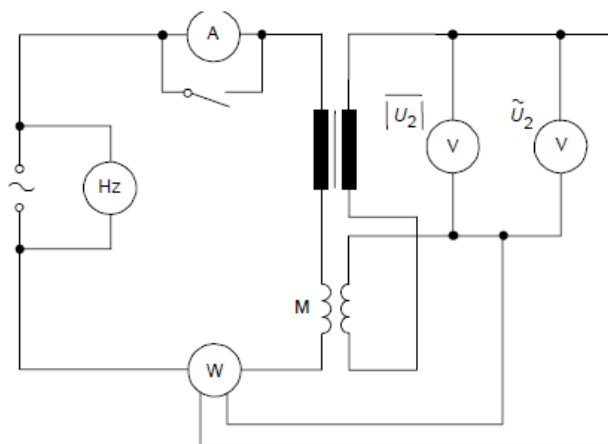
شکل ۳-۱۸: مدار معادل مغناطیسی آزمایش قاب اپستین



شکل ۱۹-۳: مدار معادل ساده شده آزمایش قاب اپستین

۳-۴-۱-۴- جبران سازی شار هوایی

القای متقابل برای جبران جریان شار باید در مرکز فضای محصور شده توسط چهار رشته قرار گیرد، محور آن به طور مستقیم به سطح محور این کویل‌ها هدایت می‌شود. سیم‌پیچ اولیه سلف متقابل باید به صورت سری با سیم‌پیچ اولیه قاب اپستین متصل شود و سیم‌پیچ ثانویه سلف متقابل باید به سیم‌پیچ ثانویه قاب اپستین در تقابل سری بصورت نشان داده شده در شکل ۲۰-۳ متصل شود که در این شکل، M سلف متقابل برای جبران سازی شار هوایی است.



شکل ۲۰-۳: مدار روش اندازه‌گیری وات‌متر [۲۱]

تنظیم مقدار القای متقابل باید طوری انجام شود که هنگام عبور جریان متناوب از میان سیم‌پیچ‌های اولیه در صورت عدم وجود نمونه در دستگاه، ولتاژ اندازه‌گیری شده بین ترمینال‌های غیرمشتک سیم‌پیچ‌های ثانویه نباید بیش از $\pm 0.1\%$ از ولتاژ نمایش داده شده در سیم‌پیچ ثانویه دستگاه تست به تنهایی باشد. بدین ترتیب، مقدار متوسط ولتاژ اصلاح شده که در سیم‌پیچ‌های ثانویه متصل شده است، متناسب با مقدار پیک قطبش مغناطیسی در نمونه مورد آزمون است.

۳-۴-۱-۵- منبع تغذیه

امپدانس منبع تغذیه باید کم بوده و ثبات زیادی در ولتاژ و فرکانس داشته باشد. در طول اندازه‌گیری، تغییرات ولتاژ و فرکانس نباید از $\pm 0.2\%$ مقدار مورد نیاز تجاوز کند. برای تعیین تلفات کل ویژه، مقدار توان ظاهری ویژه و مقدار r.m.s شدت میدان مغناطیسی، فاکتور ولتاژ ثانویه باید $1/111 \pm 1\%$ باشد.

این به روش‌های مختلفی ممکن است: به عنوان مثال با استفاده از یک منبع تغذیه کنترل شده الکترونیکی یا تقویت‌کننده توان با فیدبک منفی. فاکتور ولتاژ ثانویه، نسبت مقدار $r.m.s.$ به مقدار متوسط یکسوشده آن است.

باید دو ولت‌متر، یکی به منظور اندازه‌گیری مقادیر $r.m.s.$ و دیگری به منظور اندازه‌گیری مقادیر متوسط یکسوشده برای تعیین فاکتور استفاده شود. شکل موج ولتاژ القایی ثانویه باید با اسیلوسکوپ بررسی شده تا اطمینان حاصل شود که تنها مولفه اصلی وجود دارد.

۱-۴-۳- اندازه‌گیری ولتاژ

ولتاژ ثانویه قاب اپستین باید با استفاده از ولت‌متر مناسب با امپدانس ورودی بیشتر یا برابر $1000 \Omega/V$ اندازه‌گیری شود. یک ولت‌متر که مقادیر متوسط یکسوشده را با دقت $\pm 0.2\%$ یا بهتر اندازه‌گیری می‌کند، برای اندازه‌گیری ولتاژ متوسط مورد استفاده قرار می‌گیرد. یک ولت‌متر نیز که مقادیر rms را با دقت $\pm 0.2\%$ یا بهتر اندازه‌گیری می‌کند، برای اندازه‌گیری ولتاژ rms مورد استفاده قرار می‌گیرد. ولت‌متر دیگری نیز به منظور اندازه‌گیری مقادیر بیشینه با دقت $\pm 0.5\%$ یا بیشتر باید مورد استفاده قرار گیرد.

۱-۴-۳- اندازه‌گیری فرکانس

یک فرکانس متر با دقت $\pm 0.1\%$ یا بیشتر باید مورد استفاده قرار گیرد.

۱-۴-۳- اندازه‌گیری توان

توان باید توسط یک وات‌متر با دقت $\pm 0.5\%$ یا بیشتر در ضریب قدرت حقیقی مورد استفاده قرار گیرد. مقاومت مدار ولتاژ وات‌متر باید حداقل ۵ هزار برابر راکتانس آن باشد. اگر یک دستگاه اندازه‌گیری جریان در مدار وجود داشته باشد، هنگامی که ولتاژ ثانویه تنظیم شده و تلفات اندازه‌گیری می‌شود، باید آن را اتصال کوتاه نمود.

۲-۴-۳ روش اندازه‌گیری تلفات کل

در این بخش، روش اندازه‌گیری تلفات کل با استفاده از تجهیزات اندازه‌گیری و با استفاده از مشخصات ماده مغناطیسی ارائه می‌شود. به منظور اندازه‌گیری تلفات کل با استفاده از تجهیزات اندازه‌گیری، قاب اپستین و تجهیزات اندازه‌گیری باید به صورت نشان داده شده در شکل ۲۰-۳ متصل شوند. نمونه آزمایشی باید وزن شده و جرم آن با دقتی در حدود $\pm 0.5\%$ تعیین شود. پس از توزین، نوارها باید در کویل‌های قاب اپستین با فواصل دو لبه در گوشه‌ها و با تعداد نوارهای مشابه در هر شاخه‌ای از قاب چیده شوند، به طوری که طول بخش داخلی مربع 220 میلی‌متر باشد. در جایی که نوارها نصف موازی و نصف عمود بر جهت نورد بریده می‌شوند، نوارهایی که در جهت نورد بریده می‌شوند، باید در دو شاخه‌ی متقابل قاب و آن‌هایی که عمود بر جهت نورد قرار داده شده در دو شاخه دیگر قرار گیرند. باید اطمینان حاصل شود که فاصله هوایی بین نوارها در قسمت‌های همپوشانی تا حد ممکن کوچک باشد. نیروی حدود ۱ نیوتون مجاز است به هر گوشه‌ای که به صورت نرمال به نوار نوارهای همپوشانی است، اعمال شود. سپس نمونه آزمایشی در یک میدان مغناطیسی متناوب کاهش می‌یابد که یک سطح اولیه بالاتر از اندازه‌گیری‌های قبلی است.

خروجی منبع تغذیه باید به آرامی افزایش یابد، درحالی که آمپرمتتر در مدار اولیه برای اطمینان از اینکه مدار جریان وات‌متر بارگیری نمی‌شود، تا زمانی که مقدار متوسط اصلاح شده‌ی ولتاژ ثانویه U_2 قاب اپستین به مقدار مورد نیاز برسد. این از مقدار مورد نظر قطبش مغناطیسی با استفاده از رابطه (۳-۳۳) محاسبه می‌شود.

$$|U_2| = 4 f N_2 \frac{R_t}{R_t + R_i} A \hat{J} \quad (3-33)$$

که در آن

U_2 مقدار میانگین ولتاژ یکسوشده القایی در سیم‌پیچ ثانویه، بر حسب ولت،

A مساحت مقطعی نمونه آزمایشی، بر حسب متر مربع،

f فرکانس، بر حسب هرتز،

J مقدار بیشینه قطبش مغناطیسی، بر حسب تسلا،

N_2 تعداد دورهای سیم‌پیچ ثانویه،

R_i مقاومت کل تجهیزات در مدار ثانویه بر حسب اهم،

R_t مقاومت سری سیم‌پیچ ثانویه و سلف متقابل بر حسب اهم.

سطح مقطع نمونه با رابطه زیر ارائه می‌شود.

$$A = \frac{m}{4l\rho_m} \quad (3-34)$$

که در آن،

A مساحت مقطعی نمونه آزمایشی، بر حسب متر مربع،

m وزن نمونه آزمایشی بر حسب کیلوگرم،

l طول یک نوار نمونه آزمایشی بر حسب متر،

ρ_m چگالی متعارف یا مقدار تعیین شده مطابق با استاندارد IEC 60404-13 مواد مورد آزمایش، بر حسب کیلوگرم در هر متر مکعب است.

آمپر متر در مدار اول باید اتصال کوتاه باشد و ولتاژ ثانویه در صورت لزوم تعدیل شود. فاکتور شکل ولتاژ ثانویه باید مطابق با بخش ۳-۳-۱-۵ تعیین شود و سپس مقدار وات متر باید ثبت شود. قدرت P_m ، اندازه‌گیری شده توسط وات متر شامل قدرت مصرف شده توسط تجهیزات در مدار ثانویه است. تلفات کل P_c نمونه آزمایشی با استفاده از رابطه زیر محاسبه شود:

$$P_c = \frac{N_1}{N_2} P_m - \frac{(1.111|U_2|)^2}{R_i} \quad (3-35)$$

که در آن،

P_c تلفات کل محاسبه شده نمونه آزمایشی، بر حسب وات،

N_1 تعداد دور کل سیم‌پیچ اولیه،

N_2 تعداد دور کل سیم‌پیچ ثانویه،

P_m توان اندازه‌گیری شده توسط وات متر، بر حسب وات

R_i مقاومت کل تجهیزات در مدار ثانویه بر حسب اهم،

U_2 مقدار متوسط ولتاژ یکسو شده القایی در سیم‌پیچ ثانویه بر حسب ولت است.

تلفات کل اندازه‌گیری شده، P_s ، از تقسیم P_c بر جرم فعال m_a نمونه آزمایشی حاصل می‌شود.

$$P_s = \frac{P_c}{m_a} = \frac{P_c 4l}{m l_m} \quad (3-36)$$

که در آن،

P_s تلفات کل مشخص نمونه آزمایشی بر حسب وات بر کیلوگرم،

l طول یک نوار نمونه آزمایشی بر حسب متر،

l_m طول مسیر مغناطیسی مؤثر متعارف بر حسب متر ($l_m = 0.94 \text{ m}$)،

m جرم کل نمونه آزمایشی بر حسب کیلوگرم،

m_a جرم فعال نمونه آزمایشی بر حسب کیلوگرم،

P_c تلفات کل محاسبه شده نمونه آزمایشی، بر حسب وات است.

تکرارپذیری نتایج حاصل از روشهای توصیف شده در این زیر مجموعه با یک انحراف استاندارد نسبی از ۱/۵٪ برای اندازه گیری مواد grain oriented در قطبش مغناطیسی تا ۱/۷ T و برای اندازه گیری مواد non-oriented تا ۱/۵ T است. برای اندازه گیری در قطب‌های مغناطیسی بالاتر، انتظار می‌رود که انحراف استاندارد نسبی افزایش یابد.

۱-۲-۳-۴- اندازه‌گیری تلفات کل هسته با استفاده از مشخصات ورق مغناطیسی

همان‌طور که در بخش قبل اشاره شد، تلفات ترانس شامل تلفات اهمی و تلفات هسته بوده که تلفات هسته نیز خود شامل تلفات هیستریزس و تلفات جریان گردابی است. در این قسمت نیز، تلفات هیستریزس از رابطه (۳-۱۲) و تلفات فوکو از رابطه (۳-۱۳) محاسبه می‌شود. جهت محاسبه تلفات جریان گردابی در این پروژه با توجه به مرجع [۴۱]، ثابت فوکو از رابطه (۳-۲۵) تخمین زده می‌شود.

۳-۴-۳- دستورالعمل روش طراحی اندازه‌گیری خواص مغناطیسی نوار و ورق الکتریکی با استفاده از قاب اپستین بر اساس استاندارد IEC 60404-2

در این قسمت، به منظور جمع‌بندی طراحی الگوریتم اندازه‌گیری خواص مغناطیسی نوار و ورق الکتریکی با استفاده از قاب اپستین، دستورالعمل این الگوریتم بر اساس استاندارد IEC 60404-2 ارائه می‌شود.

۱-۳-۴- ورودی‌های لازم برای طراحی

به منظور شروع مرحله طراحی، براساس استاندارد IEC 60404-2 و مشخصه‌های ذاتی ماده مغناطیسی، لازم است پارامترهایی که در این استاندارد برای طراحی قاب اپستین داده شده است و همچنین پارامترهایی به عنوان ورودی در اختیار طراح قرار گیرد. این پارامترها عبارتند از:

- جرم ورق مغناطیسی نمونه موجود بر حسب کیلوگرم ($m \text{ (kg)}$)
- عرض ورق مغناطیسی بر حسب متر ($x \text{ (m)}$)
- طول ورق‌های مغناطیسی بر حسب متر ($l \text{ (m)}$)
- طول متوسط مسیر مغناطیسی قاب اپستین ($l_{avg} = 0.94 \text{ m}$)
- طول سیم‌پیچی‌ها ($l_c \text{ (m)}$)

- ضخامت ورق مغناطیسی بر حسب متر (d (m))
- تعداد ورق‌ها در هر ساق قاب اپستین
- فرکانس بر حسب هرتز (f (Hz))
- تعداد دور سیم‌پیچ اولیه بر اساس استاندارد IEC 60404-2 (N_1)
- نفوذپذیری نسبی مربوط به نمونه ماده مغناطیسی (μ_r)
- چگالی ماده مغناطیسی نمونه بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب (kg/m^3)
- چگالی شار بیشینه ماده مغناطیسی نمونه بر حسب تسلا (B_m (T))
- ثابت مغناطیسی (μ_0)
- رسانایی ورق مغناطیسی (σ)
- چگالی جریان بر حسب آمپر بر میلی‌متر مربع (δ (A/mm²))
- ثابت اشتینمتر و ثابت هیستریزیس برای محاسبه تلفات هیستریزیس (K_h , n)

لازم به ذکر است که در استاندارد IEC 60404-2 سطح مقطع سیم‌پیچی اولیه در قاب اپستین $1/8 \text{ mm}^2$ و سطح مقطع سیم‌پیچ ثانویه $0/8 \text{ mm}^2$ ذکر شده است.

۲-۳-۴- طراحی نمونه آزمایشی استاندارد و اندازه‌گیری مشخصات مغناطیسی

در این قسمت، با در اختیار داشتن ورودی‌های ارائه شده در بخش قبل، به طراحی مشخصات مربوط به ابعاد نمونه مغناطیسی، ولتاژ و جریان اولیه سیم‌پیچ، تعداد دور ثانویه، مشخصه‌های مغناطیسی، تلفات و امپدانس مدار معادل ترانس ساخته شده پرداخته می‌شود.

در مرحله اول با استفاده از ضخامت، عرض و تعداد ورق‌های هر ساق قاب اپستین ارائه شده در ورودی، سطح مقطع ورق A مربوط به این قاب مشخص می‌شود. سطح مقطع ورق بر اساس استاندارد IEC 60404-3 از رابطه (۳-۲۶) نیز قابل محاسبه است.

در مرحله دوم، اندوکتانس کل L_{tot} ، از رابطه (۳-۵) محاسبه می‌گردد. اندوکتانس پراکندگی L_{Leak} نیز برای هر ساق با توجه به مرجع [۴۲] از رابطه (۳-۲۷) حاصل شده که از اختلاف این دو اندوکتانس، اندوکتانس مغناطیسی L_m قابل محاسبه است. جریان مغناطیس‌کنندگی از رابطه (۳-۳۷) قابل محاسبه است.

$$\frac{Hl}{N_1} = i_m \quad (3-37)$$

در مرحله سوم، تلفات مدار مغناطیسی که شامل تلفات هیستریزیس و تلفات فوکو ($P_{hyst} + P_{eddy}$) است محاسبه می‌گردد. علاوه بر اندازه‌گیری تلفات هسته به‌طور مستقیم، می‌توان این تلفات را با استفاده از تلفات ذاتی هسته که در کاتالوگ محصولات ارائه می‌شود، محاسبه نمود. به این ترتیب، با محاسبه e_1 از جریان و امپدانس مغناطیس‌کنندگی، مقاومت R_c از رابطه (۳-۳۸) و از آنجا i_c از رابطه (۳-۳۹) قابل محاسبه است.

$$R_c = \frac{e_1^2}{P_c} \quad (3-38)$$

$$\vec{i}_c = \frac{e_1}{R_c} \quad (3-39)$$

جریان i_1 از جمع برداری جریان i_c و جریان i_m محاسبه شده و ولتاژ ورودی از رابطه (۳-۴۰) تعیین می‌شود.

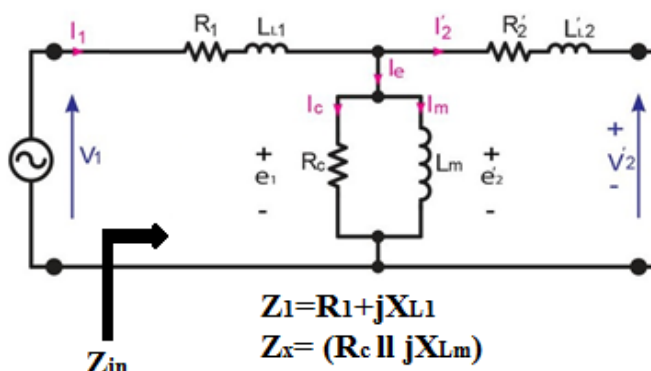
$$V_1 = i_1 Z_{in} \quad (3-40)$$

در مرحله چهارم نیز با استفاده از رابطه (۳-۴۱) رلوکتانس مغناطیسی (R_m) ناشی از کل مسیر مغناطیسی قاب اپستین و با استفاده از رابطه (۳-۴۲) شدت میدان مغناطیسی بیشینه (ϕ_m) محاسبه می‌شود.

$$R_m = \frac{L}{\mu_0 \mu_r A} \quad (3-41)$$

$$\phi_m = \frac{N_1 I_1}{R_m} \quad (3-42)$$

مدار معادل ترانس در آزمایش قاب اپستین در شکل ۳-۲۱ نشان داده شده است.



شکل ۳-۲۱: مدار معادل ترانس برای آزمایش ورق مغناطیس‌پذیر قاب اپستین

شکل ۳-۲۲ بخشی از نحوه پیاده‌سازی محاسبات در نرم‌افزار اکسل را برای آزمایش ورق مغناطیسی نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که ماده مغناطیسی مورد نظر ورق فولاد الکتریکی iso vac 530-50 A [۴۳] بوده که محاسبات مغناطیسی بر مبنای آن صورت پذیرفته است.

Input list		
Input	description	Amount
l (m)	length of the test specimen	0.28
num	Number of laminations in each leg	4
m (kg)	Mass of each sheet	0.032676
m (kg)	Mass of the epstein fram	0.522816
f (Hz)	Frequency	50
h (m)	Height of epstain	0.004
x (m)	Width of the test specimen	0.03
ρ_v (kg/m ³)	Mass density of the test material	7780
l_{avg} (m)	Avrage length of the epstain frame	0.25
l_c (m)	length of the winding (accuracy of $\pm 0,1 \%$)	0.19
l_m (m)	mean length of the epstain frame	0.94
N_1	number of turns of the primary winding	175
ρ ($\Omega \cdot m$)	Specific electrical resistance	0.000000311
μ_0 (h/m)	magnetic constant	1.2566E-06
μ_r	relative permeability of the specimen	291
d (m)	thickness of each sheet	0.0005
N_2	number of turns of the secondary winding	700
σ	Electrical conductivity of the specimen	3215434.084
B_s (T)	peak magnetic flux density	1.7
δ (A/mm ²)	current density	3.1
n	Steinmetz's Coefficients	2.5
K_h	hysteresis Coefficients	70
K_e	eddy current Coefficients	0.000169951
H_{sat} (A/m)	saturated magnetic field strength	4648.992837
V_{p-2} (Volt)	maximum voltage in secondary of the specimen	15.8508

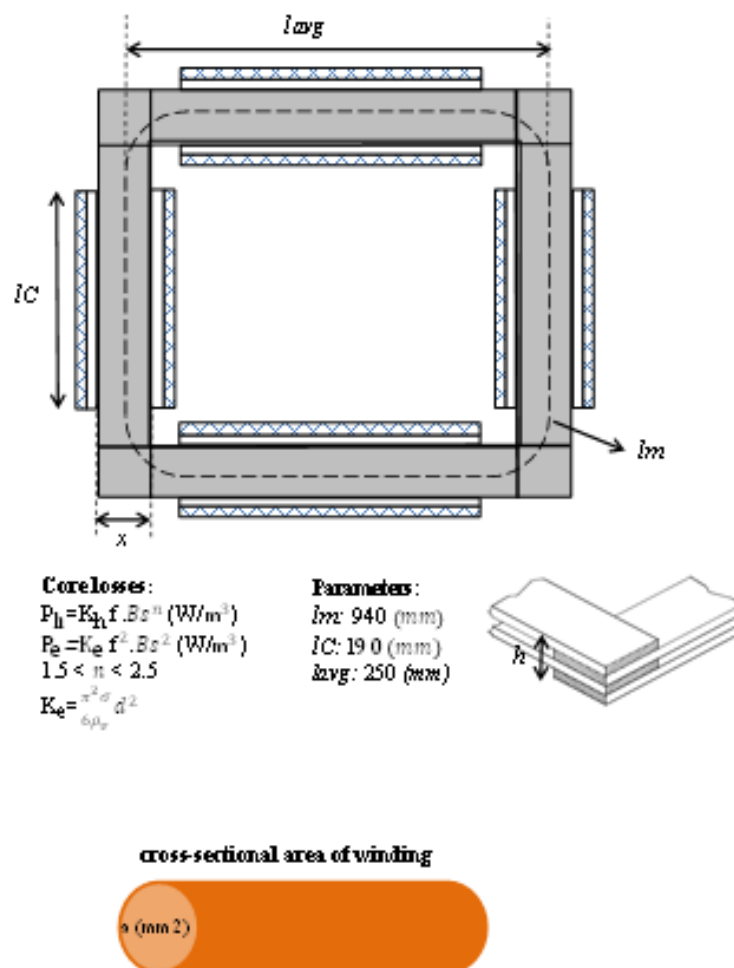
(الف)

calculation of Test specimen dimensions		
Output	description	Amount
A (m ²)	cross-sectional area of the specimen	0.00006
V (m ³)	volume of each sheet	0.0000042
V (m ³)	volume of the epstein fram	0.0000672
calculation of voltage and current		
Vp-1 (Volt)	maximum voltage in output of amplifier	300378+20.110
ABS(Vp)		23.28549045
Ep-1 (Volt)	maximum voltage in primary of the specimen	15.8508
I-max1 (A)	maximum current of the specimen	236354+6.2429
I-max2 (A)	maximum current of the specimen	590886+1.560
calculation of magnetic properties and windings		
L (H)	effective inductance of the magnetizing ring specimen wind	0.011436932
phi-sat (Wb)	maximum magnetic flux of the specimen	0.000102
N1	number of turns of the magnetizing winding	175
N2	number of turns of the secondary winding	700
R (AT/Wb)	reluctance	171374637.9
F (A.Turn)	magnetomotive force	91362+1092.51
N'2	number of secondary turns based on frequency Eq.	700
Z1 (Ω)	Impedance	28+2.00966536
Zx (Ω)	Magnetic Impedance	26404-0.03080
Zin (Ω)	Input Impedance	26404+1.9788
calculation of specific total loss and impedance		
a1 (mm ²)	calculated cross-sectional area of primery winding	1.8
a1 (mm ²)	standard cross-sectional area of primery winding	2.08
Ph (W/m ³)	hysteresis loss	13188.34647
Pe (W/m ³)	eddy current loss	19.64629833
P tot (W)	Total power loss	0.887577114

(ب)

P tot (W)	Total power loss	0.887577114
P (W/Kg)	Inherent power loss	5.908
P tot (W)	core loss	3.088796928
a2 (mm2)	calculated cross-sectional area of secondary winding	0.8
a2 (mm2)	standard cross-sectional area of secondary winding	0.823
Rc (Ω)	Magnetic reluctance	81.34165712
Ic (A)	Reluctance current	948669422363
Im (A)	Magnetic reactance current	242933237884
Lm (Ω)	Magnetic inductance	0.005039779
Xm (Ω)	Magnetic reactance	1.58324668
Pcu (W)	Total ohmic losses	1.5768928
Zeq (Ω)	Total Transformer impedance	26404+1.9788
Req (Ω)	Total Transformer Ohmic Resistance	49449-0.00252
Xeq (Ω)	Total Transformer Reactance	#VALUE!
ρ (Ω/km)	Resistivity	8.282
R1 (Ω)	Electrical resistance	1.5768928
l (m)	Length of each conductor	47.6
calculation of Leakage inductance		
L _{leak} (H)	Leakage inductance in each leg	0.001905535
L _{leak} (H)	Total leakage inductance	0.006397152
μ ₀ (h/m)	Magnetic constant	1.2566E-06
λ	Relative leakage conductance	0.012280702
K _σ	Rogowski factor	0.9
b (m)	Specific total loss range	0.19
a1 (m)	reluctance of yoke	0.002
a2 (m)	air gap reluctance	0.002
δ (m)	Thickness of the insulation	0.001
Z1 (Ω)	Impedance1	2.554475634

(ج)



(د)

شکل ۲۲-۳: پیاده‌سازی محاسبات در نرم‌افزار اکسل برای آزمایش قاب اپستین

۵-۳- جمع‌بندی

در این فصل، اصول طراحی و ساخت مدارات مغناطیسی مربوط به دستگاه B-H متر ارائه شد. این طراحی‌ها بر اساس استانداردهای بین‌المللی موجود در زمینه اندازه‌گیری مشخصه‌های مواد مغناطیسی از جمله IEC 60404-2، IEC 60404-3 و IEC 60404-6 به ترتیب در شکل‌های اپستین، ورق و پودر صورت پذیرفت. در نهایت، کلیه پارامترهای لازم برای تعیین خواص مغناطیسی نمونه آزمایشی و پارامترهای مغناطیسی نمونه آزمایشی بر اساس این استانداردها و با طراحی الگوریتم‌های محاسباتی در قالب فایل اکسل که یکی از مهم‌ترین خروجی‌های این پروژه است، پیاده‌سازی شد.

فصل چهارم: شبیه‌سازی دینامیکی دستگاه B-H متر

۱-۴- مقدمه

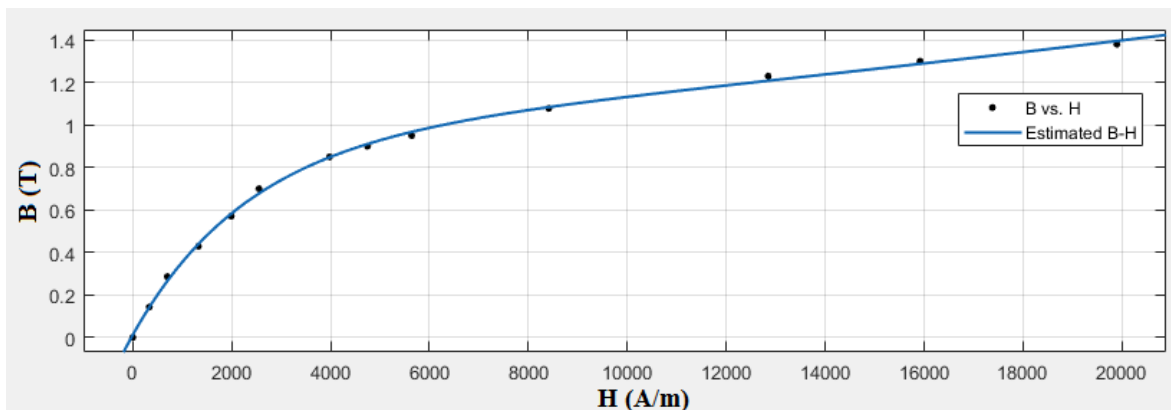
در فصل قبل، اصول طراحی و ساخت مدارهای مغناطیسی دستگاه B-H متر ارائه و در نرم‌افزار اکسل پیاده‌سازی شد. با توجه به طراحی‌های صورت گرفته در فصل قبل، در این فصل به شبیه‌سازی دینامیکی هر یک از ساختارهای ماده مغناطیسی به شکل پودر (تروئید)، اپستین و ورق با استفاده از نرم‌افزار متلب (Matlab) پرداخته می‌شود. در نهایت، پس از شبیه‌سازی و تحلیل پاسخ هر یک از این ساختارها، مدارات مغناطیسی مربوطه ساخته می‌شود.

۲-۴- شبیه‌سازی ساختار ماده مغناطیسی به شکل پودر و تروئید

در این بخش به شبیه‌سازی اندازه‌گیری تلفات هسته نمونه ترانسفورماتور به شکل حلقه پرداخته می‌شود. منحنی B-H هر ماده مغناطیسی مشخصه‌ای منحصر به آن ماده مغناطیسی است. بنابراین، به منظور تعیین ماده مغناطیسی مورد استفاده در ترانسفورماتور، لازم است چند نقطه از منحنی B-H ماده مغناطیسی که بعضاً توسط کارخانه سازنده ارائه می‌شود در قسمت مشخصات اشباع^۱ وارد شود. در این قسمت به منظور ارائه یک منحنی مشخصه B-H پیوسته و بدون تغییرات شیب تند که منجر به تغییرات تند نفوذپذیری مغناطیس ماده (μ) خواهد شد، از قابلیت Curve Fitting Tool نرم افزار متلب استفاده شد. همانطور که شکل ۴-۱ نشان می‌دهد، توسط این قابلیت، منحنی B-H با استفاده از چند نقطه ارائه شده برای ماده مورد آزمایش، با دقت بالایی توسط رابطه (۴-۱) تخمین زده می‌شود.

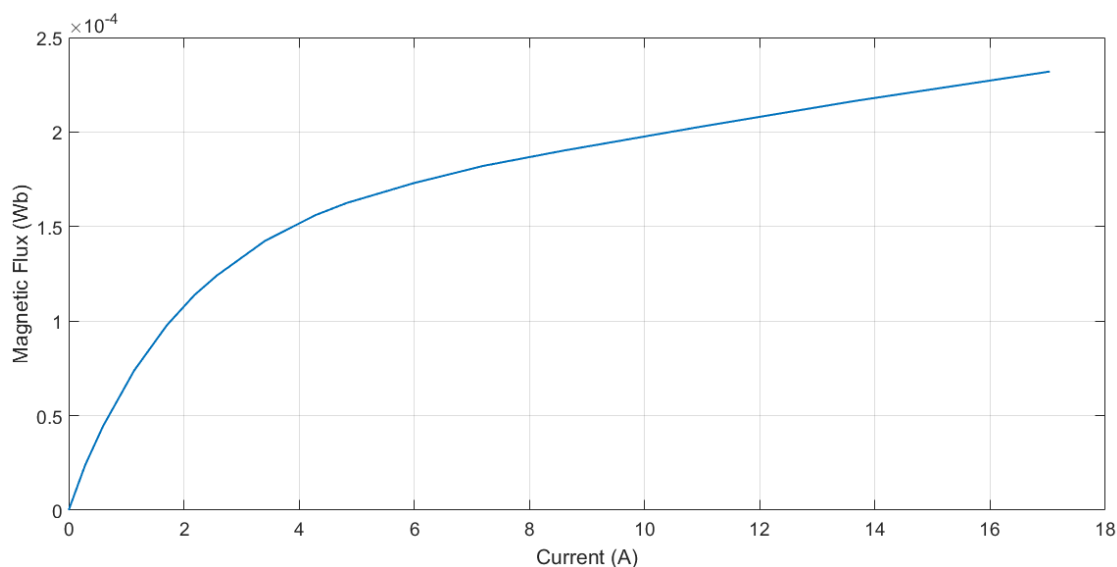
$$B(H) = a \cdot \exp(b \cdot H) + c \cdot \exp(d \cdot H) \quad (4-1)$$

که در آن $a=0.9367$ ، $b=2.004e-05$ ، $c=-0.9253$ ، $d=-0.0004306$ است.



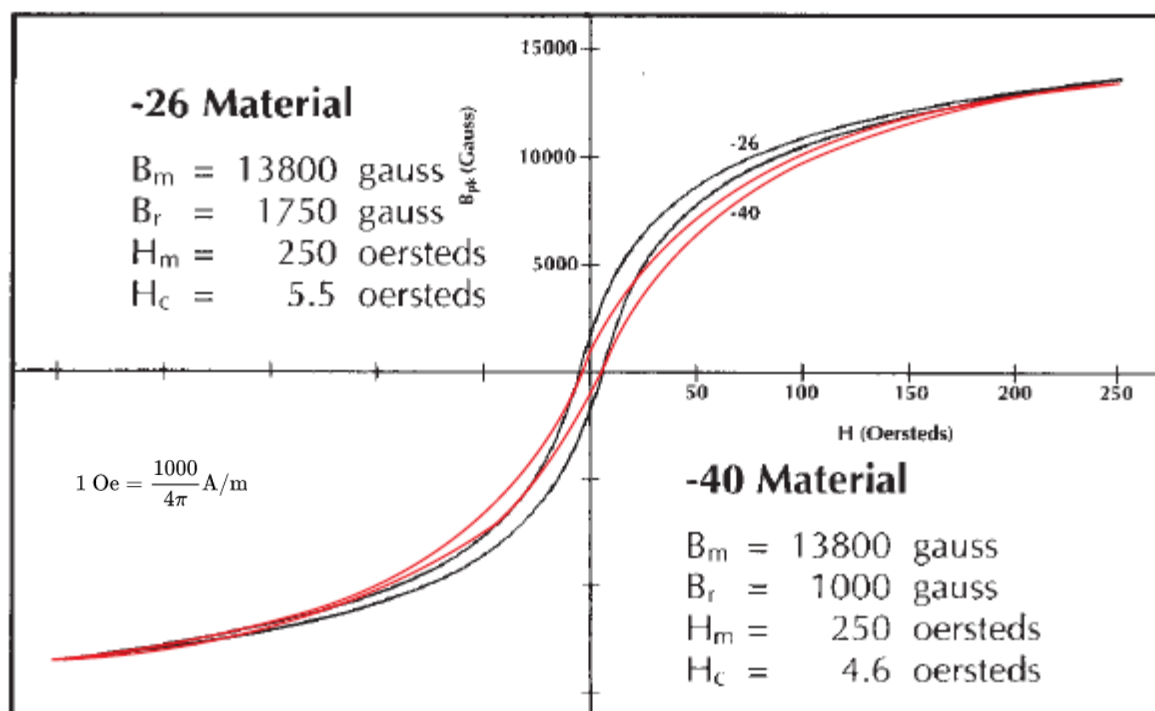
شکل ۴-۱: تخمین منحنی مرجع B-H با استفاده از قابلیت Curve Fitting Tool

شکل ۴-۲ منحنی شار پیوندی Φ بر حسب جریان I مربوط به هسته ماده مغناطیسی پودر آهن با کد 26- به شکل تروئید را که از رابطه (۴-۱) حاصل می‌شود نشان می‌دهد.



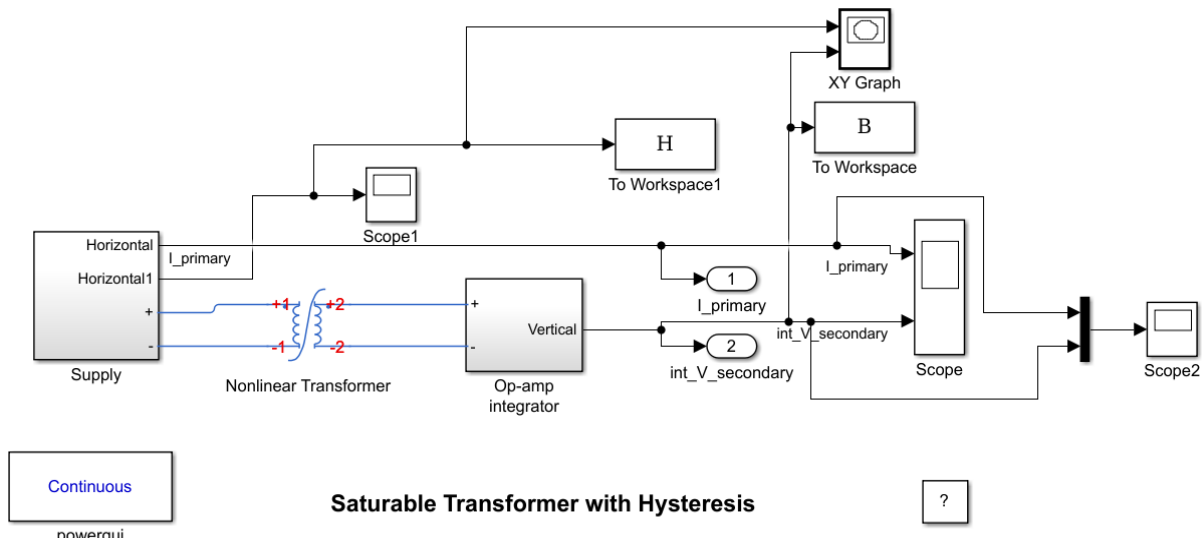
شکل ۲-۴: منحنی شار پیوندی Φ بر حسب جریان I مربوط به هسته ماده مغناطیسی پودر آهن

با توجه به محاسبات صورت گرفته برای این نوع ماده مغناطیسی در نرم افزار اکسل به منظور طراحی مدار معادل ترانس در نرم افزار اکسل، شبیه سازی مربوطه در نرم افزار Matlab انجام شده است. شکل ۳-۴ منحنی هیستریزیس نشان داده شده در کاتالوگ محصول و شکل ۴-۶ منحنی مغناطیسی شبیه سازی شده بر اساس محاسبات طراحی در نرم افزار اکسل مربوط به ماده پودر مغناطیسی به شکل تروئید با کد T300-26 را نشان می دهد. شدت میدان مغناطیسی و چگالی میدان مغناطیسی به ترتیب بر حسب آمپر بر متر (A/m) و تسلا (T) شبیه سازی شده اند.



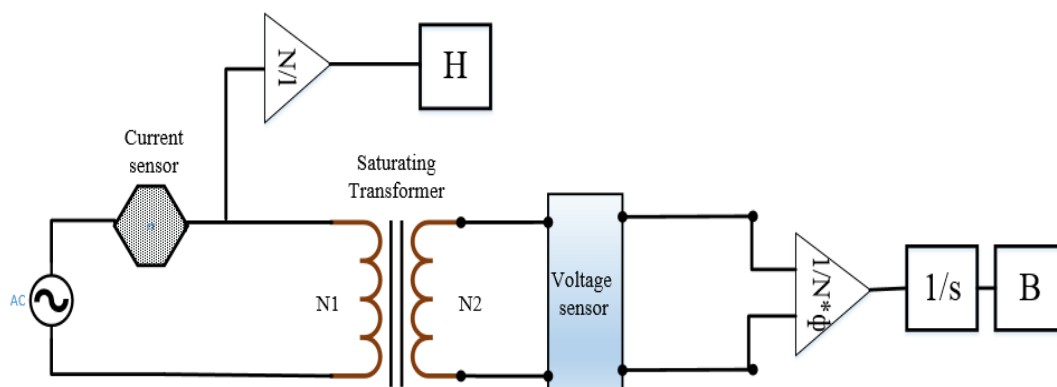
شکل ۳-۴: منحنی هیستریزیس نشان داده شده در کاتالوگ محصول

شماتیک کلی مدار الکتریکی پیاده‌سازی شده در نرم افزار متلب در شکل ۴-۴ نشان داده شده است که هر کدام از طرح‌های ماده مغناطیسی به شکل پودر، اپستین و تک ورق بر اساس محاسبات صورت پذیرفته در اکسل در نرم افزار متلب بر اساس این شماتیک شبیه‌سازی شده است. شکل ۴-۵ بلوک دیاگرام مدار شبیه‌سازی شده در نرم افزار متلب را نشان می‌دهد.

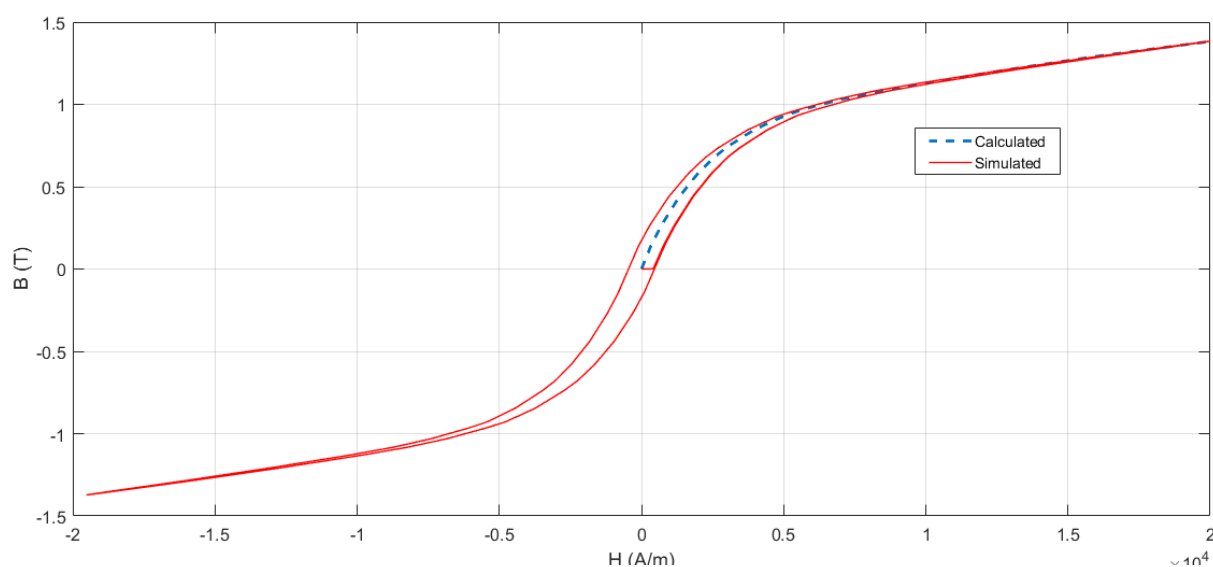


Saturable Transformer with Hysteresis

شکل ۴-۴: شماتیک کلی پیاده‌سازی شده در نرم افزار متلب

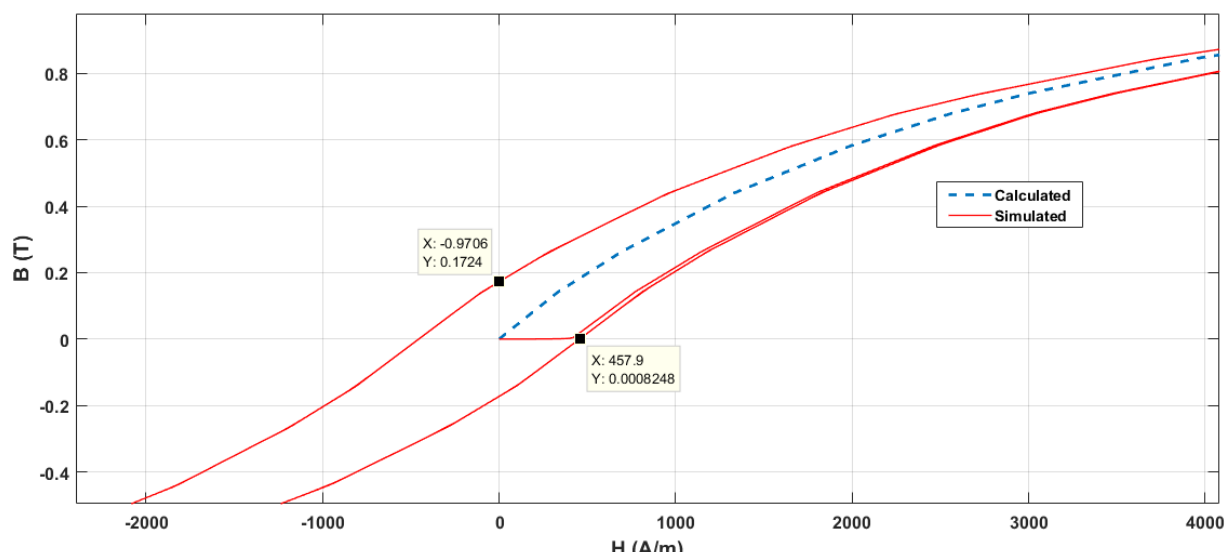


شکل ۴-۵: بلوک دیاگرام مدار شبیه‌سازی شده در متلب



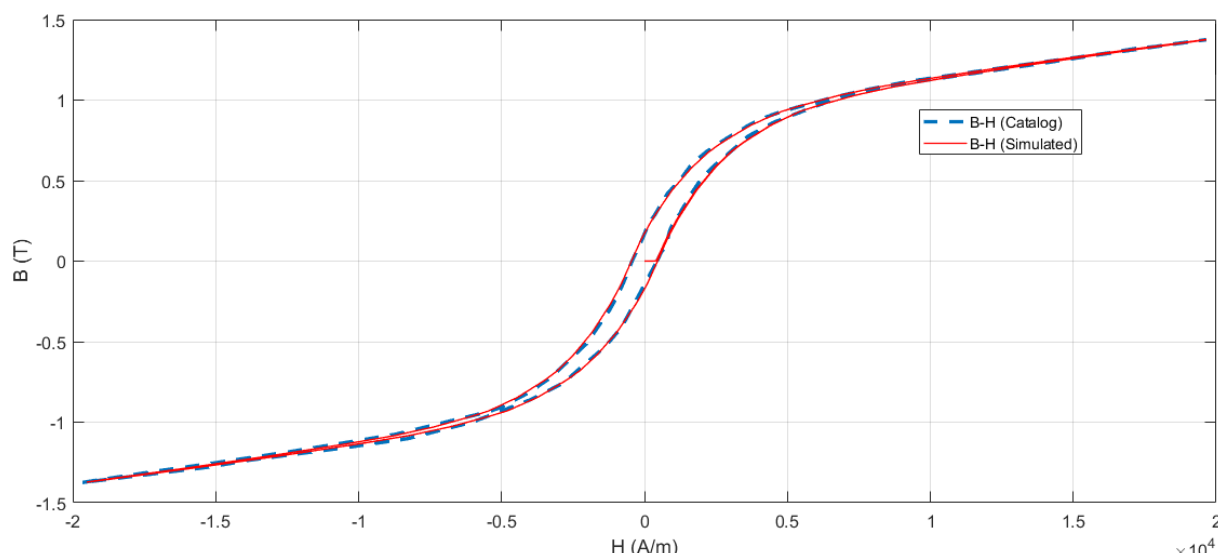
شکل ۴-۶: منحنی محاسبه شده در اکسل و شبیه‌سازی شده در Matlab برای ماده پودر مغناطیسی

منحنی B-H شبیه‌سازی شده در متلب که در شکل ۴-۶ نشان داده شده است، یک حلقه هیستریزیس است و شکل ۴-۷ بزرگ‌نمایی روی این منحنی در بازه شدت میدان مغناطیسی (-2000, 4000) را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۴-۷ مشاهده می‌شود، شبیه‌سازی ماده نمونه پودر مغناطیسی با نرم افزار متلب بر اساس محاسبات صورت گرفته در نرم افزار اکسل، به خوبی منحنی مرجع برگرفته از کاتالوگ این محصول (منحنی خطچین) را دنبال می‌کند. نقطه H_c و B_r در کاتالوگ محصول به ترتیب برابر با ۴۳۷ A/m و ۰/۱۷۵ T بوده که این مقادیر در شبیه‌سازی ۴۵۸ A/m و ۰/۱۷۲۴ T است و با مقادیر مورد نظر در کاتالوگ محصول با دقت خوبی مطابقت دارد.



شکل ۴-۷: بزرگ‌نمایی حلقه هیستریزیس ایجاد شده برای ماده پودر مغناطیسی با شبیه‌سازی متلب

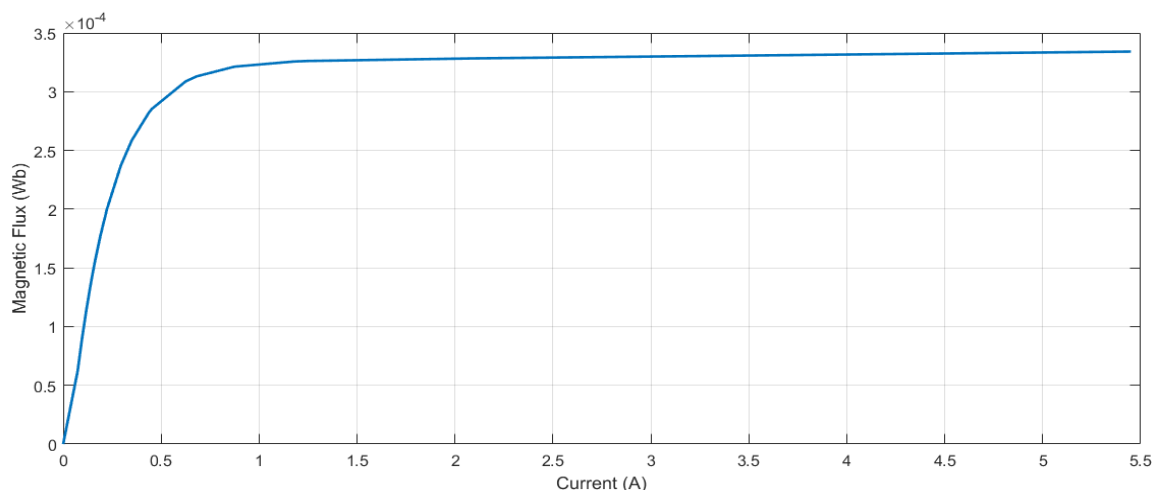
به منظور مقایسه دقیق‌تر منحنی مغناطیسی شبیه‌سازی شده و منحنی ارائه شده در کاتالوگ محصول، با استفاده از نرم افزار Get Data Graph Digitizer منحنی ارائه شده در کاتالوگ تخمین زده و در شکل ۴-۸ با منحنی شبیه‌سازی شده در متلب مقایسه شده است.



شکل ۸-۴: مقایسه منحنی شبیه‌سازی شده و منحنی تخمین زده شده از کاتالوگ محصول

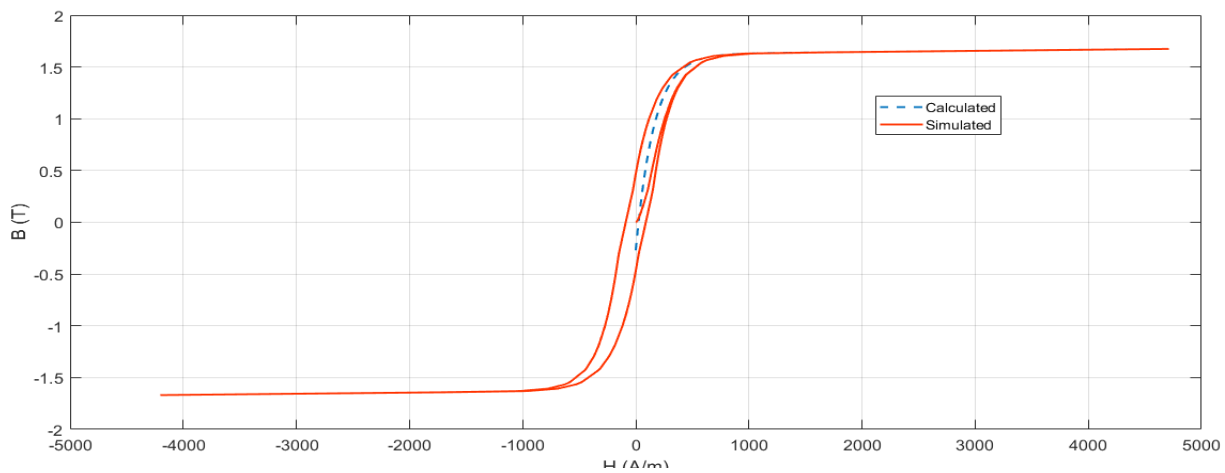
۳-۴- شبیه‌سازی ساختار ماده مغناطیسی به شکل ورق

در این بخش به شبیه‌سازی اندازه‌گیری تلفات هسته نمونه ترانسفورماتور به شکل ورق پرداخته می‌شود. از آنجایی که منحنی B-H هر ماده مغناطیسی مشخصه‌ای منحصر به آن ماده مغناطیسی است، در این بخش نیز به منظور تعیین خواص ماده مغناطیسی مورد استفاده در ترانسفورماتور، ۱۵ نقطه از منحنی B-H ماده مغناطیسی ارائه شده توسط کارخانه سازنده در قسمت مشخصات اشباع وارد می‌شود. شکل ۹-۴ منحنی شار پیوندی Φ بر حسب جریان i و مربوط به هسته ماده مغناطیسی ورق با کد M 530-50 A از شرکت isovac در فرکانس ۵۰ Hz را به منظور تعیین مشخصات هسته ورق ترانسفورماتور نشان می‌دهد. با استفاده از ابزار Curve Fitting Tool نرم افزار متلب، منحنی B-H با استفاده از چند نقطه ارائه شده برای ماده مورد آزمایش، با دقت بالایی توسط رابطه (۴-۱) تخمین زده می‌شود، با این تفاوت که در آن $a=1.613$ ، $b=8415e-06$ ، $c=-1.852$ ، $d=-0.005955$ است.



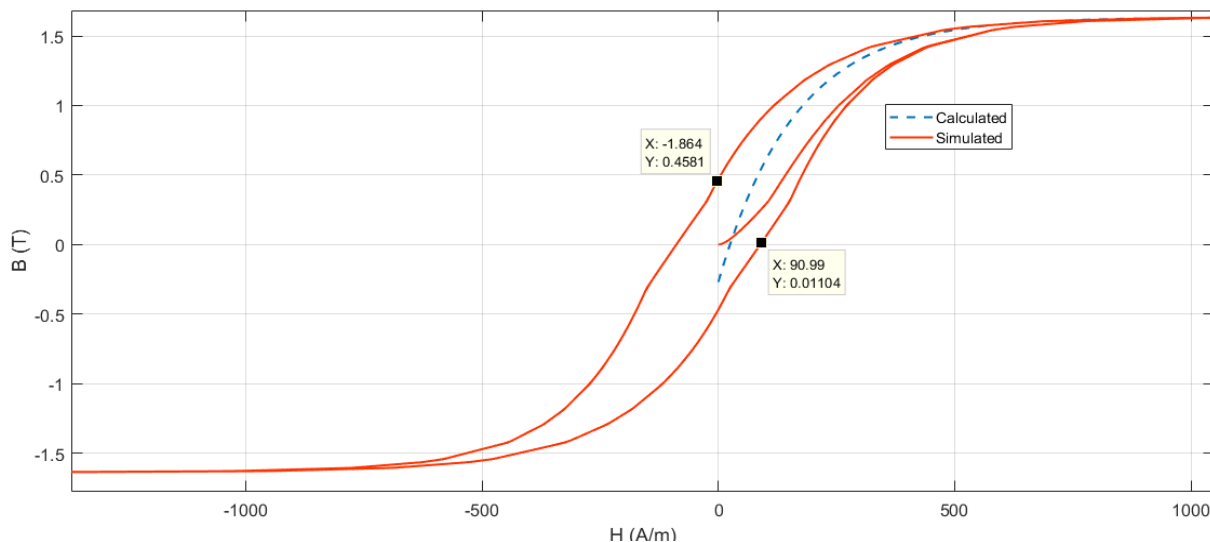
شکل ۹-۴: منحنی جریان i و شار پیوندی Φ مربوط به هسته ماده مغناطیسی ورق M 530-50 A شرکت isovac

با توجه به محاسبات صورت گرفته برای این نوع ماده مغناطیسی به منظور طراحی مدار ترانس معادل در نرم‌افزار اکسل، شبیه‌سازی مربوطه در نرم‌افزار Matlab انجام شده است. شکل ۱۰-۴ منحنی مغناطیسی مربوط به ماده ورق مغناطیسی با کد M 530-50 A را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۰: منحنی محاسبه شده در اکسل و شبیه‌سازی شده در Matlab

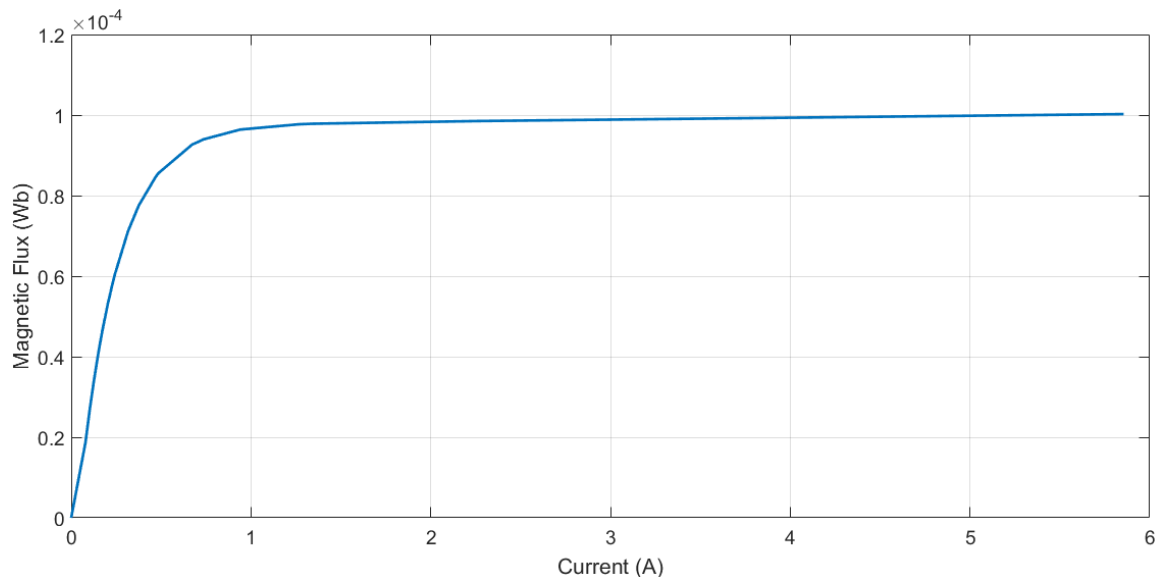
بزرگ‌نمایی روی منحنی حلقه هیستریزس منحنی B-H شبیه‌سازی شده در متلب که در شکل ۴-۱۰ نشان داده شده است، در بازه شدت میدان مغناطیسی (1500,1000-) در شکل ۴-۱۱ نشان داده شده است. همانطور که شکل ۴-۱۱ نشان می‌دهد، شبیه‌سازی ماده نمونه ورق مغناطیسی با نرم افزار متلب بر اساس محاسبات صورت گرفته در نرم‌افزار اکسل به خوبی با منحنی مرجع برگرفته از کاتالوگ این محصول (منحنی خطچین) منطبق است.



شکل ۴-۱۱: بزرگ‌نمایی حلقه هیستریزس ایجاد شده برای ماده ورق مغناطیسی با شبیه‌سازی متلب

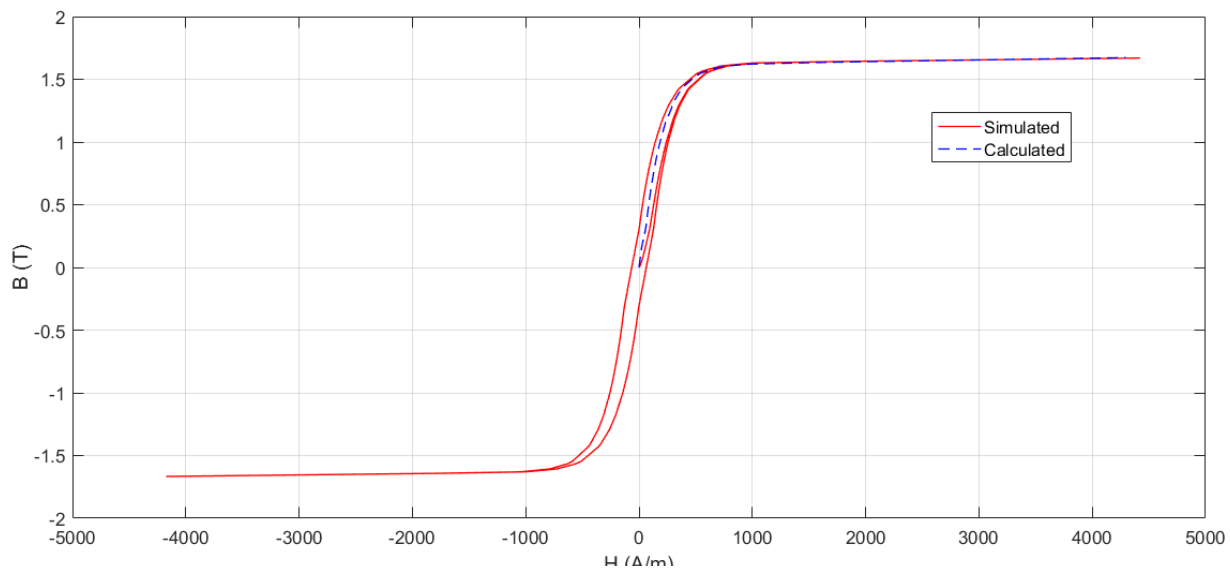
۴-۴- شبیه‌سازی ساختار ماده مغناطیسی با قاب اپستین

در این بخش به شبیه‌سازی اندازه‌گیری تلفات هسته نمونه ترانسفورماتور با قاب اپستین پرداخته می‌شود. از آنجایی که منحنی B-H هر ماده مغناطیسی مشخصه‌ای منحصر به آن ماده مغناطیسی است، در این بخش نیز مشابه دو بخش قبل به منظور تعیین خواص ماده مغناطیسی مورد استفاده در ترانسفورماتور، چند نقطه از منحنی B-H ماده مغناطیسی ارائه شده توسط کارخانه سازنده در قسمت مشخصات اشباع وارد می‌شود. شکل ۴-۱۲ منحنی شار پیوندی Φ و جریان i مربوط به هسته ماده مغناطیسی ورق با کد M 530-50 A از شرکت isovac را به منظور تعیین مشخصات هسته پودر ترانسفورماتور نشان می‌دهد.



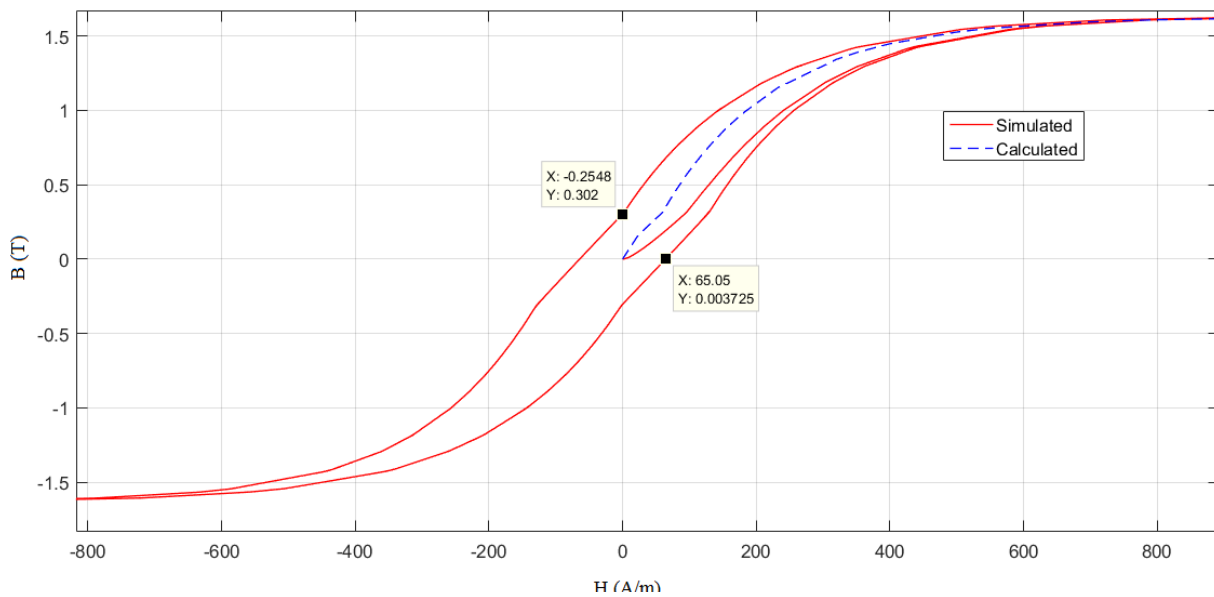
شکل ۴-۱۲: منحنی جریان i و شار پیوندی Φ مربوط به هسته ماده مغناطیسی ورق با کد M 530-50 A شرکت isovac در قاب اپستین

با توجه به محاسبات صورت گرفته برای این نوع ماده مغناطیسی به منظور طراحی مدار ترانس معادل در نرم‌افزار اکسل، شبیه‌سازی مربوطه در نرم‌افزار Matlab انجام شده است. شکل ۴-۱۳ منحنی مغناطیسی مربوط به ماده پودر مغناطیسی با کد M 530-50 A از شرکت isovac را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۳: منحنی محاسبه شده در اکسل و شبیه‌سازی شده در Matlab

بزرگ‌نمایی روی منحنی حلقه هیستریزس منحنی B-H شبیه‌سازی شده در متلب (شکل ۴-۱۳)، در بازه شدت میدان مغناطیسی (250,250-) در شکل ۴-۱۴ نشان داده شده است. همانطور که شکل ۴-۱۴ نشان می‌دهد، شبیه‌سازی ماده نمونه ورق مغناطیسی با نرم افزار متلب بر اساس محاسبات صورت گرفته در نرم‌افزار اکسل به خوبی با منحنی مرجع برگرفته از کاتالوگ این محصول (منحنی آبی) منطبق است.



شکل ۴-۱۴: بزرگنمایی حلقه هیستریزیس ایجادشده برای ماده مغناطیسی در قاب اپستین با شبیه‌سازی متلب

۴-۵- جمع‌بندی

در این فصل، نتایج شبیه‌سازی هر یک از ساختارهای ماده مغناطیسی به شکل پودر (تروئید)، اپستین و ورق با استفاده از نرم‌افزار متلب (Matlab) انجام شد و دقت محاسبات بر اساس نتایج شبیه‌سازی و مقایسه آن با منحنی B-H ارائه شده در کاتالوگ محصولات مورد ارزیابی قرار گرفت. در نهایت، پس از شبیه‌سازی و تحلیل پاسخ هر یک از این ساختارها، مدارات مغناطیسی مربوطه و مدار تقویت‌کننده توان دستگاه B-H متر با انتخاب قطعات مناسب بر اساس شبیه‌سازی ساخته می‌شود.

فصل پنجم: مدل سازی اجزا محدود B-H مت

۱-۵- مقدمه

روش اجزاء محدود یا روش المان محدود^۱ که به اختصار (FEM) نامیده می‌شود، روشی عددی برای حل تقریبی معادلات دیفرانسیل جزئی و نیز حل معادله‌های انتگرالی است. اساس کار این روش حذف کامل معادلات دیفرانسیل یا ساده‌سازی آن‌ها به معادلات دیفرانسیل معمولی، که با روش‌های عددی مانند اویلر حل می‌شوند، است. برای بررسی میدان‌های مغناطیسی و ارزیابی درستی طراحی دستگاه‌های الکترومغناطیسی از نرم‌افزارهای اجزاء محدود استفاده می‌شود. این نرم‌افزارها با بالاترین دقت ممکن دستگاه الکترومغناطیسی و شرایط موجود بر آن را مدل‌سازی نموده و یک دید مناسب از وضعیت طراحی دستگاه در اختیار قرار می‌دهند. نرم‌افزارهای اجزاء محدود قادر به مدل‌سازی شرایط گذرا و عملکرد حالت ماندگار دستگاه مغناطیسی می‌باشند و اطلاعاتی از قبیل توزیع چگالی شار^۲، اندوکتانس‌های پراکندگی^۳، تلفات و دیگر پارامترهای مهم در بحث طراحی دستگاه‌های الکترومغناطیسی را ارائه دهند.

در بحث طراحی دستگاه اندازه‌گیری B-H متر با استفاده از روابط ریاضی و تحلیلی تا حدودی می‌توان یک طراحی بهینه و مناسب را انجام داد. اما با توجه به محدودیت این روش‌ها در اندازه‌گیری و محاسبه دقیق پارامترهایی از قبیل اندوکتانس‌های ناشی و پراکندگی، تلفات هسته^۴ و ... نیاز است تا مدل طراحی شده با استفاده از این نرم‌افزارها اعتبار سنجی شود تا درستی طراحی تأیید شود و همچنین پارامترهایی که امکان محاسبه دقیق آن‌ها وجود ندارد از این طریق محاسبه شود.

در این فصل موارد زیر مورد بررسی قرار می‌گیرد:

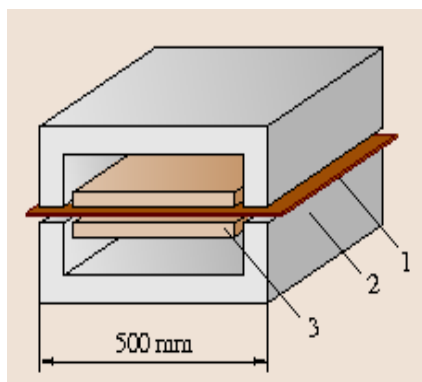
۱. مدل‌سازی اجزاء محدود هر یک از مدارات مغناطیسی فریم‌های طراحی شده در فصل (۳)
۲. صحت سنجی محاسبات تحلیلی مدارات مغناطیسی که بر اساس استاندارد و نرم‌افزار excel طراحی شده‌اند.
۳. آنالیز حساسیت پارامترهای تعیین‌کننده در بخش مغناطیسی دستگاه B-H متر و ارائه راهکار جهت بهبود طراحی نمونه
۴. استخراج دستورالعمل طراحی برای هر یک از نمونه‌های مورد آزمایش در دستگاه B-H متر بر اساس استاندارد و نتایج استخراج شده از مدل FEM

یکی از این نرم‌افزارهای اجزاء محدود موجود در بازار نرم‌افزار Altair Flux 2018 است که قابلیت مدل‌سازی دستگاه‌های الکترومغناطیسی با دقت بسیار زیادی را دارد. در این فصل مدل‌سازی اجزاء محدود با استفاده از این نرم‌افزار انجام می‌شود.

۲-۵- ساختار سه مدل هسته در نظر گرفته شده و مدار معادل مغناطیسی آن‌ها

در شکل ۱-۵ ساختارهای واقعی سه نمونه مدل‌سازی شده نشان داده شده‌اند.

1 Finite Element Method
2 Magnetic Flux Distribution
3 Leakage Inductance
4 Core Loss



(ب)



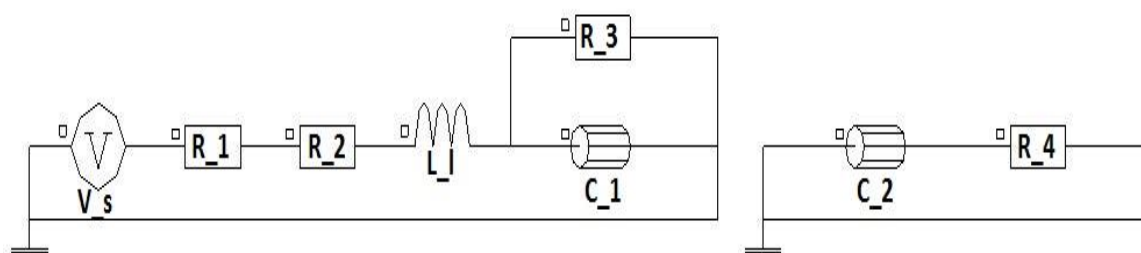
(ب)



(ج)

شکل ۱-۵: (الف) هسته تروئید (ب) هسته تک ورق (ج) قاب پشتیبان

مدار معادل مغناطیسی ارائه شده برای هر ۳ ماده معرفی شده به صورت یکسان و مشابه با ترانسفورماتور است. از این رو ابتدا مدار الکتریکی در نظر گرفته شده برای مدل سازی در نرم افزار Flux به صورت شکل ۲-۵ ارائه می شود.



شکل ۲-۵: مدار معادل الکتریکی

در شکل ۲-۵ مدار الکتریکی نمونه های مختلف ارائه شده اند. در این مدل R_1 امپدانس درونی منبع برابر با $1/5$ اهم، R_2 مقاومت سیم پیچ اولیه، L_1 اندوکتانس نشتی، R_3 مقاومت مدل کننده تلفات هسته، R_4 مقاومت قرار داده شده در خروجی برای مدل کردن حالت های مدار باز و اتصال کوتاه، V_s ولتاژ منبع، C_1 مدل کننده سیم پیچ اولیه و C_2 مدل کننده سیم پیچ ثانویه است.

۳-۵- مدل‌سازی هسته تروئید

روابط و استانداردهای موجود برای طراحی هسته تروئید به‌منظور به دست آوردن مشخصات مغناطیسی مواد مغناطیسی نرم پودر در فصل‌های گذشته ارائه شده است. در این بخش با مدل‌سازی اجزا محدود سه‌بعدی طراحی اولیه اعتبار سنجی می‌شود. مشخصات طراحی هسته تروئید در جدول ۱-۵ ارائه شده است. تروئید استفاده شده طبق استاندارد و مدل‌های موجود در بازار انتخاب و طراحی شده است. استانداردهای موجود برای هسته تروئید و مشخصات مغناطیسی آن‌ها در شکل ۳-۵ نشان داده شده‌اند.

Material Mix No.	Reference Permeability (μ_0)	Material Density (g/cm ³)	Relative Cost	Color* Code
-2	10	5.0	2.7	Red/Clear
-8	35	6.5	5.0	Yellow/Red
-14	14	5.2	3.6	Black/Red
-18	55	6.6	3.4	Green/Red
-19	55	6.8	1.7	Red/Green
-26	75	7.0	1.0	Yellow/White
-30	22	6.0	1.4	Green/Gray
-34	33	6.2	1.5	Gray/Blue
-35	33	6.3	1.4	Yellow/Gray
-40	60	6.9	1.0	Green/Yellow
-45	100	7.2	2.6	Black/Black
-52	75	7.0	1.2	Green/Blue

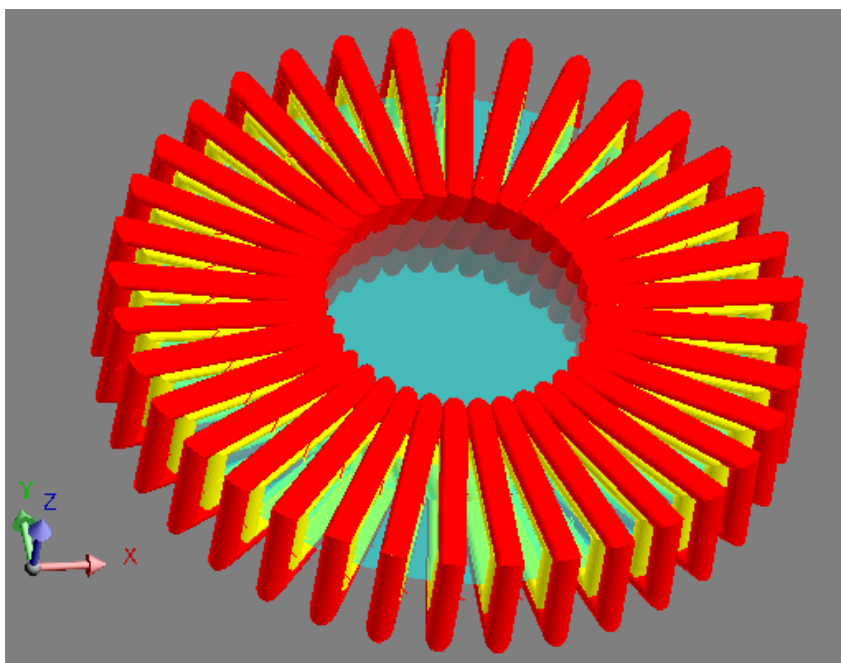
* All Micrometals color codes are protected by US Trademark law. Formal registration numbers have been issued for the -8, -18, -26 and -52 color codes by the United States Patent and Trademark office.

شکل ۳-۵: انواع مختلف هسته تروئید و مشخصات مغناطیسی آن‌ها

جدول ۱-۵: مشخصات طراحی هسته تروئید

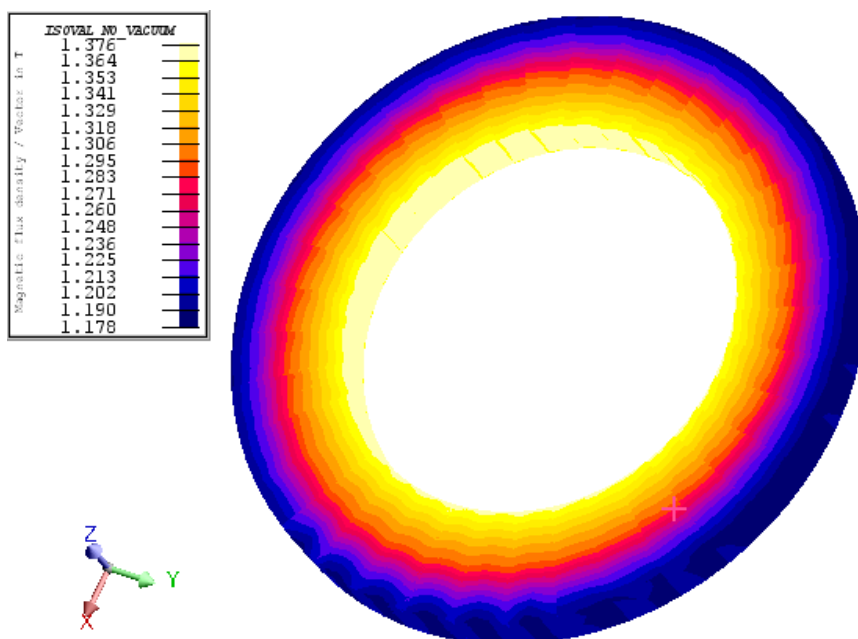
پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
قطر داخلی	۴۹ mm	تعداد دور اولیه	۲۱۲
قطر بیرونی	۷۹/۲ mm	تعداد دور ثانویه	۲۱۲
ضخامت	۱۲/۷ mm	فرکانس	۵۰ Hz
ولتاژ تغذیه	۳۱ V	قطر سیم‌پیچ	۲/۹ mm

مدل اجزا محدود سه‌بعدی هسته تروئید و نحوه سیم‌پیچی اولیه و ثانویه در شکل ۴-۵ نشان داده شده است. سیم‌پیچ از نوع Non-meshed coil استفاده شده است و کاملاً به‌صورت یکنواخت در سطح تروئید پخش شده است تا بتواند یک میدان یکنواخت را ایجاد کند و شرایطی مشابه با شرایط عملکرد عادی را مدل‌سازی کند. سیم‌پیچ اولیه با رنگ زرد و در نزدیکی هسته پیچیده می‌شود. سیم‌پیچ ثانویه با رنگ قرمز مشخص شده است و بر روی سیم‌پیچ اولیه قرار گرفته است.

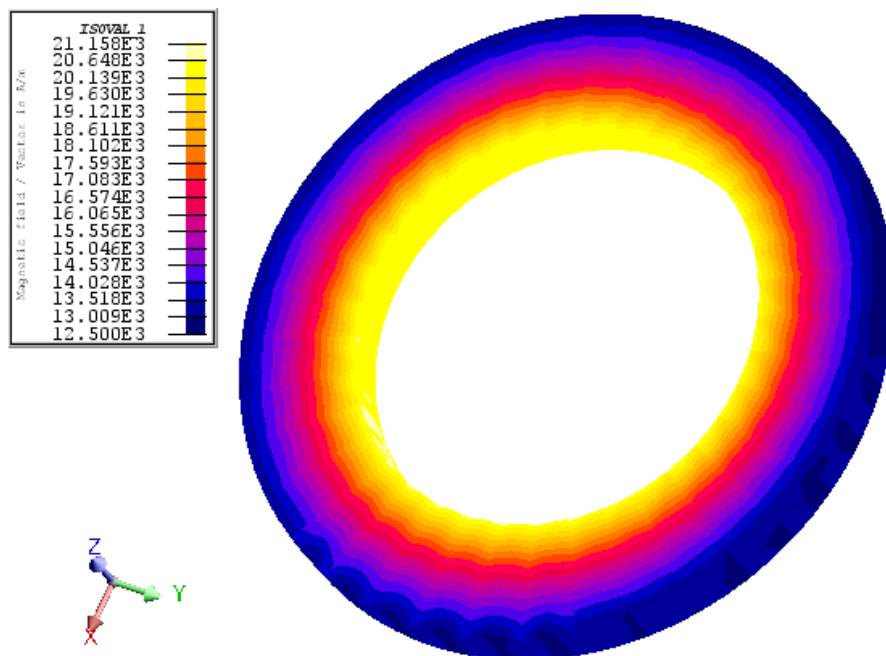


شکل ۴-۵: مدل سه‌بعدی تروئید همراه با سیم‌پیچی

پس از انجام شبیه‌سازی توزیع چگالی شار در سطح تروئید در شکل ۵-۵ نشان داده شده است. همان‌گونه که قابل مشاهده است تروئید به‌صورت کامل به اشباع رفته و چگالی شار سطح تروئید برابر با $1/376$ تسلا است. در شکل ۵-۵ مشخص است که شدت میدان اعمالی به تروئید در تمامی سطح هسته یکسان نیست و در سطح نزدیک به مرکز بیشتر بوده و هر چه فاصله از مرکز بیشتر شود افت پیدا می‌کند. دلیل این اتفاق را می‌توان به طول مسیر تروئید مرتبط دانست. به تعبیری از سیم‌پیچ جریان یکنواختی عبور می‌کند و تعداد دور نیز یکسان است اما با توجه به رابطه (۵-۱) چون در سطح نزدیک به مرکز l یا همان طول مسیر کمتر است شدت میدان اعمال شده بیشتر و در سطح دورتر شدت میدان اعمال شده کمتر است.



(الف)

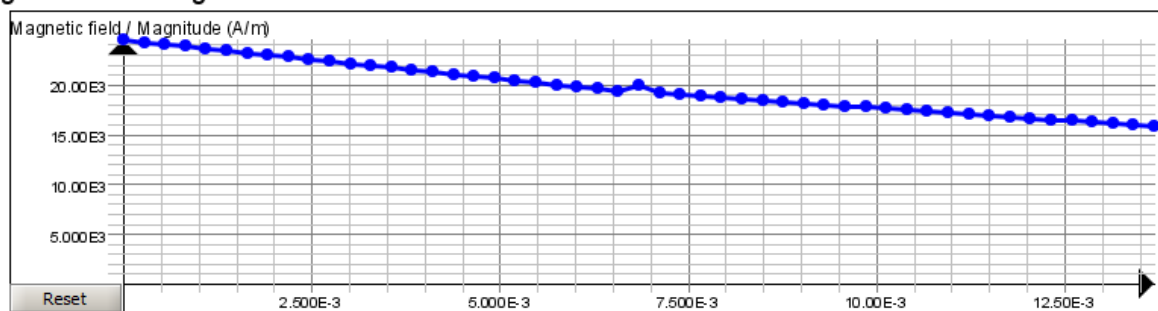


(ب)

شکل ۵-۵: (الف) توزیع چگالی شار (ب) توزیع شدت میدان مغناطیسی

در شکل ۵-۶ نیز تغییرات شدت میدان اعمال شده بر سطح تروئید نسبت به فاصله از مرکز نشان داده شده است. میانگین شدت میدان اعمال شده در بیشینه جریان برابر با ۱۹۶۹۸ آمپر بر متر است.

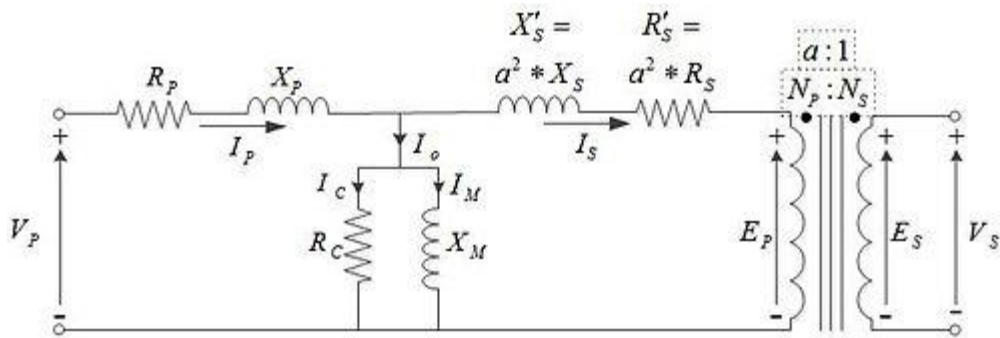
Magnetic field / Magnitude



شکل ۵-۶: تغییرات شدت میدان اعمال شده بر سطح تروئید نسبت به فاصله از مرکز

$$H = \frac{NI}{l} \quad (۵-۱)$$

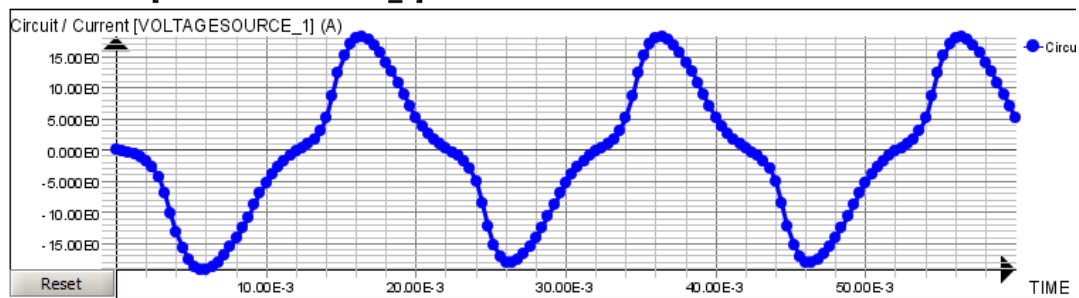
در شکل ۵-۷ مدار معادل الکتریکی ترانسفورماتور نشان داده شده است. در این شکل I_p جریان اولیه ترانسفورماتور، I_c جریان معادل کننده تلفات هسته ترانسفورماتور، I_m جریان مغناطیس‌کنندگی ترانسفورماتور و I_s جریان ثانویه ترانسفورماتور است. این مؤلفه‌های جریانی برای فریم تروئید در شکل ۵-۸ نشان داده شده‌اند.



شکل ۷-۵: مدار معادل الکتریکی ترانسفورماتور

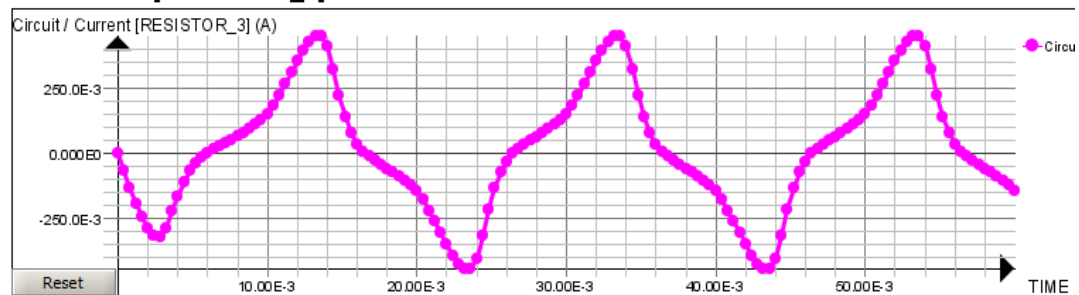
در سیکل اول با توجه به اینکه تغذیه مدار با استفاده از منبع ولتاژ است یک حالت گذرا در جریان‌ها وجود دارد که بعد از مدتی مدار به حالت پایدار خود رسیده و این نوسانات میرا می‌شوند. نکته دیگر تأثیر اشباع هسته بر روی شکل موج جریان است که منجر به غیر سینوسی شدن و اعوجاج در آن شده است. دلیل این غیر سینوسی بودن جریان به مشخصه غیرخطی B-H هسته بر می‌گردد.

Circuit / Current [VOLTAGESOURCE_1]



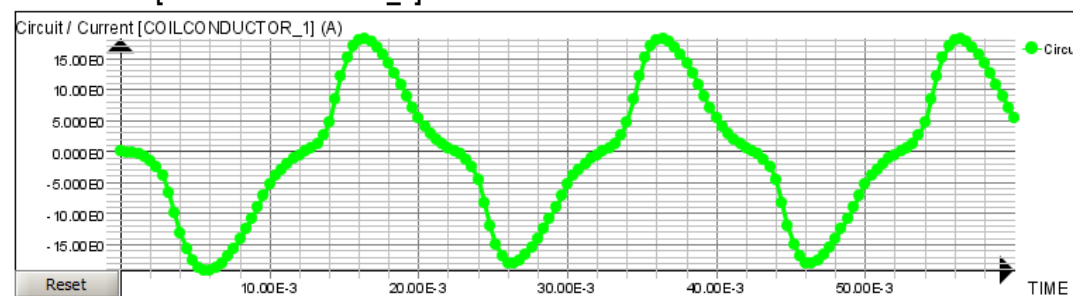
(الف)

Circuit / Current [RESISTOR_3]



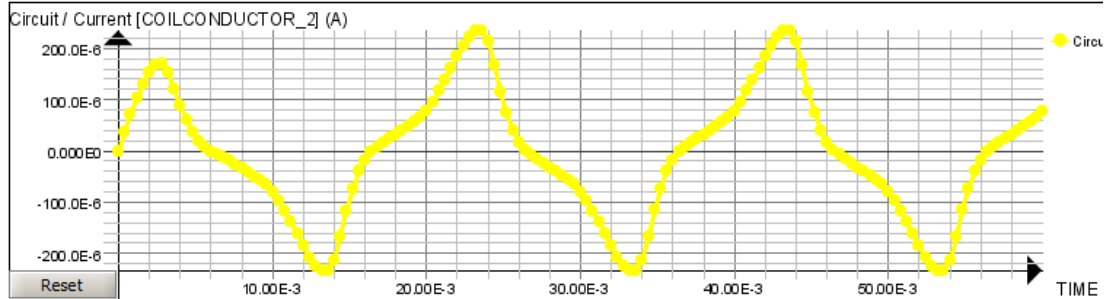
(ب)

Circuit / Current [COILCONDUCTOR_1]



(ج)

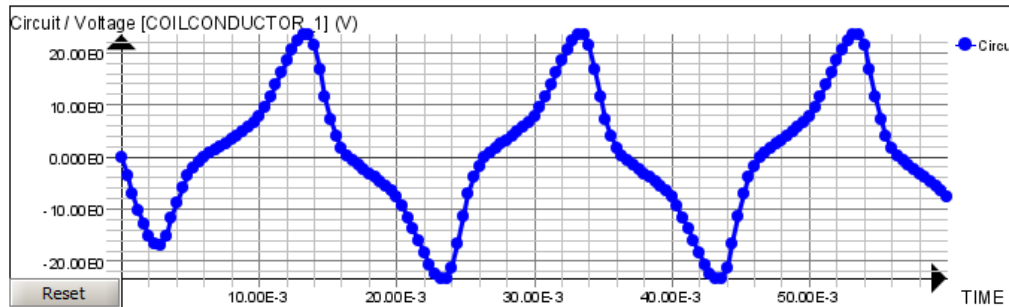
Circuit / Current [COILCONDUCTOR_2]



(د)

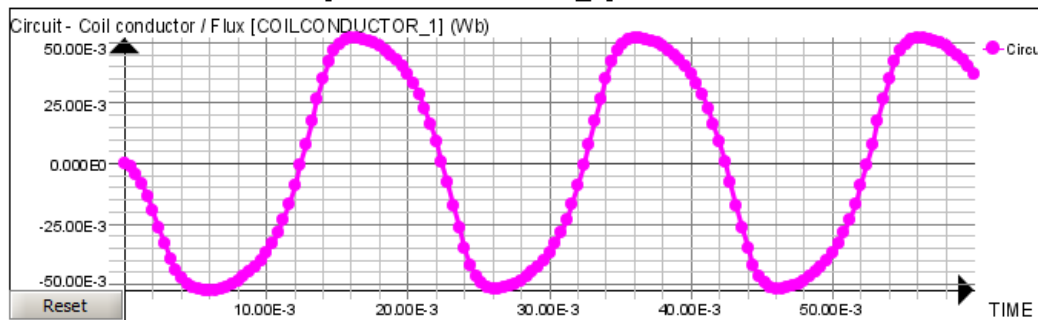
شکل ۸-۵: (الف) جریان کشیده شده از منبع (ب) جریان هسته ترانس (ج) جریان مغناطیس‌کنندگی (د) جریان در ثانویه ترانس (شرایط مدار باز)

Circuit / Voltage [COILCONDUCTOR_1]



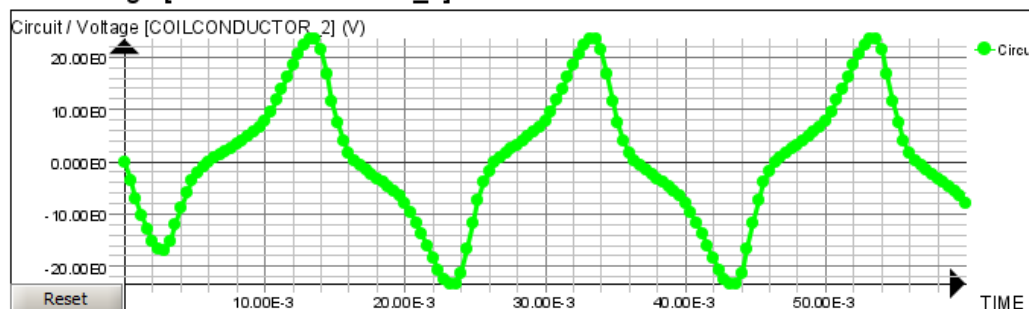
(الف)

Circuit - Coil conductor / Flux [COILCONDUCTOR_1]



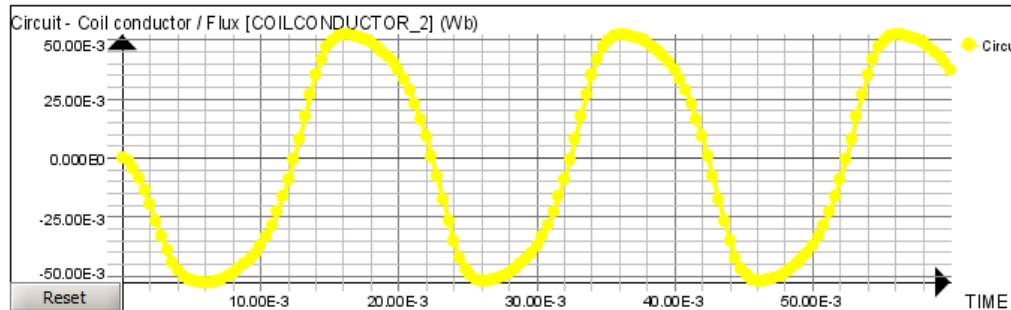
(ب)

Circuit / Voltage [COILCONDUCTOR_2]



(ج)

Circuit - Coil conductor / Flux [COILCONDUCTOR_2]

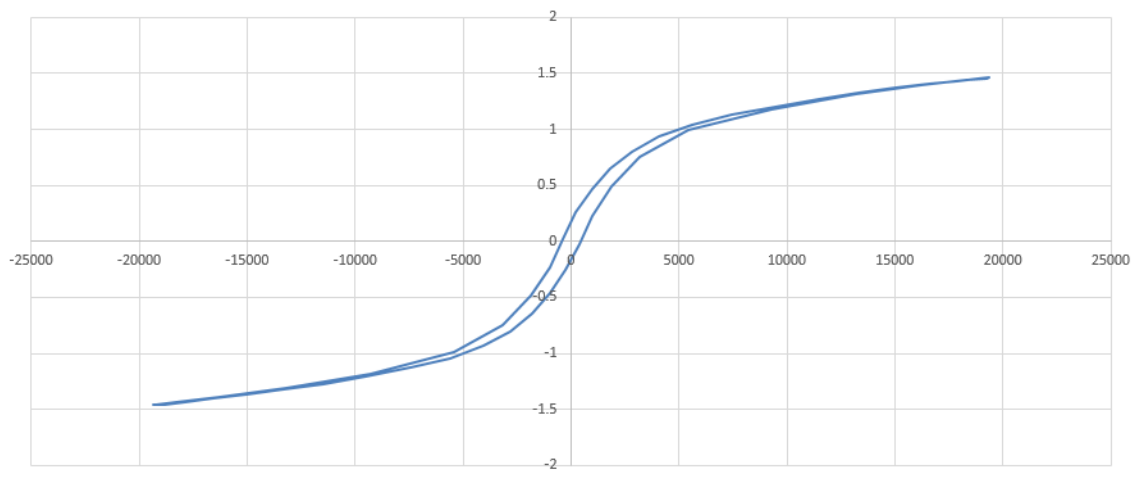


(د)

شکل ۹-۵: (الف) ولتاژ دو سر تروئید (ب) شار سیم‌پیچ اولیه (ج) ولتاژ القاشده (د) شار القاشده

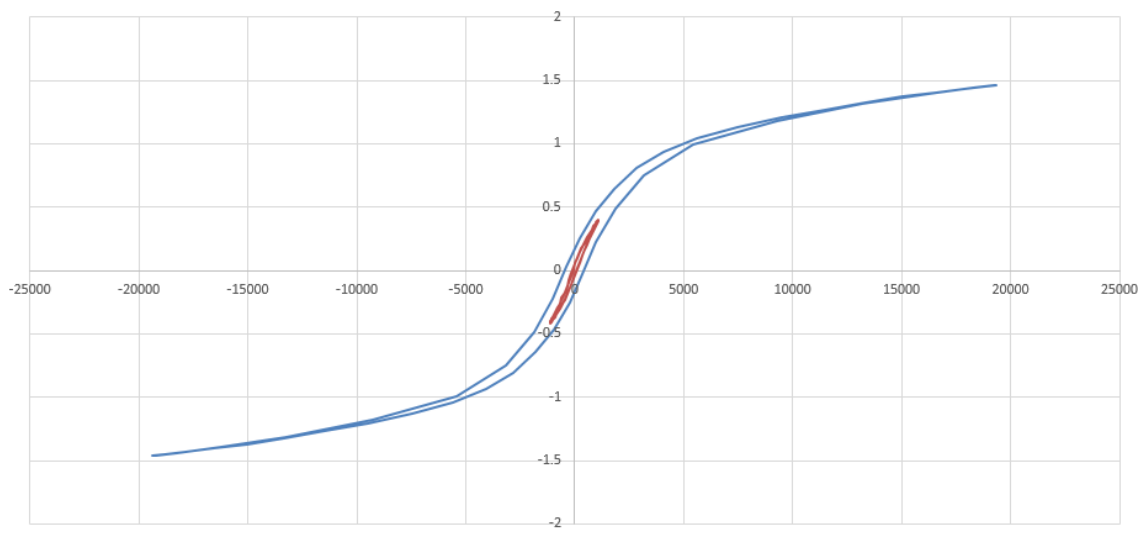
در شکل ۹-۵ ولتاژها و شارهای اولیه و ثانویه تروئید نشان داده شده‌اند. مشخص است که به خاطر اشباع شکل موج ولتاژ غیر سینوسی است و دارای اعوجاج ولی در مورد شار این گونه نیست و شار حالت سینوسی خود را دارد. حلقه هیستریزیس به دست آمده برای پودر آهن با استفاده از فریم تروئید در شکل ۱۰-۵ نشان داده شده است. برای به دست آوردن این حلقه مطابق با روند به کاررفته در دستگاه‌های B-H متر، شدت میدان مغناطیسی از روی جریان ورودی و با توجه به فرمول (۵-۱) به دست می‌آید. از طرف دیگر با اندازه‌گیری ولتاژ ثانویه ترانسفورماتور و انتگرال‌گیری از آن شار سیم‌پیچ به دست می‌آید سپس با تقسیم این شار بر سطح مقطع ورق چگالی شار مغناطیسی محاسبه می‌شود. در نهایت این دو پارامتر برحسب یکدیگر ترسیم شده و منحنی B-H فولاد به دست می‌آید.

T300-26 Toroid Frame



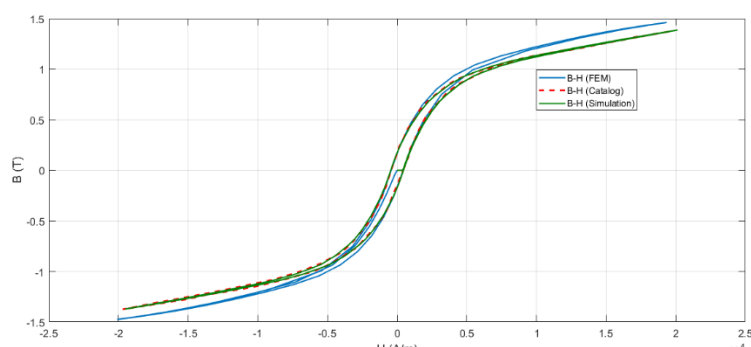
شکل ۱۰-۵: منحنی B-H پودر آهن T300-26 در فریم تروئید به دست آمده با استفاده از Flux

با تغییر سطح ولتاژ تغذیه مدار حلقه‌های جزئی منحنی B-H به دست می‌آیند. نتایج شبیه‌سازی برای ولتاژهای با دامنه‌های مختلف در شکل ۱۱-۵ نشان داده شده‌اند. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که مدل به دست آمده قابلیت به دست آوردن منحنی‌های جزئی B-H را نیز دارا است.



شکل ۵-۱۱: سیکل اصلی و حلقه‌های جزئی منحنی B-H به دست آمده از Flux

شکل ۵-۱۲: نتایج شبیه‌سازی توسط نرم افزار متلب، نرم افزار Altair Flux و کاتالوگ محصول را به منظور مقایسه این نتایج در یک نمودار نشان می‌دهد.



شکل ۵-۱۲: مقایسه نتایج شبیه‌سازی و کاتالوگ محصول تروئید T300-26

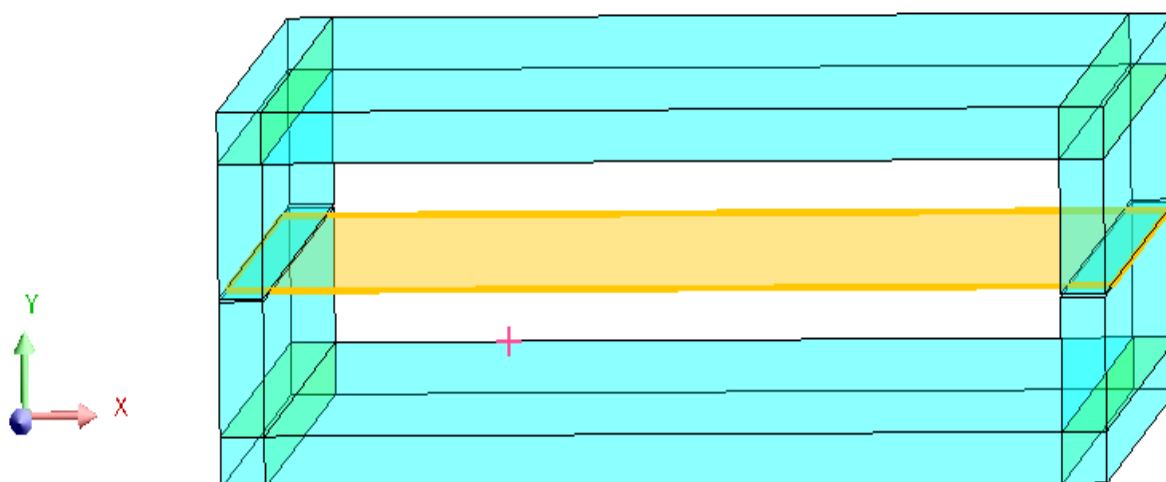
۴-۵- مدل‌سازی تک ورق

مدل‌سازی اجزا محدود تک ورق به منظور اعتبارسنجی درستی طراحی تحلیلی به دست آمده است. مدل سه بعدی تک ورق در شکل ۵-۱۳ نشان داده شده است. در این شکل حجم نارنجی رنگ بیانگر یک ورق از فولاد M-120-50 A و رنگ آبی بیانگر دو یوغ از جنس فولاد M-270-50A می‌باشند. نحوه مش‌بندی به صورت انجام شده است که در سطح تماس بین دو بخش مش ریزتری نسبت به بخش‌های دیگر تعریف شده است تا نتایج به دست آمده از دقت قابل قبولی برخوردار باشند. مشخصات طراحی فریم تک ورق بر اساس استانداردهای موجود در

جدول ۲-۵ ارائه شده‌اند.

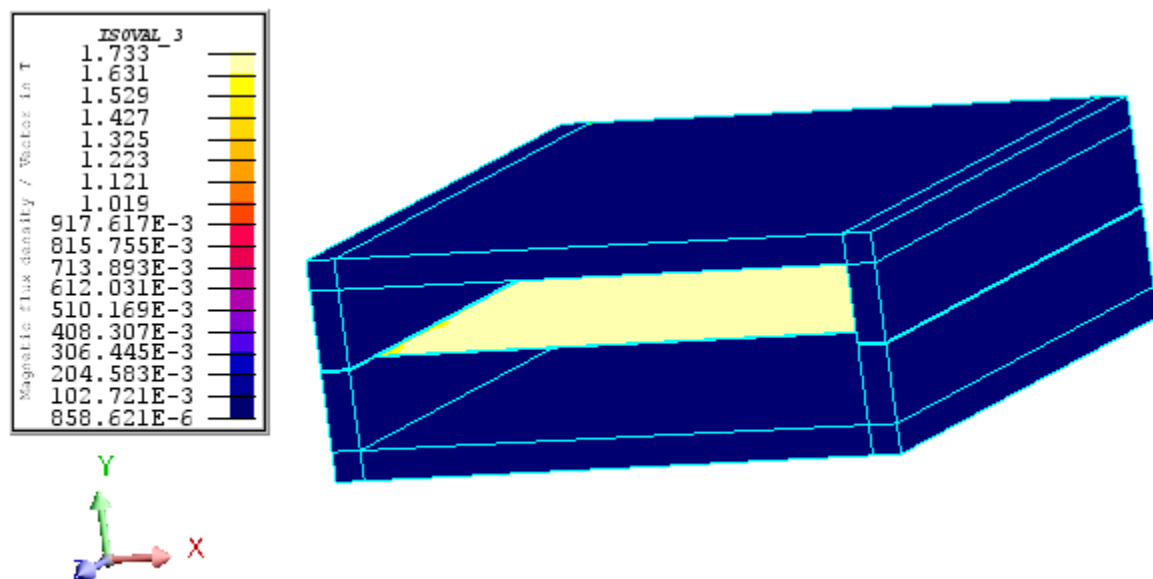
جدول ۲-۵: مشخصات طراحی فریم تک ورق

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
ضخامت هر یوغ	۲۵ mm	ضخامت ورق	۰/۵ mm
ارتفاع هر یوغ	۹۰ mm	طول ورق	۵۰۰ mm
عرض یوغ	۵۰۰ mm	عرض ورق	۴۰۰ mm
طول یوغ	۵۰۰ mm	فرکانس	۵۰ Hz
ولتاژ تغذیه	۵۸ v	تعداد دور اولیه و ثانویه	۴۰۰

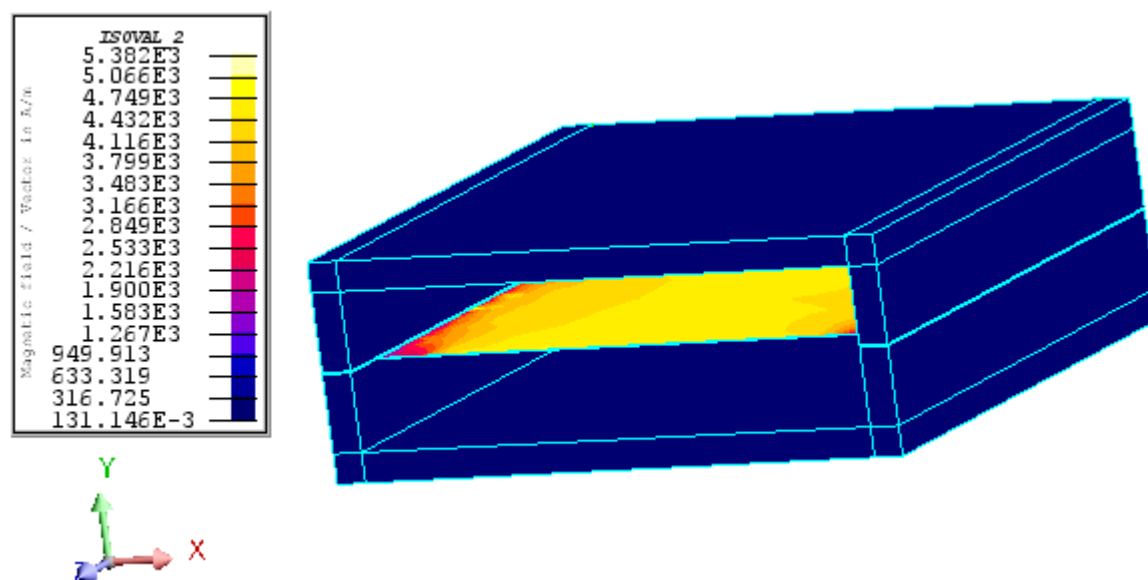


شکل ۱۳-۵: مدل سه‌بعدی تک ورق

پس از انجام شبیه‌سازی نتایج توزیع چگالی شار و شدت میدان مغناطیسی در سطح ورق و یوغ‌ها در شکل ۱۴-۵ نشان داده شده‌اند. نتایج به دست آمده درستی طراحی تحلیلی را اثبات کرده و بیان می‌کند که با توجه به مقادیر طراحی شده هسته فولادی به اشباع می‌رود.



(الف)

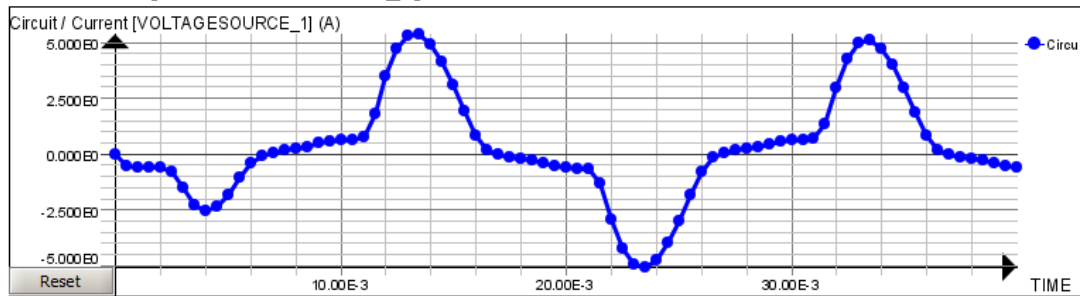


(ب)

شکل ۱۴-۵: (الف) توزیع چگالی شار (ب) توزیع شدت میدان مغناطیسی

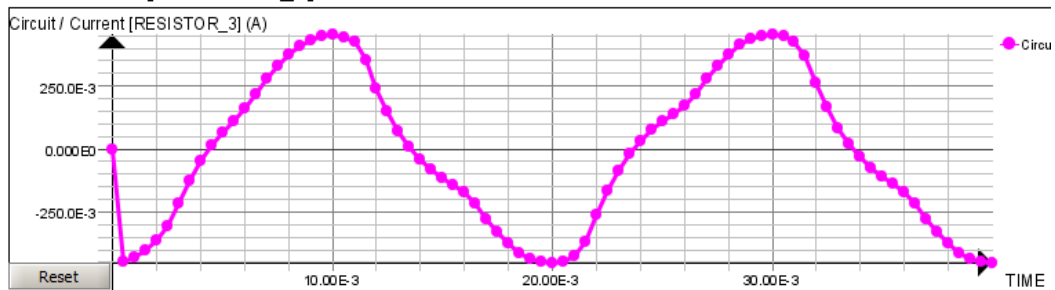
شکل موج‌های جریان‌های مدار در شکل ۱۵-۵ نشان داده شده‌اند.

Circuit / Current [VOLTAGESOURCE_1]



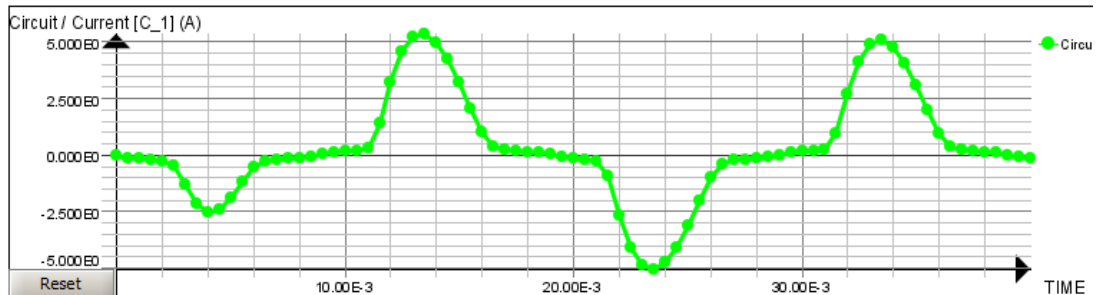
(الف)

Circuit / Current [RESISTOR_3]



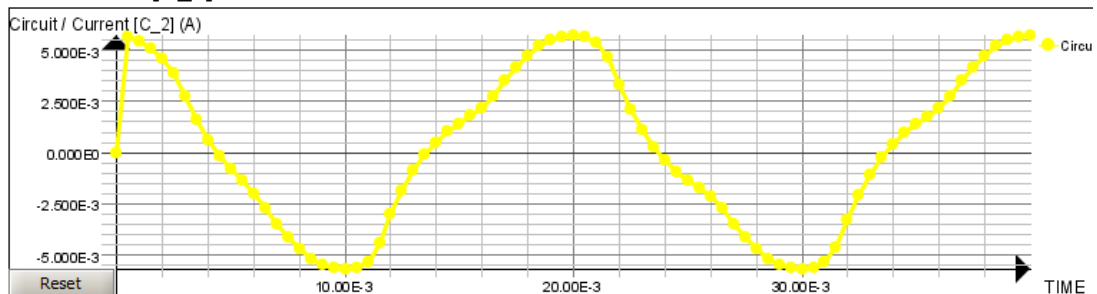
(ب)

Circuit / Current [C_1]



(ج)

Circuit / Current [C_2]

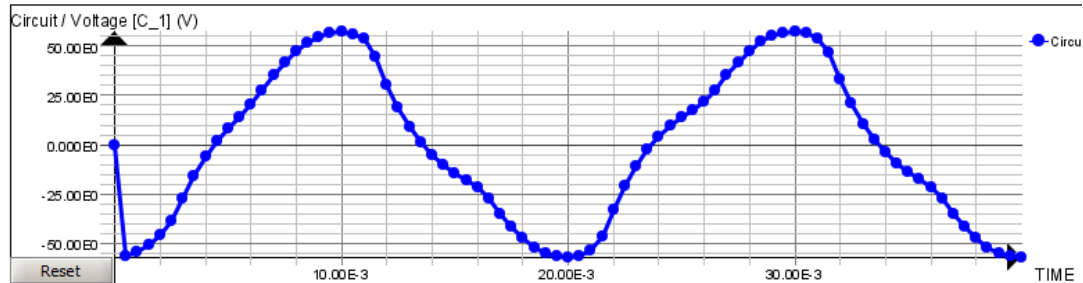


(د)

شکل ۱۵-۵: (الف) جریان کشیده شده از منبع (ب) جریان هسته ترانس (ج) جریان مغناطیس‌کنندگی (د) جریان در ثانویه ترانس (شرایط مدارباز)

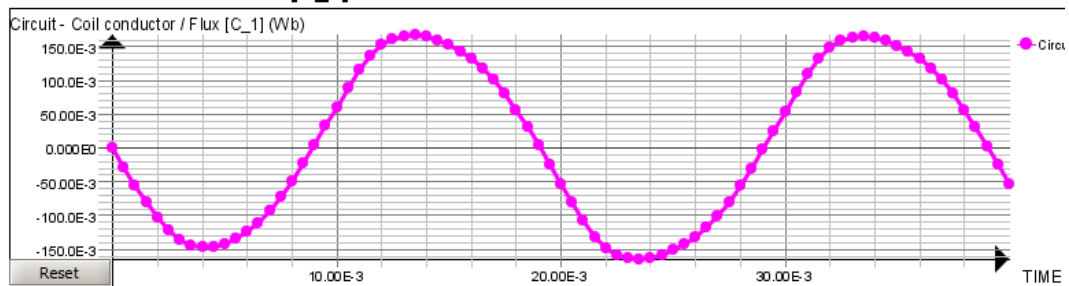
شکل موج‌های ولتاژها و شارهای سیم‌پیچ اولیه و سیم‌پیچ ثانویه در شکل ۱۶-۵ نشان داده شده‌اند.

Circuit / Voltage [C_1]



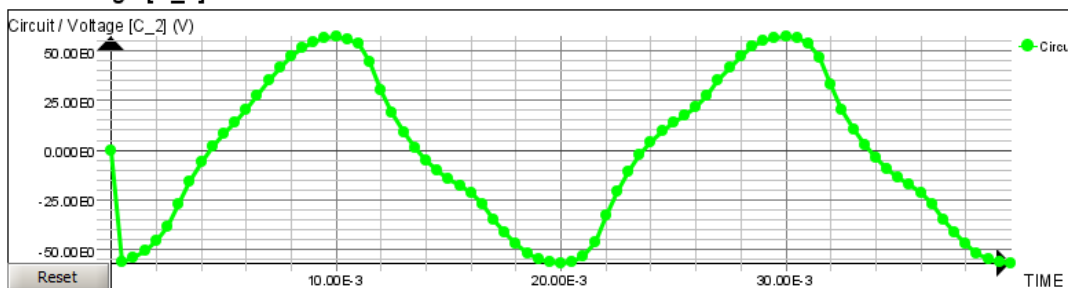
(الف)

Circuit - Coil conductor / Flux [C_1]



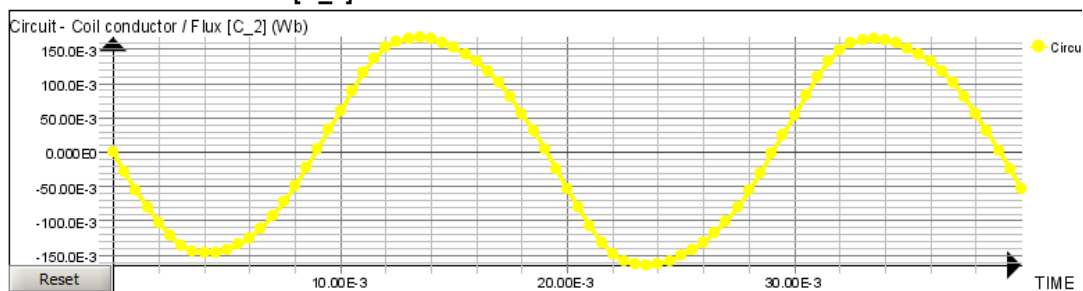
(ب)

Circuit / Voltage [C_2]



(ج)

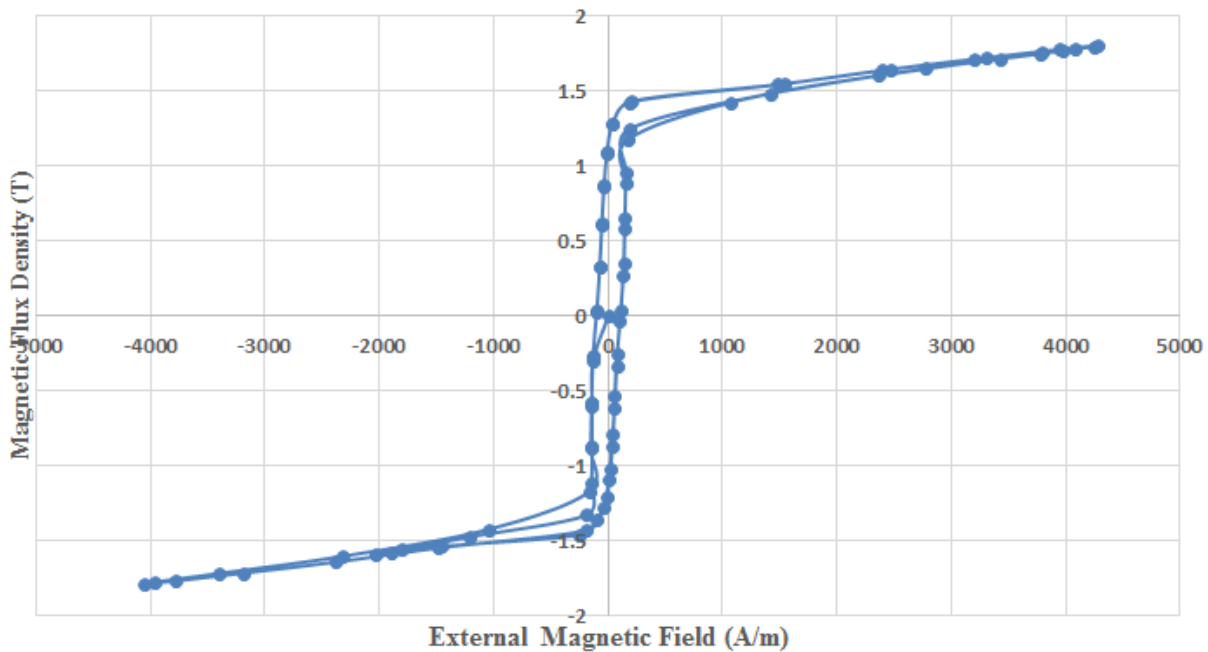
Circuit - Coil conductor / Flux [C_2]



(د)

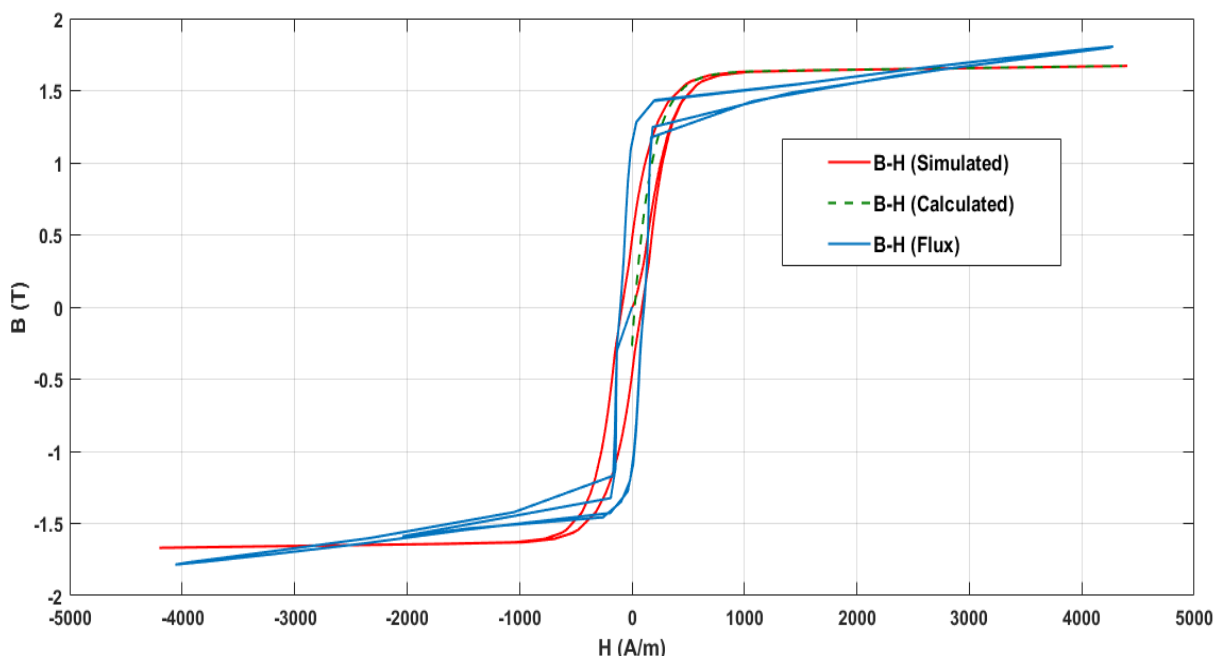
شکل ۱۶-۵: (الف) ولتاژ دو سر تک ورق (ب) شار سیم‌پیچ اولیه (ج) ولتاژ القاشده (د) شار القاشده

منحنی B-H ورق فولادی M530-50A-50Hz به دست آمده از مدل فلاکس در شکل ۵-۱۷ نشان داده شده است.



شکل ۵-۱۷: مدل B-H فولاد M530-50A به دست آمده از Flux

شکل ۵-۱۸ نتایج شبیه‌سازی توسط نرم افزار متلب، نرم افزار Altair Flux و محاسبات اکسل بر اساس کاتالوگ محصول را در قالب اپستین به منظور مقایسه این نتایج در یک شکل نشان می‌دهد.



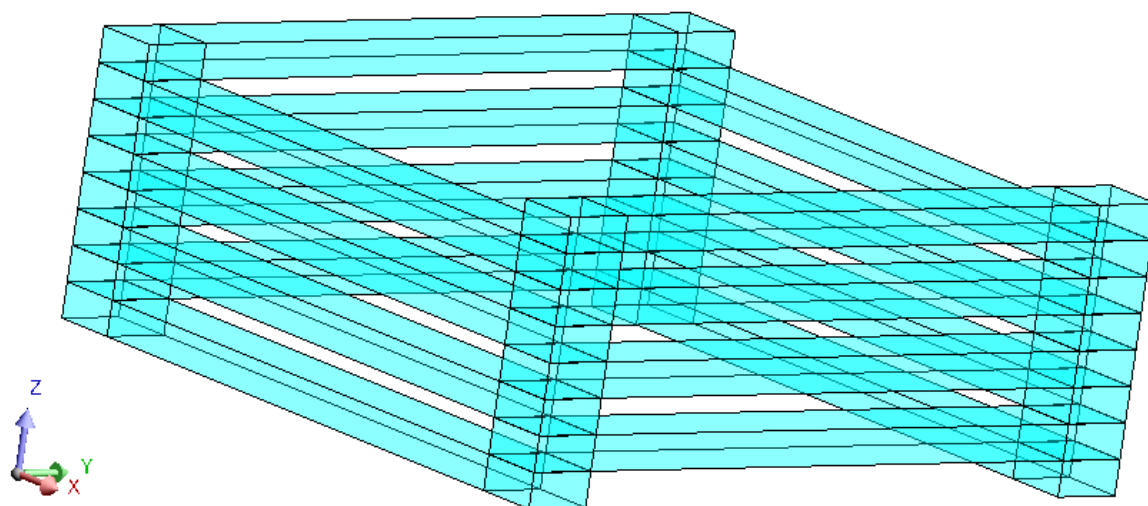
شکل ۵-۱۸: مقایسه نتایج شبیه‌سازی و کاتالوگ محصول تک ورق M530-50 A

۵-۵- مدل‌سازی هسته اپشتین

مطابق با طراحی تحلیلی مدل سه‌بعدی هسته اپشتین در شکل ۱۹-۵ نشان داده شده است. مدل بزرگنمایی شده کار به منظور نشان دادن نحوه قرارگیری ورقه‌ها بر روی یکدیگر آورده شده است. در قاب اپشتین یک چگالی شار با شکل موج سینوسی منجر به یک ولتاژ ثانویه سینوسی می‌شود. با این حال، نگه داشتن حالت سینوسی ولتاژ القایی به سختی صورت می‌گیرد. چون مدار مغناطیسی فاقد فاصله هوایی است و مواد نیز غیرخطی‌اند، شکل موج سینوسی ولتاژ تغییر می‌کند. این عمل معمولاً در مقادیر بالای چگالی شار مغناطیسی رخ می‌دهد. مشخصات طراحی فریم اپشتین در ۰ ارائه شده‌اند.

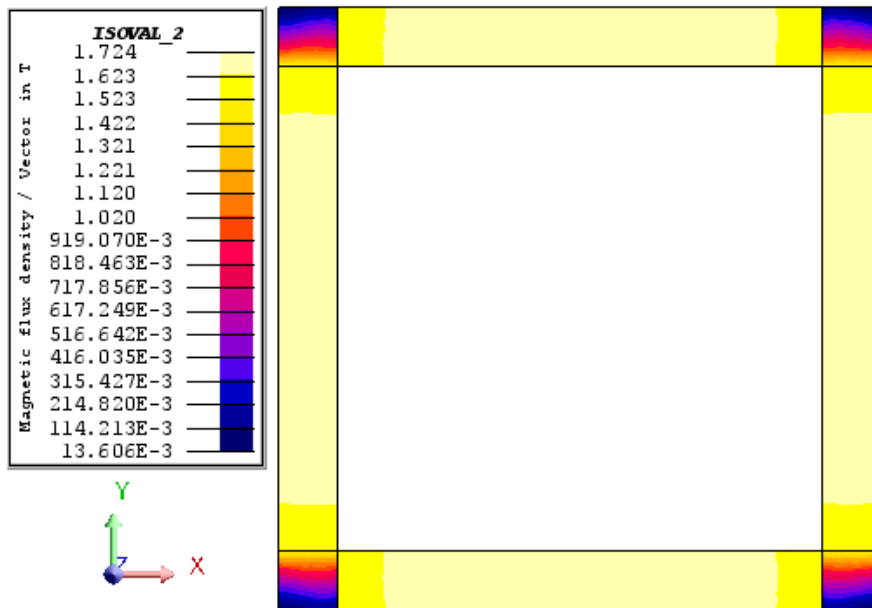
جدول ۳-۵: مشخصات طراحی فریم اپشتین

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
طول ورق	۲۸۰ mm	ولتاژ تغذیه	۴۰ v
عرض ورق	۳۰ mm	تعداد دور اولیه و ثانویه	۷۰۰
ضخامت ورق	۰/۵ mm	فرکانس	۵۰ Hz

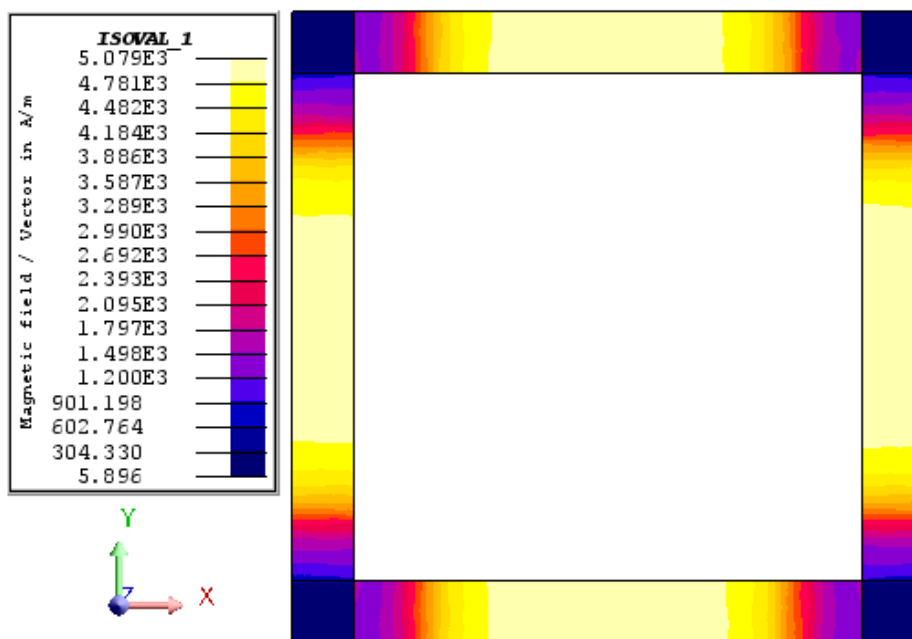


شکل ۱۹-۵: مدل بزرگنمایی شده سه‌بعدی اپشتین

پس از انجام شبیه‌سازی حالت گذرا، توزیع چگالی شار و شدت میدان مغناطیسی در شکل ۲۰-۵ نشان داده شده‌اند. شکل موج‌های جریان در اپشتین در شکل ۲۱-۵ نشان داده شده‌اند. در شکل ۲۱-۵ (الف) جریان کشیده شده از منبع نشان داده شده است. همان‌گونه که مشخص است در سیکل اول با توجه به اینکه مدار حالت گذرای خود را طی نکرده است یک جریان هجومی وجود دارد که این جریان با گذر زمان و پایدار شدن مدار از بین رفته و در سیکل‌های بعدی جریان واقعی مدار نشان داده شده است. نکته دیگر در رابطه با شکل موج جریان اثر اشباع مدار مغناطیسی است که این عامل منجر به ایجاد هارمونیک در جریان ورودی و تغییر شکل موج سینوسی آن شده است.



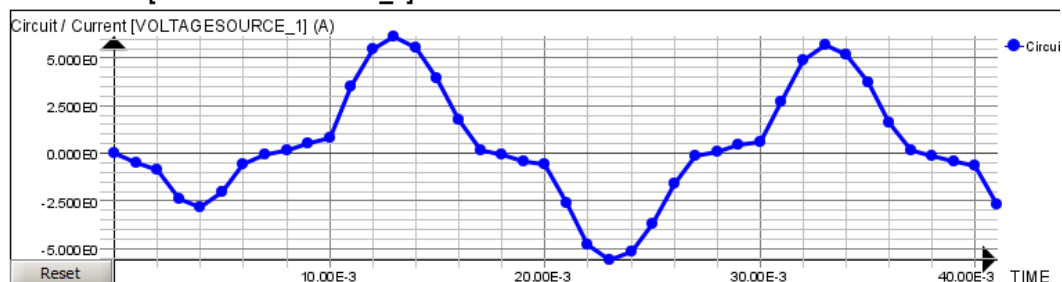
(الف)



(ب)

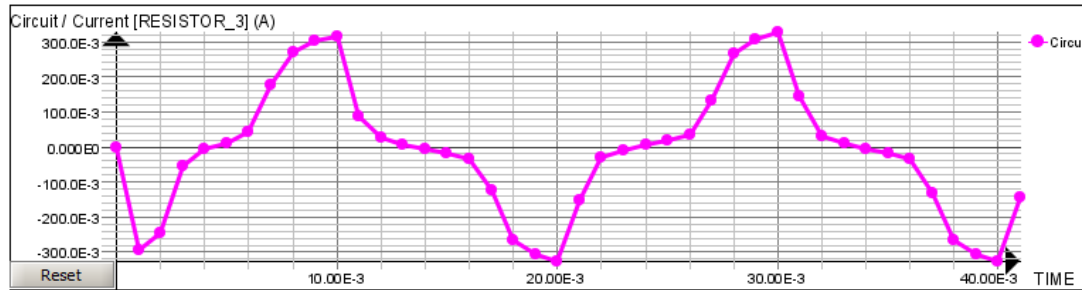
شکل ۲۰-۵: (الف) توزیع چگالی شار (ب) توزیع شدت میدان مغناطیسی

Circuit / Current [VOLTAGESOURCE_1]



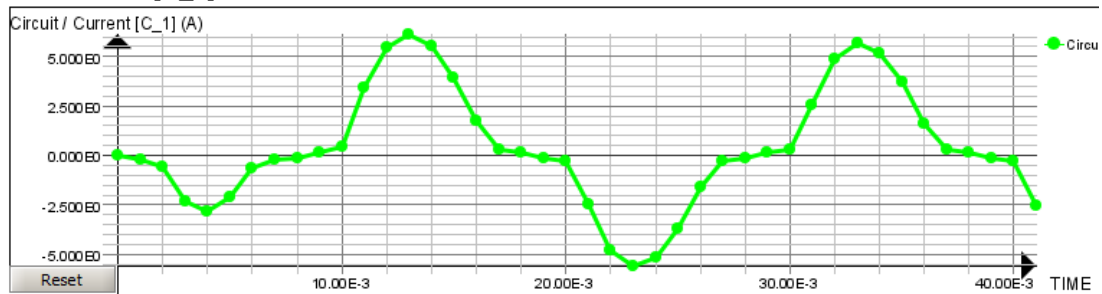
(الف)

Circuit / Current [RESISTOR_3]



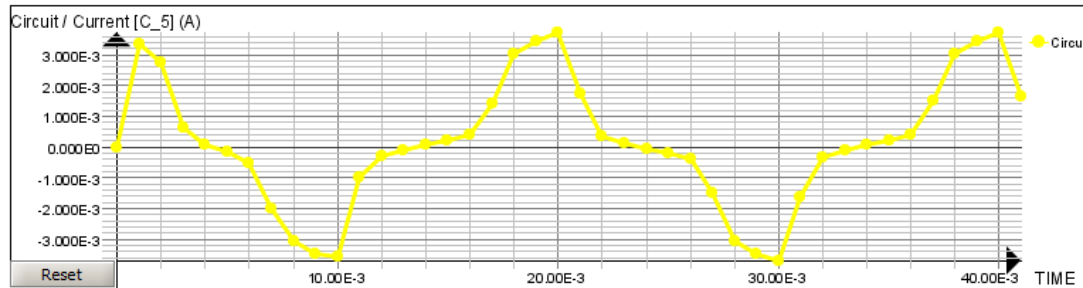
(ب)

Circuit / Current [C_1]



(ج)

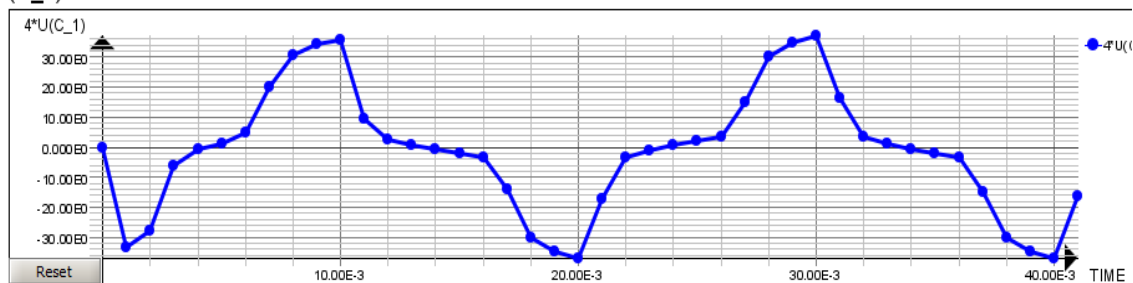
Circuit / Current [C_5]



(د)

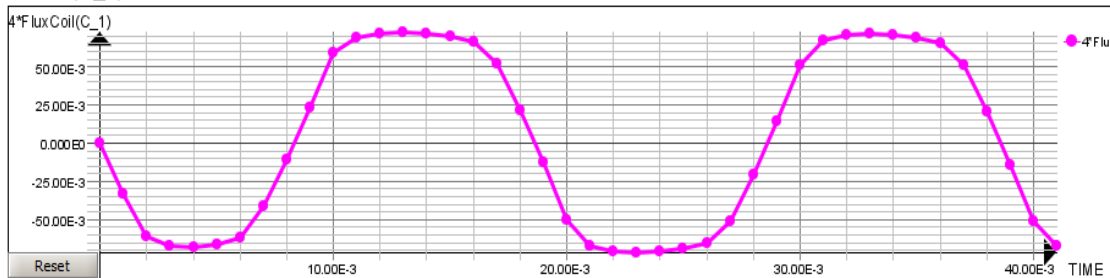
شکل ۲۱-۵: (الف) جریان کشیده شده از منبع (ب) جریان هسته ترانس (ج) جریان مغناطیس‌کنندگی (د) جریان در ثانویه ترانس (شرایط مدارباز)

$4 \cdot U(C_1)$



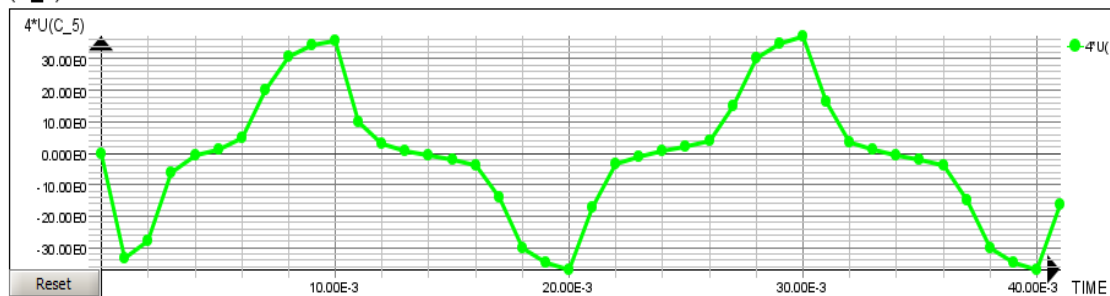
(الف)

4*FluxCoil(C_1)



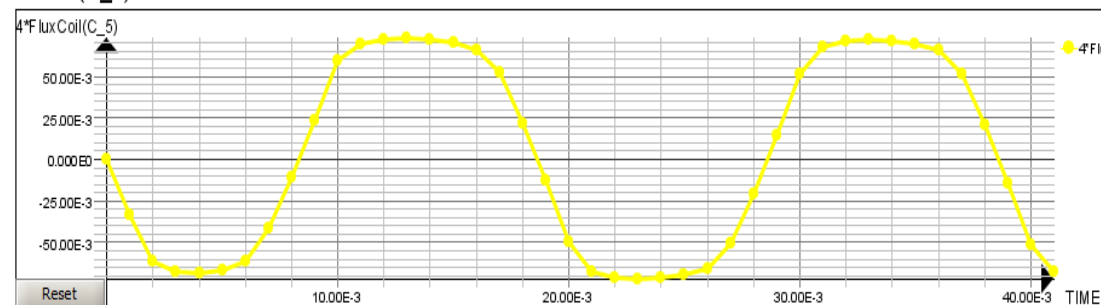
(ب)

4*U(C_5)



(ج)

4*FluxCoil(C_5)

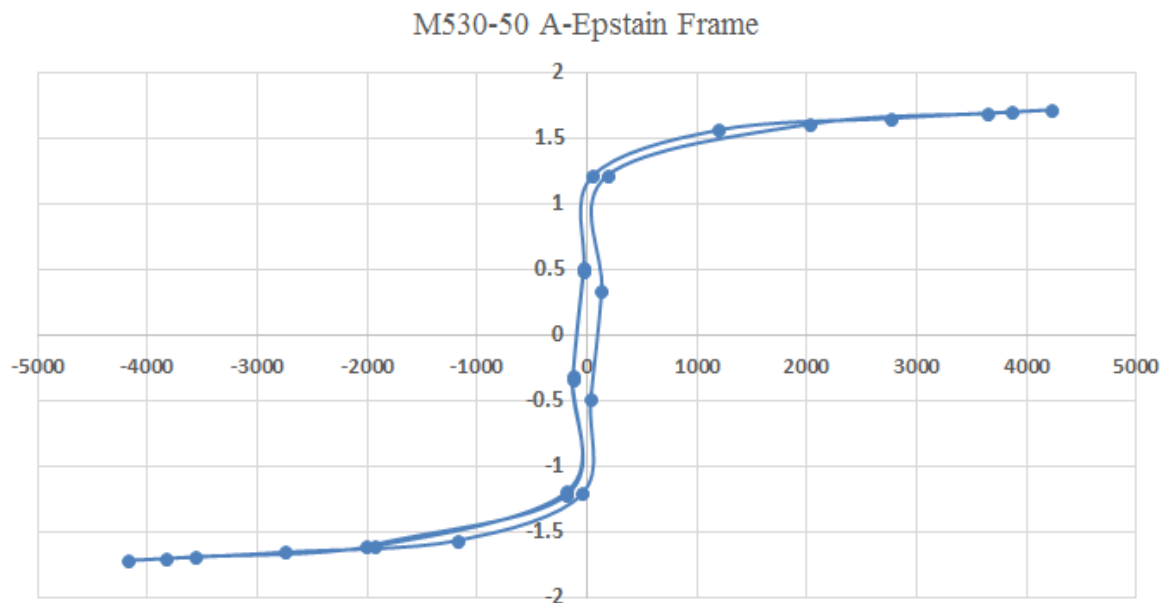


(د)

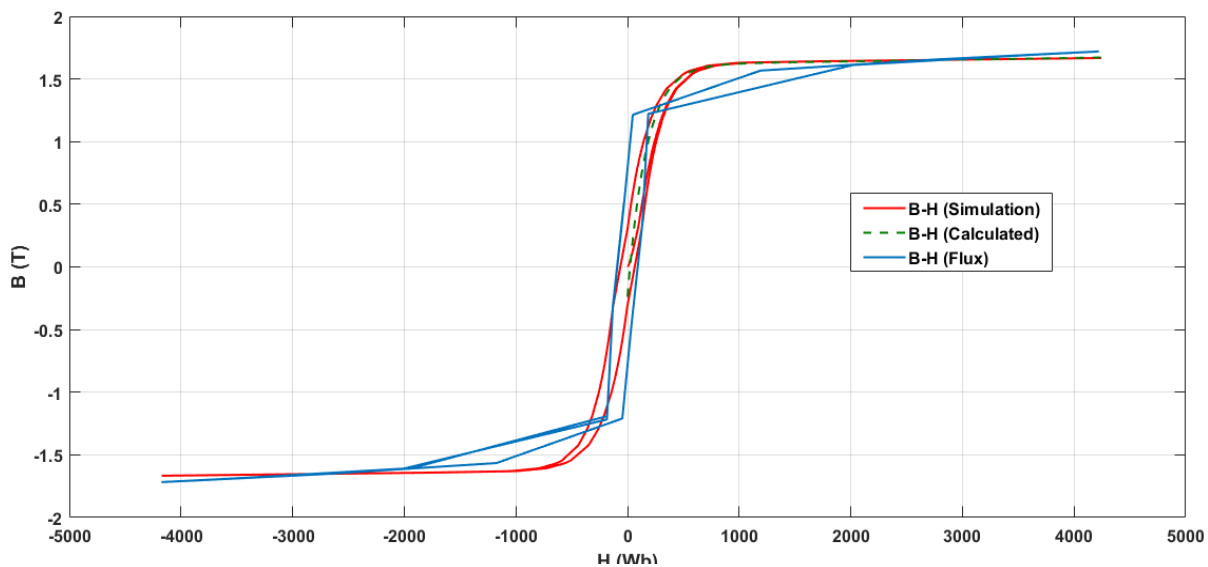
شکل ۲۲-۵: (الف) ولتاژ دو سر اپشتین (ب) شار سیم‌پیچ اولیه (ج) ولتاژ القاشده (د) شار القاشده

شکل موج‌های ولتاژ و شار در اولیه و ثانویه اپشتین در شکل ۲۲-۵ نشان داده شده‌اند. همان‌گونه که مشخص است پس از طی حالت گذر شار دو سر اپشتین و شار القاشده حالت سینوسی دارند و برعکس ولتاژ که به خاطر اشباع حالت سینوسی خود را از دست داده است.

منحنی B-H فریم اپشتین در شکل ۲۳-۵ نشان داده شده است. در این شکل با توجه به اینکه زمان شبیه‌سازی مدل اپشتین با توجه به تعداد مش بسیار بالای آن (در حدود ۱/۵ میلیون) بسیار زمان‌بر بوده و چیزی در حدود ۱۰ ساعت برای دو سیکل آن با گام زمانی ۰/۰۰۱ به طول می‌انجامد. امکان استفاده از گام‌های زمانی کوچک‌تر میسر نبوده است به همین خاطر کمی اعوجاج در منحنی B-H به دست آمده وجود دارد. ولی از لحاظ اطلاعات حیاتی از قبیل چگالی شار اشباع، شدت میدان متناسب با آن و تقارن در ساختار منحنی B-H هیچ‌گونه خطایی وجود ندارد.



شکل ۵-۲۳: حلقه هیستریزس فولاد M530-50A-50Hz به کاررفته در فریم اپستین به دست آمده با استفاده از Flux
شکل ۵-۲۴: نتایج شبیه‌سازی توسط نرم افزار متلب، نرم افزار Altair Flux و محاسبات اکسل بر اساس کاتالوگ محصول را به منظور مقایسه این نتایج در یک شکل نشان می‌دهد.



شکل ۵-۲۴: مقایسه نتایج شبیه‌سازی و کاتالوگ محصول قاب اپستین با ورق M530-50 A

۵-۶- نحوه محاسبه تلفات هسته با استفاده از نرم‌افزار Flux

مطابق با مدل ارائه شده در نرم‌افزار Flux، تلفات آهنی به سه بخش تلفات هیستریزس، تلفات جریان گردشی و تلفات اضافی جدا می‌شوند. فلاکس در تغذیه AC از این رابطه برای چگالی شار استفاده می‌کند. رابطه تلفات برتوتی در معادله (۵-۲) نمایش داده شده است.

$$dP_{\text{moy}} = K_h B_m^2 f + \frac{\pi^2 \sigma d^2}{6} (B_m f)^2 + K_e (B_m f)^2 \times 8.67 \quad (5-2)$$

که در محیط فلاکس به صورت معادله (۳-۵) بیان می‌شود:

$$dP_{\text{moy}} = [K_h B_m^2 f + \frac{\pi^2 \sigma d^2}{6} (B_m f)^2 + K_e (B_m f)^{\frac{3}{2}} \times 8.67] \times K_f \quad (۳-۵)$$

در این رابطه K_f ضریب پرشدگی است. این ضریب عایق الکتریکی ورق‌های هسته مغناطیسی را در نظر می‌گیرد. دیگر ضرایب موجود در جدول ۴-۵ زیر شرح داده شده‌اند.

جدول ۴-۵: ضرایب موجود برای محاسبه تلفات هسته

واحد	ضریب	
WsT2m-3	ضریب تلفات مغناطیسی توسط هیستریزیس	K_h
Sm-1	هدایت‌پذیری	σ
W(Ts-1)-3/2m-3	ضریب تلفات جریان گردابی	K_e
m	ضخامت ورق	d
-	ضریب پرشدگی	K_f
Hz	فرکانس	f

با در اختیار داشتن منحنی تلفات برحسب کیلوگرم ماده و استفاده از آن در فایل اکسل ارائه شده در فلاکس به همراه اطلاعاتی از قبیل ضخامت ورق، فرکانس کاری و هدایت الکتریکی، با حل فایل اکسل ضرایب تلفات فوکو و هیستریزیس به دست می‌آیند. در این بررسی‌ها دو ماده استفاده شده‌اند که منحنی تلفات بر کیلوگرم و ضرایب تلفات آن‌ها در شکل ۲۵-۵ و شکل ۲۶-۵ نشان داده شده‌اند.

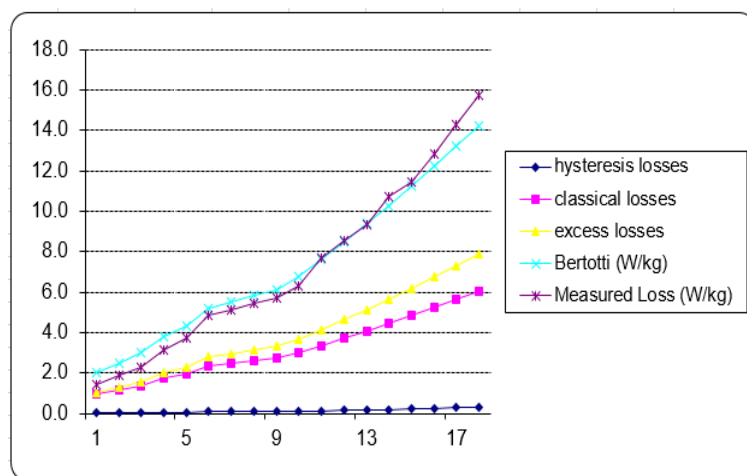
۱- T300 26 (هسته تروئید)

Electrical conductivity 1/(ohm*m):	1.03E+07
Density (kg/m3):	7000
Thickness (m):	1.00E-03
Frequency (Hz):	50.0
αh : B exponent for hysteresis loss term	2.000
βh : f exponent for hysteresis loss term	1.000
αc : B exponent for classical loss term	1.374
βc : f exponent for classical loss term	2.000
αe : B exponent for loss in excess term	1.500
βe : f exponent for loss in excess term	1.500
K_e	18.000
K_h	42.000
Volume (kg)	1.43E-04

(ب)

f=50Hz	
B (T)	Measured Loss (W/kg)
0.260	1.429
0.300	1.857
0.340	2.286
0.400	3.143
0.440	3.714
0.500	4.857
0.520	5.143
0.540	5.429
0.560	5.714
0.600	6.286
0.650	7.714
0.700	8.571
0.750	9.314
0.800	10.714
0.850	11.429
0.900	12.857
0.950	14.286
1.000	15.714

(الف)



(ج)

شکل ۲۵-۵: (الف) منحنی تلفات داده شده در کاتالوگ (ب) ضرایب تلفات به دست آمده (ج) تطبیق منحنی تلفات با مدل به دست آمده

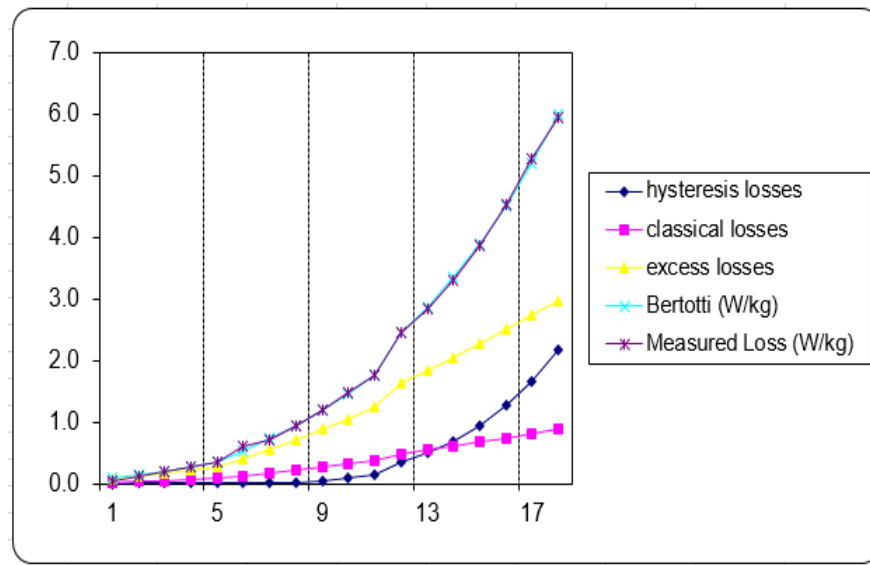
۲- M530-50Hz (به کاررفته در اپستین و تک ورق)

Electrical conductivity 1/(ohm*m):	3.22E+06
Density (kg/m3):	7780
Thickness (m):	5.00E-04
Frequency (Hz):	50.0
ah: B exponent for hysteresis loss term	4.273
βh: f exponent for hysteresis loss term	1.000
αc: B exponent for classical loss term	1.374
βc: f exponent for classical loss term	2.000
αe: B exponent for loss in excess term	1.373
βe: f exponent for loss in excess term	1.500
Ke	3.622
Kh	34.790
Volume (kg)	1.29E-04

(ب)

f=50Hz	
B (T)	Measured Loss (W/kg)
0.100	0.040
0.150	0.110
0.200	0.190
0.250	0.260
0.300	0.340
0.400	0.600
0.500	0.710
0.600	0.940
0.700	1.190
0.800	1.470
0.900	1.760
1.100	2.440
1.200	2.840
1.300	3.300
1.400	3.860
1.500	4.530
1.600	5.280
1.700	5.940

(الف)



(ج)

شکل ۵-۲۶: (الف) منحنی تلفات داده شده در کاتالوگ (ب) ضرایب تلفات به دست آمده (ج) تطبیق منحنی تلفات با مدل به دست آمده

M120-27S-50Hz -۳

این فولاد دارای تلفات بر کیلوگرم ۰/۷ در ۱/۵ تسلا است. ولی مشخصه تلفات بر کیلوگرم این ماده در دیگر چگالی شارها در اختیار نیست به همین خاطر نمی‌توان مطابق با دو ماده قبل عمل کرد و تلفات را محاسبه نمود. البته نکته مهم در رابطه با این فولاد که در یوغ فریم تک ورق به کار رفته این است که چگالی شار بیشینه این فولاد به ۰/۰۲ تسلا محدود است که در نتیجه آن تفاوت بسیار ناچیز و در نزدیکی صفر خواهد بود. با توجه به اینکه این نوع فولاد عموماً از وضعیت تلفات بر کیلوگرم بسیار مناسبی برخوردار است، در این مقدار چگالی شار تلفات مربوط به این فولاد را می‌توان ناچیز در نظر گرفت. در نهایت با اعمال این ضرایب به فلاکس و در مرحله post processing ترم‌های مختلف تلفات محاسبه و در جدول ۵-۵ نشان داده شده‌اند.

جدول ۵-۵: ترم‌های مختلف تلفات هسته

ورق	تلفات هیستریزیس	تلفات جریان گردابی	تلفات اضافی	مجموع کل تلفات
تروئید	۰/۰۴۶	۰/۰۷۱	۳/۱۹	۳/۳
ورق تنها	۱/۴۵۴	۰/۰۲۱۴	۱/۱۴۸	۲/۶۳۸
اِپِستین	۰/۹۸۱	۰/۰۱۶۱	۰/۸۶۶	۱/۸۶۴

۵-۷- محاسبه اندوکتانس با استفاده از Flux

در مواد با مشخصه خطی اگر یک فاز مدل سازی شود رابطه بین شار، انرژی و اندوکتانس به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$\varphi = L.I \Rightarrow L = \frac{\varphi}{I} \quad (5-4)$$

$$W = \frac{1}{2} L.I^2 \Rightarrow L = \frac{2W}{I^2} \quad (5-5)$$

با استفاده از فلاکس می‌توان از هر دو رابطه بالا استفاده کرد چون فلاکس قادر به محاسبه پارامترهای زیر است:

۱. شار مغناطیسی دیده شده به وسیله سیم پیچ
۲. انرژی مغناطیسی در ناحیه‌های حجمی با محاسبه حاصل ضرب $B \cdot H$ در حجم‌های مربوطه
۳. جریان تزریقی به سیم پیچ‌ها

۵-۸- محاسبه اندوکتانس نشتی

برای محاسبه اندوکتانس نشتی ترانسفورماتور به صورت اتصال کوتاه در نظر گرفته می‌شود. در این حالت جریان مغناطیس‌کنندگی قابل صرف‌نظر کردن، چگالی شار در بخش‌های مختلف پایین و شار نشتی زیاد است. برای مدل‌سازی این حالت در مدار الکتریکی مقاومت R4 بسیار کوچک در نظر گرفته می‌شود که مشابه با شرایط اتصال کوتاه است. پس از انجام شبیه‌سازی انرژی بخش‌های مختلف محاسبه شده و اندوکتانس پراکندگی از رابطه (۵-۶) محاسبه می‌شود.

$$L_l = \frac{2E}{I^2} \quad (۵-۶)$$

که در این رابطه E بیشینه انرژی ذخیره شده در یک دوره، I بیشینه جریان و L_l اندوکتانس پراکندگی است. مقادیر به دست آمده برای سه نوع ورق با استفاده از روش‌های مختلف در جدول ۵-۶ نشان داده شده‌اند.

جدول ۵-۶: اندوکتانس‌های نشتی

ورق	مقدار تحلیلی	فلاکس	درصد خطای روش تحلیلی
تروئید	۰/۰۰۰۰۸۱۴	۰/۰۰۰۰۸۶۹۵	۶/۳ %
ورق تنها	۰/۰۰۰۳۹۵	۰/۰۰۰۷۴۴	۴۶ %
ا پشتین	۰/۰۰۰۱۱۹	۰/۰۰۰۱۶۲	۲۶ %

۵-۹- محاسبه اندوکتانس مغناطیس‌کنندگی

برای محاسبه اندوکتانس مغناطیس‌کنندگی ترانسفورماتور به صورت مدار باز در نظر گرفته می‌شود. در این حالت راکتانس نشتی قابل صرف‌نظر کردن، هسته اشباع شده و جریان مغناطیس‌کننده است. برای مدل‌سازی این حالت در مدار الکتریکی مقاومت R4 بسیار بزرگ در نظر گرفته می‌شود که مشابه با شرایط مدار باز است. مقادیر به دست آمده برای سه نوع ورق با استفاده از روش‌های مختلف در جدول ۵-۷ نشان داده شده‌اند.

جدول ۵-۷: اندوکتانس مغناطیس‌کنندگی

ورق	مقدار تحلیلی	فلاکس	درصد خطای روش تحلیلی
تروئید	۰/۰۰۲۰۴	۰/۰۰۱۳۶	۵۰ %
ورق تنها	۰/۰۲۵	۰/۰۴۱۶	۳۹ %
ا پشتین	۰/۰۰۲۷۴	۰/۰۰۲۴۴	۱۲ %

۵-۱۰- محاسبه تلفات مسی

مشابه با یک ترانسفورماتور تلفات مسی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$P_{cu} = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2 \quad (۵-۷)$$

که در این رابطه R1 مقاومت سیم‌پیچ اولیه، R2 مقاومت سیم‌پیچ ثانویه، I1 جریان سیم‌پیچ اولیه و I2 جریان سیم‌پیچ ثانویه است. با استفاده از رابطه (۵-۷) تلفات سیم‌پیچی سه فریم محاسبه و در جدول ۵-۸ نشان داده شده‌اند.

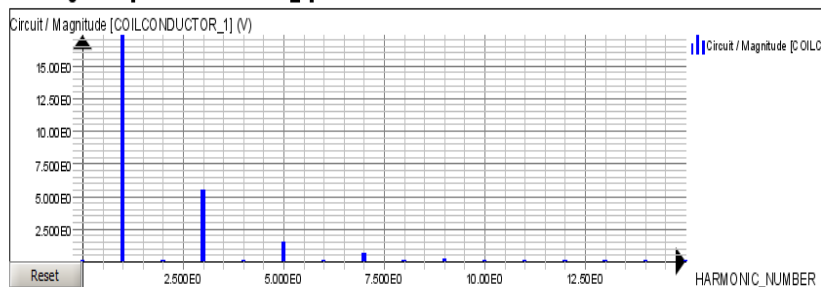
جدول ۵-۸: تلفات مسی فریم‌ها

تلفات مسی	نوع فریم
۴/۴۶	تروئید
۱۴/۰۴	اِپستین
۱۸/۵۴	تک ورق

۱-۵- تحلیل فوریه ولتاژ دو سر سیم‌پیچ اولیه

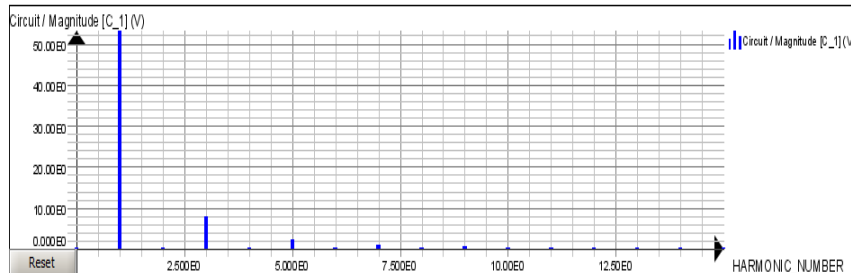
تحلیل فوریه یا FFT ولتاژ دو سر سیم‌پیچ اولیه در هر سه فریم در شکل ۲۷-۵ نشان داده شده‌اند تا مشخص شود که مؤلفه اصلی ولتاژ دارای چه دامنه‌ای است.

Circuit / Magnitude [COILCONDUCTOR_1]



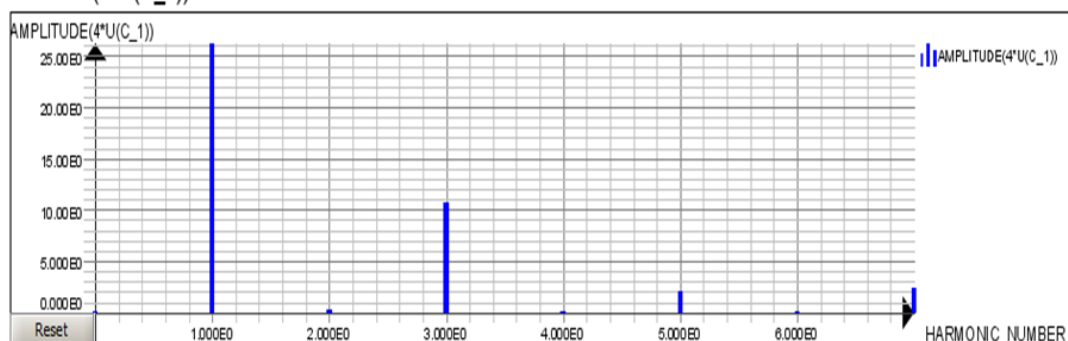
(الف)

Circuit / Magnitude [C_1]



(ب)

AMPLITUDE(4*U(C_1))



(ج)

شکل ۲۷-۵: تحلیل فوریه ولتاژ دو سر سیم‌پیچ اولیه

۵-۱۲- بررسی اصل تعادل توان

در این بخش با به دست آوردن توان اکتیو ورودی و محاسبه توان اکتیو تلف‌شده در مقاومت‌ها و هسته ترانس بررسی می‌شود تا اصل تعادل توان مورد ارزیابی قرار گیرد. نتایج به‌دست‌آمده در جدول ۹-۵ نشان داده‌شده‌اند.

جدول ۹-۵: توان تلف‌شده در بخش‌های مختلف مدار

نوع ورق	توان ورودی	توان تلف‌شده در مقاومت معادل کننده امپدانس درونی منبع	توان تلف‌شده در سیم‌پیچی اولیه	توان تلف‌شده در مقاومت معادل تلفات هسته	توان کل تلف‌شده
تروئید	-۱۹۱/۶۴	۱۸۳/۹۳	۴/۴۶	۳/۳	۱۹۰/۹
تک ورق	-۳۸/۱۵	۸/۳	۱۸/۵۴	۱۱/۵۹	۳۸/۱
اپستین	-۲۹/۵	۱۳/۳۶	۱۴//۰۴	۲/۱	۲۹/۴

۵-۱۳- مقایسه زمان محاسباتی در سه فریم

شبیه‌سازی‌های سه‌بعدی با استفاده از نرم‌افزار Altair Flux 2018 بر روی کامپیوتر ۵ هسته‌ای، 2.8 GHz، 8GB DDR4 memory انجام‌شده است که نتایج به‌دست‌آمده در جدول ۱۰-۵ نشان داده‌شده‌اند.

جدول ۱۰-۵: مقایسه شرایط شبیه‌سازی

نوع ورق	تعداد المان‌های حجم	گام زمانی	مدت‌زمان لازم برای اجرای یک سیکل
تروئید	۸۶۴۵۰	۰/۰۰۰۰۴	۲۰ دقیقه
تک ورق	۲۷۰۰۳۵	۰/۰۰۰۱	۳۰ دقیقه
اپستین	۱۳۰۶۹۲۸	۰/۰۰۰۱	۴ ساعت و ۱۰ دقیقه

۵-۱۴- بررسی نامتعادلی توزیع چگالی شار مغناطیسی بر روی سطح تروئید

مطابق با توضیحات بخش (۳-۳) توزیع چگالی شار مغناطیسی بر روی سطح تروئید یکنواخت نبوده و به‌صورت شعاعی یک غیریکنواختی که ناشی از متغیر بودن طول مسیر مغناطیسی است رخ می‌دهد. در این بخش با تغییر دادن ابعاد تروئید و استفاده از نسبت‌های مختلف بررسی می‌شود که تا چه میزان می‌توان این غیریکنواختی را برطرف نمود، چون این غیریکنواختی منجر به اندازه‌گیری نادرست منحنی B-H تروئید خواهد شد.

در شکل ۲۸-۵ نتایج اکسل و ضرایب در نظر گرفته‌شده برای طراحی تروئید نشان داده‌شده‌اند. با استفاده از این ضرایب و تغذیه منبع جریانی مدار مغناطیسی سعی بر آن شده است تا شدت میدان مغناطیسی میانگین اعمالی برابر با ۲۰ کیلو آمپر بر متر باشد. در این بررسی تعداد دور سیم‌پیچ برای سادگی کار و کاهش تعداد حالت‌های ممکن برابر با ۲۰۰ دور ثابت در نظر گرفته‌شده است. در شکل ۲۸-۵ ضریب K1 نسبت قطر خارجی به ارتفاع تروئید و ضریب K2 نسبت قطر خارجی به قطر داخلی تروئید است. ضریب K2 مطابق با استاندارد و در بازه ۱/۲۵ تا ۱/۴ تغییر می‌کند. ضریب K1 به‌صورت دلخواه و از ۴ تا ۲۰ تغییر می‌کند.

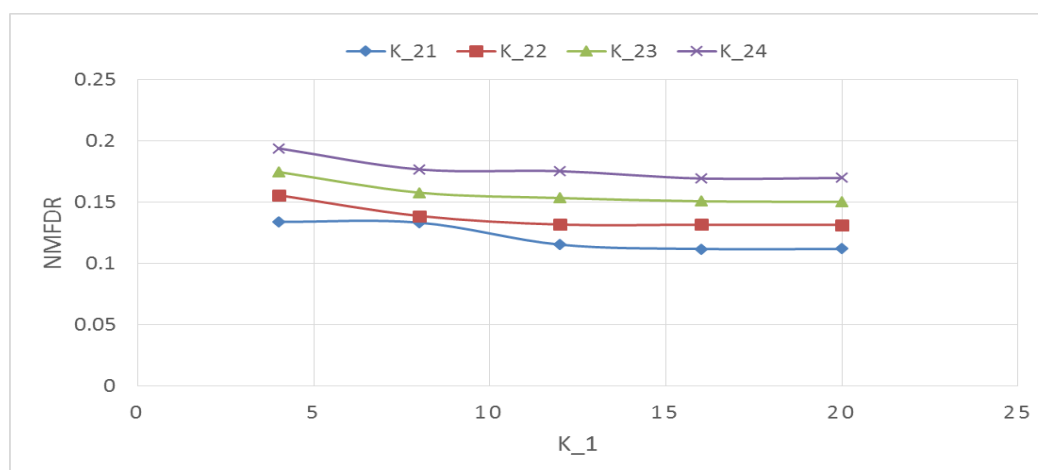
H	K_1	K_21	K_22	K_23	K_24	H_sat	N_W	R_O
12.7	4	1.25	1.3	1.35	1.4	20000	200	50.8
12.7	8	1.25	1.3	1.35	1.4	20000	200	101.6
12.7	12	1.25	1.3	1.35	1.4	20000	200	152.4
12.7	16	1.25	1.3	1.35	1.4	20000	200	203.2
12.7	20	1.25	1.3	1.35	1.4	20000	200	254

شکل ۲۸-۵: ضرایب طراحی هسته تروئید

با توجه به ضرایب تعریف شده ۲۰ حالت مختلف طراحی به دست آمده‌اند. این ۲۰ حالت مورد شبیه‌سازی قرار گرفته و برای مقایسه از شاخصی تحت عنوان نرخ توزیع غیریکنواخت چگالی شار مغناطیسی 1(NMFDR) استفاده شده است که این شاخص از رابطه (۵-۸) به دست می‌آید.

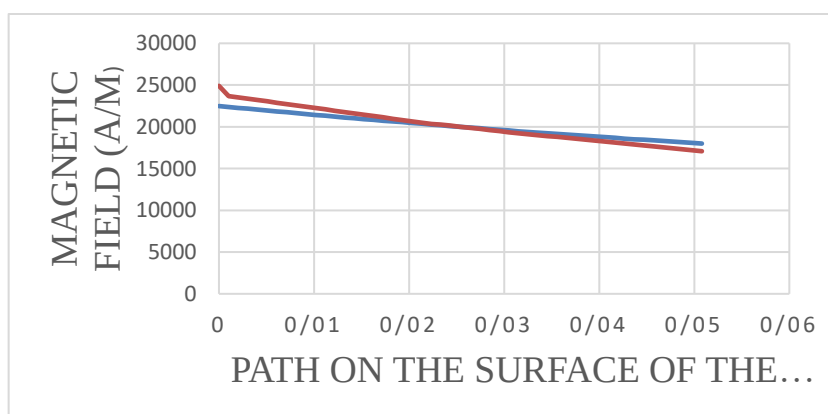
$$NMFDR = \frac{H_{\max} - H_{\min}}{2 \times H_{\text{avg}}} \quad (5-8)$$

نتایج به دست آمده در شکل ۲۹-۵ نشان داده شده‌اند.



شکل ۲۹-۵: نرخ توزیع غیریکنواخت چگالی شار مغناطیسی

با تحلیل نتایج به دست آمده مشخص شده است که بهترین وضعیت از نظر توزیع چگالی شار مغناطیسی مربوط به شرایطی است که نسبت قطر خارجی به قطر داخلی کمترین مقدار خود یعنی ۱/۲۵ و نسبت قطر خارجی به ارتفاع تروئید بیشترین مقدار خود یعنی ۲۰ باشد. نتایج بهترین و بدترین حالت ممکن از نظر توزیع میدان مغناطیسی در شکل ۳۰-۵ نشان داده شده‌اند. همان گونه که مشخص هست در حالت دوم شیب خط که به نوعی بیانگر میزان غیریکنواختی است کاهش پیدا کرده است و یک پروفیل نسبتاً یکنواخت و بهتری را در سطح هسته تروئید مشاهده می‌شود.



شکل ۳۰-۵: توزیع شدت میدان مغناطیسی بر سطح تروئید

۵-۱۵- جمع‌بندی

۱. در توزیع و یکنواختی چگالی شار در سطح سه نمونه، هسته تروئید بدترین وضعیت را دارد به گونه‌ای که در نواحی نزدیک به مرکز تروئید شدت میدان اعمالی زیاد و در نتیجه چگالی شار نقطه کار بزرگ‌تر است و هر چه فاصله از مرکز بیشتر شود چگالی شار افت پیدا می‌کند که در نتیجه آن یک توزیع کاملاً نامتقارن وجود خواهد داشت. در دو مدل دیگر این غیریکنواختی توزیع کمتر است. به گونه‌ای که در ا پشتین تنها در محل‌های اتصال دو ورق و در مدل تک ورق تنها در محل تلاقی یوغ‌ها و هسته غیریکنواختی به وجود می‌آید. نکته حائز اهمیت در وجود این غیریکنواختی تأثیر آن بر روی به دست آوردن مشخصه B-H هسته خواهد بود. به همین خاطر لازم است تا این اثر در نظر گرفته شود و به گونه‌ای در فرآیند به دست آوردن منحنی B-H لحاظ شود.
۲. در مقایسه اندوکتانس‌های نشتی و مغناطیس‌کنندگی به دست آمده از روش تحلیلی و مقایسه آن با روش اجزا محدود مشخص شده است که روش تحلیلی قابلیت محاسبه دقیق این اندوکتانس‌ها را ندارد و دارای خطا است. چون در مراحل محاسباتی دستی یک سری فرض‌ها و ساده‌سازی‌هایی صورت گرفته است.
۳. تغذیه سینوسی ولتاژ منجر به این شده است که ولتاژ القایی و جریان‌های موجود در مدار دچار اغتشاش شده و هارمونیک‌هایی در آن‌ها به وجود بیاید که دلیل آن را می‌توان مرتبط با منحنی غیرخطی B-H هسته دانست. البته این اغتشاشات در شار سیم‌پیچ‌ها وجود نداشته و این شارها حالت سینوسی خود را حفظ کرده‌اند. توضیحات تکمیلی و جامع‌تر این پدیده در فصل اول گزارش اشاره شده است.
۴. منحنی B-H کلیه ساختارهای مدار مغناطیسی شبیه‌سازی شده با روش المان محدود با مدار مغناطیسی شده در نرم‌افزار MATLAB و منحنی ارائه شده در کاتالوگ آن محصول مورد مقایسه قرار گرفتند که نتایج حاصل از این مقایسه نشان دهنده دقت خوبی در محاسبات طراحی و شبیه‌سازی‌های مربوط به هر قسمت بود.

فصل ششم: طراحی، شبیه‌سازی و ساخت مدار تقویت کننده توان

۱-۶- مقدمه

در فصل‌های قبل دستگاه B-H متر معرفی شد و پس از بررسی سوابق بین‌المللی طراحی و ساخت این دستگاه در ابعاد صنعتی و تجاری، اصول طراحی و ساخت مدارات مغناطیسی مربوط به این دستگاه بر اساس استانداردهای بین‌المللی موجود در زمینه اندازه‌گیری مشخصه‌های مواد مغناطیسی در شکل‌هایی مانند پودر (تروئید)، ورق و اپستین پرداخته شد و در هر حالت نتایج شبیه‌سازی نیز ارائه شد. همانطور که اشاره شد، یکی از اجزای مهم دستگاه B-H متر قسمت تقویت کننده توان است. تقویت کننده‌های توان مورد استفاده در شرکت IWATSU برای دستگاه B-H متر تقویت کننده‌های دوقطبی با سرعت بالا از سه نوع HSA4014-IW، HSA4101-IW و IE-1125 با پهنای باند DC تا حداکثر ۱۰ مگاهرتز، و توانایی تأمین ولتاژ و توان بالا است. سیگنال DC+/DC- به طور مداوم با خروجی حداکثر $V_p-p = 300$ بدون سوئیچینگ متغیر است. علاوه بر این، برای خروجی، حالت منبع (تأمین توان برای بار از تقویت کننده توان مطابق با پلاریته ولتاژ و پلاریته جریان به عنوان تقویت کننده معمولی) و حالت سینک (انتقال توان از بار به تقویت کننده توان در جهت جریان معکوس) وجود دارد. بنابراین، امکان بارگذاری خازنی و بار الکتریکی مانند یک اجزای الکتریکی پیژو، یک سلونوئید و ... را به راحتی در اختیار قرار می‌دهد. در این فصل، انواع ساختارهای موجود و روش‌های کلیدزنی برای طراحی تقویت کننده توان از مراجع مختلف مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت با توجه به الزامات پروژه، بهترین ساختار انتخاب و مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۲-۶- معرفی انواع تقویت کننده‌های توان

۱-۲-۶- تقویت کننده خطی

تقویت کننده خطی یک مدار الکترونیکی است که خروجی آن متناسب با ورودی آن بوده اما قادر به تحویل توان بیشتری به یک بار است. این اصطلاح معمولاً به نوع تقویت کننده توان فرکانس رادیویی (RF) اشاره دارد، که برخی از آنها توان خروجی را در حد کیلووات اندازه‌گیری می‌کنند و در رادیوهای غیرحرفه‌ای استفاده می‌شود. دیگر انواع تقویت کننده‌های خطی در تجهیزات صوتی و آزمایشگاهی استفاده می‌شود.

خطی بودن به توانایی تقویت کننده در تولید سیگنال‌هایی که به طور دقیق کپی ورودی هستند، به طور کلی در سطوح قدرت افزایش یافته اشاره دارد. امپدانس بار، ولتاژ تغذیه، جریان پایه ورودی و توان خروجی کارایی تقویت کننده را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

تقویت کننده‌های کلاس A می‌توانند در هر دو توپولوژی تک سر و پوش-پول به صورت خطی طراحی شوند. تقویت کننده‌های کلاس AB1، AB2 و B می‌توانند خطی باشند فقط زمانی که یک مدار مخزن تنظیم شده به کار برده می‌شود. یا در توپولوژی پوش-پول که در آن دو عنصر فعال (لامپ‌ها، ترانزیستورها) برای تقویت بخش‌های مثبت و منفی سیگنال RF استفاده می‌شود. تقویت کننده‌های کلاس C در هیچ توپولوژی خطی نیستند.

برای تقویت کننده کلاس‌هایی وجود دارد که بین هزینه پیاده‌سازی، کارایی و دقت سیگنال تفاوت‌های مختلفی را ایجاد می‌کند. استفاده از آنها در کاربردهای RF به طور خلاصه در ادامه ذکر شده است.

۱-۲-۶-۱- تقویت کننده‌های کلاس A

تقویت کننده کلاس A بسیار کم بازده است و هرگز نمی‌تواند کارایی بهتر از ۵۰٪ داشته باشد. نیمه‌هادی یا لامپ خلاء در طول کل سیگنال RF هدایت می‌کند. جریان متوسط آند برای یک لامپ خلاء باید در وسط بخش خطی منحنی جریان آند و پتانسیل بایاس شبکه تنظیم شود.

۶-۲-۱-۲- تقویت کننده‌های کلاس B

تقویت کننده کلاس B می‌تواند ۶۰-۶۵٪ بازدهی داشته باشد. نیمه هادی یا لامپ خلاء از طریق نیمی از چرخه هدایت می‌کند اما نیاز به قدرت درایو بیشتر دارد. کلاس AB1 جایی است که شبکه بیشتر منفی نسبت به کلاس A بایاس شده است. کلاس AB2 جایی است که شبکه اغلب منفی تر نسبت به AB1 است، همچنین اندازه سیگنال ورودی اغلب بزرگتر است. هنگامی که درایو قادر به ایجاد شبکه مثبت می‌شود، جریان شبکه افزایش می‌یابد.

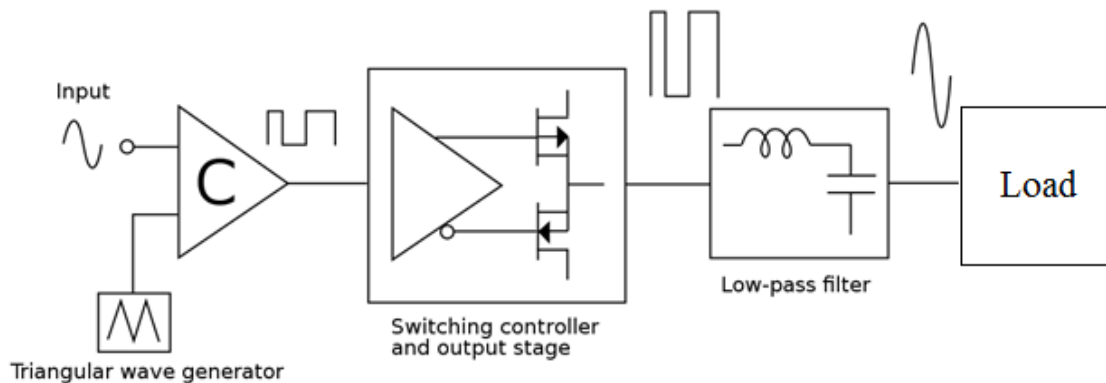
تقویت کننده‌های کلاس C هنوز کارآمدتر هستند. آنها می‌توانند در حدود ۷۵٪ بازدهی و حدود ۱۲۰ درجه رسانایی داشته باشند، اما بسیار غیرخطی هستند. آنها فقط می‌توانند برای حالت‌های غیر AM مانند FM، CW یا RTTY استفاده شوند. نیمه هادی یا لامپ خلاء از طریق کمتر از نیمی از سیکل RF هدایت می‌کند. افزایش بهره‌وری می‌تواند لامپ خلاء داده شده را برای تحویل توان RF بیشتر از آنچه که در کلاس A یا AB ارائه می‌دهد، فراهم کند. به عنوان مثال دو تترود 4CX250B که در ۱۴۴ مگاهرتز عمل می‌کنند می‌توانند ۴۰۰ وات را در کلاس A تحویل دهند، اما زمانی که با کلاس C بایاس می‌شوند، می‌توانند ۱۰۰۰ وات را بدون تجاوز از دمای استاندارد تحویل دهند؛ علاوه بر این، جریان بیشتر شبکه مورد نیاز خواهد بود.

اگر چه تقویت کننده‌های قدرت کلاس A از لحاظ خطی بودن بهترین هستند، اما بازده آنها نسبت به سایر کلاس‌ها مانند تقویت کننده‌های AB، C و Doherty بسیار ضعیف است. با این حال، راندمان بالاتر منجر به غیرخطی شدن بیشتر و ناهموار شدن خروجی تقویت کننده خواهد شد، اغلب به میزانی که عملکرد مورد نیاز سیستم را تحت تأثیر قرار دهد. بنابراین، تقویت کننده‌های قدرت کلاس AB و یا انواع دیگر با برخی فرم برنامه‌های مناسب خطی‌سازی مانند feedback، feedforward یا آنالوگ یا پیش‌بینی دیجیتال¹ DPD استفاده می‌شود. در سیستم‌های تقویت کننده توان DPD، مشخصه‌های انتقال تقویت کننده با نمونه‌گیری خروجی تقویت کننده مدل‌سازی می‌شوند و مشخصه‌های معکوس در یک پردازنده DSP محاسبه می‌شود. سیگنال باند دیجیتال در معکوس مشخصه‌های انتقال غیرخطی تقویت کننده تبدیل شده به فرکانس‌های RF ضرب شده و به ورودی PA اعمال می‌شود. با طراحی دقیق پاسخ تقویت کننده، محرکه‌های DPD می‌توانند اعوجاج خروجی PA را اصلاح کرده و بازدهی بالاتری را به دست آورند.

با پیشرفت تکنیک‌های پردازش سیگنال دیجیتال، پیش‌بینی دیجیتال (DPD) در حال حاضر به طور گسترده‌ای برای زیر سیستم‌های تقویت کننده RF استفاده می‌شود. برای اینکه DPD به درستی عمل کند، مشخصه‌های تقویت کننده توان باید بهینه باشد و تکنیک‌های مداری نیز برای بهینه‌سازی عملکرد تقویت کننده موجود است.

۶-۲-۲- تقویت کننده سوئیچینگ (کلاس D)

تقویت کننده سوئیچینگ یا تقویت کننده کلاس D تقویت کننده الکترونیکی است که در آن المان‌های تقویت کننده (ترانزیستورها، معمولاً MOSFET ها) به عنوان سوئیچ‌های الکترونیکی و نه به عنوان المان‌های بهره خطی مانند دیگر تقویت کننده‌ها عمل می‌کنند. آنها به سرعت در حال چرخش به جلو و عقب بین ریل‌های منبع، تغذیه شده توسط یک مدولاتور با استفاده از پهنای پالس، تراکم پالس یا تکنیک‌های مربوطه برای رمزگذاری ورودی‌های صوتی به یک قطار پالس هستند. سیگنال از طریق یک فیلتر ساده فیلتر پایین-گذر به بار می‌رسد. پالس‌های فرکانس بالا که می‌توانند تا ۶ مگاهرتز باشند، مسدود می‌شوند. از آنجا که جفت ترانزیستور خروجی هرگز در یک زمان هدایت نمی‌کند، مسیر دیگری برای جاری شدن جریان از فیلتر پایین گذر / بار وجود ندارد. به همین دلیل، بازدهی می‌تواند بیش از ۹۰٪ باشد.



شکل ۱-۶: بلوک دیاگرام سوئیچینگ یا PWM یک تقویت کننده کلاس D

شکل ۱-۶ بلوک دیاگرام سوئیچینگ یا PWM یک تقویت کننده کلاس D را (که می‌تواند برای ساخت یک بلندگو استفاده شود) نشان می‌دهد. راندمان توان تئوری‌های تقویت کننده کلاس D ۱۰۰٪ است. به این معنا که تمام توانی که به آن تحویل داده می‌شود تحویل بار خواهد شد و این توان به گرما تبدیل نمی‌شود. این به این دلیل است که یک سوئیچ ایده‌آل در حالت روشن، تمام جریان را انتقال می‌دهد و هیچ ولتاژی در آن از بین نمی‌رود، بنابراین هیچ گرمایی نمی‌تواند تلف شود و هنگامی که سوئیچ خاموش است، ولتاژ منبع تغذیه در سراسر آن وجود دارد، اما هیچ جریانی از آن نشت نمی‌کند و دوباره گرما از بین نخواهد رفت. ماسفت‌های قدرت واقعی در واقع سوئیچ ایده‌آل نیستند، اما بازده عملی بسیار بیش از ۹۰٪ در آنها معمول است. در مقابل، تقویت کننده‌های کلاس AB همیشه با هر دو جریان جاری در آن و ولتاژ ایجاد شده در دستگاه عمل می‌کنند. یک تقویت کننده ایده‌آل کلاس B دارای حداکثر بازده نظری ۷۸٪ است. تقویت کننده‌های کلاس A (صرفاً خطی، با المان‌های "روشن") دارای حداکثر بازده تئوری ۵۰٪ و در برخی از نسخه‌ها دارای بهره‌وری پایین‌تر از ۲۰٪ هستند.

مزیت اصلی یک تقویت کننده کلاس D این است که می‌تواند کارآمدتر از یک تقویت کننده خطی باشد، بطوری‌که توان کمتری را به صورت گرما در دستگاه‌های فعال ایجاد می‌کند. با توجه به این که به هیت‌سینک‌های بزرگ نیازی نیست، تقویت کننده‌های کلاس D بسیار سبک‌تر از تقویت کننده‌های آنالوگ هستند. پله‌های خروجی مانند آنهایی که در پالس ژنراتورها استفاده می‌شوند، نمونه‌هایی از تقویت کننده‌های کلاس D هستند. با این حال، این اصطلاح عمدتاً برای تقویت کننده‌های توان در نظر گرفته شده برای پخش سیگنال‌های صوتی با پهنای باند بسیار پایین‌تر از فرکانس سوئیچینگ است.

۳-۲-۶ اینورترهای چندسطحی

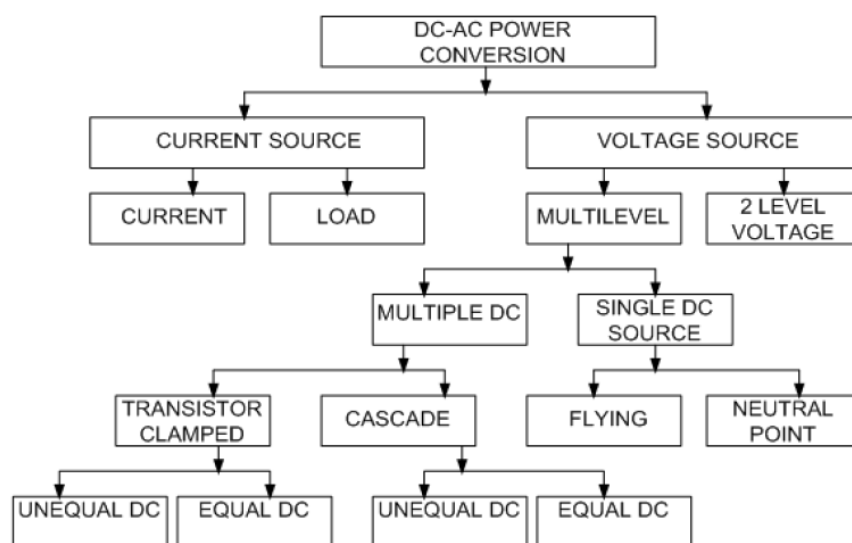
اینورترهای چندسطحی دارای مزایای منحصر به فردی نسبت به اینورترهای دوسطحی نظیر عملکرد در ولتاژهای بالای لینک dc، کاهش تنش‌های موجود بر روی ادوات کلیدزنی و کاهش اعوجاج هارمونیک ولتاژ خروجی در فرکانس کلیدزنی مشابه می‌باشند.

اینورترهای الکترونیک قدرت برای مصارف متنوع صنعتی به وفور استفاده می‌شوند. در سال‌های اخیر تقاضا برای استفاده از اینورترهای ولتاژ بالا برای سیستم‌هایی همچون لینک‌های HVDC جبران‌سازهای وار استاتیک، محرکه‌های سرعت متغیر ولتاژ متوسط و فیلترهای اکتیو رشد یافته است. برای غلبه بر محدودیت‌های موجود ادوات نیمه‌هادی قدرت، ساختارهای جدیدی مانند مبدل‌های کلمپ دیودی^۱ (NPC)، مبدل‌های خازن شناور^۲ (FC) و مبدل‌های پل H متوالی^۳ (CHB) معرفی شده‌اند. در این مبدل‌ها با افزایش تعداد سطوح ولتاژ، THD ولتاژ خروجی کمتر می‌شود [۴۵]. شکل ۲-۶ طبقه‌بندی اینورتر چند سطحی را نمایش می‌دهد.

1- Neutral-point-clamped

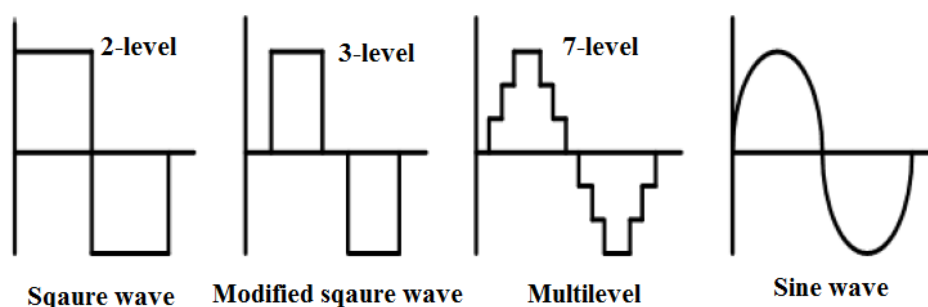
2-Flying capacitor

3- Cascaded H-bridge

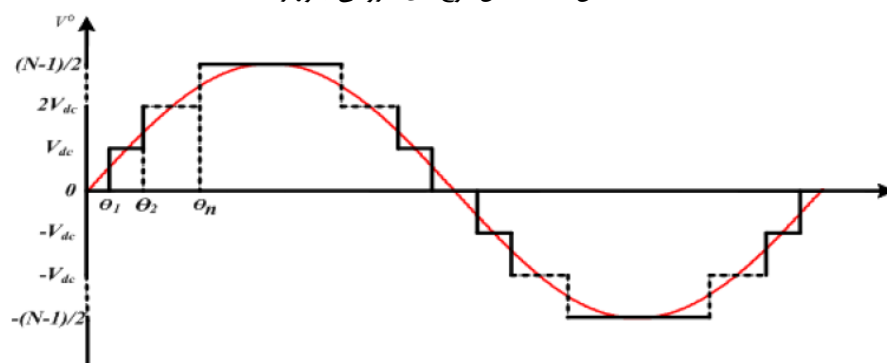


شکل ۲-۶: طبقه‌بندی اینورتر چند سطحی

شکل ۳-۶ شکل موج‌های خروجی اینورترها و شکل ۴-۶ شکل موج پله‌ای کلی مبدل‌های چندسطحی را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۶: شکل موج‌های خروجی اینورتر



شکل ۴-۶: شکل موج پله‌ای کلی مبدل‌های چندسطحی

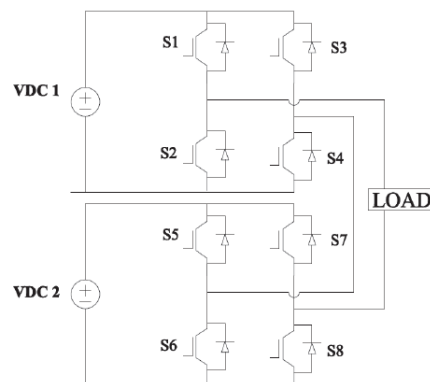
استفاده از تعداد زیاد سطوح ولتاژ با مسائلی همچون نامتعادلی ولتاژ، نیاز به کلمپ ولتاژ و محدودیت‌های بسته‌بندی محدود می‌شود. ساختار اینورتر CHB سری نسبت به ساختارهای دیگر علاوه بر سادگی و مدولار بودن، عناصر کمتری نسبت به ساختارهای دیگر دارد. همچنین این ساختار نیاز به دیودهای کلمپ بزرگ و خازن‌های بالانس ولتاژ ندارد.

مدولار بودن این ساختار اجازه می‌دهد که تعداد سطوح ولتاژ خروجی بدون افزایش پیچیدگی مدار افزایش یابد. همچنین ساختار اینورتر CHB سری انعطاف‌پذیری بیشتری برای پیاده‌سازی اینورترهای نامتقارن فراهم می‌کند.

۱-۳-۲-۶- اینورتر چندسطحی^۱ CHB

تکنولوژی اینورتر چندسطحی CHB یکی از شناخته‌شده‌ترین، سودمندترین، ساده‌ترین و اساسی‌ترین تکنولوژی اینورترهای چند سطحی است. برای به دست آوردن کیفیت بالا که حداقل مقدار اعوجاج در شکل موج ولتاژ خروجی و جریان است، فرکانس سوئیچینگ بالا با تکنیک‌های مدولاسیون پهنای پالس مورد نیاز است. اینورترهای دو سطحی دارای محدودیت‌هایی برای کاربرد در قدرت‌های بالا هستند؛ بنابراین اینورترهای چند سطحی برای این منظور معرفی می‌شوند. مبدل‌های CHB از اتصال سری اینورترهای پل تکفاز برای ساختن شاخه‌های هر فاز اینورتر استفاده می‌کنند. هر CHB دارای منبع DC جداگانه است که از یک منبع، خازن بزرگ، سلولهای سوختی یا باتری برای تولید خروجی AC استفاده می‌کند [۴۶]. مزیت عمده این مبدل‌ها، یکسان بودن مدولاسیون، کنترل و حفاظت هر کدام از پل‌های H نسبت به همدیگر است (خاصیت ماژولار بودن) [۴۷]. بنابراین در صورت بروز خطا در یکی از ماژول‌ها امکان تعویض سریع و آسان آن وجود دارد. به علاوه، در صورت بروز خطا در ماژول‌ها، مبدل می‌تواند با استفاده از یک طرح کنترلی مناسب بدون این که نیاز به متوقف کردن بار باشد، به کار خود ادامه دهد [۴۸]. همچنین، کاهش ابعاد فیلتر و اغتشاشات الکترومغناطیسی پایین از دیگر مزایای این نوع مبدل‌ها هستند [۴۹]. علی‌رغم این، هر اینورتر تکفاز نیاز به منبع تغذیه dc ایزوله دارد که نوعاً از یک ترانسفورماتور چند سیم‌پیچ فرکانس پایین و یا از مبدل‌های dc/dc فرکانس بالا گرفته می‌شود [۵۰]. از دیگر معایب مبدل CHB نیاز آن به حسگر (سنسور) ولتاژ لینک dc می‌باشد تا تعادل بین ولتاژ لینک‌های dc در هر مبدل H تکفاز را برقرار کند [۴۹].

مرجع [۵۱] عملکرد اینورتر CHB سه سطحی، پنج سطحی و هفت سطحی را از نظر تعداد سوئیچ‌ها، اعوجاج هارمونیکی کل (THD)، شکل موج، طیف هارمونیکی، ولتاژ خروجی، فشار ولتاژ روی سوئیچ‌ها و ولتاژ DC ورودی به کمک شبیه‌سازی متلب مورد بررسی قرار داده است. موج خروجی با اعوجاج هارمونیکی صفر می‌تواند با تعداد سطوح نامحدود حاصل شود، اما به دلیل مشکلات عدم تعادل ولتاژ، پیکربندی مدار و محدودیت‌های بسته بندی، تعداد سطوح اینورتر محدود می‌شود. هر مرحله نیاز به منبع تغذیه DC جداگانه‌ای دارد و این مشکل این روش است. شکل ۵-۶ شماتیک یک اینورتر پنج سطحی CHB را نشان می‌دهد.



شکل ۵-۶: اینورتر ۵ سطحی CHB [۵۱]

برای یک اینورتر چندسطحی CHB تکفاز، دو CHB مورد نیاز است. این دو سلول CHB به صورت سری هستند که توسط منبع ولتاژ DC تغذیه می‌شوند. برای تلفیق شکل موج ولتاژ خروجی، خروجی دو CHB به صورت سری به هم متصل می‌شود به طوری که خروجی کل مجموع خروجی دو سلول CHB است. برای این پیکربندی مدار، در مجموع هشت سوئیچ قدرت مورد نیاز است، بنابراین باید چهار جفت سیگنال دریافتی برای تغذیه به سوئیچ‌ها تولید شود. سوئیچینگ برای هر سلول CHB به گونه‌ای طراحی شده است که تنها یک جفت سوئیچ بطور همان زمان در فرکانس حامل عمل می‌کند و سایر جفت‌ها در فرکانس مرجع عمل

1- Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter (CHB-MLI)

می‌کنند. جدول ۱-۶ نحوه کلیدزنی سوئیچ‌ها و ولتاژ خروجی اینورتر پنج سطحی CHB را نشان می‌دهد. جدول ۲-۶ نیز مقایسه سطوح مختلف اینورتر CHB چند سطحی به همراه خروجی ولتاژ اینورتر را نشان می‌دهد.

جدول ۱-۶: الگوی کلیدزنی سوئیچ‌ها و ولتاژ خروجی در یک اینورتر پنج‌سطحی CHB

ولتاژ خروجی	S ₈	S ₇	S ₆	S ₅	S ₄	S ₃	S ₂	S ₁
0	0	1	0	1	0	1	0	1
+V/2	1	0	0	1	0	1	0	1
V	1	0	0	1	1	0	0	1
-V/2	0	1	1	0	1	0	1	0
0	1	0	1	0	1	0	1	0
-V	0	1	1	0	0	1	1	0

جدول ۲-۶: مقایسه سطوح مختلف اینورتر CHB و خروجی ولتاژ

تعداد سطوح اینورتر			پارامترها	
هفت سطحی	پنج سطحی	سه سطحی		
۳CHB	۲CHB	۱CHB	اینورتر CHB	
۱۲	۸	۴	تعداد سوئیچ‌ها	
۷	۵	۳	سطوح خروجی	
۳۰۰	۲۰۰	۱۰۰	ولتاژ ورودی	
۱۲٪/۱۵	۱۷٪/۱۲	۲۴٪/۸۶	R-Load	THD
۱۲٪/۲۷	۱۷٪/۳۷	۳۴٪/۱۸	RL-Load	

ساختارهای اینورترهای چندسطحی به دو نوع ساختارهای متقارن و نامتقارن تقسیم می‌شوند. در ساختارهای متقارن، واحدهای CHB به ولتاژهای dc یکسان متصل می‌شوند و شکل موج ولتاژ خروجی جمع ولتاژهای dc یکسان می‌باشد. در ساختارهای نامتقارن، ولتاژهای dc واحدهای CHB برابر نیستند و بدون افزایش تعداد واحدهای CHB می‌توان تعداد سطوح بیشتری در ولتاژ خروجی ایجاد کرد. در ساختارهای نامتقارن فرکانس کلیدزنی بعضی واحدهای CHB، نسبت به ساختارهای متقارن بیشتر است و بنابراین تلفات کلیدزنی افزایش می‌یابد. عملکرد مبدل‌های چند سطحی بر اساس تحلیل طیف ولتاژ خروجی تولید شده بررسی می‌شود. از دیدگاه بار این تحلیل طیف در کاربردهای فیلتراسیون اکتیو بسیار مهم است. مزایای اینورتر CHB عبارتند از:

- THD کم

- در مقایسه با ساختار اینورتر کلمپ دیودی و خازن شناور، به تعداد اجزای کمتری در هر سطح نیاز دارد.

عیب ساختار اینورتر CHB نیز این است که به منبع ولتاژ DC ایزوله نیاز دارد.

اینورترهای چندسطحی نامتقارن به ایجاد تعداد بیشتری سطوح خروجی بدون افزایش تعداد سلول‌ها کمک می‌کنند. اندازه ولتاژ dc منابع می‌تواند با توجه به افزایش هندسی با یک عامل ۲ یا ۳ انتخاب شود. اگر منبع ولتاژ dc در نسبت ۲:۱ باشد، اینورتر به عنوان اینورتر چند سطحی نامتقارن باینری شناخته می‌شود. مقدار هر منبع dc به صورت رابطه (۱-۶) است [۵۲].

$$V_k = 2^{K-1} V_{dc} \quad ; \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (۱-۶)$$

اگر منبع ولتاژ dc در نسبت ۳:۱ باشد، اینورتر به عنوان اینورتر چند سطحی نامتقارن سه‌تایی شناخته می‌شود. مقدار هر منبع dc به صورت رابطه (۲-۶) است.

$$V_k = 3^{K-1} V_{dc} \quad ; \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (۲-۶)$$

جدول ۳-۶: مقایسه‌ای کلی بین اینورترهای متقارن و نامتقارن را نشان می‌دهد. (m تعداد سلول‌های متصل شده به صورت سری)

جدول ۳-۶: مقایسه ساختارهای متقارن و نامتقارن CHB-MLI [52]

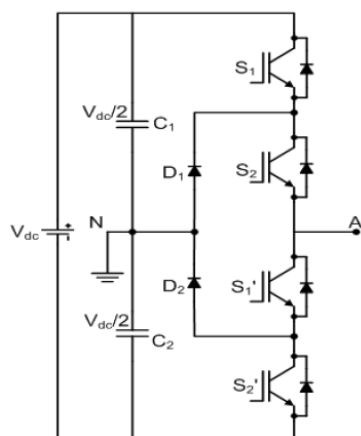
پارامتر	شرح	ساختار متقارن	ساختار نامتقارن	
			دوتایی	سه تایی
n	تعداد کل سطوح ولتاژ خروجی	2m+1	$2^{(m+1)} - 1$	3^m
N_s	تعداد سوئیچ‌ها	4m	4m	4m
N_d	منابع dc	m	m	m
V_M	ولتاژ بیشینه تولید شده	mV_{dc}	$(2^m - 1)V_{dc}$	$(3^m - 1)V_{dc}/2$
N_v	تعداد تغییرات در اندازه‌های ولتاژ	1	m	m
V_b	ولتاژ کلی بسته شده توسط سوئیچ‌ها	$4mV_{dc}$	$4mV_{dc}$	$2(3^m - 1)V_{dc}$

۲-۳-۲-۶- اینورتر چندسطحی کلمپ دیودی (NPC)

شکل ۶-۶ اینورتر سه سطحی کلمپ دیودی که اتصال نقطه خنثی نیز نامیده می‌شود را نشان می‌دهد. بیشینه ولتاژ خروجی، نصف ولتاژ DC ورودی است. به منظور حل این مشکل، تکنیک کنترلی ساده‌ای، برای مثال افزایش تعداد المان‌ها از جمله سوئیچ‌ها و دیودها اعمال می‌شود. جدول ۴-۶ الگوی کلیدزنی در DC-MLI را نشان می‌دهد.

جدول ۴-۶: الگوی کلیدزنی اینورتر چند سطحی کلمپ دیودی

حالت سوئیچ‌ها				ولتاژ خروجی $V_o = V_{AN}$
S'_2	S'_1	S_2	S_1	
0	0	1	1	$V_{dc}/2$
0	1	1	0	0
1	1	0	0	$-V_{dc}/2$



شکل ۶-۶: اینورتر سه سطحی کلمپ دیودی

مزایای این ساختار عبارتند از:

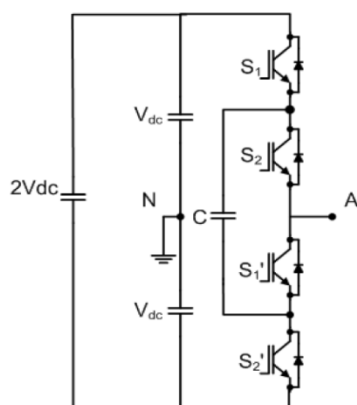
- تکنیک کنترلی ساده
- با افزایش تعداد سطوح، مقدار اعوجاج کاهش می‌یابد.

عیب این ساختار نیز عبارت است از:

❖ وقتی تعداد سطح زیاد است، دیودهای کلمپ بیشتری استفاده می‌شود.

۳-۲-۶- اینورتر چند سطحی با ساختار^۱ Flying Capacitor

شکل ۶-۷ اینورتر سه سطحی خازن شناور را نشان می‌دهد. دیودهای بسته با خازن‌هایی جایگزین می‌شوند که می‌تواند جریان توان اکتیو و راکتیو را کنترل کند.



شکل ۶-۷: اینورتر سه سطحی خازن شناور

جدول ۵-۶ الگوی کلیدزنی سوئیچ‌ها و ولتاژ خروجی در یک اینورتر سه سطحی خازن شناور را نشان می‌دهد.

جدول ۵-۶: الگوریتم کلیدزنی اینورتر سه سطحی خازن شناور

حالت سوئیچ‌ها				ولتاژ خروجی $V_o = V_{AN}$
S_2'	S_1'	S_2	S_1	

0	0	1	1	V_{dc}
0	1	0	1	0
1	0	1	0	
1	1	0	0	$-V_{dc}$

مزایای این ساختار عبارتند از:

- مشابه اینورتر NPC نیازی به فیلتر نیست

- مقدار زیاد ظرفیت بسته‌بندی

معایب این ساختار نیز عبارتند از:

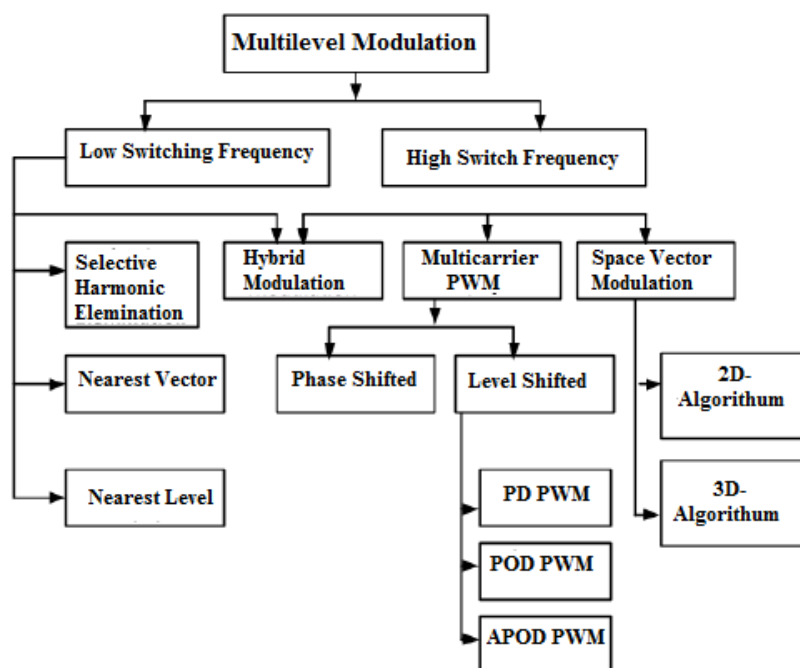
- ❖ کنترل اینورتر می‌تواند پیچیده باشد

- ❖ تلفات کلیدزنی در آن زیاد است

۴-۲-۶ تکنیک‌های کلیدزنی و کنترل مبدل‌های CHB متقارن و نامتقارن

تکنیک مدولاسیون در فرکانس‌های سوئیچینگ کم و زیاد است که در فرکانس سوئیچینگ بالاتر از ۱ کیلوهرتز در نظر گرفته شده است. انواع مختلفی از روش‌های کلیدزنی PWM برای مبدل‌های CHB وجود دارد که در دو دسته‌بندی کلی (۱) کلیدزنی فرکانس پایین (ویا کلیدزنی مؤلفه اصلی) و (۲) کلیدزنی فرکانس بالا قرار می‌گیرند. حذف انتخابی هارمونیک‌ها^۱ (SHE)، نزدیک‌ترین بردار^۲ و نزدیک‌ترین سطح^۳ از روش‌های کلیدزنی هستند که می‌توانند در دسته اول قرار گیرند. روش کلیدزنی بردار فضایی^۴ (SVM) و SHE و روش چندحاملی^۵ (MCPWM) می‌توانند در دسته‌بندی دوم قرار گیرند. روش MCPWM خود به دو شاخه انتقال فاز^۶ (PS) و انتقال سطح^۷ (LS) تقسیم‌بندی می‌شود. در روش PS، $(n-1)$ حامل در یک دوره تناوب از شکل موج مرجع به صورت افقی و با اختلاف فاز $180/n$ توزیع می‌شوند تا یک شکل موج n سطحی را در خروجی تولید کنند. در روش LS، برای یک مبدل N سطحی از $N-1$ موج حامل مثلثی با فرکانس و دامنه مشابه استفاده می‌شود. سپس، شکل موج مرجع سینوسی با هر کدام از این شکل موج‌های حامل مقایسه می‌شود تا لحظات کلیدزنی برای هر اینورتر تکفاز مشخص شوند. شکل ۸-۶ دسته‌بندی انواع روش‌های کلیدزنی و کنترل اینورترهای چندسطحی را نمایش می‌دهد.

-
- 1- Selective harmonic elimination
 - 2- Nearest vector
 - 3- Nearest level
 - 4- Space vector modulation
 - 5- Multicarrier-based PWM
 - 6- Phase shifted
 - 7- Level shifted



شکل ۸-۶: دسته‌بندی تکنیک‌های مدولاسیون

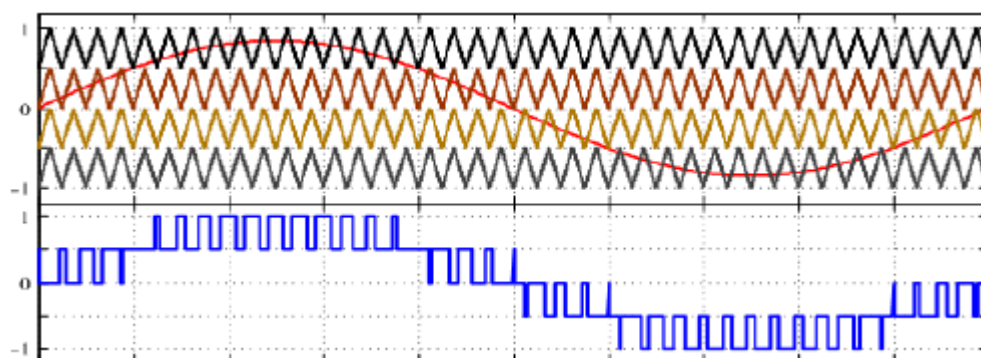
شکل موج مرجع دارای دامنه پیک-پیک $2A_m$ و فرکانس f_m می‌باشد که صفر آن در مرکز مجموعه حامل‌ها قرار گرفته است. شاخص مدولاسیون^۱ (MI) در مبدل‌های چندسطحی عبارت است از:

$$MI = A_m / ((N-1) \times A_c) \quad (۳-۶)$$

در رابطه (۳-۶)، A_c دامنه هر کدام از شکل موج‌های حامل است. سه طرح پر کاربرد در جابجایی شکل موج‌های حامل در روش LS نسبت به هم عبارتند از:

(۱) جابجایی فاز^۲ (PD)

در PWM با جابجایی فاز، همان‌طور که در شکل ۹-۶ نشان داده شده است، تمامی سیگنال‌های حامل هم‌فاز هستند.

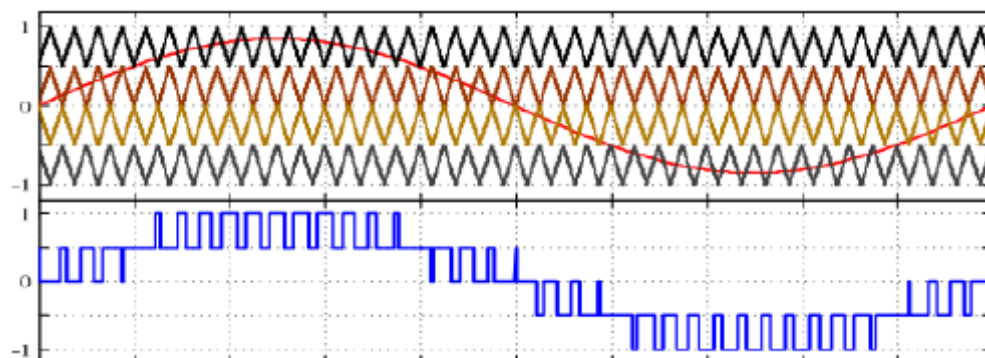


شکل ۹-۶: روش PWM با آرایش فاز (PD-PWM) [۵۳]

1 Modulation index
2 Phase Disposition

(۲) PWM با جابجایی متضاد فاز^۱ (POD-PWM)

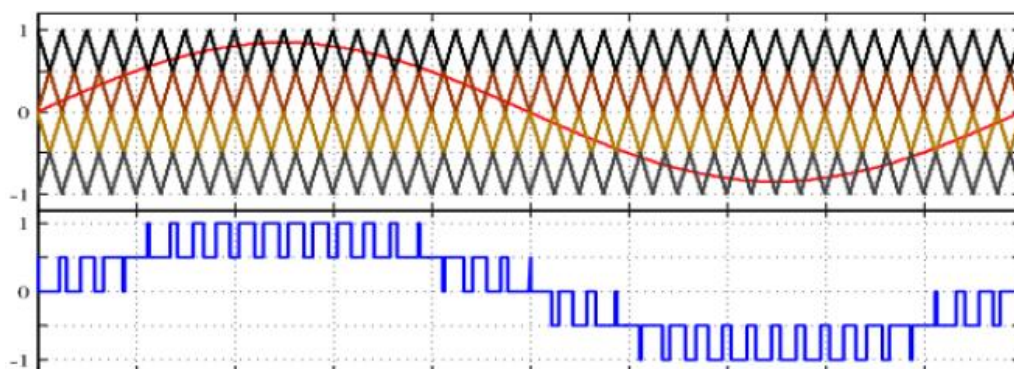
در PWM با آرایش فاز مخالف، همان‌طور که در شکل ۱۰-۶ نشان داده شده است، تمامی سیگنال‌های حامل بالای محور زمان ۱۸۰ درجه با سیگنال‌های حامل پایین محور زمان اختلاف فاز دارند.



شکل ۱۰-۶: روش PWM با آرایش فاز مخالف (POD-PWM) [۵۳]

(۳) PWM با آرایش فاز مخالف جایگزین^۲ (APOD-PWM)

در PWM با آرایش فاز مخالف جایگزین، همان‌طور که در شکل ۱۱-۶ نشان داده شده است، تمامی سیگنال‌های حامل ۱۸۰ درجه با سیگنال‌های حامل مجاور خود اختلاف فاز دارند.



شکل ۱۱-۶: روش PWM با آرایش فاز مخالف جایگزین (APOD-PWM) [۵۳]

جدول ۶-۶ بین انواع روش‌های PWM در یک اینورتر تا ۹ سطحی مقایسه‌ای را از نظر اعوجاج هارمونیک کل (THD) نشان می‌دهد [۵۳].

جدول ۶-۶: مقایسه THD انواع روش‌های PWM [۵۳]

ردیف	روش PWM	تعداد سطوح اینورتر	THD %
۱	Phase Disposition	۳ سطح	۵۲/۰۶ %
۲	Phase Opposition Disposition	۳ سطح	۵۴/۱۷ %
۳	Alternate Phase opposition Disposition	۳ سطح	۵۴/۱۷ %
۴	Phase Disposition	۵ سطح	۲۶/۶۹ %

1- Phase Opposition Disposition

2- Alternate Phase Opposition Disposition

۵	Phase Opposition Disposition	۵ سطح	٪ ۲۶/۹۶
۶	Alternate Phase opposition Disposition	۵ سطح	٪ ۳۷/۱۳
۷	Phase Disposition	۷ سطح	٪ ۱۸/۰۵
۸	Phase Opposition Disposition	۷ سطح	٪ ۲۲/۴۸
۹	Alternate Phase opposition Disposition	۷ سطح	٪ ۲۵/۲۰
۱۰	Phase Disposition	۹ سطح	٪ ۱۶/۷۷
۱۱	Phase Opposition Disposition	۹ سطح	٪ ۱۷/۰۸
۱۲	Alternate Phase opposition Disposition	۹ سطح	٪ ۱۷/۱۰

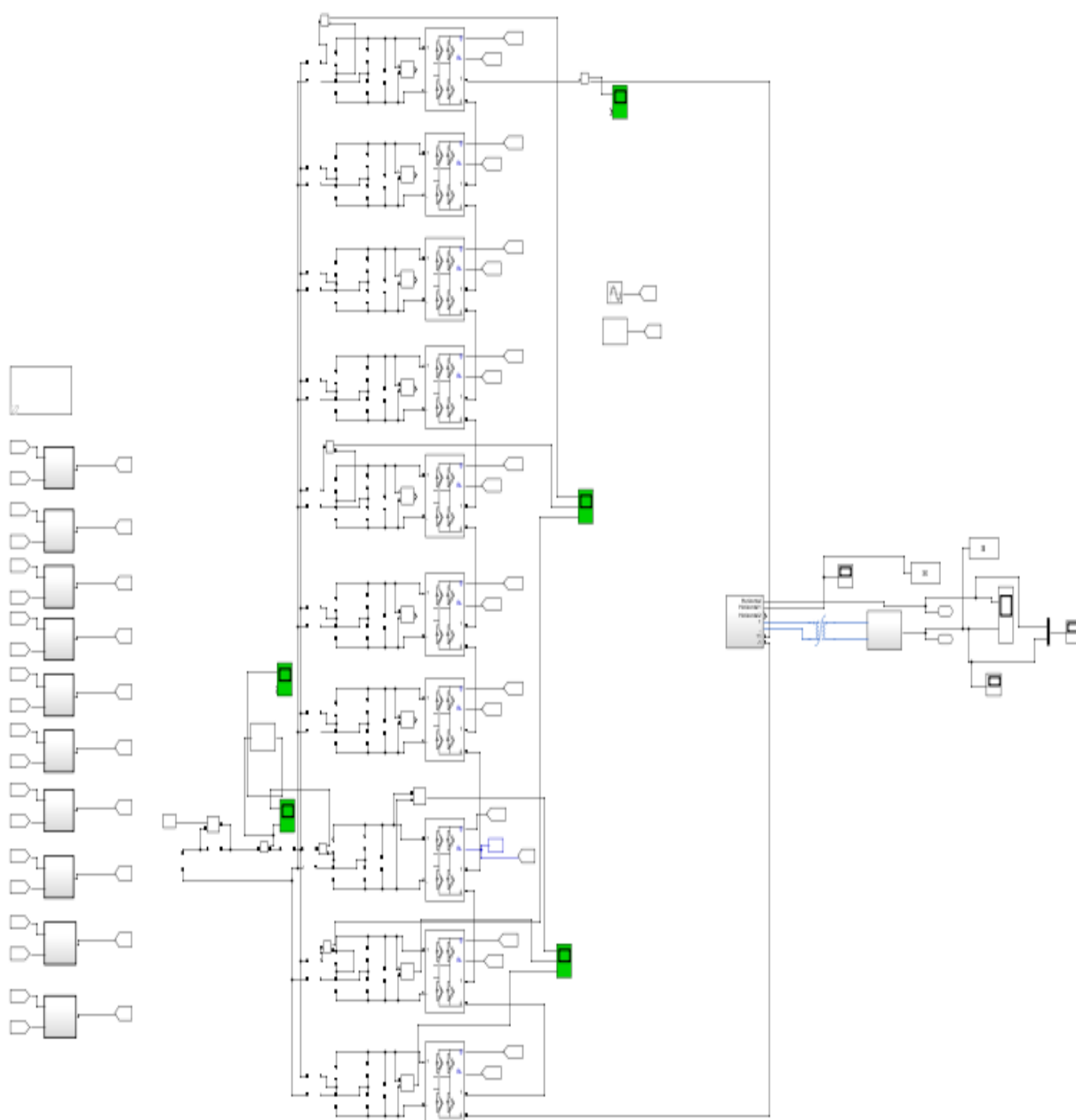
همان‌طور که جدول ۶-۶ نشان می‌دهد روش PD در یک سطح مشخص، THD کمتری نسبت به دو روش دیگر دارد.

۳-۶- نتایج شبیه‌سازی اینورترهای چندسطحی

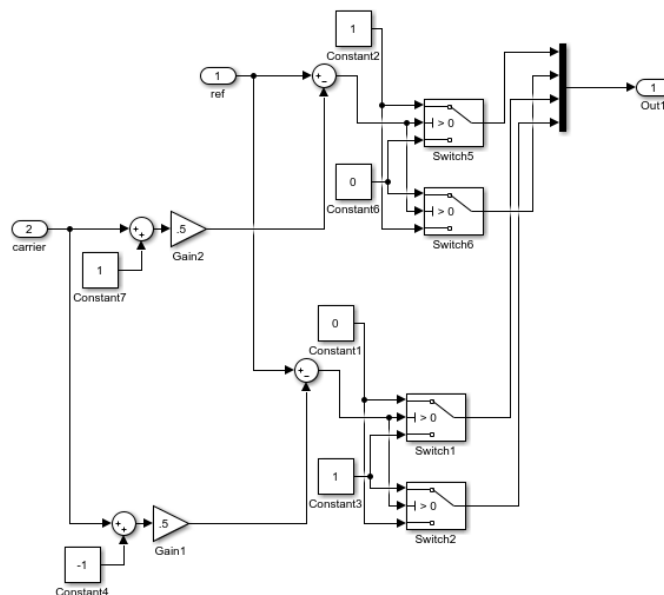
در این قسمت به پیاده‌سازی و شبیه‌سازی اینورترهای چندسطحی CHB در دونوع متقارن و نامتقارن پرداخته می‌شود.

۱-۳-۶ اینورتر چندسطحی متقارن

در ادامه به شبیه‌سازی ساختار اینورتر مورد نیاز در این پروژه بر اساس ساختار CHB و بر مبنای هر یک از روش‌های مدولاسیون دامنه PD، POD، APOD و SPWM پرداخته می‌شود. شکل ۱۲-۶ شماتیک اینورتر ۲۱ سطحی CHB متقارن پیاده‌سازی شده در متلب را نشان می‌دهد که از ۱۰ ماژول CHB تشکیل شده است و بار RL با مقاومت ۱۰۰ Ω و اندوکتانس ۱۲۰ mH را تغذیه می‌کند. هر ماژول دارای ۴ سوئیچ بوده که در مجموع ۴۰ سوئیچ در آن بکار برده شده است. شکل ۱۳-۶ یک نمونه پیاده‌سازی بلوک‌دیگرام تولید پالس گیت برای یک مبدل تمام پل در نرم‌افزار متلب را نشان می‌دهد.

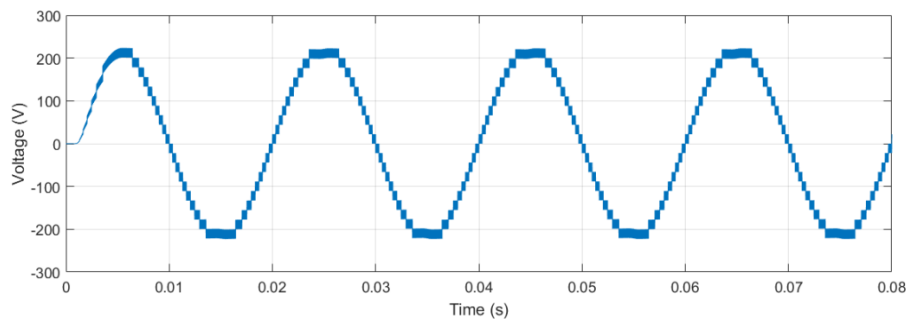


شکل ۱۲-۶: نمایی از پیاده سازی اینورتر ۲۱ سطحی شامل ۱۰ ماژول CHB در نرم افزار متلب

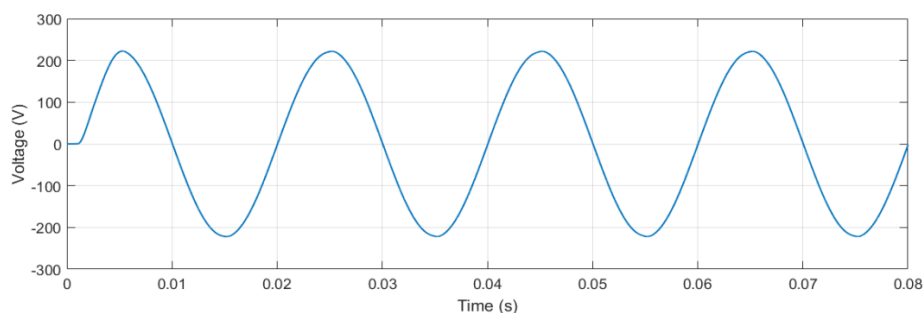


شکل ۱۳-۶: پیاده‌سازی بلوک‌دیگرام تولید پالس گیت مبدل‌های تمام پل با روش PD-PWM

با استفاده از تکنیک PD-PWM شکل موج ولتاژ خروجی اینورتر با و بدون یک فیلتر مرتبه اول که به‌منظور صاف نمودن ولتاژ خروجی در نظر گرفته شده در فرکانس ۵۰ هرتز و شاخص مدولاسیون ۱۰ در شکل ۱۴-۶ نشان داده شده است.



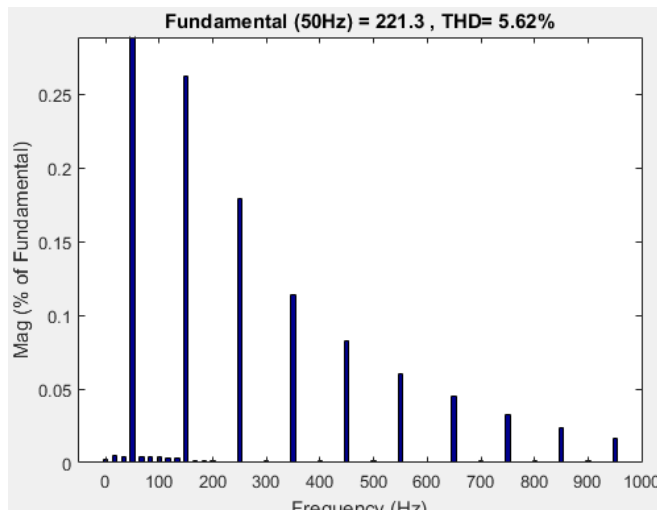
(الف)



(ب)

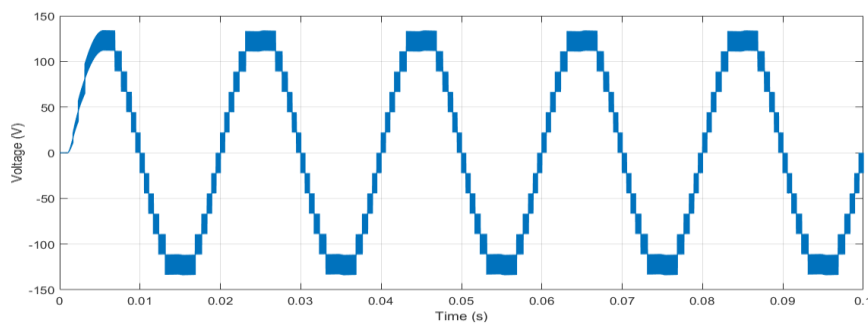
شکل ۱۴-۶: شکل موج ولتاژ خروجی اینورتر در فرکانس ۵۰ Hz، (الف): بدون فیلتر مرتبه اول؛ (ب): با فیلتر مرتبه اول

شکل ۱۵-۶: مقدار اعوجاج هارمونیک کل (THD) را از زمان ۰/۰۲ ثانیه و برای سه سیکل و مقدار دامنه ولتاژ بر حسب درصدی از ولتاژ خروجی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده است، THD این شکل موج ولتاژ خروجی ۵/۶۲٪ است.

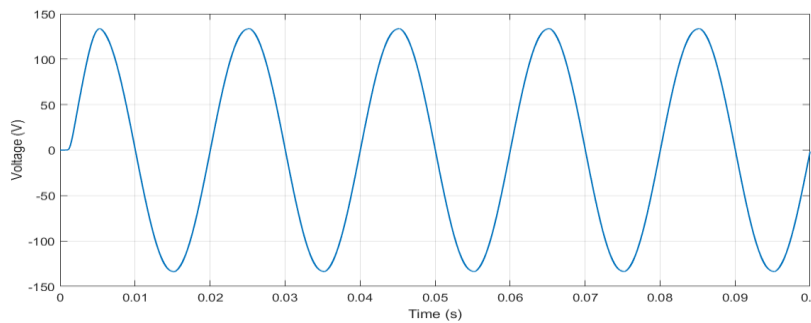


شکل ۱۵-۶: اعوجاج هارمونیکی کل در شکل موج ولتاژ خروجی اینورتر ۲۱ سطحی

شکل موج ولتاژ خروجی اینورتر در فرکانس ۵۰ Hz و شاخص مدولاسیون ۶ با و بدون یک فیلتر مرتبه اول در شکل ۱۶-۶ نشان داده شده است.



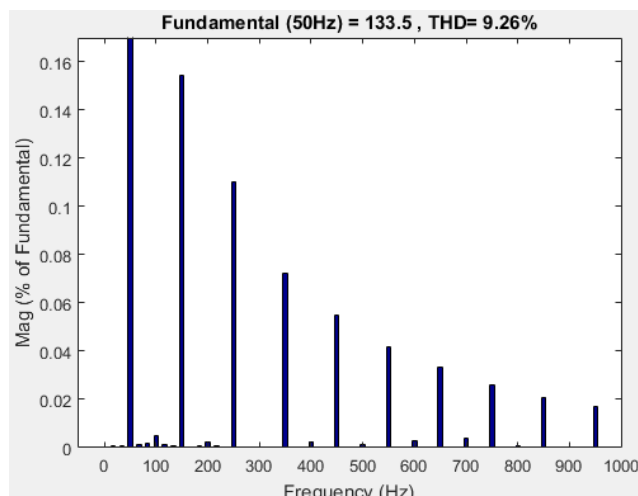
(الف)



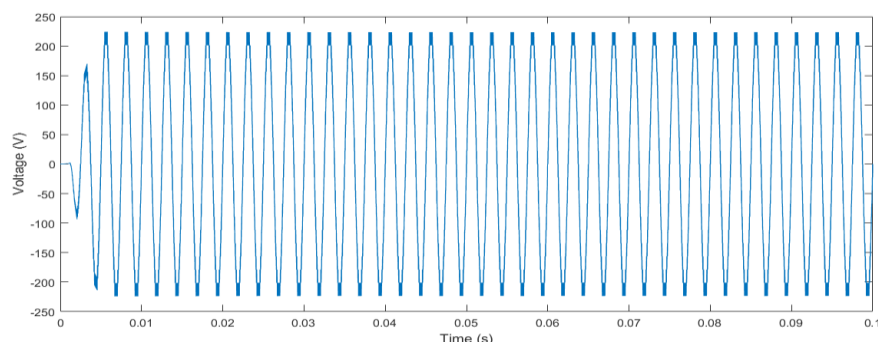
(ب)

شکل ۱۶-۶: شکل موج ولتاژ خروجی اینورتر در شاخص مدولاسیون ۶، (الف): بدون فیلتر مرتبه اول؛ (ب): با فیلتر مرتبه

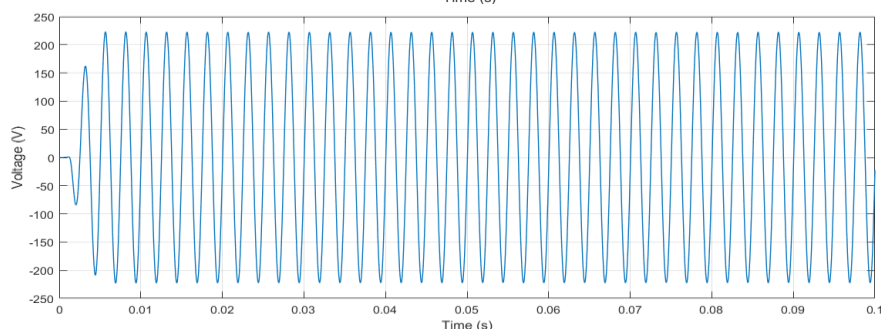
شکل ۱۵-۶ مقدار اعوجاج هارمونیکی کل (THD) برای سه سیکل و مقدار دامنه ولتاژ بر حسب درصدی از ولتاژ خروجی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده است، THD این شکل موج ولتاژ خروجی ۹/۲۶٪ است.



شکل ۱۷-۶: اعوجاج هارمونیک کل در شکل موج ولتاژ خروجی اینورتر ۲۱ سطحی با شاخص مدولاسیون ۶
 شکل موج ولتاژ خروجی اینورتر در فرکانس ۵۰ Hz و شاخص مدولاسیون ۱۰ و فرکانس ۴۰۰ Hz با و بدون یک فیلتر مرتبه
 اول در شکل ۱۶-۶ نشان داده شده است.



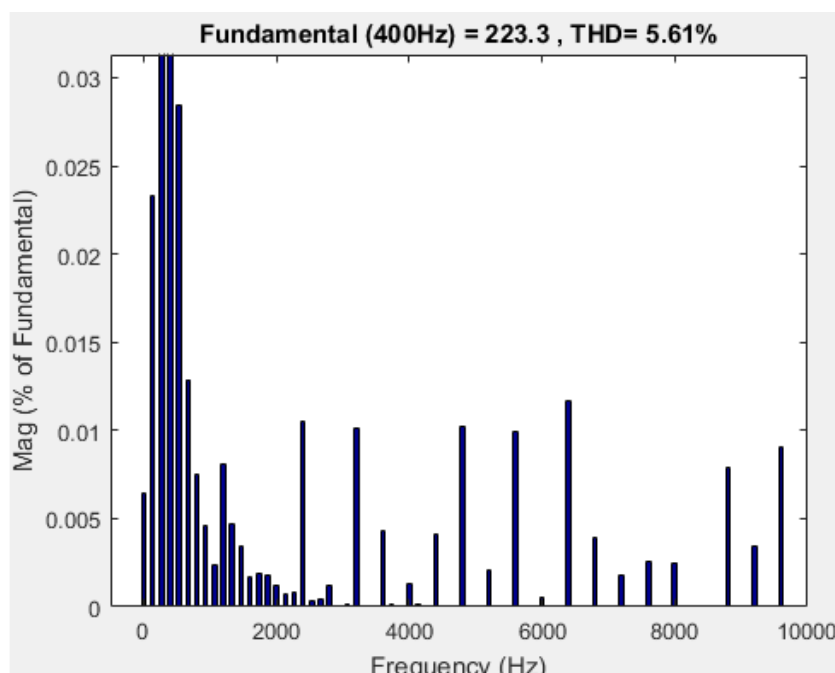
(الف)



(ب)

شکل ۱۸-۶: شکل موج ولتاژ خروجی اینورتر در شاخص مدولاسیون ۱۰ و فرکانس ۴۰۰ Hz، (الف): بدون فیلتر مرتبه اول؛ (ب): با فیلتر
 مرتبه

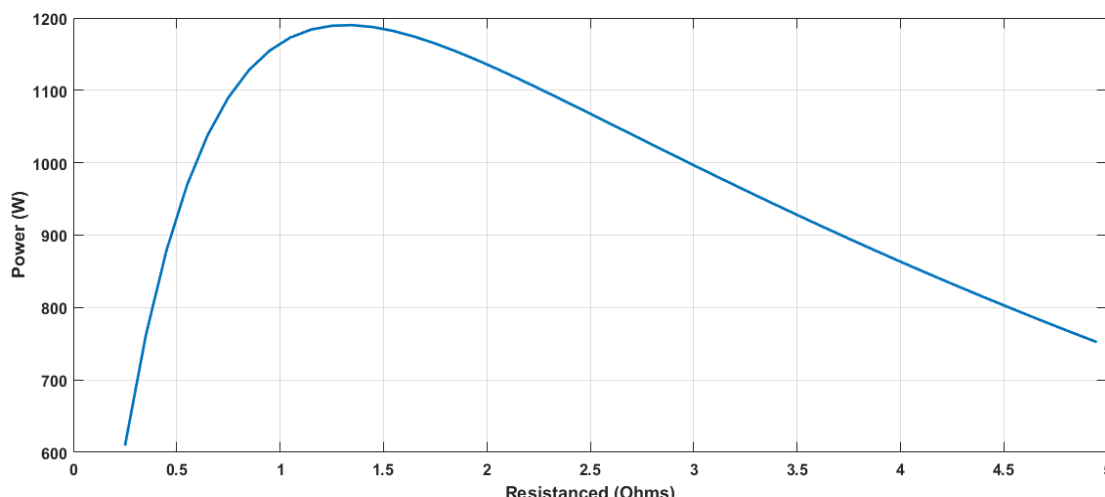
شکل ۱۵-۶: مقدار اعوجاج هارمونیک کل (THD) برای سه سیکل و مقدار دامنه ولتاژ بر حسب درصدی از ولتاژ خروجی را نشان
 می‌دهد. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده است، THD این شکل موج ولتاژ خروجی ۵/۶۱٪ است.



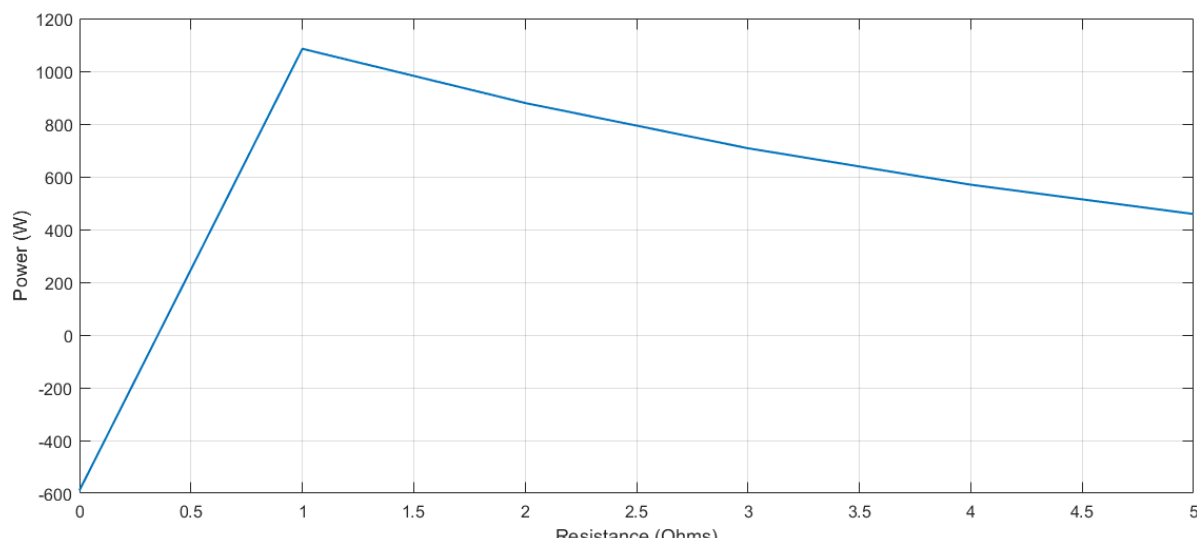
شکل ۱۹-۶: اعوجاج هارمونیک کل در شکل موج ولتاژ خروجی اینورتر ۲۱ سطحی با فرکانس ۴۰۰ هرتز

همانطور که در محاسبات مربوط به ماده مغناطیسی به شکل تروئید (پودر) اشاره شد، دانستن مقدار امپدانس تقویت‌کننده توان از دید بار اهمیت زیادی دارد و محاسبات طبق استاندارد مربوطه، بر مبنای آن صورت می‌پذیرد. در ادامه به محاسبه مقدار امپدانس خروجی اینورتر ۲۱ سطحی متقارن مورد استفاده برای تغذیه هسته مغناطیسی به شکل تروئید پرداخته می‌شود. به این منظور از قضیه بیشینه توان عبوری به ازای امپدانس بار برابر با امپدانس درونی منبع تغذیه استفاده می‌شود.

به منظور تعیین مقاومت درونی اینورتر ۲۱ سطحی بر اساس قضیه بیشینه توان عبوری از بار، با و بدون وجود اندوکتانس mH 0.31 ، منحنی تغییرات توان عبوری از بار بر حسب تغییر امپدانس بار اینورتر ۲۱ سطحی با اتصال نقاط مقاومت بار اعمال شده در شبیه‌سازی با ابزار Curve Fitting Tool نرم افزار متلب به ترتیب در شکل ۲۰-۶ و شکل ۲۱-۶ نشان داده شده است. همانطور که این شکل نشان می‌دهد، با امپدانس بار برابر با $1.25 + j0.31$ بیشینه توان برابر با ۱۱۸۶ وات از بار عبور می‌کند که در این صورت امپدانس اینورتر حدوداً 1.25 اهم تخمین زده می‌شود.



شکل ۲۰-۶: منحنی تغییرات توان عبوری از بار بر حسب تغییر امپدانس بار اینورتر ۲۱ سطحی



شکل ۲۱-۶: منحنی تغییرات توان عبوری از بار بر حسب تغییر بار مقاومتی در اینورتر ۲۱ سطحی

۲-۳-۶ اینورتر چند سطحی نامتقارن

نوعی از مبدل CHB نامتقارن (ACHB) در مراجع پیشنهاد شده است که با عنوان مبدل ترکیبی^۱ و یا مبدل نامتقارن^۲ شناخته می‌شود [۵۴]. مفهوم مبدل CHB نامتقارن (ACHB) در مرجع [۵۵] برای کاربرد کنترل دور موتور معرفی گردید. این مبدل از اینورترهای پل H متوالی تشکیل شده است که در آن ولتاژهای لینک dc برابر نیستند. این اینورتر، نسبت به نوع متقارن و معمول مزایایی نظیر کاهش تعداد ادوات کلیدزنی و در نتیجه فرکانس و تلفات کلیدزنی و کاهش مبدل‌های H لازم برای داشتن تعداد سطوح ولتاژ مشابه را دارد [۵۶]. مبدل ACHB مشکلاتی نیز دارد که از آن جمله می‌توان به لزوم کنترل ولتاژ dc البته برای سیستم STATCOM اشاره نمود. یک روش معمول برای کنترل ولتاژ خازن استفاده از حالات کلیدزنی اضافی می‌باشد [۵۷]–[۵۸] که خود منجر به مشکل فرکانس کلیدزنی متغیر می‌شود. برای حل مشکل ولتاژ لینک dc از روش‌های پرهزینه‌ای نظیر اتصال خازن لینک dc به باتری، پیل سوختی و یکسوساز استفاده می‌کنند. یکی دیگر از مشکلات اصلی مبدل‌های نامتقارن از دست دادن خاصیت ماژولار بودن آن‌ها به علت استفاده از ادوات کلیدزنی متفاوت در هر پل H تکفاز می‌باشد [۴۸].

در شکل ۲۲–۰۶، دو نوع پرکاربرد مبدل ACHB نشان داده شده است. مطابق این شکل، رابطه بین ولتاژهای لینک dc برای تولید شکل موج پلکانی در ولتاژ خروجی می‌تواند بصورت دودویی یا باینری^۳ (ولتاژهای لینک dc مضرب ۲ هستند) و سه‌سه‌ئی یا ترینری^۴ (ولتاژهای لینک dc مضرب ۳ هستند) باشد. حداکثر تعداد سطوح قابل دست‌یابی در مبدل دودویی، L_{ph}^{bin} و در مبدل سه‌سه‌ئی، L_{ph}^{tri} ، توسط رابطه (۴–۶) مشخص می‌شود:

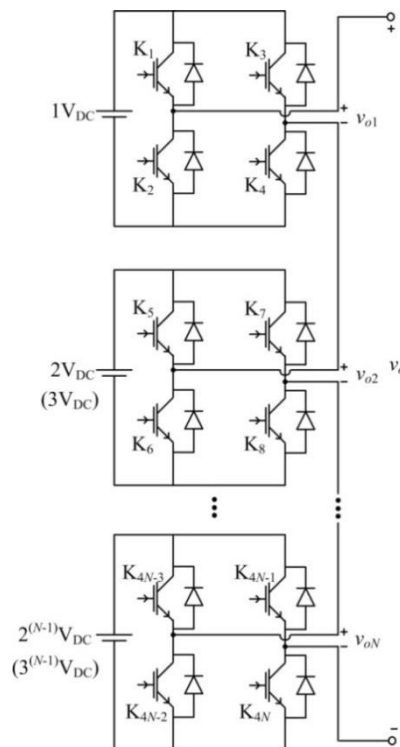
$$L_{ph}^{bin} = 2^{(N+1)} - 1; \quad L_{ph}^{tri} = 3^N \quad (6-4)$$

که در رابطه فوق، N بیان‌گر تعداد پل‌های H تکفاز می‌باشد. در مراجع [۵۹] و [۶۰] از مبدل نامتقارن سه‌سه‌ئی با سه عدد اینورتر پل H در هر فاز و لینک dc مضرب ۳ یعنی ۹:۳:۱ برای کنترل دور موتور القایی استفاده شده است. در این مبدل، پل ولتاژ بالا، HV، وظیفه تأمین ۸۹ درصد توان خروجی را بر عهده دارد، که به‌همین دلیل ادوات کلیدزنی در پل‌های H دارای انواع مختلف متناسب با

1- Hybrid inverter
2- Asymmetric inverter
3- Binary
4- Trinary

توان انتقالی هستند. در مراجع [۶۱]-[۶۲] نیز از سه پل H در هر فاز با منابع dc با ضریب ۱:۲:۶ استفاده شده است. همچنین در [۶۳]، از نسبت ۱/۲:۲:۶ برای تولید شکل موج ولتاژ چندسطحی در یک D-STATCOM بدون ترانسفورماتور استفاده شده است. سطح ولتاژ مبدل LV به اندازه ۲۰ درصد افزایش یافته است تا روش کنترلی پیشنهادی در این مرجع را روی آن پیاده‌سازی کند. در مرجع [۵۴] یک مبدل هفت‌سطحی دودویی برای کنترل دور موتور القایی استفاده شده است.

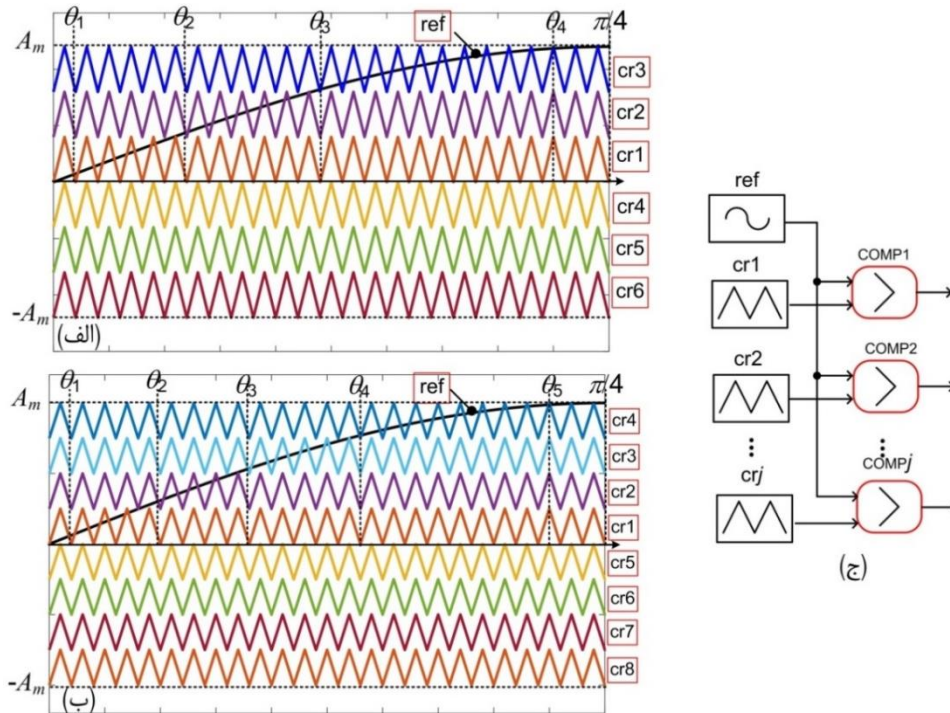
در مبدل ACHB نیز از روش PWM مبتنی بر شکل موج‌های حامل چندگانه استفاده می‌شود. با این وجود، روش کلیدزنی برای مبدل ACHB متفاوت می‌باشد. در مرجع [۵۴] برای کلیدزنی یک مبدل نامتقارن دودویی^۱ (باینری) با منابع $1V_{DC}$ و $2V_{DC}$ ، زمانی که شکل موج سینوسی مرجع بالاتر از V_{DC} و یا پایین‌تر از $-V_{DC}$ قرار گیرد سطح ولتاژ بالا ($\pm 2V_{DC}$) در خروجی قرار می‌گیرد، در غیر این صورت خروجی پل H ولتاژ بالا (پل تکفازی که ولتاژ لینک dc آن $2V_{DC}$ می‌باشد، مبدل HV) صفر خواهد بود. سطح ولتاژ پایین در خروجی ($\pm 1V_{DC}$) از طریق مقایسه بین شکل موج ناشی از اختلاف ولتاژ خروجی مبدل HV و شکل موج سینوسی با شکل موج حامل PWM بدست می‌آید.



شکل ۲۲-۶: مبدل ACHB تکفاز.

در این گزارش، ابتدا به پیاده‌سازی مبدل‌های دودویی و سه‌سه‌ئی (شکل ۲۲-۶) با استفاده از دو مبدل پل تکفاز H می‌پردازیم. با توجه به نکات گفته‌شده در قسمت قبل و طبق رابطه (۴-۶)، $7=2^{2+1}-1$ سطح برای مبدل دودویی و $9=3^2$ سطح برای مبدل سه‌سه‌ئی قابل حصول هستند. برای تعیین لحظات کلیدزنی از روش PD-PWM استفاده می‌شود. همان‌طور که قبلاً گفته شد، در این روش شش موج حامل در مورد مبدل دودویی و هشت موج حامل در مورد مبدل سه‌سه‌ئی با شکل موج مرجع مقایسه می‌شوند. مطابق شکل ۲۳-۶ نیمی از این حامل‌ها بالای محور زمان و نیمی دیگر پایین محور زمان قرار می‌گیرند تا بازه $(-A_m, A_m)$ را به‌صورت کامل و پیوسته پوشش دهند. از طرفی تمامی این موج‌های حامل با یکدیگر هم‌فاز هستند. در این‌جا قصد بر آنست که تنها با استفاده از گیت‌های منطقی OR، AND و XOR پالس‌های فرمان برای کلیدهای مبدل تعیین گردد. ورودی این گیت‌های منطقی از مقایسه

بین هر کدام از موج‌های حامل با موج مرجع گرفته می‌شود (شکل ۲۳-۶-ج)). اگر موج حامل در هر لحظه از زمان از موج مرجع کوچک‌تر باشد، خروجی مقایسه‌گر یک و در غیر این صورت صفر خواهد بود.



شکل ۲۳-۶: شکل موج مرجع و موج‌های حامل در ربع سیکل برای (الف) یک مبدل دودویی، (ب) مبدل سه‌سه‌ئی و (ج) مقایسه موج مرجع با موج‌های حامل.

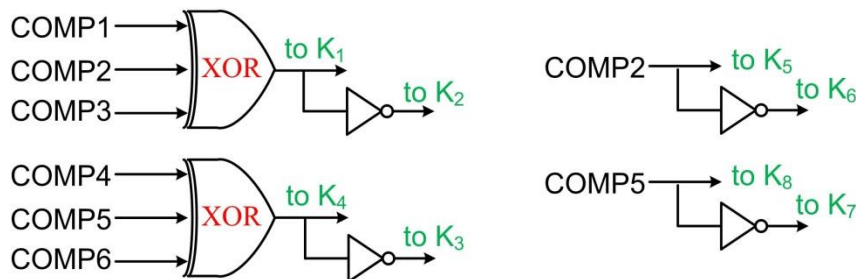
در جدول ۶-۷ خروجی مقایسه‌گرهای نشان داده شده در شکل ۲۳-۶-ج) برای ربع سیکل موج مرجع آورده شده‌اند. در این جدول نماد $\square$ بیان‌گر تغییر وضعیت خروجی مقایسه‌گر بین حالات صفر و یک است. با توجه به این جدول و شکل ۲۳-۶ در مورد مبدل دودویی در بازه $(0, \theta_1)$ شکل موج‌های حامل cr_3 - cr_1 همگی از موج مرجع بزرگ‌تر هستند و در نتیجه ولتاژ خروجی مبدل ACHB باید صفر باشد. بنابراین در این بازه از ترکیب کلیدهای $(K_4$ و $K_2)$ و $(K_8$ و $K_6)$ استفاده می‌شود تا ولتاژهای v_{o1} و v_{o2} و v_o صفر باشند. لازم به یادآوری است که برای ایجاد ولتاژ $+1V_{DC}$ و $+2V_{DC}$ در خروجی اینورترهای پل H باید به ترتیب از ترکیب کلیدهای $(K_1$ و $K_4)$ و $(K_5$ و $K_8)$ و برای ایجاد ولتاژ $-1V_{DC}$ و یا $-2V_{DC}$ در خروجی باید به ترتیب از ترکیب کلیدهای $(K_2$ و $K_3)$ و $(K_6$ و $K_7)$ بهره گرفت. همچنین، سطح ولتاژ صفر برای v_{o1} را می‌توان از طریق روشن نمودن کلیدهای $(K_1$ و $K_3)$ در نیم‌سیکل منفی و یا $(K_2$ و $K_4)$ در نیم‌سیکل مثبت ایجاد نمود و به همین ترتیب با روشن نمودن همزمان کلیدهای $(K_5$ و $K_7)$ و یا $(K_6$ و $K_8)$ ولتاژ v_{o2} را برابر صفر قرار داد. از طرفی باید توجه نمود که کلیدهای موجود در هر ساق اینورتر، به عنوان مثال $(K_1$ و $K_2)$ ، نباید به طور همزمان روشن باشند.

جدول ۶-۷: خروجی مقایسه‌گرهای بین موج مرجع و موج‌های حامل بالای محور زمان در مبدل‌های دودویی و سه‌سه‌ئی

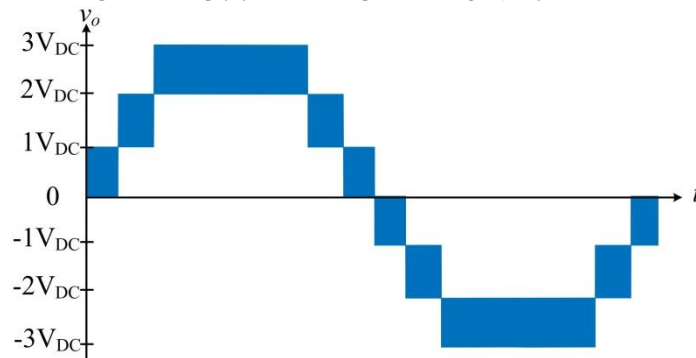
	(COMP1, COMP2, COMP3)	(COMP1, COMP2, COMP3, COMP4)
$(0, \theta_1)$	(0, 0, 0)	(0, 0, 0, 0)
(θ_1, θ_2)	($\square$, 0, 0)	($\square$, 0, 0, 0)
(θ_2, θ_3)	(1, $\square$, 0)	(1, $\square$, 0, 0)
(θ_3, θ_4)	(1, 1, $\square$)	(1, 1, $\square$, 0)
(θ_4, θ_5)	(1, 1, 1)	(1, 1, 1, $\square$)

(θ_5, θ_6)	$(1, 1, 1, 1)$

در بازه (θ_1, θ_2) ، خروجی مقایسه‌گرهای COMP2 و COMP3 صفر و خروجی مقایسه‌گر COMP1 بین صفر و یک تغییر وضعیت می‌دهد. در این بازه، ولتاژ خروجی v_o بین صفر و $1V_{DC}$ متغیر است. به عبارت دیگر، ترکیب $(1,0,0)$ برای مقایسه‌گرهای اول، دوم و سوم نشان‌دهنده آنست که کلیدهای $(K_1$ و $K_4)$ و $(K_6$ و $K_8)$ باید روشن باشند تا ولتاژ $1V_{DC}$ در خروجی مبدل LV و ولتاژ صفر در خروجی مبدل HV قرار گیرد. در بازه (θ_2, θ_3) ، خروجی مقایسه‌گر COMP2 بین صفر و یک تغییر می‌کند در حالی که خروجی مقایسه‌گرهای COMP1 و COMP3 به ترتیب برابر یک و صفر است. در این بازه کلیدهای $(K_5$ و $K_8)$ و $(K_2$ و $K_4)$ روشن هستند اگر وضعیت $(1,1,0)$ را برای خروجی مقایسه‌گرها داشته باشیم تا ولتاژ خروجی مبدل HV برابر $2V_{DC}$ و ولتاژ خروجی مبدل LV برابر 0 باشد. در بازه (θ_3, θ_4) ، خروجی مقایسه‌گرهای COMP1 و COMP2 برابر یک است و خروجی مقایسه‌گر COMP3 بین صفر و یک تغییر حالت می‌دهد. در این بازه ترکیب $(1,1,1)$ نشان‌دهنده آنست که کلیدهای $(K_1$ و $K_4)$ و $(K_5$ و $K_8)$ روشن هستند تا ولتاژ $3V_{DC}$ در خروجی قرار گیرد. در جدول ۶-۷ زاویه θ_5 برای مبدل دودویی برابر $\pi/4$ می‌باشد. با توجه به توضیحات داده شده، منبع ولتاژ $1V_{DC}$ زمانی که XOR خروجی مقایسه‌گرها برابر یک باشد در خروجی قرار می‌گیرد. بنابراین XOR این سه خروجی را مطابق شکل ۶-۲۴ می‌توان به کلید K_1 اعمال نمود و NOT آن را به کلید K_2 . همچنین، زمانی که خروجی COMP2 برابر یک باشد ولتاژ $2V_{DC}$ در خروجی ظاهر می‌شود. بنابراین می‌توان این خروجی را مستقیماً به عنوان پالس کلید K_5 در نظر گرفت و NOT آن را به عنوان پالس کلیدزنی K_6 . با استدلالی مشابه می‌توان پالس‌های گیت کلیدهای K_3 و K_7 را با توجه به مقایسه شکل موج‌های حامل با نیم‌سیکل منفی شکل موج مرجع بدست آورد. در شکل ۶-۲۵، شکل موج ولتاژ هفت‌سطحی برای مبدل دودویی نشان داده شده است. در این شکل، فرکانس موج مرجع و حامل به ترتیب ۵۰ هرتز و ۱۰۰ کیلوهرتز است. ضریب اعوجاج هارمونیکی ولتاژ نشان داده شده در شکل ۶-۲۵ برابر ۱۸/۱۱ درصد است.



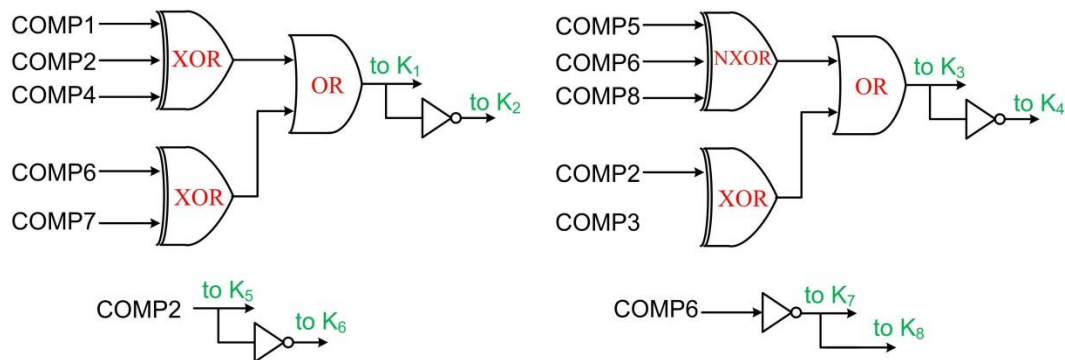
شکل ۶-۲۴: تولید پالس‌های کلیدزنی برای مبدل دودویی هفت‌سطحی



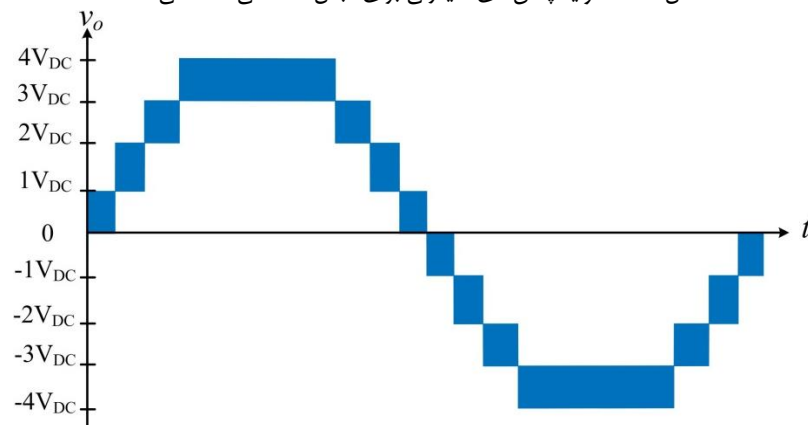
شکل ۶-۲۵: شکل موج هفت‌سطحی ولتاژ خروجی مبدل دودویی با $N=2$

همان‌طور که ملاحظه گردید، در مبدل دودویی و در نیم‌سیکل مثبت از موج مرجع، تنها سطوح ولتاژ $1V_{DC}$ و $2V_{DC}$ در خروجی قرار می‌گیرند. به عبارت دیگر، در این نیم‌سیکل کلیدهای K_3 و K_7 همواره خاموش هستند. این در حالی‌ست که در مورد مبدل سه‌سه‌ئی اوضاع کمی متفاوت خواهد بود. با توجه به شکل ۶-۲۳، به منظور ایجاد ۹ سطح ولتاژ از مقایسه هشت عدد موج حامل

با موج مرجع استفاده می‌شود. در نیم‌سیکل مثبت اگر خروجی مقایسه‌گرهای COMP1 تا COMP4 صفر باشند، بدین معناست که کلیدهای (K_2 و K_4) و (K_6 و K_8) باید روشن باشند. در بازه (θ_1, θ_2) تنها خروجی COMP1 بین صفر و یک تغییر می‌کند، بنابراین، کلید K_1 به تناوب در حالت روشن و خاموش قرار می‌گیرد و ولتاژ v_o بین صفر و $+1V_{DC}$ متغیر خواهد بود. در بازه (θ_2, θ_3) که ولتاژ خروجی بایستی بین مقادیر $+1V_{DC}$ و $+2V_{DC}=3V_{DC}-1V_{DC}$ نوسان کند، وضعیت خروجی مقایسه‌گرها به صورت $(1, \square, 0, 0)$ خواهد بود و ترکیب کلیدهای (K_2 و K_3) و (K_5 و K_8) هم‌زمان روشن می‌شوند تا ولتاژ $+2V_{DC}$ در خروجی ظاهر شود. از اینجا مشخص می‌شود که برخلاف مبدل دودویی، در نیم‌سیکل مثبت بایستی از ترکیب کلیدهای (K_2 و K_3) نیز استفاده نمود تا به سطح ولتاژی $2V_{DC}=3V_{DC}-1V_{DC}$ دست یافت. این امر کمی مدار کنترلی این مبدل را نسبت به حالت دودویی پیچیده‌تر می‌کند. در بازه (θ_3, θ_4) ، وضعیت خروجی مقایسه‌گرها به صورت $(1, 1, \square, 0)$ خواهد بود و در این صورت کلیدهای (K_5 و K_8) روشن می‌شوند تا ولتاژ $v_{o2}=3V_{DC}$ در خروجی قرار گیرد و ترکیب کلیدهای (K_2 و K_4) و (K_2 و K_3) نیز از مبدل LV باید به تناوب استفاده شوند تا خروجی v_o بین $3V_{DC}$ و $2V_{DC}$ تغییر کند. در بازه (θ_4, θ_5) ، ولتاژ خروجی بین $3V_{DC}$ و $4V_{DC}$ متغیر است و برای تولید ولتاژ $4V_{DC}$ باید ترکیب کلیدهای (K_1 و K_4) و (K_5 و K_8) روشن باشند. زاویه θ_6 در جدول ۶-۷ برای مبدل سه‌سه‌ئی برابر $\pi/4$ است. به همین ترتیب می‌توان پالس‌های کلیدزنی را در نیم‌سیکل منفی استخراج نمود. در شکل ۶-۲۶، مدار فرمان کلیدزنی مبدل سه‌سه‌ئی با توجه به جدول ۶-۷ رسم شده است. با توجه به توضیحات ارائه‌شده، کلید K_1 در سطوح ولتاژ $1V_{DC}$ ، $4V_{DC}$ و $-2V_{DC}$ روشن است. کلید K_5 نیز در سطوح ولتاژ $2V_{DC}$ ، $3V_{DC}$ و $4V_{DC}$ روشن است. بنابراین هر زمان که خروجی COMP2 برابر یک است کلید K_5 نیز روشن است. در واقع شکل ۶-۲۶ بیان‌گر این موضوع است که در مبدل سه‌سه‌ئی نیز با استفاده از گیت‌های XOR، OR و AND می‌توان به شکل موج ۹ سطحی رسید. شکل موج مربوط به خروجی مبدل سه‌سه‌ئی ۹ سطحی در شکل ۶-۲۷ نشان داده شده است. در این حالت نیز فرکانس موج‌های حامل برابر ۱۰۰ کیلوهرتز و THD ولتاژ خروجی اینورتر برابر $13/61$ درصد است.



شکل ۶-۲۶: تولید پالس‌های کلیدزنی برای مبدل سه‌سه‌ئی ۹ سطحی



شکل ۶-۲۷: شکل موج نه‌سطحی ولتاژ خروجی مبدل سه‌سه‌ئی با $N=2$.

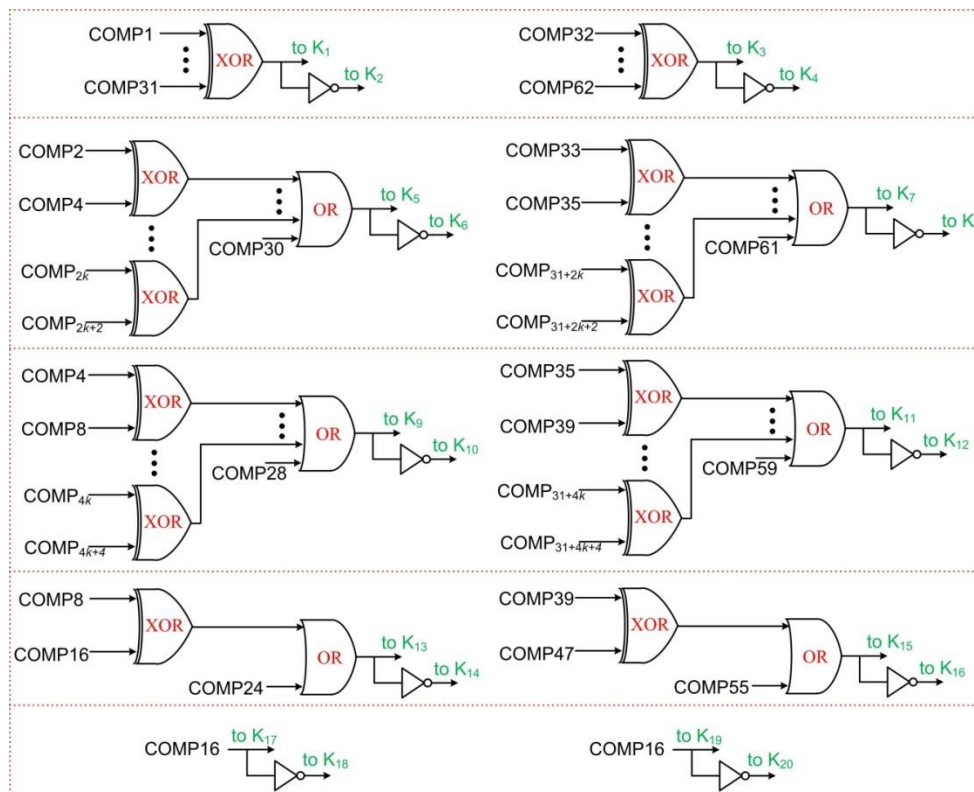
در مبدل سه‌سه‌ئی ملاحظه گردید که مبدل HV در بازه‌های بیشتری روشن است. از طرفی، در مبدل سه‌سه‌ئی روش‌های کلیدزنی PWM با فرکانس بالا مناسب نیستند چرا که طبقات با سطوح ولتاژ بالا در معرض فرکانس‌های بالای کلیدزنی قرار می‌گیرند [۶۴]. لازم به ذکر است که در کاربرد خاص مورد نظر (اندازه‌گیر منحنی B-H) فرکانس کلیدزنی تا ۱۰۰ کیلوهرتز نیز انجام‌پذیر است. از همین‌رو برای دستیابی به یک شکل‌موج تقریباً سینوسی تصمیم بر آن شد که از یک مبدل دودویی با تعداد ۵ ماژول به‌عنوان تقویت‌کننده استفاده گردد. به‌عبارت دیگر، یک شکل‌موج ۶۳ سطحی در خروجی این مبدل تولید می‌شود. با قرار دادن $N=5$ در شکل ۲۲-۶ می‌توان آن‌را به مدار مبدل ACHB ۶۳ سطحی تعمیم داد. به‌منظور تولید شکل‌موج ۶۳ سطحی نیاز به ۲۲-۶ عدد موج حامل است که بازه $(-A_m, A_m)$ از شکل‌موج مرجع را به‌صورت پیوسته پوشش دهند (البته برای شاخص مدولاسیون ۱). A_m دامنه شکل‌موج مرجع می‌باشد. بنابراین، نیاز به ۲۲-۶ عدد مقایسه‌گر است که هر کدام از موج‌های حامل را با موج مرجع مقایسه کند. در جدول ۸-۶ حالات کلیدزنی لازم برای تولید ۳۱ سطح ولتاژ در نیم‌سیکل مثبت آورده شده است. در این جدول، از یک بردار با ۵ درایه استفاده شده است. درایه "۱" بیان‌گر آنست که ولتاژ $V_{DC}^{(j-1)2}$ با روشن کردن کلیدهای K_{4j-3} و K_{4j} در خروجی مبدل زام قرار می‌گیرد. درایه "۰" نیز بیان‌گر آنست که ولتاژ صفر با روشن کردن کلیدهای K_{4j-2} و K_{4j} در خروجی مبدل زام قرار می‌گیرد.

جدول ۸-۶: تولید سطوح ولتاژ مختلف در نیم‌سیکل مثبت موج مرجع با استفاده از بردار ولتاژ لینک‌های DC.

سطح ولتاژ	(16VDC, 8VDC, 4VDC, 2VDC, 1VDC)	سطح ولتاژ	(16VDC, 8VDC, 4VDC, 2VDC, 1VDC)
0V _{DC}	(0,0,0,0,0)	16V _{DC}	(1,0,0,0,0)
1V _{DC}	(0,0,0,0,1)	17V _{DC}	(1,0,0,0,1)
2V _{DC}	(0,0,0,1,0)	18V _{DC}	(1,0,0,1,0)
3V _{DC}	(0,0,0,1,1)	19V _{DC}	(1,0,0,1,1)
4V _{DC}	(0,0,1,0,0)	20V _{DC}	(1,0,1,0,0)
5V _{DC}	(0,0,1,0,1)	21V _{DC}	(1,0,1,0,1)
6V _{DC}	(0,0,1,1,0)	22V _{DC}	(1,0,1,1,0)
7V _{DC}	(0,0,1,1,1)	23V _{DC}	(1,0,1,1,1)
8V _{DC}	(0,1,0,0,0)	24V _{DC}	(1,1,0,0,0)
9V _{DC}	(0,1,0,0,1)	25V _{DC}	(1,1,0,0,1)
10V _{DC}	(0,1,0,1,0)	26V _{DC}	(1,1,0,1,0)
11V _{DC}	(0,1,0,1,1)	27V _{DC}	(1,1,0,1,1)
12V _{DC}	(0,1,1,0,0)	28V _{DC}	(1,1,1,0,0)
13V _{DC}	(0,1,1,0,1)	29V _{DC}	(1,1,1,0,1)
14V _{DC}	(0,1,1,1,0)	30V _{DC}	(1,1,1,1,0)
15V _{DC}	(0,1,1,1,1)	31V _{DC}	(1,1,1,1,1)

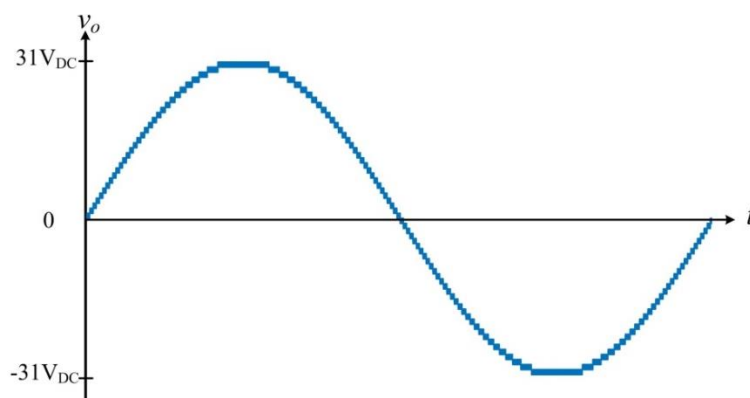
همان‌طور که اشاره شد، از مقایسه ۳۱ عدد موج حامل با موج مرجع، ۳۱ بازه کلیدزنی در نیم‌سیکل مثبت ایجاد می‌شود. در بازه اول کلیدزنی، کلیه موج‌های حامل cr1-cr31 از موج مرجع بزرگ‌تر بوده و خروجی مقایسه‌گرها برابر صفر است و در بازه دوم، موج cr1 در لحظاتی از موج مرجع بزرگ‌تر شده و خروجی مقایسه‌گر آن بین صفر و ۱ تغییر می‌یابد در حالی که خروجی بقیه مقایسه‌گرها برابر صفر است. به‌همین ترتیب و در بازه kام، خروجی مقایسه‌گر مربوط به موج حامل crk بین صفر و یک متغیر است در حالی که خروجی مقایسه‌گر مربوط به حامل‌های پایین‌تر از آن برابر یک و بالاتر از آن برابر صفر است. با این توضیحات و از روی جدول ۸-۶ مشخص است که منبع ولتاژ 1V_{DC} به‌صورت یک‌درمیان در خروجی ظاهر می‌شود. بنابراین با XOR نمودن خروجی تمامی مقایسه‌گرها می‌توان پالس کلیدزنی برای کلید K₁ را تولید نمود. منبع ولتاژ 2V_{DC} نیز به‌صورت دودر میان به‌ازای دوسطح متوالی در خروجی ظاهر شده و دو سطح متوالی بعد معادل صفر است. به‌عنوان مثال، در سطوح 2V_{DC} و 3V_{DC} کلید K₅ روشن و در سطوح 4V_{DC} و

5V_{DC} کلید K₅ خاموش است. بنابراین می‌توان تحقیق نمود که اگر خروجی مقایسه‌گرهای مربوط به موج‌ها حامل cr₂ و cr₄ را XOR نمائیم می‌توان پالس‌های گیت کلید K₅ را برای تولید ولتاژ در این بازه‌ها تولید نمود. درکل با جمع (OR نمودن) XOR مقایسه‌گرهای (COMP_{2k}, COMP_{2k+2}) که $k=1,3,5, \dots$ پالس‌های فرمان کلید K₅ تولید می‌شوند. به‌طریقی مشابه، با جمع (OR نمودن) XOR مقایسه‌گرهای (COMP_{4k}, COMP_{4k+4}) پالس‌های فرمان کلید K₉ و با جمع (OR نمودن) XOR مقایسه‌گرهای (COMP_{8k}, COMP_{8k+8}) پالس‌های فرمان کلید K₁₃ تولید می‌شوند. همچنین با توجه به جدول ۶-۸ مشخص است که منبع ولتاژ 16V_{DC} از سطح شانزدهم به بعد همواره در خروجی ظاهر می‌شود. بنابراین می‌توان خروجی مقایسه‌گر COMP₁₆ را مستقیماً به‌عنوان پالس گیت کلید K₁₇ در نظر گرفت. در شکل ۶-۲۸، مدار فرمان مبدل ۶۳ سطحی نشان داده شده است.

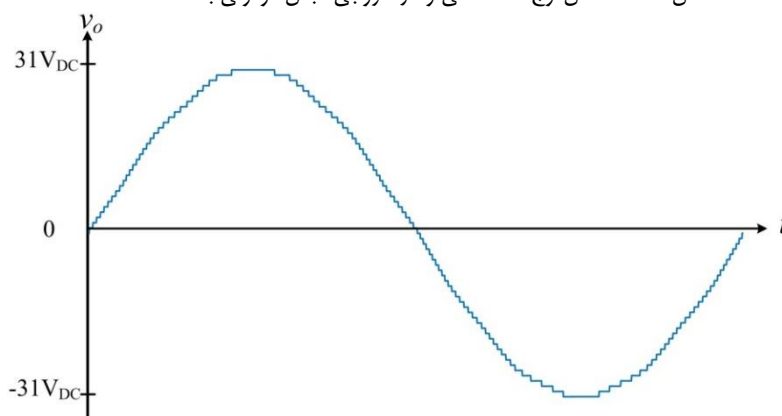


شکل ۶-۲۸: تولید پالس‌های کلیدزنی برای مبدل دودوئی ۶۳ سطحی

شکل موج مربوط به ولتاژ خروجی مبدل دودوئی ۶۳ سطحی در شکل ۶-۲۹ آورده شده است. همان‌طور که از این شکل مشخص است، این موج تقریباً سینوسی است و THD آن با توجه به تحلیل فوریه برابر ۱/۸۴ درصد است. در این شکل فرکانس موج مرجع برابر ۵۰ هرتز و فرکانس موج‌های حامل برابر ۱۰۰ کیلوهرتز است. شاخص مدولاسیون، MI، نیز برابر یک در نظر گرفته شده است. البته لازم به ذکر است که شکل ۶-۲۹ در شرایطی استخراج شده که منابع تغذیه dc به‌عنوان لینک‌های dc در نظر گرفته شده و از مجموعه شبکه ac، یکسوساز دیودی و خازن برای این منظور استفاده نگردیده است. همچنین، مبدل تقریباً به‌صورت بی‌بار بهره‌برداری شده است بدین معنی که اثرات افت ولتاژ هدایت کلیدهای هر کدام از ماژول‌ها بر روی ولتاژ خروجی مبدل دیده نشده است. از طرفی در شکل ۶-۳۰، ولتاژ خروجی مبدل ۶۳ سطحی زمانی که فرکانس موج مرجع برابر ۱۰ کیلوهرتز و فرکانس موج‌های حامل برابر ۱۰۰ کیلوهرتز است، آورده شده است. همان‌طور که از شکل مشخص است، به‌علت بالا بودن نسبتی شاخص مدولاسیون فرکانس (نسبت فرکانس موج مرجع به فرکانس موج حامل)، اثر کلیدزنی PWM بر روی سطوح ولتاژ قابل مشاهده نیست اما همچنان شکل موج ولتاژ ۶۳ سطحی است.



شکل ۲۹-۶: شکل موج ۶۳ سطحی ولتاژ خروجی مبدل دودوئی با $N=63$.



شکل ۳۰-۶: شکل موج ۶۳ سطحی ولتاژ خروجی مبدل دودوئی با $N=63$ و فرکانس موج مرجع برابر ۱۰ کیلوهرتز.

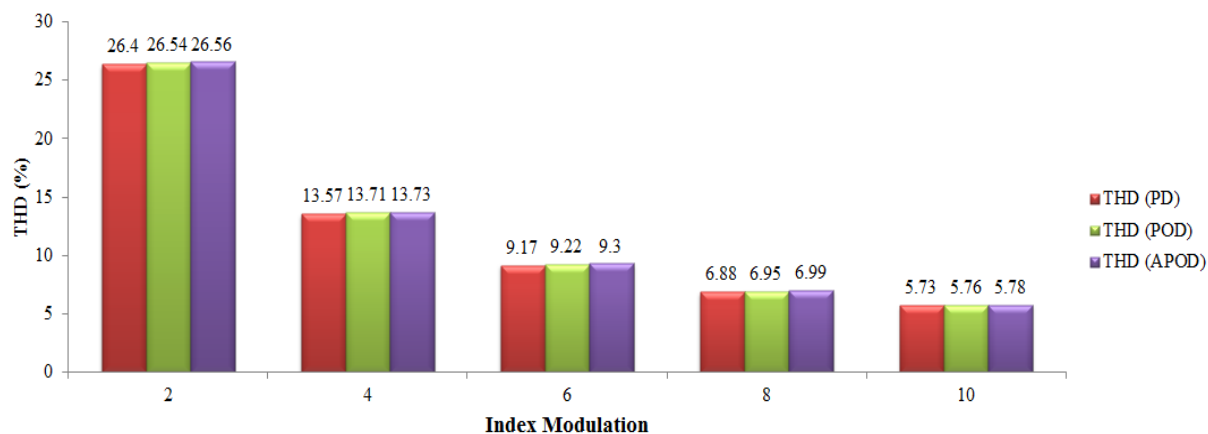
۶-۳-۳ مقایسه پارامترهای مختلف در اینورترهای چند سطحی

در ادامه در روش PD-PWM با تغییر فرکانس و اندیس مدولاسیون، مقایسه‌ای از نظر اعوجاج هارمونیک کل (THD) و فرم فاکتور (Form Factor) و کرسست فاکتور (Crest Factor) شکل موج ولتاژ خروجی اینورتر انجام خواهد شد. این دو پارامتر CF و FF بر اساس دو رابطه (۶-۵) و (۶-۶) محاسبه می‌شوند.

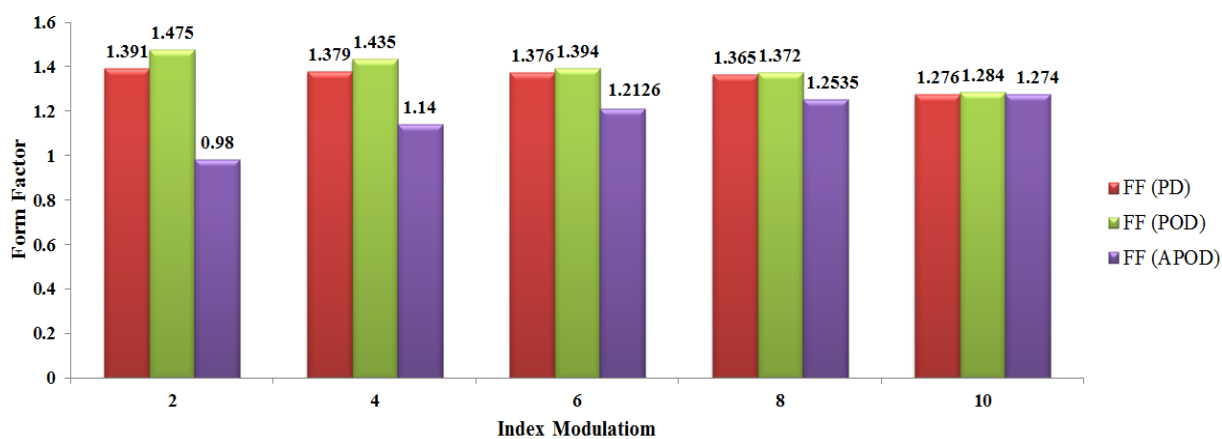
$$FormFactor = \frac{R.M.S \text{ Value}}{Average \text{ Value}} \quad (۶-۵)$$

$$Crest \text{ Factor} = \frac{Peak \text{ Value}}{R.M.S \text{ Value}} \quad (۶-۶)$$

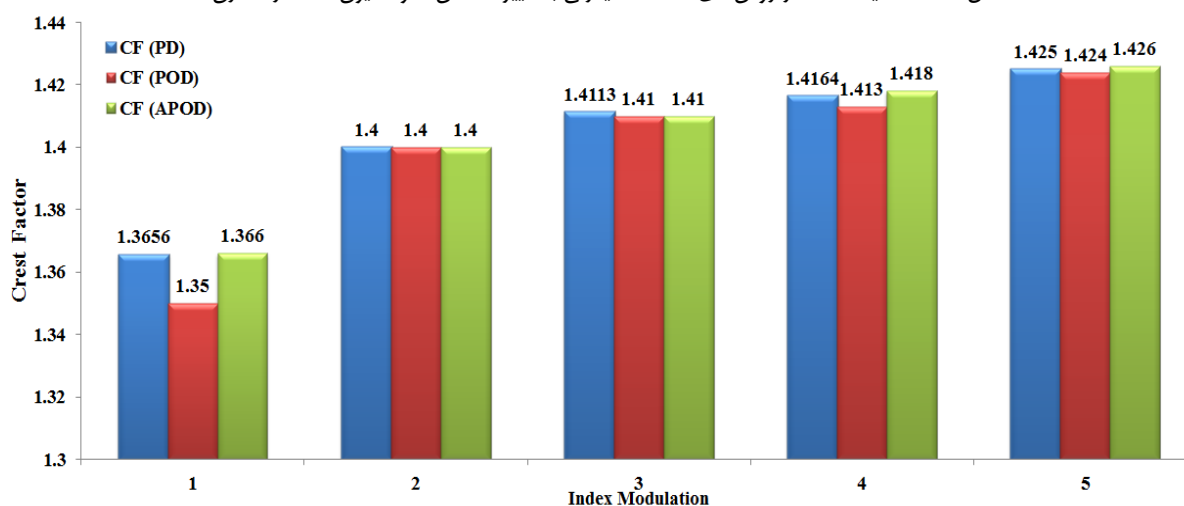
برای یک شکل موج سینوسی خالص، مقدار CF برابر با $1/\sqrt{2}$ و مقدار FF برابر با ۱/۱۱ است. مقدار زیاد CF شکل موج یک تقویت کننده توان منجر به کاهش قدرت بهره‌وری آن می‌شود.



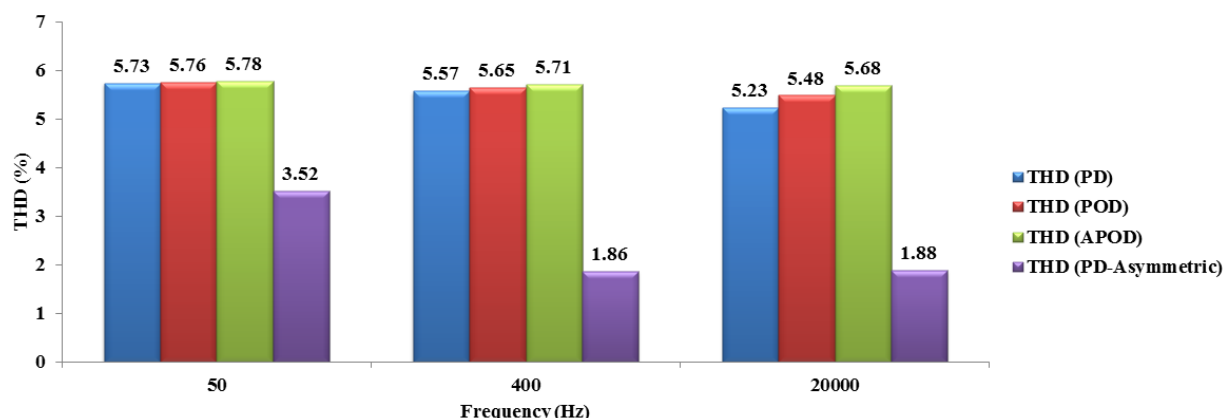
شکل ۳۱-۶: مقایسه THD در روش‌های مختلف کلیدزنی با تغییر شاخص مدولاسیون ساختار متقارن



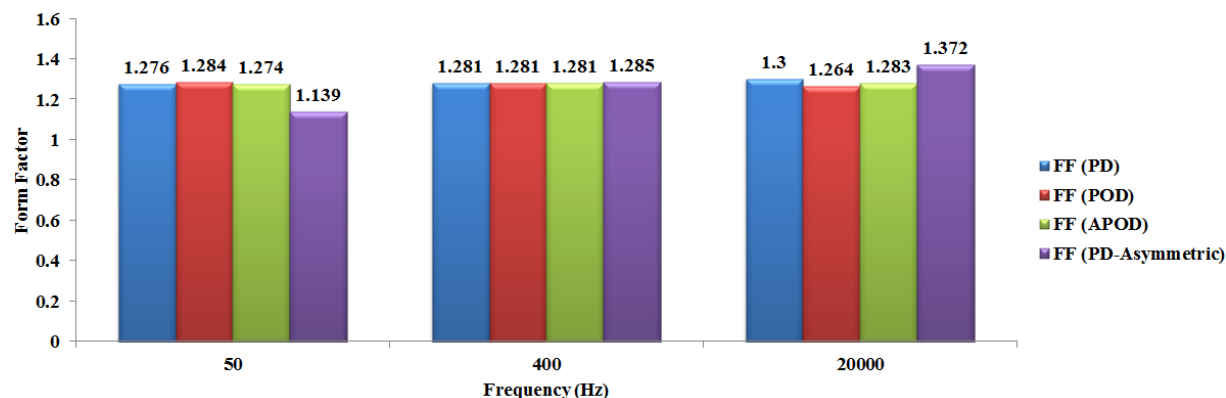
شکل ۳۲-۶: مقایسه FF در روش‌های مختلف کلیدزنی با تغییر شاخص مدولاسیون ساختار متقارن



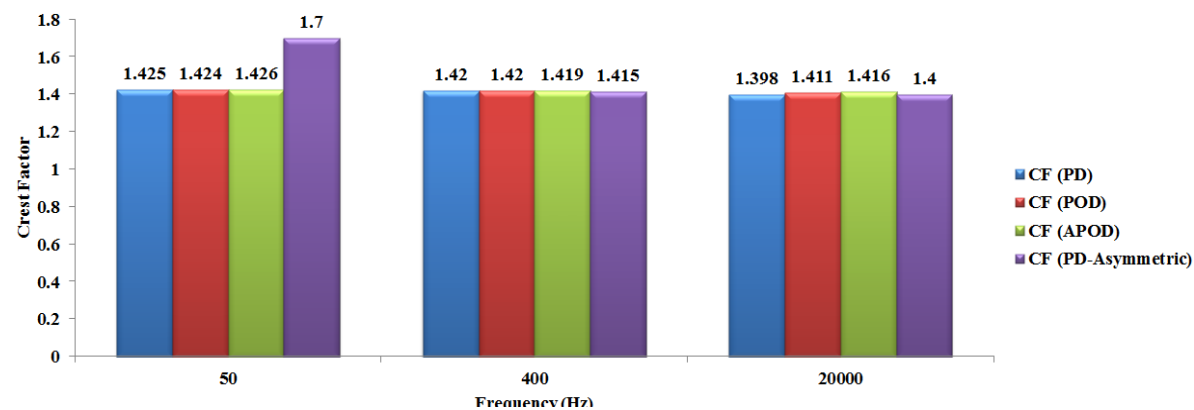
شکل ۳۳-۶: مقایسه CF در روش‌های مختلف کلیدزنی با تغییر شاخص مدولاسیون ساختار متقارن



شکل ۳۴-۶: مقایسه THD در روش‌های مختلف کلیدزنی با تغییر فرکانس در ساختارهای متقارن و نامتقارن



شکل ۳۵-۶: مقایسه FF در روش‌های مختلف کلیدزنی با تغییر فرکانس در ساختارهای متقارن و نامتقارن



شکل ۳۶-۶: مقایسه شاخص CF در روش‌های مختلف کلیدزنی با تغییر فرکانس در ساختارهای متقارن و نامتقارن

همان‌طور که نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد، با کاهش شاخص مدولاسیون از ۱۰ تا ۲ در اینورتر چندسطحی متقارن، شاخص THD افزایش پیدا کرده و نشان‌دهنده وجود اعوجاج هارمونیک بیشتر در شکل موج‌های با شاخص مدولاسیون کمتر است. همچنین در اینورتر چندسطحی متقارن در روش کلیدزنی PD-PWM اعوجاج هارمونیک کل نسبت به دو روش کلیدزنی دیگر کمتر است. شاخص CF در هر سه روش کلیدزنی با کاهش شاخص مدولاسیون کاهش یافته و از مقدار بهینه خود (۱/۴۱۴) دورتر شده است. شاخص FF در روش کلیدزنی PD و POD با کاهش شاخص مدولاسیون افزایش یافته و در روش کلیدزنی APOD با کاهش شاخص مدولاسیون کاهش می‌یابد. همچنین شبیه‌سازی‌ها در فرکانس‌های مختلف نیز مورد مقایسه قرار گرفت که در این‌صورت با افزایش فرکانس شکل موج مرجع در اینورتر ۲۱ سطحی متقارن مقدار THD در هر سه روش کلیدزنی کاهش یافته است. شکل

۳۵-۶ نشان می‌دهد که شاخص FF با افزایش فرکانس موج مرجع در روش‌های PD و APOD افزایش یافته و در روش کلیدزنی POD کاهش می‌یابد. شاخص CF نیز همان‌طور که شکل ۳۶-۶ نشان می‌دهد، در هر سه روش کلیدزنی با افزایش فرکانس موج مرجع کاهش یافته است.

از آنجایی که در بین روش‌های کلیدزنی، روش PD-PWM به عنوان روش برتر انتخاب شد، در ادامه مقایسه‌ای بین ساختار اینورتر چند سطحی متقارن و نامتقارن با روش کلیدزنی PD-PWM انجام می‌شود. همان‌طور که شکل ۳۴-۶ نشان می‌دهد، THD ولتاژ خروجی در اینورتر چند سطحی نامتقارن در هر سه سطح فرکانسی کمتر از THD ولتاژ خروجی اینورتر چند سطحی متقارن است. بنابراین ساختار اینورتر چند سطحی نامتقارن با روش کلیدزنی PD-PWM به عنوان ساختار برتر انتخاب می‌شود. شکل ۳۵-۶ نشان می‌دهد که در ساختار اینورتر چند سطحی نامتقارن، شاخص FF با افزایش فرکانس، افزایش یافته و از مقدار بهینه خود (۱/۱۱) فاصله گرفته است. شاخص CF نیز در اینورتر چند سطحی نامتقارن همان‌طور که شکل ۳۶-۶ نشان می‌دهد، با افزایش فرکانس کاهش یافته است و در فرکانس ۵۰ Hz نسبت به ساختارهای متقارن بیشتر است.

۴-۶- جمع‌بندی

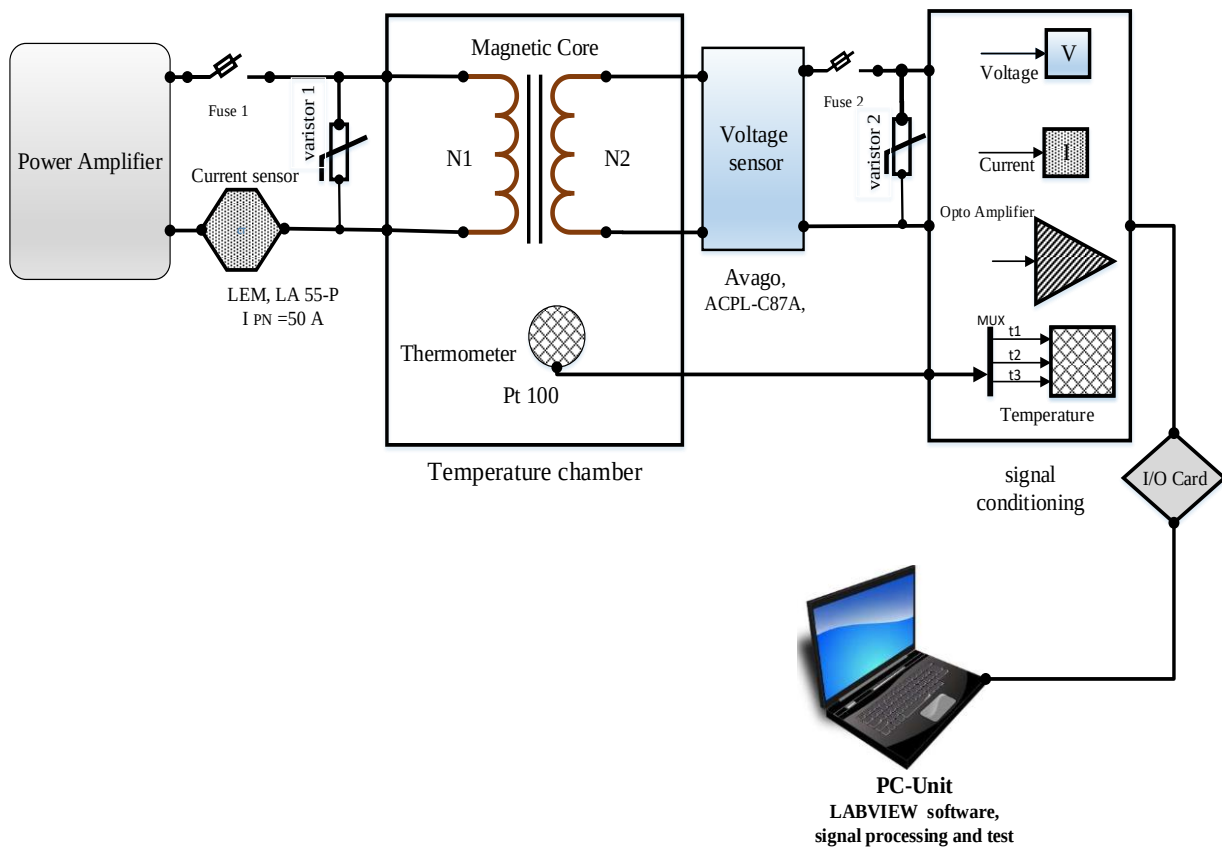
در این فصل، انواع ساختارهای موجود و روش‌های کلیدزنی برای طراحی تقویت کننده توان از مراجع مختلف مورد بررسی قرار گرفت و تأثیر افزایش فرکانس و کاهش شاخص مدولاسیون بر شاخص‌های THD، FF و CF از شکل موج ولتاژ خروجی در حالت‌های کلیدزنی مختلف و در ساختارهای متقارن و نامتقارن به طور مفصل ارائه شد. در نهایت با توجه به نتایج شبیه‌سازی اینورترهای متقارن و نامتقارن و الزامات پروژه، ساختار اینورتر چند سطحی نامتقارن با روش کلیدزنی PD-PWM به دلیل تولید ولتاژ خروجی با اعوجاج هارمونیک کل (THD) پائین انتخاب شد که این ساختار در طراحی و ساخت تقویت کننده توان مورد استفاده قرار خواهد گرفت. همچنین به منظور تعیین مقاومت درونی اینورتر ۲۱ سطحی بر اساس قضیه بیشینه توان عبوری از بار، با و بدون وجود اندوکتانس ۰/۰۳۱ mH، منحنی تغییرات توان عبوری از بار بر حسب تغییر امپدانس بار اینورتر ۲۱ سطحی بر اساس قضیه انتقال توان بیشینه و نتایج شبیه‌سازی استخراج شد.

فصل هفتم: طراحی مفهومی دستگاه B-H متر و جمع بندی

۱-۷- مقدمه

با توجه به این که در فصل‌های قبل، اصول عملکرد دستگاه B-H متر، سوابق بین‌المللی طراحی و ساخت آن توسط شرکت‌های مختلف و استانداردهای موجود در زمینه طراحی دستگاه، محاسبات مربوط به طراحی این دستگاه به همراه شبیه‌سازی‌های آن مورد بررسی قرار گرفتند، در این فصل، طراحی مفهومی دستگاه B-H متر مورد نظر این پروژه نمایش و مشخصات هر یک از قسمت‌های آن شرح داده می‌شود. اجزای اصلی تشکیل‌دهنده دستگاه B-H متر طراحی شده در این پروژه شامل تقویت‌کننده توان، سنسور جریان، سنسور ولتاژ، هسته مغناطیسی و ترانسفورماتور با سیم‌پیچ اولیه N_1 و سیم‌پیچ ثانویه N_2 ، محفظه حرارتی به منظور ایجاد تغییرات دمایی و متناسب با آن مشاهده نوسانات توان، پردازش سیگنال^۱، رابط کارت I/O و کارت I/O است. شکل ۱-۷ پیکربندی طراحی مفهومی دستگاه B-H متر مورد نظر این پروژه را نشان می‌دهد.

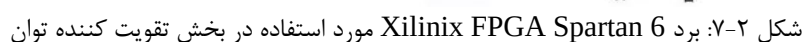
از آنجایی که ولتاژ نامی این دستگاه ۲۴۰ V بوده و توان نامی آن ۷ الی ۱۰ کیلو وات است، جریان نامی $A \pm 30$ از آن عبور کرده و رنج فرکانسی این دستگاه بین ۱۰۰ kHz - ۱۰ Hz متغیر است. با توجه به محدوده پارامترهای نامی دستگاه مورد نظر، در ادامه هر یک از قطعات به کار رفته در طراحی دستگاه B-H متر شرح داده می‌شود.



شکل ۷-۱: طراحی مفهومی دستگاه B-H متر

۷-۱-۱ واحد تقویت کننده توان^۱

تقویت کننده توان یک دستگاه الکترونیکی است که می‌تواند قدرت سیگنال (ولتاژ یا جریان متغیر با زمان) را افزایش دهد. این قسمت به طور کامل در فصل قبل مورد بررسی قرار گرفت. در واحد پردازنده این قسمت برد Xilinx FPGA Spartan 6 که در شکل ۷-۲ نشان داده شده است، مورد استفاده قرار گرفته است.



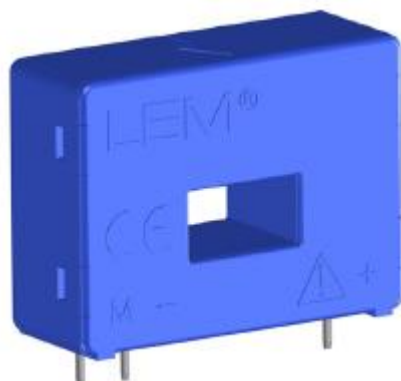
- بهره‌گیری از چیپ Xilinx Spartan-6 LX9 FPGA

- دارای حافظه SDRAM 128 Mbit
- دارای حافظه SPI Flash 128 Mbit
- دارای چیپ مبدل PL2303 USB Serial Chip
- دارای رابط (65536 Colors) JTAG Download/Debug Interface
- دارای چهار User Push Buttons
- دراری نمایشگر سون سگمنت 4Digit
- دارای EEPROM24LC04
- درارای پنچ User LEDs
- دارای اسیلاتور ۵۰Mhz
- دارای باز Buzzer

- دارای رگولاتورهای 1.2 V و 2.5 V، 3.3 V
- دارای پین هدر ۲۶ تایی برای ورودی/خروجی
- تأمین تغذیه از پورت USB
- کابل USB
- فرستنده مادون قرمز
- پروگرامر FPGA برای کار با برد

۷-۱-۲ سنسور جریان

به منظور انتخاب سنسور جریان مورد استفاده در این پروژه، سنسورهای مختلفی از شرکت‌های LEM، ChenYang، Mors Smitt، ABB، Honeywell و Avago مورد بررسی قرار گرفتند که با توجه به محدوده فرکانسی (۱۰ Hz – ۱۰۰ kHz) و مقادیر نامی مورد نظر این پروژه، سنسور مبدل جریان شرکت LEM مدل LA 55-P انتخاب و مورد استفاده قرار گرفت. این سنسور در شکل ۷-۳ و مشخصه‌های مربوط به آن در جدول ۷-۱ نمایش داده شده است.



شکل ۷-۳: سنسور LA 55-P شرکت LEM

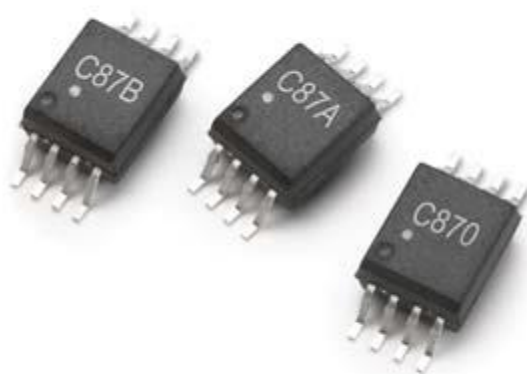
جدول ۷-۱: مشخصه‌های سنسور LA55-P شرکت LEM

پارامتر	عنوان	مقدار	واحد
I_{PN}	جریان rms نامی اولیه	۵۰	A
I_{PM}	جریان اندازه‌گیری نامی اولیه	۷۰ ۰	A
I_{SN}	جریان rms نامی ثانویه	۵۰	mA
K_N	نسبت تبدیل	۱:۱۰۰۰	---
U_c	ولتاژ تغذیه ($\pm 5\%$)	12 ± 15	V
I_c	جریان مصرفی ($\pm 15 V$)	۱۰	mA
X	دقت ($\pm 15 V$)	± 0.65	%
BW	پهنای باند (dB)	DC...۲۰۰	kHz
T_A	محدوده دمای عملکرد	-۴۰ +۸۵	$^{\circ}C$

۷-۱-۳ سنسور ولتاژ

به منظور انتخاب سنسور ولتاژ مورد استفاده در این پروژه، سنسورهای مختلفی از شرکت‌های ABB, Honeywell, ChenYang, LEM, Mors Smitt و Avago مورد بررسی قرار گرفتند که با توجه به محدوده فرکانسی (۱۰ Hz - ۱۰۰ kHz) و مقادیر نامی مورد نظر این پروژه، سنسور مبدل ولتاژ شرکت Avago مدل ACPL-C87X انتخاب و مورد استفاده قرار گرفت. هر چند که محدوده ولتاژ نامی ورودی این سنسور نسبت به خروجی ترانسفورماتور بسیار پایین است ولی با روش تقسیم مقاومتی می‌توان ولتاژی در محدوده نامی سنسور مورد نظر در خروجی ترانسفورماتور ایجاد نمود. این سنسور در شکل ۷-۴ و مشخصه‌های مربوط به آن در

جدول ۷-۲ نمایش داده شده است.



شکل ۷-۴: سنسور ولتاژ ACPL-C87X شرکت Avago

جدول ۷-۲: مشخصه‌های سنسور ولتاژ ACPL-C87X شرکت Avago

پارامتر	عنوان	مقدار	واحد
Z_{in}	امپدانس ورودی	۱	$G\Omega$
V_{in}	ولتاژ ورودی نامی	۰.....۲	V
Drift	بهره راندگی	-۳۵	ppm/ $^{\circ}C$
Offset Voltage Drift	ولتاژ راندگی آفست	۲۱	$\mu V/^{\circ}C$
Non-Linearity Max	غیر خطی بیشینه	۰/۱	%
I_c	جریان مصرفی ($\pm 15 V$)	۱۰	mA
X	دقت ($\pm 15 V$)	± 0.65	%
BW	پهنای باند	۱۰۰	kHz
T_A	محدوده دمایی عملکرد	-۴۰ +۱۰۵	$^{\circ}C$

۷-۱-۴ وریستور^۱

وریستور یا وریستور اکسید فلزی (MOV^2) مقاومت خاصی است که برای محافظت از مدار در برابر ولتاژهای گذرای بالا (کوتاه مدت) استفاده می‌شود. این امواج و گذراها توسط خطوط برق به تجهیزات ضربه زده و منبع تغذیه تجهیزات را از بین می‌برند. وریستور قادر به کوتاه کردن این امواج و گذراها است و مانع از آسیب رسیدن به تجهیزات می‌شود. وریستور به سادگی بین خط و خنثی ولی بعد از فیوز متصل می‌شود. اگر در وریستورها اتصال کوتاهی صورت پذیرد، فیوز ضربه خورده و سیستم را از منبع تغذیه جدا می‌کند. در این پروژه از دو وریستور، یکی در اولیه و قبل از ترانس و دیگری در ثانویه و بعد از سنسور ولتاژ استفاده شده است.

۷-۱-۵ مدارات آماده ساز^۳ سیگنال

سیگنال‌های آنالوگ قبل از اینکه به سیگنال‌های دیجیتال تبدیل شوند، نیاز به نوعی آماده‌سازی دارند. این بخش وظیفه آماده‌سازی سیگنال را بر عهده دارد به طوری که آن را برای مرحله بعدی پردازش مهیا می‌کند. بسیاری از کاربردها مستلزم اندازه‌گیری‌های محیطی یا ساختاری مانند دما و ارتعاشات توسط سنسورها هستند. این سنسورها، نیاز به آماده‌سازی سیگنال قبل از واحد جمع‌آوری داده‌ها دارند تا سیگنال را به طور مؤثر و دقیق اندازه‌گیری کند. به عنوان مثال، سیگنال‌های ترموکوپل دارای سطوح ولتاژ بسیار کوچک هستند و قبل از اینکه بتوان آنها را دیجیتالی کرد، باید تقویت شوند. سنسورهای دیگر، مانند آشکارسازهای دمای مقاومت، ترمیستورها، سنسورهای فشار و شتاب‌سنج، نیاز به تحریک برای کار دارند. تمام این فرایندهای آماده‌سازی، توسط مدارات آماده‌ساز سیگنال (کارت I/O) صورت می‌پذیرد. در این پروژه نیز از تهویه سیگنال به منظور آماده‌سازی و تقویت اندازه‌گیری‌های دما، ولتاژ و جریان جهت ارائه به کارت I/O استفاده شده است.

۷-۱-۶ واحد نرم‌افزاری کنترل (PC)

سیگنال‌های آماده‌سازی شده توسط کارت I/O به واحد نرم‌افزاری کنترل (PC) ارسال می‌شود و بر اساس ابزار محاسباتی نرم افزار LABVIEW، کلیه بخش‌های پردازش سیگنال و تنظیمات تست توسط این بخش نرم‌افزاری صورت می‌پذیرد. به طور کلی قطعات مورد استفاده در ساخت دستگاه B-H متر در جدول ۷-۳ ارائه شده است.

جدول ۷-۳: قطعات اصلی مورد استفاده در ساخت دستگاه B-H متر

قطعه	مدل	قطعه	مدل
پردازنده	Spartan-6 FPGA	دیود Fast	1n4148
پاور ماسفت	IRF540NS	سلف ورودی	۵ mH
گیت درایور	HCPL-3120	خازن ورودی چاپر	۳۳۰۰ uF
ترانسفورماتور	۱۲/۲۲۰ V	رکتیفایر شانه‌ای	KBP210
خازن خروجی چاپر	-	سنسور ولتاژ	ACPL-C87X
سنسور جریان	LEM-LA55P	وریستور	-

۷-۲- کلیات مدارهای مغناطیسی

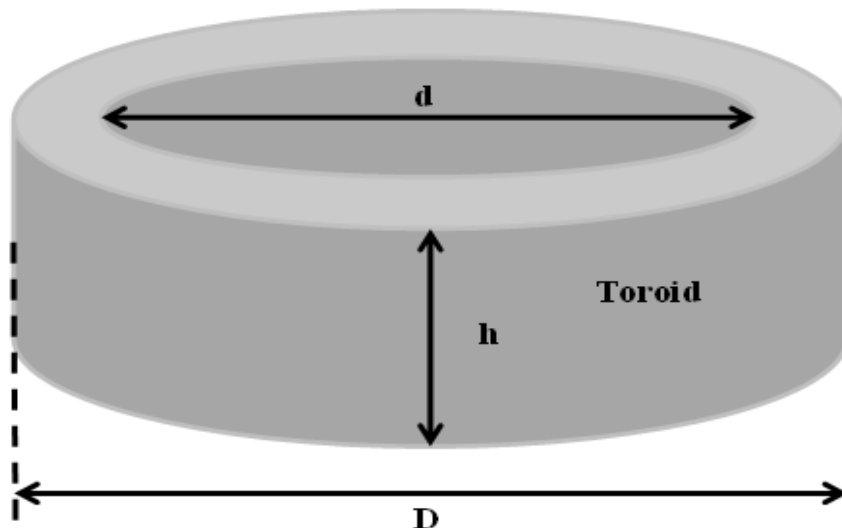
در این بخش، پارامترها، ابعاد استاندارد و خصوصیات اجزای تشکیل دهنده هر یک از مدارهای مغناطیسی مورد آزمایش در این پروژه به صورت خلاصه ارائه می‌شود. شکل ۷-۵ ابعاد ماده مغناطیسی تروئید با کد T300-26 را نشان می‌دهد. ابعاد این ماده

1- varistor

2 -metal oxide varistor

3 -signal conditioning cicuit

مغناطیسی در جدول ۷-۴ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که نسبت قطر درونی به قطر بیرونی در استاندارد IEC-60404-6 به صورت $1.4 < D/d < 1.25$ است.

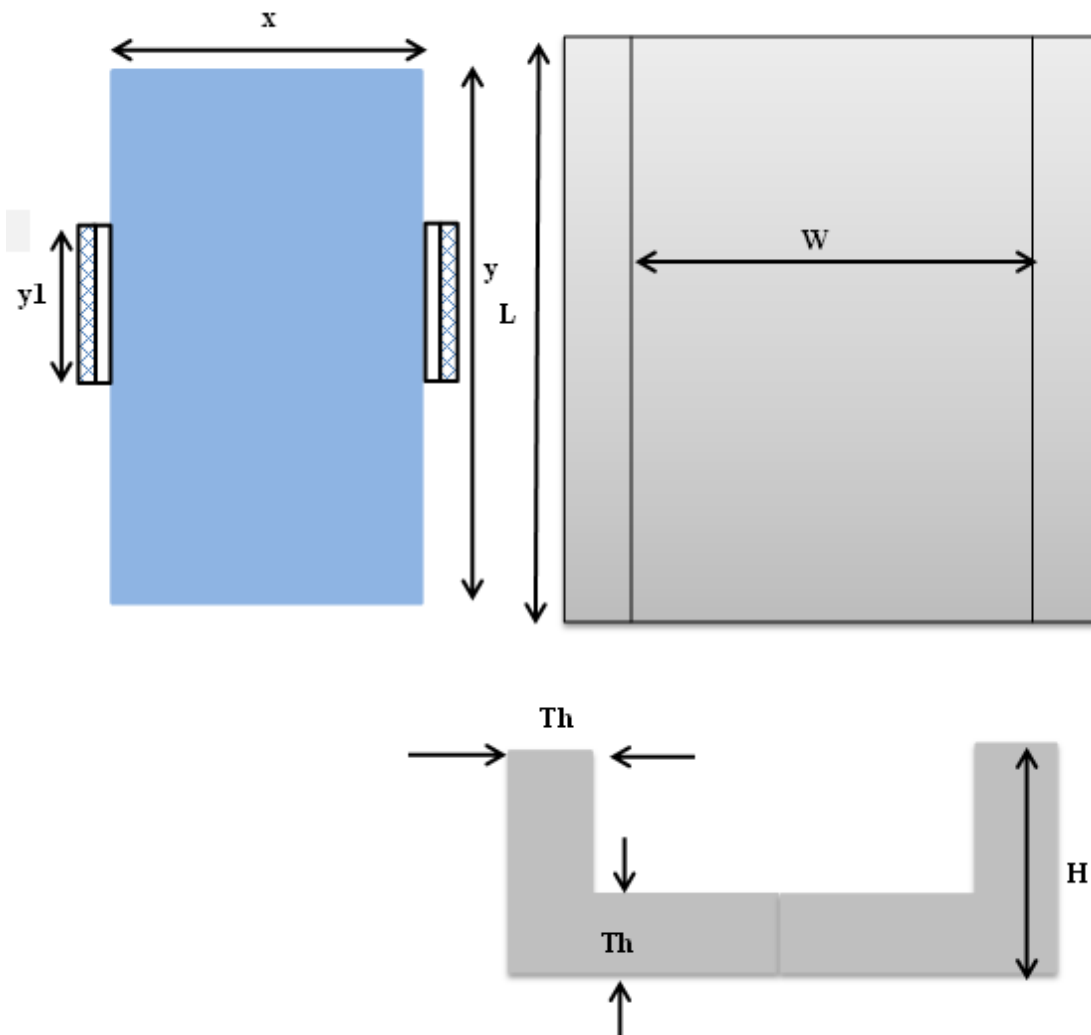


شکل ۷-۵: ماده مغناطیسی به شکل پودر یا تروئید

جدول ۷-۴: مشخصات ماده مغناطیسی مورد آزمایش برای تروئید

نوع هسته تروئید	قطر بیرونی (D)	قطر درونی (d)	ارتفاع (h)	چگالی جریان (g/cm ³)	نفوذپذیری مرجع (μ_r)	تلفات در واحد حجم (mW/cm ³)
T300-26	۷۷۲ mm	۴۹ mm	۱۲/۷ mm	۷	۷۵	۳۲

شکل ۷-۶ ابعاد ماده مغناطیسی ورق با کد M530-50A را نشان می‌دهد. ابعاد این ماده مغناطیسی در جدول ۷-۵ نشان داده شده است. پارامتر y_1 می‌تواند بر حسب تعداد سیم‌پیچی‌ها متغیر باشد.

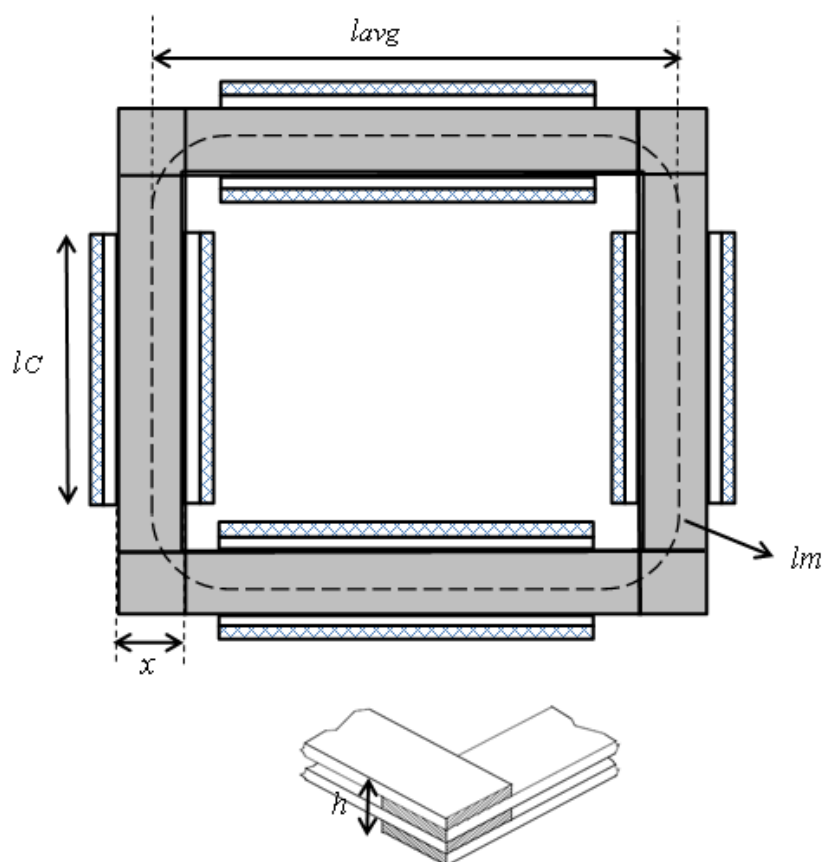


شکل ۶-۷: ماده مغناطیسی به شکل تک ورق به همراه یوغ

جدول ۵-۷: مشخصات ماده مغناطیسی مورد آزمایش برای تک ورق

جزء مدار	نوع ماده مغناطیسی	پارامتر	اندازه
ورق	M530-50A	y	۵۰۰ mm
		x	۴۰۰ mm
یوغ	M270-50A	W	۵۰۰ mm
		L	۵۰۰ mm
		Th	۲۵ mm
		H	۹۰ mm

شکل ۶-۷ ابعاد ماده مغناطیسی ورق با کد M530-50A را نشان می‌دهد. ابعاد این ماده مغناطیسی در جدول ۵-۷ نشان داده شده است. پارامتر y_1 می‌تواند بر حسب تعداد سیم‌پیچی‌ها متغیر باشد.



شکل ۷-۷: ماده مغناطیسی به شکل قاب اپستین

جدول ۷-۶: مشخصات ماده مغناطیسی مورد آزمایش برای قاب اپستین

اندازه	پارامتر	نوع ماده مغناطیسی	جزء مدار
۲۵۰ mm	l_{avg}	M530-50A	ورق
۱۹۰ mm	l_c		
۹۴۰ mm	l_m		
۳۰ mm	x		

۷-۳- جمع‌بندی

در این قسمت جمع‌بندی کلی از فصل‌های قبلی گزارش ارائه می‌شود.

در فصل اول، اصطلاحات الکترومغناطیسی، یکاهای اندازه‌گیری و رابطه بین آنها ارائه شد و در ادامه، مدارهای مغناطیسی و مدل مداری هسته مغناطیسی مورد مطالعه قرار گرفت و پس از آن روند مغناطیس‌شدگی در مواد فرومغناطیس با استفاده از نظریه ساختار حوزه توصیف شد. مغناطیس‌شدگی و نحوه تشکیل حلقه هیستریزیس در مواد فرومغناطیس مطالعه و ارائه شد و تأثیر عواملی همچون دما، فاصله هوایی، فرکانس و فشار مکانیکی روی حلقه هیستریزیس تحلیل و بررسی شد. دانش پیش‌زمینه در این فصل اطلاعات پایه‌ای برای مطالعه، شبیه‌سازی و ساخت مدارات مغناطیسی و سنسورها و انتخاب الگوریتم‌های محاسباتی در فصل‌های بعدی ایجاد نمود.

در فصل دوم، دستگاه B-H متر و اصول عملکرد آن معرفی شد و سوابق بین‌المللی طراحی و ساخت آن در ابعاد صنعتی و تجاری و مهم‌ترین استانداردها و مقالات موجود در زمینه طراحی دستگاه B-H متر مورد بررسی قرار گرفت.

در فصل سوم، اصول طراحی و ساخت مدارات مغناطیسی مربوط به دستگاه B-H متر بر اساس استانداردهای بین‌المللی موجود در زمینه اندازه‌گیری مشخصه‌های مواد مغناطیسی ارائه شد. در نهایت، کلیه پارامترهای لازم برای تعیین خواص مغناطیسی نمونه آزمایشی و پارامترهای مغناطیسی نمونه آزمایشی بر اساس این استانداردها و با طراحی الگوریتم‌های محاسباتی در قالب فایل اکسل پیاده‌سازی شد.

در فصل چهارم، نتایج شبیه‌سازی هر یک از ساختارهای ماده مغناطیسی به شکل پودر (تروئید)، اپستین و ورق با استفاده از نرم‌افزار متلب (Matlab) انجام شد. در نهایت، پس از شبیه‌سازی و تحلیل پاسخ هر یک از این ساختارها، مدارات مغناطیسی مربوطه و مدار تقویت‌کننده توان دستگاه B-H متر با انتخاب قطعات مناسب بر اساس شبیه‌سازی ساخته شد.

در فصل پنجم به شبیه‌سازی هر یک از ساختارهای مواد مغناطیسی با مدل‌سازی اجزاء محدود پرداخته شد. در توزیع و یکنواختی چگالی شار در سطح سه نمونه، هسته تروئید بدترین وضعیت را داشت به‌گونه‌ای که در نواحی نزدیک به مرکز تروئید شدت میدان اعمالی زیاد و در نتیجه چگالی شار نقطه کار بزرگ‌تر است و هر چه فاصله از مرکز بیشتر شود چگالی شار افت پیدا می‌کند که در نتیجه آن وجود یک توزیع کاملاً نامتقارن است. در دو مدل دیگر این غیریکنواختی توزیع کمتر شد، به‌گونه‌ای که در اپستین تنها در محل‌های اتصال دو ورق و در مدل تک ورق تنها در محل تلاقی یوغ‌ها و هسته غیریکنواختی به وجود می‌آید. نکته حائز اهمیت در وجود این غیریکنواختی تأثیر آن در به دست آوردن مشخصه B-H هسته است. به همین دلیل لازم است تا این اثر در نظر گرفته شود و به‌گونه‌ای در فرآیند به دست آوردن منحنی B-H لحاظ شود.

در مقایسه اندوکتانس‌های ناشی و مغناطیس‌کنندگی به‌دست‌آمده از روش تحلیلی و مقایسه آن با روش اجزا محدود مشخص شده است که روش تحلیلی قابلیت محاسبه دقیق این اندوکتانس‌ها را ندارد و دارای خطا است. چون در مراحل محاسباتی دستی یک سری فرض‌ها و ساده‌سازی‌هایی صورت گرفته است.

در فصل ششم، انواع ساختارهای موجود و روش‌های کلیدزنی برای طراحی تقویت‌کننده توان از مراجع مختلف مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت با توجه به نتایج شبیه‌سازی اینورترهای متقارن و نامتقارن و الزامات پروژه، ساختار اینورتر چند سطحی نامتقارن با روش کلیدزنی PD-PWM به دلیل تولید ولتاژ خروجی با اعوجاج هارمونیک کل (THD) پایین به عنوان ساختار برتر انتخاب شد که این ساختار در طراحی و ساخت تقویت‌کننده توان مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

در نهایت و در این فصل، با جمع‌بندی اطلاعات و استانداردهای موجود در زمینه ساخت دستگاه B-H متر، طراحی مفهومی دستگاه مورد نظر این پروژه انجام و دیاگرام آن رسم شد و قطعات مورد نیاز برای ساخت این دستگاه انتخاب و ارائه

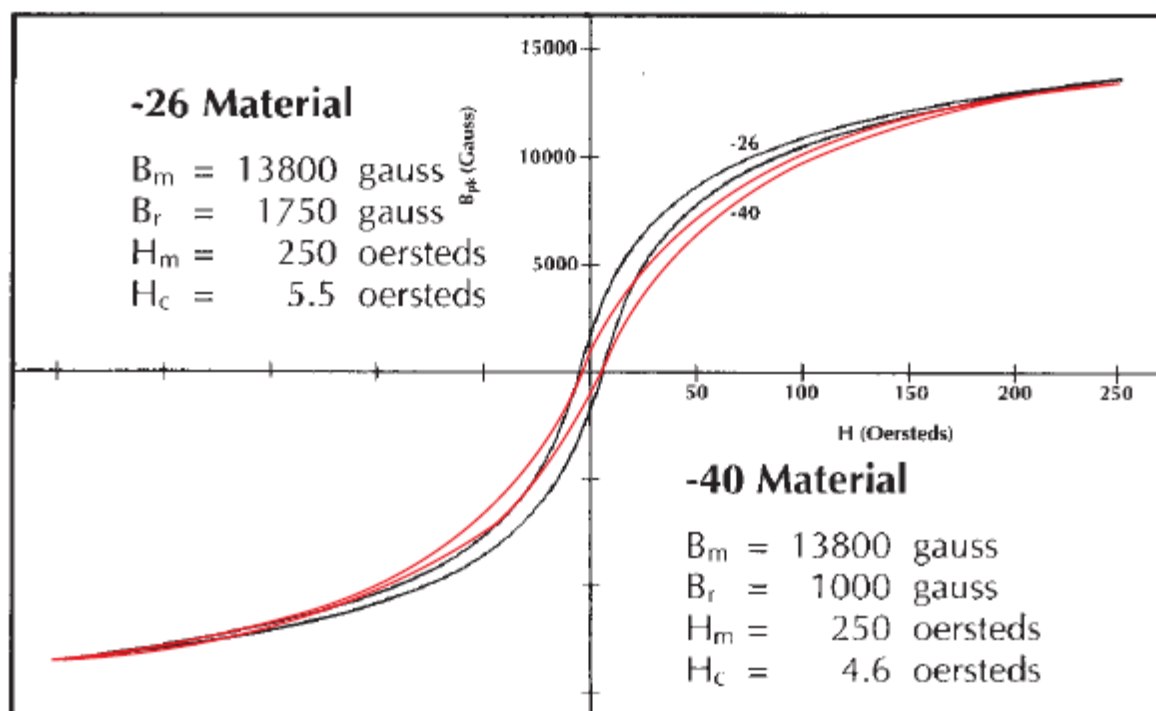
فصل هشتم: ساخت مدارات مغناطیسی دستگاه B-H متر

۸-۱-مقدمه

در این فصل با توجه به طراحی های انجام شده در فصول قبل روند ساخت سه مدل فریم مغناطیسی دستگاه B-H متر ارائه شده است. در گام نخست ساخت نمونه مغناطیسی برای تعیین مشخصه مغناطیسی پودر مغناطیسی بررسی می گردد. در مرحله دوم مراحل ساخت مدار مغناطیسی اِشتین ارائه می گردد. در پایان مراحل پیاده سازی مدار مغناطیسی برای تک ورق ارائه می گردد. لازم به ذکر است کلیه مشخصات ابعادی (ابعاد هندسی ، مواد مورد استفاده ، تعداد دور و...) بر اساس نتایج طراحی تفصیلی ارائه شده در گزارش مرحله اول (فصل اول تا هفتم) ، انجام گرفته است.

۸-۲-تهیه نمونه مورد آزمایش هسته تروئید

به منظور تعیین مشخصه B-H نمونه هسته تروئید ، هسته پودر آهن T300-26 موجود در بازار مورد استفاده قرار گرفته است. شکل ۸-۱ مشخصه B-H عمومی ماده ۲۶- را نمایش می دهد. مشخصات سیم پیچی اولیه و ثانویه محاسبه شده در مرحله اول پروژه، مطابق با استاندارد IEC-60404-6 محاسبه و در جدول ۸-۱ ارائه گردیده است.

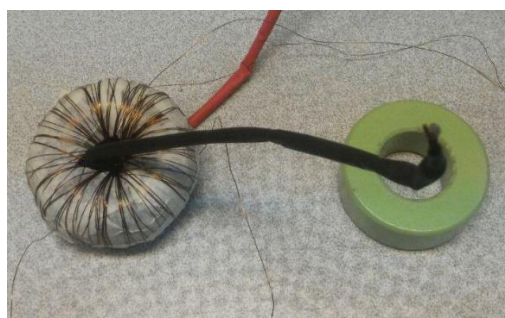


شکل ۸-۱- منحنی هیستریزیس نشان داده شده در کاتالوگ محصول

جدول ۸-۱- مشخصات هسته تروئید

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
قطر داخلی	۴۹ mm	تعداد دور اولیه	۲۱۲
قطر بیرونی	۷۹/۲ mm	تعداد دور ثانویه	۲۱۲
ضخامت	۱۲/۷ mm	فرکانس	۵۰ Hz
ولتاژ تغذیه	۳۱۷	قطر سیم پیچ	۲/۹ mm

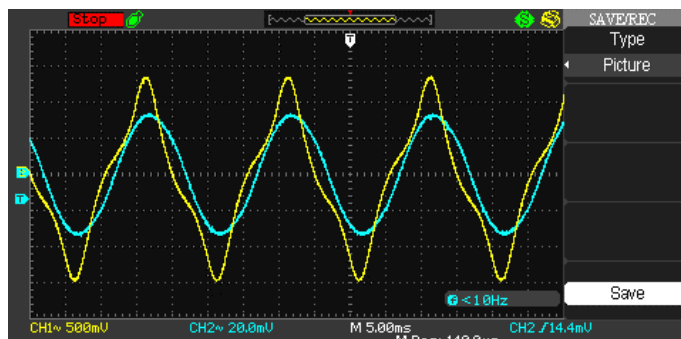
شکل ۱-۱ نمونه هسته تهیه شده در بازار قبل و پس از سیم پیچی را نمایش می دهد. به منظور اطمینان از صحت سیم بندی و بررسی ولتاژ، جریان و دمای سیم پیچها، پس از انجام سیم بندی اولیه و ثانویه، با اعمال یک یک ولتاژ ۵۰ هرتز از طریق اتوترانس و ثبت مقادیر جریان ورودی و ولتاژ القایی خروجی، مشخصه تقریبی B-H ماده مورد مطالعه اندازه گیری و بر روی صفحه اسکوپ استخراج گردیده است. لازم به ذکر است به منظور انتگرال گیری از ولتاژ ثانویه از یک مدار ساده RC استفاده شده است. شکل ۱-۳ مدار الکتریکی تست اولیه هسته سیم پیچی شده را نمایش می دهد.



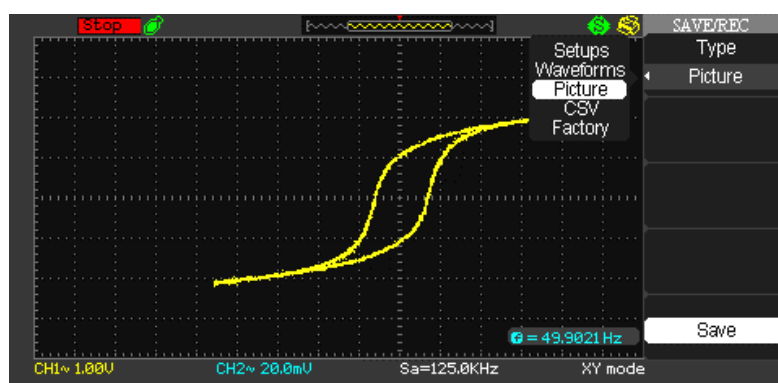
شکل ۸-۲- نحوه سیم پیچی اولیه و ثانویه هسته تروئید



شکل ۸-۳- مدار الکتریکی پیاده شده برای به دست آوردن حلقه B-H



الف



ب

شکل ۴-۸- شکل جریان اولیه و ولتاژ ثانویه (الف) مشخصه تقریبی B-H ماده T300-26 مورد آزمون (ب)

شکل های ۱-۴ الف و ب خروجی آزمون اولیه هسته تروئید تهیه شده را نمایش می دهد.

لازم به ذکر است نمونه تحت تست هسته تروئید در این پروژه از نمونه های تجاری موجود در بازار تهیه شده است. در صورتیکه نیاز به تست یک ماده بود آهن مجهول باشد، لازم است تا ابتدا مطابق با محاسبات ارائه شده در مرحله اول یک هسته تروئید قالب ریزی و پس از سیم پیچی جهت استخراج مشخصه مغناطیسی در دستگاه B-H متر استفاده گردد.

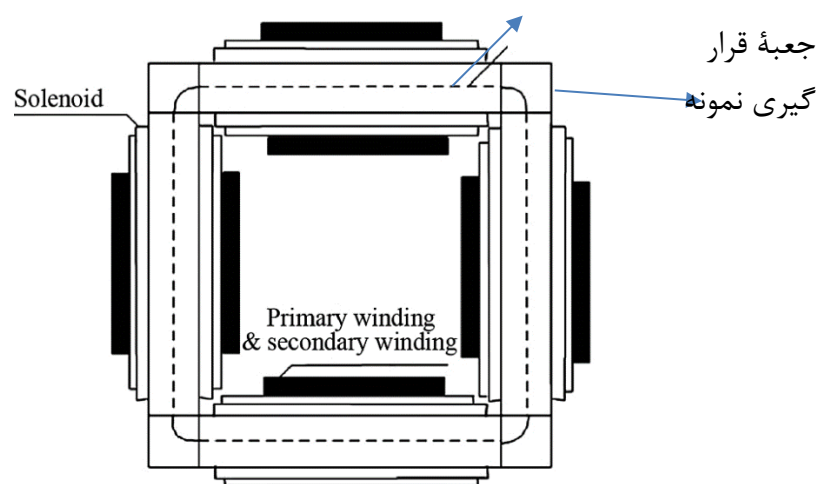
۳-۸- ساخت فریم اپشتین طبق استاندارد IEC-60404-6

خلاصه پارامترهای طراحی جهت ساخت فریم اپشتین طبق استاندارد در جدول (۸-۲) ارائه شده است. با توجه به پارامترهای ارائه شده روند ساخت این بخش از مدار مغناطیسی دستگاه در قسمتهای پیش رو ارائه شده است. شکل ۵-۸ ساختار کلی فریم اپشتین را نمایش می دهد.

جدول ۸-۲- مشخصات فریم اپشتین

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
طول ورق	۲۸۰ mm	ولتاژ تغذیه	۷۴۰
عرض ورق	۳۰ mm	تعداد دور اولیه و ثانویه	۷۰۰
ضخامت ورق	۵/۰ mm	فرکانس	۵۰ Hz

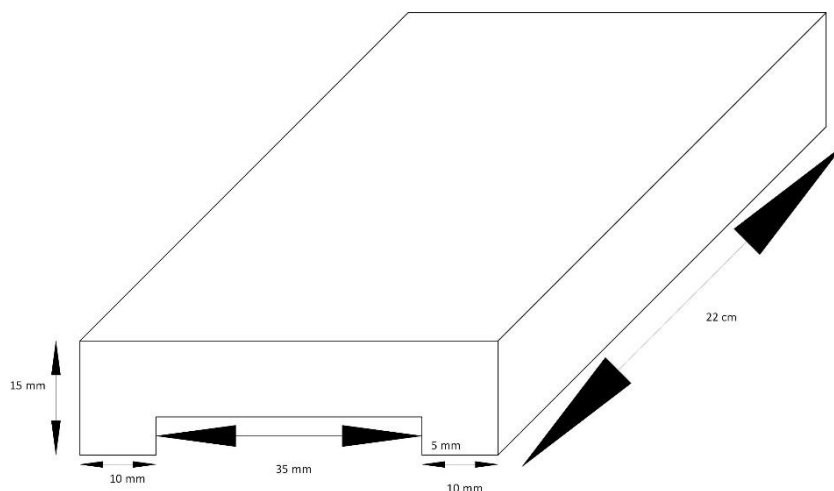
نمونه مورد تست



شکل ۸-۵- ساختار کلی فریم اپشتین

۸-۳-۱ یوغ فریم اپشتین وجعبه قرار گیری نمونه ها

به منظور نصب سیم پیچ های اولیه و ثانویه و جادهی نمونه ورق مورد آزمون نیاز به ساخت یک جعبه غیر مغناطیسی با ابعاد مناسب می باشد. برای ساخت جعبه قرارگیری نمونه ها از ورق تفلون دمای بالا استفاده شده است. علاوه بر غیر مغناطیسی بودن تفلون، فرم دهی و ماشین کاری آن نیز آسان می باشد. مطابق با شکل ۱-۶، با برش دادن ورق های به ضخامت ۳ میلی متر طبق نقشه ساخت، جعبه مورد نظر از طریق دو یوغ که رو به روی همدیگر قرار می گیرند ساخته می شود. برای اتصال دو یوغ به هم از چسب Bix که خواص حرارتی و چسبندگی مناسبی دارد استفاده شده است. در ادامه برای حفاظت تفلون ها در برابر حرارت مستقیم ایجاد شده توسط سیم پیچ ها از کاغذ عایقی از جنس برزنت استفاده شده است که ضمن دارا بودن خاصیت عایقی مناسب (تا دمای ۹۰ درجه سانتی گراد)، هیچ گونه اختلالی در مدار مغناطیسی ایجاد نمی کند. در مرحله آخر یک لایه دیگر از کاغذ عایقی پریشمال برای افزایش تحمل حرارتی جعبه های تفلونی دور جعبه ها پیچیده شده و توسط چسب برزنتی محکم می شود. شکل ۱-۷ جعبه مورد نیاز برای فریم اپشتین ساخته شده را نمایش می دهد.



شکل ۶-۸- نقشه ساخت هر کدام از یوغ های جعبه



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۷-۸ - نحوه ی اتصال دو یوغ به یکدیگر

۲-۳-۸ سیم پیچی جعبه ها

با توجه به اینکه فریم اِپشتین ممکن است در برخی از تستهای فرکانس بالا (مثلا ۴۰۰ هرتز) مورد استفاده قرار گیرد، به دلیل وجود اثر پوستی و افزایش تلفات در سیم پیچ ها از نظر حرارتی مشکل ساز می باشد. راهکار موثر به منظور کاهش اثر پوستی استفاده از سیم های لیتز می باشد. با این روش مساحت مفید و ظرفیت جریان دهی سیم حامل فرکانس بالا افزایش می یابد. به همین خاطر لازم است که از سیم های لاکه عایق دار با قطر کم استفاده کرده و با موازی کردن این سیم ها با یکدیگر سطح مقطع موثر و معادل سیم پیچ طراحی شده را به دست آورد. در این بخش با توجه به ملاحظات عملی طراحی سطح مقطع موثر در نظر گرفته شده برای سیم دو شماره بالاتر و سیم استاندارد AWG شماره ۱۱ می باشد که قطر آن برابر با $\frac{2}{3}$ میلی متر و سطح مقطع آن $\frac{4}{17}$ میلی متر مربع می باشد. سیم پیچ با قطر کم در نظر گرفته شده با توجه به فرکانس های کاری بالا، سیم مورد استفاده AWG شماره ۳۰ با قطر $\frac{0.25}{16}$ میلی متر می باشد. با توجه به سطح مقطع موثر این سیم نیاز به موازی کردن ۸۰ رشته از این سیم ها با یکدیگر می باشد. مطابق شکل ۸-۱ الف ابتدا با استفاده از امکانات محدود آزمایشگاهی، سیم لیتز ۸۰ رشته ایی از سیم مسی AWG30 تهیه گردید. در ادامه سیم پیچی روی یوغ های تفلنی مطابق با شکل ۸-۱ ب، ج و د انجام شده است.



(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۸-۸- لیتز کردن سیم با قطر ۰/۲۵ میلی متر و شارلاک گرفتن سیم پیچها روی یوغ های تفلنی

پس از سیم پیچی هر چهار ساق نیاز است تا برای استحکام مکانیکی سیم پیچ ها از شارلاک استفاده شود. لاک ، وارنیش ، رزین و لعاب که به صورت کلی در ایران بنام شارلاک شناخته میشوند به موادی گفته میشود که بمنظور دستیابی به اهداف زیر استفاده گردیده است:

- بهبود پیوند های مکانیکی بین ساختار سیم پیچ
- بهبود خواص دی الکتریک
- بهبود هدایت حرارتی
- بهبود حفاظت از سیم پیچ در برابر رطوبت و محیط شیمیایی خورنده

با قرار دادن شارلاک بر روی سیم پیچ ها و قرار دادن در یک محیط تمیز به مدت ۲۴ ساعت به منظور خشک شدن نهایی شارلاک، سیم پیچی اولیه به اتمام می رسد. سپس سیم پیچ ثانویه پیچیده شده و بر روی آن نیز از یک لایه نازک شارلاک استفاده می شود. برای محکم کردن یوغ ها به صفحه از پیچ های استیل غیر مغناطیسی استفاده شده است که هیچگونه خاصیت مغناطیسی نداشته و تاثیری بر روی دقت اندازه گیری منحنی B-H نهایی نخواهند داشت. در ادامه از هر ساق دو سیم پیچ اولیه و دو سیم پیچ

ثانویه در دسترس می باشند که با توجه به اینکه باید در یک جهت مشخص شار تولید کنند به شکل مناسب با استفاده از ترمینال های باکالیدی که تحمل حرارتی و جریانی بالایی را دارا می باشند، به صورت نشان داده شده در شکل ۱-۹، سری شده اند. در نهایت دو سیم پیچ مرتبط با اولیه و دو سیم پیچ مرتبط با ثانویه از دستگاه خارج خواهد شد. سیم پیچ اولیه به خروجی آمپلی فایر متصل می شود. سیم پیچ ثانویه جهت اتصال به سنسورهای اندازه گیری مورد استفاده قرار می گیرد.

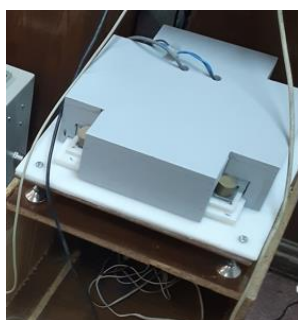
با قرارگیری نمونه های و روق مغناطیسی درون یوغ ها، از وزنه های برنجی نگیر که هیچگونه خاصیت مغناطیسی ندارند برای قرارگیری بر روی نمونه ها به منظور کاهش فاصله هوایی بین و روق های مورد آزمون و افزایش ضریب فشردگی استفاده شده است. وجود فاصله هوایی بین ورقهای مغناطیسی می تواند بر نتایج تست تاثیر گذار باشد. علاوه بر این ارتعاشات بوجود آمده در حین انجام تست نیز می تواند موجب مدولاسیون این ارتعاشات بر روی جریان و شار مدار و تاثیر بر روی نتایج تست گردد.



ب



الف



د



ج

شکل ۹-۸- نحوه قرارگیری سیم پیچ ها در دستگاه اپشتین، (ب) مدل اولیه قاب اپشتین

۳-۸- ساخت فریم مدار مغناطیسی تک ورق^۱

با توجه به محدودیت مراجع و استانداردهای معتبر در زمینه طراحی و ساخت این نوع از فریم، در این پروژه بر اساس الگوهای ارائه شده در مراجع یک نمونه از این ساختار پیاده سازی می گردد. در سال های اخیر نیز محققین سعی در ارائه مدل های جایگزین برای فریم تک ورق داشته اند که دلایل اصلی آن ها به شرح زیر می باشد:

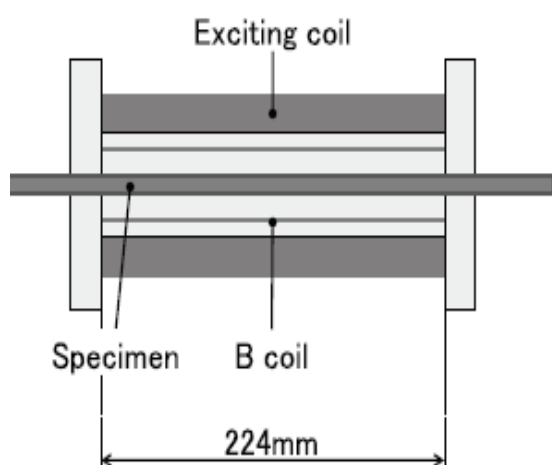
¹ Single sheet

به دست آوردن مشخصات مغناطیسی Lamination های استاتور

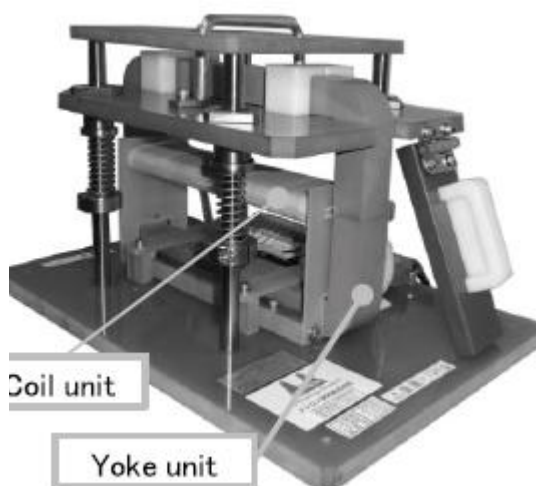
به دست آوردن مشخصات نمونه های کوچک جدید کامپوزیت های مغناطیسی نرم

بررسی تاثیر Laser Cutting یا Punching بر روی مشخصات مواد

برخی از ساختارهای موجود در شکل ۱-۱۰ آورده شده است.



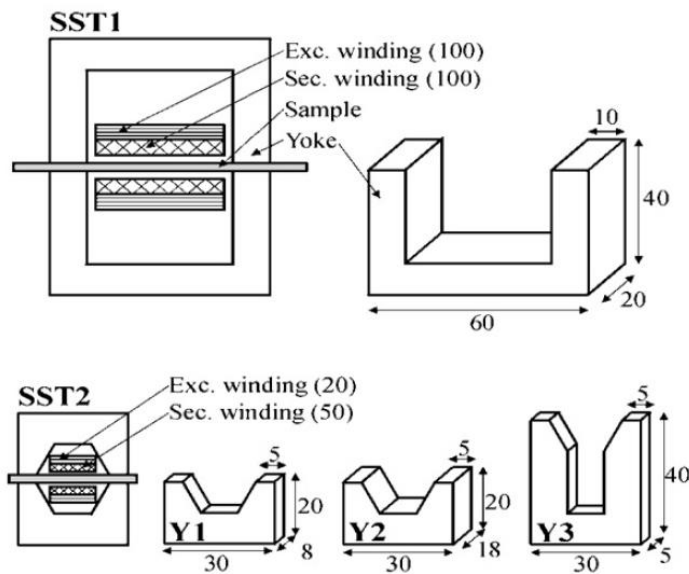
(ب)



(الف)

شکل ۱۰-۸- (الف) نمایی از مدل IEC در ابعاد کوچک تر، (ب) ساختار سیم پیچی

یک نمونه از فریم SST بر اساس استاندارد IEC البته در ابعاد کوچک تر به شرح زیر ارائه شده است که در این ساختار سیم پیچ تحریک با قطر ۱ میلی متر به صورت ۵ لایه موازی با هم و ۲۰۶ دور سیم پیچی شده است. فولاد الکتریکی جهت دار با پرماییته بالا و تلفات توان مغناطیسی پایین به عنوان یوغ استفاده شده است. ابعاد این ساختار به صورت عرضی برابر با ۳۰ میلی متر، طول خارجی بین قطب ها برابر با ۲۳۰ میلی متر و قطر خارجی ۲۸۰ میلی متر است. Error! Reference source not found. (ب) س اختار سیم پیچی را نشان می دهد. کوئل B با سیمی به قطر ۰/۵ میلی متر و طول ۲۲۴ میلی متر و با تعداد دور ۴۱۶ سیم پیچی شده است.

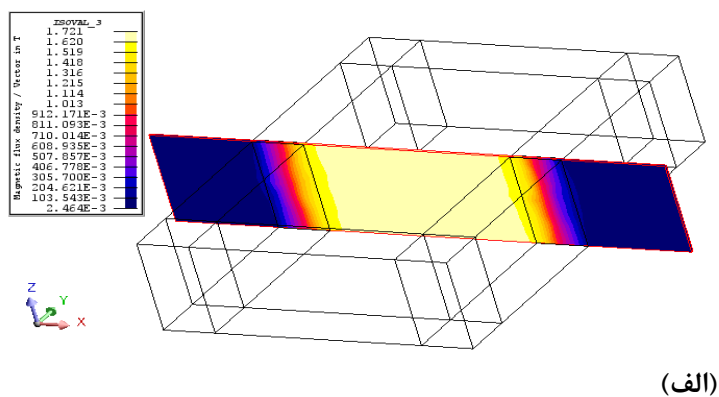


شکل ۱۱-۸- دو مدل SST1 و SST2 ارائه شده در ابعاد کوچک

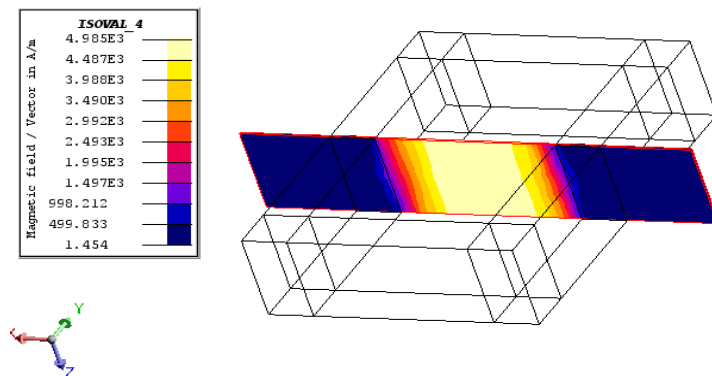
با توجه به منابع موجود و بررسی نتایج مختلف ارائه شده در مقالات و مرجع‌ها نمونه‌ای با یوغ‌های در ابعاد طول ۶ سانتی‌متر و عرض ۴ سانتی‌متر برای ساخت در نظر گرفته شده است.

۱-۳-۳-۸- اعتبارسنجی مدل مورد نظر با استفاده از نرم‌افزار اجزا محدود

قبل از ساخت مدل ارائه شده لازم است ابتدا برای اطمینان از دقت طراحی و اینکه مدل ارائه شده دقت مناسب در اندازه‌گیری منحنی B-H را داراست، لازم است که ابتدا مدل اجزا محدود سه بعدی این فریم پیاده‌سازی شده تا قابلیت این فریم اعتبارسنجی شود. در **Error! Reference source not found.** توزیع چگالی شار و شدت میدان مغناطیسی بر روی ورق فولاد نشان داده شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۱۲-۸- (الف) توزیع چگالی شار مغناطیسی (ب) توزیع شدت میدان مغناطیسی

۲-۳-۸- ساخت و برش ورق‌های مغناطیسی یوغ‌ها:

پس از نهایی کردن طراحی فریم SST، مشخصات هندسی فریم مطابق جدول ۸-۳ ارائه می‌گردد. با توجه به الزامات طراحی ارائه شده در استاندارد یوغ‌های SST باید از مواد مغناطیسی با تلفات بسیار پایین (کمتر از ۱ وات بر کیلوگرم در چگالی شار ۱/۵ تسلا) ساخته شود.

جدول ۸-۳- مشخصات طراحی SST کوچک

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
ضخامت هر یوغ	۱۰ mm	ضخامت ورق	۱ mm
ارتفاع هر یوغ	۴۰ mm	طول ورق	۸۰ mm
عرض یوغ	۲۰ mm	عرض ورق	۲۰ mm
طول یوغ	۶۰ mm	فرکانس	۵۰ Hz
ولتاژ تغذیه	۷۵۸ V	تعداد دور اولیه و ثانویه	۱۰۰

ضخامت ورق به کار رفته یک دهم میلی‌متر می‌باشد که به طور بخصوص و ویژه برای کاربردهای فرکانس بالا ساخته شده است. از این رو تلفات این ورق بسیار کم بوده و تاثیر بسیار پایینی بر روی مشخصه B-H به دست آمده خواهد گذاشت. ورق‌های ابتدائی در **Error! Reference source not found.** شکل ۸-۱۳ نشان داده شده‌اند. با توجه به اینکه دسترسی به ورق فرکانس بالا با محدودیتهایی روبرو هست، در این پروژه از اضافه‌های وایرکات شده و ورق‌های مورد استفاده در پروژه میکروتوربی دور بالا در پژوهشگاه نیرو استفاده شده است. در ادامه برای برش دادن این ورق‌ها و به دست آوردن شکل هندسی مورد نظر از روش وایرکات استفاده شده است که در بین روش‌های موجود برش فلزات (واترجت، لیزرکات، وایرکات و ...) از بالاترین دقت برخوردار است. برای به دست آوردن نقشه مهندسی برش این ورق‌ها، ابتدا مدل اجزا محدود این ورق در محیط نرم افزار Flux پیاده شده و سپس داده‌های هندسی خروجی این نرم افزار از طریق نرم افزار مبدل فایل‌های Flux به AutoCAD به فرمت DWG که فرمت برش دستگاه‌های وایرکات است تبدیل شده است. شکل ۱-۱۴ نقشه برش جهت وایرکات را نمایش می‌دهد.

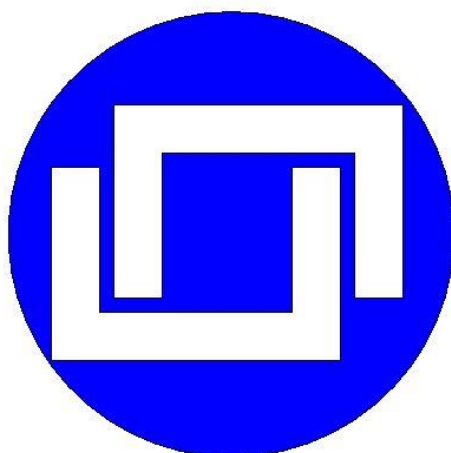
وایرکات ماشینی است که در پروسه‌های تولید قطعات فلزی استفاده می‌شود. این دستگاه در دسته بندی فرآیندهای تولید E.D.M قرار می‌گیرد (تخلیه الکتریکی). اساس کار ماشین‌های وایرکات تخلیه الکتریکی می‌باشد که با عبور جریان الکتریکی از سیم و

تماس آن با قطعه کار باعث ایجاد گرما شده که این گرما قطعه مورد نظر را ماشین کاری خواهد کرد. در وایرکات برای اینکه براده ها و گرمای ناشی از ایجاد قوس کنترل شود از یک مایع دی الکتریک استفاده می شود که هم باعث جلوگیری از گرمای بسیار زیاد می شود و هم براده هایی را که در اثر ماشین کاری به وجود آمده ته نشین می کند. این مایع دی الکتریک در وایرکات ها معمولاً آب مقطر است چرا که در حد زیادی باعث ایجاد بهترین حالت قوس بین سیم و قطعه کار می شود. در دستگاه های مذکور سیستم تصفیه ای قرار دارد که این مایع را در جریان ماشین کاری تصفیه می کند و برای تصفیه آن از یک سری فیلترهایی کمک می گیرد این اجزا در یک تابع زمانی و کاری مشخص تعویض می شوند و یا در صورت استفاده مجدد پاکسازی می شوند. همچنین خود مایع دی الکتریک نیز مانند سیستم تصفیه در بازه زمانی و شرایطی مشخص تعویض می شود.

کیفیت سطح ایجاد شده توسط این نوع ماشین ها بسیار بالا و در حد مطلوب قرار دارد که این کیفیت متناسب با نوع و شرایط کار قابل کنترل می باشد. کیفیت سطح ایجاد شده با سرعت برشی رابطه معکوس دارد، زیرا هرچه سرعت برشی بالاتر رود کیفیت سطح ایجاد شده کمتر می شود، سرعت برشی بیشتر کیفیت سطح کمتر.

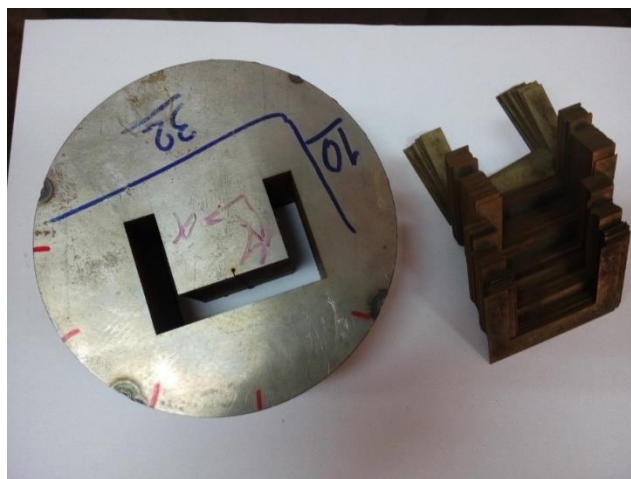


شکل ۱۳-۸- نمونه ورق های فرکانس بالای ابتدائی موجود



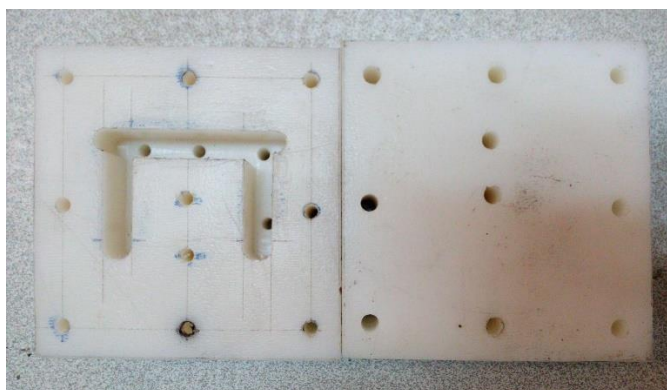
شکل ۱۴-۸- نقشه برش ورق های فرکانس بالا

برای برش دادن ورق‌های با ضخامت ۰/۱ میلی‌متر با استفاده از وایرکات ابتدا حدوداً ۴۲۰ ورق فولاد به ضخامت ۰/۱ میلی‌متر بر روی هم قرار گرفته و با قرار دادن ورق فولاد با ضخامت ۱ میلی‌متر در بالا و پایین آن‌ها، این نمونه‌ها را با جوش دادن به یکدیگر متصل کرده و سازه اولیه برای وایرکات آماده می‌شود. سپس این سازه در درون دستگاه وایرکات قرار گرفته و دستگاه اقدام به برش ورق‌های فولاد در ابعاد و اندازه‌های خواسته شده می‌نماید. از تیغ با ضخامت ۰/۲۵ میلی‌متر برای برش ورق‌ها استفاده شده است. نمای نهایی ورق‌های برش داده شده در ۱-۱۵ نشان داده شده است.

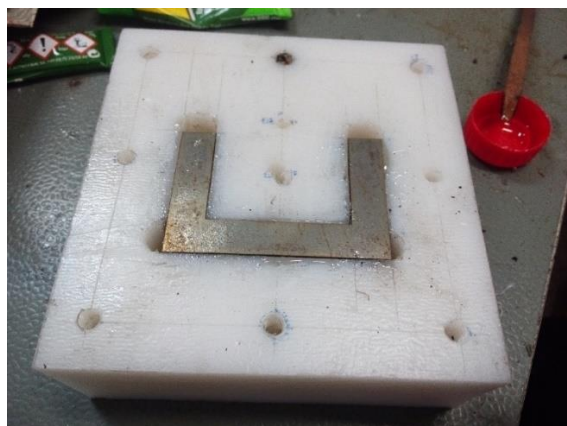


شکل ۱۵-۸- نمونه برش داده شده برای چسباندن ورق‌های فولاد

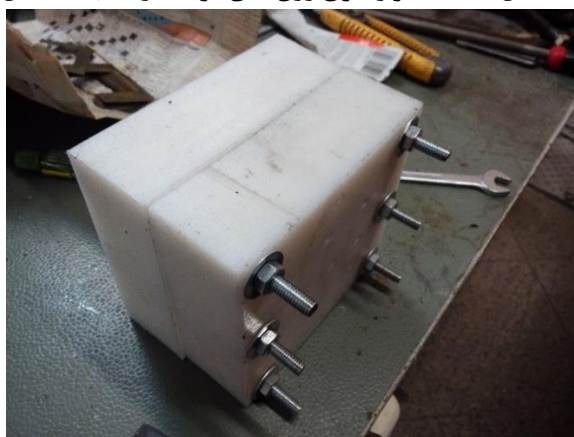
در گام بعدی لازم است تا این ورق‌های فولاد برش داده شده در کنار یکدیگر قرار گرفته و یوغ‌هایی با ضخامت ۲ سانتی‌متر ایجاد نمایند که با صرف نظر کردن از ضریب فشردگی نیاز به ۲۰۰ ورق برای هر یوغ می‌باشد. بدین منظور برای چسباندن این ۲۰۰ ورق به یکدیگر ابتدا با استفاده از ورق‌های تفلون به ضخامت ۴ سانتی‌متر یک قاب برای قرارگیری نمونه‌ها مطابق با **Error! Reference source not found.** های ۱-۱۶ و ۱-۱۷ برش داده می‌شود. در ادامه با قراردادن نمونه‌ها در درون قاب طراحی شده در میان هر لایه ورق فولاد یک لایه نازک از چسب مخصوص اتصال ورق‌های مغناطیسی Oho قرار می‌گیرد. در ادامه بعد از به دست آمدن ضخامت مطلوب ۲ سانتی‌متر دوبخش جعبه مطابق با شکل ۱-۱۸ بر روی یکدیگر قرار گرفته و برای تکمیل فرآیند متصل شدن به یکدیگر، همانگونه که در شکل ۱-۱۹ نشان داده شده است، در درون کوره با دمای ۸۰ درجه و به مدت ۹۰ دقیقه قرار می‌گیرند تا فرآیند نهایی چسباندن ورق‌ها به یکدیگر و ایجاد یوغ‌ها انجام شود.



شکل ۱۶-۸- نمونه برش داده شده برای چسباندن ورق‌های فولاد



شکل ۱۷-۸- قرارگیری ورق‌های فولاد در قالب U شکل



شکل ۱۸-۸- : قاب نهایی برای قرارگرفتن در کوره



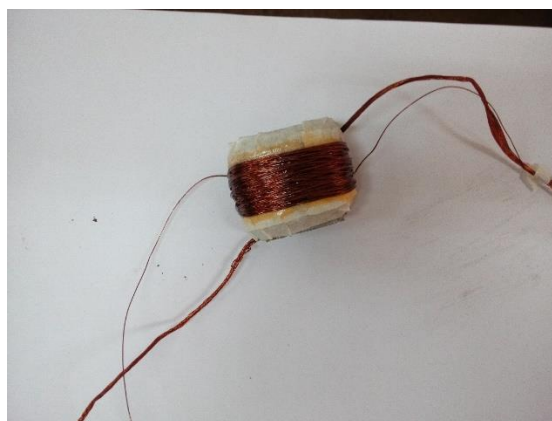
شکل ۱۹-۸- قراردادن قاب در کوره با دمای ۸۰ درجه سانتی گراد

۳-۳-۸- ساخت یوغ و محل قرارگیری نمونه‌ها و سیم پیچی آن

برای قرارگیری نمونه ورق فولاد در بین دو یوغ نیاز است تا با استفاده از تفلون یک محفظه برای آن طراحی شود و سپس سیم پیچ‌های اولیه و ثانویه با تعداد دور ۱۰۰ مشابه بر روی آن پیچیده شوند. سیم پیچی مدار تحریک (سیم پیچ اولیه) و سیم پیچ ثانویه مشابه با سیم پیچی فریم‌پشتین می‌باشد. در اینجا نیز برای بخش سیم پیچ اولیه از سیم لیتز استفاده شده است. در پایان با استفاده از شارلاک سیم پیچ اولیه و ثانویه مطابق شکل ۱-۲۰ تهیه می‌گردد.



(ب)

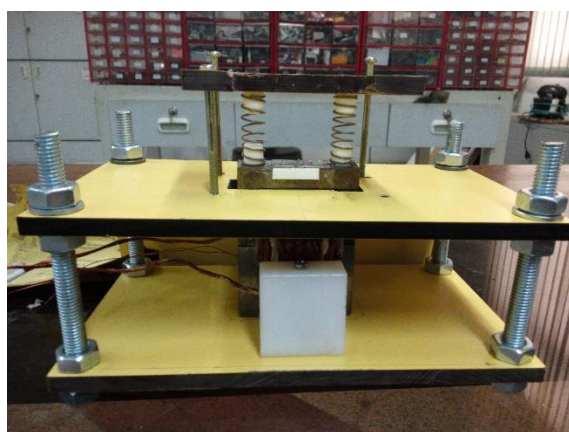


(الف)

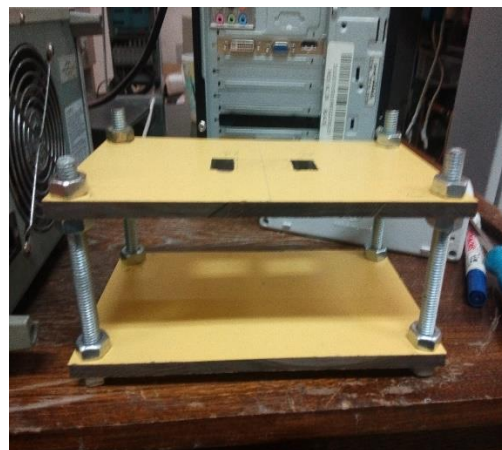
شکل ۲۰-۸- جعبه قرارگیری نمونه و سیم پیچی آن (الف) نمای جانبی (ب) نمای بالا

۴-۳-۸- ساخت سازه نگهدارنده فریم تک ورق

برای ساخت سازه نگهدارنده فریم تک ورق همانگونه که در شکل‌های ۱-۲۱ الف تا د نشان داده شده است، در ابتدا یوغ پایینی با استفاده از یک نمونه تراش خورده تفلون به کف کار چسبانده می‌شوند. در ادامه از این نمونه تفلون برای قراردادن سیم پیچ بر روی آن استفاده می‌شود. سپس برای قراردادن یوغ بالایی بر روی قطعه بالایی فیبر استخوانی قرار گرفته و برای تغییر وضعیت آن و قرار دادن نمونه فولاد از ساختاری فنری شکل برای به حداقل رساندن میزان فاصله بین یوغ و نمونه فولاد استفاده می‌شود. برای سیم پیچ‌های اولیه و ثانویه نیز، ابتدا بر روی سیم پیچ اولیه وارنیش حرارتی قرار داده و سپس آن را به یک کانکتور نظامی که توانایی تحمل جریانی و حرارتی بالایی دارد متصل می‌شود. برای سیم پیچ ثانویه با توجه به اهمیت اندازه‌گیری بالا و جلوگیری از ورود نویز به دستگاه اندازه‌گیری از کانکتورهای BNC استفاده شده است. ساختار نهایی کار در شکل ۱-۲۱ د نشان داده شده است.



(ب)



(الف)



(د)

(ج)

شکل ۲۱-۸- روند ساخت Fixture فریم تک ورق

اتمام فرآیند ساخت فریم های مغناطیسی با استفاده از دستگاه LCR متر، مقدار مقاومت، سلف، خازن و امپدانس که سیم پیچ ها در فرکانس های مختلف از خود نشان می دهند برای مدار مغناطیسی هسته تروئید، فریم SST و Epstein به ترتیب در جدول های ۱-۴، ۱-۵ و ۱-۶ نشان داده شده است

جدول ۴-۸- اندازه گیری سیم پیچ اولیه نمونه هسته تروئید

F (Hz)	LS	Rs	Z
50	3.545MH	0.196ohm	1.131 ohm
100	3.53MH	0.270 ohm	2.23 ohm
400	3.39MH	1.48 ohm	8.6 ohm

جدول ۵-۸- اندازه گیری سیم پیچ اولیه نمونه فریم SST

f	Z	Ls	Rs	Cs
DC	—	—	1.34	—
10	1.39	2.82 mH	1.38	89.9 mF
50	1.91	2.5	1.74	4.04
200	3.67	1.8	2.88	352 uF
400	5.3	1.39	3.77	113
1000	8.5	925 uH	6.17	27.3
5000	18.3	437	12	2.3
10000	26.1	336	15.4	753 nF
15000	33.5	296	18.4	379
20000	39.9	273	20.4	231

جدول ۶-۸- اندازه گیری سیم پیچ اولیه نمونه فریم Epstein

f	Rs	Ls	Cs	Z
DC	1.83	—	—	—
10	2.71	38.6 mH	6.5 mF	3.62
50	5.4	32.2	314 uF	11.53
200	15.12	23.7	26.6	33.5
400	26.68	18.4	8.57	53.6
1000	53.7	11.5	2.19	90.3
5000	123	4.7	212 nF	194
10000	167	3.58	70	280
15000	200	3.09	36.3	354
20000	229	2.81	22	421

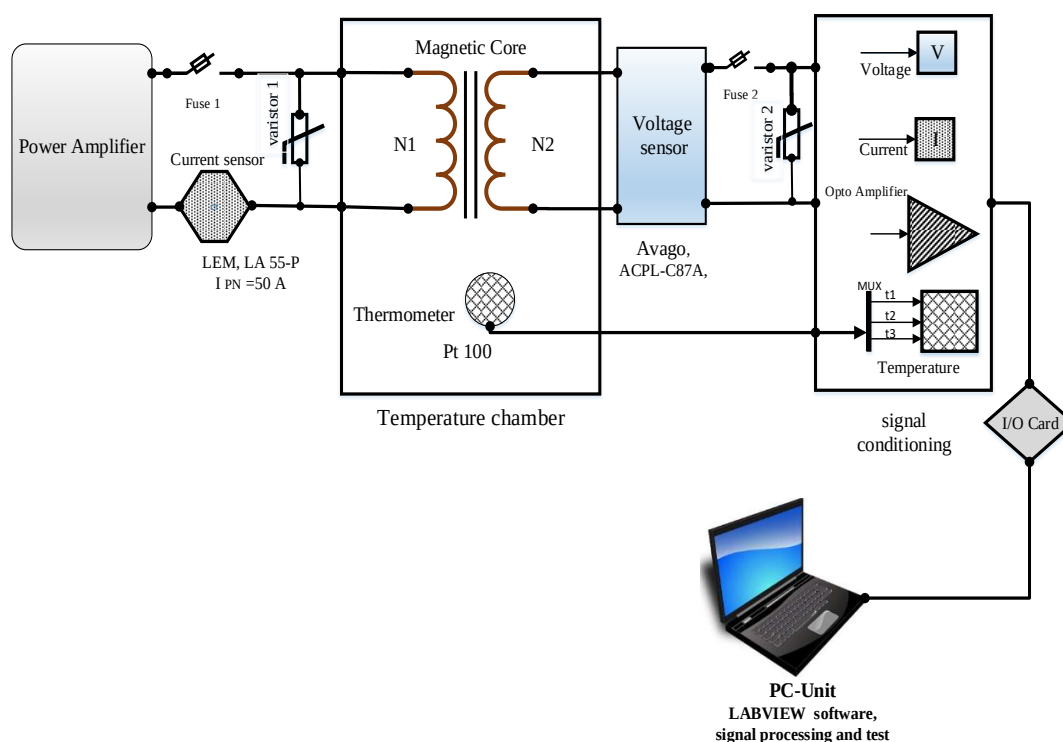
۸-۴- جمع بندی و نتیجه گیری

در این فصل مراحل مختلف ساخت مدارت مغناطیسی مورد استفاده در دستگاه B-H متر برای سه نمونه پودر مغناطیسی، فریم اپستین و فریم تک ورق ارائه گردیده است. محاسبات طراحی ابعادی و مشخصات فیزیکی نمونه ها بر اساس استاندارد های بین المللی (که اغلب نمونه های موجود دستگاه B-H متر به این استاندارد ها ارجاع دادند) انجام گرفته است. دقت ساخت و دستیابی به مشخصات هندسی بدست آمده از طراحی تفصیلی، در دقت نهایی دستگاه B-H متر می تواند بسیار تاثیر گذار باشد. در این پروژه مراحل ساخت و پیاده سازی بر اساس امکانات محدود آزمایشگاهی انجام گرفته است که خطا و عدم قطعیت در نمونه های پیاده سازی شده را اجتناب ناپذیر خواهد کرد.

فصل نهم: ساخت مدار آمپلی فایر دستگاه B-H متر

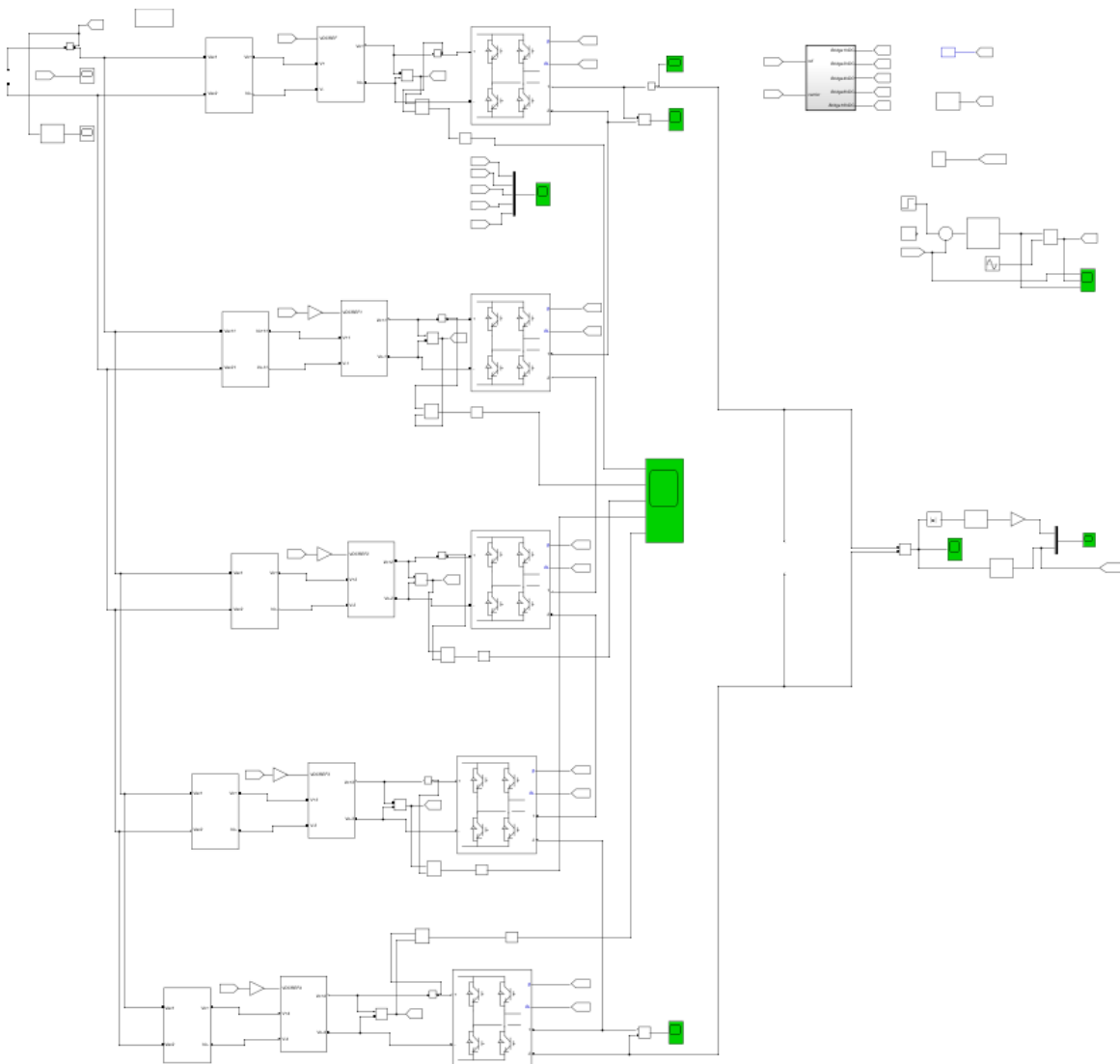
۹-۱- مقدمه

یکی از بخشهای کلیدی در دستگاه B-H متر، ماژول آمپلی فایر دستگاه می باشد. شکل ۲-۱ نمایش بلوک دیاگرامی دستگاه را نمایش می دهد. نقش مدار آمپلی فایر تامین جریان تحریک مورد نیاز جهت تولید شار در مدار مغناطیسی تحت تست در فرکانس و چگالی جریان مورد نظر کاربر می باشد.

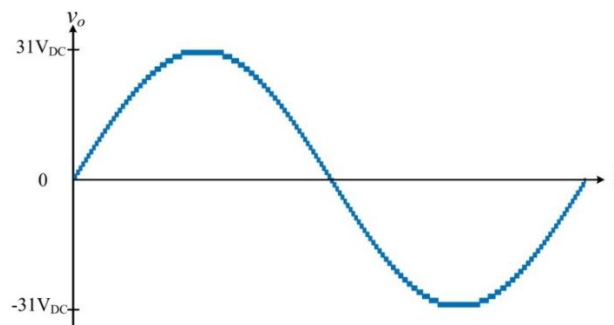


شکل ۹-۱- ساختار کلی دستگاه B-H متر

به منظور تامین جریان تحریک سینوسی با فرکانس و دامنه دلخواه دو روش کلی قابل پیاده سازی می باشد که عبارتند از استفاده از تقویت کننده خطی و مبدل های سوئیچینگ. تقویت کننده های خطی (مانند آمپلی فایر پوش پول) به دلیل محدودیت ولتاژ و جریان سوئیچ های خطی موجود در یک محدوده توان محدود قابل پیاده سازی می باشد. بعلاوه اینکه امپدانس خروجی این نوع از تقویت کننده ها بالاست و از نظر تطبیق امپدانس با مدارات مغناطیسی چندان عملکرد خوبی نخواهد داشت. در این پروژه به منظور حل این چالش از تقویت کننده های سوئیچینگ استفاده شده است. همانگونه که در گزارش مرحله اول بررسی گردید، توپولوژی پیشنهادی در این پروژه یک اینورتر چند سطحی نامتقارن بوده که در شکل ۱-۲ نمایش داده شده است. در این طراحی اینورتر طراحی شده شامل ۵ ماژول H-bridge می باشد که بصورت نامتقارن و باینری تغذیه می شوند.



شکل ۹-۲- نمایی از پیاده سازی اینورتر ۶۳ سطحی شامل ۵ ماژول CHB در سیمولینک مطلب



شکل ۹-۳- شکل موج ولتاژ خروجی اینورتر ۶۳ سطحی به ازای $ma=1$

شکل موج خروجی مورد انتظار از یک اینورتر ۶۳ سطحی به ازای اندیس مدولاسیون $ma=1$ در شکل ۹-۳ نمایش داده شده است. بطوریکه ملاحظه می گردد با بکارگیری این نوع از مبدلها، شکل موج خروجی تا حد قابل قبولی به یک موج سینوسی خالص

نزدیک می باشد. مشخصات فنی اینورتر ۶۳ سطحی باینری در جدول ۱-۲ ارائه گردیده است. تعداد سوئیچ های ماسفت مورد نیاز ۲۰ عدد و ماکزیمم ولتاژ خروجی به ازای ولتاژ پایه $v_{dc}=10v$ برابر 310 ولت می باشد.

جدول ۱-۹- مشخصات اینورتر ۶۳ سطحی نامتقارن

پارامتر	شرح	دوتایی	مقدار
N	تعداد کل سطوح ولتاژ خروجی	$2^{(m+1)} - 1$	63
N_s	تعداد سوئیچ‌ها	4m	20
N_d	منابع dc	m	5
V_M	ولتاژ بیشینه تولید شده	$(2^m - 1)V_{dc}$	31vdc=310
N_v	تعداد تغییرات در اندازه‌های ولتاژ	m	۵
V_b	ولتاژ کلی بسته شده توسط سوئیچ‌ها	4mV _{dc}	20vdc=200
مقدار ولتاژ ماژول اول $v_{dc}=10v$			

بطور کلی ماژول آمپلی فایر مبتنی بر اینورتر چند سطحی نامتقارن جهت کاربرد در دستگاه B-H متر از زیر بخشهای سخت افزاری و نرم افزاری به شرح زیر تشکیل شده است.

یکسوساز ورودی و ترانسفورماتور ایزوله

اینورتر hbridge با استفاده از سوئیچ ماسفت

مدار درایو گیت، منبع تغذیه و مدارات حفاظتی

مدار چاپر باک (شامل مدارات کنترل، مدارات درایو گیت و سلف چاپر)

برد های سنسور ولتاژ و جریان

برد FPGA و پیاده سازی الگوریتم سوئیچ زنی اینورتر ۶۳ سطحی

در ادامه ساخت هر یک از زیر بخشهای فوق ارائه می گردد. در هر مورد بر اساس نیاز تستهای اولیه به منظور اطمینان از عملکرد صحیح نمونه ساخته شده انجام می گردد.

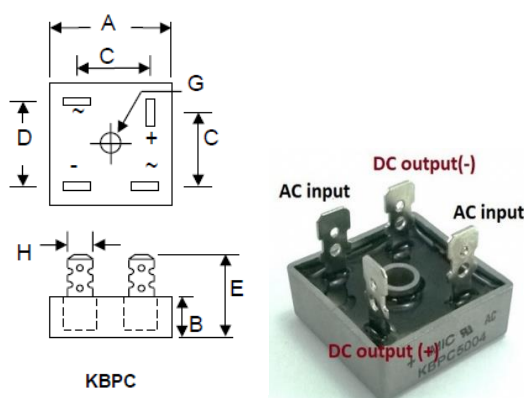
۹-۱-۱ یکسوساز و ترانس ایزوله ورودی

بر اساس مشخصات فنی اینورتر چند سطحی ارائه شده در جدول ۹-۱، سطوح ولتاژ dc ورودی برای یک اینورتر باینری ۶۳ سطحی به ازای ولتاژ پایه dc ورودی ۱۰ ولت، عبارتند از ۲۰، ۴۰، ۸۰ و ۱۶۰ ولت می باشد که باید بصورت ایزوله به ورودی هر یک از مازول های H-bridge اعمال گردد. در این پروژه از یک ترانس تکفاز با ۵ خروجی ایزوله استفاده شده است. با در نظر گرفتن افت ولتاژ ترانس و دیوده های یکسوساز و در نظر گرفتن سیکل کاری حدود ۵۰٪، چارپ ورودی سطوح ولتاژ خروجی ترانس به ترتیب ۱۲، ۲۴، ۴۸، ۱۱۰ و ۲۲۰ ولت طراحی شده است.



شکل ۹-۴- ترانسفورماتور ایزوله ورودی اینورتر چند سطحی

به منظور ساخت یکسوساز دیودی ورودی از پل دیودی KBPC5004 با سطح ولتاژ ۴۰۰ ولت و جریان ۵۰ آمپر استفاده شده است.



شکل ۹-۵- یکسوساز KBPC5004 و پکیج مورد استفاده

شکل ۹-۱-۶ برد یکسوساز پیاده سازی شده برای سطوح ولتاژ مورد نیاز را نمایش می دهد. در این طراحی از خازن های با ظرفیت ۲ میلی فاراد و ۶/۸ میلی فاراد ۵۰ ولت استفاده شده و برای سطح ولتاژ بالاتر خازن ها به تعداد مورد نیاز به صورت سری و موازی مورد استفاده قرار گرفته اند.



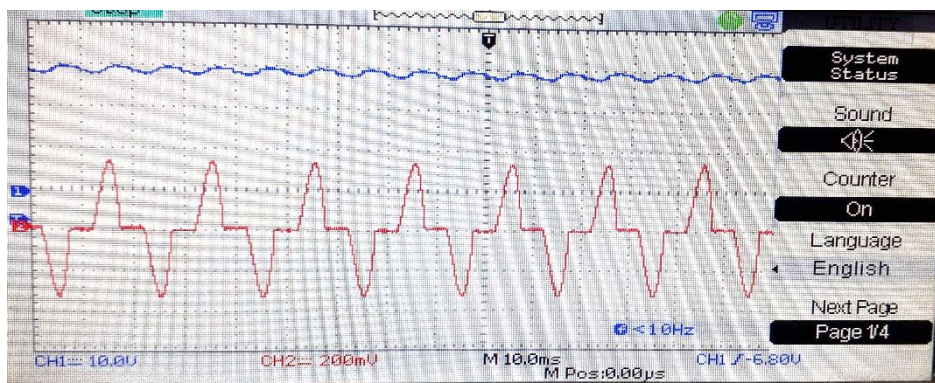
شکل ۶-۹- بردهای یکسو ساز مونتاژ شده

با توجه به عبور جریان حدود ۱۵ آمپر از یکسوسازهای ورودی و دمای بالای یکسوساز ورودی از یک فن dc ۱۲ ولت به منظور خنک سازی پل دیودی بهره گرفته شده است. پس از ساخت هر یک از ۵ برد یکسوساز لازم است تا به منظور بررسی کیفیت رپیل ولتاژ خروجی و شرایط حرارتی سوئیچها تحت اعمال بار، تست های اولیه انجام گردد. شکل ۹-۷ مدار تست یکسوساز را نمایش می دهد.

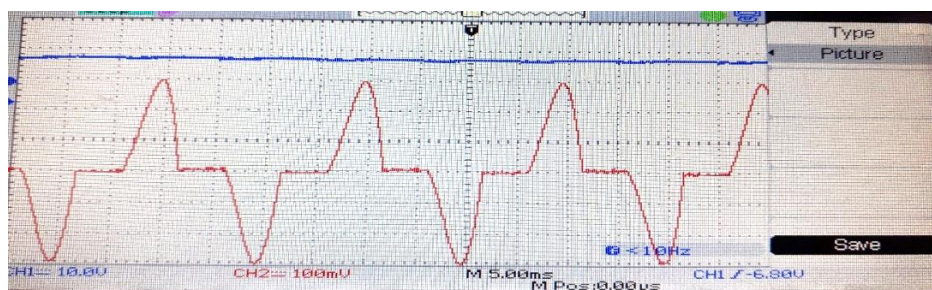


شکل ۷-۹- تست بردهای یکسوساز

خروجی ولتاژ یکسوساز و جریان ورودی یکسوساز برای سطوح ولتاژ ۱۲ ولت و ۴۸ ولت به ترتیب در شکل های ۹-۸ و ۹-۹ نمایش داده شده است. بررسی رپیل ولتاژ خروجی تحت جریان نامی مورد نیاز این پروژه تایید کننده عملکرد مطلوب یکسوساز ورودی می باشد.



شکل ۸-۹- ولتاژ خروجی و جریان ورودی برد یکسوساز ماژول ۱۲ ولت به ازای جریان ۱۵ آمپر



شکل ۹-۹- موج ولتاژ و جریان ۴۸ ولت به ازای جریان ۱۵ آمپر

پس از ساخت و تست بردهای یکسوساز ورودی، نصب بردهای یکسو ساز در کیس دستگاه و انجام اتصالات و سیم کشی داخلی مطابق با شکل ۲-۱۰ انجام می گردد.



شکل ۱۰-۹- مونتاژ ماژول های یکسوساز داخل کیس دستگاه

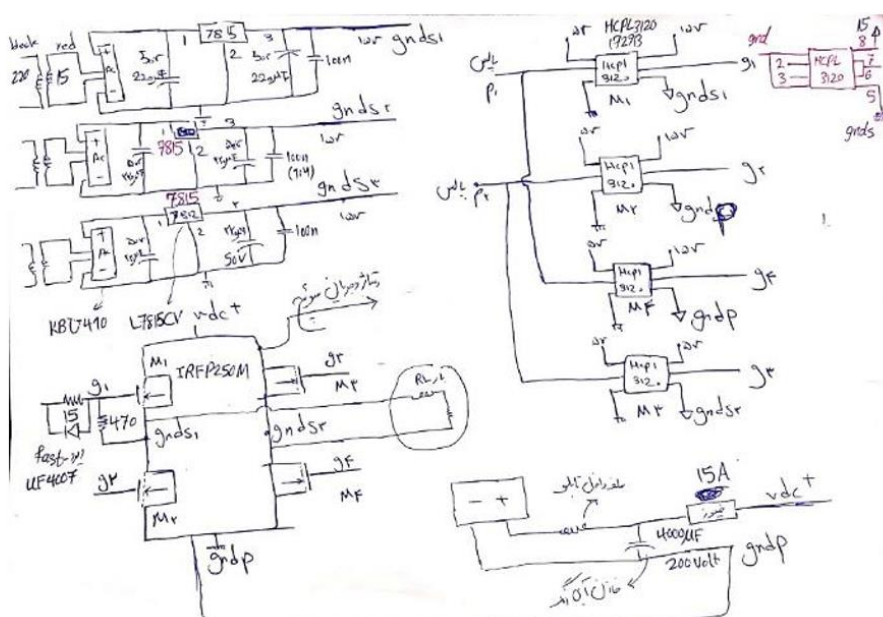
۲-۹- ساخت مبدل ۶۳ سطحی CHB نامتقارن

در این بخش از گزارش پروژه مراحل مختلف ساخت و پیاده سازی اینورتر چند سطحی و مبدل باک ورودی مورد بررسی قرار می گیرد. مراحل مختلف ساخت و تست هر یک از زیر بخشهای ماژول آمپلی فایر بررسی و تشریح می گردد. پیاده سازی و ساخت این ماژول در سه نسخه بصورت آزمایشگاهی انجام گرفته که نسخه ابتدایی روی برد برد و بصورت آزمایشگاهی و نسخه دوم بصورت

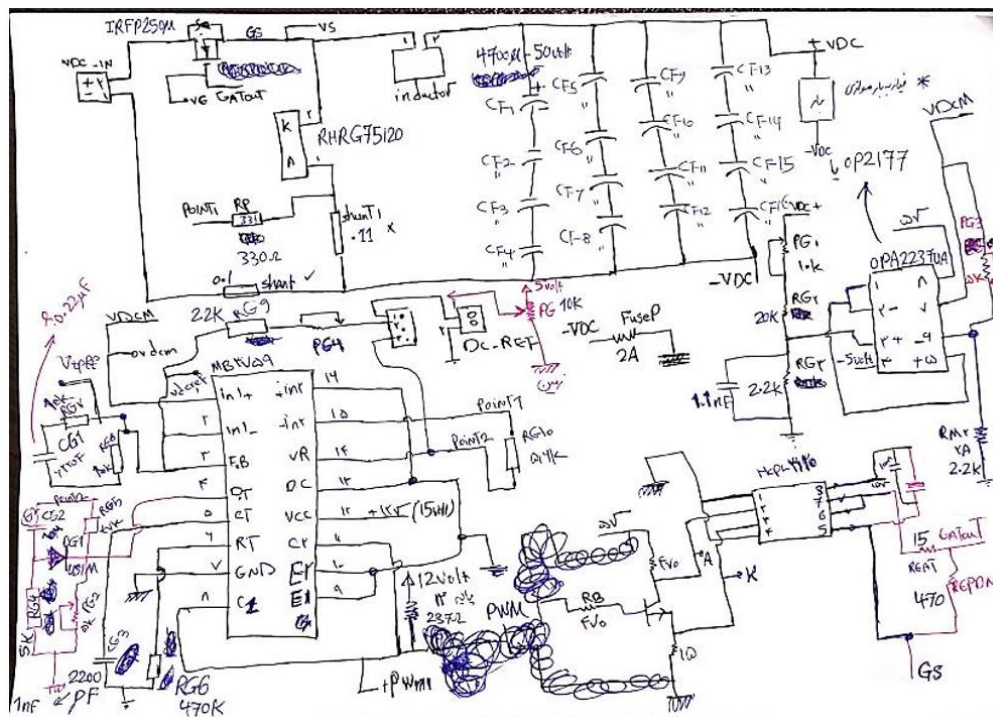
نیمه صنعتی پیاده سازی و تست گردید. در پایان پس از رفع ایرادات مداری و اعمال اصلاحات مورد نیاز، نسخه نهایی بردها چاپ، مونتاژ و مورد آزمون قرار گرفت. در ادامه این گزارش مراحل ساخت مدار چاپر کاهنده ورودی و نتایج تست آن ارائه گردیده است.

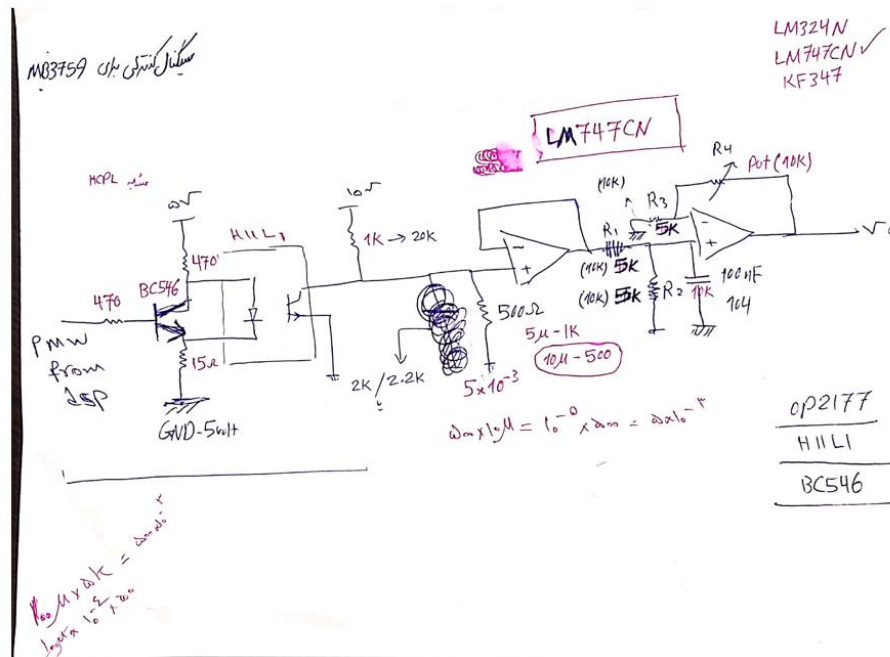
۹-۲-۱ نقشه نگاری مدارات

پس از طراحی تفصیلی مدار اینورتر چند سطحی و انتخاب المان‌ها، نقشه اولیه ساخت مدارات الکترونیکی مطابق شکل‌های ۱۱-۲ تا ۱۴-۲ تهیه گردید. این مدارات شامل بخش تغذیه مدارات الکترونیک، درایو گیت، مازول H-Bridge، Chopper، مدارات حفاظتی و سایر مدارات جانبی می‌باشد.



شکل ۱۱-۹- نقشه مدارات Driver، H-Bridge و تغذیه برای یک مازول

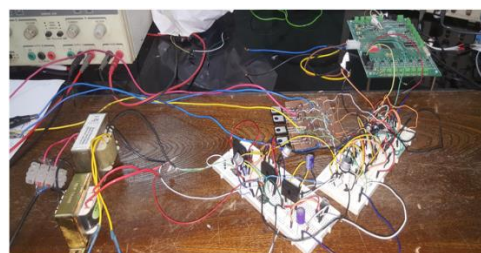
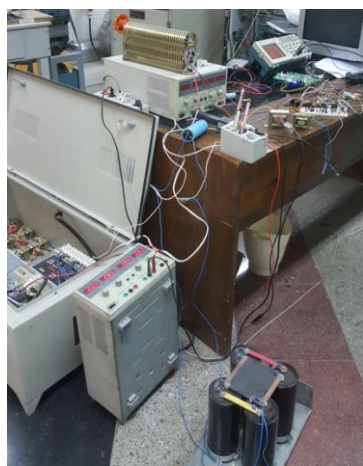




شکل ۱۴-۹- نقشه مدار ایزولاتور ولتاژ مرجع ورودی به چاپر باک

۹-۲-۲ پیاده سازی، تست نسخه اولیه مدار اینورتر

در این مرحله بر اساس نقشه مدارات استخراج شده، پیاده سازی مدار اینورتر پل تکفاز (H-Bridge) و مبدل باک بر روی برد مورد و بصورت آزمایشگاهی انجام گردید مدار اینورتر که در شکل ۹-۱۵ نشان داده شده است در واقع شامل مدار H-Bridge، Driver و تغذیه است که البته با توجه به جریان عبوری از مدار H-Bridge و لزوم در نظرگیری سطح مقطع بیشتر جهت جریان کشی نقاط اتصال در این ساختار از فیبر سوراخ دار و برقراری اتصال نقاط از طریق قلع اندود کردن مسیر استفاده شده است. یکی از مدارات مورد نیاز در بخش اینورتر تغذیه ایزوله مدارات درایو گیت می باشد. مدرا تغذیه درایو گیت نقش کلیدی در عملکرد سوئیچ زنی اینورتر ایفاء می کند و هر گونه اختلال در عملکرد آن می تواند باعث اختلال در عملکرد دستگاه گردد. مطابق شکل ۹-۱۵ برای درایو گیت یک ماژول H-bridge نیاز به سه منبع DC تغذیه ۱۵ ولت کاملاً ایزوله می باشد و از همین جهت در این طراحی سه ترانس ۲۲۰ به ۱۵ ولت مورد استفاده قرار گرفته است. در این مرحله از تست پالس های PWM مورد نیاز ورودی درایو گیت HCPL3120 نیز از طریق DSP تولید می شود.



شکل ۱۵-۹- نمایش از پیاده سازی اینورتر بدون بار

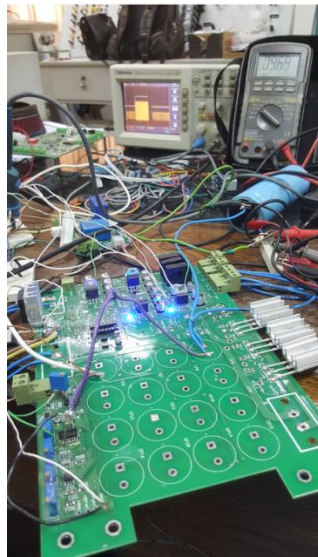
در این بخش هدف اصلی پیاده سازی و تست اولیه و پس از آن رفع ایرادات و اصلاح مدارات اولیه به منظور نهایی سازی بخش مداری اینورتر بوده است. در ادامه پس از حصول اطمینان از مدار اینورتر و رفع ایرادات و انجام اصلاحات لازم، اقدام به قراردعی بار مقاومتی و سلفی در قسمت خروجی و همچنین اعمال ولتاژ تغذیه DC ورودی در دو سمت مدار H-Bridge و قرارگیری فیلتر در بخش ورودی مطابق آنچه در شکل ۲-۱۶ الف نشان داده شده است. جهت حصول اطمینان از صحت عملکرد مدار، کلمپ جریانی در دو قسمت بار سلفی مقاومتی و مدار H-Bridge و همچنین پروب ولتاژ برای سیگنال خروجی در دو سر بار سلفی - مقاومتی قرار گرفته است. خروجی ولتاژ دو سر سوئیچ، جریان سوئیچ و جریان بار بر روی صفحه اسکوپ در شکل ۲-۱۶ ب نمایش داده شده است.



شکل ۱۶-۹- پیاده سازی و تست اولیه مدار کامل اینورتر الف شکل موج ولتاژ و جریان سوئیچ و جریان بار خروجی اینورتر H-Bridge

۹-۲-۳ پیاده سازی، تست نسخه اولیه مدار چاپر

در این مرحله مطابق نقشه مداری شکل ۲-۱۳ مدار چاپر کاهنده ورودی پیاده سازی گردیده است. شکل ۲-۱۷ مدار پیاده سازی شده جهت تست مدار چاپر ورودی را نمایش می دهد. البته این برد در واقع نسخه دوم مدار اینورتر و چاپر می باشد که به صورت یکپارچه ساخته شده که البته این مساله مشکلاتی را از نظر نویز به همراه داشته است.

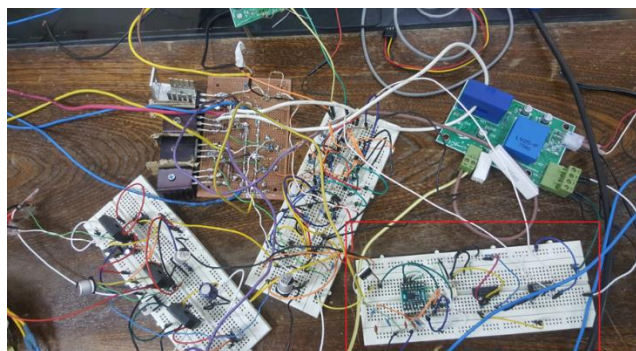


شکل ۱۷-۹- نسخه دوم برد اینورتر و چاپر برای یک ماژول

به همین دلیل همچنین به منظور سهولت بیشتر در قرارگیری بردها در تابلوی دستگاه تصمیم بر این شد که در نسخه نهایی pcb هر یک از مدارات به طور جداگانه طراحی و مونتاژ گردد تا در صورت لزوم و تعویض یا ایجاد برخی تغییرات احتمالی نیاز به تعویض کلی pcb مشتمل بر سه مدار مختلف نباشد.

۹-۲-۴ پیاده سازی، تست و اصلاح مدار تشخیص خطا

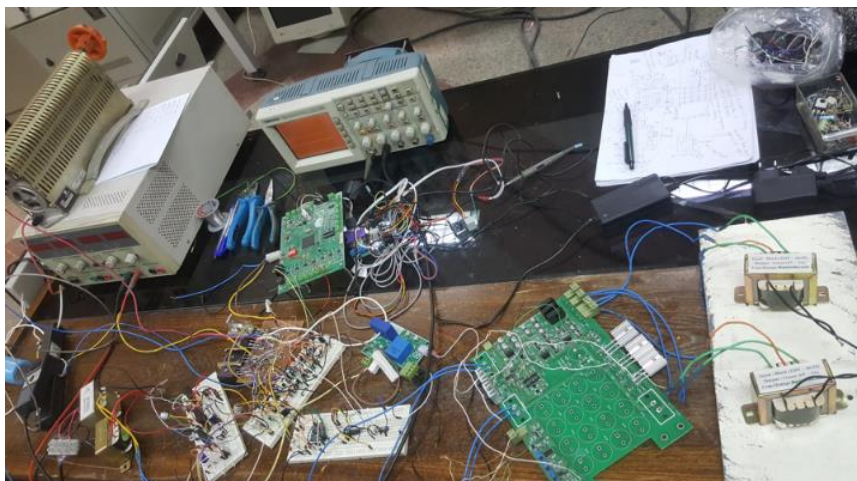
با توجه به حساسیت‌های موجود در روند عملکرد دستگاه و تعداد بالای سوئیچ‌های فعال در اینورتر چند سطحی و همچنین به جهت جلوگیری از وارد شدن هر گونه آسیب به مدارات و افزایش سرعت در تشخیص خرابی‌های احتمالی یا سوختگی قطعات و بروز هر گونه مشکل در روند فعالیت‌های دستگاه برای هر یک از دو مدار اینورتر و چاپر، مدار جداگانه ای با کاربرد تشخیص خطا در نظر گرفته شده و در هر یک از این دو بخش استفاده شده است. از همین جهت به منظور تست مدار تشخیص خطای مورد نظر که نقشه آن در شکل ۲-۱۴ نشان داده شده است، این مدار مطابق شکل ۲-۱۸ بر روی برد پیاده سازی شده و صحت عملکرد آن مورد بررسی قرار گرفته است. نکته حائز اهمیت در این ساختار اینست که در این پیاده سازی اولیه ولتاژ اعمالی به مقایسه گر TL3116 با استفاده از یک تقسیم مقاومتی اعمال شده است که در ساختار اصلی با کمک آی سی LM385 ولتاژی ۲.۵ ولت به عنوان ولتاژ مرجع انتخاب گردید.



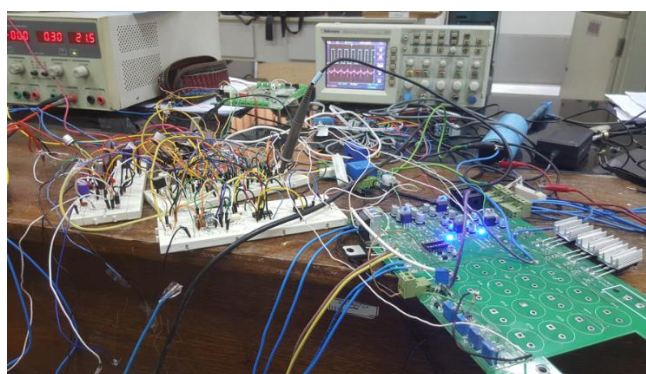
شکل ۱۸-۹- پیاده سازی و تست مدار تشخیص خطا

۹-۲-۵ تست تجمیعی، شناسایی و رفع ایرادات مدارات

تا این مرحله پس از تکمیل طراحی و رفع ایرادات، هر یک از مدارات به صورت جداگانه تست و ارزیابی گردیده است. در ادامه پس از تجمیع تمامی مدارات و اتصال به یکدیگر جهت پیاده سازی یکی از طبقات مورد نظر شامل اجزای مداری تغذیه، اینورتر که خود شامل مدار درایور و H-Bridge است و همچنین مدار چاپر و تشخیص خطا با اعمال بار مورد نظر در خروجی و همچنین قراردعی فیلترهای لازم در بخش های مختلف مدار مطابق آنچه در شکل ۲-۱۹ نمایش داده شده است، می‌نماییم. همچنین در این بخش پس از اتصال مدارات مختلف به یکدیگر ایرادات مشاهده شده شناسایی و اصلاحات مورد نیاز در همین رابطه اعمال شده است. نکته بعدی در خصوص تجمیع مدارات و عملیات انجام شده در این بخش اینست که پس از مشاهده خروجی‌ها مطابق شکل ۲-۲۰ پایداری مدارات در مقابل افزایش و کاهش ولتاژ و همچنین میزان جریان قابل تحمل ماسفت‌های مدار H-Bridge مورد بررسی و تست واقع گردید. سیگنال های خروجی HCPL3120 و شکل جریانی خروجی بار مدار H-Bridge در شکل ۲-۲۱ نشان داده شده است.



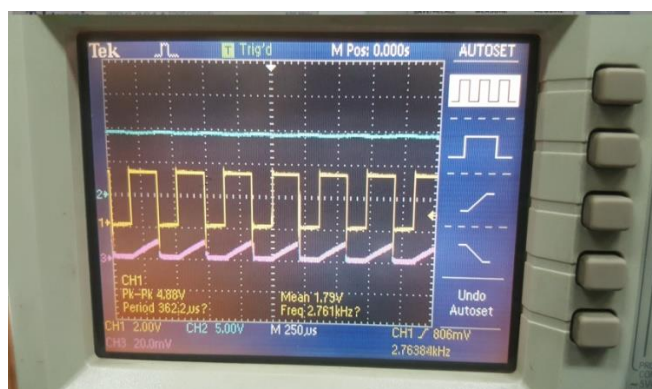
شکل ۱۹-۹- مدار تجمیع شده



شکل ۲۰-۹- بررسی سیگال‌ها در مدار تجمیعی



شکل ۲۱-۹- سیگنال خروجی HCPL3120 و جریان مدار H-Bridge



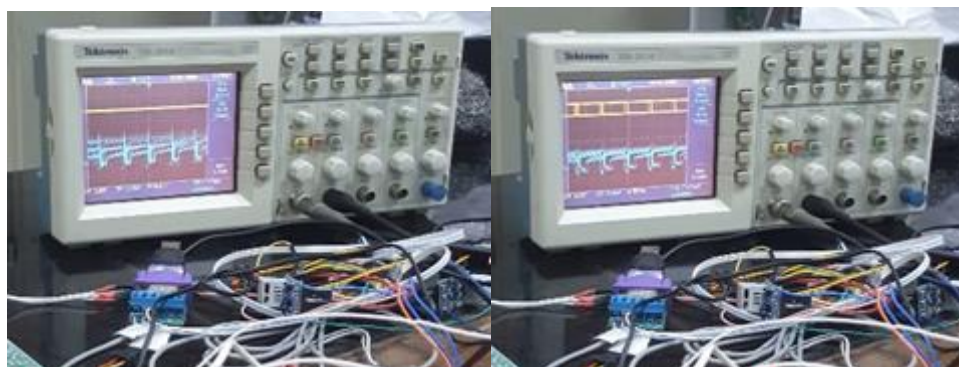
شکل ۲۲-۹- ولتاژ خروجی چاپر باک، پالسهای کنترلی، جریان سلف ورودی چاپر

شکل ۲-۲۳ خروجی مبدل چاپر به ازای تغییر پله ایی در ورودی مرجع سیستم کنترلی را نمایش می دهد. بررسی پاسخ خروجی مبدل نشان می دهد سیستم کنترلی پیاده سازی شده برای مبدل چاپر با دقت مطلوبی ورودی مرجع را دنبال می کند.

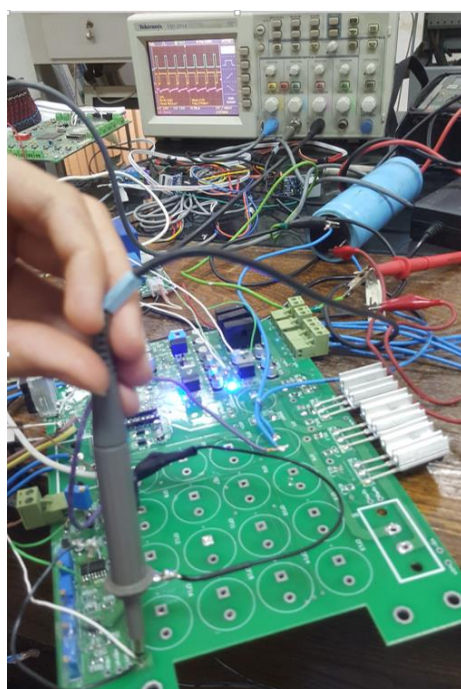


شکل ۲۳-۹- پاسخ مدار چاپر به ورودی مرجع پله

جهت مشاهده صحت عملکرد مدار تشخیص خطا در شکل ۲-۲۴ عملکرد این مدار را در قطع جریان با افزایش جریان از حد آستانه تعیین شده را نشان می دهد. همانگونه که ملاحظه می شود با افزایش جریان از حد آستانه تعیین شده پالسهای گیت اعمالی به سوئیچ های ماسفت قطع و مبدل ها غیر فعال می شوند.



شکل ۲۴-۹- مشاهده عملکرد مدار تشخیص خطا قبل و بعد از وقوع خطا

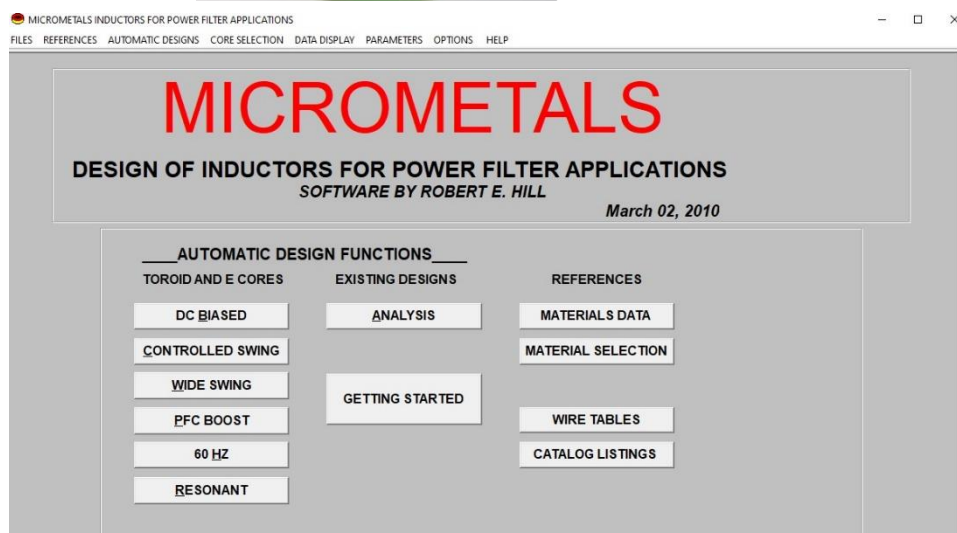
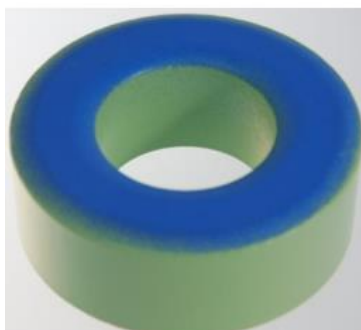


شکل ۲۵-۹- مشاهده سیگنال خروجی MB3759 و پالس اعمالی به گیت ماسفت قدرت و جریان ورودی چاپر

۹-۲-۶ ساخت سلف چاپر باک

در این مرحله ساخت سلف با هسته پودر آهن مورد استفاده در چاپر باک مورد ارزیابی قرار می گیرد. طبق محاسبات طراحی انجام شده برای ساخت مدار چاپر نیاز به ۵ عدد سلف با هسته پودر آهن با شماره T300-52، می باشد. فرکانس کلید زنی چاپر در محدوده ۳۰ کیلو هرتز می باشد. شکل ۲۶-۲ هسته پودر آهن خریداری شده را نمایش می دهد. جزئیات مشخصات هسته مورد استفاده در بخش پیوست آورده شده است. بر اساس محاسبات انجام گرفته مقدار سلف مورد نیاز برای مبدل باک حدود 1mH بوده که با توجه به سطح جریان ۲۰ آمپر ورودی لازم است تا برای هر سلف دو عدد از این نوع هسته ها با یکدیگر سری شوند. سایر محاسبات

همانگونه که در شکل تعداد دور و سطح مقطع هادی ها با استفاده نرم افزار micro material انجام شد. مشخصات هسته T300-52 در پیوست ۱ آورده شده است.



ELECTRICAL PROPERTIES:

INDUCTANCE	771 u	Henry	CORE LOSS	10.9	W
DC RESISTANCE	22.9 m	OHMS	COPPER LOSS	19.9	W
AC RESISTANCE		OHMS	BUILD	2.262	mm
RIPPLE CURRENT		AMPS p-p	SURFACE AREA	176.4	Sq cm
DC BIAS		OES	TEMP RISE @ 0 HRS	73.8	DEG C
AC FLUX DENSITY	10742	GAUSS	Time To 115 % Loss	3e+05	Hours
PERCENT PERM	105	PCT	Life Limit	1e+08	Hours
CORE AL VALUE	484	nH			

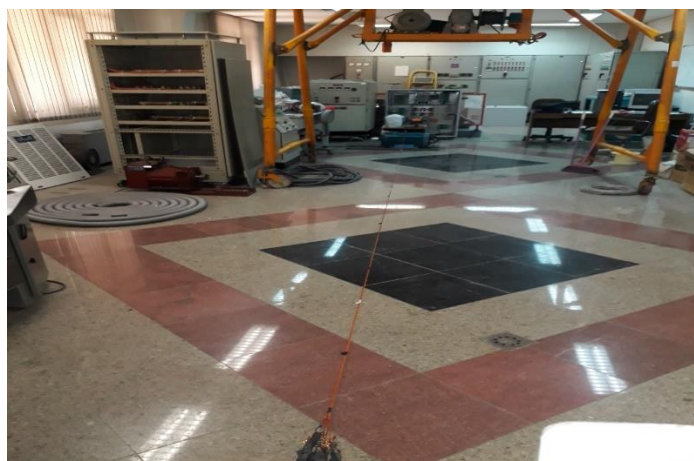
MECHANICAL PROPERTIES:

CORE OD	63.500	mm	WIRE WEIGHT	218.874	gm
CORE ID	31.750	mm	SURFACE AREA	176.43	Sq cm
CORE HEIGHT	50.800	mm	TOT LOSSES	30.8	WATTS
CORE WEIGHT	806.400	gm	TEMP RISE	73.78	DEG. C
CORE VOLUME	115.200	Cubic cm	WINDING BUILD	2.262	mm
MAGNETIC Ac	7.680	Sq cm	WINDOW FILL	22.0	PERCENT
MAGNETIC Lm	15.000	cm	WOUND OD	65.567	mm
WIRE DIA	0.302	mm	WOUND HEIGHT	52.867	mm

شکل ۲۶-۹- هسته پودر آهن 52-material و نتیجه محاسبات در نرم افزار Micro Metals

برای سیم پیچی نیاز به سیم مسی با روکش لاک با مشخصات سیم 8 AWG دارای قطر ۳.۲۶ mm و سطح مقطع mm² ۸.۳۷ می باشد. با موازی کردن و بهم تابیدن ۸۸ رشته سیم 30 AWG که دارای قطر ۰.۲۵۴ mm و سطح مقطع mm² ۰.۰۵۰۹

هستند، معادل سیم مورد نیاز تهیه شده است. به منظور استفاده از مزایای سیم لیتز در این مرحله مطابق شکل ۲-۲۷ با تاباندن ۸۸ رشته سیم عایق دار با طول ۸ متر، سیم پیچی سلفها انجام می گردد.



شکل ۲۷-۹- تاباندن سیم های مسی عایق داز جهت تهیه سیم لیتز

بعد از تهیه سیم لیتز، مطابق شکل ۲-۲۸ سیم پیچی هسته ها انجام گردید. با توجه به اینکه جریان مبدل باک بصورت گسسته می باشد، ارتعاشات سیم پیچها و نویز صوتی در سلف ها محتمل می باشد که به منظور جلوگیری از ایت مساله مطابق شکل ۲-۲۹ سلفها بطور کامل شارلاک گرفته می شوند.



شکل ۲۸-۹- ساخت سلف هسته پود آهن مورد استفاده در چاپر باک



شکل ۲۹-۹- شارلاک گیری سلفها

پس از مونتاژ نهایی سلف ها ، مطابق شکل ۹-۳۰ مقادیر اندومتانس و مقاومت سلف های ساخته شده با استفاده از دستگاه LCR متر اندازه گیری و نتایج آن در جدول ۹-۲ آورده شده است. لازم به ذکر است کلیه اندازه گیری ها در فرکانس 10KHz انجام شده است.

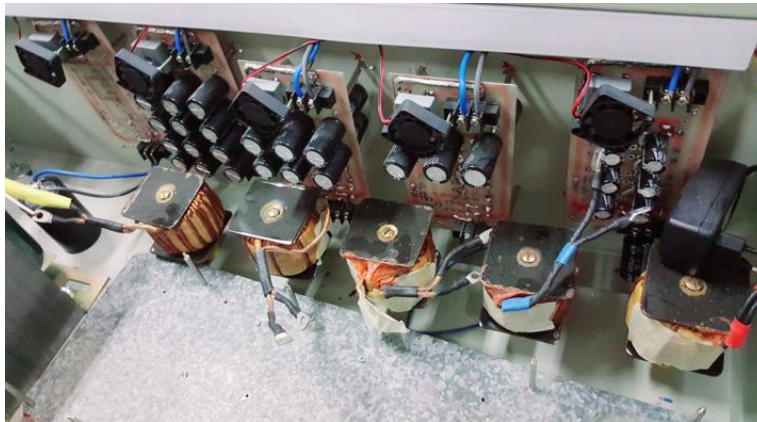


شکل ۳۰-۹- اندازه گیری مقادیر پارامترهای سلف های ساخته شده

جدول ۲-۹- مشخصات امپدانسی سلف های چاپر

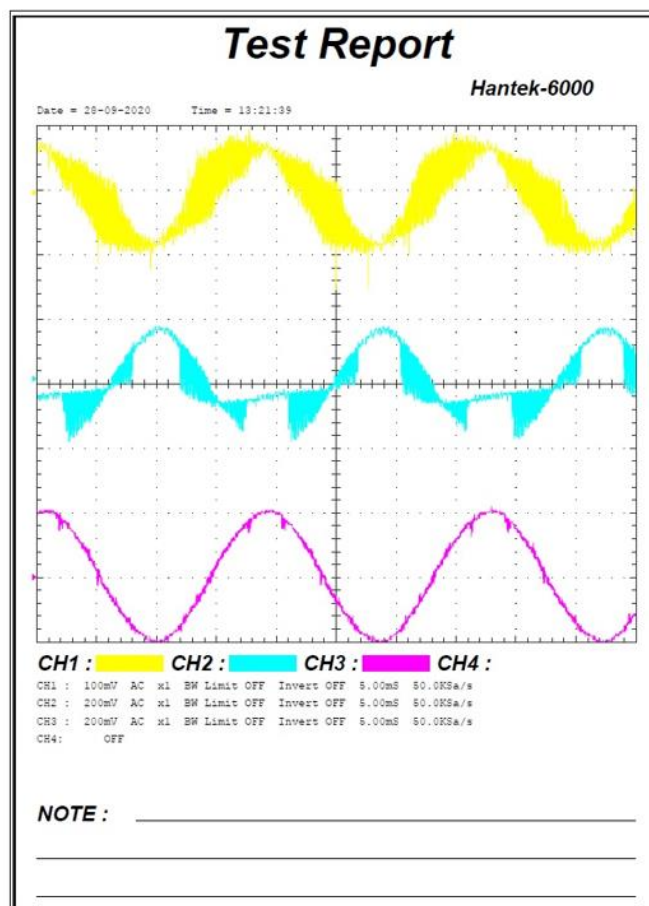
شماره سلف	C (nF)	Z (Ω)	R (Ω)	L (mH)	DC (mΩ)
۱	۲۲۵.۷۱	۷۰	۱	۱.۱	۷۰.۹۰
۲	۲۲۳.۹۳	۷۱	۱	۱.۱۳	۷۳.۸۸
۳	۲۳۴.۵۲	۶۷.۸۸	۰.۹۶۱	۱.۰۸	۷۱.۷۲
۴	۲۰۹.۳۹	۷۶	۱.۰	۱.۲۰	۶۹.۷۸
۵	۲۰۸.۸۱	۷۶.۲۱	۱.۰	۱.۲۱	۶۹.۳۰

شکل ۲-۳۱ نحوه نصب سلف های ساخته شده داخل تابلو را نمایش می دهد. به منظور رعایت مسائل عایقی دستگاه بطوریکه ملاحظه می شود از مقره های عایقی به منظور نصب ایستاده سلف ها استفاده شده است.



شکل ۳۱-۹- نصب مقره ها و نصب سلف ها روی آن

پس از نصب سلف های چاپر و تجميع آن با مدار اینورتر H-bridge به ازای بار نامی ، ولتاژ و جریان یکی از سوئیچ های اینورتر و جریان بار در شکل ۳۲-۲ نمایش داده شده است. بررسی نتایج تایید کننده صحت طراحی نسخه دوم مدار اینورتر و چاپر ورودی دستگاه می باشد. در مرحله بعد، طراحی نقشه های نهایی برد های قدرت و کنترلی مورد نیاز پروژه انجام می شود.



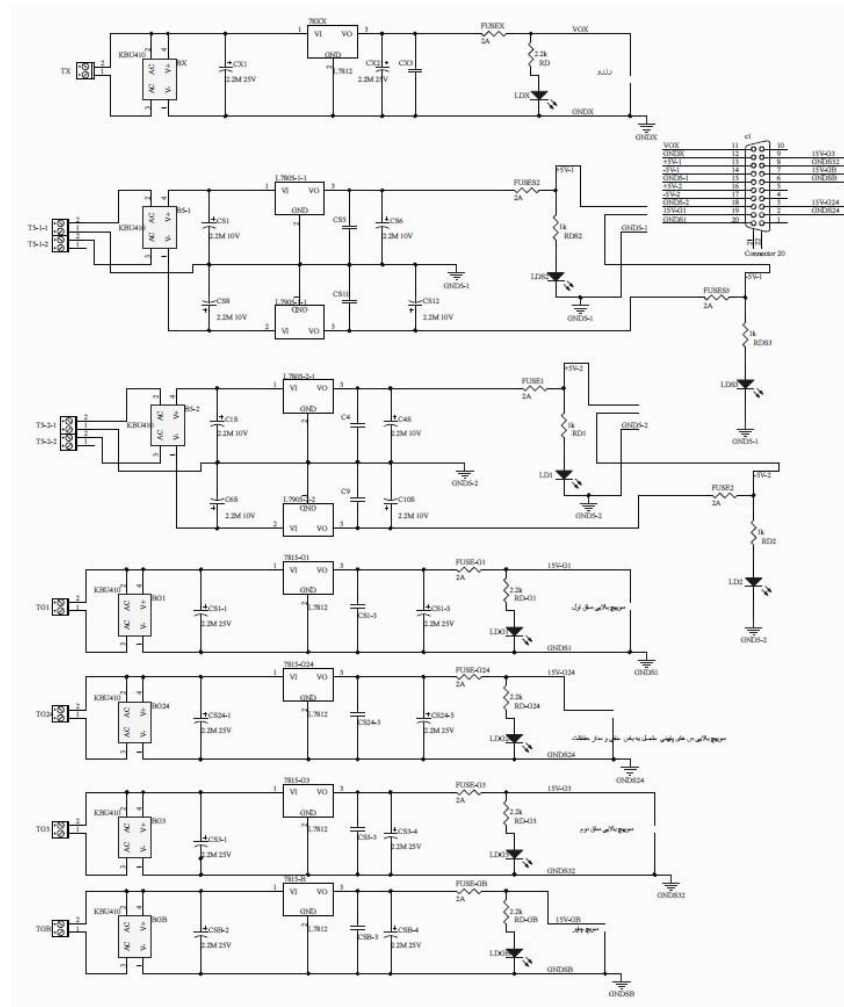
شکل ۹-۳۲- خروجی‌های تست مدار H-Bridge نسخه دوم

۹-۲-۷ پیاده سازی نسخه نهایی بخش سخت افزار بخش آمپلی فایر دستگاه B-H متر

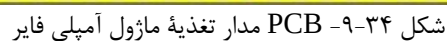
در مسیر طراحی و ساخت زیر بخش های سخت افزاری دستگاه B-H متر پس از انجام تحقیقات فاز صفر پروژه و گردآوری اطلاعات لازم در خصوص مدارات مورد نیاز و همچنین انجام شبیه سازی‌های لازم و در ادامه پیاده سازی و تست مدارات مورد نظر، در گام نهایی طراحی PCB مدارات نهایی شده انجام گردید. از همین جهت در این فصل نیز مطابق همین رویه در این مرحله از گزارش طراحی نقشه های نسخه سوم مدارات و تست آنها بر اساس اصلاحات تعیین شده در نسخه دوم انجام شده است

۹-۲-۷-۱ طراحی شماتیک و PCB مدار تغذیه درایو گیت ماژولهای H-bridge

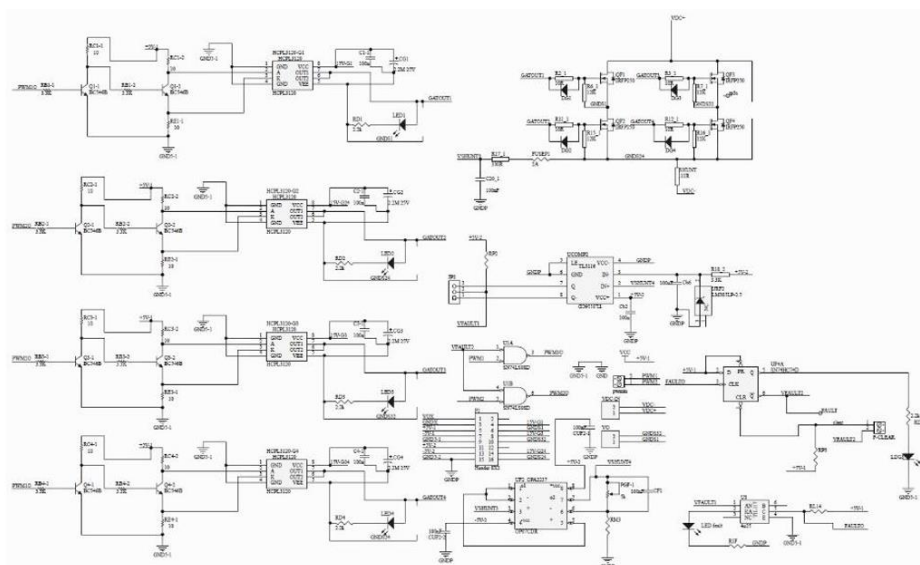
در این بخش شماتیک مدار تغذیه مورد نیاز هر یک از ماژول های اینورتر چند سطحی و نقشه PCB تهیه شده آن در شکل های ۳۳-۹ و ۳۴-۹ نمایش داده شده است. به منظور کاهش نویز های ناشی از سوئیچ زنی در نسخه نهایی از منبع تغذیه خطی استفاده شده و برای این منظور یک ترانس تکفاز با تعداد ۷ خروجی (متناسب با ولتاژ و جریان مورد نیاز) بصورت برون سپاری به یک کارگاه ساخت ترانس سفارش گردید. نکته حائز اهمیت در بخش تغذیه که در نسخه نهایی لحاظ شده این است که سعی شده به منظور حفاظت از بردهای الکترونیکی و کاهش سطح نویز دستگاه تا حد امکان از زمین های ایزوله استفاده شود و برای این منظور زمین مدار درایو گیت با زمین برد FPGA و زمین قدرت کاملاً ایزوله می باشد. همانگونه که قبلاً نیز تاکید گردید عملکرد مطمئن مدار تغذیه نقش اساسی در عملکرد صحیح دستگاه و جلوگیری از آسیب و هزینه های ناخواسته در بخش های قدرت می شود. همچنین به منظور نظارت لحظه ایی بخش تغذیه توسط کاربر از نشانگرهای LED استفاده شده است. بعلاوه در خروجی هر یک از تغذیه ها از یک فیوز SMD استفاده شده تا در صورت بروز هر گونه خطا از آسیب به برد تغذیه جلوگیری شود.



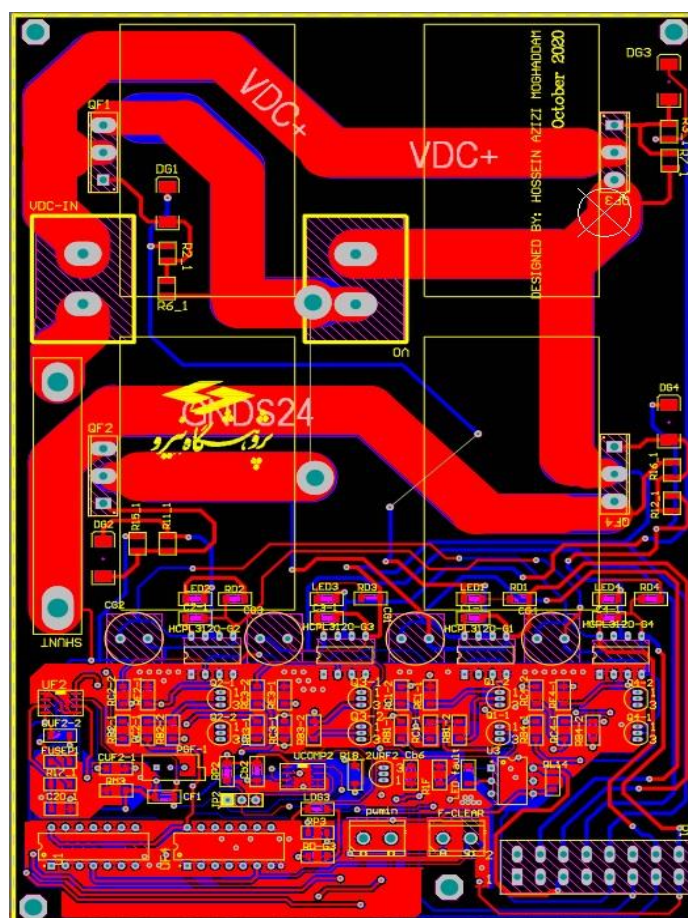
شکل ۳۳-۹- شماتیک مدار تغذیه



در این بخش شماتیک مدار H-Bridge و پس از آن PCB این مدار بر اساس اصلاحات نسخه دوم ساخته شده انجام می شود. شکل ۹-۳۵ و ۹-۳۶ به ترتیب نقشه مدار شماتیک و PCB را نمایش می دهد. در نسخه نهایی برد H-bridge بخش اینوتر، مدارات هیئت سینک جمع شده است. به منظور ضخیم سازی مسیر های عبور جریان بالا در این برد امکان افزودن قطع به ترک های زیر برد فراهم شده تا در مرحله مونتاژ بر حسب نیاز ضخامت ترکها افزوده شود.



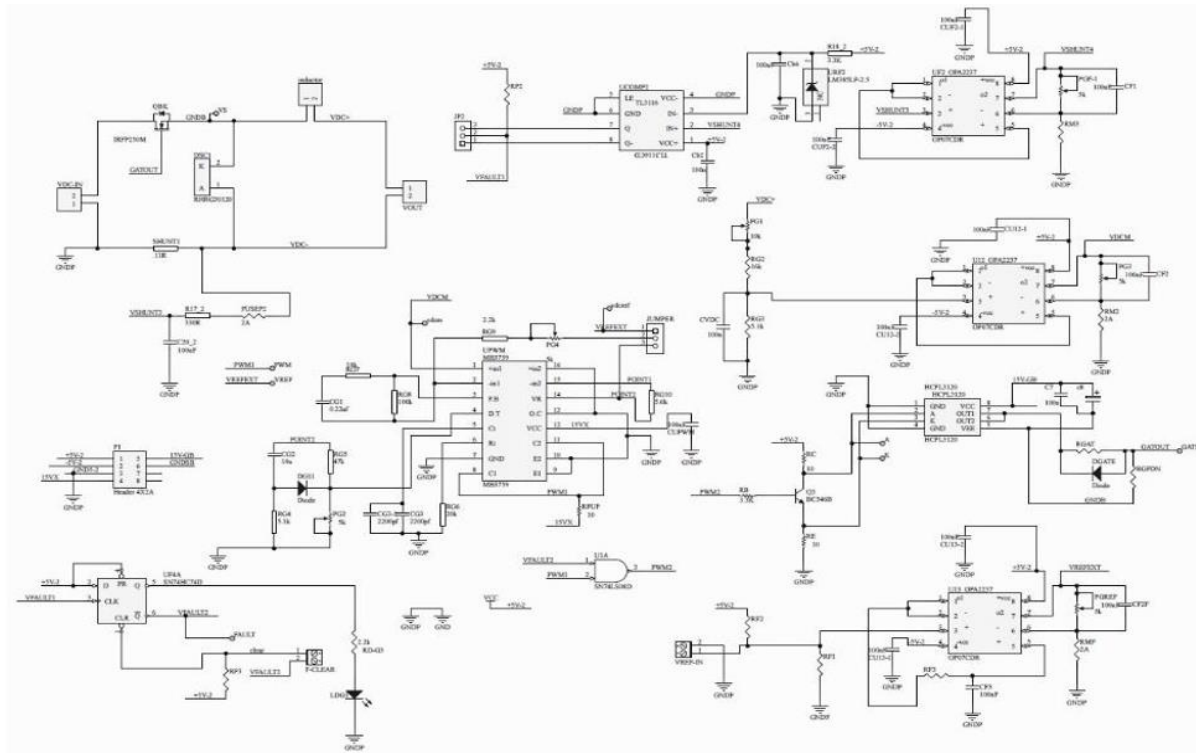
شکل ۳۵-۹- شماتیک مدار H-Bridge



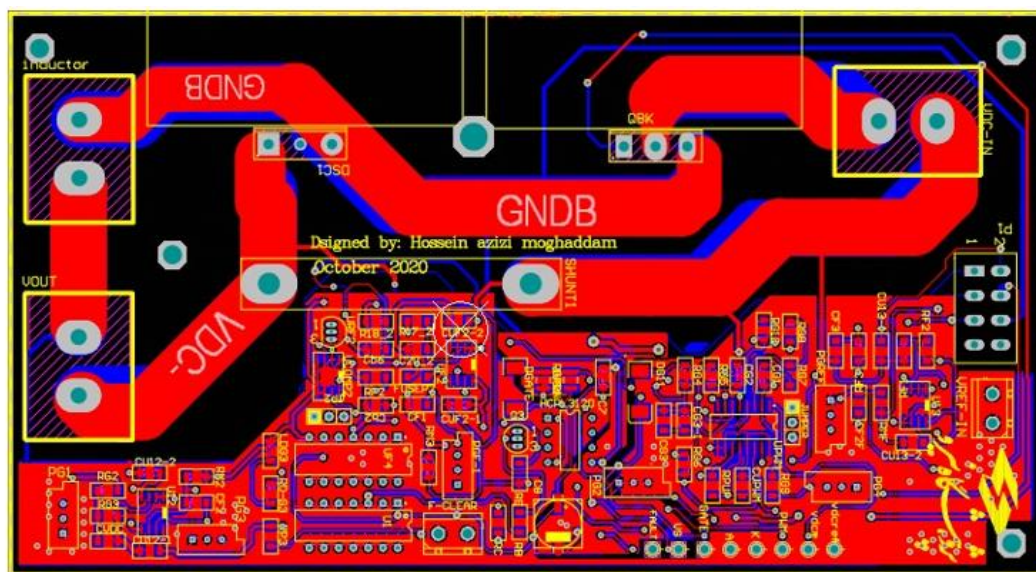
شکل ۳۶-۹- PCB مدار H-Bridge

۳-۷-۲-۹- طراحی شماتیک و مدار PCB

در این بخش شماتیک مدار چاپر و پس از آن PCB این مدار بر اساس اصلاحات نهایی تعیین شده در نسخه دوم برد چاپر تهیه و در شکل ۲-۳۷ و ۲-۳۸ ارائه گردیده است.



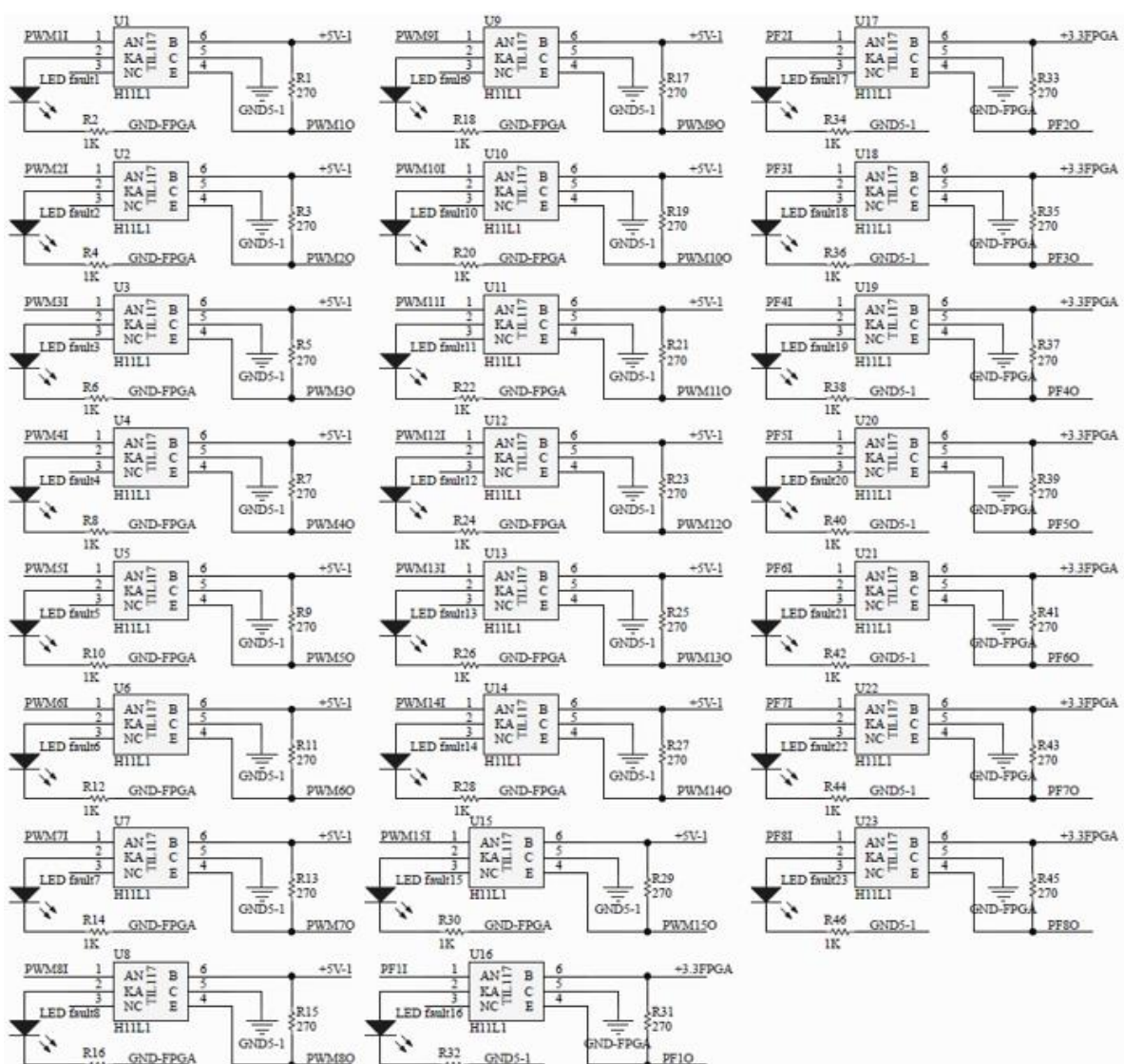
شکل ۳۷-۹- شماتیک مدار چاپر



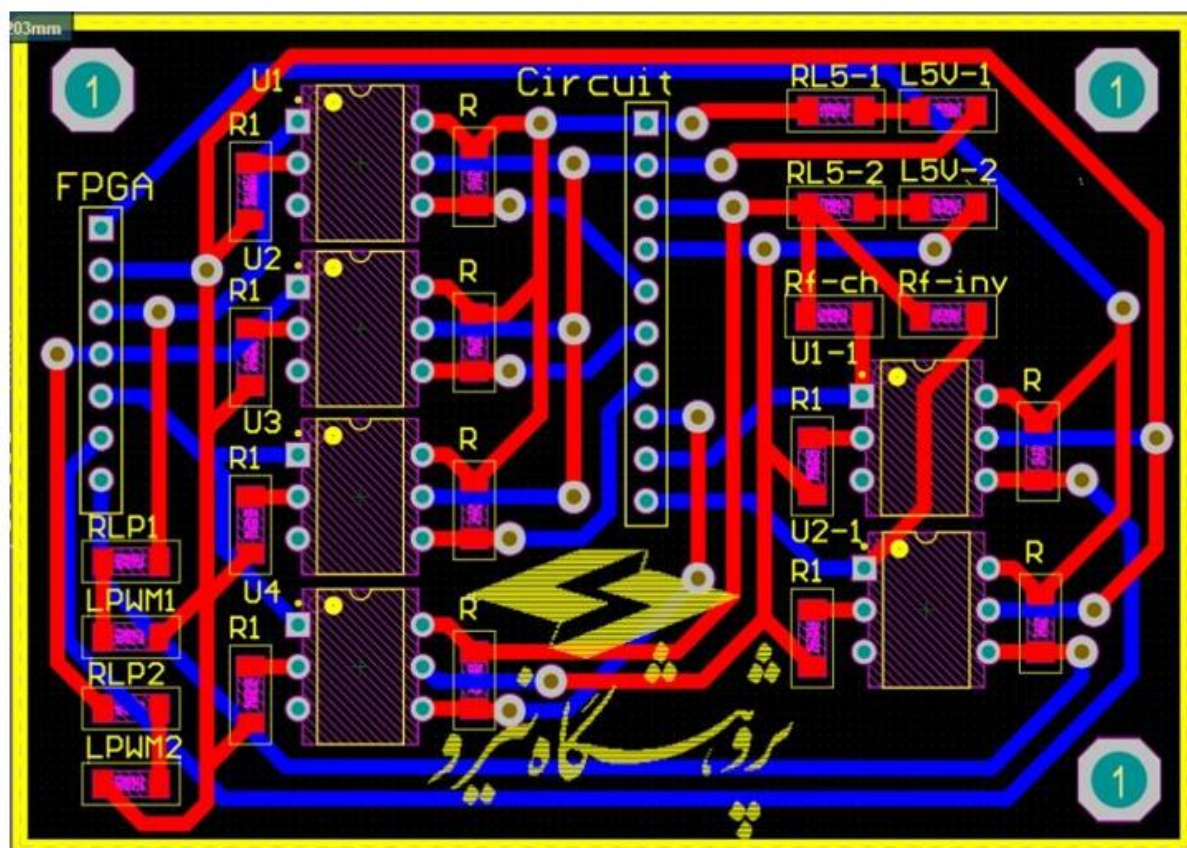
شکل ۳۸-۹- مدار PCB

۹-۲-۷-۴- طراحی شماتیک و مدار رابط FPGA

همانگونه که در بخش های قبل ذکر شد به منظور بهبود نویز پذیری دستگاه و حفاظت از تجهیزات حساس از ایزولاتورهای نوری و زمین های مجزا در بخشهای مختلف استفاده شده است. شکل های ۲-۳۹ و ۲-۴۰ به ترتیب برد واسط ایزوله نوری بین مدارات قدرت و الکترونیک را نمایش می دهد. لازم به ذکر است با وجود تبادیل دوطرفه سیگنالهای کنترلی و سیگنالهای وضعیت خطای دستگاه ، در این برد ارتباط ایزوله دوطرفه بین بخش الکترونیک و قدرت لحاظ شده است.



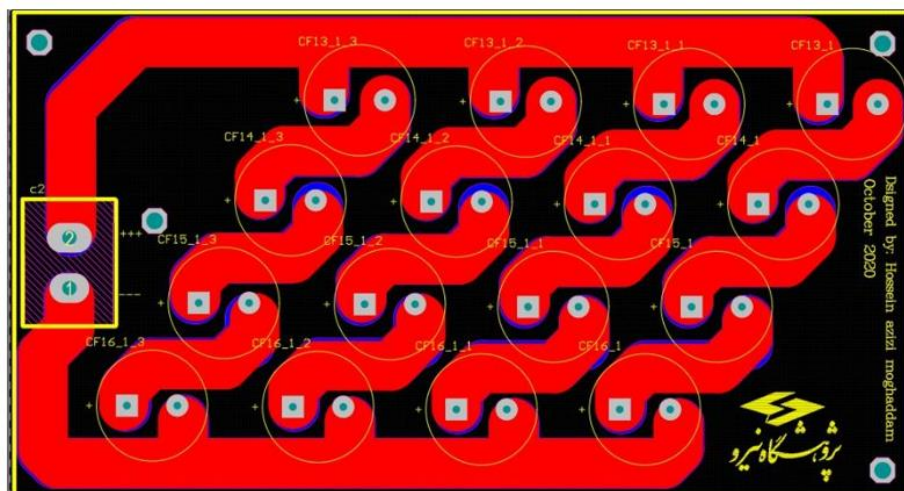
شکل ۳۹-۹- شماتیک مدار رابط FPGA



شکل ۴۰-۹ مدار رابط FPGA

۵-۷-۲-۹- طراحی PCB مدار خازنی متصل به مدار چاپر

با توجه به اینکه سطوح ولتاژ ورودی مبدل ۶۳ سطحی نامتقارن می باشد، در نگاه اول لازم بنظر می رسد برای هر ۵ طبقه Hbridge مدارت بصورت مجزا و متناسب با سطح ولتاژ و جریان طراحی شود. این مساله به معنی طراحی حداقل ۱۵ برد با PCB های مجزا می باشد که می تواند هزینه چاپ PCB و در نتیجه هزینه ساخت را بسیار افزایش دهد. به همین منظور در نسخه نهایی طراحی بردهای دستگاه از یک طراحی یکسان برای هر ۵ طبقه اینورتر چند سطحی استفاده شده است. این موضوع برای برد خازن شین DC نیز صدق می کند. همانگونه که در شکل ۲-۴۱ نشان داده شده برد خازن به نحوی طراحی شده تا امکان سری و موازی سازی مقادیر دلخواه خازن و دستیابی به سطح ولتاژ قایب تحمل و ظرفیت دلخواه در هر یک طبقات پنج گانه اینورتر چند سطحی فراهم شود.



شکل ۴۱-۹- PCB مدار خازنی چاپر

در ادامه پس از طراحی PCB های مدارات مختلف دستگاه چاپ بردها، مونتاژ و ساخت هر یک از بردها بر اساس BOM تهیه شده انجام گردید.

۸-۲-۹ مونتاژ و تست بردهای نسخه سوم

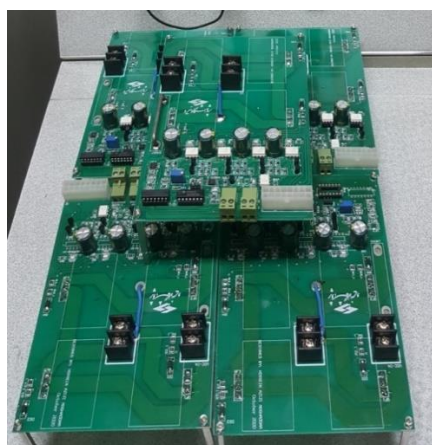
در بخش قبل به انجام تحقیقات اولیه و طراحی مدارات و همچنین پیاده سازی و انجام اصلاحات لازم و رفع ایرادات مدارات مختلف دستگاه پرداخته شد. پس از تهیه مدارات چاپی بردهای نسخه نهایی دستگاه، مونتاژ و تست هر یک از بردها در دستور کار قرار گرفت. شکل ۲-۴۲ برد تغذیه نسخه نهایی آماده جهت نصب داخل تابلو را نمایش می دهد. به منظور کاهش سیم بندی و دسترسی ساده تر به خروجی ترانس تغذیه الکترونیک، برد تغذیه رروی هر یک از ترانس ها نصب شده است.



شکل ۴۲-۹- برد مونتاژ شده تغذیه به همراه ترانس

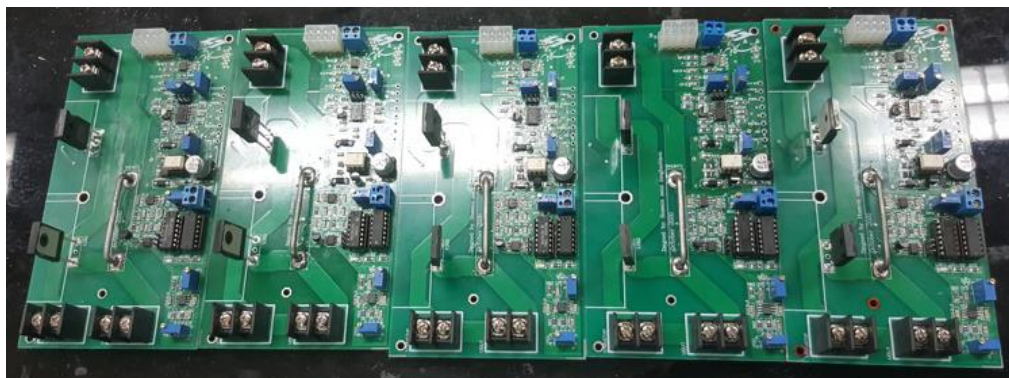
شکل ۲-۴۳ برد مونتاژ شده مازول H-bridge را نمایش می دهد. در مونتاژ این برد سعی گردیده تا با استفاده از کانکتورهای سیگنال و قدرت با استحکام و کیفیت بالا، عملکرد ایمن و قابلیت اطمینان دستگاه را تضمین می کند. همانگونه که قبلاً ذکر شد یکی از قابلیت‌های برد H-bridge تشخیص خطای اضافه جریان و قطع پالسهای اعمالی به گیت سوئیچها پس از تشخیص خطا

می باشد. علاوه بر غیر فعال کردن مازول H-bridge پس از وقوع خطا، طراحی برد به گونه ایی انجام شده که پس از تشخیص خطا یک پالس به برد FPGA ارسال می شود تا پالس های سایر مازول ها نیز غیر فعال گردد. همچنین برای شروع مجدد لازم است تا یک سیگنال clear از برد FPGA به مدار درایو ارسال و در نتیجه ریست شدن مدارات الکترونیک اجازه فعال شدن مجدد اینورتر داده می شود.

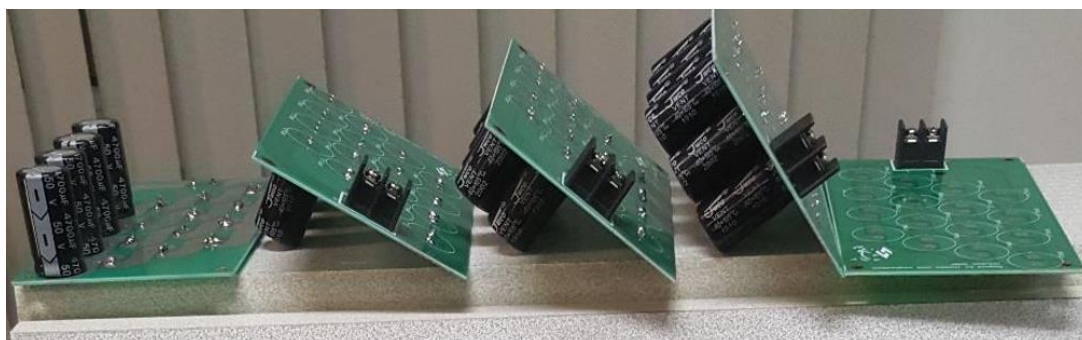


شکل ۴۳-۹- برد مونتاژ شده مدار اینورتر

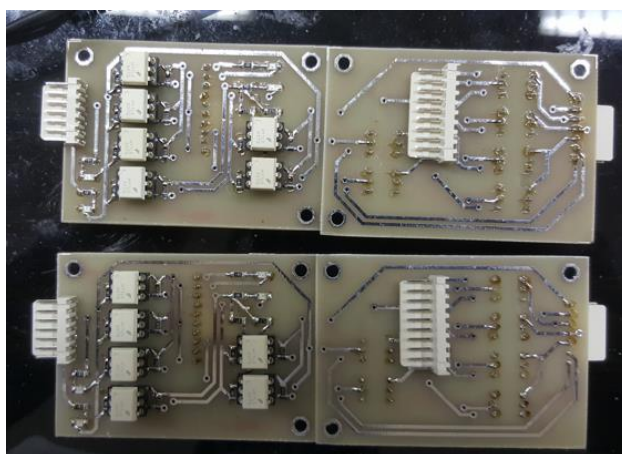
شکل ۴۴-۲ و ۴۵-۲ به ترتیب برد های مونتاژ شده نسخه نهایی مدار چاپر کاهنده و برد فیلتر خازنی شین DC را نمایش می دهد. در مونتاژ نهایی بردها داخل تابلو این دو برد به منظور کاهش طول سیم اتصال شین DC روی یکدیگر نصب می شوند. در هر یک از بردهای Hbridge و برد چاپر از سنسور جریان شانت برای اندازه گیری جریان برگشتی شین DC استفاده می شود.



شکل ۴۴-۹- برد مونتاژ شده مدار چاپر

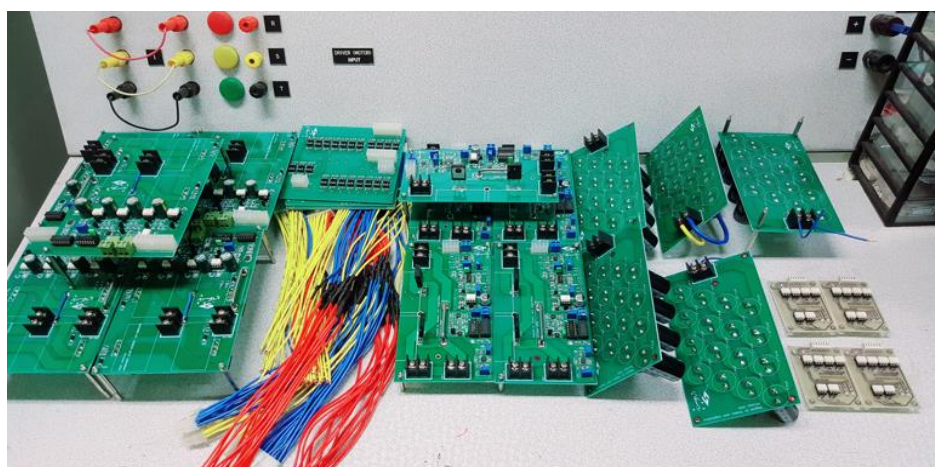


شکل ۴۵-۹ برد مونتاژ شده مدار خازن‌ها



شکل ۴۶-۹ برد مونتاژ شده مدار رابط FPGA

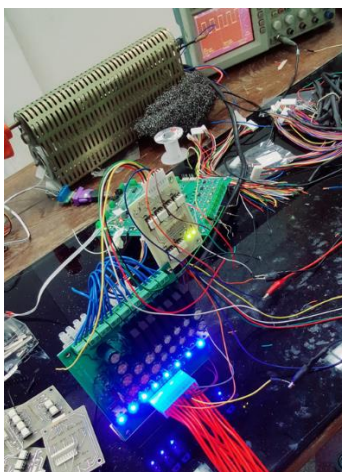
همچنین شکل ۲-۴۶ برد واسط و ایزولاتور نوری بین مدار FPGA و مدار قدرت را نمایش می دهد. شکل ۲-۴۷ کلیه بردهای مونتاژ شده برای کلیه پنج ماژول اینورتر چند سطحی را نمایش می دهد.



شکل ۴۷-۹ نمایی از تمامی بردهای مونتاژ شده

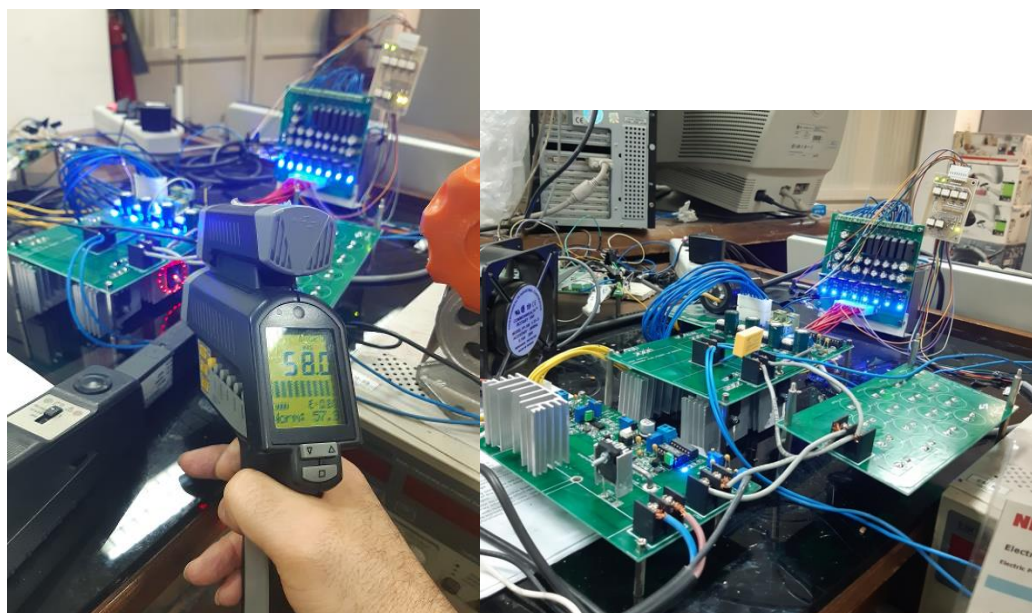
۹-۲-۹ تست و رفع ایرادات بردها

در ادامه هر یک از بردها جهت تایید صحت عملکرد و رفع ایرادات احتمالی مورد تست قرار می‌گیرد. همانطور که در شکل ۲-۴۸ نشان داده شده است مدار تغذیه در اتصال به مدار رابط FPGA مورد تست قرار گرفته و خروجی‌های مختلف تغذیه تست و صحت سنجی و از سوی دیگر صحت عملکرد مدار رابط FPGA مورد تست و بررسی قرار گرفت.

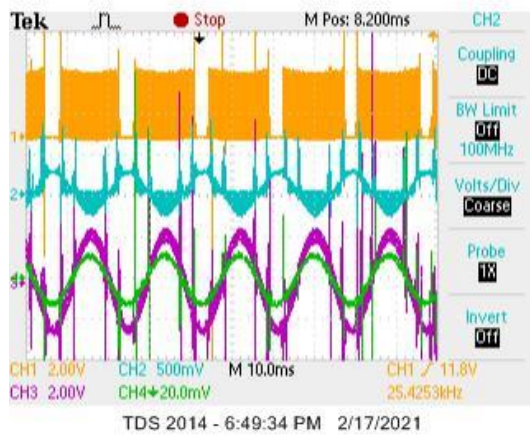


شکل ۴۸-۹- تست مدار تغذیه و مدار رابط FPGA

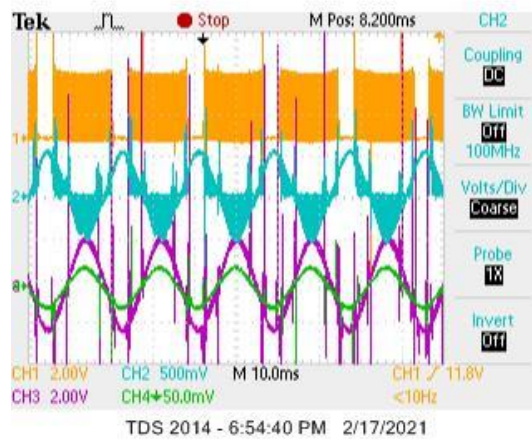
در ادامه مطابق شکل ۲-۴۹، به منظور ارزیابی کلیه مدارات ساخته شده مدار اینورتر و چاپر و سایر مدارات بصورت تجمیعی تست و خروجی هر یک از بخشها در شرایط مختلف جریان بار ارزیابی می‌شود. مقادیر مختلف جریان بار در شکل ۲-۳۲ الف تا و از جریان ۲.۵ آمپر تا ماکزیمم جریان 31 آمپر برای یک بار RL و اندیس مدولاسیون ۱ آورده شده است.



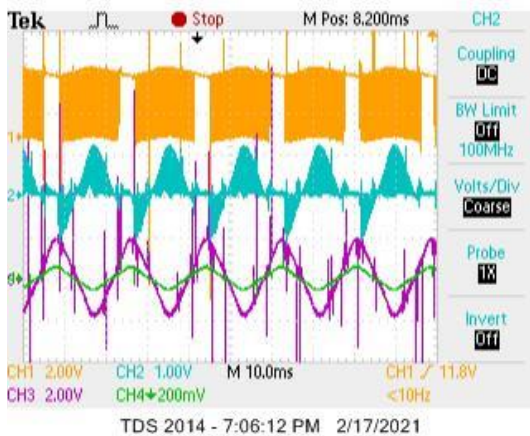
شکل ۴۹-۹- تست مدار چاپر و اینورتر



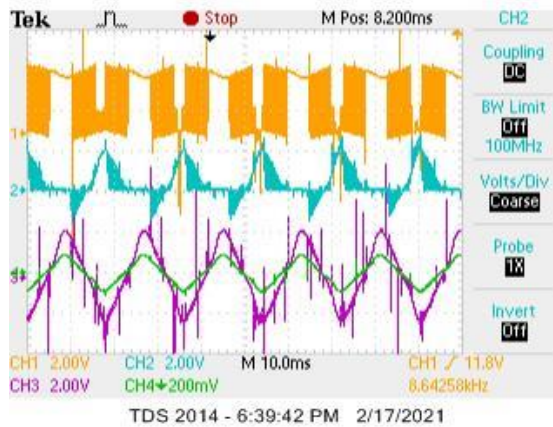
Iload=2.4AMP



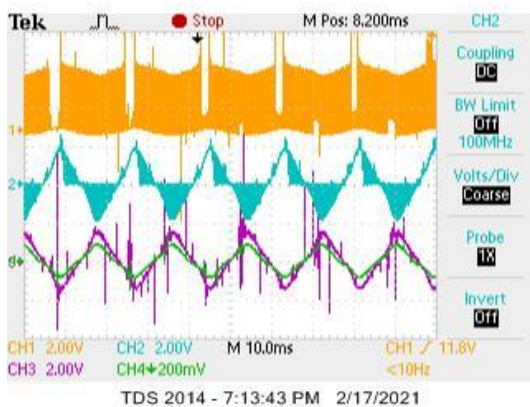
Iload=5AMP



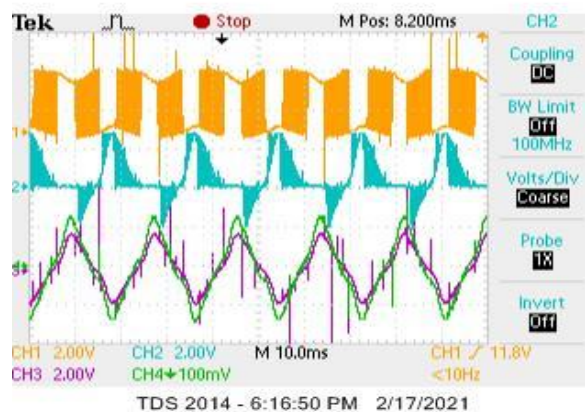
Iload=12AMP



Iload=20AMP for 30sec



Iload=24AMP for 30sec

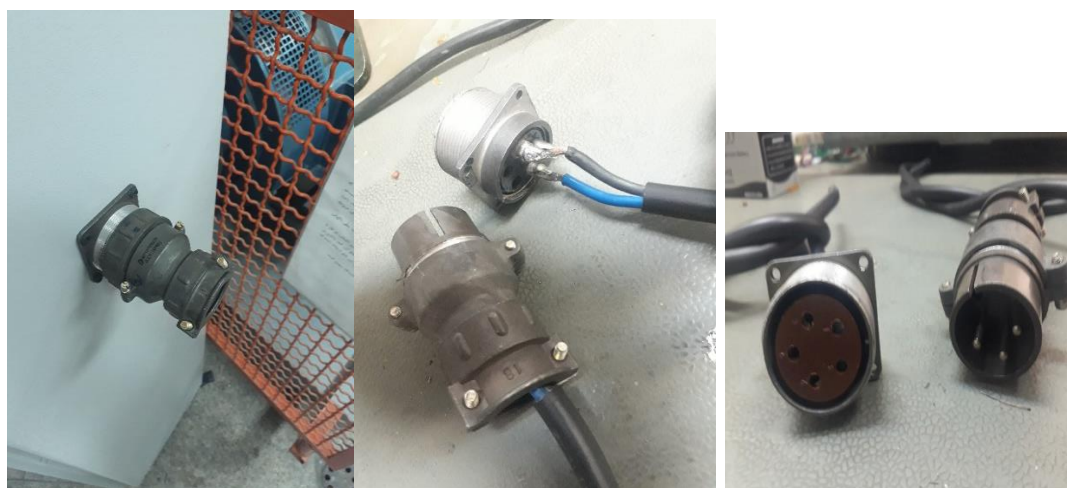


Iload=31AMP for 10sec

شکل ۵۰-۹- تست مدار چاپر و اینورتر برای یک مازول Hbridge

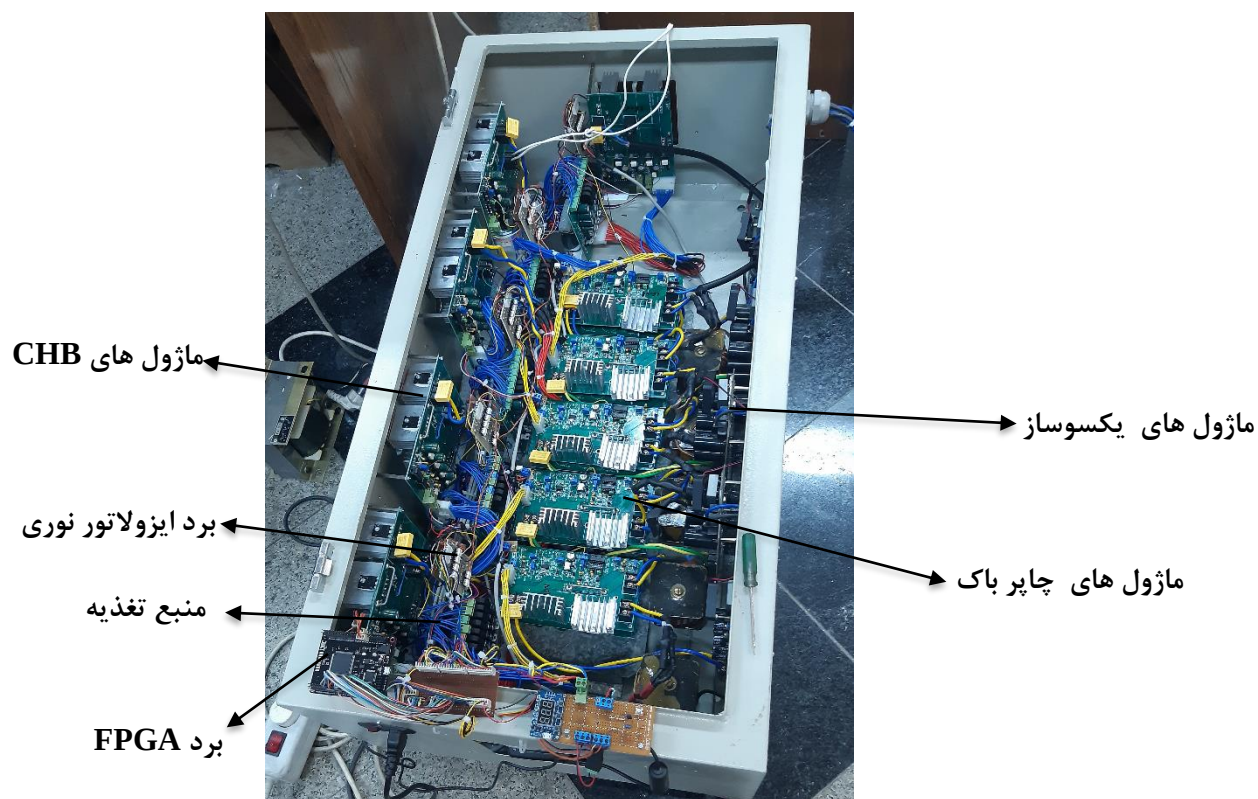
۹-۲-۱۰ تست تجمیعی هر طبقه و مونتاژ نهایی

پس از اتمام مونتاژ و تست اولیه بردها بصورت مجزا، در مرحله بعدی مونتاژ نهایی بردها داخل دستگاه و همچنین انجام تست‌های لازم برای هر طبقه، مونتاژ تجمیعی ماژول‌ها و قراردادی بردها در درون کیس دستگاه انجام گردید. پس از استقرار بردها جهت ارتباط دهی آن‌ها به یکدیگر و همچنین ملاحظات که در انجام سیم کشی‌های میان این بردها می‌بایست در نظر داشت، اقدام به در نظرگیری این ملاحظات در انجام فرایند مونتاژ نموده و همچنین جهت خنک سازی هیت سینک‌های استفاده شده در مدار اینورتر از داکت کشی مسیر تهویه دستگاه استفاده گردیده است. به منظور اطمینان از عملکرد دستگاه و انجام ایمن تستها، مطابق شکل از کانکتورهای قدرت نظامی استفاده گردیده است.



شکل ۵۱-۹- کانکتورهای نظامی

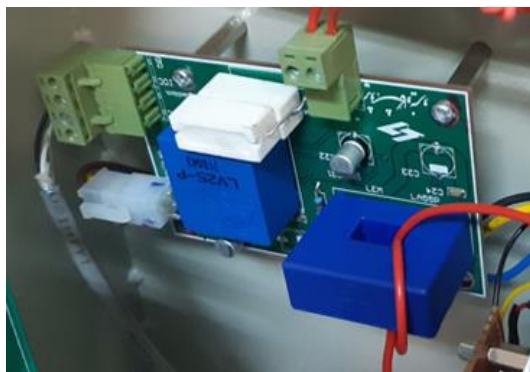
در این بخش به عنوان آخرین بخش از فعالیت‌های انجام شده در مرحله دوم پروژه، ابتدا برای هر طبقه متناسب با سطح ولتاژی مورد نظر پنج گانه تجمیع مداری را مطابق شکل ۹-۵۱ انجام داده و تست هر یک از پنج ماژول مبدل H-bridge و مبدل چاپر ورودی بصورت مجزا انجام گردیده است. شکل های ۲-۵۲ و ۲-۵۳ ست آپ نهایی پیاده سازی شده دستگاه B-H متر را نمایش می دهد.



شکل ۵۲-۹- مونتاژ نهایی بخش آمپلی فایر دستگاه B-H متر مبتنی بر اینورتر ۶۳ سطحی CHB نامتقارن

۹-۲-۱۱ برد سنسور

به منظور اندازه گیری ولتاژ و جریان نمونه تحت تست مطابق شکل ۲-۵۳ و ۲-۵۴ از سنسورهای ولتاژ و جریان اثر هال استفاده شده است. دقت عملکرد دستگاه اندازه گیری پیاده سازی شده علاوه بر دقت در ساخت مدارات مغناطیسی و تامین تغذیه خالص سینوسی به ورودی دستگاه، به دقت و کیفیت سنسورهای خروجی دستگاه نیز وابسته می باشد. در این پروژه از سنسورهای اثر هال LA55P و LV25P به ترتیب به عنوان سنسور ولتاژ و جریان استفاده شده است.



شکل ۵۳-۹- سنسور ولتاژ و جریان سیم پیچ اولیه



شکل ۵۴-۹- سنسور ولتاژ ثانویه

۹-۳- تولید پالس اینورتر ۶۳ سطحی با استفاده از FPGA

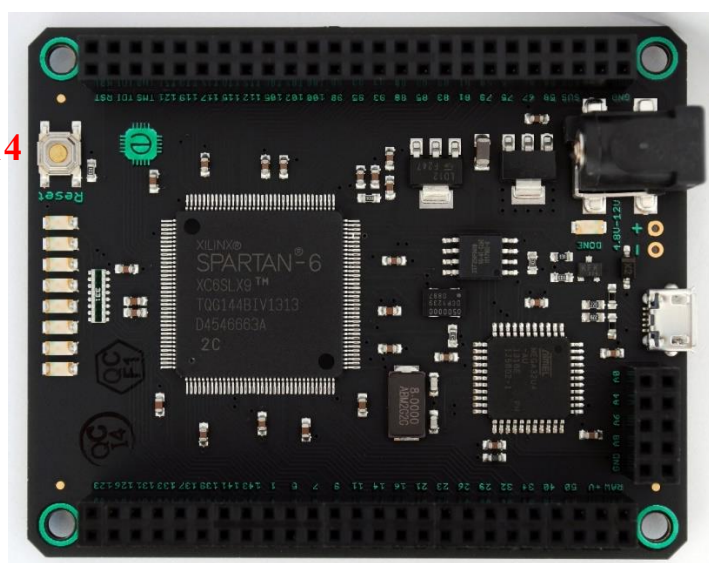
به منظور تولید پالسهای مورد نیاز اینورتر چند سطحی از چیپ FPGA-Spartan 6 استفاده شده است. سرعت بالا و قابلیت برنامه نویسی سخت افزاری بر روی تراشه‌های FPGA به صورت تعریف اتصالات گیت ها و بلوک های منطقی به هم یکی از قابلیت های اصلی این نوع از چیپ ها می باشد. زبان برنامه نویسی در FPGA ، زبان برنامه نویسی توسعه سخت افزار یا HDL (Hardware Development Language) است که شامل دو زبان رایج HDL عبارتند از VHDL و Verilog می باشد. در جدول ۱-۶ مقایسه کلی بین زبان Verilog و VHDL انجام شده است.

جدول ۳-۹- مقایسه کلی بین زبان VHDL و Verilog

Verilog	VHDL
دارای قابلیت های کمتر	دارای قابلیت های بیشتر
ساده تر و یادگیری آسان	پیچیده تر و یادگیری سخت
ساخته شده توسط بخش صنعتی	ساخته شده توسط بخش نظامی

با وجود تفاوت‌های گفته شده، Syntax دو زبان بسیار شبیه به هم است. در این پروژه به منظور پیاده سازی پالسهای سوئیچینگ ماژول آمپلی فایر از برد Mojo V3 ساخته شده توسط شرکت Alchitry استفاده شده است. این برد دارای تراشه Spartan 6 FPGA و میکروکنترلر Atmel Mega 32 است که در شکل ۲-۵۵ نمایش داده شده است.

Spartan6 TQ114



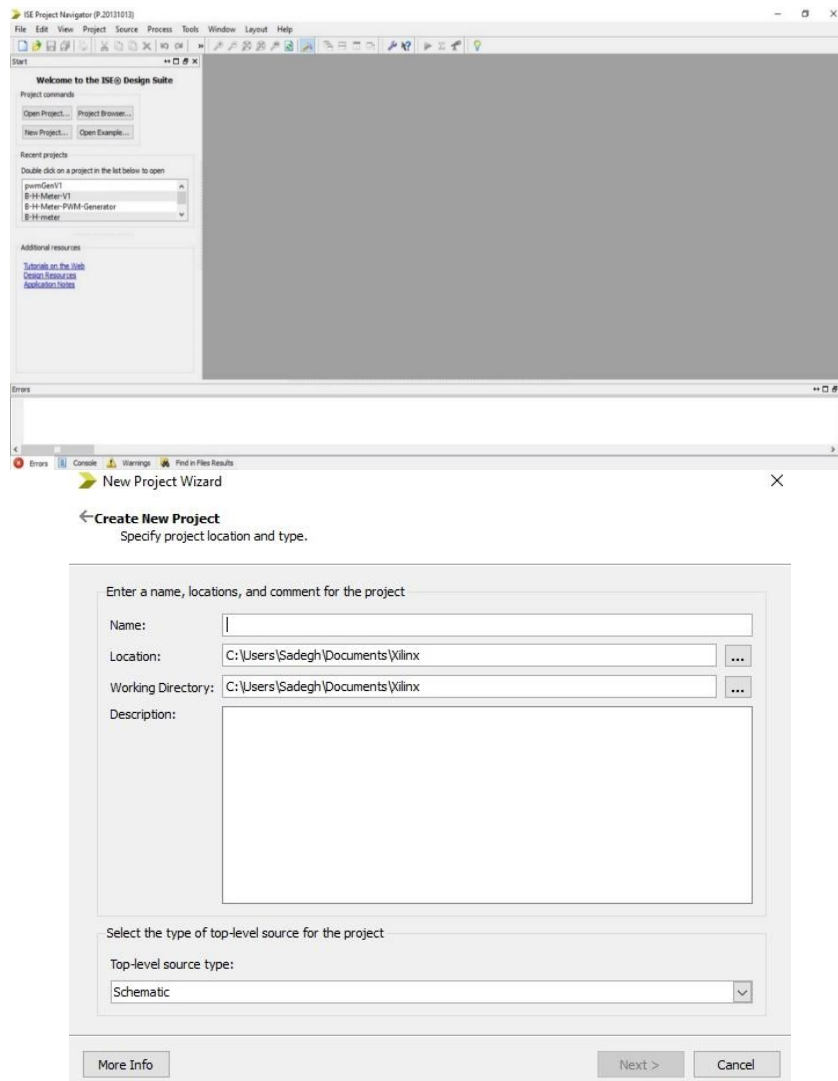
شکل ۵۵-۹- برد Mojo V3 تولید شده توسط شرکت Alchitry (alchitry.com)

تراشه SPARTAN 6 FPGA ساخت شرکت Xilinx است. این شرکت برای برنامه‌نویسی این خانواده از تراشه‌های برنامه نسخه ۱۴.۷ Xilinx ISE را ارائه داده است. لازم به ذکر است این نسخه از برنامه دیگر به روزرسانی نمی‌شود و برای برنامه‌نویسی تراشه‌های جدیدتر این شرکت نیاز به استفاده از برنامه جدید ارائه شده به نام Vivado Design Suit است. در ادامه به طور خلاصه ای چگونگی کار با Xilinx ISE پرداخته می‌شود.

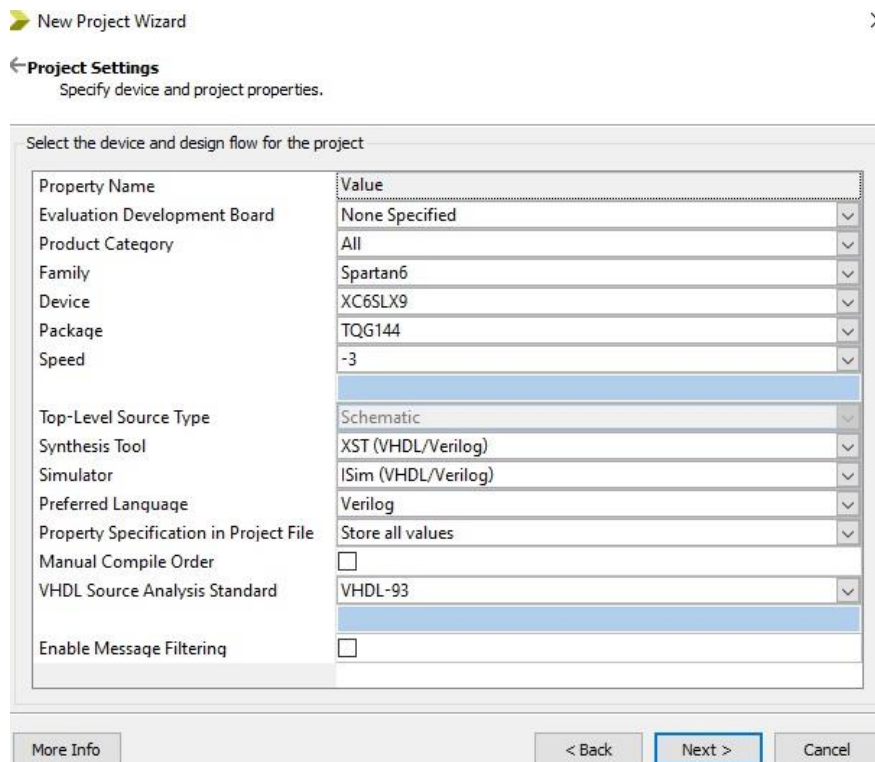
۹-۳-۱ نحوه برنامه‌نویسی برای تراشه FPGA با Xilinx ISE

پس از نصب برنامه Xilinx ISE بر روی کامپیوتر و اجرای آن صفحه شکل ۹-۵۶ پدیدار می‌شود. با انتخاب مسیر File > New Project پروژه جدیدی باز ایجاد می‌شود. بعد از نام گذاری پروژه باید نوع اصلی ترین ماژول که بقیه ماژول‌ها در آن قرار می‌گیرند (Top Level) مشخص شود. در این پروژه برای راحتی دنبال کردن کار این فایل از نوع Schematic انتخاب شده است.

از آن در مرحله بعد، مشخصات تراشه‌ای که از آن استفاده می‌شود و همچنین نوع شبیه‌ساز باید مشخص شود. برد Mojo V3 که در این پروژه مورد استفاده است دارای FPGA از خانواده Spartan 6 و نوع XC6SLX9 و پکیج TQG144 است که همگی بر روی تراشه نوشته شده‌اند (۲-۵۷).



شکل ۵۶-۹ صفحه اول برنامه Xilinx ISE



شکل ۵۷-۹- ایجاد پروژه جدید در Xilinx ISE

سرعت پردازش نیز 3- طبق datasheet تراشه انتخاب می‌شود. شبیه ساز نیز Isim و برای آسانی کار زبان برنامه نویسی Verilog انتخاب شده است. بعد از آن مراحل ایجاد پروژه جدید تمام می‌شود.

پس از ایجاد پروژه باید ماژول‌ها یک به یک اضافه شوند. ماژول‌ها همان بسته‌هایی هستند که کار یک سخت افزار را انجام می‌دهند. به عبارت دیگر آنها سخت افزارهایی هستند که با اتصال بلوک‌های منطقی درون تراشه ایجاد می‌شوند. در برنامه Xilinx ISE ماژول‌ها می‌توانند از انواع مختلف باشند که چهار نوع مورد استفاده در این پروژه عبارتند از:

Schematic: در این نوع ماژول می‌توان تراشه را به صورت نمادین دید و اضافه کرد و با وصل کردن سیم اتصالات بین تراشه‌های مورد استفاده برقرار کرد. همچنین می‌توان ورودی و خروجی ماژول اصلی را به صورت دیداری اضافه کرد و اتصالات و ماژول‌ها را نام گذاری نمود.

Verilog یا VHDL: این نوع ماژول از ابتدا با یکی از زبان‌های برنامه نویسی HDL نوشته می‌شوند. البته می‌توان از روی آنها شماتیک ساخت تا در فایل شماتیک نیز استفاده شود.

IP Core (Intellectual Property): این نوع ماژول‌ها تراشه‌های پر کاربرد و پیچیده هستند که توسط شرکت Xilinx نوشته شده اند و می‌توان با استفاده از یک Wizard نوع تراشه و مشخصات آن را انتخاب نمود. پس از آن می‌توان از آنها نسخه شماتیک نیز ساخت.

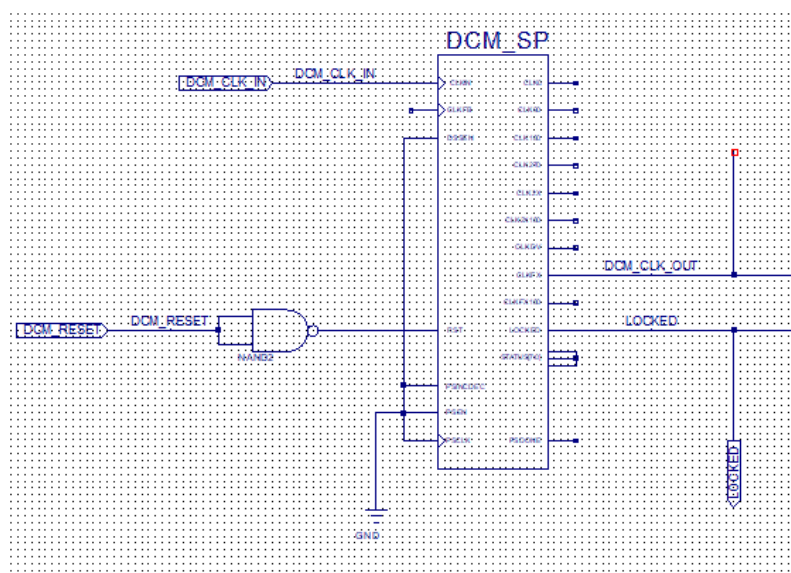
Verilog Test Bench یا VHDL: این نوع ماژول‌ها برای اجرای شبیه سازی استفاده می‌شوند.

اصلی‌ترین ماژول یا سخت‌افزار که بقیه سخت‌افزارها در آن قرار می‌گیرند طبق انتخاب در مرحله قبلی از نوع شماتیک (Schematic) است که با انتخاب مسیر Project < add new source یک ماژول شماتیک ساخته می‌شود. پس از آن ماژول‌های مورد نظر یک به یک ساخته و با ساختن شماتیک از آنها به فایل اصلی اضافه می‌شوند. در ادامه هر یک از ماژول‌های ساخته شده در پروژه توضیح داده خواهند شد.

تولید پالس PWM برای یک ماژول Hbridge

در این بخش به بخش‌ها (ماژول‌ها) مختلف برنامه تولید PWM جهت اعمال به کلیدهای قدرت موجود در ACHB پرداخته می‌شود.

Clock اصلی سیستم یا DCM_SP مطابق شکل (۵۸-۹)



شکل ۵۸-۹- ماژول DCM_SP

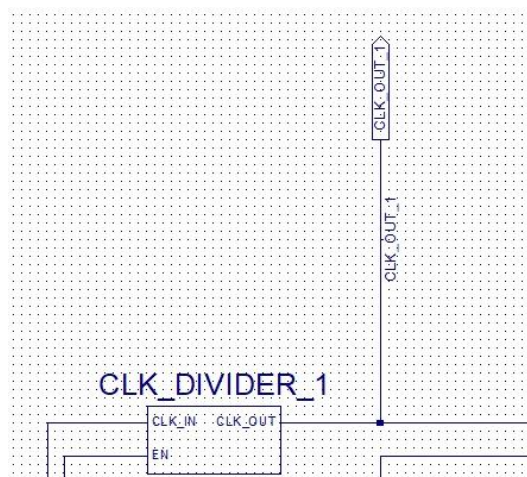
مهمترین قسمت هر سیستم دیجیتال دارای حافظه ساعت یا Clock اصلی سیستم است که سرعت پردازش و انجام عملیات آن سیستم را مشخص می‌کند. با مراجعه به شماتیک برد Mojo V3 مشاهده می‌شود که منبع clock متصل به تراشه FPGA ساعتی با فرکانس 50MHz است.

این سرعت برای پردازش و تولید پالس‌های PWM در فرکانس‌های بالا کم است. پس با مراجعه به دستورالعمل Spartan 6 clocking resources می‌توان یافت که سخت‌افزاری درون تراشه وجود دارد که می‌تواند سرعت clock ورودی را افزایش دهد. با مطالعه بیشتر این دستورالعمل می‌توان یافت که بیشینه سرعت ممکن برای خروجی این سخت‌افزار 375MHz است. پس با اضافه کردن این ماژول از نمادهای موجود در برنامه و دوبار کلیک بر روی آن می‌توان نسبت فرکانس خروجی به ورودی را عدد صحیح نزدیک به بیشینه فرکانس ممکن یعنی 7 برابر را وارد کرد تا سرعت clock سیستم به 350MHz برسد.

CLK_DIVIDER_1 و CLK_DIVIDER_2 (شکل ۲-۵۹)

این ماژول‌ها که به زبان Verilog نوشته شده‌اند وظیفه تقسیم فرکانس 350MHz خروجی ماژول DCM_SP را به فرکانس‌های کمتر دارند تا شمارنده‌ای که موج مثلثی و سینوسی را تولید می‌کنند قابل تنظیم باشد. طریقه کار این ماژول (شکل ۲-۲)

۵۷) به این ترتیب است که با تنظیم عدد ثابت درون آن، به اندازه آن عدد لبه‌های بالا رونده clock ورودی را می‌خواند و هر بار بعد از رسیدن به آن عدد خروجی را از حالت منطقی قبل برعکس می‌کند تا clock با فرکانس دلخواه ایجاد شود.



شکل ۵۹-۹- مازول‌های CLK_DIVIDER_1 و CLK_DIVIDER_2.

لازم به ذکر است چون موج‌های سینوسی و مثلثی به صورت دیجیتال هستند پس به صورت پله‌های ریز تولید می‌شوند. با توجه به محدودیت سرعت clock سیستم و دقت لازم برای تولید این موج‌ها، هر موج در یک پریود دارای ۵۱۲ عدد پله است. با دانستن این مطلب می‌توان فرمول زیر را برای خروجی‌های ممکن مازول‌های تقسیم کننده clock را بدست آورد. نمونه‌ای از برخی فرکانس‌های خروجی در جدول ۹-۴ و شکل ۹-۶۰ ارائه شده است.

جدول ۹-۴- برخی فرکانس‌های ممکن موج‌های خروجی (سینوسی و مثلثی)

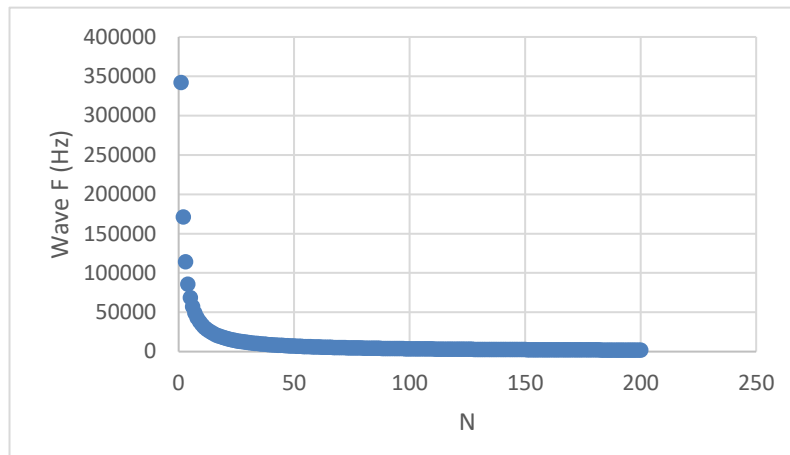
N.	T (s)	Clk F (Hz)	Wave F(Hz)
1	5.71429E-09	175000000	341796.9
2	1.14286E-08	87500000	170898.4
3	1.71429E-08	58333333	113932.3
4	2.28571E-08	43750000	85449.22
5	2.85714E-08	35000000	68359.38
6	3.42857E-08	29166667	56966.15
7	0.00000004	25000000	48828.13
8	4.57143E-08	21875000	42724.61
9	5.14286E-08	19444444	37977.43
10	5.71429E-08	17500000	34179.69
11	6.28571E-08	15909091	31072.44
12	6.85714E-08	14583333	28483.07
13	7.42857E-08	13461538	26292.07
14	0.00000008	12500000	24414.06
15	8.57143E-08	11666667	22786.46

16

9.14286E-08

10937500

21362.3



شکل ۶۰-۹ روند تغییرات فرکانس خروجی به ازای تقسیم فرکانس ورودی

ورودی و خروجی های این بلوک به شرح زیر می باشد:

ورودی‌ها:

CLK_IN: سیگنال Clock با فرکانس 350MHz خارج شده از ماژول DCM_SP

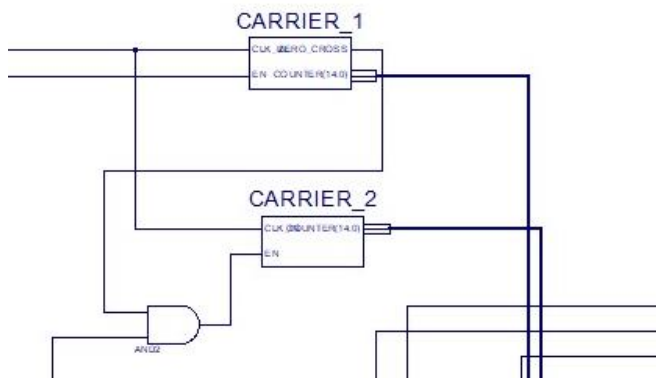
EN: سیگنال EN که از سیگنال DCM_SP Locked آمده است.

خروجی‌ها:

CLK_OUT: سیگنال clock با فرکانس کمتر از 350MHz

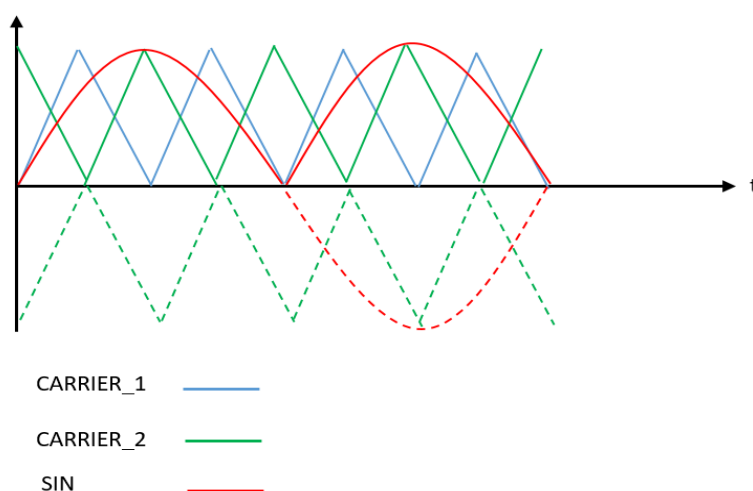
: CARRIER_2 و CARRIER_1

این دو ماژول که با زبان برنامه‌نویسی Verilog نوشته شده اند وظیفه تولید موج مثلثی حامل (Carrier) را در روش SPWM دارند (شکل ۹-۶۱). هر دو ماژول در واقع شمارنده های بالا - پایین شمار هستند که در هر بالا رفتن و یا پایین آمدن از صفر تا 2^{14} با پله های ۶۴ تایی (۲۵۶ پله) و بالعکس را می‌شمارند. ماژول اول موج مثلثی مقایسه شونده با نیم سیکل مثبت موج سینوسی و ماژول دوم موج مثلثی مقایسه شونده با نیم سیکل منفی موج سینوسی را تولید می کند. برای ساده‌تر و بهینه‌تر شدن طراحی، هیچ عدد منفی در برنامه نیامده است. در عوض موج سینوسی در هر دو سیکل از 0 تا قله و بالعکس را می‌شمارد اما هر بار در سیکل منفی می‌رود سیگنالی را High می‌کند تا سیکل مثبت و منفی از هم مشخص شوند.



شکل ۶۱-۹- مازول های CARRIER_1 و CARRIER_2

مطابق شکل ۲-۶۲، هر دو موج مثلثی نیز همیشه مثبت هستند اما هر کدام در سیکل خود با موج سینوسی مقایسه می‌شود. چون در عمل موج CARRIER_2 در واقع شیفت داده شده CARRIER_1 به زیر محور زمان و در نتیجه منفی است با قرینه کردن آن به بالای محور زمان می‌توان مشاهده کرد که زمانی که CARRIER_1 به صفر می‌رسد CARRIER_2 باید از قله به پایین بشمارد و بالعکس. برای این منظور سمازول CARRIER_1 خروجی دارد که نشان می‌دهد اولین بار به صفر رسیده است.



شکل ۶۲-۹- موج‌های CARRIER_1، CARRIER_2، SIN

ورودی و خروجی های این مازول به شرح زیر می باشد:

CARRIER_1

ورودی ها:

- CLK_IN: سیگنال Clock با فرکانس دلخواه خارج شده از CLK_DIVIDER_1
- EN: سیگنال EN که از سیگنال DCM_SP Locked آمده است.

خروجی ها:

- COUNTER: عدد شمارنده که از 0 تا 2^{14} و بالعکس را با پله‌های ۶۴ تایی می شمارد.
- ZERO_CROSS: اولین دفعه که CARRIER_1 به عدد صفر می‌رسد این سیگنال High می‌شود که نشان دهنده این است که CARRIER_2 باید شروع به شمارش از قله سیگنال به پایین کند.

ورودی ها:

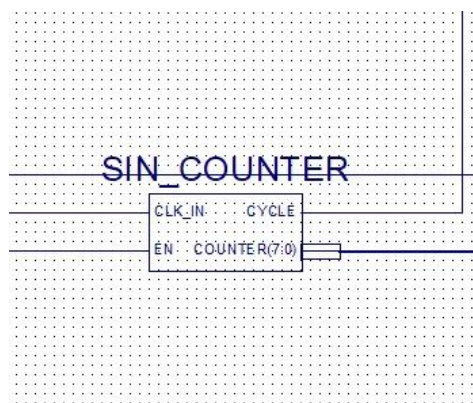
- CLK_IN: سیگنال Clock با فرکانس دلخواه خارج شده از CLK_DIVIDER_1
- EN: سیگنال EN که از AND سیگنال DCM_SP Locked و ZERO_CROSS مازول CARRIER_1 آمده است.

خروجی:

- COUNTER: عدد شمارنده که از 2^{14} تا 0 و بالعکس را با پله‌های ۶۴ تایی می‌شمارد.

• SIN_COUNTER :

این ماژول که با زبان برنامه‌نویسی Verilog نوشته شده است یک شمارنده بالا-پایین شمار است که از 0 تا 128 و بالعکس را با پله‌های واحد می‌شمارد (شکل ۲-۶۳). با اینکار موج سینوسی از 0 تا 90 درجه به 129 عدد تقسیم می‌شود تا دقت موج دیجیتال بالا باشد. عدد شمارش شده در مرحله بعد به یک LUT داده می‌شود تا مقدار سینوس متناظر با آن مشخص شود. همانطور که گفته شد، برای ساده‌تر و بهینه‌تر شدن طراحی، هیچ عدد منفی در برنامه نیامده است. در عوض موج سینوسی در هر دو سیکل از 0 تا قله و بالعکس را می‌شمارد اما هر بار در سیکل منفی می‌رود سیگنال CYCLE را High می‌کند تا سیکل مثبت و منفی از هم مشخص شوند.



شکل ۶۳-۹- ماژول SIN_COUNTER

ورودی و خروجیهای این ماژول عبارتند از:

ورودی‌ها:

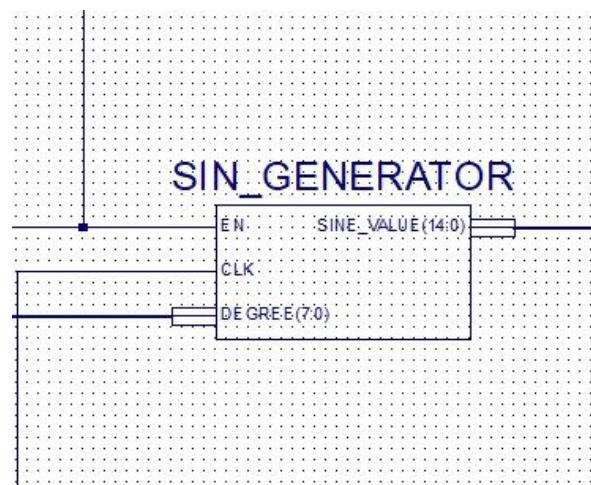
- CLK_IN*: سیگنال Clock با فرکانس دلخواه خارج شده از CLK_DIVIDER_2
- EN: سیگنال EN که از سیگنال DCM_SP Locked آمده است.

خروجی‌ها:

- COUNTER: عدد شمارنده که از 0 تا 128 و بالعکس را با پله‌های واحد می‌شمارد.
- CYCLE: هر بار موج سینوسی در سیکل مثبت قرار دارد این سیگنال Low و هر بار در سیکل منفی قرار دارد High می‌شود.

: SIN_GENERATOR

عدد شمارش شده در ماژول SIN_COUNTER که نشان دهنده درجه موج سینوسی است در مرحله بعد به ماژول SIN_GENERATOR داده می‌شود که یک LUT است تا مقدار سینوس متناظر با آن مشخص شود. این ماژول نیز زبان برنامه‌نویسی Verilog نوشته شده است (شکل ۹-۶۴). برای استفاده نکردن از اعداد اعشاری و داشتن دقت مطلوب، مطابق شکل ۹-۶۳ عدد سینوس هر زاویه در 2^{14} ضرب شده است.



شکل ۶۴-۹- ماژول SIN_GENERATOR

N		Scaled SIN ($X 2^{14}$)
0	→	0
1	→	201
2	→	402
3	→	603
4	→	804
5	→	1005
6	→	1205
.		.
.		.
.		.

شکل ۶۵-۹- روش تولید موج سینوسی با استفاده از LUT

ورودی و خروجی های این ماژول عبارتند از:

ورودی ها:

- CLK_IN: سیگنال Clock با فرکانس دلخواه خارج شده از CLK_DIVIDER_2
- EN: سیگنال EN که از سیگنال Locked DCM_SP آمده است.

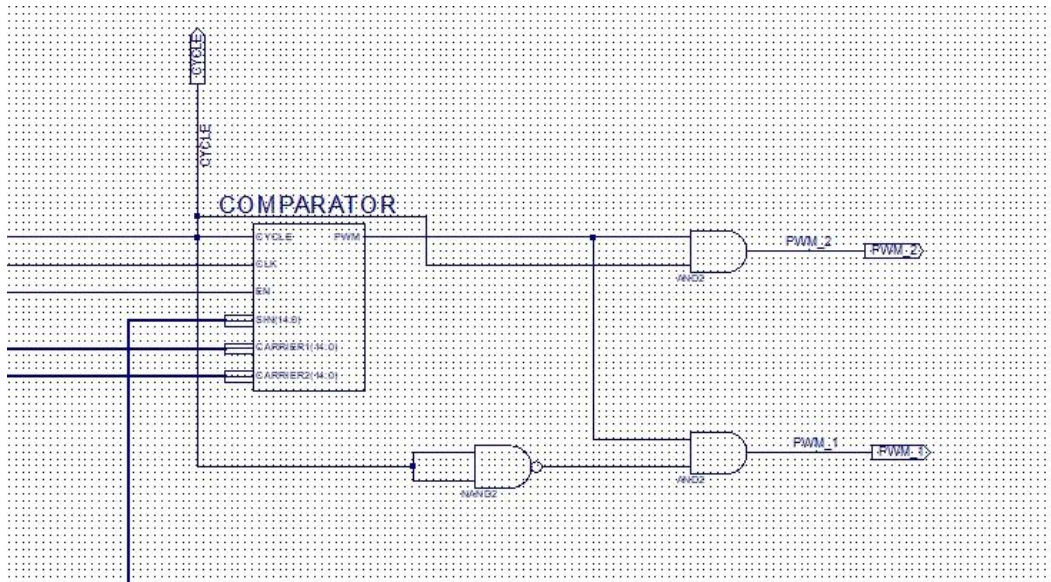
خروجی:

- SINE_VALUE: عدد متناظر سینوس که از 0 تا 2^{14} .

: COMPARATOR

همانگونه که در شکل ۲-۶۶ نمایش داده شده این ماژول که با زبان برنامه نویسی Verilog نوشته شده است وظیفه مقایسه موج سینوسی با موج مثلثی اول در نیم سیکل مثبت و موج مثلثی دوم در نیم سیکل منفی را دارد و در صورت بیشتر بودن

مقدار موج سینوسی از مثلثی خروجی PWM را High و در غیر این صورت آن را Low کند. در نهایت سیگنال PWM_1 که حاصل AND سیگنال PWM با عکس CYCLE است خروجی ماژول در نیم سیکل مثبت و PWM_2 که حاصل AND سیگنال PWM با CYCLE است خروجی ماژول در نیم سیکل منفی خواهد بود.



شکل ۶۶-۹- ماژول COMPARATOR

ورودی و خروجی این ماژول عبارتند از:

ورودی‌ها:

CLK_IN : سیگنال Clock با فرکانس دلخواه خارج شده از DCM_CLK_OUT

EN : سیگنال EN که از سیگنال DCM_SP Locked آمده است.

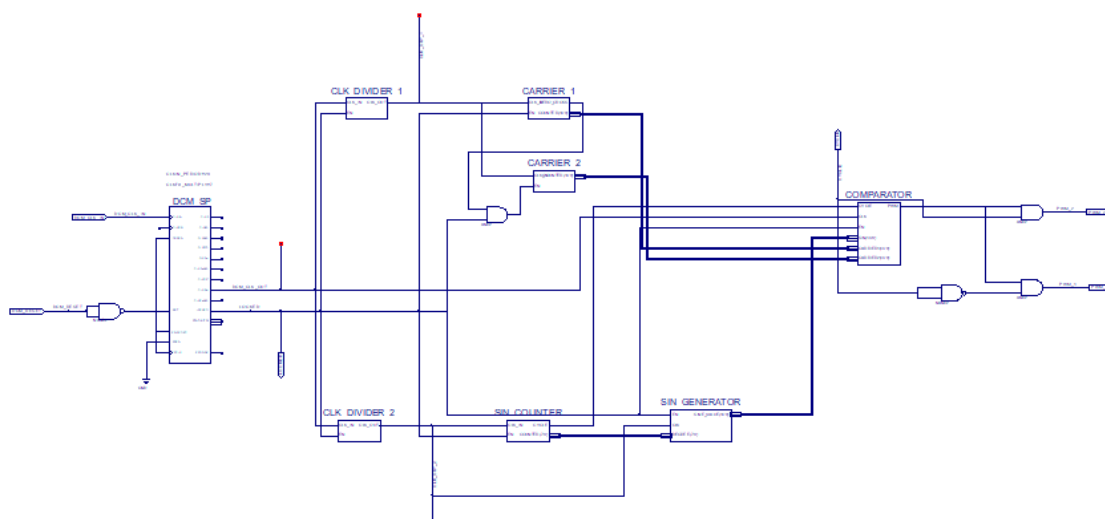
CYCLE : خروجی CYCLE از ماژول SIN_COUNTER است که نشان می‌دهد موج سینوسی در چه نیم سیکلی قرار دارد.

SINE : مقدار موج سینوسی

CARRIER_1 : مقدار موج مثلثی CARRIER_1

CARRIER_2 : مقدار موج مثلثی CARRIER_2

شکل ۲-۶۷ پیاده سازی مولد موج PWM برای یکی از ماژول‌های Hbridge را نمایش می‌دهد. لازم به ذکر است به منظور عملکرد ایمن سوئیچ‌های ماسفت در هر یک از ساق‌های اینورتر پالس‌های اعمالی به گیت سوئیچ‌ها از dead time استفاده شده تا مانع از روشن شدن همزمان دو سوئیچ روی یک ساق گردد

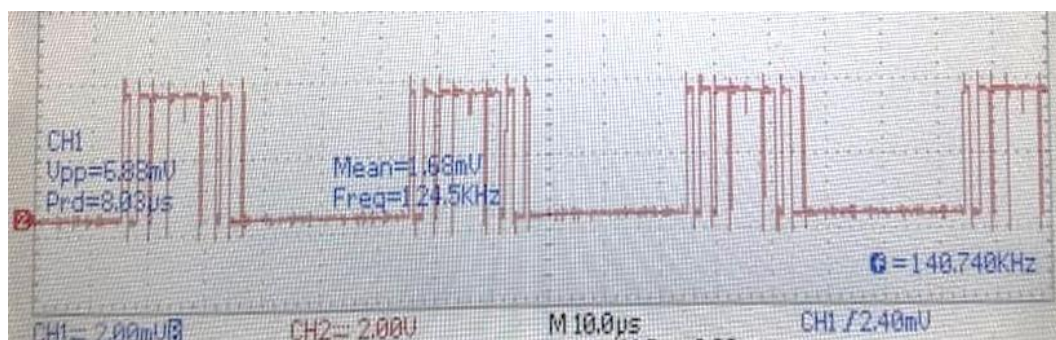


۱-۱-۳-۹- شیه سازی

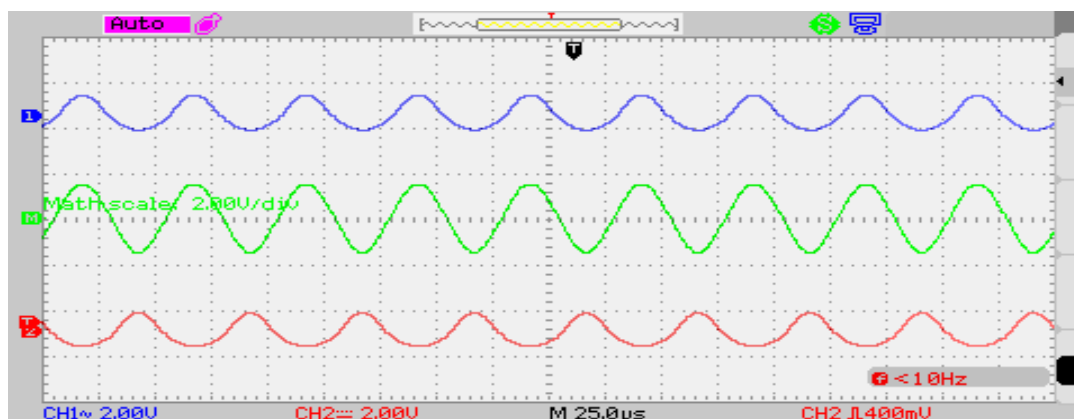
The timing diagram illustrates the relationship between various signals over an 80 us period. The signals are:

- DCM_CLK_OUT**: A green signal that is high from 0 to approximately 20 us, then drops to low.
- LOCKED**: A green signal that is high from 0 to approximately 20 us, then drops to low.
- CLK_OUT_1**: A green signal that is high from 0 to approximately 20 us, then drops to low.
- CLK_OUT_2**: A green signal that is high from 0 to approximately 20 us, then drops to low.
- PWM_2**: A green signal that is high from approximately 20 to 40 us, then drops to low.
- PWM_1**: A green signal that is high from approximately 20 to 40 us, then drops to low.
- CYCLE**: A red signal that is high from approximately 20 to 40 us, then drops to low.
- DCM_CLK_IN**: A green signal that is high from 0 to approximately 20 us, then drops to low.
- DCM_RESET**: A green signal that is high from 0 to approximately 20 us, then drops to low.

پس از انجام شبیه سازی و بررسی صحت پالسهای خروجی، پالسهای تولیدی PWM به ازای موج سینوسی با فرکانس 20kHz و موج مثلثی 340kHz اندازه گیری شده با اسیلوسکوپ در شکل ۹-۶۹ نمایش داده شده است. با اعمال فیلتر به شکل موج PWM خروجی مطابق آنچه در شکل ۲-۷۰ ملاحظه می شود، خروجی مولفه اصلی ۲۰ کیلو هرتز کاملاً مشهود می باشد.

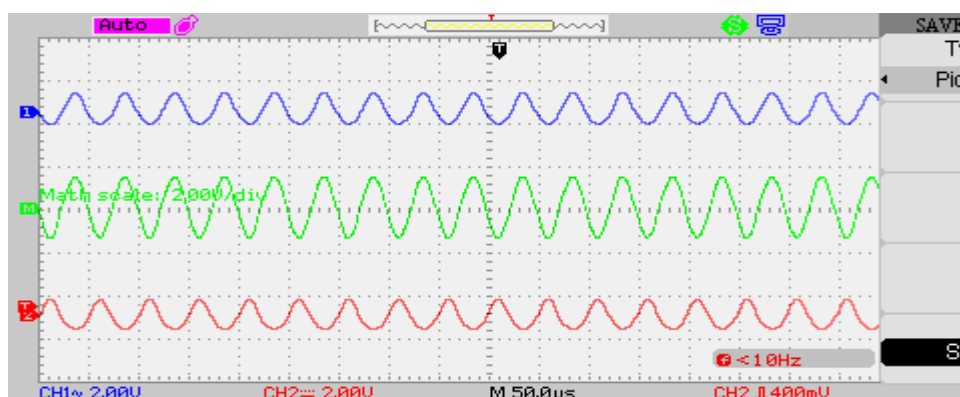


شکل ۶۹-۹- خروجی PWM سیگنال های PWM_1 مشاهده شده با آسیلوسکوپ به ازای موج سینوسی با فرکانس 20kHz و موج مثلثی 340kHz

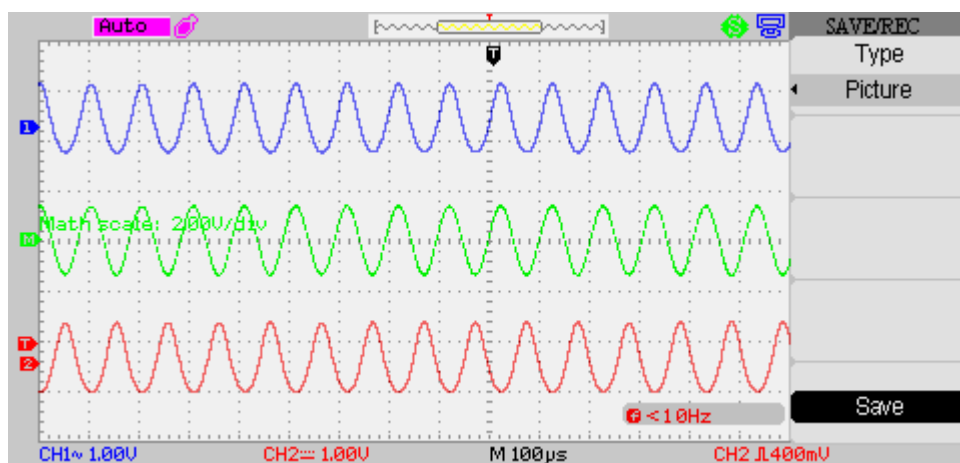


شکل ۷۰-۹- خروجی فیلتر شده سیگنال های PWM_1 و PWM_2 و تفاضل سیگنالها به ازای فرکانس موج اصلی 20KHZ

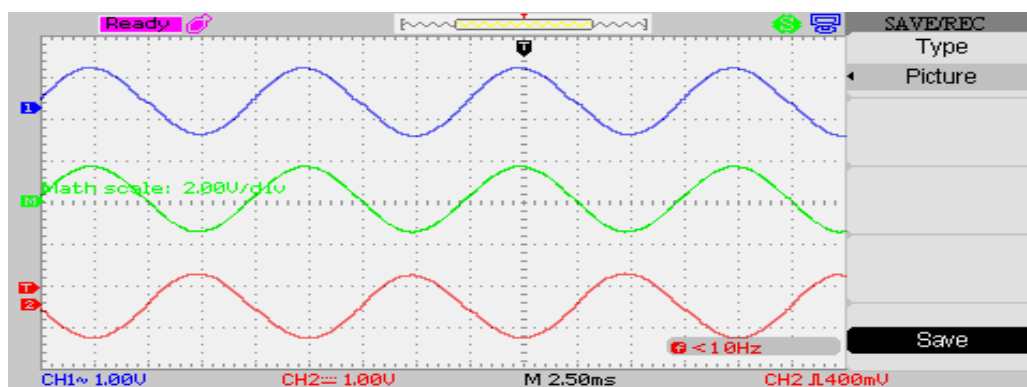
در ادامه خروجی پالسهای PWM و سیگنالهای فیلتر شده پالس خروجی و تفاضل آنها روی دو ساق مختلف اینورتر Hbridge به ازای فرکانس های کلید زنی مختلف و فرکانس موج اصلی مختلف در شکلهای ۲-۷۱ تا ۲-۷۵ نمایش داده شده است. بررسی نتایج پالسهای خروجی و آنالیز سیگنال مولفه اصلی تایید کننده عملکرد مازول مولد پالس PWM می باشد.



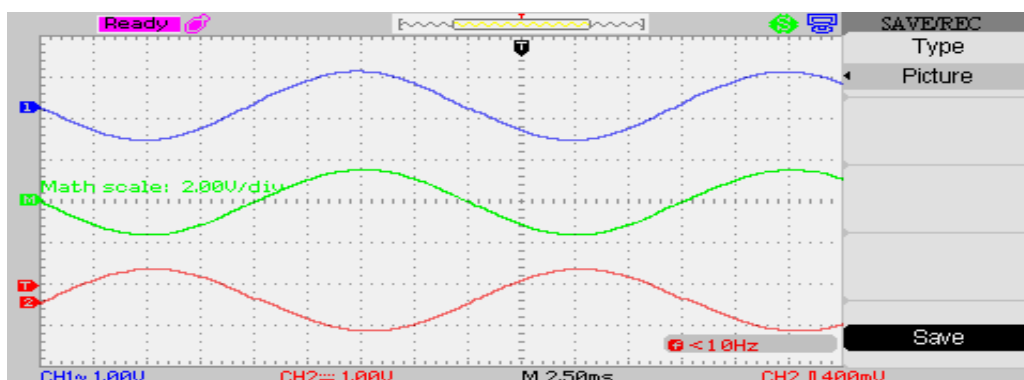
شکل ۷۱-۹- خروجی PWM سیگنال های PWM_1 و PWM_2 به ازای موج سینوسی با فرکانس 20kHz و موج مثلثی 170kHz پس از اعمال فیلتر پایین گذر و تفاضل دو سیگنال از هم



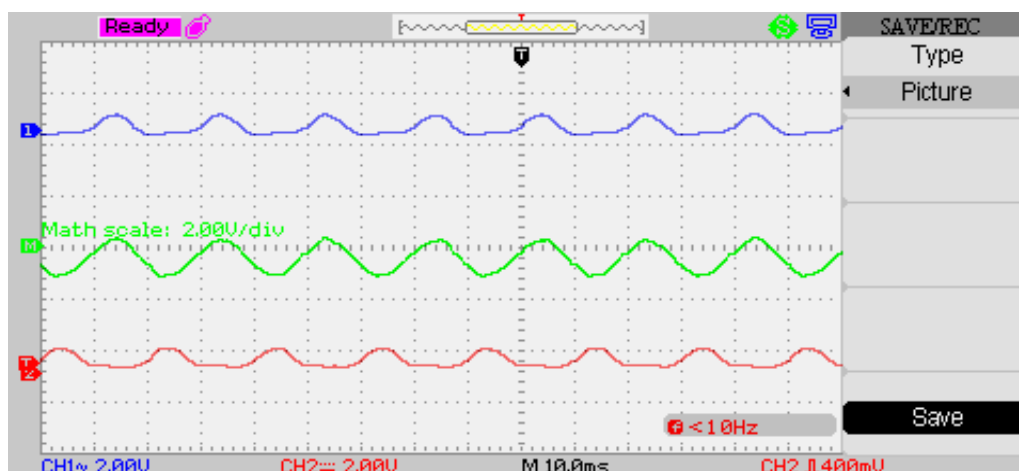
شکل ۷۲-۹- خروجی PWM سیگنال‌های PWM_1 و PWM_2 به ازای موج سینوسی با فرکانس 10kHz و موج مثلی 114kHz پس از اعمال فیلتر پایین‌گذر و تفاضل دو سیگنال از هم



شکل ۷۳-۹- خروجی PWM سیگنال‌های PWM_1 و PWM_2 به ازای موج سینوسی با فرکانس 100Hz و موج مثلی 5kHz پس از اعمال فیلتر پایین‌گذر و تفاضل دو سیگنال از هم

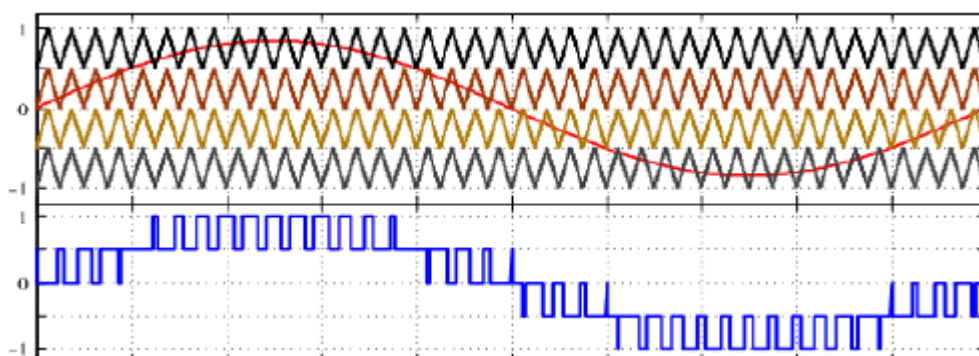


شکل ۷۴-۹- خروجی PWM سیگنال‌های PWM_1 و PWM_2 به ازای موج سینوسی با فرکانس 50Hz و موج مثلی 5kHz پس از اعمال فیلتر پایین‌گذر و تفاضل دو سیگنال از هم

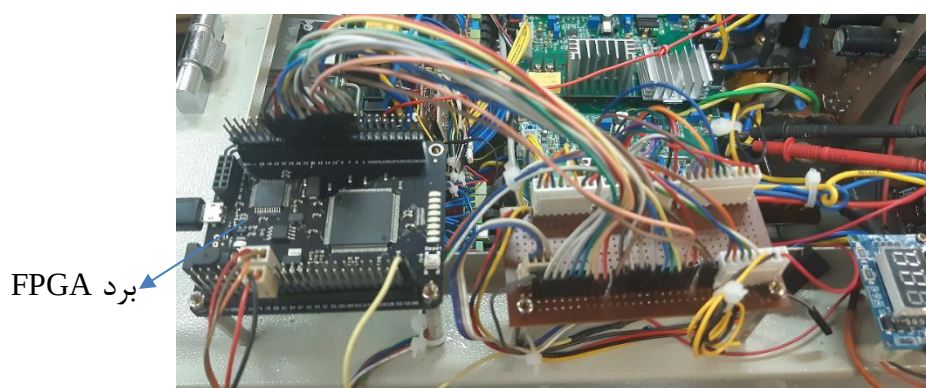


شکل ۷۵-۹ - خروجی PWM سیگنال‌های PWM_1 و PWM_2 به ازای موج سینوسی با فرکانس 50Hz و موج مثلثی 5kHz با اندیس مدولاسیون 0.5 پس از اعمال فیلتر پایین‌گذر و تفاضل دو سیگنال از هم

به منظور تولید پالس‌های مورنیز ۲۰ سوئیچ ماسفت با استفاده از برنامه نویسی انجام شده برای یک مازول Hbridge و مطابق شکل ۱-۷۶ تعمیم آن برای سطوح مختلف کریر، پالس نهایی تولید و به گیت‌های سوئیچ ماسفت اعمال می‌گردد.



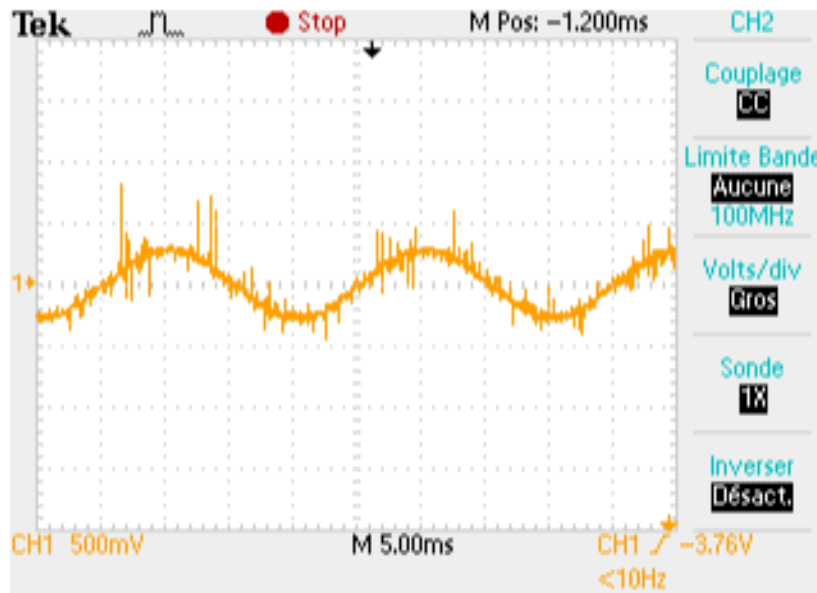
شکل ۷۶-۹ - الگوی تولید پالس اینورتر چند سطحی



شکل ۷۷-۹ - برد FPGA-Spartan6 مورد استفاده در این پروژه

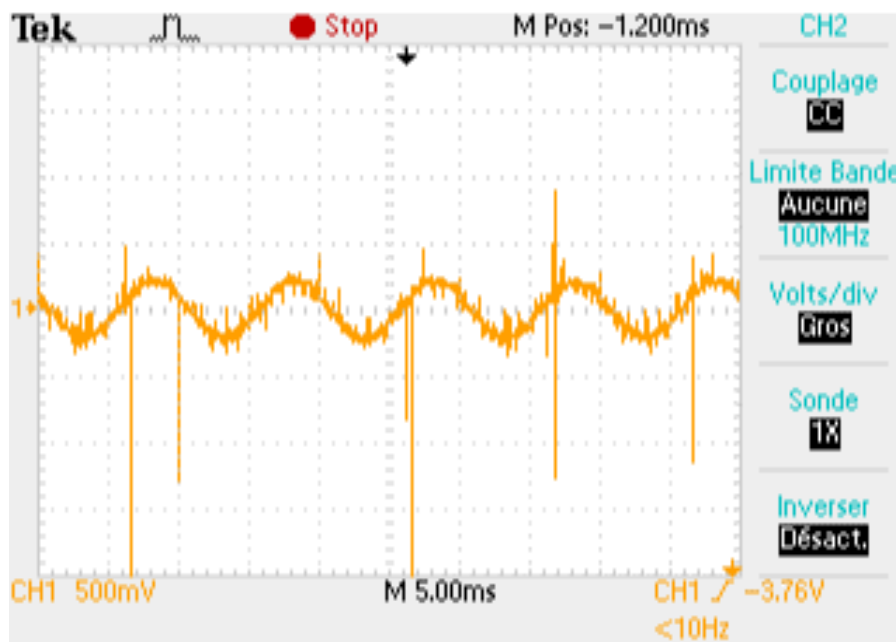
پس از پیاده‌سازی نرم‌افزار FPGA و تجمیع مازول‌های آمپلی‌فایر مبتنی بر اینورتر ۶۳ سطحی پیاده‌سازی شده، خروجی این مازول مورد آزمون قرار می‌گیرد. شکل‌های ۹-۷۷ تا ۹-۸۱ به ترتیب خروجی آمپلی‌فایر به ازای فرکانس‌های ۵۰ هرتز، ۱۰۰

هرتز، ۲۰۰ هرتز و ۴۰۰ هرتز را نمایش می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، بررسی شکل موجهای خروجی آمپلی فایر نشان می‌دهد شکل موج ولتاژ خروجی آمپلی فایر به ازای فرکانسهای مختلف از کیفیت مناسبی برخوردار می‌باشد.



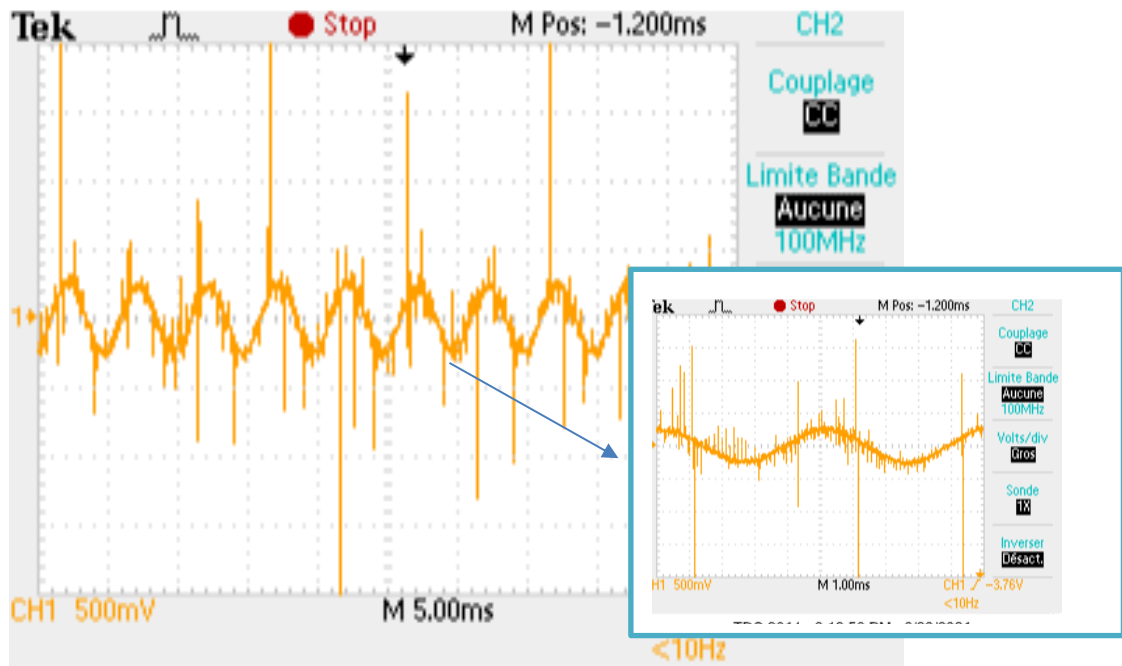
TDS 2014 - 5:46:04 PM 6/23/2021

شکل ۷۸-۹- ولتاژ خروجی آمپلی فایر به ازای فرکانس ۵۰ هرتز



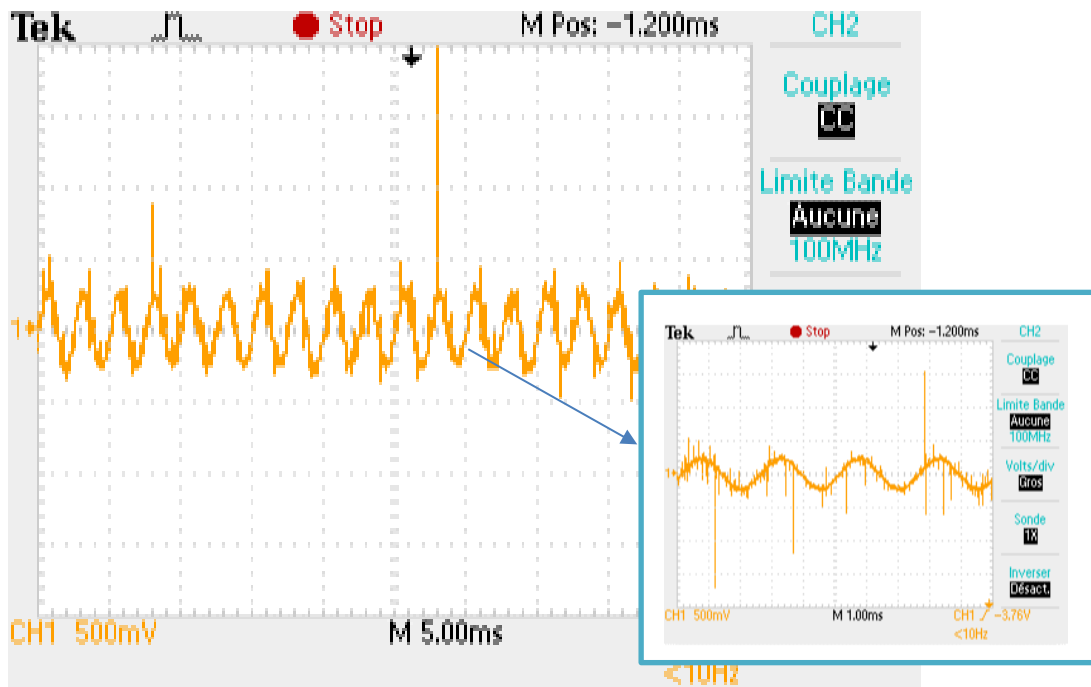
TDS 2014 - 6:06:54 PM 6/23/2021

شکل ۷۹-۹- ولتاژ خروجی آمپلی فایر به ازای فرکانس ۱۰۰ هرتز



TDS 2014 - 6:11:28 PM 6/23/2021

شکل ۸۰-۹- ولتاژ خروجی آمپلی فایر به ازای فرکانس ۲۰۰ هرتز



TDS 2014 - 6:19:12 PM 6/23/2021

شکل ۸۱-۹- ولتاژ خروجی آمپلی فایر به ازای فرکانس ۴۰۰ هرتز

۴-۹- نتیجه گیری

در این مرحله از پروژه کلیه مراحل ساخت دستگاه B-H متر مورد بررسی و تشریح قرار گرفت. مراحل ساخت دستگاه به ترتیب به شرح زیر بوده است:

مدارات مغناطیسی برای تست هسته پودر مغناطیسی، فریم اپشتین و فریم تک ورق بر اساس طراحی های انجام شده در محله اول پروژه ساخت و پیاده سازی گردید.

ساخت مدار آمپلی فایر شامل زیر بخشهای زیر :

یکسوساز ورودی و ترانسفورماتور ایزوله

اینورتر hbridge با سوئیچ ماسفت

مدار درایو گیت و مدارات حفاظتی

مدار چاپر باک (شامل مدارات کنترل، مدارات درایو گیت و سلف چاپر)

برد FPGA و نرم افزار تولید پالس سوئیچینگ

در پایان پس از جمع مدارات مختلف بخش آمپلی فایر هر یک از زیر بخشها مورد آزمون قرار گرفته است. لازم به ذکر است برای ساخت زیر بخشهای مختلف دستگاه B-H متر سه نسخه از بردها پیاده سازی گردید. نسخه اولیه بصورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت و پس از انجام تست های اولیه نسخه دوم برد های مازول آمپلی فایر تصحیح و ساخته شد. پس از انجام تست روی نسخه دوم و شناسایی ایرادات مداری، نسخه نهایی برد های الکترونیک و قدرت طراحی و پس از مونتاژ مورد تست قرار گرفت. در پایان خروجی مازول آمپلی فایر به ازای فرکانسهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت. بررسی نتایج بدست آمده در مرحله آخر تایید کننده عملکرد مطلوب آمپلی فایر پیاده سازی شده جهت کاربرد در دستگاه B-H متر می باشد.

فصل دهم: (مرحله سوم پروژه) پیاده سازی نرم افزار دستگاه B-H متر

۱-۱۰- مقدمه

در مرحله دوم پروژه ساخت زیر بخشهای مختلف سخت افزاری دستگاه B-H متر مورد بررسی و تست قرار گرفت. پس از اعمال سیگنال تحریک به مدار مغناطیسی، به منظور اندازه گیری مشخصه مغناطیسی لازم است تا سیگنالهای ورودی و خروجی مدار مغناطیسی تحت تست نمونه برداری و سپس در یک محیط نرم افزار مناسب مورد پردازش قرار گیرد. در این فصل مراحل مختلف پردازش داده های اکتساب شده مورد بررسی قرار می گیرد. کلیه محاسبات نرم افزاری در این مرحله از پروژه در محیط GUI نرم افزار مطلب پیاده سازی گردیده است. در هر مرحله از محاسبات نرم افزاری، کد پیاده سازی شده ارائه می شود و نتایج خروجی بر روی سیگنال های نمونه ارزیابی می گردد.

۱-۱۰-۲- پیاده سازی نرم افزار GUI دستگاه B-H متر

شکل ۳-۱ محیط نرم افزار گرافیکی دستگاه B-H متر را نمایش می دهد. همانگونه که ملاحظه می گردد نرم افزار پیاده سازی شده از سه بخش اصلی تشکیل شده است. بخش اول شامل اطلاعات ورودی نرم افزار می باشد. این اطلاعات شامل تعداد دور اولیه و ثانویه، ابعاد هندسی نمونه، فرکانس تحت تست، فرکانس نمونه برداری، چگالی ماده مغناطیسی تحت تست می باشد. بخش دوم که در سمت راست نشان داده شده شامل خروجی محاسبات ابعادی طول متوسط، و سطح مقطع هسته، حجم و وزن می باشد. بخش اصلی و کلیدی محاسبات نرم افزاری مربوط به محاسبه حلقه هیستریزیس، مساحت حلقه، H_c ، H_m و B_m و نفوذ پذیری ممغناطیسی می باشد. همچنین به دلیل وجود نویزهای محیطی و افست های ناخواسته در خروجی سنسورها، نحوه فیلتر کردن نویزهای اندازه گیری نیز در نرم افزار پیاده سازی شده لحاظ گردیده است. در ادامه هر یک از بخشهای نرم افزار GUI پیاده سازی شده معرفی و مورد بررسی قرار می گیرد.

The image shows the B-H meter software interface. It features several input data fields for parameters such as N1, N2, f, fs, d, D, h, R, p, and sample. There is also a geometry calculation section with fields for Le, Ae, Vc, and m. A diagram of a toroidal core is shown with dimensions d, h, D, and Total. A measurement results table is displayed with fields for Bmax, Hmax, Br, Hc, Aloop, Pin, and Pc. A graph of B-H curve is visible on the right.

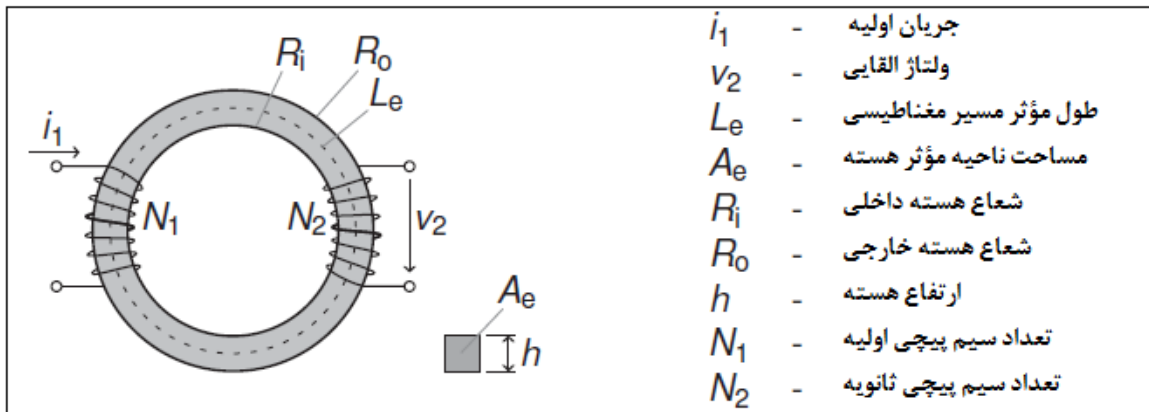
شکل ۱-۱-۱- نمای کلی طرح شبیه ساز گرافیکی B-H meter

۳-۱۰- مقدار دهی اولیه نرم افزار

در این بخش از شبیه سازی ، داده های مورد نیاز برای محاسبات مشخصات قطعه و دستگاه از کاربر درخواست می شود و هر کدام در پارامتر مربوط به خود ذخیره می شوند.

۱-۳-۱۰ انواع داده

در این پروژه ما به دو دسته اطلاعات نیاز داریم . یکی اطلاعات اولیه مربوط به مدار مغناطیسی شامل تعداد دور های سیم پیچ های اولیه و ثانویه ، فرکانس تحریک ، قطر داخلی و بیرونی و و دیگری اطلاعات و داده های خروجی از اسلیدوسکوپ که در فایل های Excel ذخیره شده اند. انواع داده های ورودی مربوط به مدار مغناطیسی در شکل ۳-۲ معرفی گردیده است.



شکل ۲-۱۰- هسته مورد آزمایش با دو سیم‌پیچی برای آنالیز B-H

به طور کلی لیست اطلاعات ورودی به شرح زیر می باشد:

N_1 : تعداد سیم پیچ های اولیه

N_2 : تعداد سیم پیچ ثانویه

F : فرکانس برحسب هرتر

d : قطر داخلی برحسب میلی متر

D : قطر بیرونی برحسب میلی متر

h : ضخامت برحسب میلی

ρ : چگالی حجمی

Sample: تعداد داده ی مورد نظر کاربر

R : مقاومت مسی

FS: فرکانس اسکوپ

۲-۳-۱۰ کد دریافت داده

در این قسمت مقادیر اولیه به صورت پیش فرض وارد شده اند اما در صورت تغییر اطلاعات ، کاربر می تواند داده های جدید را وارد کند. برای این کار از ۱۰، edit txt برای دریافت اطلاعات و از ۱۷، static txt برای نمایش نام و واحد پارامتر ها استفاده شده است. برای مشخص کردن هر کدام از edit txt ها در کد نویسی از tag مربوط به هر کدام استفاده می کنیم. همانطور که در شکل ۳-۳ مشاهده می کنید تمام موارد گفته شده را در یک panel به نام input data قرار می دهیم. معرفی هر edit txt توسط کد زیر انجام می گیرد.

```
Name = str2double(get(handles.edit?, 'string'))
```

به این ترتیب اطلاعات نوشته شده در هر متن به صورت رشته ای در پارامتر name ذخیره می شود. کد مربوط به این قسمت در mfile متلب به صورت مقابل است :

```
N1=str2double(get(handles.edit1, 'string'))
N2=str2double(get(handles.edit2, 'string'))
f=str2double(get(handles.edit10, 'string'))
fs=str2double(get(handles.edit3, 'string'))
d=str2double(get(handles.edit4, 'string'))
```

```

D=str2double(get(handles.edit5,'string'))
R=str2double(get(handles.edit6,'string'))
h=str2double(get(handles.edit7,'string'))
sample=str2double(get(handles.edit8,'string'))
p=str2double(get(handles.edit9,'string'))

```

Input data		
N1	212	
N2	212	
f	50	Hz
fs	250000	Hz
d	49	mm
D	79.2	mm
h	12.7	mm
R	0.05	Ω
ρ	7000	Kg/m ³
sample	11250	

شکل ۳-۱۰- قسمت input data در طرح GUI

۴-۱۰- محاسبات ابعادی هسته تحت تست

در این بخش به محاسبه و نمایش ابعاد قطعه مورد آزمایش می پردازیم. برای این قسمت از طرح، از ۴، edit txt استفاده شده است تا بتوان نتایج محاسبات برای کاربر نمایش داده شود. همچنین از ۸، static txt استفاده کرده ایم تا نام و واحد پارامترها نمایش داده شود. می توانستیم در این قسمت از edit txt استفاده کنیم اما با این کار در حجم کد های نوشته شده صرفه جویی انجام شد. تمامی موارد گفته شد در یک panel قرار گرفته اند. همچنین برای مشاهده ی نتایج از یک push button استفاده کرده ایم تا با فشردن آن نتایج چاپ شوند. پارامترهای محاسبات هندسی به شرح زیر می باشد:

Le: طول مسیر مغناطیسی نمونه (برحسب میلی متر)

$$l_m = \pi \frac{(D+d)}{2} \quad (۳-۱)$$

Ae: سطح مقطع نمونه (برحسب میلی متر مربع)

$$A = \frac{2m}{\rho \pi (D+d)} \quad (۳-۲)$$

V_c : حجم نمونه (برحسب میلی متر مکعب)

(۳-۳)

$$V_c = A_e * L_e$$

m : وزن نمونه (برحسب کیلوگرم)

(۴-۳)

$$m = p * v_c * 10^{-9}$$

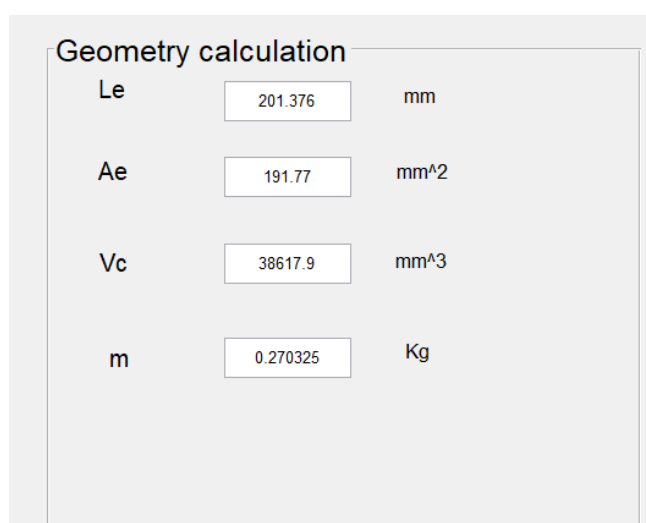
همانطور که در ابتدای بخش گفتیم ، برای نمایش نتایج از edit txt استفاده کرده ایم . برای نمایش اطلاعات در edit txt از کد نوشتاری مقابل استفاده می کنیم:

```
set(handles.edit?, 'string', name)
```

با مشخص کردن شماره ی edit txt و پارامتری که می‌خواهیم نمایش داده شود ، این دستور کامل می شود. طبق توضیحات کد نوشته شده در این قسمت ، به صورت مقابل است:

```
set(handles.edit11, 'string', Le)
set(handles.edit12, 'string', Ae)
set(handles.edit13, 'string', vc)
set(handles.edit14, 'string', m)
```

با فشردن push button مربوط به این قسمت که نام آن را see result گذاشته ایم نتایج ظاهر می شوند.



Geometry calculation		
Le	201.376	mm
Ae	191.77	mm ²
Vc	38617.9	mm ³
m	0.270325	Kg

شکل ۴-۱۰- قسمت Geometry calculation در GUI

۵-۱۰- پردازش داده ها و اندازه گیری مشخصات مغناطیسی

همانگونه که قبلا نیز ذکر شد لیست پارامترهای قابل اندازه گیری در محیط GUI به شرح زیر می باشد:

Bmax

Hmax

Br

Hc

Aloop

Pin

P foko

Pcu

B-H

شکل ۵-۱۰ پنل خروجی محاسبات نرم افزار را نمایش می دهد. لازم به ذکر است اندازه گیری مشخصات مغناطیسی به صورت افلاین انجام می شود. در گام نخست خروجی سنسورهای ولتاژ و جریان مدار مغناطیسی توسط اسکوپ دیجیتال با نرخ نمونه برداری ۲۵ کیلو هرتز نمونه برداری می شود. سپس داده های ذخیره شده با فرمت اکسل ذخیره و از طریق کد نویسی در محیط مطلب از فایل اکسل خوانده و در نرم افزار مورد استفاده قرار می گیرد.

Measurement results			
Bmax		T	Pfoko wat
Hmax		A/m	
Br		T	
Hc		A/m	B-H
Aloop			
Pin		wat	
Pc		wat	

شکل ۵-۱۰- قسمت Measurement result در GUI

بنابراین در ابتدای کار پردازش داده ها نیاز است تا داده های ورودی از فایل Excle فراخوانده شوند. این داده ها شامل ولتاژ اولیه، جریان اولیه، ولتاژ ثانویه و زمان نمونه برداری می باشد. برای انتقال داده های اکسل به آرایه ی جدید ابتدا فایل را فراخوانی کرده و در یک ماتریس به نام data قرار می دهیم. این کار با دستور زیر انجام می گیرد:

```
data=xlsread('SDS00004.CSV','A:C');
```

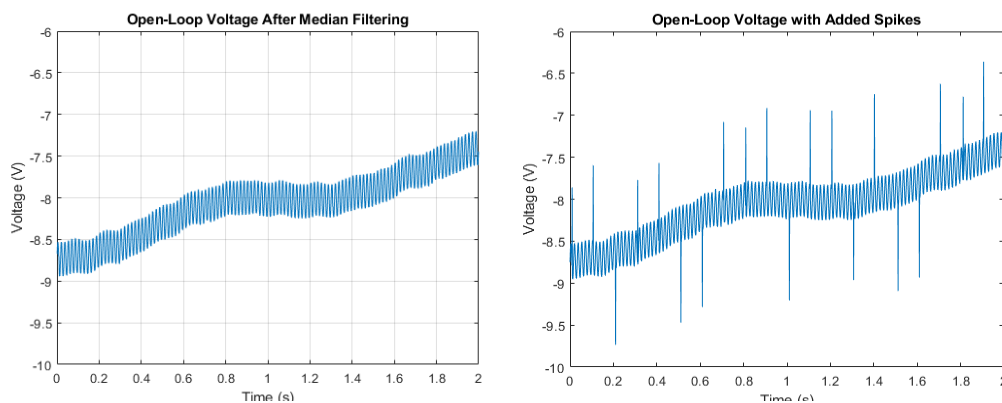

بنابراین از ستون A تا C این فایل در ماتریس data ذخیره می شود. حال باید ستون ها را از یک دیگر جدا کرد.

```
time=data(:,1);
voltage_noise=data(:,3);
current_noise=data(:,2);
```

با دستور فوق ، تمام درایه های ستون اول ماتریس در آرایه time، ستون سوم در آرایه voltage_noise و ستون دوم در آرایه current_noise ذخیره می شوند.

۱۰-۶- فیلتر کردن سیگنالها و حذف اسپایک های ولتاژ

با توجه به وجود سوئیچینگ در مدار آمپلی فایر و همچنین وجود نویز های اندازه گیری ، وجود اسپایک های ولتاژ و جریان در سیگنالهای نمونه برداری شده محتمل می باشد. برای حل این مشکل بطور معمول از فیلتر مدین^۱ استفاده می شود. در این فیلتر داده هایی که نسبت به سایر داده ها دارای جهش ناگهانی هستند شناسایی و حذف می شود. این روش یک راهکار موثر به منظور حذف پشه های ناگهانی در سیگنال ورودی می باشد. بنابراین قبل از انجام هرکاری ، داده های مربوط به ولتاژ و جریان را از این فیلتر عبور می دهیم و نتیجه را در آرایه های جدید ذخیره می کنیم.



شکل ۱۰-۶- حذف اسپایکهای سیگنال ورودی با استفاده از فلتر مدین

کد های کتابخانه ایی مطلب به منظور پیاده سازی این فیلتر به صورت زیر می باشد:

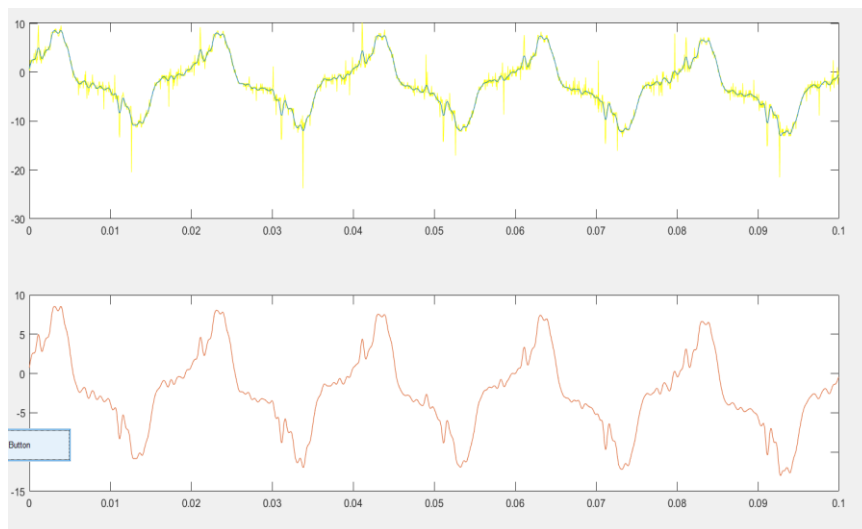
```
voltage=medfilt1(voltage_noise);
current=medfilt1(current_noise);
```

علاوه بر اسپایکهای ولتاژ و جریان ، وجود نویز ها و اغتشاشات فرکانس بالا و افست های فرکانس پایین نیز می تواند موجب اختلال در محاسبات خروجی می گردد. به همین منظور با استفاده ترکیبی از یک فیلتر پایین گذر و بالاگذر ، یک فیلتر میان گذر به منظور حذف نویزهای فرکانس بالا و فرکانس پایین پیاده سازی گردیده است. دستورات کتابخانه ایی مورد استفاده جهت پیاده سازی فیلتر میان گذر به شرح زیر می باشد:

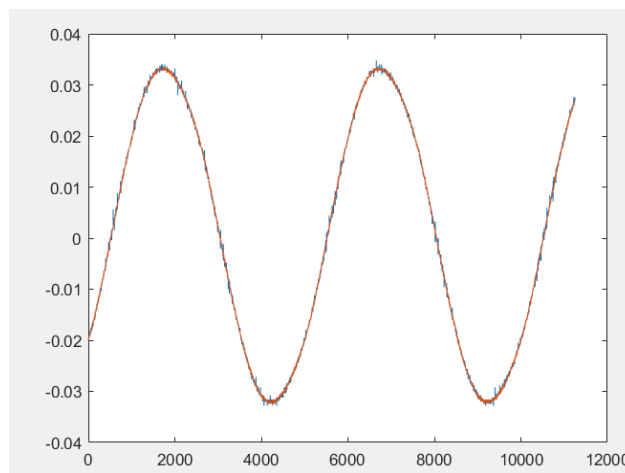
¹ remove space median filter

```
xfilter1 =highpass(x,f_lp,fs);
xfilter = lowpass(xfilter1,f_hp,fs);
```

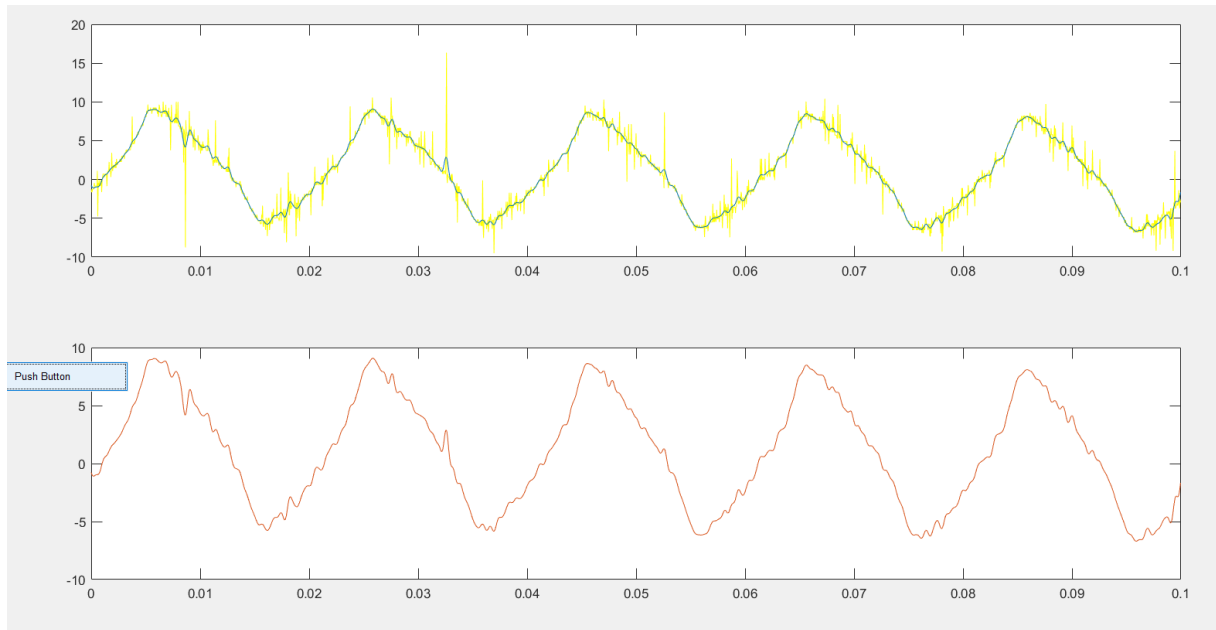
برای مشاهده ی عملکرد این فیلتر ، شکل مقابل ، شکل موج ولتاژ و جریان را قبل و بعد از فیلتر نمایش می دهد.همانگونه که ملاحظه می گردد بعد از اعمال فیلتر نویزهای فرکانس بالا تا حد قابل قبولی کاهش یافته است.



شکل ۷-۱۰- شکل موج جریان قبل و بعد از فیلتر



شکل ۸-۱۰- شکل موج ولتاژ قبل و بعد از حذف اسپایک



شکل ۹-۱۰- شکل موج ولتاژ قبل و بعد از فیلتر

۷-۱۰- محاسبه ی سیگنال شدت میدان (H)

پس از حذف حداکثری نویز از داده های ولتاژ و جریان اولیه و ولتاژ ثانویه، محاسبه ی میدان مغناطیسی با استفاده از فرمول زیر انجام می شود:

(۳-۵)

$$H(t) = \frac{N_1 \cdot i_1(t)}{L}$$

مقادیر پارامترهای N_1 و L قبلا در بخش داده های ورودی و محاسبات ابعادی تعیین شده است. بنابراین با تعریف یک حلقه برای خواندن هر کدام از درایه های آرایه ی جریان، میدان مغناطیسی را محاسبه و در آرایه ی جدید H ذخیره می گردد. ممکن است کاربر نخواهد از تمام داده های ذخیره شده در فایل Excle استفاده کند، بنابراین تعداد تکرار حلقه را متناسب با sample دریافتی در قسمت اول طرح، تنظیم می کنیم.

```
for i=1:sample
H(i,1)=(1000*N1/Le)*current(i,1);
end
```

۸-۱۰- محاسبه سیگنال شدت میدان مغناطیسی (B)

به منظور محاسبه چگالی شار بر اساس ولتاژ ثانویه از رابطه زیر استفاده می گردد:

(۳-۶)

$$B(t) = \frac{1}{N_2 \cdot A_e} \cdot \int v_2(t) dt$$

همانطور که در فرمول مشخص است به منظور محاسبه سیگنال چگالی شار لازم است تا از سیگنال ولتاژ ثانویه انتگرال گرفته شود. برای محاسبه ی انتگرال از سیگنالهای گسسته زمان از روش انتگرال ذوزنقه ایی استفاده شده است که مطابق رابطه زیر پیاده سازی می گردد:

$$(7-3)$$

$$y(n) = y(n-1) + K*[t(n) - t(n-1)]*u(n-1)$$

در این رابطه ، K گین می باشد که برابر یک می باشد و محاسبه ی اختلاف زمانی بر اساس نرخ فرکانس نمونه برداری انجام می شود. بر این اساس کد محاسبه شار بر اساس انتگرال ولتاژ ثانویه به صورت زیر می باشد:

```
result(1,1)=0;
for i=1:sample-1
result(i+1,1)=result(i,1)+(voltage(i,1)/fs);
end
```

نتیجه ی انتگرال به صورت یک آرایه بدست می آید که در واقع چگالی شار مدار مغناطیسی می باشد. پس از محاسبه ی انتگرال ، آرایه جدید را در فرمول B قرار می دهیم.

$$B=(10^6/(N2*Ae))*result;$$

۹-۱۰- نمودار B-H

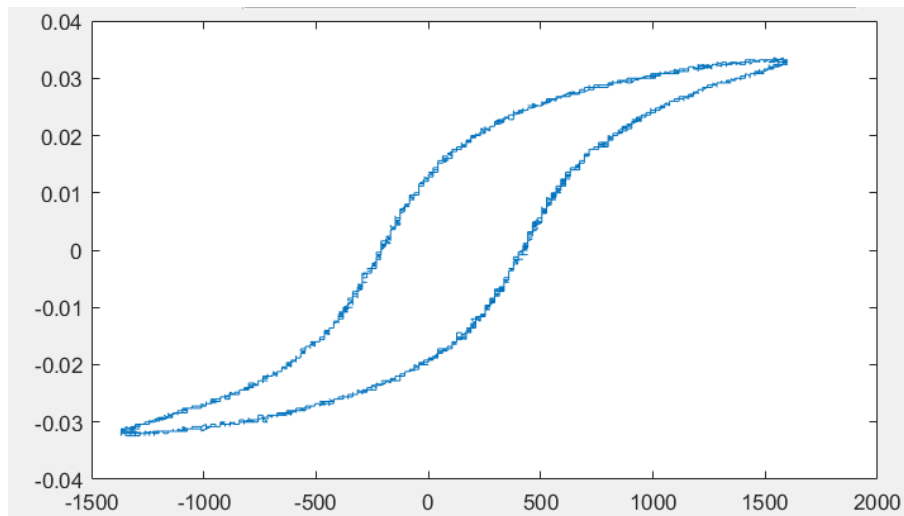
برای رسم حلقه هیستریزیس از دستور axes استفاده شده است. برای مشخص کردن نام و واحد هر کدام از محور ها از کد زیر استفاده می کنیم. قبل از آن باید نمودار را تعریف کنیم.

```
axes(handles.axes2)
xlabel('H ( A/m )')
ylabel('B ( T )')
```

سپس از دستور plot برای رسم نمودار استفاده می کنیم.

```
plot(H,B)
```

مشخصه حلقه هیستریزیس برای یک نمونه داده آزمایشگاهی در شکل ۱۰-۱۰ نمایش داده شده است.



شکل ۱۰-۱۰- نمودار B-H

۱۰-۱۰- چگالی شار ماکزیمم (B_{max})

برای محاسبه ی نقطه بیشینه چگالی شار مغناطیسی، با استفاده از سیگنالهای نمونه برداری شده و روش تعیین مقدار ماکزیمم در آرایه چگالی شار مقادیر ماکزیمم تعیین می شود. در این روش ابتدا اولین داده به عنوان ماکزیمم فرض می شود و پس از آن وارد حلقه ای می شویم که هر در صورتیکه کدام از درایه ها از مقدار فرض شده بیشتر باشد جایگزین مقدار قبلی می شود تا در نهایت مقدار بیشینه بدست آید.

همچنین پس از پیدا کردن مقدار بیشینه یک حلقه ی دیگر تعریف می کنیم تا اندیس هر کدام از درایه هایی که مقدار بیشینه را دارند، در یک آرایه ذخیره کنیم. زیرا در ادامه ی کار به آن ها نیاز خواهیم داشت در نهایت از دستور set برای نمایش B_{max} استفاده می کنیم.

```
B_max=B(1,1);
b=1;
for j=1:sample-1
    if (B(j+1,1)> B_max)
        B_max=B(j+1,1);
    end
end

for x=1:sample
    if (B(x,1)==B_max)
        andis_B_max(b,1)=x;
        b=b+1;
    end
end

set(handles.edit15,'string',V_max)
```

۱۰-۱۱- شدت میدان ماکزیمم (Hmax)

برای محاسبه ی نقطه بیشینه میدان مغناطیسی ، مشابه روش تعیین ماکزیمم چگالی شار عمل می شود. در اینجا نیز پس از تعیین مقدار ماکزیمم ، مقدار اندیس داده ها نیز جهت استفاده در مراحل بعدی مورد استفاده قرار می گیرند. در نهایت از دستور set برای نمایش Hmax استفاده می کنیم.

```
H_max=H(1,1)
b=1;
for z=1:sample-1
    if(H(z+1,1)>H_max)
        H_max=H(z+1,1);
    end
end
for x=1:sample
    if(H(x,1)==H_max)
        andis_H_max(b,1)=x;
        b=b+1;
    end
end
set(handles.edit18,'string',H_max)
```

۱۰-۱۲- محاسبه شار پس ماند (Br)

مقدار چگالی شار پس ماند Br در حلقه هیستریزس نقطه ای می باشد که H متناظر با آن صفر و B آن مقدار مثبتی دارد. بنابراین برای پیدا کردن Br باید ابتدا اندیس هایی از فریم داده H که برابر صفر است شناسایی و ذخیره می شود. برای این کار یک حلقه تعریف می کنیم تا بررسی کند که اگر H برابر صفر بود ، اندیس آن در درایه در یک آرایه به نام andis_h_zero ذخیره شود. برای رفتن به خانه ی بعد در این آرایه از یک متغیر به نام size_h_zero تعریف می کنیم که در حقیقت بیانگر تعداد خانه های این آرایه می باشد.

```
size_h_zero=1;
for i=1:sample
    if(H(i,1)==0)
        andis_h_zero(size_h_zero,1)=i;
        size_h_zero=size_h_zero+1;
    end
end
```

بعد از آن باید شرط مثبت بودن B در آن اندیس ها را بررسی کنیم . بنابراین یک حلقه ی دیگر تعریف می کنیم که بررسی می کند که اگر B در اندیس های ذخیره شده در آرایه ی andis_h_zero مثبت یا مساوی صفر باشد را در آرایه ی matrix_Br ذخیره سازد.

```

z=1;
for i=1:size_h_zero-1
    if(B(andis_h_zero(i,1),1)>=0)
        matrix_Br(z,1)=B(andis_h_zero(i,1),1);
        z=z+1;
    end
end

```

با توجه به نرخ نمونه برداری بالای اسکوپ، ممکن است در نقاط نزدیک به عبور از صفر سیگنال H ، مقادیر چگالی شار در B ، یکسان باشند. در این شرایط بنابراین برای بدست آوردن یک عدد به عنوان Br باید از Br های موجود میانگین بگیریم. برای این کار یک متغیر به نام sum تعریف می کنیم که در هر مرحله با هر کدام از درایه های $matrix\_Br$ جمع شود و در نهایت بر تعداد آن ها تقسیم گردد. سرانجام از دستور set برای چاپ عدد نهایی استفاده می کنیم.

```

sum=0;
for i=1:z-1
    sum=sum+matrix_Br(i,1);
end
Br_final=sum/(z-1);
set(handles.edit19,'string',Br_final)

```

۱۳-۱۰- محاسبه نیروی پس ماند زدای مغناطیسی (H_c)

H_c در نمودار نقطه ای می باشد که B آن صفر و H آن مقدار مثبتی دارد. بنابراین برای پیدا کردن H_c باید ابتدا درایه هایی که در آن مقدار B صفر می شود را بیابیم. برای این کار یک حلقه تکرار تعریف می کنیم تا بررسی کند که اگر B برابر صفر بود، اندیس آن در درایه در یک آرایه به نام $andis\_B\_zero$ ذخیره شود. برای رفتن به خانه ی بعد در این آرایه از یک متغیر به نام b تعریف می کنیم که در حقیقت بیانگر تعداد خانه های این آرایه می باشد.

```

b=1;
for i=1:sample
    if(B(i,1)==0)
        andis_B_zero(b,1)=i;
        b=b+1;
    end
end

```

بعد از آن باید شرط مثبت بودن H در آن اندیس ها را بررسی کنیم. بنابراین یک حلقه ی دیگر تعریف می کنیم که بررسی می کند که اگر H در اندیس های ذخیره شده در آرایه ی $andis\_B\_zero$ مثبت یا مساوی صفر باشد را در آرایه ی $matrix\_Hc$ ذخیره سازد.

```

z=1;
for i=1:b-1

```

```

if (H(andis_B_zero(i,1),1)>=0)
    matrix_Hc(z,1)=H(andis_B_zero(i,1),1);
    z=z+1;
end

```

```

end

```

بطور مشابه در اینجا نیز ممکن است در نقطه عبور از صفر مقادیر تکراری داشته باشیم که در این شرایط برای بدست آوردن یک عدد به عنوان Hc باید از Hc های موجود میانگین گرفته شود. برای این کار یک متغیر به نام sum تعریف می کنیم که در هر مرحله با هر کدام از درایه های matrix_Hc جمع شود و در نهایت بر تعداد آن ها تقسیم گردد. سرانجام از دستور set برای چاپ عدد نهایی استفاده می کنیم.

```

sum=0;
for i=1:z-1
    sum=sum+matrix_Hc(i,1);
end
Hc_final=sum/(z-1);
set(handles.edit20,'string',Hc_final)

```

۱۰-۱۴- محاسبه مساحت حلقه هیستریزیس

در محاسبه ی مساحت حلقه هیستریزیس باید به این نکته توجه داشته باشیم که داده های در اختیار ما برای چند سیکل از شکل موج می باشد. در نتیجه اگر بخواهیم فقط یک عدد را به عنوان مساحت حلقه هیستریزیس نمایش دهیم باید مساحت برای هر یک از سیکلها بدست آید و سپس میانگین آن ها گرفته شود.

با توجه به نمودار B-H شکل ۱۰-۱۰، که در مباحث قبلی نمایش داده شد، هر سیکل از دو نیمه ی مثبت و منفی (نسبت به محور H) تشکیل شده است. این دو نیم سیکل برابر هستند بنابراین کافی است تا مساحت یک نیم سیکل را بدست آوریم و دو برابر نماییم.

در نتیجه در ابتدای کار تعداد نیم سیکل های مثبت سیگنال های B و H باید تعیین گردد. مجدداً به نمودار توجه می کنیم و درمی یابیم که هر نیم سیکل مثبت از نقطه ای با B صفر و H منفی شروع می شود و تا نقطه ای با B صفر و H مثبت به پایان می رسد. بنابراین انتها و ابتدای هر نیم سیکل مثبت، نقاطی با B صفر می باشند. پس به دنبال $B=0$ می گردیم. این کار در قسمت های قبل برای بدست آوردن Hc انجام گرفته است و اندیس های متناظر با نقاط نیز ذخیره گردیده اند. بنابراین مجدداً نیاز به محاسبه ی آن نداریم. اما نکته ی مهم در این مرحله توجه به تکرار داده ها در زمان های متوالی است. بنابراین برای تشخیص نقطه ی پایان هر نیم سیکل از دستور زیر استفاده می کنیم.

```

start_nim_sicles(1,1)=andis_B_zero(1,1);
size_start=2;

for i=1: size_B_zero-2

```



```

    if (andis_B_zero(i+1,1) -
andis_B_zero(i,1) >= (fs/f))

start_nim_sicles(size_start,1)=andis_B_zero(i+1,1);
    size_start=size_start+1;

end
end
number_nim_sicle=size_start-2;
number_sicle=number_nim_sicle/2;

    قدم بعدی برای پیدا کردن تعداد نیم سیکل های مثبت ، بررسی مثبت بودن B های موجود بین دو نقطه با B=0 است . برای
    این کار از کد زیر استفاده کرده و تعداد نیم سیکل های مثبت و منفی مشخص می گردد. همچنین نقاط شروع هریک از نیم سیکل
    ای مثبت و منفی را در آرایه های مجزا ذخیره می گردد.

    number_posetive_sicle=1;

for i=1:number_nim_sicle
    a=1;
    c=2;

    for
j=start_nim_sicles(i,1):start_nim_sicles(i+1,1)

        if (B1(j,1)>0)
            B_sicles(a,number_posetive_sicle)=B1(j,1);
            andis_B_posetive(a,number_posetive_sicle)=j;
            a=a+1;

        end

        size_a(1,number_posetive_sicle)=a-1;
    end
    error=0.5*(start_nim_sicles(i+1,1)-
start_nim_sicles(i,1));

    if ((size_a(1,number_posetive_sicle)-error)>0)
        number_posetive_sicle=number_posetive_sicle+1;

    c=0;

```

```

else
    c=1;
end

if (c==0)

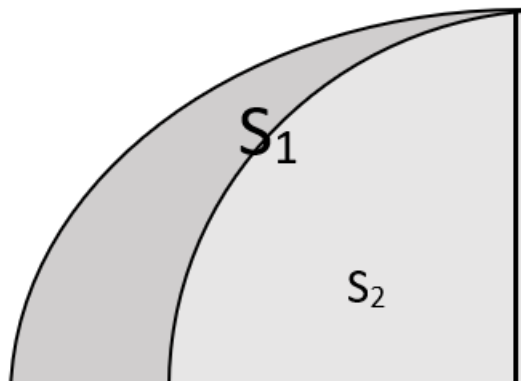
start_posetive(1,number_posetive_sicle)=start_nim_sicles(i,1);
end
if (c==1)

start_negative(1,number_posetive_sicle)=start_nim_sicles(i,1);
end

end

```

حال باید فرمولی برای محاسبه ی مساحت نیم سیکل ها بیابیم. در این قسمت از تجزیه ی شکل موج به دوزنقه های با قاعده هایی از متغیر B و ارتفاعی از متغیر H استفاده می کنیم. و شکل موج را به دو قسمت S1 و S2 تقسیم می نماییم. S1 مساحت یک سهمی از نقطه ی $(-H_c, 0)$ تا نقطه ی (H_x, B_{max}) می باشد و S2 مساحت یک سهمی از نقطه ی $(H_c, 0)$ تا نقطه ی (H_x, B_{max}) می باشد. بدیهی است برای بدست آوردن مساحت لوپ باید S2 را از S1 کم کنیم.



شکل ۱۱-۱۰- نحوه محاسبه مساحت حلقه هیستریزس

برای بدست آوردن نقاط ذکر شده باید Bmax در هر نیم سیکل مثبت بدست آید و در آرایه ی جدید ذخیره شوند. بنابراین از دستور زیر استفاده می کنیم:

```

for i=1:number_posetive_sicle-1
    Bmax(1,i)=B_sicles(1,i);
    size_andis_B_max_sicles(1,i)=1;
    for j=1:size_a(1,i)-1

```

```

if (B_sicles(j+1,i) > Bmax(1,i))
    Bmax(1,i)=B_sicles(j+1,i);
end
end

for x=1:size_a(1,i)
    if (B_sicles(x,i)==Bmax(1,i))

andis_B_max_sicles(size_andis_B_max_sicles(1,i),i)=x;

size_andis_B_max_sicles(1,i)=size_andis_B_max_sicles(1,i)+1;
    end
end
end

```

اکنون می‌توانیم به سراغ بدست آوردن مساحت S1 برویم.

(۸-۱۰)

$$S1 = \sum [(B(n+1)+B(n))*((H(n+1)-H(n)))/2]$$

کد محاسبه S1 به شرح زیر می‌باشد:

```

r=2;
for i=1:number_posetive_sicle-1
    sum_1(1,i)=0;
    for
j=start_posetive(1,r):andis_B_posetive(andis_B_max_sicles(size_andis_B_max_sicles(1,i)-1,i),i)-1
        S1=0;
        S1=(B1(j+1,1)+B1(j,1))*(H1(j+1,1)-H1(j,1))*0.5;
        sum_1(1,i)=S1+sum_1(1,i);
    end

    r=r+1;
end

```

از همین فرمول برای محاسبه S2 استفاده می‌شود و تنها تفاوت آن در نقاط ابتدا و انتها می‌باشد.

```

r=2;
for i=1:number_posetive_sicle-1
    sum2(1,i)=0;

```

```

for
j=andis_B_posetive(andis_B_max_sicles(size_andis_B_max_
_sicles(1,i)-1,i),i):start_negative(1,r)-1
    S2=0;
    S2=(B1(j+1,1)+B1(j,1))*(H1(j+1,1)-
H1(j,1))*0.5;
    sum2(1,i)=S2+sum2(1,i);
end
r=r+1;
end

```

در نهایت برای محاسبه مساحت کلی حلقه هیستریزس لازم است تا مساحت های S_1 و S_2 از یکدیگر تفاضل و دو برابر گردند

:

```

for i=1:number_posetive_sicle-1
    S(1,i)=(sum_1(1,i)-sum2(1,i))*2;
end

```

این محاسبات می تواند برای چند سیکل سیگنال B و h انجام شود و در انتها از مساحت سیکل های موجود میانگین گرفته شود

:

```

sum_s=0;
for i=1:number_posetive_sicle-1
    sum_s=sum_s+S(1,i);
end

```

```

S_final=sum_s/(number_posetive_sicle-1);
set(handles.edit21,'string',S_final)

```

لازم به ذکر است مقدار مساحت حلقه هیستریزس برابر چگالی حجمی تلفات هیستریزس هسته می باشد. با ضرب مساحت حلقه هیستریزس در حجم هسته کل تلفات هسته قابل محاسبه می باشد.

۱۵-۱۰- محاسبه توان

در این بخش هدف اندازه گیری مولفه های تلفاتی هسته بر اساس سیگنالهای اندازه گیری شده می باشد. این مولفه ها شامل تلفات هیستریزس ، تلفات فوکو و تلفات هسته می باشد. در این بخش برای محاسبه ی هر کدام کد مربوطه ارائه می گردد.

۱۵-۱۰-۱ توان ورودی

برای محاسبه ی توان ورودی مدار مغناطیسی از ولتاژ و جریان اندازه گیری در سیم پیچی اولیه استفاده می شود. این قسمت باید از فرمول زیر استفاده کرد:

$$(9-3)$$

$$P_{in} = (1/T) * \int [V(t).I(t)]$$

برای محاسبه ی انتگرال از روش محاسبه ی سطح محصور منحنی توان لحظه ایی مساحت استفاده می گردد. بنابراین ابتدا نقاط عبور از صفر ولتاژ تعیین می گردد:

```
size_v_zero=1;
for i=1:sample
    if(voltage(i,1)==0)
        andis_v_zero(size_v_zero,1)=i;
        size_v_zero=size_v_zero+1;
    end
end

start_nim_sicles_v(1,1)=andis_v_zero(1,1);
size_start_v=2;

for i=1: size_v_zero-2

    if(andis_v_zero(i+1,1)-
andis_v_zero(i,1)>=(fs/f))

start_nim_sicles_v(size_start_v,1)=andis_v_zero(i+1,1)
;
        size_start_v=size_start_v+1;

    end
end
number_nim_sicle_v=size_start_v-2;
number_sicle_v=number_nim_sicle_v/2;
```

مقدار توان اکتیو با حاصلضرب مساحت محصور سیگنال توان در فرکانس سیگنال مولفه اصلی قابل محاسبه می باشد.

۲-۱۵-۱۰ تلفات مسی

محاسبه تلفات مسی بر اساس مقدار مقاومت اندازه گیری شده با دستگاه LCR متر در فرکانس کاری مدار و محاسبه مقدار موثر جریان قابل محاسبه می باشد:

$$(3-10)$$

$$P=R*i^2$$

در این فرمول از مقدار rms جریان استفاده شده است، بنابراین با استفاده از دستور rms ، مقدار موثر جریان را بدست می آوریم.

```
rms_current=rms(current);
```

```
P_cu=R*(rms_current^2);
set(handles.edit23,'string',P_cu)
```

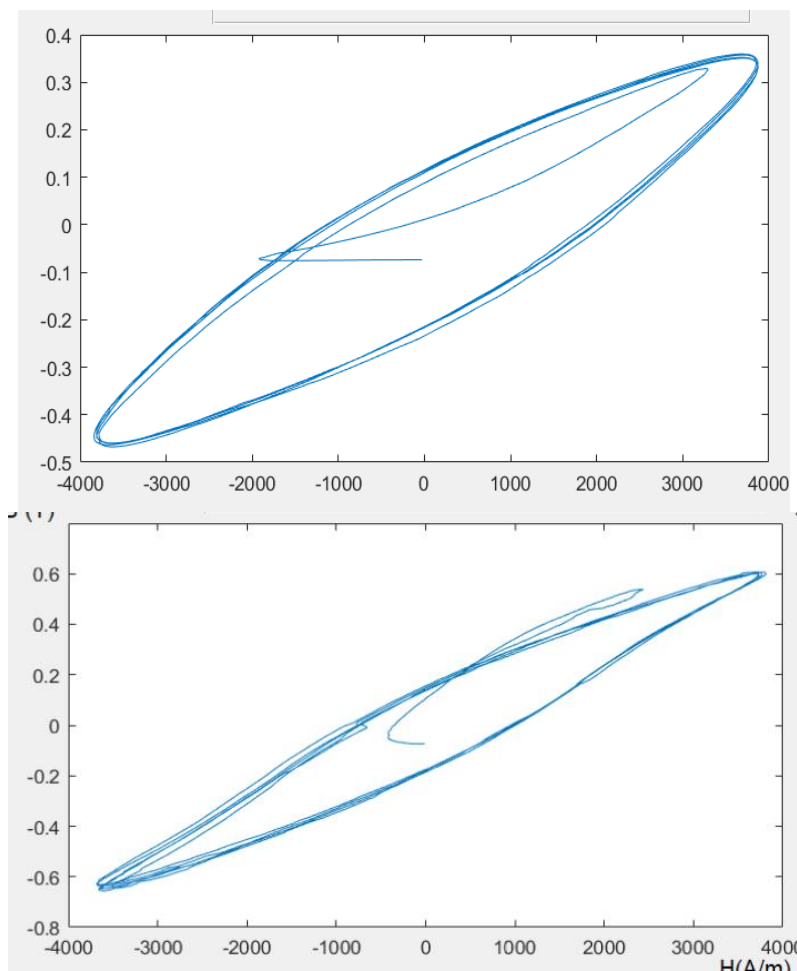
۳-۱۵-۱۰ تلفات فوکو

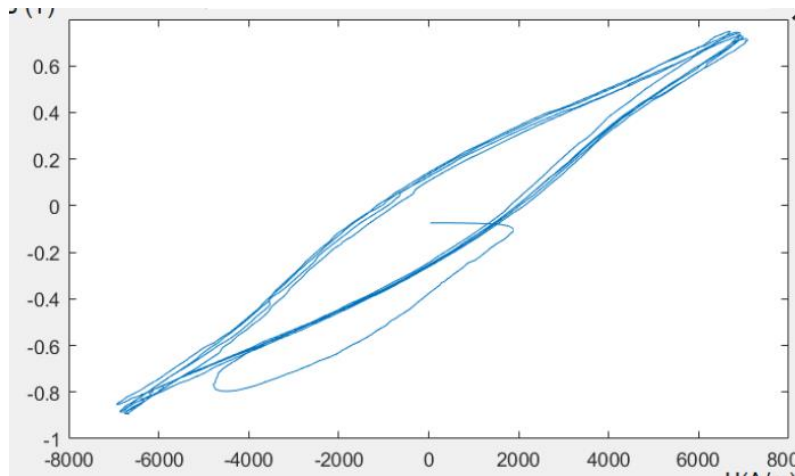
با اندازه گیری توان ورودی و تفاضل مجموع تلفات هیستریزیس و تلفات مسی از توان ورودی تلفات فوکو قابل محاسبه می باشد.

```
p_foko=p_in-S_final-P_cu;
set(handles.edit17,'string',p_foko)
```

۶-۱۰-۱۰ مشخصه مغناطیس شونده

مطابق شکل ۳-۱۲ حلقه هیستریزیس به ازای شدت میدان های ماکزیمم مختلف را نمایش می دهد. همانگونه که ملاحظه می گردد مکان هندسی (B_m, H_m) روی این حلقه ها ، منحنی مغناطیس شونده هسته مورد آزمایش می باشد. برای این منظور ابتدا به ازای مقادیر مختلف پیک جریان تحریک داد های مور نیاز اندازه گیری و در یک فایل اکسل ذخیره می گردد.





شکل ۱۰-۱۲- حلقه هیستریزیس به ازای جریان‌های مختلف

در مرحله بعد همانگونه که در بخش محاسبه B_m و H_m بررسی گردید، برای تست این مقادیر تعیین و در یک آرایه ذخیره می شود. با داشتن مقادیر ماکزیمم چگالی شار و شدت میدان به ازای مقادیر مختلف جریان تحریک مشخصه مغناطیس شونددگی قابل استخراج می باشد. کد استخراج مشخصه مغناطیس شونددگی به شرح زیر می باشد:

```
Sc=1;
Sv=2;
data=xlsread('SDS00004.CSV','A:C');
for i=1:10

voltage_noise=data(:,Sv);
current_noise=data(:,Sc);

%remove space
voltage=medfilt1(voltage_noise);
current=medfilt1(current_noise);

%find h
for j=1:sample
H(j,1)=(1000*N1/Le)*current(j,1);
end

%find B
result(1,1)=0;
for k=1:sample-1
result(k+1,1)=result(k,1)+(voltage(k,1)/fs);
end
```

```

B=(10^6/(N2*Ae))*result;

%find Bmax , H max , andis
voltage_max=voltage(1,1);
b=1;
for j=1:sample-1
    if (voltage(j+1,1)> voltage_max)
        voltage_max=voltage(j+1,1);
    end
end

for x=1:sample
    if(voltage(x,1)==voltage_max)
        andis_voltage_max(b,1)=x;
        b=b+1;
    end
end

current_max=current(1,1)
b=1;
for z=1:sample-1
    if(current(z+1,1)>current_max)
        current_max=current(z+1,1);
    end
end
for x=1:sample
    if(current(x,1)==current_max)
        andis_current_max(b,1)=x;
        b=b+1;
    end
end
currents_max(i,1)=current_max;
voltages_max(i,1)=voltage_max;
Sc=Sc+2;
Sv=Sv+2;
end
B_H=cftool(currents_max,voltages_max);
set(handles.edit16,'string',B_H)

```


با در اختیار داشتن منحنی مغناطیسی شونددگی امکان محاسبه نفوذپذیری مغناطیسی به ازای نقاط کار مغناطیسی مختلف فراهم می‌گردد.

۱۷-۱۰- نتیجه گیری

در این مرحله از گزارش مراحل پردازش سیگنالهای اخذ شده از دستگاه B-H متر مورد بررسی قرار گرفته است. نرم افزار پیاده سازی شده در محیط GUI مطلب پیاده سازی شده و بصورت آفلاین پیاده سازی شده است. مقادیر خروجی سیگنالهای اندازه گیری شده در یک فایل اکسل ذخیره و فرمت می‌شود. سپس با کد نویسی در محیط مطلب این اطلاعات از فیل اکسل بصورت یک فریم داده خوانده می‌شود و کلیه محاسبات بصورت زمان گسسته انجام می‌شود. همچنین در این گزارش مراحل مختلف پردازش داده ها به منظور محاسبه B_m و H_m ، منحنی هیستریزس، مقادیر B_r و H_c ، مساحت حلقه هیستریزس، مشخصه مغناطیس شونددگی و مولفه های تلفات هسته مورد ارزیابی قرار گرفته است.

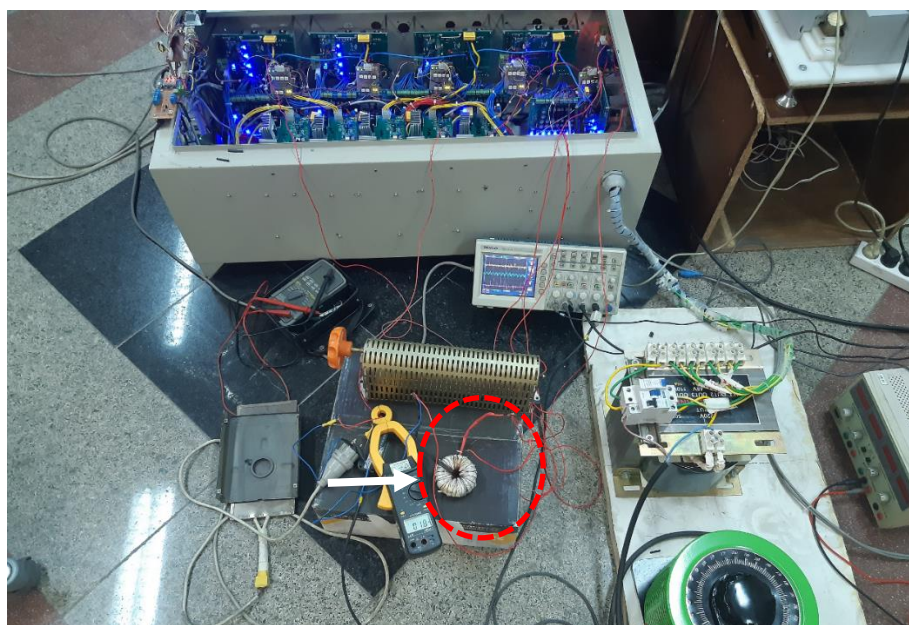
فصل یازدهم: تجميع دستگاه و انجام تستهای نهایی و کالیبراسیون دستگاه

۱-۱-۱-مقدمه

پس از تکمیل زیر بخشهای سخت افزاری و نرم افزاری دستگاه B-H متر ، در این مرحله تست های آزمایشگاهی روی نمونه های مدار مغناطیسی ساخته شده انجام می گردد. در هر مرحله از تست ولتاژ و جریان اولیه و ولتاژ ثانویه اندازه گیری و در فایل اکسل ذخیره می شود. سپس با استفاده از نرم افزار مطلب پیاده سازی شده، مشخصه های مغناطیسی استخراج می گردد می شود.

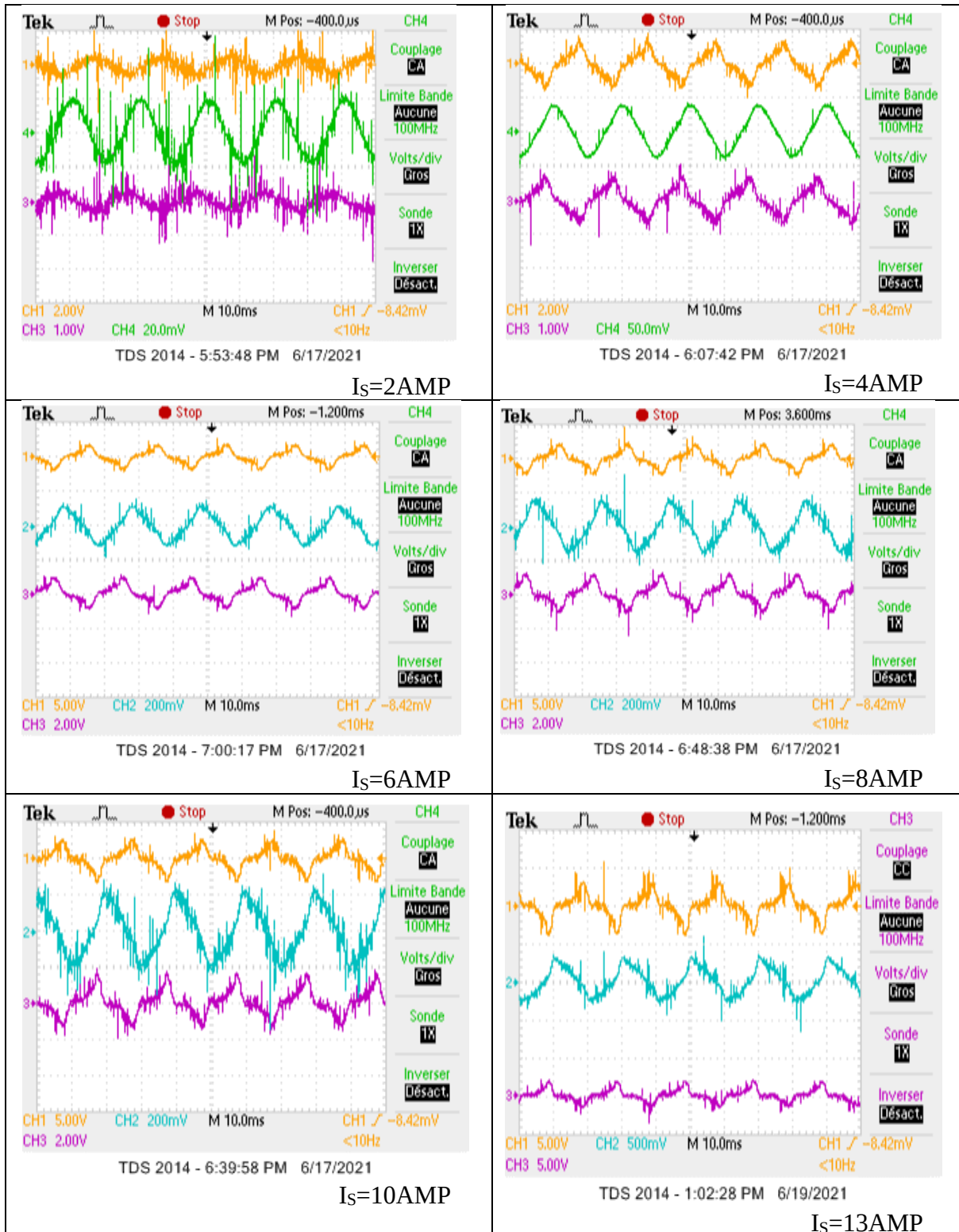
۱-۱-۲-اندازه گیری مشخصه هسته پودر آهن

شکل ۱-۴ اتصال هسته تروئید به خروجی مدار آمپلی فایر را نشان می دهد. در این آزمایش مشخصه های خروجی دستگاه به ازای مقادیر مختلف جریان تحریک استخراج می گردد. در هر یک از تست های انجام گرفته نمونه برداری از سیگنالهای خروجی سنسور در شرایط کار دائم و پس از پایداری سطوح ولتاژ و جریان انجام می گیرد.

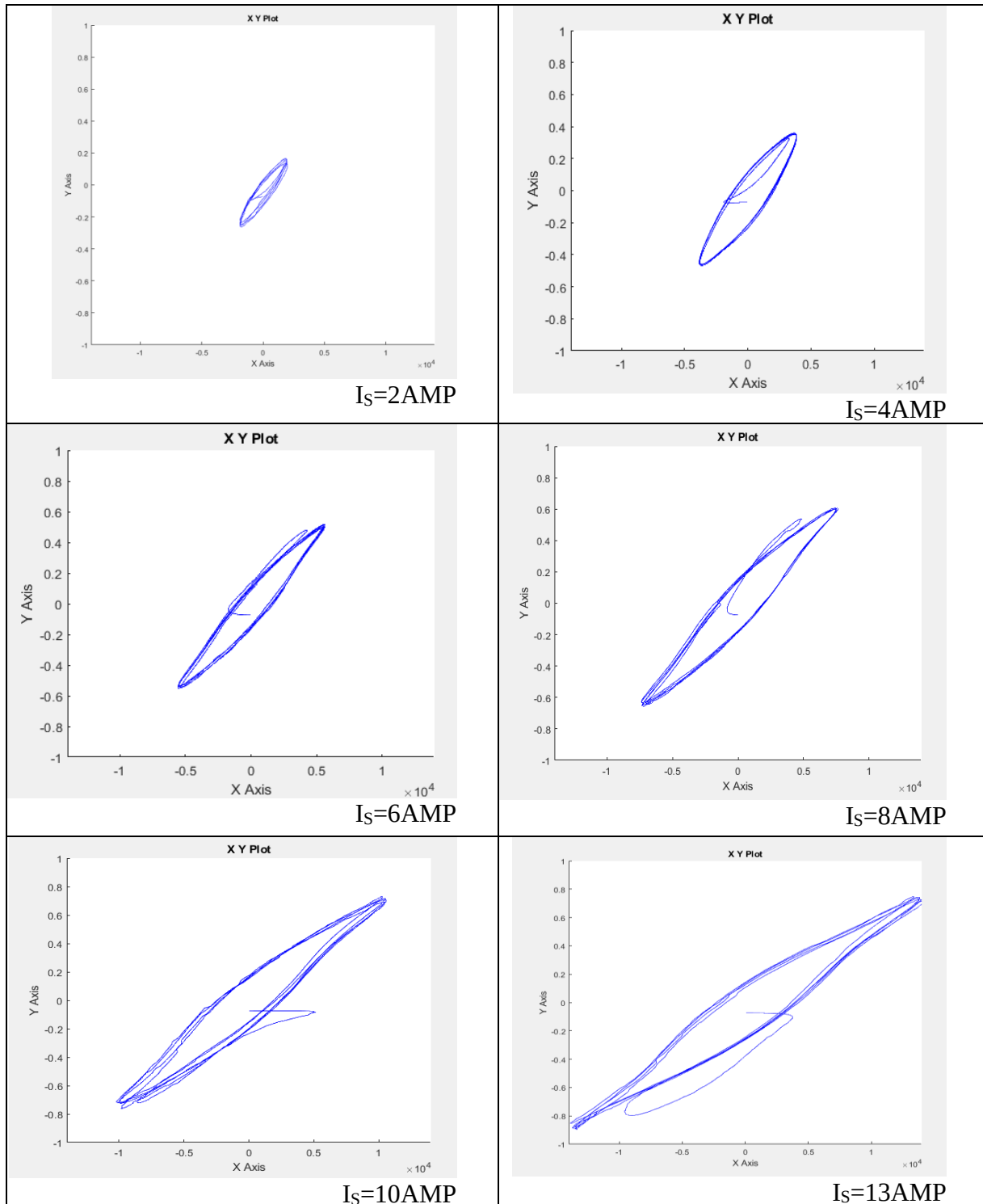


شکل ۱-۱- تست هسته تروئید T300-26

لازم به ذکر است در این تست فرکانس کلیدزنی اینورتر 10KHZ و فرکانس تحریک ورودی ۵۰ هرتز تنظیم گردیده است. شکل ۲-۴ سیگنالهای خروجی سنسورهای اندازه گیری ولتاژ اولیه، جریان اولیه و ولتاژ ثانویه را به ازای مقادیر مختلف جریان تحریک نمایش می دهد. پس از ذخیره سازی داده ها و بارگذاری آن در نرم افزار GUI پیاده سازی شده، نمودار حلقه هیستریزس هسته مغناطیسی تروئید در شکل ۳-۴ نمایش داده شده است. بطوریکه ملاحظه می گردد با افزایش جریان تحریک هسته به اشباع رفته و مقدار نفوذ پذیری مغناطیسی نیز کاهش می یابد.



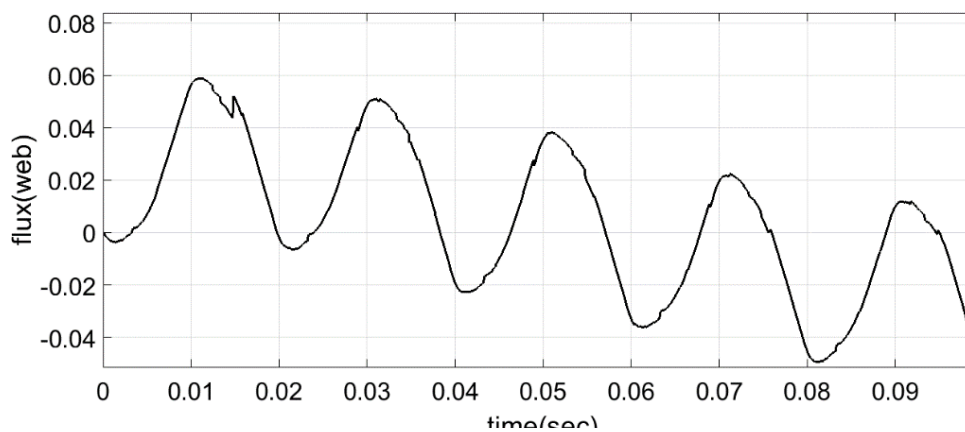
شکل ۲-۱۱- ولتاژ اولیه، جریان اولیه و ولتاژ ثانویه به ازای مقادیر متفاوت جریا های تحریک به ازای فرکانس کلیدزنی 10Khz و فرکانس تحریک ۵۰ هرتز



شکل ۳-۱- حلقه هیستریزیس بدست آمده از نتایج تست هسته پودر آهن به ازای جریات های تحریک مختلف به ازای فرکانس کلیدزنی 10Khz و فرکانس تحریک ۵۰ هرتز

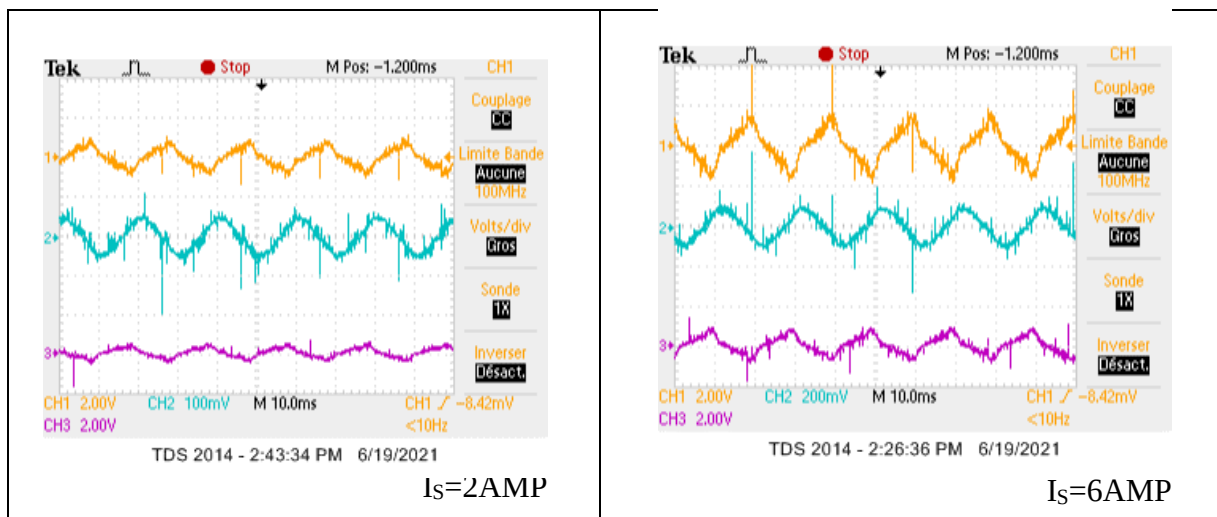
بررسی نتایج تست بدست آمده در شکل ۳-۴ نشان می دهد با توجه به اینکه مدار آمپلی فایر ساخته شده مبتنی بر سوئیچینگ می باشد، درصد پایداری از فرکانسهای کلید زنی در شکل موج ولتاژ و جریان اعمالی به مدار مغناطیسی ملاحظه می گردد. علاوه

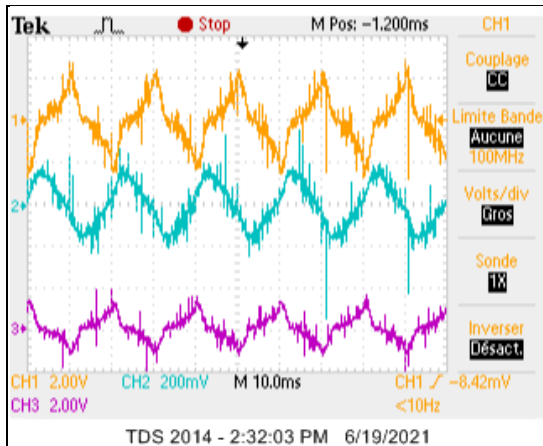
براین وجود نویزهای اندازه‌گیری در برد های سنسور و پراب اسکوپ نیز موجب ایجاد سطح قابل ملاحظه ایی از نویز در سیگنال گردآوری شده می‌گردد. همانگونه که در بخش نرم افزار نیز بررسی گردید به منظور حذف نویزها و اغتشاشات ایجاد شده در سیگنالهای گردآوری شده از فیلترهای نرم افزاری به منظور حذف نویز و افست استفاده گردیده است. یکی از چالشهای اساسی که در مرحله محاسبه شار هسته (با انتگرال گیری از ولتاژ ثانویه) که می‌تواند موجب اختلال در محاسبه حلقه هیستریزس گردد، وجود افست در سیگنال های گردآوری شده می‌باشد. وجود حتی مقادیر جزئی افست (به دلیل وجود افست در سنسور و مدارات الکترونیک) می‌تواند موجب اشباع انتگرال گیر و اختلال در محاسبه حلقه هیستریزس گردد. بعلاوه وجود نویزها و اعوجاجات ناخواسته در سیگنالهای ولتاژ و جریان موجب اعوجاج در حلقه هیستریزس بدست آمده می‌گردد. شکل ۴-۱۱ یک نمونه از این اعوجاج در ولتاژ و تاثیر آن بر نتایج اندازه‌گیری را نمایش می‌دهد. چالش دیگری که در حذف و پالایش سیگنالهای اندازه‌گیری وجود دارد، تاثیر فیلترهای دیجیتال و الگوریتم های نرم افزاری بر نتایج اندازه‌گیری می‌باشد. تغییر ناخواسته دامنه و فاز سیگنال در خروجی فیلتر های دیجیتال مورد استفاده (در صورت عدم طراحی مناسب فیلتر)، خود می‌تواند عامل خطا و اختلال در نتایج اندازه‌گیری خروجی باشد. بنابراین لازم است تا در مرحله طراحی و پیاده سازی الگوریتم های پردازش سیگنالهای اکتساب شده (با هدف حذف نویز و افست) دقت کافی صورت گیرد.



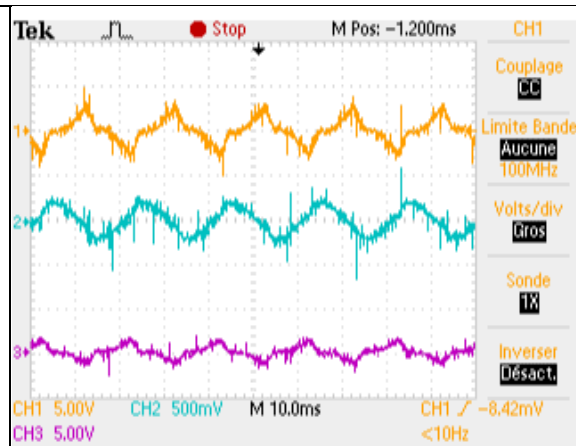
شکل ۴-۱۱- تاثیر افست خروجی سنسور ولتاژ بر خروجی انتگرال گیر نحاسبه شار مدار مغناطیسی

با هدف کاهش نویز های سوپرج زنی ولتاژ خروجی آمپلی فایر، فرکانس کلید زنی اینورترچند سطحی از ۱۰ کیلو هرتز به مقادیر ۲۰ و ۴۰ کیلو هرتز افزایش داده شده است. در ادامه نتایج خروجی این تست ها به ترتیب در شکل های ۴-۵ تا ۴-۸ ارائه گردیده است.

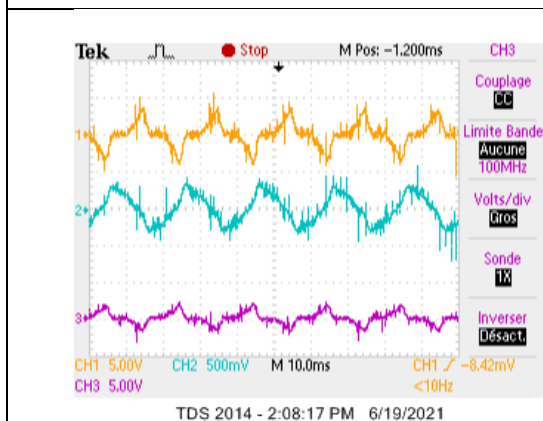




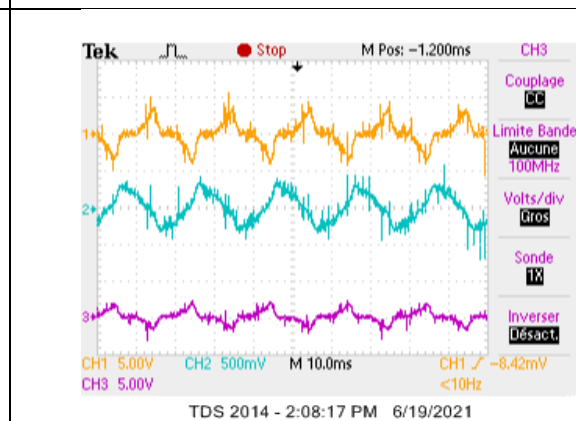
$I_s=8\text{AMP}$



$I_s=10\text{AMP}$

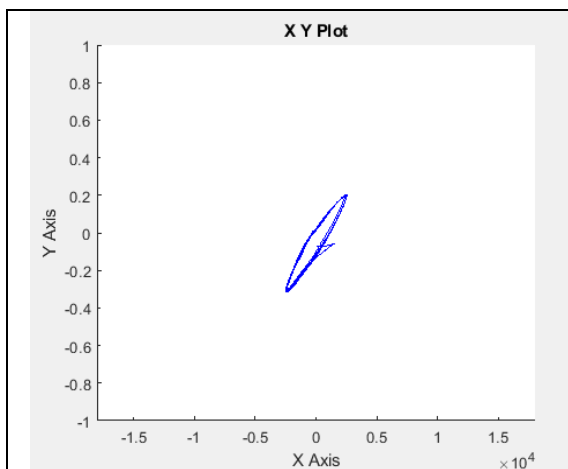


$I_s=13\text{AMP}$

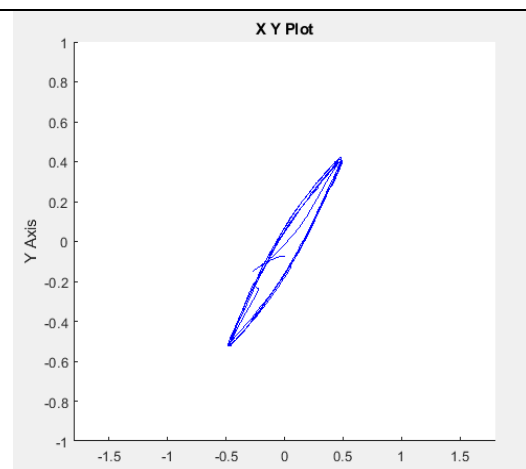


$I_s=15\text{AMP}$

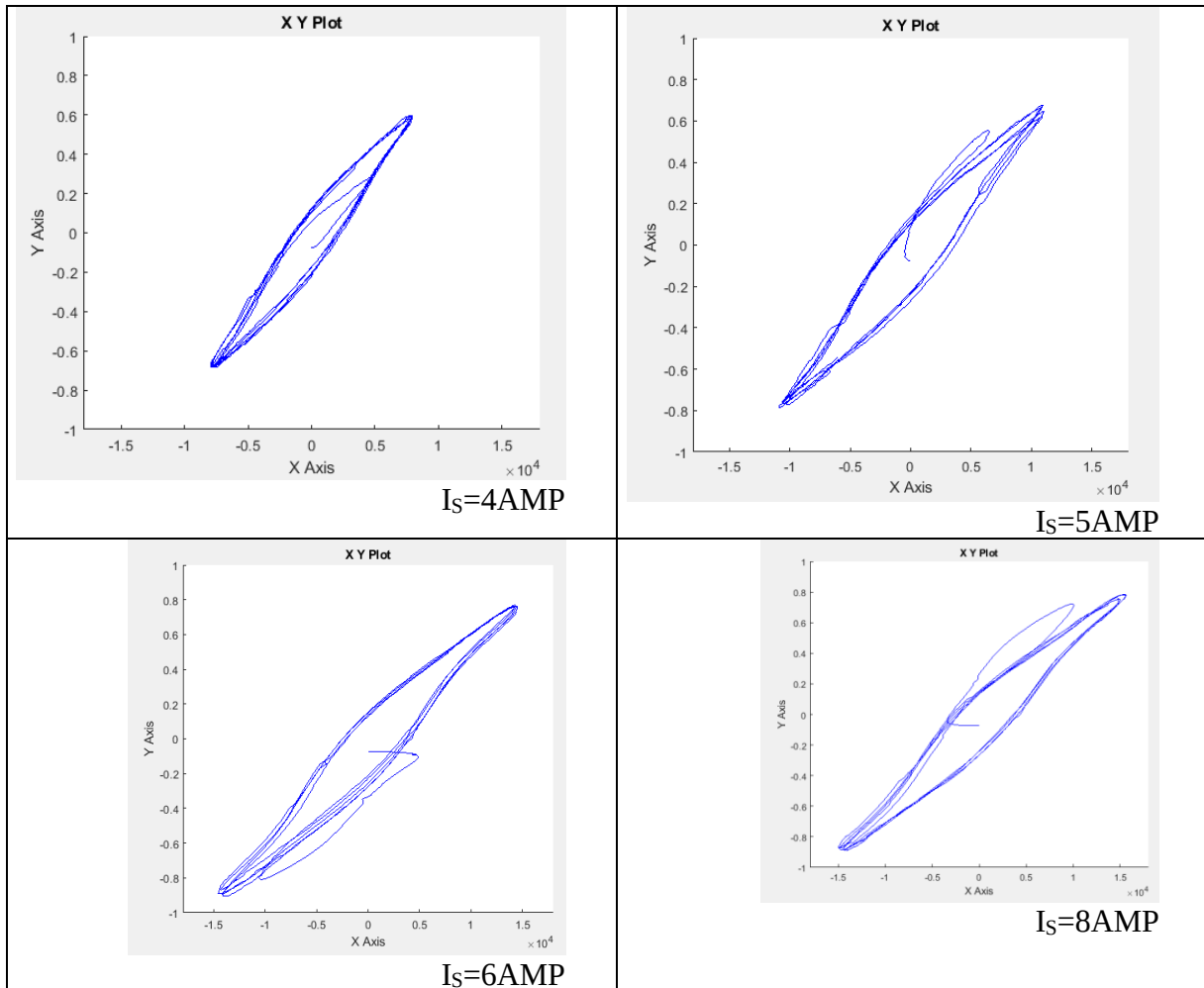
شکل ۵-۱۱- ولتاژ اولیه، جریان اولیه و ولتاژ ثانویه به ازای مقادیر متفاوت جریای تحریک به ازای فرکانس کلیدزنی 20Khz و فرکانس تحریک ۵۰ هرتز



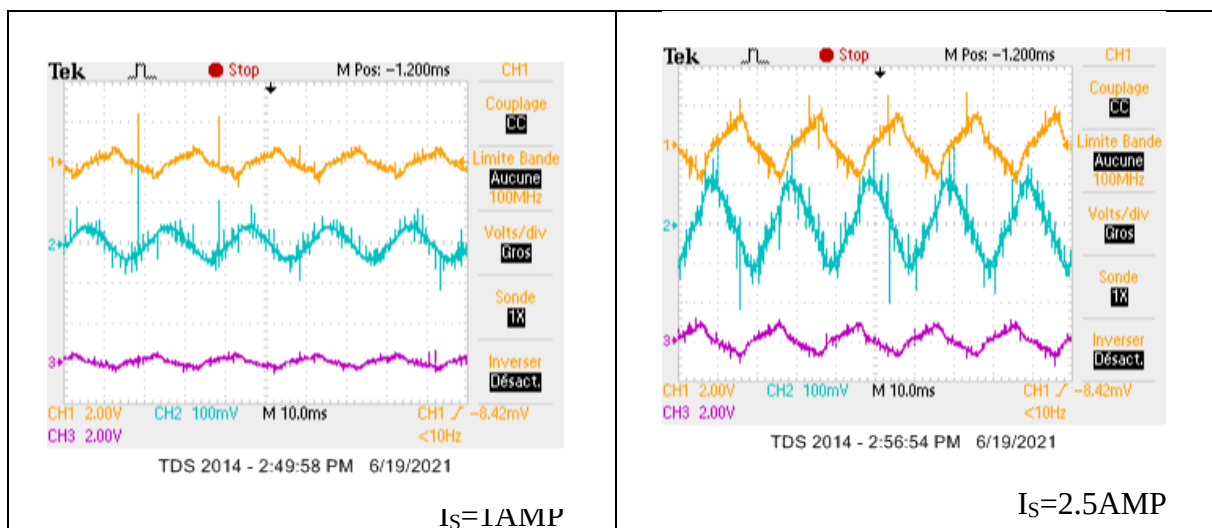
$I_s=1\text{AMP}$

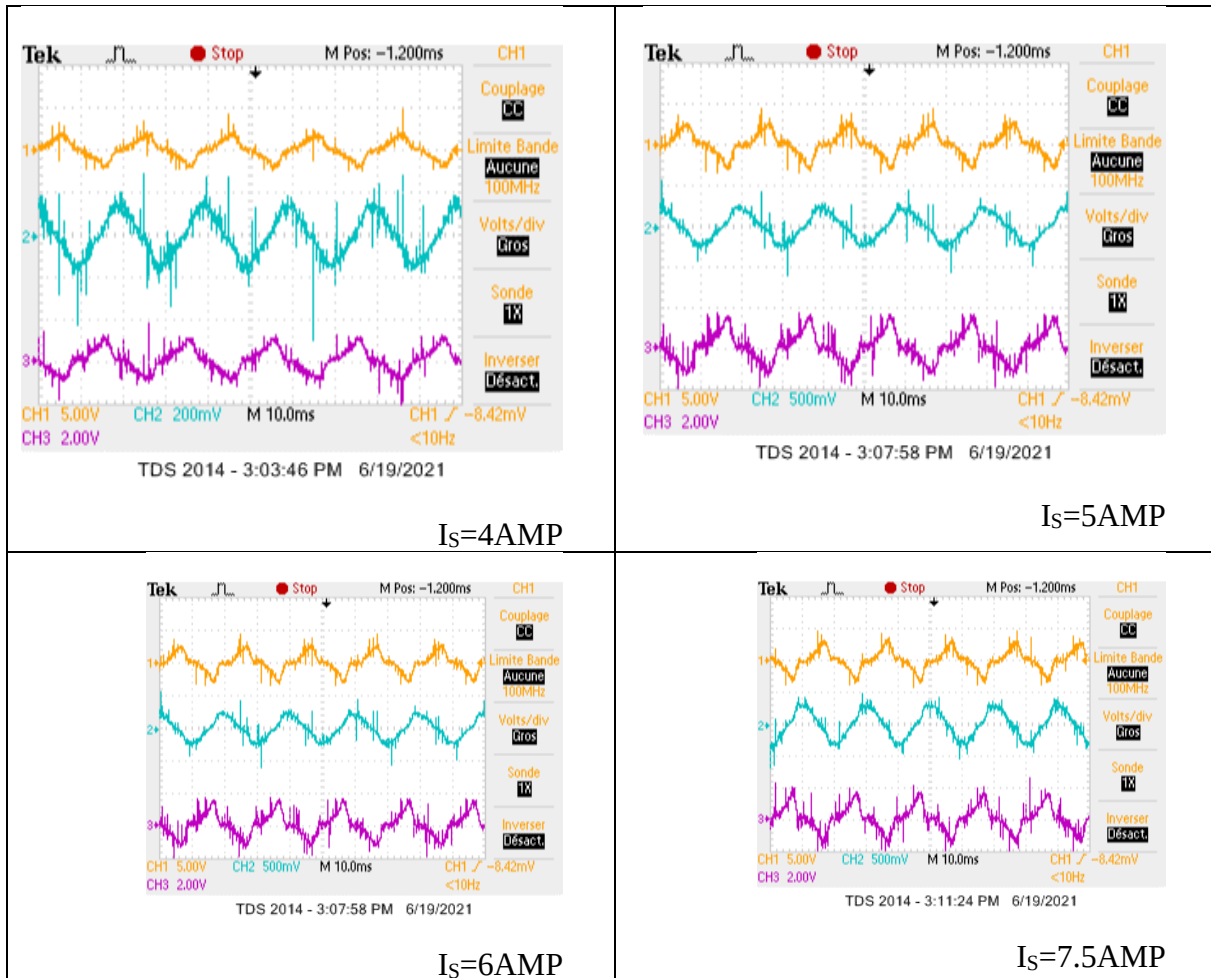


$I_s=3\text{AMP}$

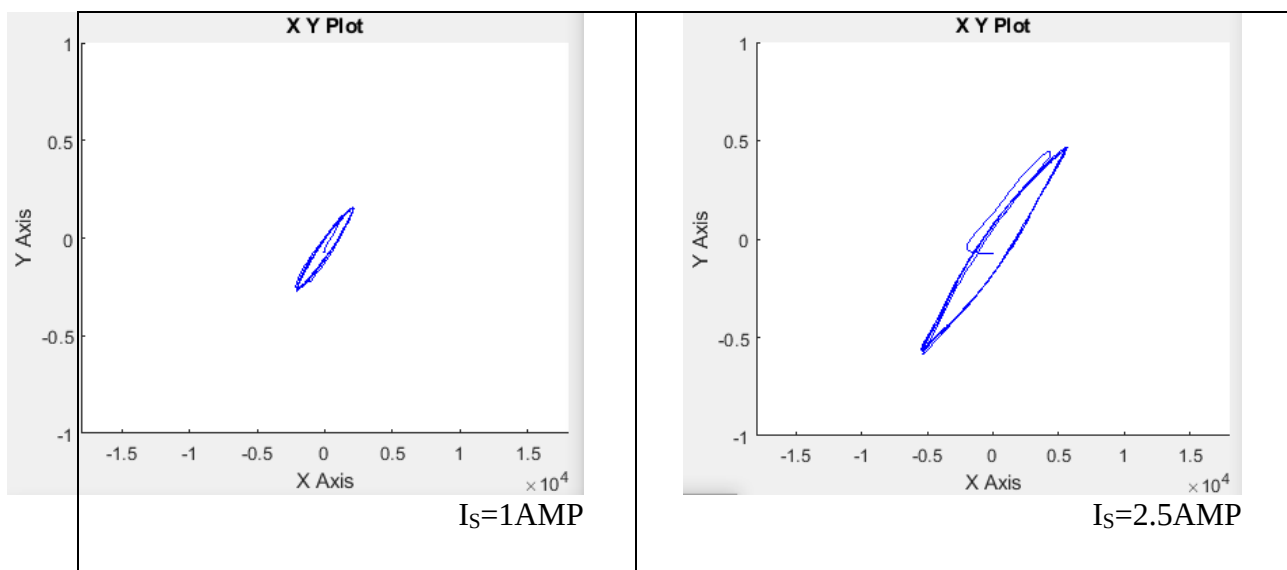


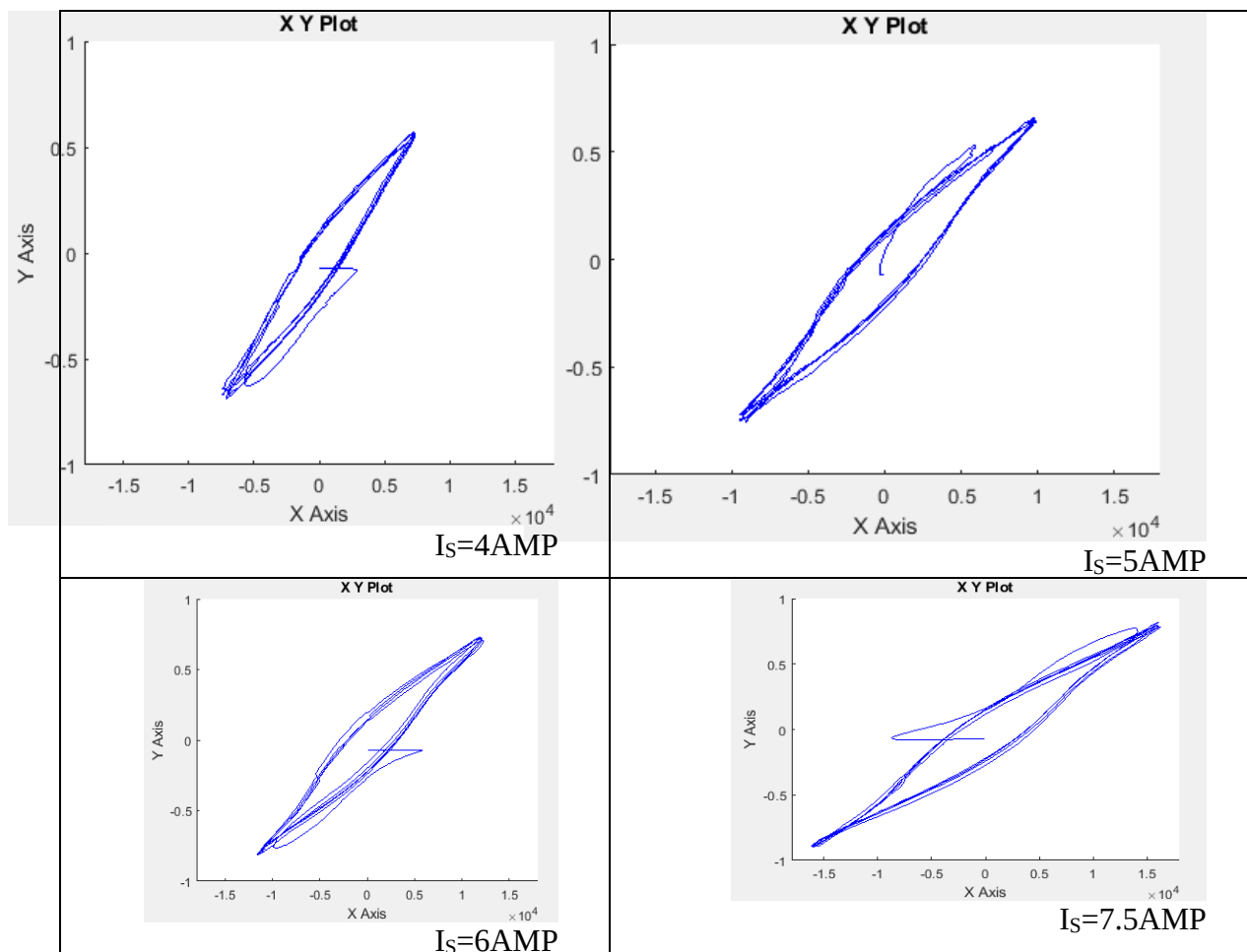
شکل ۶-۱۱- حلقه هیستریزس بدست آمده از نتایج تست هسته پودر آهن به ازای جریات های تحریک مختلف به ازای فرکانس کلیدزنی ۲۰Khz و فرکانس تحریک ۵۰ هرتز





شکل ۷-۱۱- ولتاژ اولیه، جریان اولیه و ولتاژ ثانویه به ازای مقادیر متفاوت جریا های تحریک به ازای فرکانس کلیدزنی 40Khz و فرکانس تحریک ۵۰ هرتز

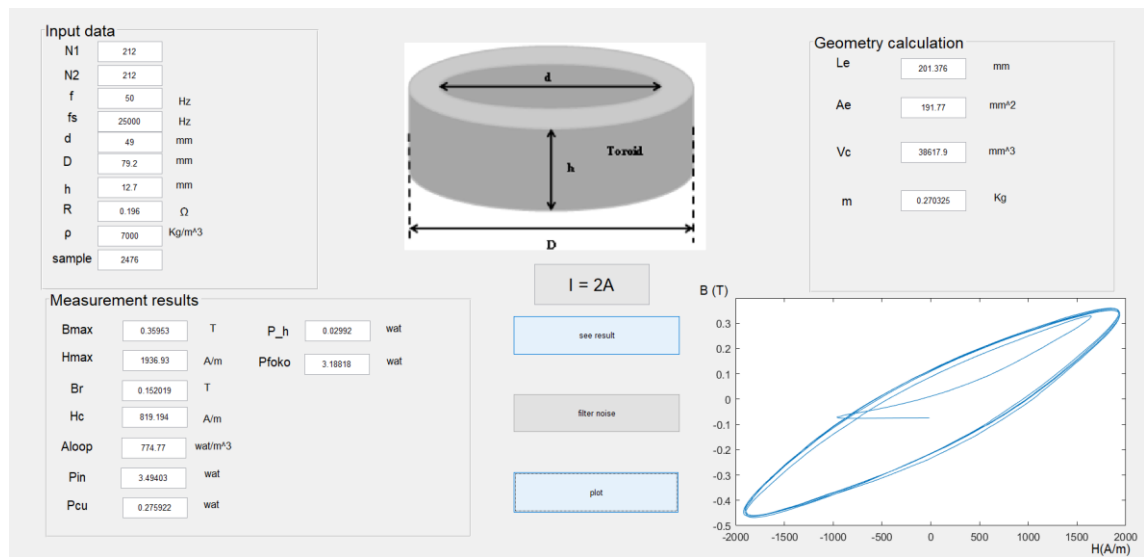




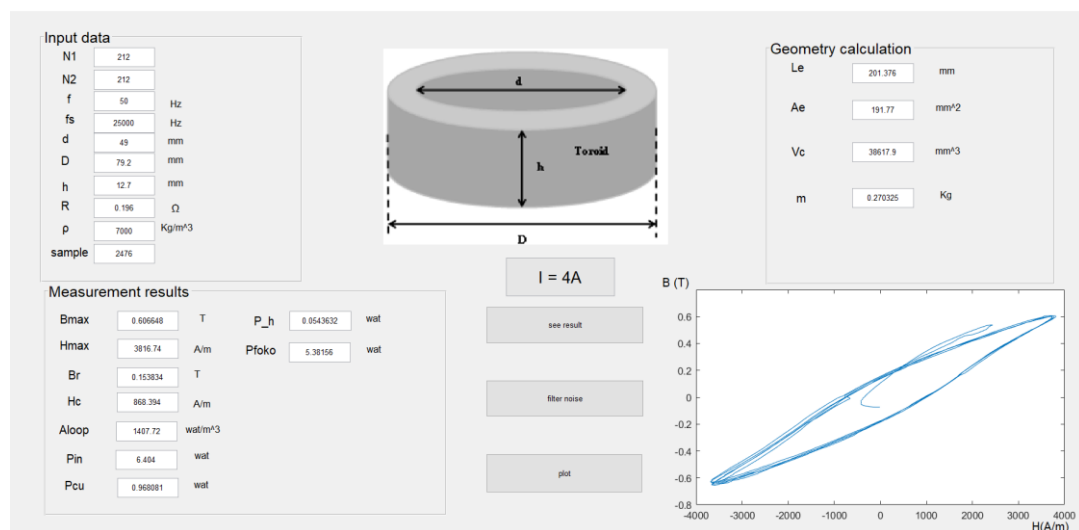
شکل ۸-۱۱ - حلقه هیستریزیس بدست آمده از نتایج تست هسته پودر آهن به ازای جریات های تحریک مختلف به ازای فرکانس کلیدزنی 40Khz و فرکانس تحریک ۵۰ هرتز

بررسی شکل موجهای خروجی اینورتر و حلقه هیستریزیس بدست آمده نشان می دهد فرکانس کلید زنی 20KHZ از نظر کیفیت شکل موج عملکرد بهتری دارد. در فرکانس 40KHZ به دلیل کاهش عرض پالسها در مقایسه با dead time تنظیم شده (حدود 2usec) ، اعوجاج در ولتاژ افزایش می یابد. بعلاوه افزایش فرکانس کلید زنی تا فرکانس 40khz موجب افزایش شدید تلفات سوئیچهای ماسفت و پیچیدگی سیستم خنک سازی می گردد.

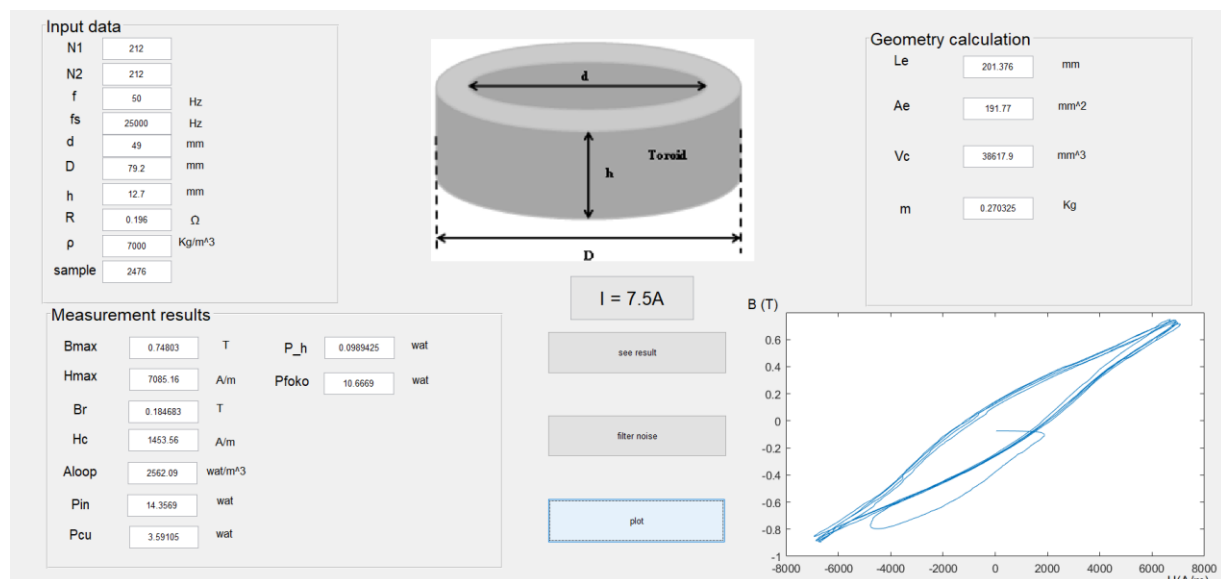
در ادامه پس از پردازش اولیه و صحت گذاری داده های اندازه گیری شده ، داده ها به نرم افزار GUI بارگذاری می شود. نتایج محاسبات هسته تروئید T300-26 به ازای مقادیر مختلف جریان تحریک در شکل های ۴-۹ تا ۴-۱۱ آورده شده است.



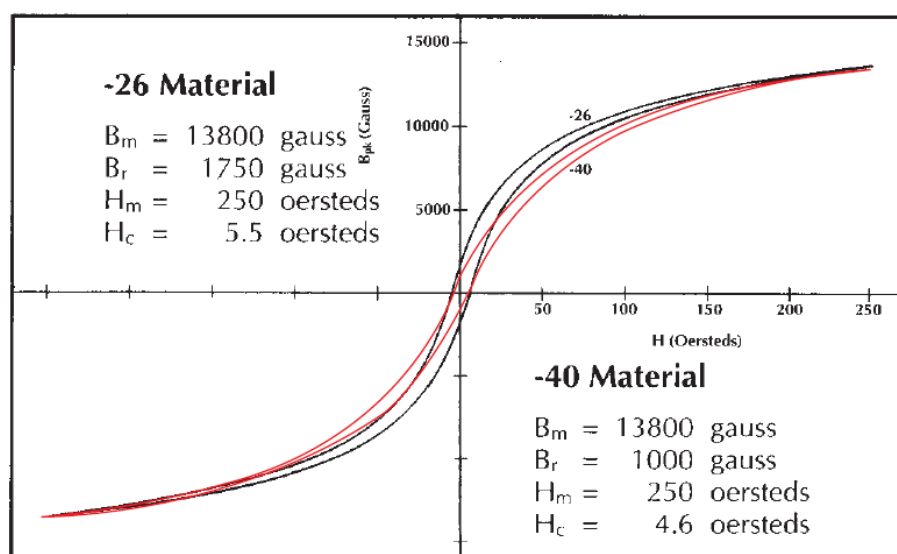
شکل ۹-۱۱ - محاسبات GUI برای جریان ۲



شکل ۱۰-۱۱ - محاسبات GUI برای جریان ۴



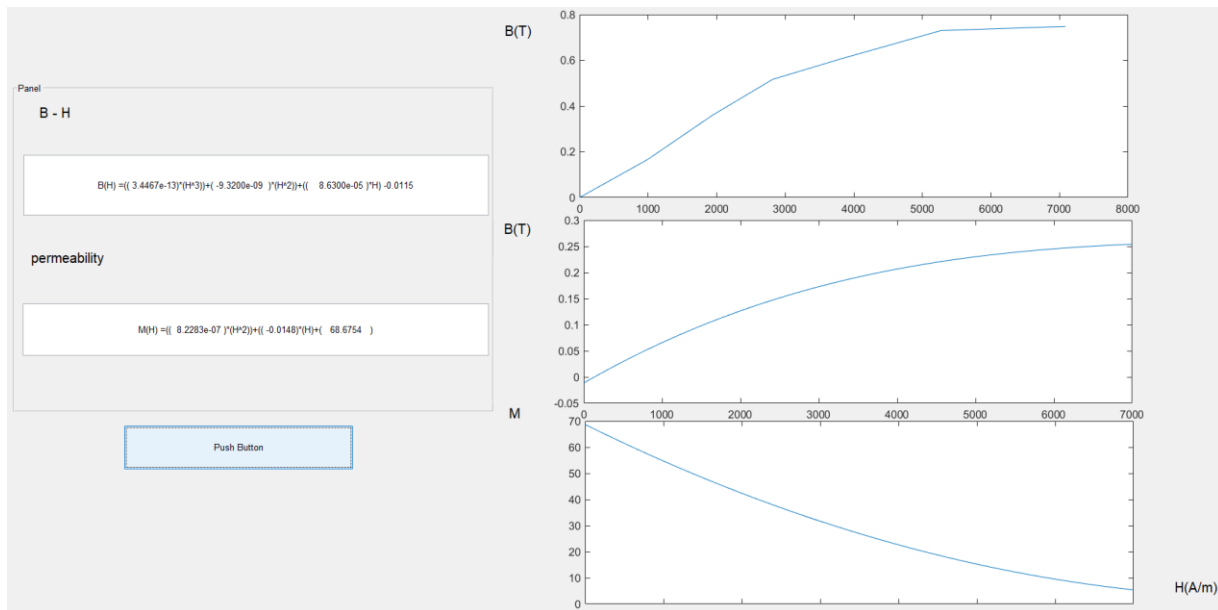
شکل ۱۱-۱۱- محاسبات GUI برای جریان ۱۵



شکل ۱۱-۱۲- مشخصه کاتالوگ حلقه هیستریزیس هسته T300-26

شکل ۴-۱۲ نمودار حلقه هیستریزیس متداول هسته T300-26 به ازای حداکثر جریان تحریک را نمایش می دهد. بررسی نتایج بدست آمده از نتایج تست های اولیه دستگاه نشان می دهد نتایج بدست آمده از خروجی دستگاه در حد قابل قبولی با مشخصه سازنده منطبق می باشد.

به منظور تعیین مشخصه مغناطیس شوندگی هسته مقادیر هندسی B_m و H_m از نتایج تست های قبلی استخراج و نمودار آن در شکل ۴-۱۳ نمایش داده شده است. پس از استخراج مکان هندسی نقاط B_m و H_m ، مطابق شکل ۴-۱۳ معادله مشخصه مغناطیس کنندگی به صورت تابع از B بر حسب H بدست می آید. به منظور محاسبه معادله ریاضی این مشخصه از ابزار CFTOOL مطلب استفاده شده است. با در اختیار داشتن معادله B بر حسب H و مشتق گیری از آن معادله مشخصه نفوذ پذیری هسته به صورت تابعی H بدست می آید.



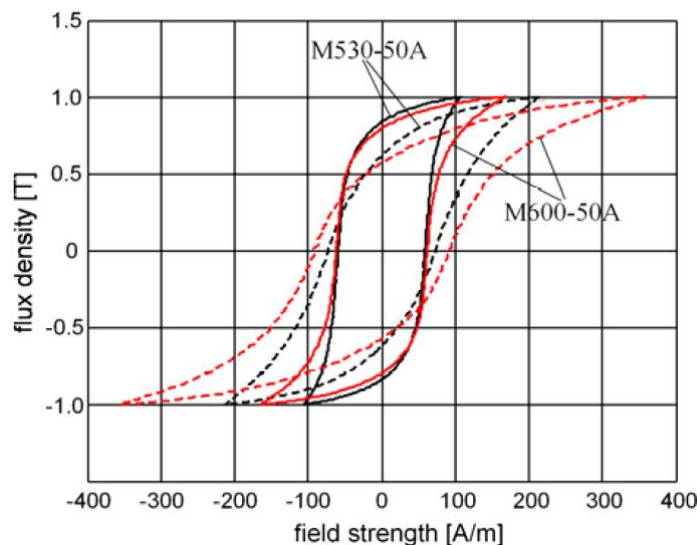
شکل ۱۳-۱۱- مشخصه مغناطیس کنندگی و نفوذ پذیری مغناطیسی و محاسبه تابع B بر حسب H و نفوذ پذیری مغناطیسی هسته

۳-۱۱- اندازه گیری مشخصه ورق مغناطیسی با فریم اپشتین

در ادامه به منظور ارزیابی آزمایشگاهی روش اندازه گیری حلقه هیستریزیس با استفاده از فریم اپشتین، مطابق شکل ۴-۱۴ ورق مغناطیسی M530-50 مورد آزمون قرار گرفته است.

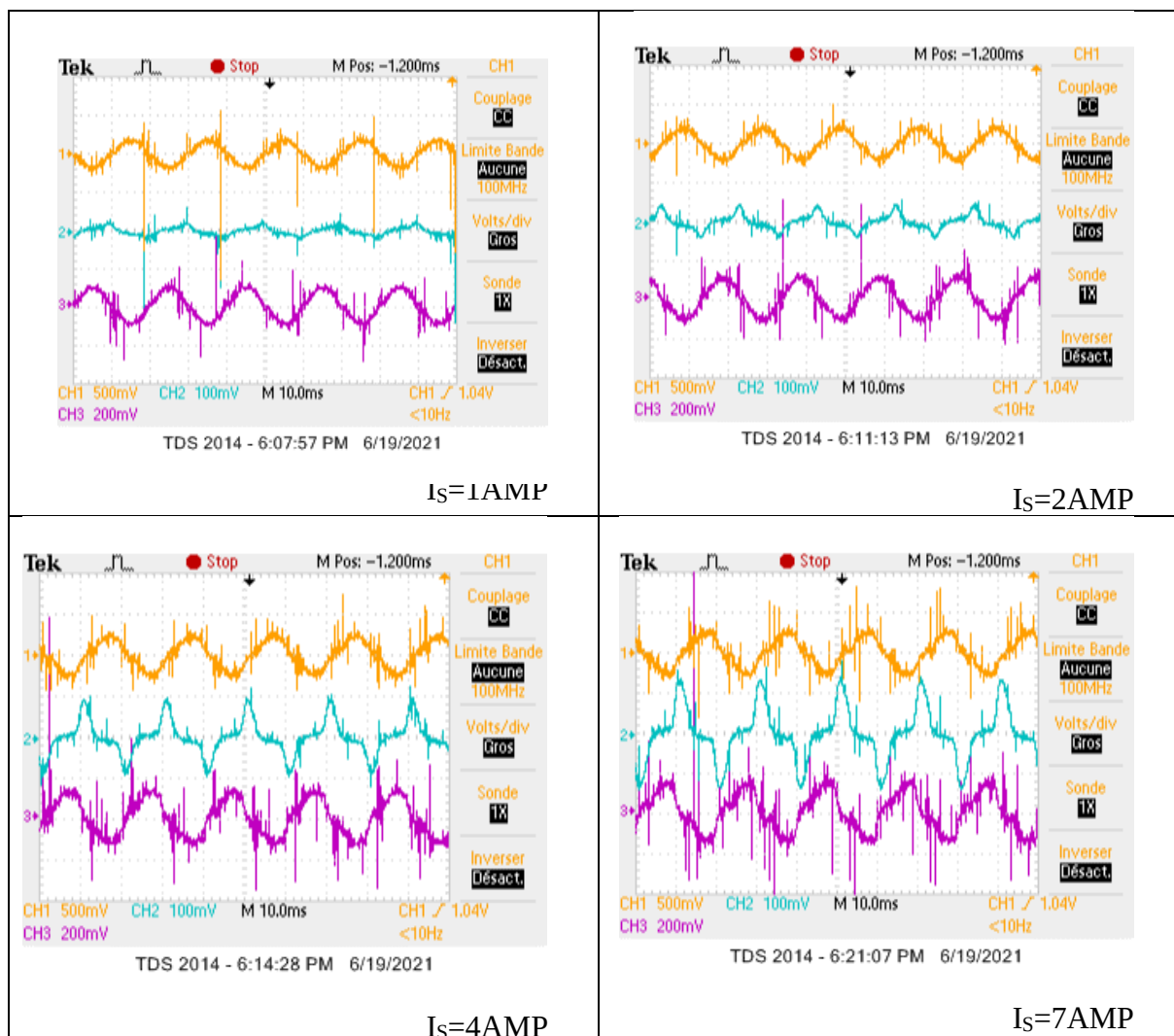


شکل ۱۴-۱۱- تست ورق مغناطیسی M530-50 با استفاده از فریم اپشتین



شکل ۱۵-۱۱- مشخصه حلقه هیستریزیس ورق M530-50 A در چگالی شار 1 تسلا

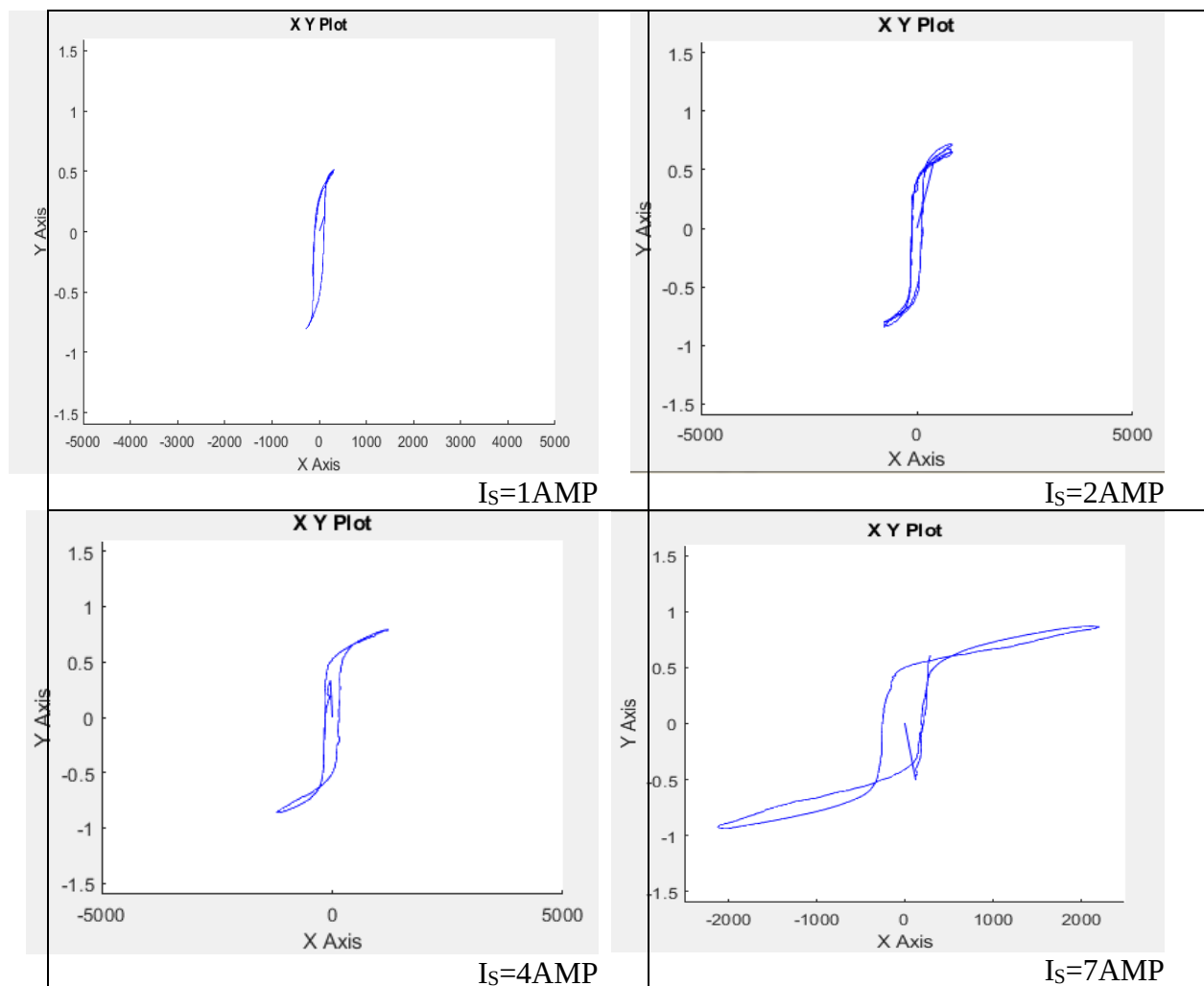
مشخصه حلقه هیستریزیس ورق M530-50 A در شکل ۴-۱۵ نمایش داده شده است. شکل ۴-۱۶ ولتاژ اولیه، جریان اولیه و ولتاژ ثانویه اکتساب شده از تست فریم اپشتین به ازای جریان‌های مختلف را نمایش می‌دهد. بطوریکه انتظار می‌رفت با افزایش جریان ورودی ورق‌های مغناطیسی به سرعت به ناحیه اشباع وارد می‌شود. لازم به ذکر است در این آزمایش تعداد ۴ ورق M530-50A با ابعاد مشخص (طبق استاندارد) در هر یک از ساق‌های فریم اپشتین قرار گرفته است. پس از پردازش اولیه سیگنال‌های بدست آمده از تست آزمایشگاهی، منحنی حلقه هیستریزیس برای هر یک از تست‌ها، مطابق شکل ۴-۱۷، استخراج می‌گردد. بطوریکه ملاحظه می‌شود در برخی از مراحل تست منحنی هیستریزیس بدست آمده دارای مقداری اعوجاج می‌باشد. پس از چندین مرحله تست و بررسی نتایج مشخص شد علت این اغتشاشات در حلقه هیستریزیس ارتعاش ورق‌های مغناطیسی داخل فریم (به‌خصوص در نزدیکی نقطه کار اشباع) و جابجایی ورق‌ها حین تست و در نتیجه آن تغییر جزئی در مشخصه مغناطیسی می‌باشد که موجب می‌گردد تا مولفه‌های فرکانس پایین در جریان مدار و در نتیجه شار و ولتاژ القایی ظاهر گردد. این مولفه‌ها به‌خصوص در مرحله انتگرال‌گیری از ولتاژ ثانویه و محاسبه شار می‌تواند موجب جابجایی حلقه هیستریزیس و اختلال در کار دستگاه گردد. شکل ۴-۱۸ یک نمونه از این اعوجاج را نمایش می‌دهد. بطوریکه در مرحله طراحی فریم اپشتین بررسی گردید، به منظور کاهش فاصله بین ورق‌های مغناطیسی و همچنین کاهش ارتعاشات ورق‌های مغناطیسی از یک وزنه برنجی استفاده شده است. انجام تست‌های مختلف نشان می‌دهد استفاده از یک سازه مکانیکی مناسب با قابلیت مهار کامل ورق‌های مغناطیسی می‌تواند روی کیفیت اندازه‌گیری تأثیر مثبت داشته باشد.



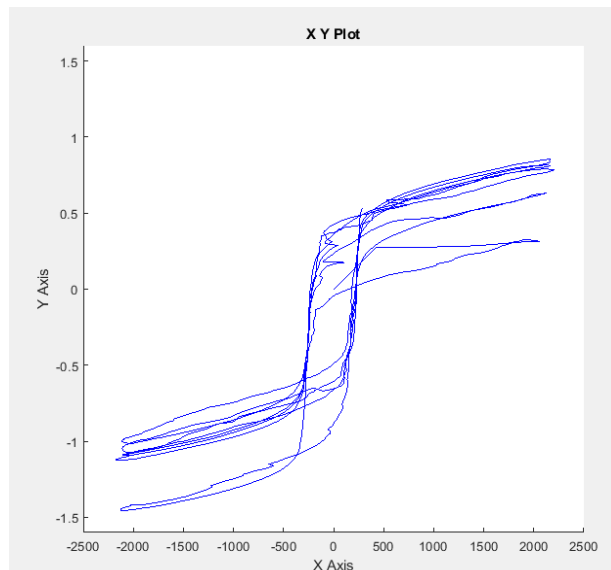
شکل ۱۶-۱۱- ولتاژ اولیه، جریان اولیه و ولتاژ ثانویه تست فریم اِپستین به ازای مقادیر متفاوت جریا های تحریک به ازای

فرکانس کلیدزنی 20Khz و فرکانس تحریک ۵۰ هرتز و روق M530-50A

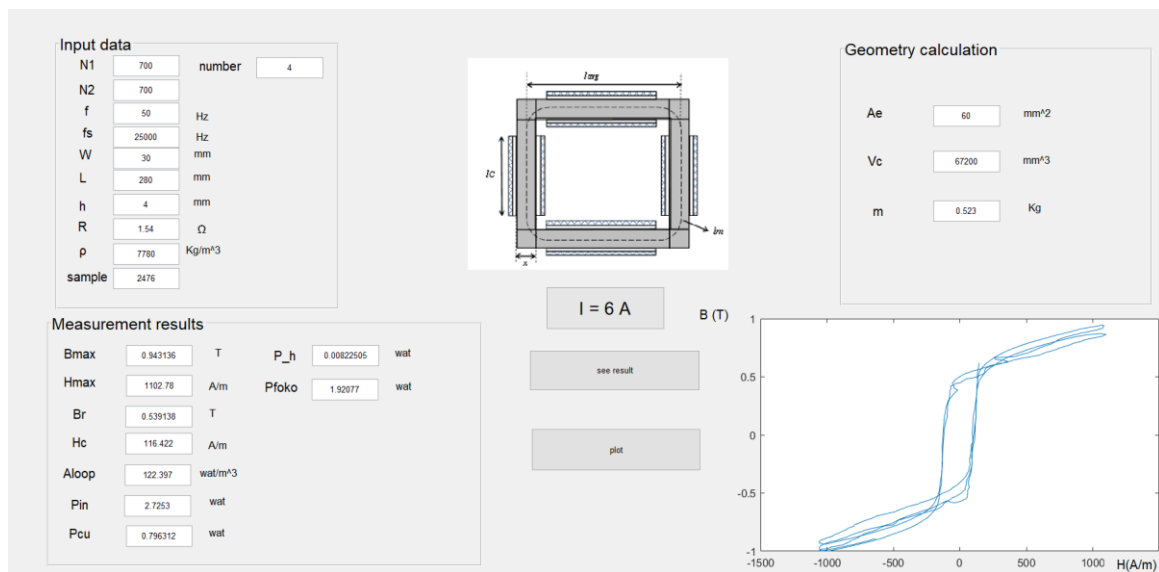
پس از پردازش اولیه داده ها و ارزیابی حلقه های هیستریزس بدست آمده در جریان های مختلف داده های ذخیره شده در نرم افزار GUI بارگذاری می گردد. در ادامه مقادیر محاسبه شده مطابق شکل ۴-۱۹ تا ۴-۲۱، به ازای جریان ۲ و ۶ آمپر نمایش داده شده است. همانگونه که ملاحظه می شود نتایج بدست آمده برای تست های اولیه تا حد قابل قبولی با مشخصات کارخانه ای تطابق دارد. مشخصات تلفات ورق M530-50A بر اساس داده های سازنده و مقالات در پیوست ۲ آورده شده است.



شکل ۱۷-۱۱- ولتاژ اولیه و ولتاژ ثانویه به ازای مقادیر متفاوت جریا های تحریک به ازای فرکانس کلیدزنی 20Khz و فرکانس تحریک ۵۰ هرتز و روق M530-50A

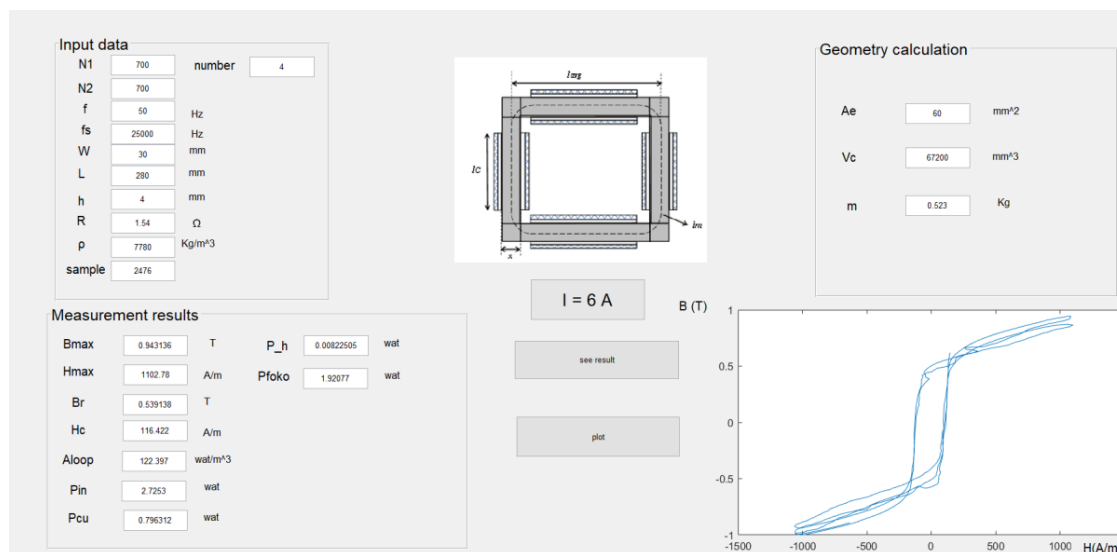


شکل ۱۸-۱۱- شکل موج اعوجاجی مشخصه BH

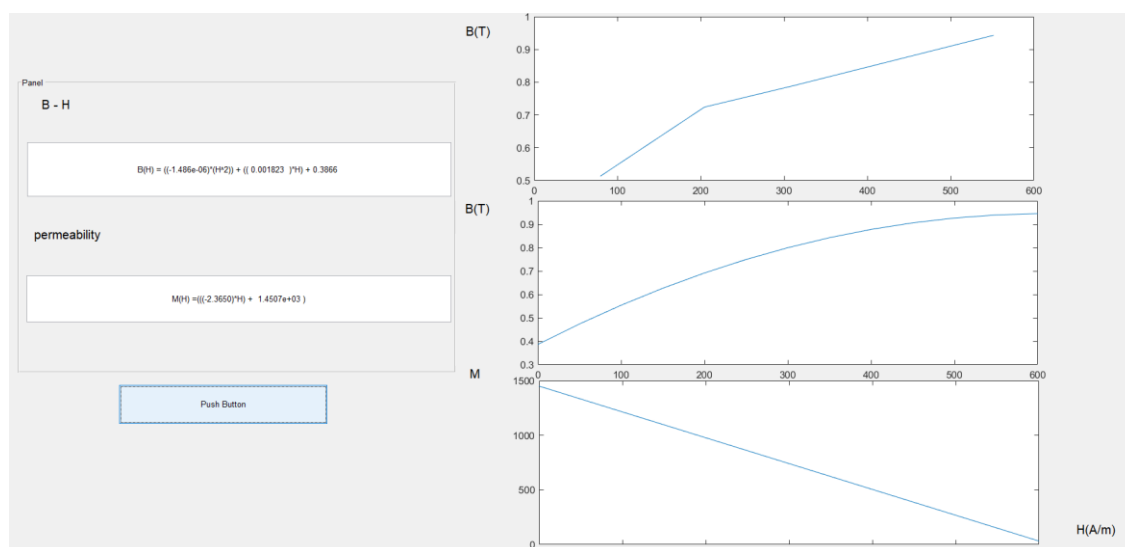


شکل ۱۹-۱۱- خروجی برنامه GUI به ازای جریان ۶ آمپر

در شکل های ۴-۱۹ تا ۴-۲۰ داده های گرد آوری شده از نتایج تست در نرم افزار GUI پیاده سازی شده بار گذاری و نتایج محاسبات ارائه گردیده است. با مقایسه مقادیر بدست آمده با مشخصات سازنده (پیوست ۲) ملاحظه می گردد نتایج بدست آمده تا حد قابل قبولی با مشخصات کارخانه ایی انطباق دارد.



شکل ۲۰-۱۱- خروجی برنامه GUI به ازای جریان ۲ آمپر

شکل ۲۱-۱۱- مشخصه مغناطیس کنندگی و نفوذ پذیری مغناطیسی و محاسبه تابع B بر حسب H و نفوذ پذیری مغناطیسی هسته

۴-۱۱- کالیبراسیون دستگاه

در این فصل نتایج تستهای اولیه دستگاه B-H متر پیاده سازی شده مورد آزمایش قرار گرفته است. تحلیل نتایج تست های انجام شده نشان می دهد دستیابی به دقت قابل قبول به منظور انجام تستهای مختلف مستلزم کالیبراسیون دستگاه و اخذ تاییدیه ای مورد نیاز از مراجع معتبر می باشد. در یک تقسیم بندی کلی منابع ایجاد کننده عدم قطعیت در عملکرد دستگاه پیاده سازی شده عبارتند از:

هر گونه عدم قطعیت در اندازه گیری مشخصات هندسی و فیزیکی اجزاء مدار مغناطیسی ساخته شده می تواند منجر به عدم قطعیت در نتایج نهایی خروجی دستگاه B-H متر گردد. با وجود آنکه کلیه محاسبات ابعادی مدارات مغناطیسی طبق استاندارد انجام شده، لازم است تا در نمونه صنعتی ساخت مدارات مغناطیسی با دقت بسیار بالا و با ابزار کالیبره شده انجام گردد بطوریکه با اندازه گیری های ابعادی دقیق و استفاده از روش های ساخت دقیق، خطاهای ناشی از ساخت کاهش داده شود.

سنسور های مورد استفاده : سنسور های ولتاژ و جریان مورد استفاده نقش بسیار اساسی در نمونه برداری دقیق سیگنالها و استخراج نتایج قابل اطمینان دارند. همانگونه که در تحلیل نتایج آزمایشگاهی نیز بررسی گردید هر گونه خطا یا افسست در خروجی سنسورها نتایج خروجی نهایی دستگاه را به شدت تحت تاثیر قرار می دهد. بنابراین لازم است در نمونه صنعتی دستگاه از سنسورهای مطمئن و کالیبره شده همراه با تاییدیه از مراجع معتبر در دستگاه استفاده گردد.

خطا های ناشی از نمونه برداری و پردازش داده ها: خطای ناشی از نمونه برداری سیگنالهای آنالوگ خروجی سنسور های اندازه گیری دستگاه با استفاده از کارت های I/O با نرخ نمونه برداری بالا قابل اصلاح می باشد. آنچه در این بخش اهمیت دارد استفاده از ابزارهای پردازش سیگنال مانند فیلترهای دیجیتال و الگوریتم های حذف نویز و افسست می باشد که لازم است در بکارگیری آنها دقت کافی لحاظ گردد. در اغلب موارد طراحی و تنظیم این الگوریتم ها لازم است تا یک مصالحه بین دقت و کیفیت خروجی انجام شود. در غیر اینصورت بکارگیری نامناسب این ابزارهای پردازشی می تواند خود عامل ایجاد خطا و انحراف در نتایج تست باشد.

کیفیت توان خروجی آمپلی فایر: بطور ایده آل لازم است تا منبع تغذیه ورودی یک منبع سینوسی بدون هیچ گونه نویز و اغتشاش باشد. وجود هر گونه اعوجاج مانند مولفه های ولتاژ هارمونیک، مولفه DC یا اسپایک های ولتاژ می تواند منجر به اعوجاج در سیگنالهای ولتاژ و جریان و نهایتاً در نتایج خروجی تست می گردد. همانگونه که بررسی گردید در این پروژه از یک اینورتر ۶۳ سطحی با فرکانس کلید زنی بالا به عنوان منبع تغذیه مدار مغناطیسی استفاده گردید. با توجه به ماهیت سوئیچینگ مدار آمپلی فایر ارائه شده در این پروژه، وجود مولفه های هارمونیک فرکانس بالا در ولتاژ خروجی اجتناب ناپذیر است. البته انتخاب توپولوژی CHB نامتقارن و تولید ولتاژ خروجی ۶۳ سطحی، تولید ولتاژ با مقدار THD کمتر از یک درصد را نتیجه می دهد. با این وجود برای ساخت نمونه صنعتی استفاده از سوئیچ های ماسفت فرکانس بالا و همچنین استفاده از روشهای کلید زنی پیشرفته تر می تواند تغذیه مدار مغناطیسی را به شرایط ایده آل نزدیک کند.

۵-۱۱- نتیجه گیری و پیشنهادات

این پروژه با هدف طراحی و ساخت دستگاه تعیین مشخصات مواد مغناطیسی نرم اجرا گردید. به طور کلی طراحی و ساخت دستگاه در سه گام اصلی انجام شد که عبارتند از :

طراحی مفهومی ، طراحی تفصیلی و شبیه سازی دستگاه و تهیه نقشه های صنعتی

ساخت کلیه زیر بخشهای سخت افزاری دستگاه

پیاده سازی محیط نرم افزاری

تجمیع و انجام تست های نهایی

در مرحله اول از پروژه پس از رصد نمونه های تجاری موجود در دنیا، ضمن شناسایی قابلیت های این محصولات استاندارد ها و مراجع مرتبط با این موضوع گردآوری و مطالعه گردید. در ادامه طراحی مفهومی و طراحی تفصیلی بخش های مختلف دستگاه انجام گردید که شامل :

مدارات مغناطیسی برای سه نوع پودر مغناطیسی، فریم اپشتین و فریم تک ورق. در این مرحله به منظور تایید محاسبات طراحی علاوه بر مدل تحلیلی از مدلسازی دینامیکی در محیط مطلب و مدل اجزاء محدود استفاده گردید.

طراحی و شبیه سازی مدار آمپلی فایر. مدار آمپلی فایر مورد استفاده در این پروژه مبتنی بر یک اینور تر ۶۳ سطحی CBH نامتقارن بوده است.

همچنین به منظور اطمینان از صحت محاسبات تحلیلی و تایید طراحی انجام گرفته، مدارات مغناطیسی طراحی شده در محیط سیمولینک مطلب و نرم افزار FLUX شبیه سازی و نتایج خروجی صحنه گذاری گردید. مستندات طراحی تفصیلی و شبیه سازی دستگاه در گزارش مرحله اول ارائه گردید.

در این گزارش میتندات مراحل دوم، سوم و چهارم پروژه ارائه گردید. در مرحله دوم و سوم پروژه ساخت کلیه اجزاء سخت افزاری و نرم افزاری دستگاه B-H متر شامل مدارات مغناطیسی، مدار آمپلی فایر، برد FPGA و مدارات سنسور و همچنین پیاده سازی یک بسته نرم افزاری در محیط GUI مطلب بررسی گردیده است. گزارش و مستندات ساخت و پیاده سازی کلیه زیر بخشهای سخت افزاری و نرم افزاری در فصل های مربوطه به تفصیل بررسی گردید. در هر مرحله از ساخت اجزاء دستگاه تست های اولیه انجام و ایرادات احتمالی رفع گردیده است.

در مرحله چهارم پروژه پس از تجميع اجزاء دستگاه و آماده سازی ست آپ آزمایشگاهی، نتایج تست های انجام شده بدست آمده مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. بررسی نتایج تست های انجام گرفته نشان می دهد ایده پیشنهادی جهت ساخت نمونه صنعتی و بومی سازی دستگاه B-H متر قابل اجرا می باشد.

بر اساس نتایج بدست آمده در این پژوهش، جمع بندی و پیشنهادات ارائه شده در ارتباط با تجاری سازی و ساخت نمونه صنعتی دستگاه B-H مواد مغناطیسی نرم بر اساس ایده پیش نهادی در این پروژه به شرح زیر می باشد:

چالش اساسی در ساخت دستگاه B-H متر که جنبه فن آورانه نیز دارد، مازول آمپلی فایر به عنوان منبع تغذیه ورودی دستگاه می باشد. در این پروژه از یک مبدل ۶۳ سطحی CHB به عنوان آمپلی فایر قابل برنامه ریزی استفاده شده که این ایده با موفقیت طراحی، شبیه سازی و پیاده سازی گردید. مزیت اصلی این توپولوژی امکان دسترسی به سطوح توان بالا و امپدانس خروجی بسیار پایین نسبت به روش های معمول می باشد. با توجه به قابلیت توسعه توان خروجی مازول آمپلی فایر، استفاده از توپولوژی پیشنهادی برای مواد مغناطیسی سخت نیز با کمترین تغییرات امکان پذیر می باشد. بررسی های انجام گرفته نشان می دهد با انجام طراحی صنعتی و یکپارچه سازی مدارات، حجم و وزن مازول آمپلی فایر تا یک سوم نمونه آزمایشگاهی موجود فراهم می گردد.

بخش مدار مغناطیسی با توجه به نوع ماده مغناطیسی تحت تست مورد بررسی قرار گرفت. در این پروژه مدارات مغناطیسی مورد نیاز برای تست سه نمونه پودر مغناطیسی، فریم اپشتاین و ورق تکی طراحی و پیاده سازی گردید. یکی از اولویت های اصلی در طراحی و پیاده سازی مدارات مغناطیسی انجام محاسبات طراحی با توجه به استانداردها و دستورالعمل های بین المللی بوده است. چالش اساسی در این بخش از پروژه وابستگی دقت نتایج نهایی دستگاه تست به دقت ساخت مدارات مغناطیسی می باشد. لازم است تا در ساخت نمونه صنعتی دقت مورد نیاز در شناسایی مشخصات دقیق فیزیکی و ابعادی اجزاء مدار مغناطیسی لحاظ گردد. برای نمونه در مراحل تست تست فریم اپشتاین بررسی گردید ملاحظه گردید ارتعاش و جابجایی ورق های تحت تست می تواند در نتایج تست خروجی اختلال ایجاد کند. بنابراین پیشنهاد می گردد در مرحله ساخت نمونه صنعتی دستگاه B-H متر، طراحی مکانیکی مستحکم و دقیق برای مدارات مغناطیسی و سازه های مرتبط با آن انجام گردد.

علاوه بر بخش های سخت افزاری، به منظور گردآوری و پردازش داده های تست و استخراج مشخصات مغناطیسی خروجی یک نرم افزار GUI در محیط نرم افزار مطالب پیاده سازی شده است. در این نرم افزار محاسبه مقادیر چگالی شار و شدت میدان ماکزیمم، H_c ، B_r ، مساحت حله هیستریزس، تلفات هسته، نفوذپذیری مغناطیسی انجام شده است. در این نرم افزار پردازش و استخراج مشخصات مغناطیسی به صورت آفلاین انجام می گیرد. این نرم افزار امکان تنظیم فیلترهای مورد استفاده برای حذف اسپایک ها، نویز های فرکانس بالا و افست را برای کاربر فراهم می کند. با توجه به تجارب بدست آمده در پیاده سازی نرم افزار دستگاه B-H در نمونه آزمایشگاهی، امکان توسعه نرم افزار پیشرفته در نسخه صنعتی میسر گردیده است.

یکی از چالش های ساخت تجهیزات اندازه گیری ابزار دقیق کالیبراسیون دستگاه و اخذ تاییدیه از مراجع معتبر می باشد. در این پروژه پس از پیاده سازی زیر بخشهای سخت افزاری و نرم افزاری دستگاه تستهای نهایی بر اساس نمونه های ساخته شده انجام گردید. در این پروژه نمونه های تحت تست از مواد

مغناطیسی موجود در بازار بوده که مشخصات فنی آنها توسط سازندگان ارائه شده است. در نمونه آزمایشگاهی ساخته شده دستگاه B-H متر، کالیبراسیون دستگاه به استندات این داده ها انجام گردید. در مرحله صنعتی سازی دستگاه لازم است تا کالیبراسیون دستگاه بر اساس تست تعداد متعدد مواد مغناطیسی موجود و مقایسه با خروجی های تست یک دستگاه معتبر و با تایید یک نهاد شخص سوم انجام گردد.

پیوست:

پیوست ۱

هسته ترانس مورد استفاده برای سلف چاپر:

DATASHEET material -52:

جدول ۱ مشخصات فنی هسته پود آهن 52-

OD	(nom. - bare core) (max. - after coating)	63.50 mm 64.26 mm	2.500 in 2.530 in
ID	(nom. - bare core) (min. - after coating)	31.75 mm 30.99 mm	1.250 in 1.220 in
Ht	(nom. - bare core) (max. - after coating)	25.40 mm 26.16 mm	1.000 in 1.030 in
Mass	(approximate)	400 grams	
Magnetic Dimensions	A _e - Eff. Mag. Cross Section	3.84 cm ²	
	L _e - Eff. Mag. Path Length	15.0 cm	
	V _e - Eff. Core Volume	57.4 cm ³	
	W _A - Min. Eff. Window Area	7.54 cm ²	
	s _a - Surface Area	150 cm ²	
	mlt - mean length per turn	10.1 cm	
Inductance	μ _i (reference)	75	
	A _L value (nominal)	242 nH/N ²	
	Test Winding	N=100, #24 AWG	
	Frequency	10 kHz	
	Voltage on Agilent 4284A	1.7 V	
	A _L tolerance	±10%	
Core Loss	$\text{Core Loss(mW/cm}^3\text{)} = \frac{f}{\frac{a}{Bpk^3} + \frac{b}{Bpk^{2.3}} + \frac{c}{Bpk^{1.65}}} + d \cdot Bpk^2 \cdot f^2$		
	where B _{pk} expressed in gauss, f expressed in hertz, and: a=1.00E+09, b=1.10E+08, c=2.10E+06, d=6.90E-14		
	Bpk	140 G	
	frequency	100 kHz	
	Core Loss (nominal)	58 mW/cm ³	
	Core Loss (maximum)	67 mW/cm ³	
DC Saturation	$\% \mu_i = \frac{1}{a + b \cdot H^c} + d$		
	where H expressed in oersteds, and: a=1.00E-02, b=4.66E-06, c=1.84, d=0.00		
	H _{DC}	50 Oe	
	Percent Initial Perm(nom.)	61.6%	
	Percent Initial Perm(min.)	53.4%	
	Coating/Pkg	Coating Type:	Green/Blue Epoxy Paint
Voltage Breakdown (min.)		500 Vrms, 60Hz	
Limit		3 mA, 5 s	
Package Quantity		45 Pcs/Box	

پیوست ۲

جدول ۱ تلفات در واحد جرم یوغ تشکیل شده از ورق فولاد الکتریکی را نشان می‌دهد.

جدول ۱: تلفات در واحد جرم یوغ تشکیل شده از ورق فولاد الکتریکی

نوع ورق	ضخامت (mm)	فرکانس (Hz)	چگالی شار مغناطیسی (T)	تلفات ورق ۵۰ Hz (W/Kg) ۶۰ Hz (W/lb)
C 120-23	۰.۲۳	۵۰	۱.۵	۰.۷۷
			۱.۷	۱.۱۸
		۶۰	۱.۵	۰.۴۶
			۱.۷	۰.۷۱
C 120-27	۰.۲۷	۵۰	۱.۵	۰.۸۰
			۱.۷	۱.۱۸
		۶۰	۱.۵	۰.۴۸
			۱.۷	۰.۷۱
C 130-27	۰.۲۷	۵۰	۱.۵	۰.۸۳
			۱.۷	۱.۲۳
		۶۰	۱.۵	۰.۵۰
			۱.۷	۰.۷۴
C 120-30	۰.۳۰	۵۰	۱.۵	۰.۸۲
			۱.۷	۱.۱۸
		۶۰	۱.۵	۰.۴۹
			۱.۷	۰.۷۱
C 130-30	۰.۳۰	۵۰	۱.۵	۰.۸۴
			۱.۷	۱.۲۳
		۶۰	۱.۵	۰.۵۰
			۱.۷	۰.۷۴
C 150-30	۰.۳۰	۵۰	۱.۵	۰.۹۳
			۱.۷	۱.۴۳
		۶۰	۱.۵	۰.۵۶
			۱.۷	۰.۸۵
C 165-35	۰.۳۵	۵۰	۱.۵	۱
			۱.۷	۱.۴۸
		۶۰	۱.۵	۰.۶۰
			۱.۷	۰.۸۸
H 075-23 L	۰.۲۳	۵۰	۱.۵	۰.۵۵

۰.۷۴	۱.۷			
۰.۳۳	۱.۵	۶۰		
۰.۴۴	۱.۷			
۰.۵۷	۱.۵	۵۰	۰.۲۳	H 080-23 L
۰.۷۸	۱.۷			
۰.۳۴	۱.۵	۶۰		
۰.۴۷	۱.۷			
۰.۶	۱.۵	۵۰		
۰.۸۳	۱.۷			
۰.۳۶	۱.۵	۶۰		
۰.۵۰	۱.۷			
۰.۶۲	۱.۵	۵۰	۰.۲۳	H 090-23
۰.۸۸	۱.۷			
۰.۳۷	۱.۵	۶۰		
۰.۵۳	۱.۷			
۰.۶۷	۱.۵	۵۰		
۰.۹۸	۱.۷			
۰.۴۰	۱.۵	۶۰		
۰.۵۹	۱.۷			
۰.۶۳	۱.۵	۵۰	۰.۲۷	H 085-27 L
۰.۸۳	۱.۷			
۰.۳۸	۱.۵	۶۰		
۰.۵۰	۱.۷			
۰.۶۵	۱.۵	۵۰		
۰.۸۸	۱.۷			
۰.۳۹	۱.۵	۶۰		
۰.۵۳	۱.۷			
۰.۶۸	۱.۵	۵۰	۰.۲۷	H 095-27
۰.۹۳	۱.۷			
۰.۴۱	۱.۵	۶۰		
۰.۵۶	۱.۷			
۰.۷۱	۱.۵	۵۰		
۰.۹۸	۱.۷			
۰.۴۳	۱.۵	۶۰		
۰.۵۹	۱.۷			
۰.۷۶	۱.۵	۵۰	۰.۲۷	H 110-27
۱.۰۸	۱.۷			

۰.۴۶	۱.۵	۶۰		
۰.۶۵	۱.۷			
۰.۷۲	۱.۵	۵۰	۰.۳۰	H 100-30
۰.۹۸	۱.۷			
۰.۴۴	۱.۵	۶۰		
۰.۵۹	۱.۷			
۰.۷۵	۱.۵	۵۰	۰.۳۰	H 105-30
۱.۰۳	۱.۷			
۰.۴۵	۱.۵	۶۰		
۰.۶۲	۱.۷			
۰.۷۷	۱.۵	۵۰	۰.۳۰	H 110-30
۱.۰۸	۱.۷			
۰.۴۶	۱.۵	۶۰		
۰.۶۵	۱.۷			

پیوست ۲

جدول ۲، جدول ۳ و جدول ۴ مقادیر جریان i و شار پیوندی Φ مربوط به هسته ماده مغناطیسی به ترتیب پودر آهن با کد 26- به شکل تروئید، ماده مغناطیسی ورق M 530-50 A در آزمایش تک ورق و ماده مغناطیسی ورق M 530-50 A در قاب اپستین را به منظور تعیین مشخصات هسته پودر ترانسفورماتور با استفاده از رابطه (۴-۱) نشان می‌دهد.

جدول ۲: مقادیر جریان i و شار پیوندی Φ مربوط به هسته ماده مغناطیسی پودر و تروئید

Φ (Wb)	I (A)	H (A/m)	B (T)
0	0	0	1.14E-02
2.37957E-05	0.285976	334	1.42E-01
4.44334E-05	0.596783	697	2.64E-01
7.3819E-05	1.1362	1327	4.39E-01
9.78144E-05	1.704728	1991	5.82E-01
0.000113821	2.185065	2552	6.78E-01
1.24E-04	2.56865	3000	7.40E-01
0.000142406	3.406887	3979	8.48E-01
1.56E-04	4.281084	5000	9.28E-01
0.000162472	4.82735	5638	9.67E-01
1.73E-04	5.993518	7000	1.03E+00
0.000182107	7.202496	8412	1.08E+00
1.90E-04	8.562168	10000	1.13E+00
0.000202954	10.99896	12846	1.21E+00
0.000216322	13.62752	15915.96371	1.29E+00
2.32E-04	17.03443	19895	1.38E+00

جدول ۳: مقادیر جریان i و شار پیوندی Φ مربوط به هسته ماده مغناطیسی ورق M 530-50 A

Φ (Wb)	I (A)	H (A/m)	B (T)
0	0	0	0
6.20801E-05	0.07375	59	0.310401
8.98486E-05	0.09625	77	0.449243
0.000113383	0.1175	94	0.566914
0.000134568	0.13875	111	0.672842
0.000143793	0.14875	119	0.718966
0.000155755	0.1625	130	0.778775
0.000178286	0.19125	153	0.891428
0.000200182	0.22375	179	1.00091
0.000236937	0.29375	235	1.184683
0.000258526	0.35	280	1.292629
0.000282198	0.4375	350	1.410992
0.000285328	0.4525	362	1.426642
0.000308741	0.625	500	1.543707
0.000313164	0.68375	547	1.56582
0.000321322	0.875	700	1.606611
0.000325696	1.17875	943	1.628481
0.000326145	1.25	1000	1.630724
0.000328353	2.09875	1679	1.641763
0.000330888	3.57125	2857	1.65444
0.000334137	5.45	4360	1.670683
-0.000054	0	0	-0.27

جدول ۴: مقادیر جریان i و شار پیوندی Φ مربوط به هسته ماده مغناطیسی ورق M 530-50 A در قاب اپستین

Φ (Wb)	I (A)	H (A/m)	B (T)
0	0	0	0
1.8624E-05	0.079228571	59	0.31040074
2.69546E-05	0.1034	77	0.449243182
3.40148E-05	0.126228571	94	0.566913573
4.03705E-05	0.149057143	111	0.67284151
4.31379E-05	0.1598	119	0.718965807
4.67265E-05	0.174571429	130	0.778774599
5.34857E-05	0.205457143	153	0.891428498
6.00546E-05	0.240371429	179	1.000910233
7.1081E-05	0.315571429	235	1.184683005
7.75577E-05	0.376	280	1.292629125
8.46595E-05	0.47	350	1.410991792
8.55985E-05	0.486114286	362	1.426642101
9.26224E-05	0.671428571	500	1.543707043
9.39492E-05	0.734542857	547	1.565819907
9.63967E-05	0.94	700	1.60661093
9.77088E-05	1.266314286	943	1.628480717
9.78434E-05	1.342857143	1000	1.630723508
9.85058E-05	2.254657143	1679	1.641762935
9.92664E-05	3.836542857	2857	1.654440224
0.000100241	5.854857143	4360	1.670682527

جدول ۵ تلفات هیستریزیس در واحد جرم چند نمونه ورق

Type of dynamo sheet		M400-50A Sweden		M530-50A Czech Republic		M530-50A South Korea		M600-50A Romania		M800-50A Sweden	
Flux density [T]		1.0	1.5	1.0	1.5	1.0	1.5	1.0	1.5	1.0	1.5
Coercive force [A/m]	0°	31	36	53	63	59	68	62	70	61	74
	45°	35	40	65	74	66	76	74	85	73	86
	90°	37	41	66	75	73	84	91	102	77	88
Remanence [T]	0°	0.77	0.99	0.88	1.29	0.84	1.21	0.80	1.02	0.87	1.31
	45°	0.70	0.88	0.77	1.01	0.76	1.05	0.67	0.82	0.75	1.09
	90°	0.64	0.78	0.71	0.90	0.62	0.79	0.57	0.64	0.64	0.90
Field strength [A/m]	0°	95	1092	95	715	107	603	167	896	108	635
	45°	117	1588	173	1364	155	1194	229	1158	166	1039
	90°	138	1687	203	1301	214	989	358	1464	207	1051
η	---	0.0148		0.0247		0.0260		0.0286		0.0280	
$P_h, 0^\circ$	measured	0.015	0.030	0.025	0.055	0.026	0.055	0.029	0.061	0.028	0.061
$P_h, 45^\circ$	measured	0.017	0.040	0.030	0.067	0.029	0.063	0.033	0.067	0.038	0.069
	estimated	0.016	0.040	0.028	0.062	0.029	0.061	0.034	0.073	0.037	0.068
$P_h, 90^\circ$	measured	0.018	0.041	0.031	0.067	0.032	0.065	0.039	0.074	0.034	0.070
	estimated	0.017	0.042	0.030	0.066	0.031	0.064	0.037	0.079	0.032	0.071

جدول ۶ تلفات فوکو چند نمونه ورق استاندارد

Type of dynamo sheet		M400-50A Sweden		M530-50A Czech Republic		M530-50A South Korea		M600-50A Romania		M800-50A Sweden	
Conductivity [1/Ω·m]*10 ⁶	Thomson bridge	2.36		2.90		3.16		3.57		3.75	
	T. method DC	2.33		2.85		3.18		3.58		3.75	
	T. method AC	2.30		2.84		3.12		3.53		3.66	
Flux density [T]		1.0	1.5	1.0	1.5	1.0	1.5	1.0	1.5	1.0	1.5
P_{tot} , 50 Hz, 0°	measured	1.264	3.022	1.815	4.041	1.885	4.049	2.182	4.614	2.014	4.379
P_{tot} , 50 Hz, 90°	measured	1.479	3.415	2.157	4.632	2.129	4.465	2.671	5.237	2.213	4.703
P_{ed} , 50 Hz	estimated (6)	0.315	0.708	0.386	0.869	0.425	0.958	0.481	1.082	0.502	1.131
P_{exc} , 50 Hz	estimated (7)	0.274	0.503	0.307	0.562	0.324	0.594	0.352	0.645	0.348	0.638
V_0 [A/m]	calculated	0.035	0.041	0.060	0.071	0.067	0.077	0.070	0.079	0.069	0.084
P_{ed} , 50 Hz, 0°	measured	0.514	1.522	0.565	1.291	0.585	1.299	0.732	1.564	0.614	1.329
	exceeds	0.199	0.814	0.179	0.422	0.160	0.341	0.251	0.482	0.112	0.198
P_{ed} , 50 Hz, 90°	measured	0.579	1.365	0.607	1.282	0.529	1.215	0.721	1.537	0.513	1.203
	exceeds	0.264	0.657	0.221	0.413	0.104	0.257	0.240	0.455	0.011	0.072
P_{tot} , 100 Hz, 0°	measured	3.427	8.099	4.630	10.579	4.769	10.602	5.748	12.136	5.003	11.270
P_{tot} , 100 Hz, 90°	measured	3.918	8.878	5.450	11.635	5.269	11.221	6.684	13.385	5.425	11.650
P_{ed} , 100 Hz	estimated (6)	1.261	2.838	1.547	3.483	1.704	3.837	1.926	4.336	2.013	4.531
P_{exc} , 100 Hz	estimated (7)	0.773	1.421	0.864	1.589	0.913	1.679	0.992	1.824	0.981	1.804
P_{ed} , 100 Hz, 0°	measured	1.927	5.099	2.130	5.079	2.169	5.102	2.848	6.036	2.203	5.170
	exceeds	0.666	2.261	0.583	1.596	0.465	1.265	0.922	1.700	0.190	0.639
P_{ed} , 100 Hz, 90°	measured	2.118	4.778	2.350	4.935	2.069	4.721	2.784	5.985	2.025	4.650
	exceeds	0.857	1.940	0.803	1.452	0.365	0.884	0.858	1.649	0.012	0.119

مراجع

- [5] Q. Tang, "Investigation of Magnetic Properties of Electrical Steel and Transformer Core at High Flux Densities," PhD Thesis, The University of Manchester, 2015.
- [6] C. W. T. McLyman, *Transformer and inductor design handbook*: CRC press, 2017.
- [7] B. D. Cullity and C. D. Graham, *Introduction to magnetic materials*: John Wiley & Sons, 2011.
- [8] J. J. Morton, "Magnetic properties of materials," *JJLM Trinity*, 2012.
- [10] P. Parthasaradhy and S. Ranganayakulu, "Hysteresis and eddy current losses of magnetic material by Epstein frame method-novel approach," *Int. J. Eng. Sci.(IJES)*, pp. 85-93, 2014.
- [12] S. Yanase, M. Uchiyama, S. Ishikawa, and Y. Okazaki, "AC Magnetic Properties of Electrical Steel Sheet under DC-biased Magnetization," *Przeglad Elektrotechniczny (Electrical Review)*, vol. 87, pp. 52-56, 2011.
- [13] J. M. Walker, "Measurement and modeling of the anhysteretic magnetization of magnetic cores for temperature and frequency dependent effects," 2007.
- [15] O. Perevertov and R. Schäfer, "Influence of applied tensile stress on the hysteresis curve and magnetic domain structure of grain-oriented Fe-3% Si steel," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 47, p. 185001, 2014.
- [17] J. Sievert, "The measurement of magnetic properties of electrical sheet steel—survey on methods and situation of standards," *Journal of magnetism and magnetic materials*, vol. 215, pp. 647-651, 2000.
- [19] B. Hudoffsky, C. Okinori, and J. Trueller, "Investigation of Core Losses under Different Conditions Applying the Cross Power Method," in *PCIM Europe 2016; International*

Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management; Proceedings of, 2016, pp. 1-8.

[21] IEC, "MAGNETIC MATERIALS-Part 2: Methods of measurement of the magnetic properties of electrical steel strip and sheet by means of an Epstein frame," ed: IEC 60404-2, 2008.

[22] IEC, "Magnetic materials – Part 3: Methods of measurement of the magnetic properties of electrical steel strip and sheet by means of a single sheet tester," ed. IEC 60404-3, 2010.

[23] IEC, "Magnetic materials – Part 4: Methods of measurement of d.c. magnetic properties of magnetically soft materials," ed: IEC 60404-4, 2008.

[24] IEC, "MAGNETIC MATERIALS– Part 5: Permanent magnet (magnetically hard) materials – Methods of measurement of magnetic properties," ed: IEC 60404-5, 2015.

[25] IEC, "Magnetic materials – Part 6: Methods of measurement of the magnetic properties of magnetically soft metallic and powder materials at frequencies in the range 20 Hz to 200 kHz by the use of ring specimens," ed: IEC 60404-6, 2003.

[26] IEC, "Magnetic materials. Part 7: Method of measurement of the coercivity of magnetic materials in an open magnetic circuit," ed: IEC 60404-7, 1982.

[27] IEC, "MAGNETIC MATERIALS – Part 8-1: Specifications for individual materials – Magnetically hard materials," ed: IEC 60404-8-1, 2015.

[28] IEC, "Magnetic materials. Part 9: Methods of determination of the geometrical characteristics of magnetic steel sheet and strip," ed: IEC 60404-9, 1987.

[29] IEC, "Magnetic materials – Part 10: Methods of measurement of magnetic properties of electrical steel strip and sheet at medium frequencies," ed: IEC 60404-10, 2016.

[30] IEC, "Magnetic materials – Part 11: Method of test for the determination of surface insulation resistance of magnetic sheet and strip," ed: IEC 60404-11, 2012.

[31] IEC, "Magnetic materials - Part 12: Guide to methods of assessment of temperature capability of interlaminar insulation coatings," ed: IEC 60404-12, 1992.

[32] IEC, "Magnetic materials - Part 13: Methods of measurement of density, resistivity and stacking factor of electrical steel sheet and strip," ed: IEC 60404-13, 1995.

[33] IEC, "Magnetic materials - Part 14: Methods of measurement of the magnetic dipole moment of a ferromagnetic material specimen by the withdrawal or rotation method," ed: IEC 60404-14, 2002.

[34] GB/T, "Methods of measurement of d.c. magnetic properties of magnetically soft materials," ed: GB/T 13012, 2017

[35] GB/T, "Methods of measurement of a.c. magnetic properties of magnetically soft materials," ed: GB/T 3658, 2008.

[36] M. Markovic and Y. Perriard, "Eddy current power losses in a toroidal laminated core with rectangular cross section," in *Electrical Machines and Systems, 2009. ICEMS 2009. International Conference on*, 2009, pp. 1-4.

[41] L. Petrescu, V. Ionita, E. Cazacu, and C. Petrescu, "Steinmetz'parameters fitting procedure for the power losses estimation in soft magnetic materials," in *Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM) & 2017 Intl Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP), 2017 International Conference on*, 2017, pp. 208-213.

[45] J. Gholinezhad and R. Noroozian, "Application of cascaded H-bridge multilevel inverter in DTC-SVM based induction motor drive," in *Power Electronics and Drive Systems Technology (PEDSTC), 2012 3rd*, 2012, pp. 127-132.

- [46] M. Ahmad and B. Khan, "New approaches for harmonics reduction in solar inverters," in *Engineering and Systems (SCES), 2012 Students Conference on*, 2012, pp. 1-6.
- [47] B. P. McGrath and D. G. Holmes, "Multicarrier PWM strategies for multilevel inverters," *IEEE transactions on industrial electronics*, vol. 49, pp. 858-867, 2002.
- [48] M. Malinowski, K. Gopakumar, J. Rodriguez, and M. A. Perez, "A survey on cascaded multilevel inverters," *IEEE Transactions on industrial electronics*, vol. 57, pp. 2197-2206, 2010.
- [49] A. Moeini and S. Wang, "A DC Link Sensor-Less Voltage Balancing Technique for Cascaded H-Bridge Multilevel Converters With Asymmetric Selective Harmonic Current Mitigation-PWM," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, 2018.
- [50] N. P. Schibli, T. Nguyen, and A. C. Rufer, "A three-phase multilevel converter for high-power induction motors," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 13, pp. 978-986, 1998.
- [51] A. Gaikwad and P. A. Arbune, "Study of cascaded H-Bridge multilevel inverter," in *Automatic Control and Dynamic Optimization Techniques (ICACDOT), International Conference on*, 2016, pp. 179-182.
- [52] A. Prayag and S. Bodkhe, "A Comparative Study of Symmetrical and Asymmetrical Cascaded H Bridge Multilevel Inverter Topology for Industrial Drive," 2018.
- [53] S. Rathore, M. K. Kirar, and S. Bhardwaj, "Simulation of Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter using PD, POD, APOD Techniques," *Electrical & Computer Engineering: An international Journal (ECIJ) Volume*, vol. 4.
- [54] M. D. Manjrekar, P. K. Steimer, and T. A. Lipo, "Hybrid multilevel power conversion system: A competitive solution for high-power applications," *IEEE transactions on industry applications*, vol. 36, pp. 834-841, 2000.
- [55] M. D. Manjrekar and T. A. Lipo, "A hybrid multilevel inverter topology for drive applications," in *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1998. APEC'98. Conference Proceedings 1998., Thirteenth Annual*, 1998, pp. 523-529.
- [56] S. Du, J. Liu, J. Lin, and Y. He, "A novel DC voltage control method for STATCOM based on hybrid multilevel H-bridge converter," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, pp. 101-111, 2013.
- [57] C. Silva, N. Espinoza, and P. Lezana, "A novel modulation technique for a multilevel hybrid converter with floating capacitors," in *IECON 2010-36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, 2010, pp. 296-302.
- [58] Z. Du, B. Ozpineci, L. M. Tolbert, and J. N. Chiasson, "DC-AC cascaded H-bridge multilevel boost inverter with no inductors for electric/hybrid electric vehicle applications," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 45, pp. 963-970, 2009.
- [59] J. Dixon, A. A. Bretón, F. E. Ríos, J. Rodríguez, J. Pontt, and M. A. Pérez, "High-power machine drive, using nonredundant 27-level inverters and active front end rectifiers," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 22, pp. 2527-2533, 2007.
- [60] C. Rech and J. R. Pinheiro, "Hybrid multilevel converters: Unified analysis and design considerations," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 54, pp. 1092-1104, 2007.
- [61] J. Song-Manguelle, S. Mariethoz, M. Veenstra, and A. Rufer, "A generalized design principle of a uniform step asymmetrical multilevel converter for high power conversion," in *European Conference on Power Electronics and Applications, EPE*, 2001, pp. 1-12.
- [62] M. Pérez, J. Rodríguez, J. Pontt, and S. Kouro, "Power distribution in hybrid multi-cell converter with nearest level modulation," in *Industrial Electronics, 2007. ISIE 2007. IEEE International Symposium on*, 2007, pp. 736-741.

- [63] K. Sano and M. Takasaki, "A transformerless D-STATCOM based on a multi-voltage cascade converter requiring no DC sources," in *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2011 IEEE*, 2011, pp. 3151-3158.
- [64] H. Belkamel, S. Mekhilef, A. Masaoud, and M. A. Naeim, "Novel three-phase asymmetrical cascaded multilevel voltage source inverter," *IET Power Electronics*, vol. 6, pp. 1696-1706, 2013.
- L. Shu-Hua, "Origine de la Boussole II. aimant et boussole," *Isis*, vol. 45, pp. 78-94, [1] 1954.
- [2] W. Gilbert and P. F. Mottelay, *De magnete*: Courier Corporation, 1958.
- [3] D. W. Ball, "Maxwell's Equations, Part VII," *Spectroscopy*, vol. 27, pp. 20-27, 2012.
- [4] F. T. Ulaby, E. Michielssen, and U. Ravaioli, *Fundamentals of Applied Electromagnetics 6e*: Prentice Hall, 2001.
- [5] Q. Tang, "Investigation of Magnetic Properties of Electrical Steel and Transformer Core at High Flux Densities," PhD Thesis, The University of Manchester, 2015.
- [6] C. W. T. McLyman, *Transformer and inductor design handbook*: CRC press, 2017.
- [7] B. D. Cullity and C. D. Graham, *Introduction to magnetic materials*: John Wiley & Sons, 2011.
- [8] J. J. Morton, "Magnetic properties of materials," *JJLM Trinity*, 2012.
- [9] M. Marolt, "Superparamagnetic materials," 2014.
- [10] P. Parthasaradhy and S. Ranganayakulu, "Hysteresis and eddy current losses of magnetic material by Epstein frame method-novel approach," *Int. J. Eng. Sci.(IJES)*, pp. 85-93, 2014.
- [11] R. Pry and C. Bean, "Calculation of the energy loss in magnetic sheet materials using a domain model," *Journal of Applied Physics*, vol. 29, pp. 532-533, 1958.
- [12] S. Yanase, M. Uchiyama, S. Ishikawa, and Y. Okazaki, "AC Magnetic Properties of Electrical Steel Sheet under DC-biased Magnetization," *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*, vol. 87, pp. 52-56, 2011.
- [13] J. M. Walker, "Measurement and modeling of the anhysteretic magnetization of magnetic cores for temperature and frequency dependent effects," 2007.
- [14] O. Messal, F. Sixdenier, L. Morel, N. Burais, and A. Bui, "Effect of Temperature on Magnetic Hysteresis: Modeling by the Jiles-Atherton Model," in *20th international Conference on Soft Magnetic Materials*, 2011, pp. 18-22.
- [15] O. Perevertov and R. Schäfer, "Influence of applied tensile stress on the hysteresis curve and magnetic domain structure of grain-oriented Fe-3% Si steel," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 47, p. 185001, 2014.
- [16] C. A. Charalambous, Z. D. Wang, P. Jarman, and M. Osborne, "2-D finite-element electromagnetic analysis of an autotransformer experiencing ferroresonance," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 24, pp. 1275-1283, 2009.
- [17] J. Sievert, "The measurement of magnetic properties of electrical sheet steel—survey on methods and situation of standards," *Journal of magnetism and magnetic materials*, vol. 215, pp. 647-651, 2000.
- [18] L. 2016 IWATSU ELECTRIC CO., http://www.iti.iwatsu.co.jp/en/products/sy/index_e.html. [Online].
- [19] B. Hudoffsky, C. Okinori, and J. Trueller, "Investigation of Core Losses under Different Conditions Applying the Cross Power Method," in *PCIM Europe 2016; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management; Proceedings of*, 2016, pp. 1-8.

- [20] IEC, "CORES MADE OF SOFT MAGNETIC MATERIALS – MEASURING METHODS – Part 3: Magnetic properties at high excitation level ", ed: IEC 62044-3, 2000.
- [21] IEC, "MAGNETIC MATERIALS-Part 2: Methods of measurement of the magnetic properties of electrical steel strip and sheet by means of an Epstein frame," ed: IEC 60404-2, 2008.
- [22] IEC, "Magnetic materials – Part 3: Methods of measurement of the magnetic properties of electrical steel strip and sheet by means of a single sheet tester," ed. IEC 60404-3, 2010.
- [23] IEC, "Magnetic materials – Part 4: Methods of measurement of d.c. magnetic properties of magnetically soft materials," ed: IEC 60404-4, 2008.
- [24] IEC, "MAGNETIC MATERIALS– Part 5: Permanent magnet (magnetically hard) materials – Methods of measurement of magnetic properties," ed: IEC 60404-5, 2015.
- [25] IEC, "Magnetic materials – Part 6: Methods of measurement of the magnetic properties of magnetically soft metallic and powder materials at frequencies in the range 20 Hz to 200 kHz by the use of ring specimens," ed: IEC 60404-6, 2003.
- [26] IEC, "Magnetic materials. Part 7: Method of measurement of the coercivity of magnetic materials in an open magnetic circuit," ed: IEC 60404-7, 1982.
- [27] IEC, "MAGNETIC MATERIALS – Part 8-1: Specifications for individual materials – Magnetically hard materials," ed: IEC 60404-8-1, 2015.
- [28] IEC, "Magnetic materials. Part 9: Methods of determination of the geometrical characteristics of magnetic steel sheet and strip," ed: IEC 60404-9, 1987.
- [29] IEC, "Magnetic materials – Part 10: Methods of measurement of magnetic properties of electrical steel strip and sheet at medium frequencies," ed: IEC 60404-10, 2016.
- [30] IEC, "Magnetic materials – Part 11: Method of test for the determination of surface insulation resistance of magnetic sheet and strip," ed: IEC 60404-11, 2012.
- [31] IEC, "Magnetic materials - Part 12: Guide to methods of assessment of temperature capability of interlaminar insulation coatings," ed: IEC 60404-12, 1992.
- [32] IEC, "Magnetic materials - Part 13: Methods of measurement of density, resistivity and stacking factor of electrical steel sheet and strip," ed: IEC 60404-13, 1995.
- [33] IEC, "Magnetic materials - Part 14: Methods of measurement of the magnetic dipole moment of a ferromagnetic material specimen by the withdrawal or rotation method," ed: IEC 60404-14, 2002.
- [34] GB/T, "Methods of measurement of d.c. magnetic properties of magnetically soft materials," ed: GB/T 13012, 2017
- [35] GB/T, "Methods of measurement of a.c. magnetic properties of magnetically soft materials," ed: GB/T 3658, 2008.
- [36] M. Markovic and Y. Perriard, "Eddy current power losses in a toroidal laminated core with rectangular cross section," in *Electrical Machines and Systems, 2009. ICEMS 2009. International Conference on*, 2009, pp. 1-4.
- [37] I. Hernández, F. De León, and P. Gómez, "Design formulas for the leakage inductance of toroidal distribution transformers," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 26, pp. 2197-2204, 2011.
- [38] F. De León, S. Purushothaman, and L. Qaseer, "Leakage inductance design of toroidal transformers by sector winding," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, pp. 473-480, 2014.

- [39] *Power Conversion & Line Filter Applications*. Available: web.mit.edu/6.131/www/document/micrometals.pdf
- [40] www.thyssenkrupp-steel.com.
- [41] L. Petrescu, V. Ionita, E. Cazacu, and C. Petrescu, "Steinmetz'parameters fitting procedure for the power losses estimation in soft magnetic materials," in *Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM) & 2017 Intl Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP), 2017 International Conference on*, 2017, pp. 208-213.
- [42] R. Doeblin, C. Teichert, M. Benecke, and A. Lindemann, "Computerized calculation of leakage inductance values of transformers," *Piers Online*, vol. 5, pp. 721-726, 2009.
- [43] *isovac 530-50 A Data sheet*, February 2015. Available: <https://www.voestalpine.com/isovac/en/Product-overview/Data-sheets>
- [44] *isovac high-perm 270-50 A HF Data sheet*, October 2015. Available: <https://www.voestalpine.com/isovac/en/Product-overview/Data-sheets>
- [45] J. Gholinezhad and R. Noroozian, "Application of cascaded H-bridge multilevel inverter in DTC-SVM based induction motor drive," in *Power Electronics and Drive Systems Technology (PEDSTC), 2012 3rd*, 2012, pp. 127-132.
- [46] M. Ahmad and B. Khan, "New approaches for harmonics reduction in solar inverters," in *Engineering and Systems (SCES), 2012 Students Conference on*, 2012, pp. 1-6.
- [47] B. P. McGrath and D. G. Holmes, "Multicarrier PWM strategies for multilevel inverters," *IEEE transactions on industrial electronics*, vol. 49, pp. 858-867, 2002.
- [48] M. Malinowski, K. Gopakumar, J. Rodriguez, and M. A. Perez, "A survey on cascaded multilevel inverters," *IEEE Transactions on industrial electronics*, vol. 57, pp. 2197-2206, 2010.
- [49] A. Moeini and S. Wang, "A DC Link Sensor-Less Voltage Balancing Technique for Cascaded H-Bridge Multilevel Converters With Asymmetric Selective Harmonic Current Mitigation-PWM," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, 2018.
- [50] N. P. Schibli, T. Nguyen, and A. C. Rufer, "A three-phase multilevel converter for high-power induction motors," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 13, pp. 978-986, 1998.
- [51] A. Gaikwad and P. A. Arbune, "Study of cascaded H-Bridge multilevel inverter," in *Automatic Control and Dynamic Optimization Techniques (ICACDOT), International Conference on*, 2016, pp. 179-182.
- [52] A. Prayag and S. Bodkhe, "A Comparative Study of Symmetrical and Asymmetrical Cascaded H Bridge Multilevel Inverter Topology for Industrial Drive," 2018.
- [53] S. Rathore, M. K. Kirar, and S. Bhardwaj, "Simulation of Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter using PD, POD, APOD Techniques," *Electrical & Computer Engineering: An international Journal (ECIJ) Volume*, vol. 4.
- [54] M. D. Manjrekar, P. K. Steimer, and T. A. Lipo, "Hybrid multilevel power conversion system: A competitive solution for high-power applications," *IEEE transactions on industry applications*, vol. 36, pp. 834-841, 2000.
- [55] M. D. Manjrekar and T. A. Lipo, "A hybrid multilevel inverter topology for drive applications," in *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1998. APEC'98. Conference Proceedings 1998., Thirteenth Annual*, 1998, pp. 523-529.
- [56] S. Du, J. Liu, J. Lin, and Y. He, "A novel DC voltage control method for STATCOM based on hybrid multilevel H-bridge converter," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, pp. 101-111, 2013.

- [57] C. Silva, N. Espinoza, and P. Lezana, "A novel modulation technique for a multilevel hybrid converter with floating capacitors," in *IECON 2010-36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, 2010, pp. 296-302.
- [58] Z. Du, B. Ozpineci, L. M. Tolbert, and J. N. Chiasson, "DC-AC cascaded H-bridge multilevel boost inverter with no inductors for electric/hybrid electric vehicle applications," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 45, pp. 963-970, 2009.
- [59] J. Dixon, A. A. Bretón, F. E. Ríos, J. Rodríguez, J. Pontt, and M. A. Pérez, "High-power machine drive, using nonredundant 27-level inverters and active front end rectifiers," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 22, pp. 2527-2533, 2007.
- [60] C. Rech and J. R. Pinheiro, "Hybrid multilevel converters: Unified analysis and design considerations," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 54, pp. 1092-1104, 2007.
- [61] J. Song-Manguelle, S. Mariethoz, M. Veenstra, and A. Rufer, "A generalized design principle of a uniform step asymmetrical multilevel converter for high power conversion," in *European Conference on Power Electronics and Applications, EPE*, 2001, pp. 1-12.
- [62] M. Pérez, J. Rodríguez, J. Pontt, and S. Kouro, "Power distribution in hybrid multi-cell converter with nearest level modulation," in *Industrial Electronics, 2007. ISIE 2007. IEEE International Symposium on*, 2007, pp. 736-741.
- [63] K. Sano and M. Takasaki, "A transformerless D-STATCOM based on a multi-voltage cascade converter requiring no DC sources," in *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2011 IEEE*, 2011, pp. 3151-3158.
- [64] H. Belkamel, S. Mekhilef, A. Masaoud, and M. A. Naeim, "Novel three-phase asymmetrical cascaded multilevel voltage source inverter," *IET Power Electronics*, vol. 6, pp. 1696-1706, 2013.