

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی برق و رباتیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی الکترونیک قدرت و ماشین های الکتریکی

# طراحی و پیاده سازی فیلتر تداخلات الکترومغناطیسی در اینورتر

نگارنده: ابوالفضل سعدی

استاد راهنما:

دکتر علی دستفان

بهمن ۱۳۹۶

شماره ۱۵۴۳، ۰۶، ۰۱  
تاریخ: ۹۲، ۱۱، ۳

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای ابوالفضل سعدی با شماره دانشجویی ۹۴۰۹۳۱۴ رشته مهندسی برق- قدرت گرایش الکترونیک قدرت تحت عنوان: طراحی و پیاده سازی فیلتر تداخلات الکترومغناطیسی در اینورتر که در تاریخ ۱۳۹۶/۱۱/۰۳ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با درجه: ..... عالی) <input checked="" type="checkbox"/>	مردود <input type="checkbox"/>
نظری <input type="checkbox"/>	عملی <input type="checkbox"/>

نوع تحقیق:

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	علی رستمیان	دانشیار	
۲- استاد راهنمای دوم	-	-	-
۳- استاد مشاور	-	-	-
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	مجتبی شهبازی	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	حبیب نادبانان	استادیار	
۶- استاد ممتحن دوم	حسین میرزایی	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده:

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تبصره: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

به پاس تعبیر عظیم و انسانی شان از کلمه ایشار و از خود گذشتگان

به پاس عاطفه سرشار و گرمای امید بخش وجودشان که در این سرو تپین روزگاران بختترین

پشتیبان دست

به پاس قلب های بزرگشان که فریاد رس دست و سرگردانی و ترس در پناهشان به شجاعت

می گرید

و به پاس محبت های بی دریغشان که هرگز فروکش نمی کند

این مجموعه را به پدر و مادر عزیزم تقدیم می کنم

سپاس‌گزاری...

سپاس مخصوص خداوند مهربان که به انسان توانایی و دانایی بخشید تا به بندگانش شفقت ورزد، مهربانی کند و در حل مشکلاتشان یاری‌شان نماید. از راحت خویش بگذرد و آسایش هم نوعان را مقدم دارد،

با او معامله کند و در این خلوص انباز نگیرد و خوش باشد که پروردگار سمیع و بصیر است. به مصداق " **من لم یشکر الخالق لم یشکر المخلوق** " بسی شایسته است به جهت توفیق تحصیل علم، خداوند متعال را شکر گزارده و از درگاهش برای اساتید محترمی که در طی تحصیل از محضرشان کسب فیض نموده‌ام، آرزوی موفقیت نمایم.

وظیفه شاگردی خود می‌دانم از استاد راهنمای گران‌قدر جناب آقای دکتر دستفان که با راهنمایی‌های خود راهگشای اینجانب بوده‌اند کمال تشکر و سپاس‌گزاری را بنمایم. هم‌چنین از جناب آقای دکتر جواد قالیبافان به‌منظور راهنمایی‌های ارزشمند و کمک‌های ایشان سپاس‌گزاری می‌نمایم.

از کلیه دوستان عزیزم که در طول انجام پایان‌نامه به اینجانب کمک نمودند، تشکر می‌نمایم.

ابوالفضل سعدی

بهمن ۱۳۹۶

## تعهدنامه

اینجانب ابوالفضل سعدی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته برق / قدرت دانشکده برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه طراحی و پیاده سازی فیلتر تداخلات

الکترومغناطیسی در اینورتر تحت راهنمایی دکتر علی دستفان متعهد می شوم.

- ◆ تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- ◆ در استفاده از نتایج پژوهش محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- ◆ مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- ◆ کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- ◆ حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- ◆ در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت های آن ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- ◆ در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

امضای دانشجو

تاریخ

### مالکیت نتایج و حق نشر

- ◆ کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن ( مقالات مستخرج، کتاب، برنامه رایانه ای،
- ◆ نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است ) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد.
- ◆ این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- ◆ استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

## چکیده:

این پایان نامه به طراحی و پیاده سازی فیلتر تداخلات الکترومغناطیسی برای اینورتر سه فاز با هدف کاهش سطح انتشار هدایتی می پردازد. در ضمن این طراحی، انتشار هدایتی مود مشترک و تفاضلی، به سطوح استاندارد رسانده می شود. به منظور طراحی، ابتدا بایستی سطح انتشار هدایتی اندازه گیری شود که به منظور اندازه گیری صحیح، بایستی تنظیمات اندازه گیری فراهم گردد. در گام بعد، پس از اندازه گیری انتشار هدایتی و مقایسه با سطح استاندارد، میزان حداقل میرایی مورد نیاز برای آن که بتوان استانداردهای EMC را گذراند محاسبه می شود، و با داشتن میرایی مورد نیاز می توان به طراحی فیلتر مورد نظر پرداخت. با تعیین حداقل میرایی مورد نیاز می توان فرکانس گوشه را برای هر دو مود مشترک و تفاضلی تعیین کرد، که این فرکانس با توجه به ساختار فیلتر تعیین می گردد و پس از آن تعیین مقدار المان های فیلتر صورت می پذیرد. در حین تعیین المان های فیلتر مبحث جریان نشتی مطرح می گردد که این جریان توسط استانداردها محدود شده است. جریان نشتی معیار تعیین خازن مود مشترک است. با تعیین فرکانس گوشه و خازن مود مشترک، مقدار چوک مورد نیاز در مود مشترک بدست می آید. با روندی مشابه فیلتر مود تفاضلی را با این تفاوت می توان طراحی کرد، که در این حالت محدودیت جریان نشتی معنی نخواهد داشت، پس در انتخاب مقدار سلف و خازن مود تفاضلی آزادی عمل بیشتری وجود دارد. برای بررسی عملکرد فیلتر، با توجه به طراحی انجام شده، فیلتر مورد نظر ساخته شد. کارایی فیلتر برای به وجود آوردن میرایی مورد نیاز و رساندن سطح انتشار هدایتی به زیر سطح استاندارد تعریف شده، مورد بررسی قرار گرفته است، که نتایج نشان دهنده کاهش قابل توجه سطح انتشار هدایتی در اینورتر می باشد. در ادامه بهبود تلفات جایگذاری فیلتر با استفاده از هسته نانو کریستال و همچنین روش جدید سیم پیچی، انجام پذیرفته است.

**واژه های کلیدی:** فیلتر EMI، اینورتر، فرکانس گوشه، مود مشترک، مود تفاضلی، استاندارد

EMC، تلفات جایگذاری.

## فهرست

فصل ۱: مقدمه.....	۱
۱-۱-۱ تعریف موضوع.....	۲
۱-۲-۱ هدف پژوهش.....	۲
فصل ۲: مروری بر فیلتر EMI.....	۵
۱-۲-۱ تعریف EMI.....	۶
۲-۲-۱ تقسیم بندی EMI.....	۷
۱-۲-۲ انتشار تشعشعی.....	۹
۲-۲-۲ انتشار هدایتی.....	۹
۳-۲-۲ مود مشترک (CM) و مود تفاضلی (DM).....	۱۰
۳-۲-۳ استانداردهای تداخلات الکترومغناطیسی هدایتی.....	۱۱
۱-۳-۲ مقررات انتشار هدایتی.....	۱۳
۲-۳-۲ روش‌های اندازه‌گیری EMI هدایتی.....	۱۵
۴-۲ اندازه‌گیری EMI هدایتی.....	۱۶
۵-۲ شبکه پایدار ساز امپدانس خط LISN.....	۱۷
۶-۲ تکنیک‌های کاهش EMI هدایتی.....	۲۱
۱-۶-۲ کاهش از منبع تولید کننده EMI.....	۲۱
۲-۶-۲ کاهش EMI از مسیرهای اتصال.....	۲۲
۷-۲ فیلتر EMI پسیو.....	۲۳
۱-۷-۲ فیلتر مود مشترک (CM).....	۲۷
۲-۷-۲ فیلتر مود تفاضلی (DM).....	۲۸
۸-۲ اندوکتانس نشتی.....	۲۹
۹-۲ ملاحظات طراحی فیلتر EMI.....	۳۳
۱-۹-۲ فرکانس گوشه.....	۳۳
۲-۹-۲ خازن‌های مورد استفاده در فیلتر EMI.....	۳۴
۱-۲-۹-۲ کاربرد خازن X.....	۳۶
۲-۲-۹-۲ کاربرد خازن Y.....	۳۷
۳-۹-۲ خازن مورد استفاده در فیلتر مود مشترک EMI.....	۳۸
۱-۳-۹-۲ محدودیت جریان نشتی.....	۳۹



- ۴۱..... ۲-۳-۹-۲ خازن کاغذ آغشته شده Y
- ۴۲..... ۳-۳-۹-۲ خازن سرامیکی Y
- ۴۴..... ۴-۳-۹-۲ تعیین چوک مود مشترک  $L_{CM}$
- ۴۴..... ۴-۹-۲ تعیین سلف مود تفاضلی  $L_{DM}$
- ۴۵..... ۵-۹-۲ تعیین خازن مود تفاضلی  $C_X$

### فصل ۳: طراحی فیلتر EMI..... ۴۷

- ۴۸..... ۱-۳-۱-۱ مراحل طراحی فیلتر EMI
- ۵۰..... ۲-۳-۱-۱ ایجاد تنظیمات اندازه‌گیری EMI هدایتی
- ۵۰..... ۳-۳-۱-۱ ساخت فیلتر EMI
- ۵۰..... ۱-۳-۱-۱ اندازه‌گیری EMI هدایتی
- ۵۳..... ۱-۱-۳-۱-۱ جداسازی انتشار هدایتی مود مشترک از مود تفاضلی
- ۵۶..... ۲-۱-۳-۱-۱ شبکه ردکننده مود تفاضلی
- ۵۸..... ۳-۱-۳-۱-۱ محاسبه غیر مستقیم انتشار هدایتی مود تفاضلی
- ۵۹..... ۲-۳-۱-۱ مقایسه با مقادیر استاندارد
- ۶۲..... ۳-۳-۱-۱ تعیین حداقل میرایی مورد نیاز
- ۶۲..... ۴-۳-۱-۱ تعیین فرکانس گوشه
- ۶۵..... ۵-۳-۱-۱ تعیین مقدار المان‌های فیلتر مود مشترک و تفاضلی

### فصل ۴: نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی..... ۶۷

- ۶۸..... ۱-۴-۱-۱ مدلسازی و تعیین پارامترهای خازن Y
- ۷۰..... ۲-۴-۱-۱ طراحی چوک مود مشترک
- ۷۵..... ۳-۴-۱-۱ مدل سازی چوک مود مشترک
- ۷۶..... ۱-۳-۴-۱ استخراج اندوکتانس مود مشترک  $L_{CM}$
- ۷۹..... ۲-۳-۴-۱ بدست آوردن اندوکتانس نشتی
- ۸۱..... ۳-۳-۴-۱ بدست آوردن امپدانس  $Z_1$
- ۸۳..... ۴-۴-۱-۱ بررسی عملکرد فیلتر
- ۸۳..... ۱-۴-۴-۱ تلفات جایگذاری فیلتر با هسته Mn-Zn
- ۸۴..... ۲-۴-۴-۱ انتشار هدایتی بعد از اعمال فیلتر
- ۸۹..... ۳-۴-۴-۱ بهبود تلفات جایگذاری با استفاده از هسته نانو کریستال
- ۹۳..... ۴-۴-۴-۱ بهبود تلفات جایگذاری مود تفاضلی با روش جدید سیم‌پیچی

### فصل ۵: نتیجه‌گیری و پیشنهادات..... ۹۷

۹۸	.....	۱-۵ نتیجه گیری
۹۹	.....	۲-۵ پیشنهادات

## فهرست اشکال

- شکل (۱-۲) اجزای کلی EMC در یک سیستم ..... ۸
- شکل (۲-۲) طبقه بندی پدیده‌های الکترومغناطیسی از لحاظ محدوده‌ی فرکانسی ..... ۸
- شکل (۳-۲) (a) مسیر جریان انتشار هدایتی مود مشترک (b) مسیر جریان انتشار هدایتی مود  
تفاضلی ..... ۹
- شکل (۴-۲) (a) محدوده‌ی تداخلات هدایتی تعیین شده در استاندارد CISPR 11 (b) انتشار هدایتی  
تولیدی یک دستگاه منبع تغذیه خانگی نوعی و سطح استاندارد مرتبط به آن ..... ۱۲
- شکل (۵-۲) محدودیت انتشار هدایتی کلاس A و B مربوط به FCC/CISPR ..... ۱۴
- شکل (۶-۲) محل قرارگیری LISN، تجهیز تحت آزمون و وسیله اندازه‌گیری انتشار هدایتی ..... ۱۷
- شکل (۷-۲) تنظیمات اندازه‌گیری انتشار هدایتی FCC/CISPR ..... ۱۷
- شکل (۸-۲) مدار معادل شبکه پایدارساز امپدانس خط ..... ۱۸
- شکل (۹-۲) مدل فرکانس بالای ساده شده از اندازه‌گیری انتشار هدایتی ..... ۲۰
- شکل (۱۰-۲) روش‌های کاهش EMI هدایتی ..... ۲۱
- شکل (۱۱-۲) ساختارهای اساسی فیلترهای EMI (a) فیلتر C (b) فیلتر L (c) فیلتر CL (d) :  
فیلتر LC (e) : فیلتر  $\pi$  (f) : فیلتر T ..... ۲۴
- شکل (۱۲-۲) مدل مداری از یک فیلتر EMI برای یک منبع تغذیه ..... ۲۵
- شکل (۱۳-۲) نحوه قرارگیری یک فیلتر EMI با استفاده از اندوکتانس نشتی چوک به عنوان سلف  
مود تفاضلی ..... ۲۶
- شکل (۱۴-۲) نحوه قرارگیری یک فیلتر EMI با استفاده از سلف کمکی به عنوان سلف مود تفاضلی  
..... ۲۶

- شکل (۲-۱۵) فیلتر EMI با اندوکتانس نشتی چوک مود مشترک به همراه جدول امپدانس بار و منبع نویز ..... ۳۱
- شکل (۲-۱۶) فیلتر EMI با اضافه شدن دو عدد سلف مود تفاضلی ..... ۳۲
- شکل (۲-۱۷) مدار معادل فیلتر EMI (a) فیلتر مود تفاضلی (b) فیلتر مود مشترک ..... ۳۳
- شکل (۲-۱۸) مدار معادل کلی یک سیستم متشکل از منبع تغذیه (EUT) ، فیلتر EMI و LISN ..... ۳۳
- شکل (۲-۱۹) آزمون ضربه خازن‌های سری X و Y ..... ۳۶
- شکل (۳-۱) مراحل طراحی فیلتر ..... ۴۹
- شکل (۳-۲) نمایی از نمونه آزمایشگاهی تنظیمات اندازه‌گیری طبق استاندارد FCC/CISPR ..... ۵۱
- شکل (۳-۳) انتشار هدایتی مربوط به خروجی فاز LISN ..... ۵۲
- شکل (۳-۴) انتشار هدایتی مربوط به خروجی نول LISN ..... ۵۳
- شکل (۳-۵) یک منبع تغذیه متصل به LISN با مسیرهای انتشار جریان انتشار هدایتی مود مشترک و تفاضلی ..... ۵۴
- شکل (۳-۶) تنظیمات اندازه‌گیری انتشار هدایتی، با اضافه کردن یک شبکه رد کننده مود مشترک یا مود تفاضلی ..... ۵۵
- شکل (۳-۷) یک شبکه رد کننده مود تفاضلی ..... ۵۷
- شکل (۳-۸) نمونه آزمایشگاهی شبکه رد کننده مود تفاضلی ..... ۵۷
- شکل (۳-۹) انتشار هدایتی مود مشترک مربوط به اینورتر و مقایسه با انتشار هدایتی حاصل از ولتاژ فاز خروجی LISN ..... ۵۸
- شکل (۳-۱۰) انتشار هدایتی مود تفاضلی (رنگ قرمز) به واسطه روش غیر مستقیم و مقایسه با انتشار هدایتی مود مشترک (رنگ آبی) ..... ۵۹

- شکل (۳-۱۱) مقایسه بین سطح انتشار هدایتی مود مشترک اینورتر با سطح استاندارد CISSPR11 QP-Class A ..... ۶۰
- شکل (۳-۱۲) مقایسه بین سطح انتشار هدایتی مود تفاضلی اینورتر با سطح استاندارد CISSPR11 QP-Class A ..... ۶۰
- شکل (۳-۱۳) تضعیف‌کننده به منظور ایجاد ایمنی برای تجهیز اندازه‌گیر ..... ۶۱
- شکل (۳-۱۴) تصویر انتشار هدایتی مود مشترک اینورتر بر روی SA ، در ضمن استفاده از 30dB تضعیف‌کننده و تحلیل میانگین جهت محاسبه انتشار هدایتی ..... ۶۱
- شکل (۳-۱۵) مقدار حداقل میرایی مورد نیاز مود مشترک ..... ۶۳
- شکل (۳-۱۶) مقدار حداقل میرایی مورد نیاز مود تفاضلی ..... ۶۳
- شکل (۳-۱۷) تعیین فرکانس گوشه برای انتشار هدایتی مود مشترک ..... ۶۴
- شکل (۳-۱۸) تعیین فرکانس گوشه برای انتشار هدایتی مود تفاضلی ..... ۶۴
- شکل (۴-۱) مشخصه امپدانس-فرکانس خازن  $4/\sqrt{n}F$  Rifa ..... ۶۹
- شکل (۴-۲) مدار معادل خازن و استخراج داده‌ها از طریق شبیه‌سازی ..... ۶۹
- شکل (۴-۳) شبیه‌سازی و اندازه‌گیری خازن  $4/\sqrt{n}F$  Rifa مربوط به فیلتر مود مشترک ..... ۷۰
- شکل (۴-۴) حداکثر زاویه قابل سیم‌پیچی ..... ۷۳
- شکل (۴-۵) ابعاد هسته Ferrite Mn-Zn انتخاب شده و  $A_L$  مربوط به هسته ..... ۷۴
- شکل (۴-۶) هسته Ferrite Mn-Zn با ۱۷ دور سیم‌پیچی با قطر هادی  $1/0.24mm$ ، با اندوکتانس مود مشترک  $4/7mH$  ..... ۷۴
- شکل (۴-۷) (a) ساختار چوک مود مشترک، (b) مدل مداری فرکانس بالا چوک مود مشترک ..... ۷۶
- شکل (۴-۸) مدار معادل دیده شده از طرف دستگاه اندازه‌گیر، جهت محاسبه  $L_{CM}$  ..... ۷۷

- شکل (۹-۴) منحنی امپدانس-فرکانس برای مقایسه حالت اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی اندوکتانس چوک مود مشترک، جهت ارائه مدل مداری ..... ۷۷
- شکل (۱۰-۴) (a) طرحی از یک چوک مود مشترک (b) مدار معادل برای اندوکتانس نشتی ..... ۸۰
- شکل (۱۱-۴) مدار معادل دیده شده از طرف دستگاه اندازه‌گیر، جهت محاسبه  $L_{Leakage}$  ..... ۸۰
- شکل (۱۲-۴) منحنی امپدانس-فرکانس برای مقایسه حالت اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی اندوکتانس نشتی چوک مود مشترک، جهت ارائه مدل مداری ..... ۸۱
- شکل (۱۳-۴) مدار معادل دیده شده از طرف دستگاه اندازه‌گیر، برای محاسبه  $Z_1$  ..... ۸۲
- شکل (۱۴-۴) منحنی امپدانس-فرکانس برای مقایسه حالت اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده امپدانس  $Z_1$  ، جهت ارائه مدل مداری ..... ۸۲
- شکل (۱۵-۴) مدار معادل برای اندازه‌گیری (a) مود تفاضلی (b) مود مشترک ..... ۸۳
- شکل (۱۶-۴) تلفات جایگذاری مود مشترک فیلتر به ازای هسته Mn-Zn ..... ۸۴
- شکل (۱۷-۴) تلفات جایگذاری مود تفاضلی فیلتر به ازای هسته Mn-Zn ..... ۸۴
- شکل (۱۸-۴) ولتاژ فاز خروجی LISN در حالت بدون فیلتر و با فیلتر ..... ۸۵
- شکل (۱۹-۴) ولتاژ نول خروجی LISN در حالت بدون فیلتر و با فیلتر ..... ۸۵
- شکل (۲۰-۴) تصویر اسیلوسکپ برای ولتاژ فاز و نول خروجی LISN بدون فیلتر ..... ۸۶
- شکل (۲۱-۴) تصویر اسیلوسکپ برای ولتاژ فاز و نول خروجی LISN با فیلتر ..... ۸۶
- شکل (۲۲-۴) انتشار هدایتی مود مشترک در حالت بدون فیلتر و با فیلتر ..... ۸۷
- شکل (۲۳-۴) انتشار هدایتی مود تفاضلی در حالت بدون فیلتر و با فیلتر ..... ۸۸
- شکل (۲۴-۴) اندازه‌گیری انتشار هدایتی مود مشترک ، بدون استفاده از تضعیف‌کننده ..... ۸۸
- شکل (۲۵-۴) مقایسه بین ابعاد هسته‌های فریت و نانوکریستال ..... ۹۰
- شکل (۲۶-۴) مقایسه منحنی نفوذپذیری هسته نانوکریستال و فریت ..... ۹۱

- شکل (۴-۲۷) مقایسه تلفات جایگذاری مود مشترک هسته نانوکریستال و فریت Mn-Zn..... ۹۲
- شکل (۴-۲۸) مقایسه تلفات جایگذاری مود تفاضلی هسته نانوکریستال و فریت Mn-Zn..... ۹۲
- شکل (۴-۲۹) جهت شارها در مود مشترک ئ تفاضلی برای روش جدید سیم پیچی ..... ۹۳
- شکل (۴-۳۰) سیم‌پیچی هسته فریت Mn-Zn با روشی جدید جهت افزایش توانایی فیلتر در مود تفاضلی ..... ۹۳
- شکل (۴-۳۱) مقایسه تلفات جایگذاری مود تفاضلی هسته فریت Mn-Zn در حالت سیم‌پیچی ساده و روش سیم‌پیچی جدید ..... ۹۴
- شکل (۴-۳۲) نسخه نهایی فیلتر تداخلات الکترومغناطیسی برای اینورتر ..... ۹۵

## فهرست جداول

- جدول (۱-۲) محدودیت انتشار هدایتی کلاس A مربوط به FCC/CISPR ..... ۱۴
- جدول (۲-۲) محدودیت انتشار هدایتی کلاس B مربوط به FCC/CISPR ..... ۱۴
- جدول (۳-۲) استانداردهای اتحادیه اروپایی استاندارد سازی الکتروتکنیک (CENELEC) ..... ۱۵
- جدول (۱-۴) مقادیر استاندارد سیم AWG ..... ۷۲
- جدول (۲-۴) مقایسه بین هسته‌های فریت و نانوکریستال ..... ۸۹



## فصل ١: مقدمه

## ۱-۱ تعریف موضوع

تداخل الکترومغناطیسی<sup>۱</sup> EMI به عنوان نویز الکترومغناطیسی تعریف می‌شود که باعث تخریب، محدودیت یا تداخل با عملکرد یک سیستم الکترونیکی یا الکترونیکی می‌شود. امروزه این تداخلات EMI با توجه به کاهش سایز مدارهای الکترونیکی و استفاده از مدارهای فشرده، بیشتر مورد توجه قرار می‌گیرند [۱]. در واقع EMI یک نگرانی بزرگ برای طراحان مدارهای الکترونیک قدرتی می‌باشد که از MOSFET، IGBT و GTO استفاده می‌کنند. کلیدزنی سریع در مبدل‌های الکترونیک قدرت باعث تغییرات سریع در ولتاژ و جریان، با مقدار زیادی از تداخل الکترومغناطیسی می‌شود. تداخلات الکترومغناطیسی به دو دسته انتشار هدایتی و تشعشعی تقسیم بندی می‌شود [۲].

انتشار هدایتی تولید شده در مبدل‌های الکترونیک قدرت متشکل از مود مشترک<sup>۲</sup> CM و مود تفاضلی<sup>۳</sup> DM است. به طور کلی در مدارهایی که شامل المان‌های کلیدزنی هستند، پیش‌بینی تداخل الکترومغناطیسی به دلیل غیر قابل پیش‌بینی بودن نویز، بسیار دشوار است و به همین دلیل طراحی فیلتر نیز کار دشواری است. در این پایان نامه رویکردی برای طراحی فیلتر بیان شده است که توسط آن بتوان سطح انتشار هدایتی را کاهش داد تا بتوان از اثرات مخرب آن جلوگیری کرد.

## ۱-۲ هدف پژوهش

با توجه به آنکه اینورتر تجهیزاتی است که شامل المان‌های کلیدزنی می‌باشد، تولید EMI بحث

---

<sup>1</sup> Elrctromagnetic interference

<sup>2</sup> Common mode

<sup>3</sup> Differential mode

غیر قابل پیش‌گیری می‌باشد. این EMI تولیدی چنانچه از سطوح استاندارد تعریف شده بالاتر باشد، سبب بروز مشکلاتی از قبیل تداخل با اجزای خود سیستم، تداخل با سیستم‌های دیگر و یا سبب قطع عملکرد خود سیستم می‌شود. بنا به همین دلایل سطح EMI الزاما بایستی کاهش یابد. راه‌هایی برای کاهش سطح EMI تولید شده توسط اینورتر وجود دارد، اما این میزان کاهش به مقدار قابل توجهی نخواهد بود که بتواند استانداردهای EMC<sup>1</sup> را بگذراند. بدین منظور استفاده از روشی برای کاهش قابل توجه سطح EMI الزامی می‌باشد. استفاده از یک فیلتر EMI روش معمولی برای کاهش سطح انتشار هدایتی می‌باشد. به منظور طراحی مناسب و اصولی ابتدا بایستی اطلاع کاملی راجع به سطح انتشار هدایتی تولید شده توسط اینورتر داشته باشیم تا بتوانیم فیلتری مناسب برای اینورتر طراحی کنیم، و در نهایت عملکرد فیلتر بایستی به نحوی باشد که بتواند سطح انتشار هدایتی را به زیر سطوح استاندارد برساند.

---

<sup>1</sup> Electromagnetic Interference



## **فصل ۲: مروری بر فیلتر EMI**

## ۱-۲ تعریف EMI

در الکترونیک قدرت، فرآیند تبدیل انرژی سبب بوجود آمدن تداخلات الکترومغناطیسی فرکانس بالا خواهد شد که اغلب مربوط به لبه‌های تیز تغییرات ولتاژ ( $dv/dt$ ) و جریان ( $di/dt$ ) طی فرآیند کلیدزنی می‌شود. تغییرات ولتاژ ( $dv/dt$ ) و جریان ( $di/dt$ ) توسط روش مدولاسیون پهنای پالس ایجاد می‌شوند که اغلب در کنترل مدرن برای رسیدن نیازمندی‌های طراحی در پاسخ دینامیکی و کاهش اندازه و وزن سیستم مورد استفاده واقع می‌شود. در نتیجه کلیدزنی اصلی‌ترین عامل تولید EMI است که باعث شده تا مبدل‌های الکترونیک قدرت، به منبعی برای تولید EMI تبدیل شوند [۳]. البته از یکسو پیدایش ادوات نیمه هادی سرعت بالا و از سوی دیگر حرکت کلی به سمت مجتمع سازی، استاندارد کردن و افزایش چگالی انرژی سبب شده تا مباحث مربوط به EMI بیش از پیش مورد توجه قرار گیرد. فرکانس کلیدزنی بیشتر، سبب کاهش اندازه، وزن و قیمت مبدل‌ها می‌شود، اما از سوی دیگر اثرات EMI را نیز افزایش می‌دهد. بسته بندی و طراحی‌های پیشرفته و تکنولوژی‌های مجتمع‌سازی این امکان را فراهم آورده‌اند که اجزای مبدل در یک فضای کوچک فشرده شوند که در این حالت باید در طراحی مدارات الکترونیک قدرت، بسیار بیشتر از قبل ملاحظات الکترومغناطیسی مورد توجه قرار گیرد [۴-۶].

با در نظر گرفتن ملاحظات سازگاری الکترومغناطیسی (EMC)، اثرات مخرب EMI می‌تواند کنترل شود، به نحوی که طبق تعریف، یک تجهیز یا سیستم بایستی بتواند به طور قابل قبولی در محیط الکترومغناطیسی خود، بدون ایجاد تداخلات الکترومغناطیسی غیر قابل تحمل برای خود و یا هیچ یک از اجزای محیط، به وظیفه خود عمل کند [۷، ۸]. به عبارت دیگر استانداردهای EMC برای حفاظت دستگاه‌های الکترونیکی و الکتریکی نگارش شده‌اند. تجهیزات الکترونیکی دارای سازگاری الکترومغناطیسی هستند اگر [۱]

- ۱- باعث تداخل در سیستم‌های دیگر نشود.
- ۲- در فرآیندهای خودش تداخل ایجاد نکند.
- ۳- به نویز تولید شده توسط دیگر سیستم‌ها حساس<sup>۱</sup> نباشد.

## ۲-۲ تقسیم بندی EMI

تداخلات الکترومغناطیسی در سیستم را می‌توان در دو گروه تقسیم بندی کرد.

- ۱- انتشار هدایتی<sup>۲</sup> که گونه‌ای از انرژی الکترومغناطیسی ناخواسته است که از طریق مسیره‌های هادی متصل کننده، بین ساع کننده<sup>۳</sup> و گیرنده<sup>۴</sup> جریان می‌یابد.
- ۲- انتشار تشعشی<sup>۵</sup> که گونه‌ای از انرژی الکترومغناطیسی ناخواسته است که به فرم میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در فضا انتشار می‌یابد.

تعریف EMI در چهار جنبه متفاوت است. بروندهی انتشاری، بروندهی هدایتی، تاثیرپذیری انتشاری و تاثیرپذیری هدایتی. دو جنبه اول در مورد عملکرد سیستم بدون بوجود آوردن EMI در سیستم‌های دیگر، و دو جنبه بعدی توانایی کارکرد صحیح سیستم در یک محیط الکترومغناطیسی را شامل می‌شود.

انتشار هدایتی آن بخشی از تداخل الکترومغناطیسی می‌باشد که از طریق سیم‌ها از منبع تولید کننده به سایر مدارها انتقال می‌یابد. کل پهنای باند انتشار هدایتی زیر ۳۰MHz می‌باشد. انتشارهای بالاتر از ۳۰MHz متشکل از هر دو بخش هدایتی و تشعشی هستند. انتشار تشعشی شامل اتصال

---

<sup>1</sup> Susceptible

<sup>2</sup> Radiated emission

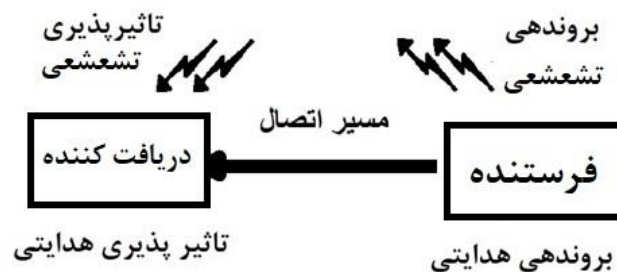
<sup>3</sup> Emitter

<sup>4</sup> Reciever

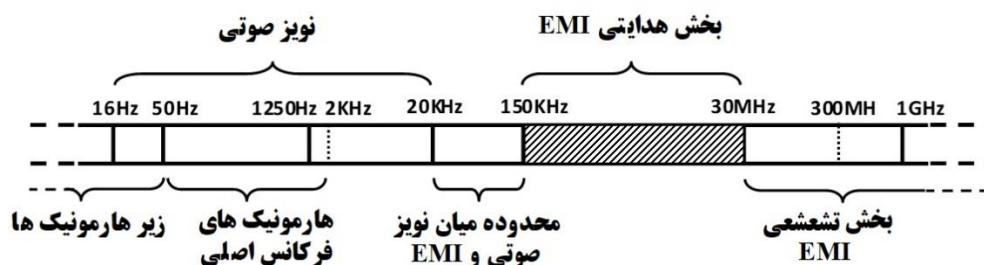
<sup>5</sup> Conducted emission

میدان الکتریکی (خازنی)، اتصال میدان مغناطیسی (القایی) و ترکیبی از هر دو است، که به عنوان اتصال الکترومغناطیسی میدان شناخته می‌شود. هنگامی که گیرنده نزدیک به منبع (میدان) است، دو نوع اتصال به طور جداگانه در نظر گرفته می‌شود. وقتی که دریافت کننده دور از منبع (میدان) قرار دارد، انتشار تشعشی به عنوان ترکیبی از میدان الکتریکی و مغناطیسی در نظر گرفته می‌شود [۹].

شکل (۱-۲) اجزای کلی EMC در یک سیستم را نمایش می‌دهد. شکل (۲-۲) طبقه بندی پدیده‌های الکترومغناطیسی را از لحاظ محدوده‌ی فرکانسی، نشان می‌دهد [۵]. اغتشاشات با محدوده‌ی فرکانسی ۱۵۰ KHz تا ۳۰ MHz که شامل تداخلات الکترومغناطیسی هدایتی می‌باشد، انتشار هدایتی EMI و اغتشاشات با فرکانس‌های بیشتر از ۳۰ MHz انتشار تشعشی EMI شناخته می‌شود. البته گفتنی است در برخی مراجع اغتشاشات با محدوده‌ی فرکانس کمتر از ۱۵۰ KHz (بین ۲۰ KHz تا ۳۰ MHz) نیز جزء مطالعات EMI هدایتی قرار داده شده است [۱۰] ولی طبقه‌بندی نشان داده شده در شکل (۲-۲) برای مطالعه رفتار EMC در مبدل‌های الکترونیک قدرت رایج‌تر است.



شکل (۱-۲) اجزای کلی EMC در یک سیستم

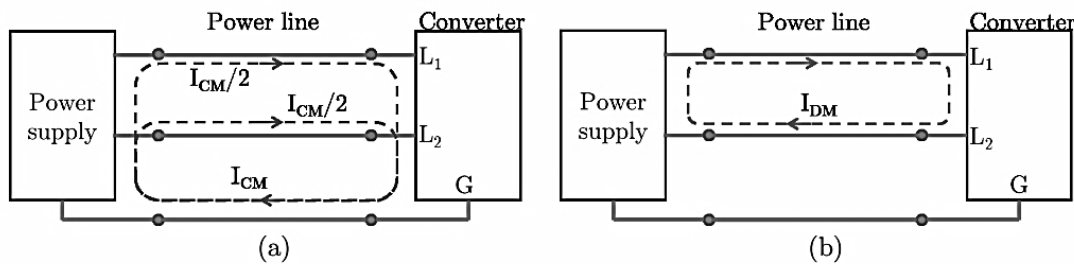


شکل (۲-۲) طبقه بندی پدیده‌های الکترومغناطیسی از لحاظ محدوده‌ی فرکانسی



## ۱-۲-۲ انتشار تشعشی

استانداردهای EMC بازه انتشار تشعشی را بزرگتر از ۳۰ MHz و گاهی تا ۴۰ GHz تعیین می‌کنند. اندازه‌گیری این بخش نیازمند به یک فضای باز یا یک اتاق بدون پژواک است که توسط یک ساختار آنتنی به دست می‌آید [۱۱]. در مبدل‌های الکترونیک قدرت این بخش از EMI بیشتر شامل میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی ناخواسته‌ای است که با فرآیند کلیدزنی در محیط، انتشار پیدا می‌کند. مطالعات زیادی در بررسی و تخمین سطوح فرکانس بالای EMI در مبدل‌ها انجام پذیرفته، که برخی از این مطالعات در مراجع [۱۲-۱۴] بیان گردیده است. مطالعات صورت گرفته اغلب شامل اندازه‌گیری و دستیابی به مدل فرکانس بالای سیستم جهت شبیه‌سازی و در برخی موارد ارائه پیشنهاد برای کاهش EMI تشعشی است. در روش‌های عددی برای یافتن پارامترهای فرکانس بالا، اغلب روش تحلیل اجزای محدود به کار گرفته شده [۱۵] که به طور کلی نسبت به انتشار هدایتی EMI در مباحث الکترونیک قدرت کمتر مورد توجه و تحقیق بوده است. قابل توجه است که بررسی انتشارات تشعشی خارج از محدوده این کار می‌باشد.



شکل (۳-۲) (a) مسیر جریان انتشار هدایتی مود مشترک (b) مسیر جریان انتشار هدایتی مود تفاضلی [۶]

## ۲-۲-۲ انتشار هدایتی

انتشار هدایتی آن قسمت از EMI است که از بین بخش‌های به هم پیوسته در سیستم (اینورتر)

و شبکه اتصالات فیزیکی بین آن‌ها، مسیر خود را می‌بندد. اگر سیستم را دارای سه بخش منبع، مبدل و مسیرهای اتصال هادی در نظر بگیریم، انتشار هدایتی EMI آن قسمت از تداخلات است که از مسیر هادی‌ها عبور می‌کند. EMI هدایتی دارای دو مود متفاوت است: مود مشترک<sup>۱</sup> و تفاضلی<sup>۲</sup> که به طور مثال برای یک سیستم دوسیمه در شکل (۳-۲) نشان داده شده است [۵، ۶].

### ۳-۲-۲ مود مشترک (CM) و مود تفاضلی (DM)

مود مشترک به معنی ولتاژ اثرگذار روی هر دو خط یا تمام خطوط است. این ولتاژ بین همه این خطوط و زمین برقرار است. اگر فقط یک خط وجود داشته باشد، پالس بین این خط و زمین خواهد بود. جریان در یک جهت و در تمام خطوط جاری می‌شود و از طریق مسیر زمین برمی‌گردد که در شکل (۳-۲) (a) نشان داده شده است. مسیر لازم برای جاری شدن جریان از سمت خطوط به سمت زمین توسط خازن‌های نشستی تامین می‌گردد.

مود تفاضلی به معنای انتقال طبیعی انرژی به خط است. به این حالت مود نرمال نیز گفته می‌شود. ولتاژ روی خط است، و جریان در یک مسیر روی یک سیم جاری می‌شود و در روی سیم دیگر در جهت مخالف ادامه می‌یابد که به این حالت مود نرمال گویند که در شکل (۳-۲) (b) نشان داده شده است. به عبارت دیگر، همانند توان عادی در خطوط انرژی جریان می‌یابد [۱۶].

---

<sup>1</sup> Common mode

<sup>2</sup> Differential mode

## ۲-۳ استانداردهای تداخلات الکترومغناطیسی هدایتی

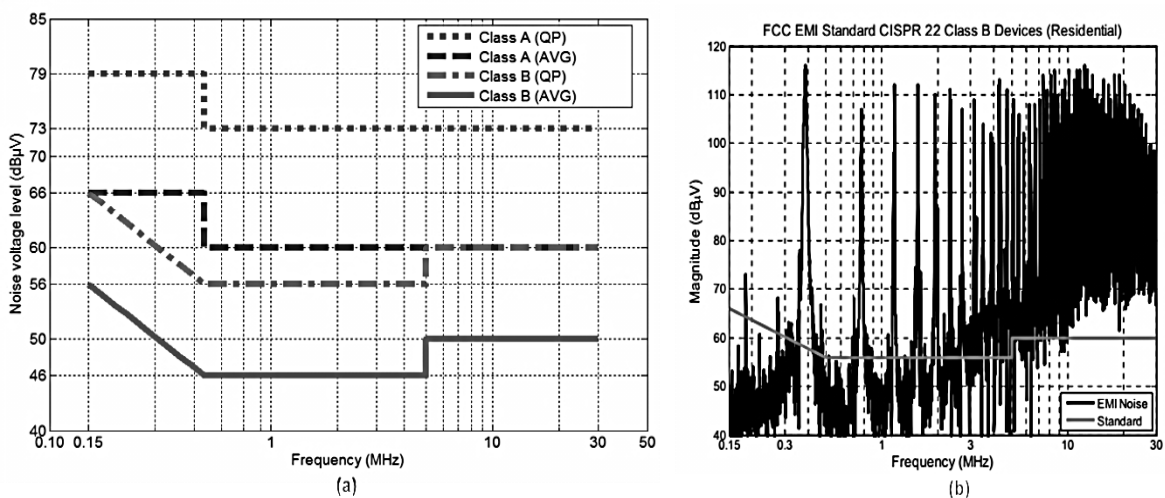
استانداردهایی را که در بحث EMI هدایتی مطرح هستند، می‌توان به دو شاخه کلی نظامی و غیرنظامی تقسیم کرد و سپس براساس محیط کاربری به زیر شاخه‌های دیگر دسته‌بندی می‌شوند. چهار استاندارد اصلی و مشهور در مورد EMI مطرح است. استاندارد IEC، استاندارد FCC در ایالات متحده، استاندارد CENELEC و استاندارد ETSI در کشورهای اروپایی [۱۷]. IEC دارای بزرگترین گروه‌ها و کمیته‌هایی است که در بیش از ۴۰ کشور گسترده شده است. این استاندارد دارای دو کمیته فنی مهم است. TC77 که با سری IEC 61000 مرتبط بوده و کمیته مخصوص بین‌المللی تداخلات رادیویی (CISPR) که به طور خاص روی تداخلات رادیویی تحقیق می‌کند. امروزه استاندارد CISPR دارای گستردگی فراوانی در سراسر دنیا است. مثال‌هایی از چند استاندارد مهم برای تداخلات هدایتی به صورت زیر است.

- CISPR 11: محدوده‌هایی برای رادیو فرکانس‌های تجهیزات صنعتی، آزمایشگاهی و پزشکی تعیین می‌کند.
- IEC 61800-3: محدوده‌هایی برای سیستم‌های درایو الکتریکی سرعت متغیر، مشخص می‌کند.
- EN 55011: محدوده و روش‌های اندازه‌گیری رادیو فرکانس‌های تجهیزات صنعتی، آزمایشگاهی و پزشکی تعیین می‌کند.

همان‌گونه که قبلاً ذکر شد، گستره فرکانسی برای EMI هدایتی که توسط استاندارد تعیین گردیده از ۱۵۰ KHz تا ۳۰ MHz است. در این محدوده، استاندارد دو کلاس مشخص کرده است که کلاس A برای دستگاه‌های تجاری و صنعتی و نیز کلاس B برای کاربردهای نظامی و برخی کاربرد

های خاص دیگر می‌باشد. همچنین استاندارد دو روش تشخیص شامل اندازه‌گیری شبه‌قله ( $QP^1$ ) و تشخیص دهنده میانگین ( $AVG^2$ )، تعریف کرده است. در شکل (۲-۴) (a) به طور نمونه سطوح استاندارد EMI هدایتی استاندارد CISPR 11 برای کلاس‌ها و روش‌های مختلف نشان داده شده است. روش شبه‌قله به سیگنال‌ها بر اساس نرخ تکرارپذیری آنها وزن‌دهی می‌کند در حالی که تشخیص دهنده میانگین از اجزای فرکانس بالا میانگین‌گیری می‌کند.

در اکثر موارد سطح انتشار هدایتی تولیدی مبدل‌ها از سطوح تعیین شده در استاندارد فراتر می‌رود. لذا لازم است تمهیداتی جهت کاهش EMI در مبدل‌های الکترونیک قدرت به کار گرفته شود. شکل (۲-۴) (b) سطح استاندارد و انتشار هدایتی تولید شده توسط یک منبع تغذیه خانگی را نشان می‌دهد [۶].



شکل (۲-۴) (a) محدوده‌ی تداخلات هدایتی تعیین شده در استاندارد CISPR 11 (b) انتشار هدایتی تولیدی یک دستگاه منبع تغذیه خانگی نوعی و سطح استاندارد مرتبط به آن [۱۸]

<sup>1</sup> Quasi Peak

<sup>2</sup> Average

## ۲-۳-۱ مقررات انتشار هدایتی

مقررات انتشارات هدایتی، ولتاژی را که به خطوط AC برمی‌گردد، در دامنه ۱۵۰kHz تا ۳۰MHz محدود می‌کند. محدودیت انتشارات هدایتی الزامی است. زیرا تنظیم‌کننده‌های قوانین معتقدند که در فرکانس‌های کمتر از ۳۰MHz، اولین عاملی که باعث ایجاد تداخل در ارتباطات رادیویی می‌شود توسط انرژی‌ای که به سمت خطوط AC هدایت می‌شود، تامین می‌گردد و سپس توسط خط قدرت این انتشارات رادیویی ایجاد می‌گردد. به عبارت دیگر، محدودیت‌های انتشارات هدایتی نوعی از محدودیت انتشارات تشعشی هستند که وجود دارند، اما به ظاهر مخفی شده‌اند. محدودیت‌های انتشارات هدایتی FCC در واقع همان کمیته اختصاصی بین‌المللی تداخلات رادیویی (CISPR) است که در آمریکا مورد استفاده قرار می‌گیرد. در حقیقت محتوای کلی این دو استاندارد یکی می‌باشد.

جدول (۱-۲) و جدول (۲-۲) محدودیت‌های انتشارات هدایتی را برای دو کلاس مختلف نشان می‌دهد که به صورت ترسیمی در شکل (۲-۵) نشان داده شده است.

در یک مقایسه ساده بین جدول (۱-۲) و جدول (۲-۲) می‌توان مشاهده کرد که در کلاس B، محدودیت انتشار هدایتی در روش شبه‌قله، از ۱۳dB تا ۲۳dB سختگیرانه‌تر نسبت به کلاس A است و برای انتشار هدایتی در روش میانگین، کلاس B، از ۱۰ تا ۲۰dB سختگیرانه‌تر از کلاس A می‌باشد. کلاس A برای تجهیزات صنعتی و تجاری تعریف شده است و کلاس B برای تجهیزات مورد استفاده در منازل نظیر کامپیوتر و همچنین تجهیزات نظامی می‌باشد.

علاوه بر استفاده از استاندارد FCC که مربوط به ایالت متحده آمریکا می‌باشد می‌توان از استانداردهای اتحادیه اروپا نظیر EN55011 که با CISPR11 تطابق دارد و برای تجهیزات صنعتی و پزشکی، قوانین و محدودیت‌ها را بیان کرده است، استفاده کنیم. در جدول (۲-۳) برخی از

استانداردهای رایج در اروپا بیان گردیده است، که با توجه به کاربرد صنعتی اینورتر مورد نظر، استاندارد EN55011 که معادل با CISPR11 است و شباهت بسیار زیادی به FCC15 دارد، انتخاب می‌شود [۱، ۱۸، ۱۹].

جدول (۱-۲) محدودیت انتشار هدایتی کلاس A مربوط به FCC/CISPR [۱۸]

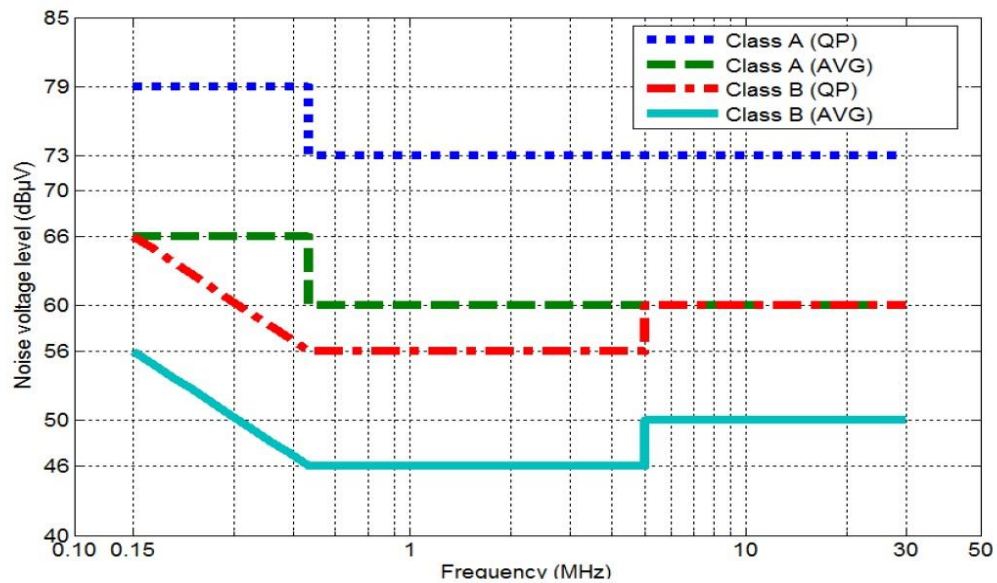
**FCC/CISPR Class A Conducted Emission Limits.**

Frequency (MHz)	Quasi-peak (dB $\mu$ V)	Average (dB $\mu$ V)
0.15–0.5	79	66
0.5–30	73	60

جدول (۲-۲) محدودیت انتشار هدایتی کلاس B مربوط به FCC/CISPR [۱۸]

**FCC/CISPR Class B Conducted Emission Limits.**

Frequency (MHz)	Quasi-peak (dB $\mu$ V)	Average (dB $\mu$ V)
0.15–0.5	66–56 <sup>a</sup>	56–46 <sup>a</sup>
0.5–5	56	46
5–30	60	50



شکل (۵-۲) محدودیت انتشار هدایتی کلاس A و B مربوط به FCC/CISPR [۶]

جدول (۲-۳) استانداردهای اتحادیه اروپایی استاندارد سازی الکتروتکنیک (CENELEC) [۲۰]

**European Union's EMC Test Standards.**

Equipment Type	Emission	Immunity
<b><u>Product Specific Standards</u></b>		
Information Technology Equipment (ITE)	EN 55022	EN 55024
<b>Industrial, Scientific &amp; Medical Equipment (ISM)</b>	<b>EN 55011</b>	<b>-</b>
Radio & Television Receivers	EN 55013	EN 55020
Household Appliances/Electric Tools	EN 55014-1	EN 55014-2
Lamps & Luminaries	EN 55015	EN 61547
Adjustable Speed Motor Drives	EN 61800-3	EN 61800-3
Medical Equipment <sup>a</sup>	EN 60601-1-2	EN 60601-1-2
<b><u>Generic Standards</u></b>		
Residential, Commercial, Light Industrial Environment	EN 61000-6-3	EN 61000-6-1
Heavy Industrial Environment	EN 61000-6-4	EN 61000-6-2

### ۲-۳-۲ روش‌های اندازه‌گیری EMI هدایتی

EMI هدایتی توسط مبدل استاتیکی تولید می‌شود و بایستی این سطح EMI اندازه‌گیری شود

تا بتوانیم این انتشار هدایتی را با سطوح استاندارد EMC مقایسه کنیم.

به صورت کلی می‌توان گفت که سه روش برای اندازه‌گیری EMI وجود دارد.

۱- اندازه‌گیری مستقیم توسط ترمینال ۵۰ اهم LISN<sup>۲</sup> و مشاهده طیف فرکانسی با استفاده

از دستگاه EMI Receiver یا Spectrum Analyzer .

۲- اندازه‌گیری مستقیم روی مسیر انتشار نویز توسط پروب جریان فرکانس بالا.

۳- اندازه‌گیری غیر مستقیم توسط FFT<sup>۳</sup> روی ولتاژ خروجی ترمینال ۵۰ اهم LISN .

<sup>1</sup> The European Committee for Electro-Technical Standardization

<sup>2</sup> Line Impedance Stabilization Network

<sup>3</sup> Fast Fourier Transform

به دلیل محدودیت‌های موجود و عدم دسترسی به تجهیزات مورد نیاز در روش دوم، ناگزیر از روش اول یا سوم برای اندازه‌گیری انتشار هدایتی استفاده نموده‌ایم. اطلاعات راجع به نحوه کار با روش دوم در مرجع [۶] بیان شده است.

## ۲-۴ اندازه‌گیری EMI هدایتی

از آنجا که بحث اندازه‌گیری EMI دارای اهمیت خاصی است و در اندازه‌گیری انتشار هدایتی عوامل محیطی بسیار تاثیرگذار هستند، بایستی مبحث اندازه‌گیری به طور دقیق انجام پذیرد. از این رو برای اندازه‌گیری استاندارد و شرایط خاصی تعریف شده است.

اندازه‌گیری انتشار هدایتی توسط شبکه پایدارساز امپدانس خط ( $LISN^1$ ) انجام می‌شود که بین منبع توان ورودی و تجهیز تحت آزمون ( $EUT^2$ ) قرار می‌گیرد که در شکل (۲-۶) نشان داده شده است. این دستگاه از تداخلات نویز دستگاه‌های خارجی جلوگیری می‌کند و همچنین برخی امپدانس‌های ثابت را فراهم می‌آورد. معمولاً امپدانس خروجی LISN، ۵۰ اهم بر فاز است و امپدانس مود مشترک نصف امپدانس LISN و امپدانس مود تفاضلی دو برابر امپدانس LISN می‌باشد [۶]. LISN استفاده می‌شود تا اطمینان حاصل گردد که نویز می‌تواند به طور مداوم اندازه‌گیری شود.

جهت اندازه‌گیری انتشار هدایتی بایستی مقررات اندازه‌گیری رعایت شود. در شکل (۲-۷) نمای کلی از تنظیمات<sup>۳</sup> اندازه‌گیری انتشارات هدایتی طبق استاندارد FCC/CISPR را نشان می‌دهد.

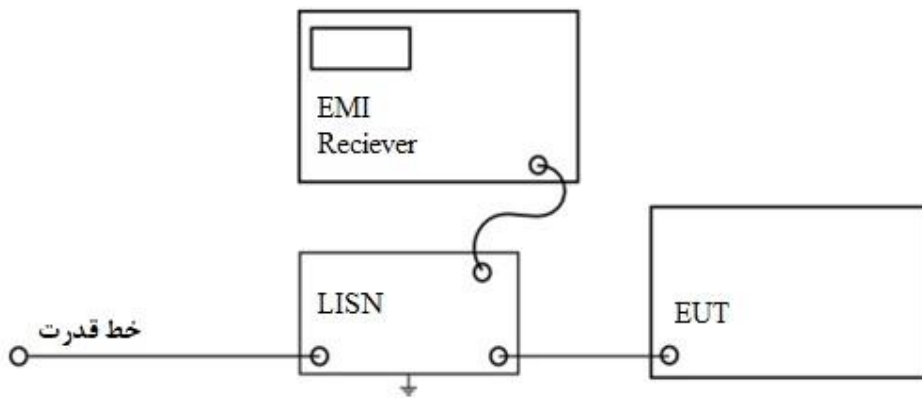
---

<sup>1</sup> Line Impedance Stabilization Network

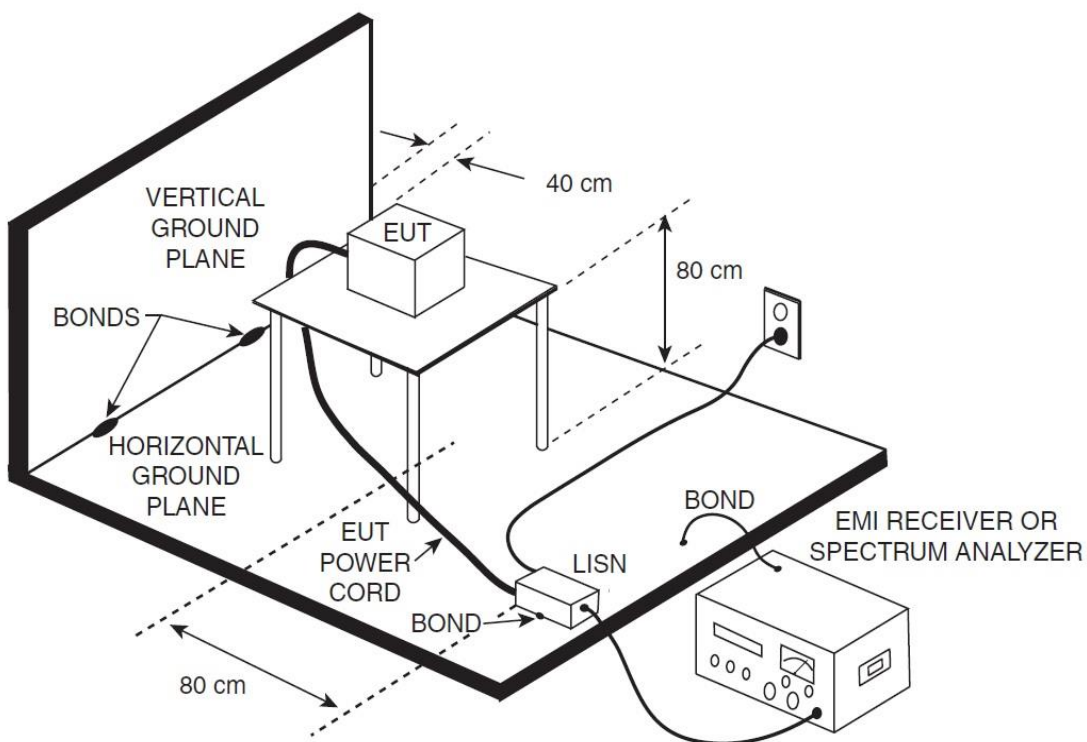
<sup>2</sup> Equipment under test

<sup>3</sup> Setup





شکل (۶-۲) محل قرارگیری LISN، تجهیز تحت آزمون و وسیله اندازه‌گیری انتشار هدایتی

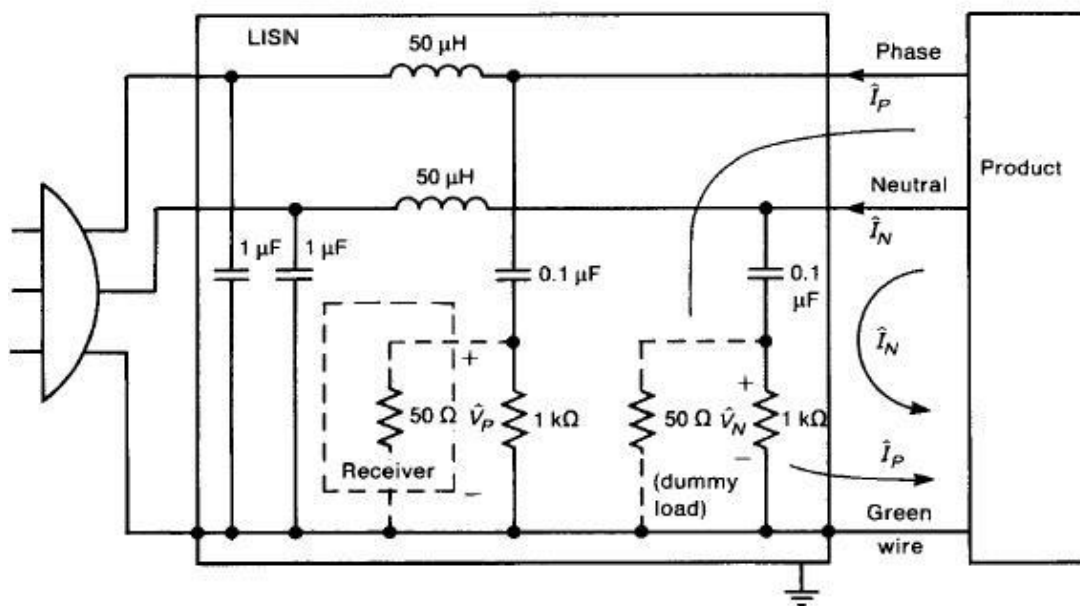


شکل (۷-۲) تنظیمات اندازه‌گیری انتشار هدایتی FCC/CISPR [۱۸]

## ۵-۲ شبکه پایدار ساز امپدانس خط LISN

پارامترهای LISN می‌توانند وابستگی زیادی به سطح جریان داشته باشند. یک LISN در شکل

(۸-۲) نشان داده شده است.



شکل (۸-۲) مدار معادل شبکه پایدارساز امپدانس خط [۹]

به منظور تضمین تکرارپذیری و ایجاد شرایط یکسان در اندازه‌گیری‌های تداخلات الکترومغناطیسی، می‌بایست امپدانس دیده شده توسط دستگاه تحت آزمون را پایدار نمود تا اختلافی میان این امپدانس در مکان‌های مختلف انجام آزمون وجود نداشته باشد. بنابراین اولین وظیفه شبکه پایدارساز امپدانس خط این است که در گستره فرکانسی مورد نظر در آزمون انتشار هدایتی، امپدانس ثابتی را از خود نشان دهد.

علاوه بر این میزان نویز موجود در شبکه سیستم قدرت از نقطه‌ای به نقطه دیگر متفاوت است. این نویز خارجی از طریق اتصالات هدایت برق، به داخل دستگاه تحت آزمون راه می‌یابد و میزان تداخلات الکترومغناطیسی اندازه‌گیری شده در دستگاه تحت آزمون را افزایش می‌دهد. مطلوب است که تنها تداخلات الکترومغناطیسی حاصل از دستگاه تحت آزمون اندازه‌گیری شود، از این رو دومین کارکرد شبکه پایدارساز امپدانس خط، جلوگیری از انتقال نویز سیستم قدرت به دستگاه تحت آزمون می‌باشد. دو ویژگی معرفی شده، لازم است در فرکانس مورد بررسی انتشار هدایتی یعنی ۱۵۰ kHz تا ۳۰ MHz برقرار باشد و خارج از این بازه الزامی بر این مشخصه‌ها نیست. کارکرد سوم شبکه پایدارساز

امپدانس خط که مانند دو کارکرد پیشین در اولین نگاه مشهود نیست، عبور توان الکتریکی در فرکانس ۵۰ هرتز (یا ۶۰ هرتز) از منبع به دستگاه تحت آزمون است.

شبکه پایدارساز امپدانس خط که در اندازه‌گیری انتشار هدایتی مورد استفاده قرار می‌گیرد در شکل (۲-۸) نمایش داده شده است. وظیفه خازن ۱ میکروفاراد میان فاز و سیم سبز (ایمنی یا زمین) و میان نول و سیم سبز، انتقال نویز خارجی موجود در شبکه برق به زمین و جلوگیری از وارد شدن آن به سیستم اندازه‌گیری و از بین بردن داده‌های صحیح می‌باشد. به طور مشابه، القاگر ۵۰ میکروهانری با هدف جلوگیری از عبور نویز تعبیه گردیده است. کارکرد خازن دیگر با ظرفیت ۰,۱ میکروفاراد نیز جلوگیری از ایجاد اضافه بار برای درگاه اندازه‌گیری توسط جریان‌های DC است که ممکن است در مجموعه سیستم آزمون وجود داشته باشند.

خروجی‌های LISN معمولاً قبل از آنکه به تحلیلگر طیف<sup>۱</sup> متصل شوند به یه تضعیف کننده<sup>۲</sup> وصل می‌شوند. مدار معادل برای نویز فرکانس بالا در شکل (۲-۹) نشان داده شده است که امپدانس LISN در سمت EUT توسط یک مقاومت ۵۰ اهم مدل شده است

در شکل (۲-۹) جریان نویز مود مشترک و تفاضلی نشان داده شده است. جریان نویز مود مشترک در صورتی تولید می‌شود که یک امپدانس اتصال معادلی ( $Z_c$ )، بین زمین و مبدل وجود داشته باشد.

دو روش برای اندازه‌گیری سطح EMI هدایتی وجود دارد

۱- اجرای تکنیک های نرم افزاری [۲۱]

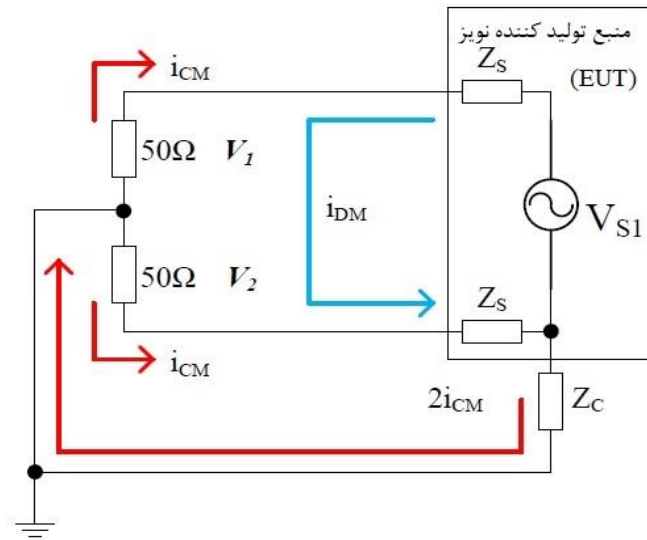
۲- استفاده از سخت افزار تکفیک کننده نویز<sup>۳</sup> [۲۲]

---

<sup>1</sup> Spectrum Analyzer

<sup>2</sup> Attenuator

<sup>3</sup> Noise-separator



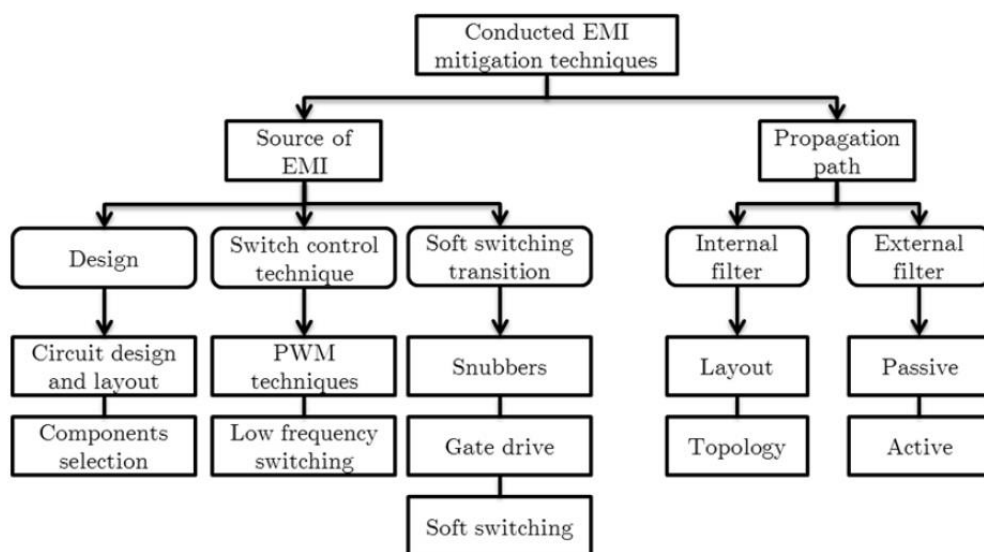
شکل (۹-۲) مدل فرکانس بالای ساده شده از اندازه‌گیری انتشار هدایتی

کل سطح انتشار هدایتی، توسط اتصال LISN که به تحلیلگر طیف متصل است اندازه‌گیری می‌شود، در حالی که ترمینالی دیگر ۵۰ اهم است. سپس، کل انتشار هدایتی اندازه‌گیری شده می‌تواند به انتشار هدایتی مود مشترک و مود تفاضلی جداسازی شود که در حقیقت از طریق افت ولتاژ روی LISN می‌توان این کار را انجام داد [۲۳].  $V_1$  افت ولتاژ روی مقاومت خروجی LISN که بین فاز و زمین قرار گرفته است می‌باشد و  $V_2$  افت ولتاژ روی مقاومت خروجی که بین نول و زمین قرار دارد. با توجه به روابط مداری می‌توان نوشت :

$$50\Omega \cdot i_{DM} = \frac{V_1 - V_2}{2} \quad (1-2)$$

$$-50\Omega \cdot i_{CM} = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (2-2)$$

به این ترتیب می‌توان ولتاژ مود مشترک و تفاضلی را محاسبه کرد.



شکل (۱۰-۲) روش‌های کاهش EMI هدایتی [۶]

## ۶-۲ تکنیک‌های کاهش EMI هدایتی

وقتی که تجهیزات، استانداردهای EMC را برآورده نمی‌کنند بایستی این EMI به نحوی کاهش یابد. تکنیک‌های مختلفی برای کاهش سطح EMI وجود دارد که به صورت کلی به دو بخش تقسیم می‌شوند.

- کاهش EMI از منبع تولید کننده آن
- کاهش EMI از مسیرهای اتصال

در شکل (۱۰-۲) تکنیک‌های مختلف کاهش EMI ارائه شده است.

### ۱-۶-۲ کاهش از منبع تولید کننده EMI

تکنیک‌های مختلفی برای کاهش EMI از منبع تولید کننده آن وجود دارد. در [۲۴] با استفاده

از تکنیک کلیدزنی نرم توانسته است سطح EMI را به طور قابل توجهی کاهش دهد. تکنیک‌های دیگری نظیر طراحی مدار، نحوه قرارگیری اجزای مبدل، تکنیک کلیدزنی پهنای پالس آشوبناک و همچنین استراتژی‌های مختلف برای اتصال به زمین برای کاهش EMI مطرح گردیده است که در [۲۳، ۲۵] مورد استفاده قرار گرفته است. نکته قابل توجه در این قسمت آن است که با وجود استفاده از تمام تکنیک‌های کاهش EMI در منبع، دیده می‌شود که اغلب سطح EMI همچنان بالاتر از سطوح استاندارد است. لذا نیازمند آنیم که از روش‌های دیگری نظیر فیلتر، جهت رساندن سطح EMI به سطوح استاندارد استفاده کنیم. کاهش EMI از منبع، خارج از حیطه کاری این پایان نامه می‌باشد.

## ۲-۶-۲ کاهش EMI از مسیرهای اتصال

انتشارات هدایتی از مسیرهای اتصال عبور می‌کنند، تا اینکه از این مسیر به بقیه اجزای سیستم برسد. حذف یا کاهش این انتشارات توسط یک فیلتر EMI می‌تواند صورت پذیرد. با وجود استفاده از تکنیک‌های کاهش EMI از منبع تولید کننده آن، استفاده از یک فیلتر EMI بر روی خط انتقال دهنده توان یک راه حل معمول و گاهی تنها راه حل ممکن برای رساندن سطح انتشار هدایتی به استانداردهای EMC می‌باشد.

سه نوع فیلتر از انواع فیلترهای EMI را می‌توان برجسته کرد [۶].

- ۱- فیلتر پسیو<sup>۱</sup> که فقط با المان‌های پسیو نظیر سلف، خازن و مقاومت ساخته می‌شود.
- ۲- فیلتر اکتیو<sup>۲</sup> که با المان‌های اکتیو نظیر تقویت کننده‌های عملیاتی ساخته می‌شوند.
- ۳- فیلتر هیبرید<sup>۱</sup> که ترکیبی از فیلتر پسیو و اکتیو می‌باشد.

---

<sup>1</sup> Passive filter

<sup>2</sup> Active filter

فیلترهای اکتیو معمولاً حجم فیلتر را به مقدار قابل توجهی کاهش می‌دهند، اما قدرت تضعیف آن‌ها در فرکانس‌های پایین می‌باشد که این مورد در [۲۶] بررسی شده است. این فیلترها اگر با یک فیلتر پسیو ترکیب شوند می‌توانند عملکرد بهتری را از خود بروز دهند، که در حقیقت نوع سوم از فیلترهای رایج هستند [۲۷]. با این وجود، در کاربردهای توان با گستره HF<sup>۲</sup>، استفاده از فیلترهای پسیو تنها راه حل ممکن می‌باشد.

## ۷-۲ فیلتر EMI پسیو

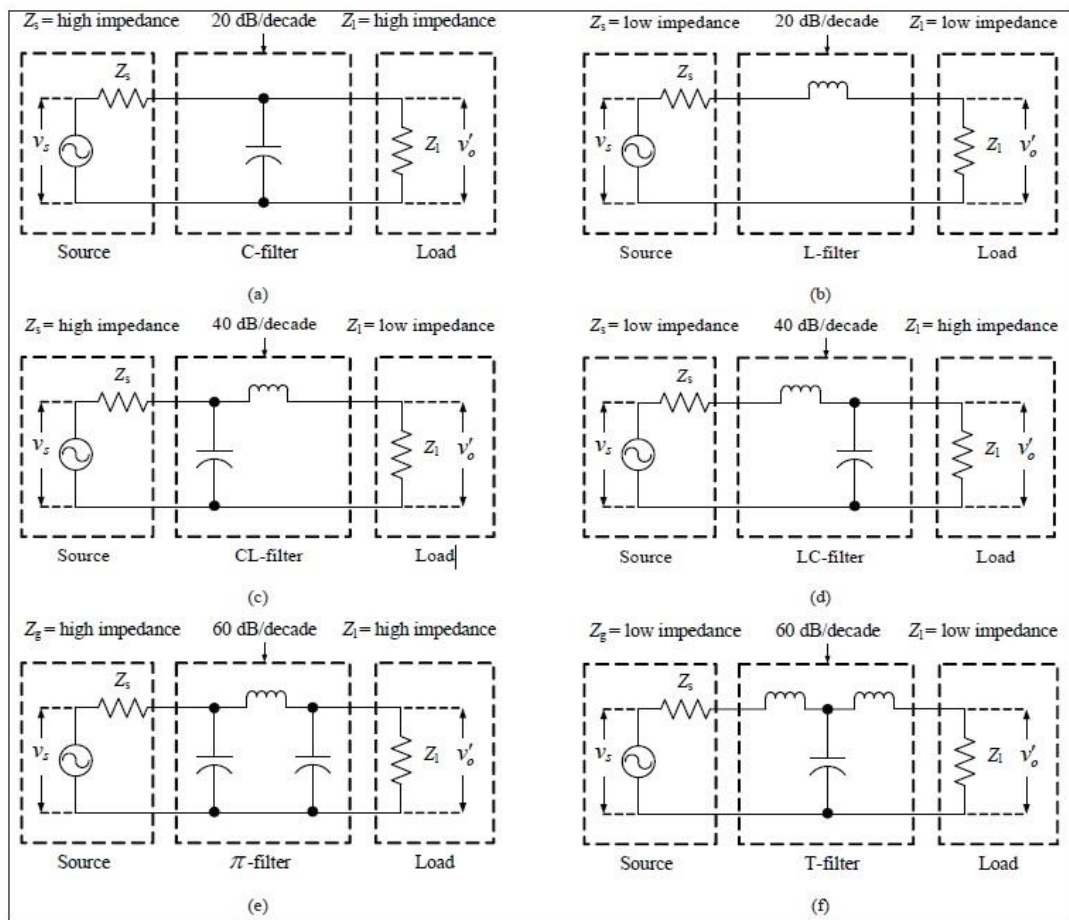
پس از اندازه‌گیری سطح انتشار هدایتی EMI، چنانچه بالاتر از سطوح استاندارد تعریف شده باشد، استفاده از یک فیلتر EMI یک روش معقول و در دسترس برای رساندن سطح انتشار هدایتی به سطح استاندارد می‌باشد. ساختارهای مختلفی برای فیلترهای پسیو وجود دارد که انواع آن در [۲۸] مورد بررسی قرار گرفته است که خلاصه‌ای از آن در شکل (۲-۱۱) آورده شده است. همچنین میزان قدرت تضعیف هر کدام از فیلترها نیز در ضمن شکل (۲-۱۱) بیان شده است.

شاخص اصلی برای انتخاب مناسب ساختار، میزان تضعیف مورد نیاز و همچنین تطبیق امپدانس‌های بین ورودی و خروجی متصل به فیلتر است. وقتی که امپدانس ورودی و خروجی متصل به فیلتر نامشخص باشد ساختار  $50\Omega/50\Omega$  را در نظر می‌گیریم. یک ساختار شناخته شده در شکل (۲-۱۲) به صورت معادل مداری و همچنین ساختار واقعی آورده شده است. هدف اصلی این فیلترها کاهش جریان جاری شده به سمت امپدانس خروجی LISN می‌باشد. به این ترتیب مسیر جریان برای

---

<sup>1</sup> Hybrid filter

<sup>2</sup> High frequency

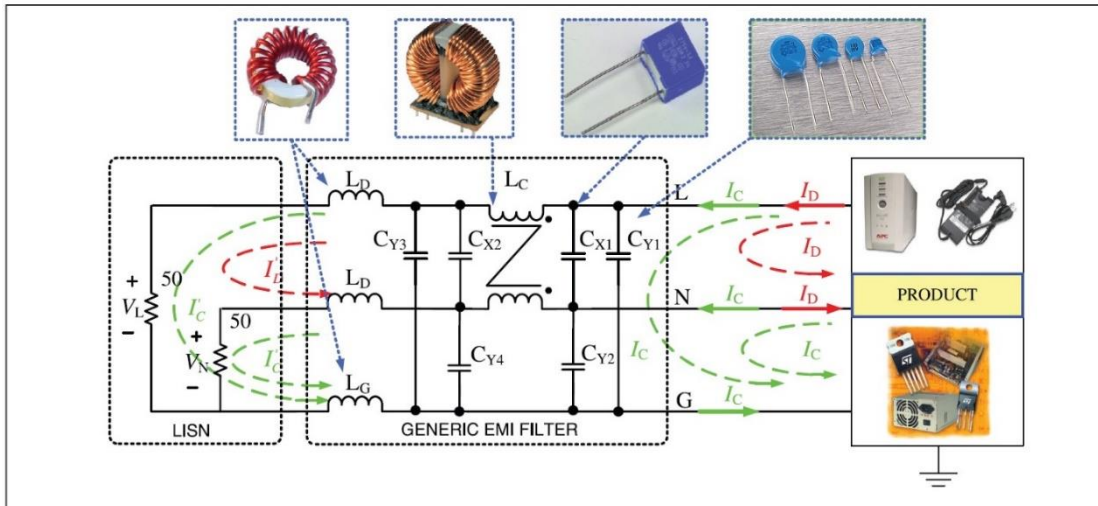


شکل (۱۱-۲) ساختارهای اساسی فیلترهای EMI : (a) فیلتر C : (b) فیلتر L : (c) فیلتر CL : (d) فیلتر LC : (e) فیلتر  $\pi$  : (f) فیلتر T [۲۸]

انتشار هدایتی در رنج فرکانسی مربوطه به سمت استانداردهای EMC می‌رود. در شکل (۱۲-۲) مقادیر  $L_C, C_Y$  برای کاهش انتشار هدایتی مود مشترک و مقادیر  $L_D, C_X$  برای کاهش انتشار هدایتی مود تفاضلی تعبیه شده‌اند. زوج سلف مود مشترک از نوع سلف چوک<sup>۱</sup> هستند، که میدان مغناطیسی ایجاد شده توسط جریان مود مشترک را می‌گیرند و شار تولید شده ناشی از جریان مود تفاضلی را از خود عبور می‌دهند. در اغلب موارد شار نشتی سلف چوک را می‌توان به عنوان سلف مود تفاضلی استفاده کرد [۲۹].

<sup>1</sup> Choke inductor





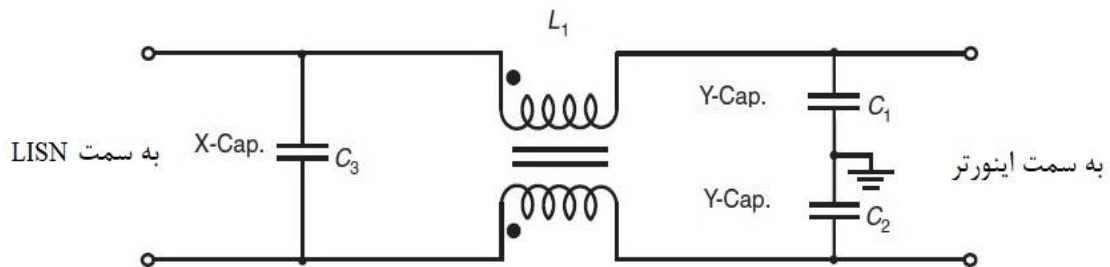
شکل (۲-۱۲) مدل مداری از یک فیلتر EMI برای یک منبع تغذیه [۲۸]

همانطور که قبلاً بیان شد استفاده از یک فیلتر EMI برای برآورده کردن مقرارت انتشار هدایتی در اغلب وسایل الکترونیک قدرت بخش ضروری و مهمی می‌باشد. یک فیلتر بایستی بتواند میرایی لازم برای جریان هر دو مود مشترک و تفاضلی را ایجاد نماید.

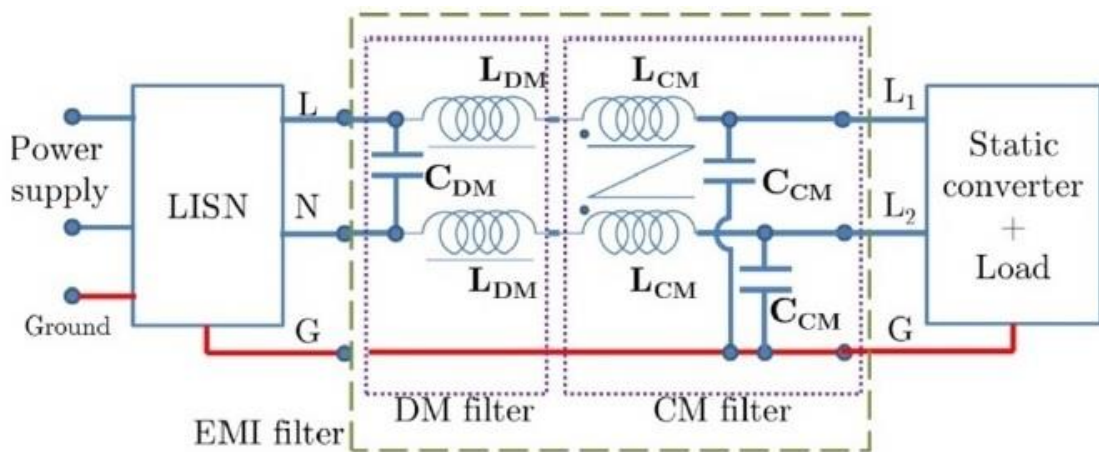
اگر ساختار LC را در یک فیلتر EMI در نظر بگیریم می‌توان گفت که این فیلتر از نوع فیلترهای LC پایین‌گذر خواهد بود. علاوه بر میزان تضعیف مورد نیاز، عامل دیگری جهت تعیین ساختار، حائز اهمیت است که این موضوع، امپدانس متصل به فیلتر می‌باشد. فیلتر مورد نظر از یک سمت به EUT و از سمت دیگر به LISN متصل است. به دلیل آنکه میرایی یک فیلتر تابعی از عدم تطابق امپدانس است، نقش یک فیلتر EMI، به وجود آوردن بیشترین عدم تطابق بین منبع تولید کننده EMI (اینورتر) و امپدانس LISN می‌باشد.

در انتشار هدایتی مود مشترک، اینورتر به عنوان یک منبع امپدانس بالا شناخته می‌شود زیرا مقدار خازن پارازیتی کوچکی که باعث برقراری مسیر جریان مود مشترک می‌شود، امپدانس زیادی خواهد داشت. از طرف دیگر یک LISN به عنوان یک بار امپدانس پایین برای فیلتر شناخته می‌شود زیرا در حالت مود مشترک فیلتر از سمت LISN دو مقاومت موازی ۵۰ اهمی را که برابر ۲۵ اهم خواهد بود، می‌بیند. برای داشتن حداکثر میرایی، المان امپدانس بالای فیلتر که سلف محسوب

می‌شود بایستی در سمت امپدانس پایین قرار گیرد و به طور مشابه خازن که المان امپدانس پایین فیلتر محسوب می‌شود بایستی رو به روی بخش امپدانس بالا که در اینجا اینورتر می‌باشد، قرار گیرد. در شکل (۲-۱۲) یک نمونه از ساختار فیلتر EMI نشان داده شده است. شکل (۲-۱۳) حالتی است که از اندوکتانس نشستی چوک به عنوان سلف مود تفاضلی استفاده شده است. دو خازن  $C_1, C_2$  به همراه چوک  $L_1$ ، بخش مود مشترک فیلتر شناخته می‌شوند که در حقیقت یک فیلتر LC می‌باشد. شکل (۲-۱۴) به عدم کافی بودن اندوکتانس نشستی برای ایجاد تضعیف مورد نیاز اشاره دارد و از این رو، یک سلف مود تفاضلی کمکی استفاده شده است تا بتوان میرایی لازم را ایجاد کرد.



شکل (۲-۱۳) نحوه قرار گیری یک فیلتر EMI با استفاده از اندوکتانس نشستی چوک به عنوان سلف مود تفاضلی



شکل (۲-۱۴) نحوه قرار گیری یک فیلتر EMI با استفاده از سلف کمکی به عنوان سلف مود تفاضلی [۶]

بیشترین مقدار ظرفیت خازن‌های مود مشترک که به عنوان Y-cap شناخته می‌شوند به دلیل

الزامات جریان نشتی<sup>۱</sup> توسط سازمان های ایمنی مختلف محدود شده اند. خازن های Y-cap در بین خطوط قدرت و زمین قرار می گیرند. جریان نشتی بیش از اندازه به سمت زمین به عنوان یک شوک در نظر گرفته می شود، بنابراین بایستی محدود گردد. در سراسر جهان استانداردهای مختلفی برای مقدار جریان نشتی بیان شده است که تمام آنها برای استفاده معمول و صنعتی تجهیزات، جریانی بین ۰,۵ تا ۵ میلی آمپر را در نظر گرفته اند. به عنوان مثال استاندارد UL<sup>۲</sup> مقدار جریان نشتی را بین ۰,۵ تا ۳,۵ میلی آمپر با توجه به شرایط مختلف در نظر گرفته است [۳۰]. اما حد پایین جریان نشتی در اکثر استانداردها به ۰,۵ میلی آمپر محدود گردیده است.

برای بدست آوردن بیشترین اندوکتانس مورد نیاز جهت سرکوب کردن هارمونیک های پایین فرکانس کلیدزنی،  $L_1$  روی یک هسته با نفوذپذیری بالا پیچیده می شود. برای جلوگیری از به اشباع رفتن هسته ناشی از جریان بالای خطوط قدرت، هر دو سیم پیچ سلف روی همان هسته پیچیده می شوند که در این حالت فرم یک سلف چوک مود مشترک می باشد. از آنجایی که جریان خطوط قدرت در هر سیم پیچ در جهت مخالف هم هستند، جریان شار مغناطیسی که در هسته بوجود می آید توسط این جریان ها لغو می شود.

## ۱-۷-۲ فیلتر مود مشترک (CM)

در عمل، این خازنی که بین خط و زمین قرار گرفته است، معمولاً نصف مقدار ماکزیمم مجاز است که توسط جریان نشتی محاسبه می شود. این اتفاق به دلیل آن است که فیلتر نمی تواند از تمام جریان نشتی مورد نیاز استفاده کند تا آنرا به حد مجاز برسد. ولتاژ نویز مود مشترک، دو خازن که

---

<sup>1</sup> Leakage current

<sup>2</sup> Underwriters Laboratore

بین خط و زمین قرار گرفته‌اند را به صورت موازی در مسیر خود می‌بیند، بنابراین خازن موثر مود مشترک برابر با جمع دو خازن می‌باشد. با تعیین مقدار خازن در حقیقت ما اولین گام برای طراحی فیلتر را انجام داده ایم که در پس تعیین این مقدار خازن می‌توانیم مقدار سلف چوک مود مشترک را تعیین کنیم، تا بتوان مقدار میرایی مورد نیاز را فراهم آورد. برای کاهش اندازه فیلتر مورد نظر سعی بر آن است که حداکثر مقدار خازن را انتخاب کنیم تا اندازه سلف چوک کاهش یابد. به صورت کلی مقدار انتخابی چوک از ۲ تا ۱۰ میلی هانری می‌باشد. چنانچه بیشتر از ۱۰mH مورد نیاز باشد، برای دستیابی به میرایی مورد نظر بایستی از چند چوک به صورت سری استفاده کرد تا خازن پارازیتی بین چوک‌ها محدود گردد [۱، ۲۸، ۳۱].

## ۲-۷-۲ فیلتر مود تفاضلی (DM)

برای انتشار هدایتی مود تفاضلی، دو خازن مود مشترک (Y-cap) به صورت سری متصل شده‌اند. بنابراین مقدار موثر خازن‌های مود مشترک در مود تفاضلی، برابر با نصف مقدار یکی از خازن‌ها خواهد بود. این مقدار از خازن تضعیف‌ناچیزی در مود تفاضلی در فرکانس‌های پایین ایجاد می‌کند که مقدار بیشتری مورد نیاز است، و همچنین مقدار خازن مود مشترک نیز نمی‌تواند افزایش پیدا کند، زیرا این مقدار بیشترین مقدار ممکن بوده است که توسط محدودیت‌های جریان نشتی تعیین شده است. این خازن‌ها در فرکانس‌های بالا در حدود ۱۰MHz برای میرایی مود تفاضلی مشارکت می‌کنند که معمولاً مورد نیاز واقع نمی‌شود. بنابراین می‌توان از این خازن‌ها در مود تفاضلی صرف نظر کرد.

برای فراهم آوردن مقدار قابل توجهی خازن مود تفاضلی، از یک خازن که بین خطوط توان قرار می‌گیرد استفاده می‌شود که به اصلاح به این خازن‌ها X-cap گفته می‌شود. چون این خازن به زمین

متصل نشده است، مقدار آن توسط استانداردهای جریان نشتی محدود نمی‌شود. مقدار کلی این خازن بازه ای بین ۰٫۱ تا  $2 \mu F$  را دارد. بنابه دلایل ایمنی، از یک مقاومت با مقدار ۱ مگا اهم به صورت موازی با خازن مود تفاضلی استفاده می‌شود. این مقاومت برای تخلیه خازن استفاده می‌شود، هنگامی که منبع توان حذف شده است [۱].

برای فیلتر مود تفاضلی نیاز به سلف مود تفاضلی داریم که می‌توان از اندوکتانس نشتی چوک مود مشترک به عنوان سلف مود تفاضلی استفاده کرد. قابل ذکر است که، چنانچه نتوانیم میرایی لازم برای مود تفاضلی را توسط اندوکتانس نشتی چوک مود مشترک فراهم کنیم، بایستی از سلف اضافی برای مود تفاضلی استفاده کنیم.

## ۲-۸ اندوکتانس نشتی

اندوکتانس نشتی با شار مغناطیسی کوپل شده با هوا به جای هسته مغناطیسی ایجاد می‌شود [۶]. این مقدار را می‌توان از فرمول‌های تجربی [۳۲]، محاسبات تحلیلی [۳۳] یا به واسطه روش‌های اندازه‌گیری [۳۴] محاسبه کرد. مقدار اندوکتانس نشتی با توجه به نوع سیم‌پیچی می‌تواند مقادیر متفاوتی را داشته باشد که با توجه به کاربرد سلف مورد نظر می‌توان این مقدار از نشتی را افزایش یا کاهش داد.

با توجه به آنکه می‌توان از مقدار اندوکتانس نشتی چوک مود مشترک به عنوان سلف مود تفاضلی استفاده کرد به نظر می‌رسد داشتن مقادیر بیشتر از اندوکتانس نشتی مطلوب ما باشد.

اندوکتانس نشتی چوک مود مشترک در یک فیلتر EMI بخش مهمی است، زیرا علاوه بر استفاده در جهت سلف مود تفاضلی تعیین کننده درجه فیلتر مود تفاضلی می‌باشد. یک چوک ایده‌آل مود مشترک، هیچگونه اندوکتانس مود تفاضلی ایجاد نمی‌کند. مسیر عبور جریان انتشار هدایتی مود تفاضلی در هر سیم‌پیچ به صورت متضاد هم هستند. اندوکتانس نشتی یک چوک یا ترانسفورمر نتیجه

اتصال ناکامل بین دو سیم پیچ است. همه شار تولید شده توسط یک سیم به طور کامل با سیم پیچ دیگری در اتصال نخواهد بود، از این رو وقتی جریان مود تفاضلی در سیم پیچ جاری می شود مقداری شار نشتی وجود دارد که از بین نرفته است. این نشت باعث می شود که سیم پیچ، مقداری سلف مود تفاضلی از خود نشان دهد. همانطور که قبلا ذکر شد در یک فیلتر EMI اندوکتانس نشتی چوک مود مشترک می تواند مفید واقع شود اما معایبی نیز دارد. اگر به اندوکتانس نشتی به عنوان یک نتیجه نگاه کنیم، هر سیم پیچ از چوک مود مشترک به صورت سری با مقداری اندوکتانس نشتی قرار گرفته است. این مقدار از سلف مود تفاضلی به همراه خازن مود تفاضلی (X-cap) تشکیل یک فیلتر LC را می دهند تا عمل فیلتر کردن در مود تفاضلی را بتوانند انجام دهند. قابل توجه است که بدانیم مقدار زیاد اندوکتانس نشتی چوک مود مشترک اگرچه به ظاهر مطلوب به نظر می رسد اما باید دقت کرد که مقدار زیاد اندوکتانس نشتی می تواند باعث به اشباع رفتن چوک مود مشترک در حالت مقادیر پایین جریان خط توان شود و این یک مشخصه نامطلوب به حساب می آید [۱].

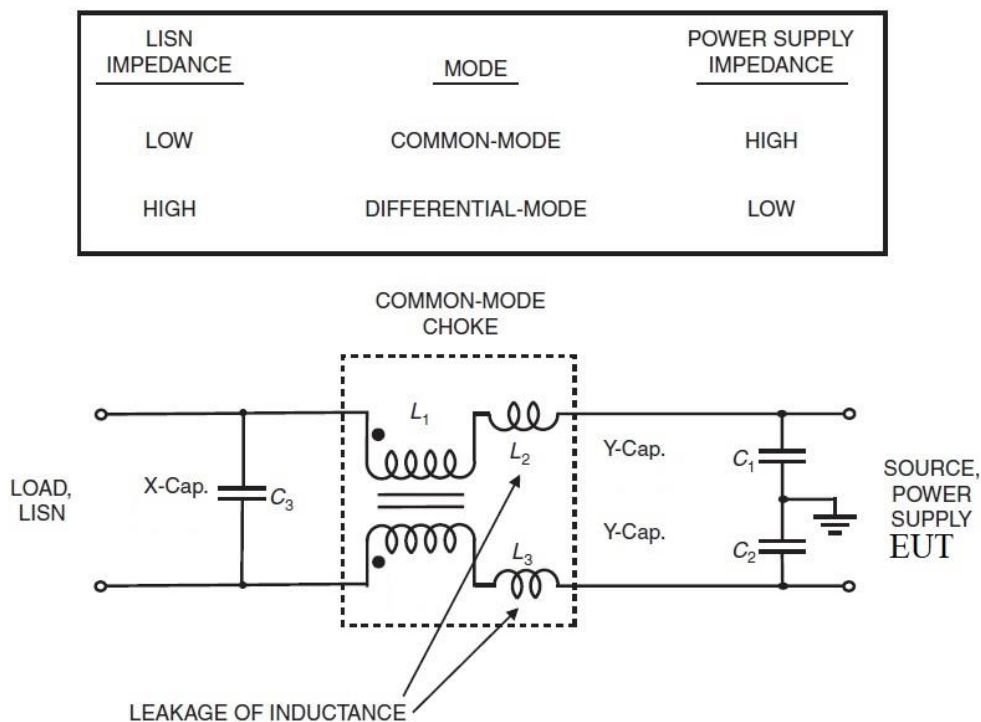
در مواقعی که می خواهیم از اندوکتانس نشتی چوک مود مشترک به عنوان سلف مود تفاضلی استفاده کنیم، چوک مود مشترک بایستی طراحی و ساخته شود تا بتواند یک مقدار خاصی اندوکتانس نشتی را از خود بروز دهد. به طور معمول چوک استفاده شده در فیلتر EMI اندوکتانس نشتی بین ۰,۵ تا ۵ درصد را دارد که با توجه به ساختار سیم پیچی این مقدار می تواند تغییر کند [۲۳].

روش ساده ای برای اندازه گیری اندوکتانس نشتی چوک مود مشترک وجود دارد. به این صورت که کافی است یکی از سیم پیچ ها اتصال کوتاه شود و مقدار اندوکتانس دو سر سیم پیچ دیگر اندازه گیری شود. اگر هیچ شار نشتی وجود نداشته باشد اندوکتانس اندازه گیری شده برابر صفر خواهد بود [۳۵].

فیلتر مود تفاضلی مدار شکل (۲-۱۵) شامل یک خازن X-cap و اندوکتانس نشتی چوک مود مشترک می باشد. این دو سلف و خازن در واقع تشکیل یک فیلتر LC را می دهند که همانند مرحله قبل برا استفاده از امپدانس های متصل به فیلتر می توان ساختار مناسب را انتخاب کرد. برای فیلتر مود

تفاضلی، اینورتر یک منبع امپدانس پایین است (به دلیل حضور خازن بزرگ در مسیر اینورتر) و LISN یک منبع امپدانس بالا در مود تفاضلی شناخته می‌شود (زیرا دو مقاومت ۵۰ اهمی با هم سری شده‌اند). برای داشتن بیشترین میرایی از جانب فیلتر بایستی المان امپدانس پایین فیلتر که خازن X-cap می‌باشد در مقابل بار امپدانس بالا که LISN می‌باشد قرار گیرد و به صورتی مشابه المان امپدانس بالای فیلتر که اندوکتانس نشتی چوک می‌باشد در مقابل EUT که دارای امپدانس کمی است قرار گیرد (شکل (۲-۱۵)).

به طور کلی می‌توان گفت که در ابتدا بایستی فیلتر مود مشترک طراحی شود و سپس با استفاده از اندوکتانس نشتی چوک مود مشترک می‌توان مقدار خازن X-cap را به نحوی تعیین کرد



شکل (۲-۱۵) فیلتر EMI با اندوکتانس نشتی چوک مود مشترک به همراه جدول امپدانس بار و منبع نویز [۱]

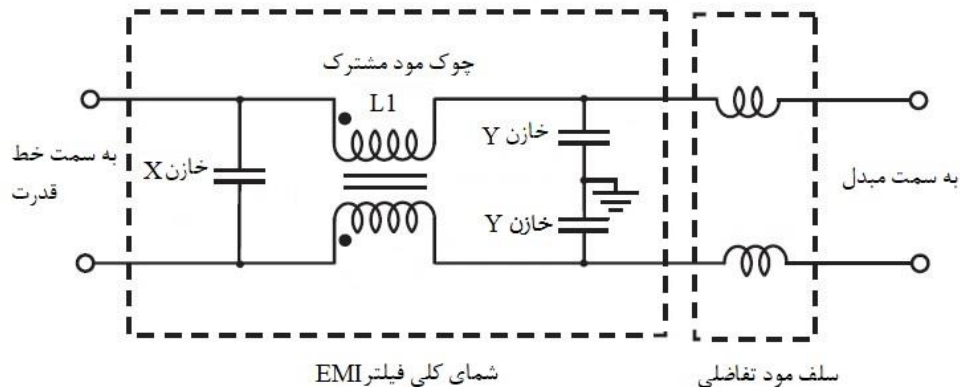
که بتوانیم میرایی مورد نیاز را ایجاد کنیم.

اگر به واسطه اندوکتانس نشتی چوک نتوانیم میرایی مورد نیاز را تامین کنیم، دو سلف مجزا را

برای تقویت میرایی به مدار فیلتر اضافه می‌کنیم که در شکل (۲-۱۶) نشان داده شده است. در صورت نیاز به سلف مود تفاضلی، قابل توجه است که این سلف بایستی روی یک هسته با نفوذپذیری کم پیچیده شود تا در حالیکه جریان‌های فرکانس بالا از آن‌ها عبور می‌کنند، هسته به اشباع نرود. مقدار تقریبی سلف‌های مود تفاضلی در حدود چندصد میکروهنری می‌باشد.

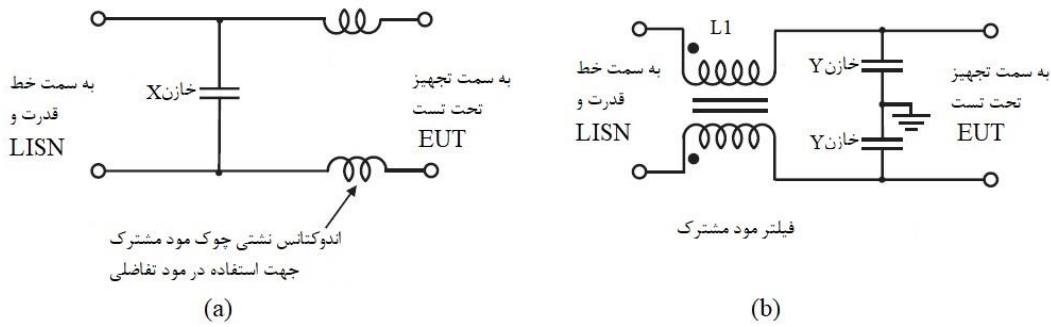
فیلتر ارائه شده در شکل (۲-۱۵) را می‌توان به دو بخش مود مشترک و تفاضلی تفکیک کرد که در شکل (۲-۱۷) به نمایش گذاشته شده است. شکل (۲-۱۷) (a) فیلتر مود تفاضلی و قسمت (b) فیلتر مود مشترک را نشان می‌دهد. اندوکتانس  $L_L$  نشان‌دهنده اندوکتانس نشستی چوک مود مشترک  $L_1$  می‌باشد.

شکل (۲-۱۸) نمای کلی از یک مدار معادل نویز را نشان می‌دهد که شامل یک منبع تغذیه (اینورتر)، فیلتر EMI و LISN می‌باشد. خازن  $C_Y$  و چوک  $L_{CM}$  نشان‌دهنده یک فیلتر مود مشترک و خازن  $C_X$  به همراه اندوکتانس نشستی چوک، یعنی  $L_L$ ، نشان‌دهنده فیلتر مود تفاضلی است [۱].

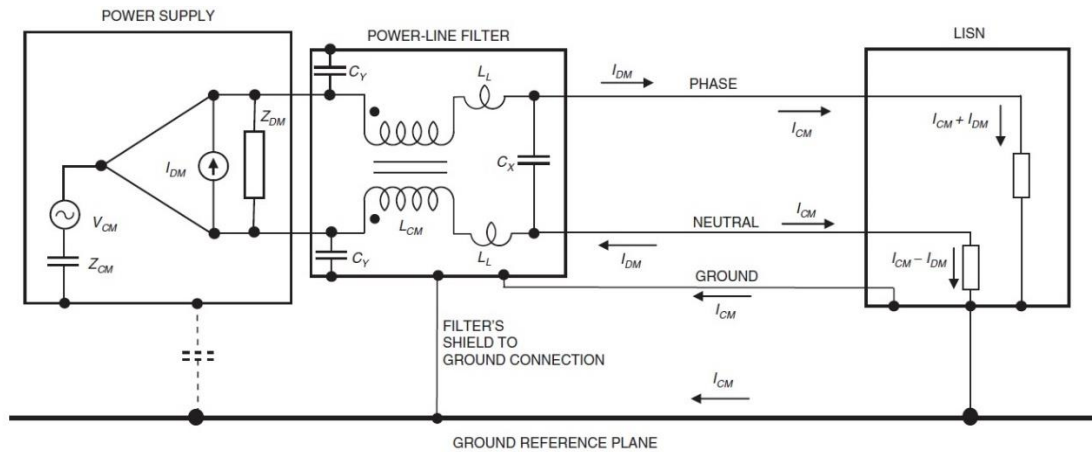


شکل (۲-۱۶) فیلتر EMI با اضافه شدن دو عدد سلف مود تفاضلی





شکل (۲-۱۷) مدار معادل فیلتر EMI (a) فیلتر مود تفاضلی (b) فیلتر مود مشترک



شکل (۲-۱۸) مدار معادل کلی یک سیستم متشکل از منبع تغذیه (EUT)، فیلتر EMI و LISN [۱]

## ۹-۲ ملاحظات طراحی فیلتر EMI

به منظور طراحی مناسب باید برخی از مسائل در نظر گرفته شود که در بخش‌های زیر به

صورت مفصل توضیح داده شده است.

### ۹-۲-۱ فرکانس گوشه

فرکانس گوشه، تقاطع بین خط مستقیم  $40\text{dB/dec}$  و محور افقی می‌باشد. قاعده کلی

این‌گونه بیان می‌کند که سطح انتشار هدایتی بایستی زیر این خط قرار گیرد. شیب این خط به

ساختار فیلتر ( $LC, CL, CLC, \dots$ ) و همچنین تعداد مراحل فیلتر (فیلتر تک مرحله‌ای یا دو مرحله‌ای

یا بیشتر) بستگی دارد. به عبارتی در یک فیلتر چند مرحله‌ای هر مرحله از فیلتر، یک خط مستقیم  $40\text{ dB/dec}$  را ارائه می‌دهد. از این‌رو با داشتن مقدار میرایی مورد نیاز که توسط فرمول‌های (۲-۳) و (۲-۴) تعیین می‌شود، می‌توان فرکانس گوشه را برای هر یک از مودهای مشترک و تفاضلی محاسبه کرد که با استفاده از فرمول (۲-۵) تعیین می‌گردد.

$$A_{req\_att\_CM[dB\mu V]} = A_{h\_att\_CM[dB\mu V]} - Limit_{[dB\mu V]} + 6_{[dB\mu V]} \quad (۳-۲)$$

$$A_{req\_att\_DM[dB\mu V]} = A_{h\_att\_DM[dB\mu V]} - Limit_{[dB\mu V]} + 6_{[dB\mu V]} \quad (۴-۲)$$

که  $A_{h\_att}$  مقدار دامنه انتشار هدایتی در فرکانس مورد نظر،  $Limit$  بیشترین مقدار مجاز تعیین شده انتشار هدایتی و  $6\text{ dB}$  برای حاشیه امنیت اضافی در نظر گرفته شده است [۲۹].  
و برای محاسبه فرکانس گوشه با توجه به توضیحات ارائه شده داریم :

$$f_{C\_CM/DM} = \frac{f_{h\_att}}{10^{\frac{A_{req\_att}}{filt\_att}}} \quad (۵-۲)$$

که  $f_{h\_att}$  فرکانسی است که خط  $40\text{ dB/dec}$  بر آن مماس شده و بقیه انتشار هدایتی زیر این خط قرار گرفته‌اند.  $filt\_att$  میرایی ذاتی فیلتر است که با توجه به ساختار فیلتر تعیین می‌شود [۲۹]. به منزله بهبود عملکرد فیلتر و همچنین جلوگیری از امکان تقویت شدن هارمونیک‌های کلیدزنی بهتر است مقدار  $f_C$  کمتر یا مقداری بیشتر از فرکانس کلیدزنی مبدل باشد. پس از تعیین مقادیر فرکانس گوشه می‌توان به تعیین پارامترهای داخلی فیلتر پرداخت.

## ۲-۹-۲ خازن‌های مورد استفاده در فیلتر EMI

استاندارد (EN132400(IEC384-14)، هفت کلاس مختلف برای خازن تداخلات فرکانس

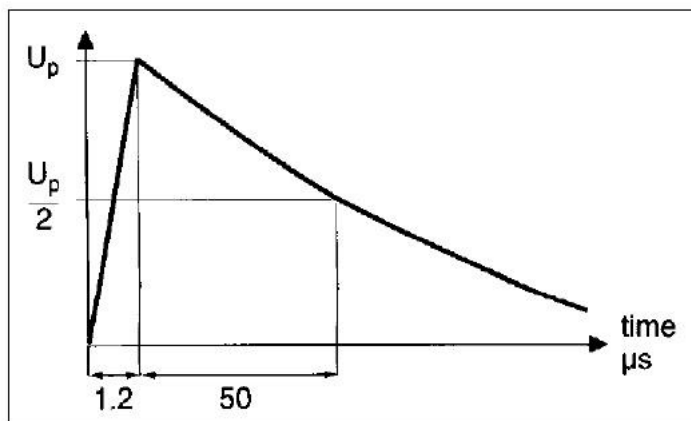
رادیویی<sup>۱</sup> RFI تعریف می‌کند، که سه کلاس مربوط به خازن‌های کلاس X و چهار کلاس مربوط به خازن‌های کلاس Y می‌باشد. کلاس مورد استفاده، توسط استانداردهای تجهیزات برای محصول نهایی تعیین می‌شود. برای تجهیزات تجاری معمولی و رایانه‌های تحت استاندارد (IEC950) EN60950 طبقه‌های کاربردی X2 و Y2 مورد استفاده قرار می‌گیرند. این خازن‌ها بایستی حداقل دو آزمون را بگذرانند [۳۶].

**آزمون ضربه :** در آزمون ضربه، ۲۴ بار ولتاژی به اندازه  $U_p$ ، به خازن تحت آزمون اعمال می‌گردد. دامنه این ولتاژ ضربه بستگی به کلاس ساخت خازن دارد که در قسمت بعد توضیح داده خواهد شد. شکل موج ضربه اعمالی به خازن‌ها در شکل (۲-۱۹) نشان داده شده است.

**آزمون استقامت :** همان خازن‌هایی که آزمون ضربه را با موفقیت گذرانده‌اند، در درجه حرارت بالا قرار می‌گیرند. ولتاژ اعمال شده ۱/۷ برابر ولتاژ نامی برای خازن‌های Y و ۱/۲۵ برابر ولتاژ نامی برای خازن‌های X می‌باشد. علاوه بر این، یک بار در هر ساعت، ولتاژ به ۱۰۰۰VAC در مدت زمان ۱/۰ ثانیه افزایش می‌یابد. آزمون استقامتی برای ۱۰۰۰ ساعت ادامه دارد. پس از آن خازن‌ها، تحت آزمون مقاومت الکتریکی قرار می‌گیرند که بایستی این آزمون را نیز با موفقیت بگذرانند و سپس اندازه‌گیری می‌شوند. اگر تغییرات پارامترهای بحرانی در حد محدود باشد، خازن‌ها قابل قبول هستند.

---

<sup>1</sup> Radio Frequency Interference



شکل (۲-۱۹) آزمون ضربه خازن‌های سری X و Y [۳۶]

## ۲-۹-۲-۱ کاربرد خازن X

با توجه به نوع کاربرد مورد نظر، می‌توان کلاس خاصی را انتخاب کرد که با توجه به سطح ولتاژ مورد استفاده یا شرایط خاص، تعیین می‌شود. با توجه به میزان کاربرد خازن‌های X، کلاس‌های آن به شرح زیر می‌باشد.

### • کلاس X2

رایج‌ترین کلاس از خازن‌های سری X می‌باشد که در کاربردهایی با سطح ولتاژ بین ۱۵۰ تا ۲۵۰ ولت AC مورد استفاده قرار می‌گیرد. این خازن‌ها کاربرد بسیار وسیعی در کامپیوترها، سشوار، ماشین فکس و ... دارند. این خازن‌ها آزمون ضربه را با ولتاژ ۲/۵kV به ازای ظرفیت  $1 \mu F$  یا کمتر از آن، می‌گذرانند. برای ظرفیت‌های بزرگتر از  $1 \mu F$  آزمون ضربه به صورت  $2/5 kV / \sqrt{C(\mu F)}$  می‌باشد.

### • کلاس X1

این مدل از خازن‌ها بیشتر برای کاربردهای خاص به کار برده می‌شوند. کاربردهایی نظیر پرینترهای صنعتی یا کامپیوترهای کوچکی که به خطوط سه فاز متصل هستند. نورپردازی‌های

صنعتی نیز می‌توانند در این دسته‌بندی جای بگیرند. این خازن‌ها آزمون ضربه با 4kV به ازای ظرفیت های کمتر از  $1\ \mu F$  می‌گذرانند. برای ظرفیت‌های بالاتر از  $1\ \mu F$  مقدار ولتاژ ضربه  $4\ kV / \sqrt{C(\mu F)}$  می‌باشد.

### • کلاس X3

یک دسته‌بندی عمومی از این خازن‌ها می‌باشد که هیچ‌گونه آزمون ضربه‌ای را نمی‌گذرانند. تا به امروز هیچ تجهیز استاندارد شناخته شده‌ای وجود ندارد که اجازه استفاده از خازن‌های کلاس X3 را داشته باشد [۳۶, ۳۷].

### ۲-۲-۹-۲ کاربرد خازن Y

EN132400 چهار کلاس برای خازن‌های Y دارد که مطابق با درجه عایق بودن پل و ولتاژ خط، مورد استفاده قرار می‌گیرند. در حالت عادی برای تجهیزاتی که عمل پردازش داده را انجام می‌دهند به یک خازن Y2 نیاز است که بین خطوط قدرت و زمین قرار می‌گیرند. چهار کلاس خازن Y به ترتیب بیشترین کاربرد توصیف می‌شود.

### • کلاس Y2

مشهورترین نوع خازن‌های Y، سری Y2 می‌باشد. این خازن‌ها بیشتر، تا سطح ولتاژهای ۲۵۰ ولت AC استفاده می‌شوند و دارای یک عایق اساسی به صورت پل<sup>۱</sup> و یک عایق تکمیلی می‌باشد. همانطور که بیان شد این خازن‌ها بین مسیر قدرت و زمین قرار می‌گیرند و بخش ایمنی فیلتر را ایفا می‌کنند. این خازن‌ها آزمون ضربه ۵kV را می‌گذرانند.

### • کلاس Y1

---

<sup>1</sup> Bridge

این خازن‌ها دارای یک پل تقویت شده یا عایق دو لایه می‌باشند. این نوع خازن‌ها، دسته جدیدی از خازن‌های Y هستند. در گذشته نیاز به استفاده از دو خازن جداگانه به صورت سری برای برآورده شدن نیازهای عایقی وجود داشت. اکنون خازن‌های Y1 دارای این خاصیت هستند و به جای استفاده از دو خازن Y2 به صورت سری می‌توان از یک خازن Y1 استفاده کرد. این خازن‌ها آزمون ضربه با ۸kV را می‌گذرانند و برای کاربردهایی با سطح ولتاژ ۲۵۰VAC مناسب هستند

### • کلاس Y3

این خازن‌ها دارای یک لایه پل و عایق تکمیلی هستند و سطح ولتاژ نامی آن‌ها تا ۲۵۰VAC می‌باشد، اما این نوع خازن‌ها آزمون ولتاژ ضربه را نمی‌گذرانند. تاکنون هیچ تجهیزاتی برای استفاده از این نوع خازن‌ها تعریف نشده است.

### • کلاس Y4

برای کاربردهایی با سطح ولتاژ تا ۱۵۰VAC این سری از خازن‌ها مناسب هستند. این خازن‌ها با آزمون ضربه ۲,۵kV و یک لایه پل و عایق تکمیلی ساخته می‌شوند. با توجه به سطح ولتاژ و نوع آزمون ضربه، کاربرد خاصی در صنعت ندارند [۳۶, ۳۷].

## ۲-۹-۳ خازن مورد استفاده در فیلتر مود مشترک EMI

پس از تعیین فرکانس گوشه، معمولاً خازن اولین المانی است که بایستی تعیین شود. برای برآورده کردن محدودیت‌های EMC استفاده از یک فیلتر EMI در اکثر موارد ضروری است. انواع متفاوت این فیلترها بستگی به تجهیز مورد نظر دارد. عمل فیلتر شدن توسط خازن‌های خاصی که برای خطوط AC طراحی شده‌اند انجام می‌شود که این خازن‌ها در اتصال با چوک‌هایی که دارای طراحی خاصی هستند می‌توانند عمل فیلترینگ را انجام دهند.

تداخلات الکترومغناطیسی، هدایتی است در خطوط AC، که می‌تواند به صورت متقارن یا نامتقارن ایجاد شود. تداخلات متقارن توسط منبعی که بین سیم اصلی (فاز) و نول قرار دارد تولید می‌شود. یک خازن خط به خط (طراحی شده از اساس نوع X) برای این نوع از تداخلات موثر است. تداخل غیر متقارن توسط منبعی که بین هر کدام از سیم‌های فاز، نول و شاسی زمین قرار دارد، تولید می‌شود. یک خازن خط به زمین (نوع Y) فیلترینگ برای این نوع از تداخلات را تامین می‌کند. خازن X ممکن است هر مقداری را داشته باشد، اما خازن Y معمولاً باید در مقادیر کوچکی حفظ شود زیرا برای جریان نشتی  $50/60\text{ Hz}$  که به زمین جاری می‌شود محدودیت‌هایی وجود دارد. مقدار عمومی این خازن بدون در نظر گرفتن عوامل طراحی  $4700\text{ pF}$  است. مقدار نرمال خازن‌های X بین  $0.1$  تا  $1\ \mu\text{F}$  است. گاهی مقدار بیشتری مورد نیاز است که بستگی به تداخلات الکترومغناطیسی دستگاه مورد نظر دارد.

## ۲-۹-۳-۱ محدودیت جریان نشتی

در طول عملیات نرمال تجهیزات الکترونیکی، برخی از جریان‌ها از طریق سیم حفاظت زمین به سمت زمین جاری می‌شوند. این جریان‌ها، که جریان نشتی نامیده می‌شود، خطر پنهانی را برای کاربر به وجود می‌آورند، پس بنابراین توسط استانداردهای ایمنی این مقدار محدود می‌شود. فیلتر خطوط قدرت یا فیلترهای EMC با خازنی که در مسیر زمین قرار دارند، در این امر مشارکت می‌کنند. تکنولوژی امروز باعث شده است که استفاده از فیلترهای سرکوب‌کننده نویز اغلب به صورت اجباری استفاده شوند و بنابراین برای کاربر نهایی بحث جریان نشتی اهمیت بیشتری پیدا می‌کند.

در واقع اتصال زمین حفاظت شده، کاربر را از خطر لمس ولتاژ در موارد خرابی یا اتصال کوتاه تجهیزات الکترونیکی حفاظت می‌کند. با توجه به این موضوع مقدار جریان نشتی بایستی به نحوی

محدود گردد که حفاظت برای کاربران را به وجود آورد. بنا به همین دلیل استانداردهای مختلفی در کشورهای مختلف برای اندازه‌گیری محدودیت‌های جریان نشتی تعریف شده است. در این مبحث از استاندارد EN60950-1 استفاده شده است، که در آن استانداردهای ایمنی برای تجهیزات اداری و تجهیزات فناوری اطلاعات بیان شده است.

در حالی که برای جریان نشتی یک توصیف رایجی وجود دارد، اما استانداردها، تفاوتی را بین جریان لمس‌شده<sup>۱</sup> و جریان هادی حفاظتی<sup>۲</sup> قائل می‌شوند. جریان لمس‌شده، کل جریانی است که از طریق بدن انسان عبور می‌کند، زمانی که تجهیز را لمس می‌کند. و جریان هادی حفاظتی آن مقدار جریانی است که، از طریق هادی حفاظتی زمین در شرایط کار نرمال وسیله عبور می‌کند. این همان جریانی است که به آن جریان نشتی گفته می‌شود.

تمام تجهیزات الکتریکی بایستی در هنگام ساخت، خطرات ناشی از جریان لمس‌شده و جریان زمین حفاظت شده را در نظر بگیرند که هر دو می‌تواند برای کاربر خطرناک باشد. به طور کلی جریان لمس شده نباید از  $3,5\text{mA}$  تجاوز کند. محدودیت  $3,5\text{mA}$  برای همه نوع از تجهیزات واقع بینانه نیست، بنابراین مقررات دیگری در استانداردها برای تجهیزات وجود دارد.

علاوه بر این برای فیلترهای EMI پسیو، استانداردهای ایمنی وجود دارد. به عنوان مثال در اروپا استاندارد EN60939 و VDE16 بخش ۱۲ است. این استانداردها در آمریکا برای فیلتر EMI متفاوت است که در استاندارد UL1283 بیان شده است. در بیشتر این موارد مقدار جریان نشتی برای یک فیلتر نباید از  $0,5\text{mA}$  تجاوز کند و برای جریان لمس شده هم از مقدار  $3,5\text{mA}$  نباید تجاوز کند. البته مقدار جریان نشتی در تجهیزات پزشکی با مقررات سختگیرانه‌تری روبه‌رو است که جریان نشتی را به مقدار بسیار پایین و در حدود  $50\ \mu\text{A}$  محدود می‌کنند. در این مورد نیز استانداردهای خاصی وجود

---

<sup>1</sup> Touch current

<sup>2</sup> Protective Conductor Current



دارد.

همچنین در این استانداردها روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری جریان نشتی بیان شده است که در صورت نیاز می‌توان نحوه انجام این آزمایش‌ها را نیز مورد بررسی قرار داد. البته، اندازه‌گیری جریان نشتی با پروب‌های جریان انجام می‌پذیرد که در اختیار نمی‌باشد [۳۹، ۳۸، ۳۰].

## ۲-۳-۹-۲ خازن کاغذ آغشته شده<sup>۱</sup> Y

مهمترین مشخصه یک خازن کاغذی تغییرات دمایی و محدوده خطا<sup>۲</sup> می‌باشد. تغییرات محدوده خطا ۲۰ درصد و تغییرات دما در  $25^{\circ}\text{C}$ ،  $5\%$  و در  $85^{\circ}\text{C}$  برابر با  $6\%$  است (در حقیقت گستره تغییرات دمای خازن کاغذی از  $40^{\circ}\text{C}$  تا  $100^{\circ}\text{C}$  درجه است، اما برای اینکه بتوانیم با خازن‌های سرامیکی مقایسه کنیم این گستره از دما انتخاب شده است).

نحوه محاسبه بیشترین مقدار خازن Y به صورت زیر می‌باشد

$$C_{\max} = C_{\text{rated}} \times 1.2_{\text{tol}} \times 1.06_{\text{temp}} \quad (6-2)$$

که در معادله (۶-۲) ضرایب ۱،۲ و ۱،۰۶ به ترتیب به عنوان ضریب تغییرات محدوده خطا و دما انتخاب شده‌اند. از طرفی جریان نشتی که از طریق خازن عبور می‌کند برابر است با:

$$I_{\text{leakage}} = V_{\text{ac}} \times \omega \times C_{\max} \quad (7-2)$$

که  $I_{\text{leakage}}$  بیانگر جریان نشتی مجاز است که برابر با  $0,5\text{mA}$  در نظر گرفته شده است.  $V_{\text{ac}}$  ولتاژ ورودی به فیلتر و  $\omega = 2\pi f$  است که  $f$  بیانگر فرکانس منبع تغذیه AC می‌باشد.

---

<sup>1</sup> Impregnated Paper

<sup>2</sup> Tolerance

با استفاده از روابط (۶-۲) و (۷-۲) می توان برای  $C_{rated}$  نوشت :

$$C_{rated} = \frac{I_{leakage}}{V_{ac} \times 2\pi \times f_{(Hz)} \times 1.2_{(tol)} \times 1.06_{(temp)}} \quad (۸-۲)$$

از آنجا که هر مقداری برای خازن را نمی توان در اختیار داشت، هر مقداری کمتر از  $C_{rated}$  قابل قبول است. زیرا مقادیر کمتر از  $C_{max}$  سبب تجاوز از مقدار جریان نشتی مجاز نمی شود. همچنین می توان حداقل مقدار قابل قبول خازن نیز محاسبه شود. حد پایین خازن در عوامل استاندارد اثری ندارد اما برای برطرف کردن نیازهای EMI بایستی حداقل مقدار قابل قبول نیز محاسبه شود [۴۰].

$$C_{min} = C_{rated} \times 0.8_{tol} \times 0.95_{temp} \quad (۹-۲)$$

## ۲-۹-۳-۳ خازن سرامیکی Y

مشخصه های مهم یک خازن سرامیکی عبارتند از : تغییرات محدوده خطا، دما، وابستگی به ولتاژ AC و عمر خازن<sup>۱</sup>. برخی از فرضیات بایستی ساخته شود، زیرا اطلاعات کاملی از آن توسط شرکت های سازنده ارائه نشده است. از این رو آزمون هایی بر روی خازن های سرامیکی انجام شده است تا اعداد منطقی در اختیار قرار گیرد.

اطلاعات برای بیشتر خازن های سرامیکی به فرم زیر است :

۱. تغییرات محدوده خطا : ۲۰%

۲. تغییرات دمایی : +/- ۱۰%

۳. وابستگی به ولتاژ AC : +۳۰%

<sup>1</sup> Aging

۴. عمر خازن : ۷%-

پس با توجه به تغییرات ذکر شده می توان نوشت :

$$C_{\max} = C_{\text{rated}} \times 1.2_{\text{tol}} \times 1.1_{\text{temp}} \times 1.33_{\text{ac dep}} \quad (10-2)$$

و جریان نشتی برابر است با :

$$I_{\text{leakage}} = V_{\text{ac}} \times \omega \times C_{\max} \quad (11-2)$$

و با حل کردن  $C_{\text{rated}}$  می توان نوشت :

$$C_{\text{rated}} = \frac{I_{\text{leakage}}}{V_{\text{ac}} \times 2\pi \times f_{(\text{Hz})} \times 1.2_{(\text{tol})} \times 1.1_{(\text{temp})} \times 1.33_{\text{ac dep}}} \quad (12-2)$$

و همانند خازن های کاغذی می توان مقادیر کمتر از  $C_{\text{rated}}$  را که در دسترس است به عنوان خازن مورد نظر انتخاب نمود. با توجه به فرمول  $C_{\text{rated}}$  در دو حالت کاغذ آغشته شده و سرامیکی پرواضح است که در حالت خازن سرامیکی مقادیر کمتری برای خازن بدست می آید. اگر چنانچه محاسبات برای خازن کاغذی انجام شود و مقدار خازن از نوع سرامیکی انتخاب شود باعث نقص استاندارد بیان شده برای جریان نشتی خواهد شد زیرا که خازن سرامیکی ناپایداری ولتاژ و دمای بیشتری نسبت به خازن کاغذی دارد. این موضوع در مسائل پزشکی بسیار بیشتر اهمیت دارد زیرا محدودیت جریان نشتی برابر  $50 \mu A$  است. پایداری بیشتر خازن های کاغذی سبب می شود انتخاب آنها برای خازن Y مناسب تر باشد و بتواند حفاظت بیشتری را برای مدار ایجاد کند.

برای کامل شدن بحث تحلیل خازن می توان کمترین مقدار خازن سرامیکی را نیز بدست آورد

که به فرم زیر خواهد بود [۴۰].

$$C_{\min} = C_{\text{rated}} \times 0.8_{\text{tol}} \times 0.9_{\text{temp}} \times 1.33_{\text{ac dep}} \times 0.93_{\text{Aging}} \quad (13-2)$$

## ۴-۳-۹-۲ تعیین چوک مود مشترک $L_{CM}$

پس از تعیین خازن مود مشترک مقدار سلف مود مشترک را می‌توان تعیین کرد که با استفاده

از رابطه (۱۴-۲) بدست می‌آید

$$f_{C_{CM}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \sqrt{L_{CM} \cdot C_{CM}}}, C_{CM} = 2C_Y \quad (14-2)$$

که  $C_{CM}$  دو برابر خازن  $C_Y$  می‌باشد. با توجه به رابطه (۱۴-۲) می‌توان مقدار سلف چوک مود

مشترک را بدست آورد که توسط رابطه (۱۵-۲) بیان شده است.

$$L_{CM} = \frac{1}{C_{CM} (2\pi f_{C_{CM}})^2} \quad (15-2)$$

## ۴-۹-۲ تعیین سلف مود تفاضلی $L_{DM}$

پس از تعیین مقدار چوک مود مشترک بایستی اندوکتانس نشتی این چوک اندازه‌گیری شود

که در بخش ۲-۸ به معرفی اندوکتانس نشتی و روش محاسبه آن پرداختیم.

همانطور که قبلا بیان شد از اندوکتانس نشتی چوک به عنوان سلف مود تفاضلی می‌توان

استفاده کرد و اگر چنانچه نتوان با استفاده از این اندوکتانس نشتی، میرایی لازم را ایجاد کرد، بایستی

سلف‌های کمکی برای مود تفاضلی در نظر گرفته شود تا بتوان میرایی لازم را به وجود آورد. به همین

منظور ابتدا بایستی چوک مود مشترک طراحی و ساخته شود و مقدار اندوکتانس نشتی آن را تعیین

نمود. البته به صورت کلی اندوکتانس نشتی یک چوک بین ۰,۵ تا ۵ درصد اندوکتانس مود مشترک

می‌باشد که در رابطه (۱۶-۲) بیان شده است.

$$L_{leakage} = (0.5 \pm 5) \% L_{CM}$$

(۱۶-۲)

پس در گام اول سعی بر آن داریم که به منزله کاهش حجم و اندازه فیلتر از سلف اضافی برای مود تفاضلی استفاده نکنیم که این بررسی در بخش‌های بعدی انجام خواهد پذیرفت [۲۹].

## ۲-۹-۵ تعیین خازن مود تفاضلی $C_x$

پس از تعیین مقدار اندوکتانس نشستی چوک مود مشترک، پارامتر بعدی که خازن مود تفاضلی می‌باشد را می‌توان تعیین کرد. برای محاسبه خازن می‌توان از رابطه (۲-۱۷) استفاده کرد [۲۹].

$$C_{DM} = \frac{1}{L_{DM} (2\pi f_{C_{DM}})^2} \quad (۲-۱۷)$$



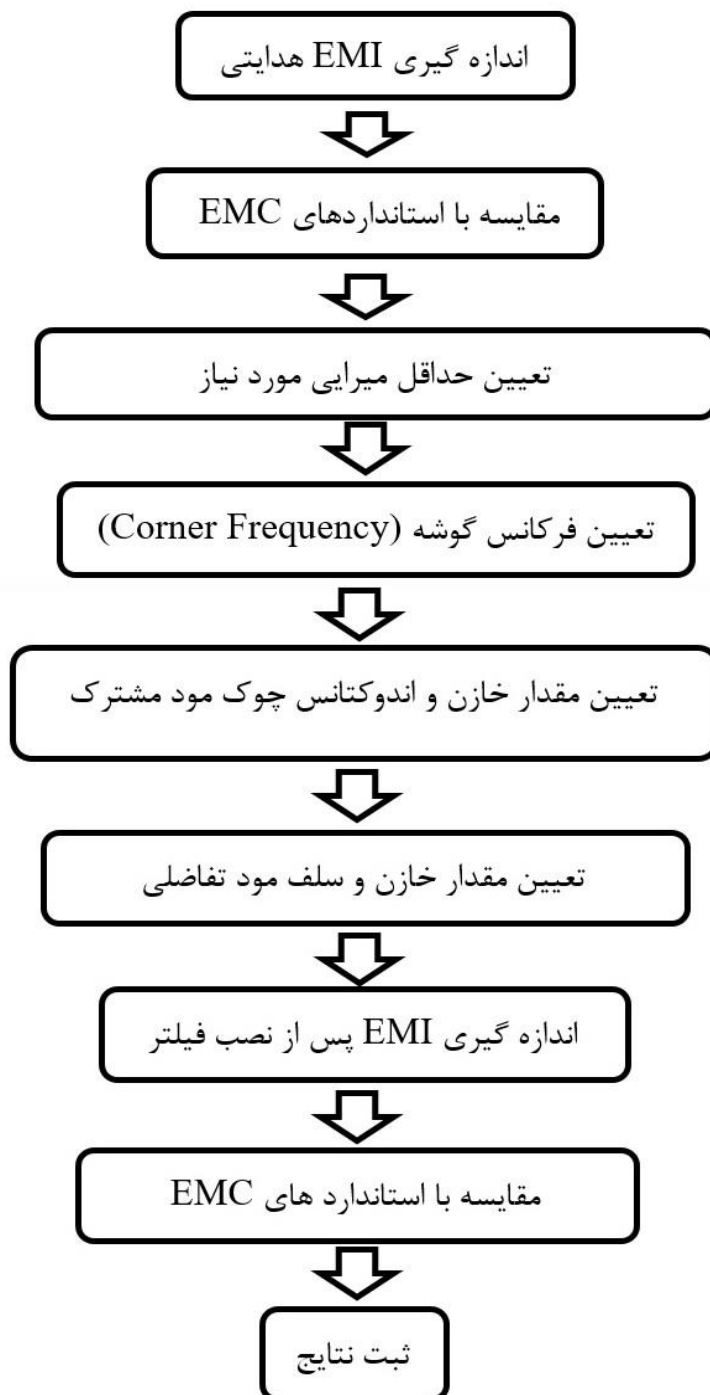
## فصل ۳: طراحی فیلتر EMI

### ۳-۱ مراحل طراحی فیلتر EMI

نمودار نشان داده شده در شکل (۳-۱) ، خلاصه ای از روش پیاده سازی فیلتر EMI برای اینورتر مورد نظر را نشان می‌دهد. در گام اول بایستی سطح انتشار هدایتی اینورتر اندازه‌گیری شود که در بخش بعدی در رابطه با نحوه بدست آوردن انتشار هدایتی توضیح داده خواهد شد. پس از اندازه‌گیری انتشار هدایتی ، بایستی این انتشار هدایتی را با سطوح استاندارد مقایسه کرد، تا بتوان مقدار میرایی مورد نیاز را بدست آورد. در این رابطه سطوح استاندارد مختلفی تعریف شده است که در بخش‌های بعدی این سطح استاندارد تعریف می‌شود. پس از بدست آوردن مقدار میرایی مورد نیاز بایستی فرکانس گوشه برای هر دو مود مشترک و تفاضلی محاسبه شود. با داشتن فرکانس گوشه و در نظر گرفتن استانداردهای تعریف شده برای مبحث جریان نشتی می‌توان مقدار مطلوب، برای خازن مود مشترک را محاسبه کرد که یک بخش به نحوه محاسبه خازن مود مشترک اختصاص داده می‌شود. پس از تعیین خازن مود مشترک می‌توان مقدار اندوکتانس مورد نیاز برای مود مشترک را تعیین نمود. همانطور که قبلاً بیان شد می‌توان از اندوکتانس نشتی چوک مود مشترک به عنوان اندوکتانس مود تفاضلی استفاده کرد. پس از طراحی چوک مود مشترک می‌توان مقدار اندوکتانس نشتی را اندازه‌گیری کرد و در نهایت آخرین قطعه از فیلتر که خازن مود تفاضلی می‌باشد به کمک فرکانس گوشه در مود تفاضلی ( $f_{DM}$ ) بدست می‌آید. قابل ذکر است، در صورتی که به واسطه اندوکتانس نشتی حاصل از چوک مود مشترک، نتوانیم میرایی لازم را ایجاد کنیم، لازم است از سلف مود تفاضلی اضافی‌ای برای فیلتر استفاده کنیم که این اقدام بعد از بررسی کارایی و عملکرد فیلتر مورد بررسی قرار خواهد گرفت. پس از طراحی فیلتر بایستی از عملکرد فیلتر اطمینان حاصل کرد که بدین منظور، این فیلتر در مدار قرار می‌گیرد و مجدد سطح انتشار هدایتی اندازه‌گیری می‌شود. در این بخش نیز بایستی سطح EMI با سطوح استاندارد مقایسه شود. در صورتی که میرایی لازم ایجاد شده



باشد مرحله طراحی فیلتر به اتمام رسیده است و در صورتی که سطح EMI بالاتر از سطوح استاندارد قرار بگیرد بایستی روند طراحی دوباره تکرار شود.



شکل (۱-۳) مراحل طراحی فیلتر

## ۲-۳ ایجاد تنظیمات اندازه‌گیری EMI هدایتی

در شکل (۲-۳) نمایی از نمونه آزمایشگاهی تنظیمات اندازه‌گیری EMI را مشاهده می‌کنیم که برای اندازه‌گیری، طبق روش بیان شده در استاندارد ساخته شده است. در این نمونه صفحه فلزی که به زمین متصل است، کف و دیوار را پوشانیده است و یک میز چوبی برای قرار دادن تجهیز تحت آزمون و بار نیز تعبیه شده است. طبق استاندارد ارتفاع میز چوبی ۸۰ سانتی متر و فاصله تجهیز تحت آزمون که در اینجا اینورتر می‌باشد، از دیوار فلزی ۴۰ سانتی متر می‌باشد. همچنین فاصله LISN از اینورتر نیز بایستی حداقل ۸۰ سانتی متر باشد. دستگاه اندازه‌گیر که می‌تواند اسیلوسکوپ یا تحلیلگر طیف<sup>۱</sup> یا EMI Receiver باشد، بایستی خارج از صفحه فلزی قرار گیرد.

## ۳-۳ طراحی و ساخت فیلتر EMI

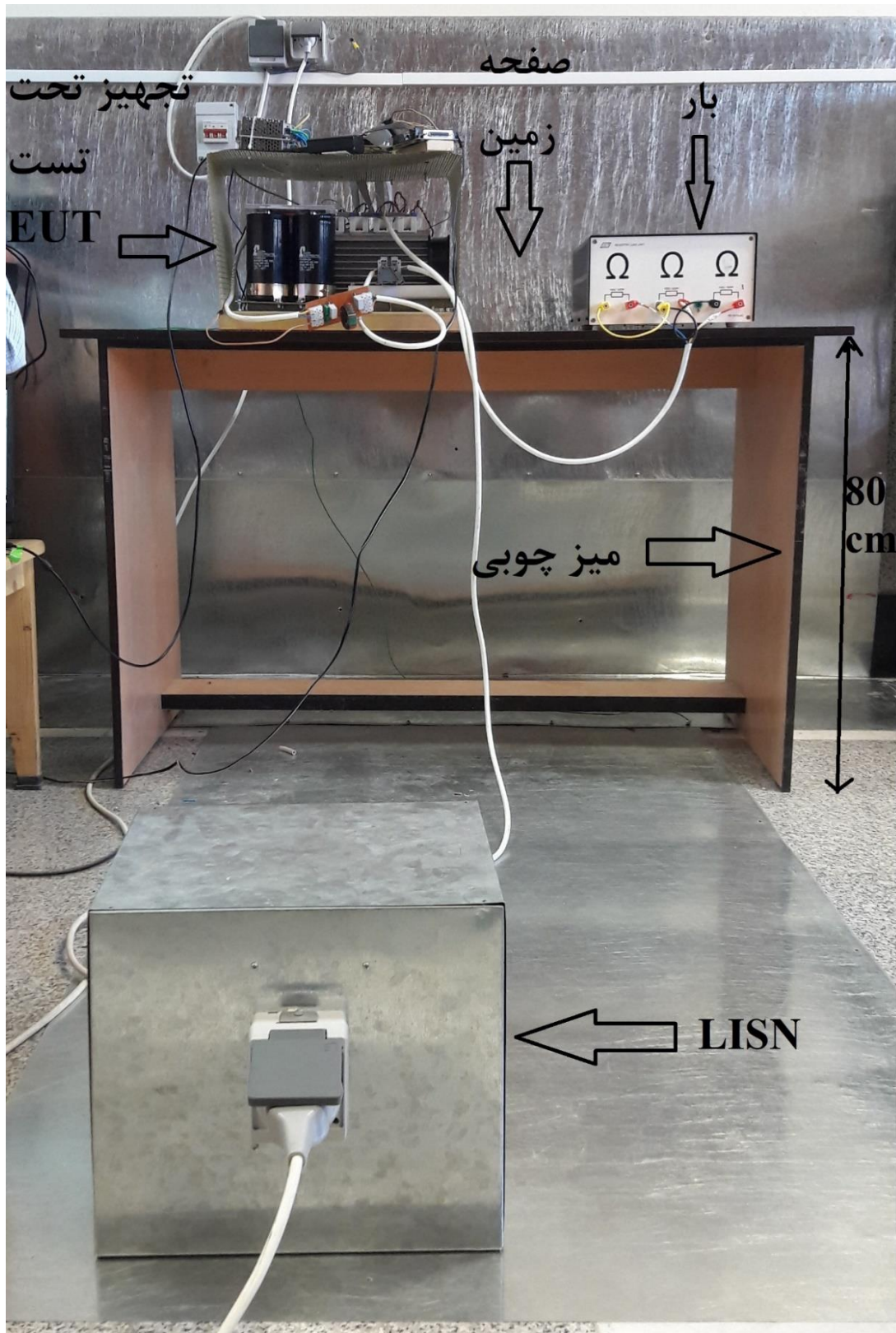
به منظور طراحی و ساخت فیلتر EMI همانند روند بیان شده در شکل (۱-۳) بایستی عمل کرد که به ترتیب زیر انجام می‌پذیرد.

## ۱-۳-۳ اندازه‌گیری EMI هدایتی

نخستین گام از مراحل طراحی فیلتر EMI، تعیین سطح انتشار هدایتی می‌باشد. بدین منظور، همانطور که در بخش ۲-۳ توضیح داده شد، نمونه آزمایشگاهی از تنظیمات اندازه‌گیری فراهم گردید، که اندازه‌گیری‌ها مطابق با استانداردهای تعریف شده باشد.

---

<sup>1</sup> Spectrum Analyzer

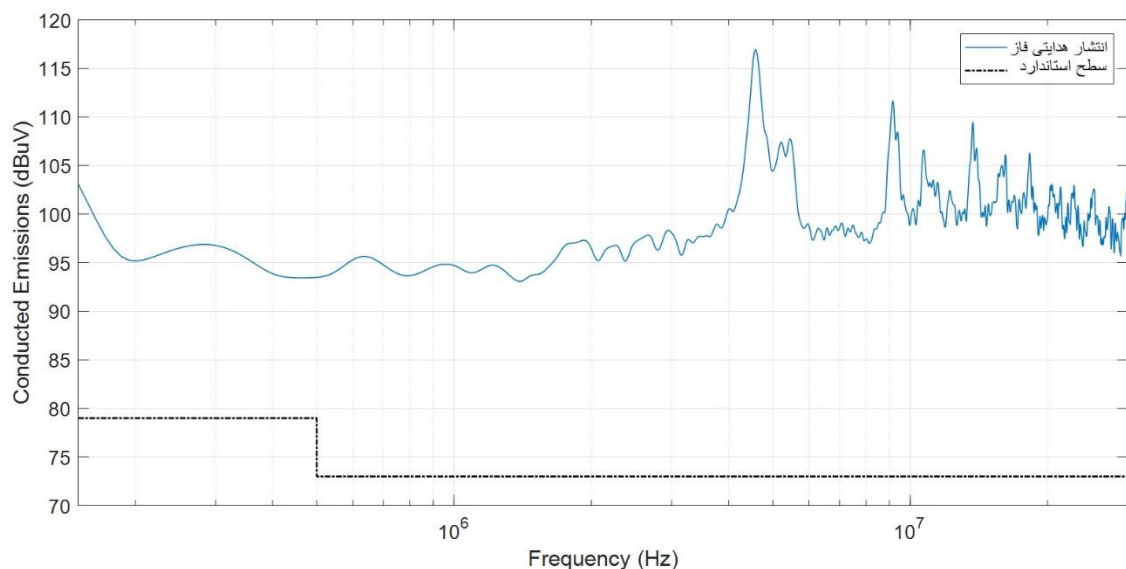


شکل (۲-۳) نمایی از نمونه آزمایشگاهی تنظیمات اندازه‌گیری طبق استاندارد FCC/CISPR

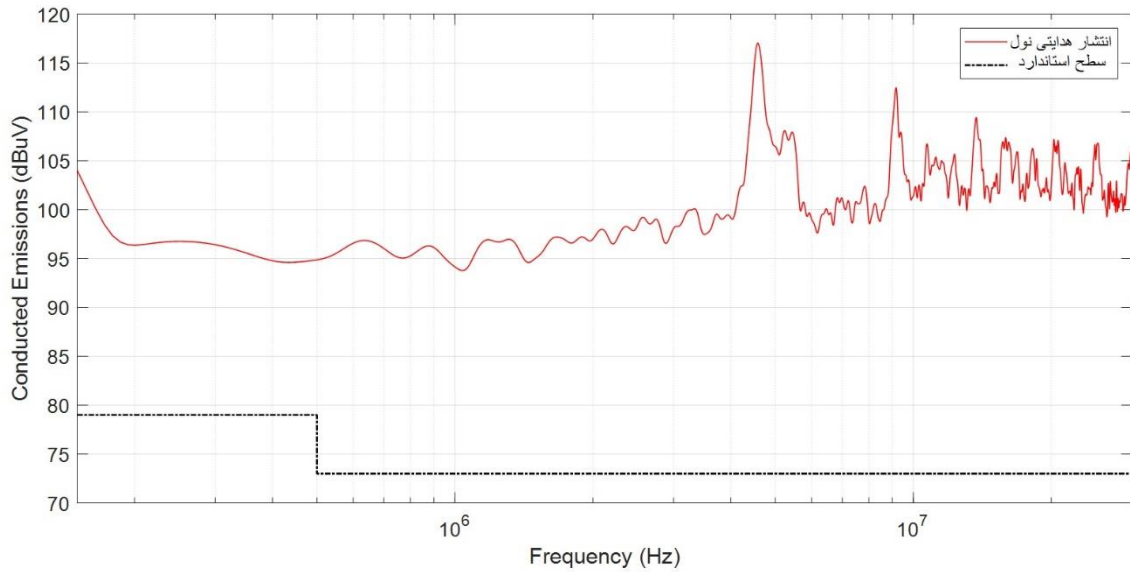
به منظور اندازه‌گیری EMI از روش غیرمستقیم که تحلیل FFT می‌باشد استفاده کرده‌ایم. به همین منظور، جهت تبدیل شکل موج ولتاژ نویز که می‌تواند مربوط به فاز، نول یا مود مشترک باشد، با استفاده از برنامه MATLAB، انتشار هدایتی را محاسبه کردیم. به دلیل محدودیت در وجود ابزار جهت اندازه‌گیری، ناگزیر به اندازه‌گیری غیر مستقیم رو آورده‌ایم و در این روش قادر به استفاده از روش شبه‌قله نخواهیم بود و از روش قله استفاده کرده‌ایم.

همانطور که در بخش‌های قبل بیان گردید، استانداردها برای دو حالت شبه قله و میانگین تعریف شده‌اند و روش حل در این پایان‌نامه به صورت قله می‌باشد. قابل توجه است که روش حل باعث خللی در روند مقایسه نمی‌شود، زیرا که به واسطه اندازه‌گیری EMI از روش قله، مقدار بیشتری EMI نسبت به روش شبه پیک محاسبه می‌شود و این امر تنها حاشیه امنیت کارکرد فیلتر را بالا می‌برد.

در شکل (۳-۳) و شکل (۴-۳) انتشار هدایتی مربوط به فاز به و نول خروجی LISN نشان داده شده است.



شکل (۳-۳) انتشار هدایتی مربوط به خروجی فاز LISN



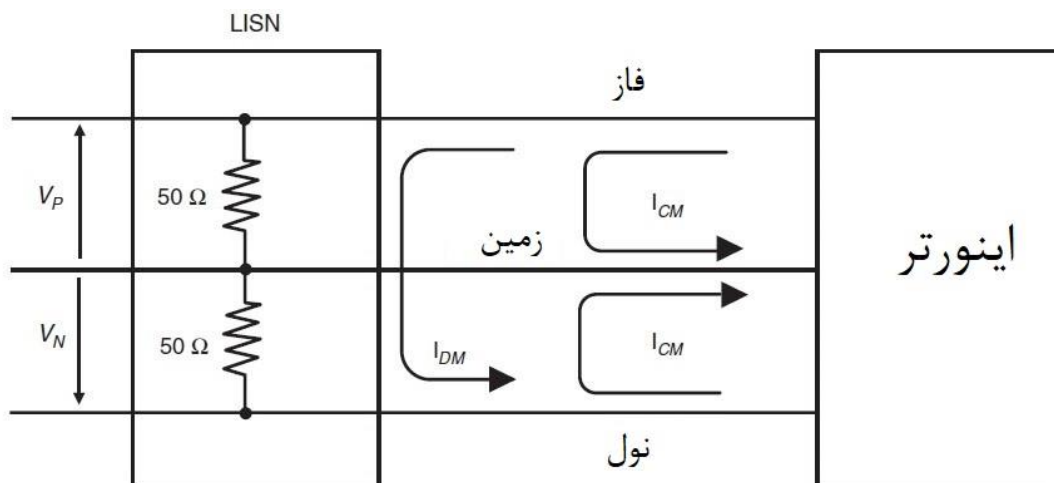
شکل (۳-۴) انتشار هدایتی مربوط به خروجی نول LISN

همانطور که در شکل (۲-۷) توضیح داده شد، ولتاژ اندازه‌گیری شده بر روی خروجی‌های LISN که با  $V_n$  و  $V_p$  مشخص می‌شود شامل ترکیبی از ولتاژ مود مشترک و تفاضلی هستند. پس به منظور طراحی فیلتر بایستی جداسازی انتشار هدایتی مود مشترک از تفاضلی انجام شود.

### ۳-۳-۱-۱ جداسازی انتشار هدایتی مود مشترک از مود تفاضلی

روش اندازه‌گیری انتشار هدایتی که با LISN انجام می‌شود، به نحوی است که کل انتشار هدایتی اندازه‌گیری می‌شود. در حقیقت این انتشار هدایتی شامل هر دو جز مود مشترک و تفاضلی است. به منظور طراحی فیلتر، بایستی مود مشترک از مود تفاضلی تفکیک گردد.

شکل (۳-۵) یک اینورتر را نشان می‌دهد که به LISN متصل است، و جریان نویز مود مشترک و تفاضلی از سمت اینورتر به سمت LISN جاری شده است. ولتاژ نویز روی خروجی فاز LISN برابر است با



شکل (۳-۵) یک منبع تغذیه متصل به LISN با مسیرهای انتشار جریان انتشار هدایتی مود مشترک و تفاضلی

$$V_P = 50(I_{CM} + I_{DM}) \quad (۱-۳)$$

و ولتاژ نویز روی خروجی نول LISN برابر است با

$$V_N = 50(I_{CM} - I_{DM}) \quad (۲-۳)$$

با جمع کردن ولتاژ فاز و نول LISN خواهیم داشت :

$$V_P + V_N = 50(2I_{CM}) = 2V_{CM} \quad (۳-۳)$$

و با تفریق کردن ولتاژ فاز و نول LISN داریم :

$$V_P - V_N = 50(2I_{DM}) = 2V_{DM} \quad (۴-۳)$$

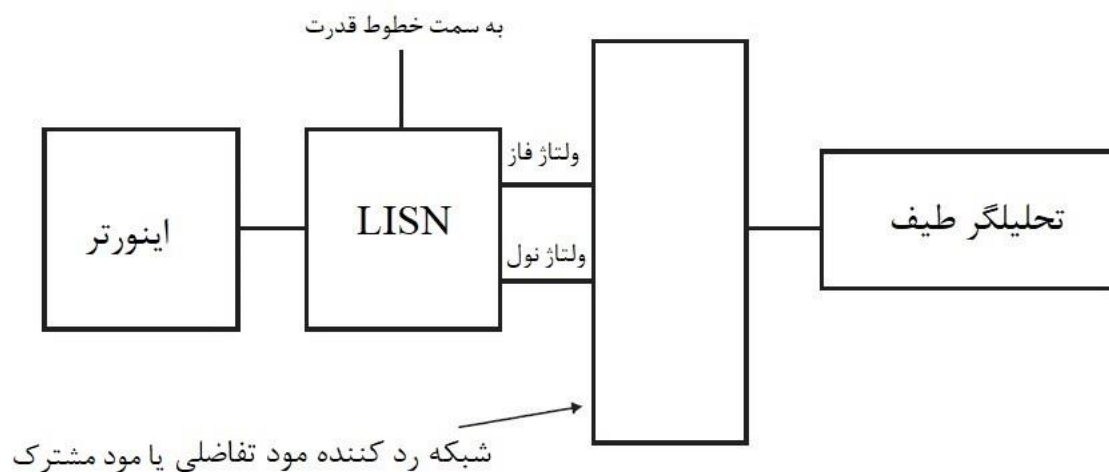
بنابراین با جمع و تفریق کردن دو خروجی ولتاژ LISN می‌توان ولتاژ نویز مود مشترک و تفاضلی را از هم جدا کرد. این عمل جمع و تفریق ولتاژهای فاز و نول را نمی‌توان بعد از عملیات اندازه‌گیری توسط تحلیلگر طیف انجام داد، زیرا اندازه‌گیری توسط این دستگاه فقط دامنه انتشار

هدایتی را ارائه می‌دهد و هیچ اطلاعاتی راجع به فاز در اختیار نمی‌گذارد. بنابراین به یک شبکه‌ای نیازمند هستیم که قبل از اندازه‌گیری عملیات جمع یا تفریق ولتاژهای خروجی LISN را انجام دهد و اطلاعات مربوط به فاز از بین نرود.

شکل (۶-۳) تنظیمات اندازه‌گیری انتشار هدایتی است، که یک شبکه به آن اضافه شده است. اگر شبکه مورد نظر ولتاژ فاز و نول را با هم جمع کند، به این شبکه ردکننده مود تفاضلی گویند، و اگر دو ولتاژ از هم تفریق شود، شبکه ردکننده مود مشترک گویند. چنین شبکه‌ای بایستی دو شرط زیر را داشته باشد:

۱- جمع (یا تفریق) ولتاژ فاز و نول

۲- فراهم آوردن یک مقاومت  $50 \Omega$  انتهایی<sup>۱</sup> برای هر کدام از خروجی‌های LISN



شکل (۶-۳) تنظیمات اندازه‌گیری انتشار هدایتی، با اضافه کردن یک شبکه رد کننده مود مشترک یا مود تفاضلی

<sup>1</sup> Termination

<sup>2</sup> Rejection Network

### ۳-۱-۳-۲ شبکه ردکننده مود تفاضلی

شکل (۳-۷) یک شبکه ساده را نشان می‌دهد، که شامل تنها پنج مقاومت است. این شبکه دو ولتاژ ورودی را با هم جمع می‌کند و در نهایت عمل تقسیم ولتاژ صورت می‌پذیرد که به این شبکه، ردکننده مود تفاضلی گویند. برای دستیابی به یک ردکننده مود تفاضلی، بایستی مقاومت‌های ۰,۱% استفاده کرد و آن‌ها باید با دقت قرار بگیرند که پارازیت به حداقل برسد. برای استفاده از این شبکه، ابتدا بایستی انتشار هدایتی را بدون استفاده از این شبکه اندازه‌گیری کرد، تا ولتاژ نویز کلی بدست آید (جمع مود مشترک و تفاضلی). سپس، آزمایش را می‌توان با حضور شبکه ردکننده مود تفاضلی انجام داد تا ولتاژ نویز مود مشترک بدست آید. اختلاف بین این دو آزمایش ولتاژ نویز مود تفاضلی می‌باشد [۱].

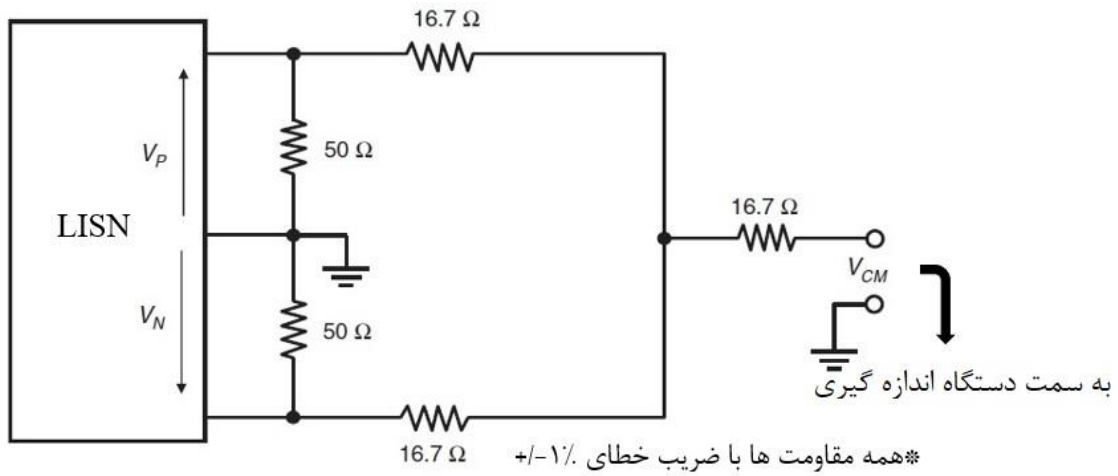
به همین منظور نمونه آزمایشگاهی‌ای از شبکه ردکننده مود تفاضلی ساخته شد که در شکل (۳-۸) نشان داده شده است.

در این نمونه به منظور دقت بیشتر در عمل تقسیم ولتاژ، از مقاومت‌های دقیق با ضریب خطای ۰,۱% استفاده شده است. مقاومت‌های ورودی، که به ولتاژهای خروجی فاز و نول LISN متصل می‌شود نیز، از نوع دقیق و دارای مقدار ۵۰ اهم بایستی باشند.

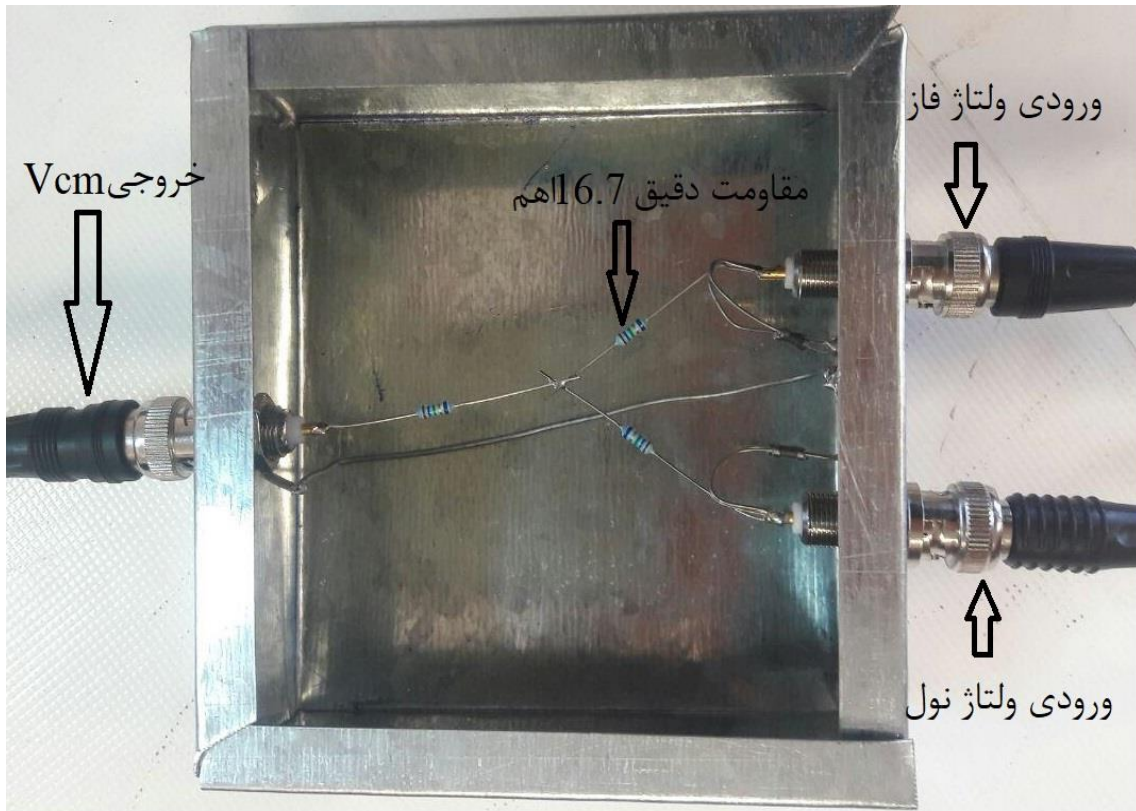
پس از ساخت شبکه ردکننده مود تفاضلی بایستی انتشار هدایتی مود مشترک اینورتر اندازه‌گیری شود که در شکل (۳-۹) با خطوط توپر نشان داده شده است.

به منظور بدست آوردن انتشار هدایتی مود تفاضلی بایستی شبکه‌ای ارائه گردد که عمل تفریق بین ولتاژ فاز و نول مربوط به LISN را انجام دهد. در این راستا می‌توان از تجهیزاتی به عنوان Noise Separator یا جداساز نویز استفاده کرد.

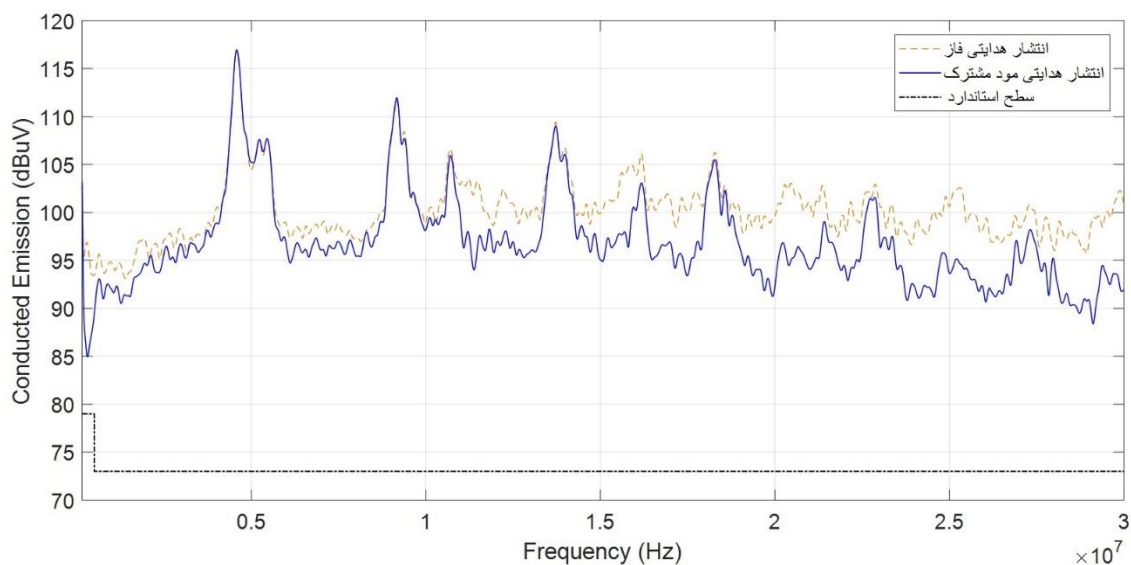




شکل (۷-۳) یک شبکه ردکننده مود تفاضلی



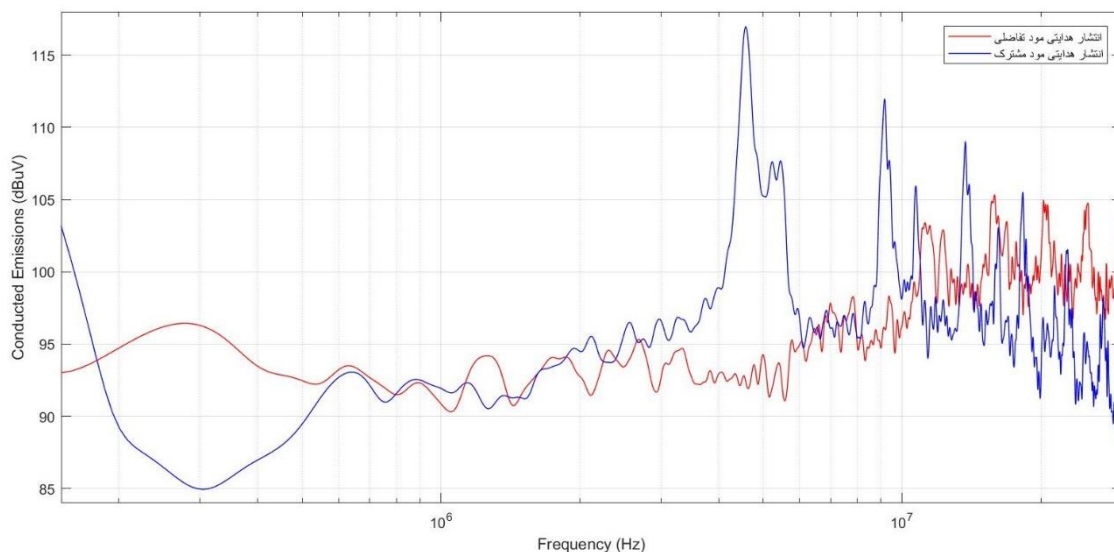
شکل (۸-۳) نمونه آزمایشگاهی شبکه ردکننده مود تفاضلی



شکل (۳-۹) انتشار هدایتی مود مشترک مربوط به اینورتر و مقایسه با انتشار هدایتی حاصل از ولتاژ فاز خروجی LISN به دلیل در دسترس نبودن این شبکه و همچنین در اختیار نداشتن ترانس‌های فرکانس بالا که در حیطه فرکانسی ۱۵۰ KHz تا ۳۰ MHz به صورت کاملاً خطی عمل نمایند و اطلاعات نویز در مسیر این عمل تفریق از بین نرود، از ساخت این شبکه صرف نظر گردیده است و تحلیل عملی نویز مود تفاضلی امکان‌پذیر نخواهد بود. اطلاعات بیشتر راجع به این شبکه در مرجع [۹] بیان شده است.

### ۳-۳-۱-۳ محاسبه غیر مستقیم انتشار هدایتی مود تفاضلی

همانطور که در بخش ۳-۳-۱-۲ بیان شد، به دلیل در اختیار نبودن ترانس فرکانس بالا، از روش مستقیم برای اندازه‌گیری انتشار هدایتی نمیتوانیم استفاده کنیم، اما با توجه به در اختیار داشتن ولتاژ فاز و نول LISN، و استفاده از رابطه (۳-۴) می‌توان انتشار هدایتی مود تفاضلی را بدست آورد که در شکل (۳-۱۰)، در ضمن مقایسه با انتشار هدایتی مود مشترک، نشان داده شده است.

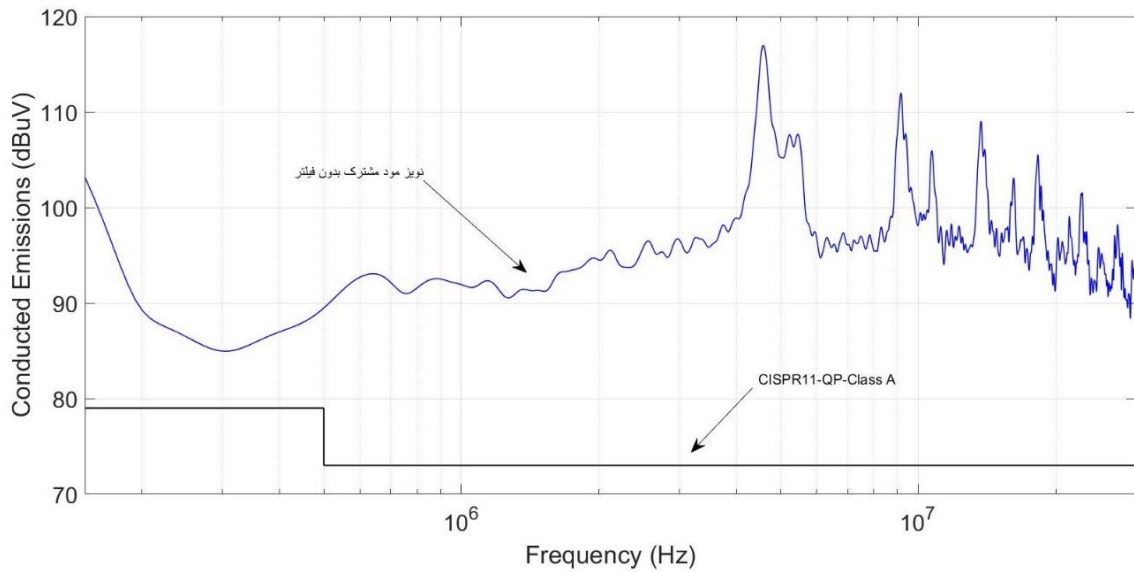


شکل (۳-۱۰) انتشار هدایتی مود تفاضلی (رنگ قرمز) به واسطه روش غیر مستقیم و مقایسه با انتشار هدایتی مود مشترک (رنگ آبی)

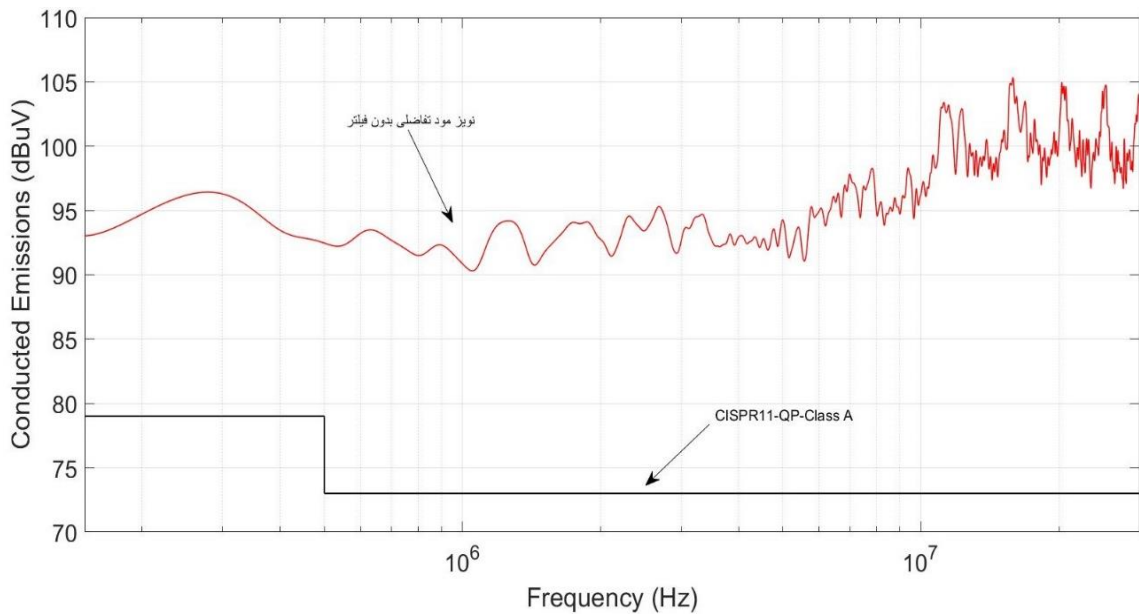
### ۳-۲ مقایسه با مقادیر استاندارد

پس از محاسبه انتشار هدایتی مربوط به خروجی فاز و نول LISN و همچنین انتشار هدایتی مود مشترک و تفاضلی، بایستی این مقادیر با مقادیر استاندارد مقایسه شوند. چنانچه مقدار انتشار هدایتی در هر یک از این حالتها بالاتر از سطح استاندارد تعریف شده (CISPR11 که معادل با EN55011 است) باشد، نیاز به استفاده از یک فیلتر EMI مشهود خواهد بود. به همین منظور مقادیر انتشار هدایتی با استاندارد مقایسه شده است که در شکل (۳-۱۱) این مقایسه برای انتشار هدایتی مود مشترک و در شکل (۳-۱۲) مقایسه برای مود تفاضلی صورت پذیرفته است.

برای اندازه‌گیری EMI بایستی از ابزار اندازه‌گیری استفاده شود که بدین منظور از یک تحلیلگر طیف **GSP-9300 - GW Instek** استفاده شده است. در همین راستا تصویری از انتشار هدایتی مود مشترک اینورتر که توسط تحلیلگر طیف انجام شده است، در شکل (۳-۱۴) به نمایش گذاشته شده است. قابل توجه است که در تصویر موجود به دلیل استفاده از ۳۰dB تضعیف کننده، جهت تحلیل



شکل (۱۱-۳) مقایسه بین سطح انتشار هدایتی مود مشترک اینورتر با سطح استاندارد CISPR11 QP-Class A



شکل (۱۲-۳) مقایسه بین سطح انتشار هدایتی مود تفاضلی اینورتر با سطح استاندارد CISPR11 QP-Class A

طیف مورد نظر بایستی این تضعیف را در نظر گرفت. همچنین تحلیل انجام شده بر روی تصویر به صورت متوسط گیری بوده است. مسئله قابل توجه دیگر محور فرکانس می باشد که به دلیل عدم توانایی تحلیلگر طیف برای تحلیل داده در حالت لگاریتمی ، مجبور به استفاده از نمودار خطی شده ایم.



شکل (۳-۱۳) ۳۰dB تضعیف‌کننده به منظور ایجاد ایمنی برای تجهیز اندازه‌گیر



شکل (۳-۱۴) تصویر انتشار هدایتی مود مشترک اینورتر بر روی SA، در ضمن استفاده از 30dB تضعیف‌کننده و تحلیل میانگین جهت محاسبه انتشار هدایتی

به منظور ایجاد ایمنی برای تحلیلگر طیف، از تضعیف‌کننده<sup>۱</sup> استفاده شده است که در شکل (۳-۱۳) نشان داده شده است. پس بعد از دریافت داده‌ها بایستی این مقدار تضعیف جبران شود. در این مورد از ۳۰dB تضعیف‌کننده استفاده شده است.

در شکل (۳-۱۴) نیز مشهود است که با وجود استفاده از ۳۰dB تضعیف‌کننده، انتشار هدایتی مود مشترک همچنان بالاتر از سطوح استاندارد تعریف شده می‌باشد. در نتیجه استفاده از یک فیلتر EMI جهت کاهش سطح انتشار هدایتی و برقراری استاندارد EMC الزامی می‌باشد.

### ۳-۳-۳ تعیین حداقل میرایی مورد نیاز

پس از محاسبه انتشار هدایتی و حصول اطمینان، برای استفاده از یک فیلتر EMI، بایستی حداقل میرایی مورد نیاز تعیین گردد تا بتوان استانداردهای EMC را گذراند، که در اینجا منظور استاندارد CISPR 11 می‌باشد. بدین منظور در شکل (۳-۱۵) حداقل میرایی برای مود مشترک و در شکل (۳-۱۶) برای مود تفاضلی نشان داده شده است.

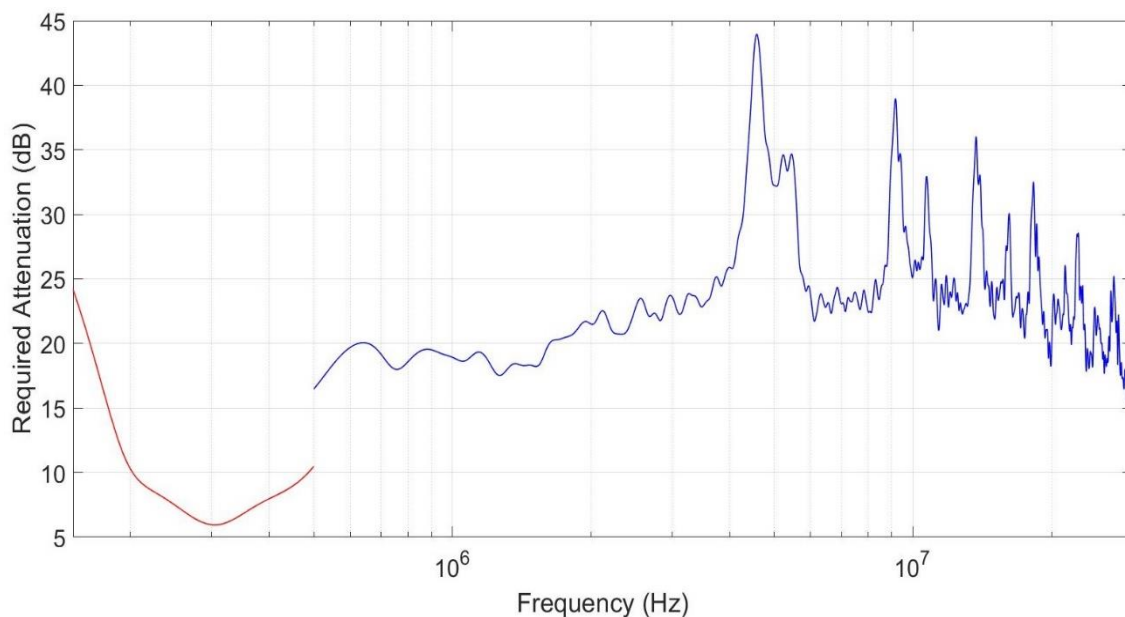
در این شکل‌ها به دلیل تفاوت سطح استاندارد، در بازه فرکانسی ۱۵۰KHz تا ۵۰۰KHz و ۵۰۰KHz تا ۳۰MHz مقدار میرایی مورد نیاز در این دو بازه متفاوت خواهد بود که بنابه همین دلیل مقدار میرایی در دو سطح مختلف ترسیم شده است.

### ۴-۳-۳ تعیین فرکانس گوشه

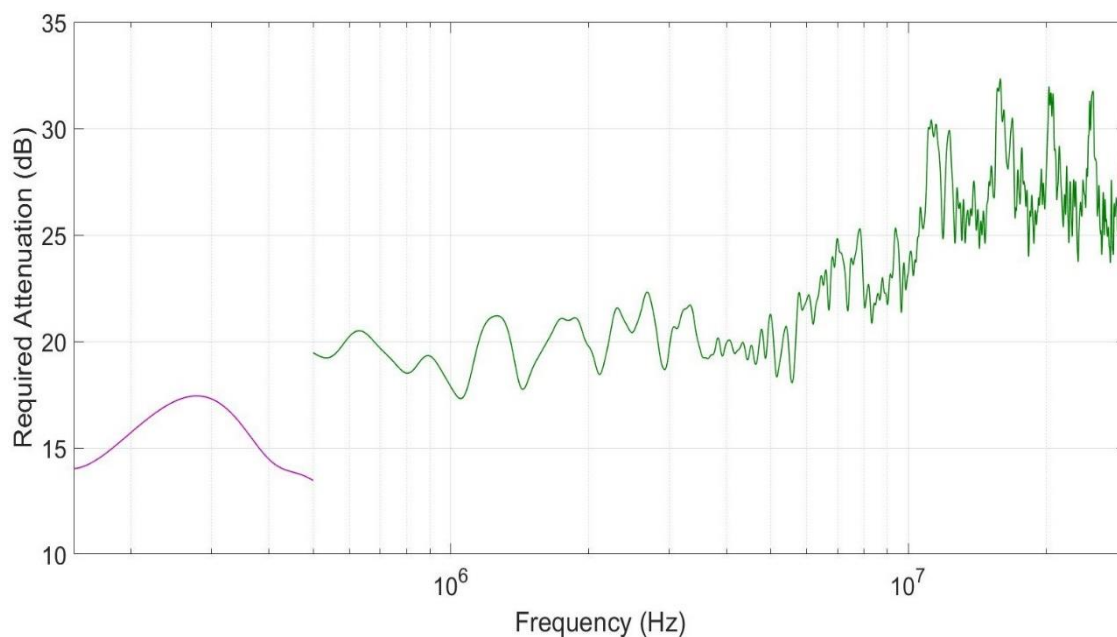
در بخش ۳-۳-۳ حداقل میرایی مورد نیاز برای دو مود مشترک و تفاضلی محاسبه شد که برای

---

<sup>1</sup> Attenuator



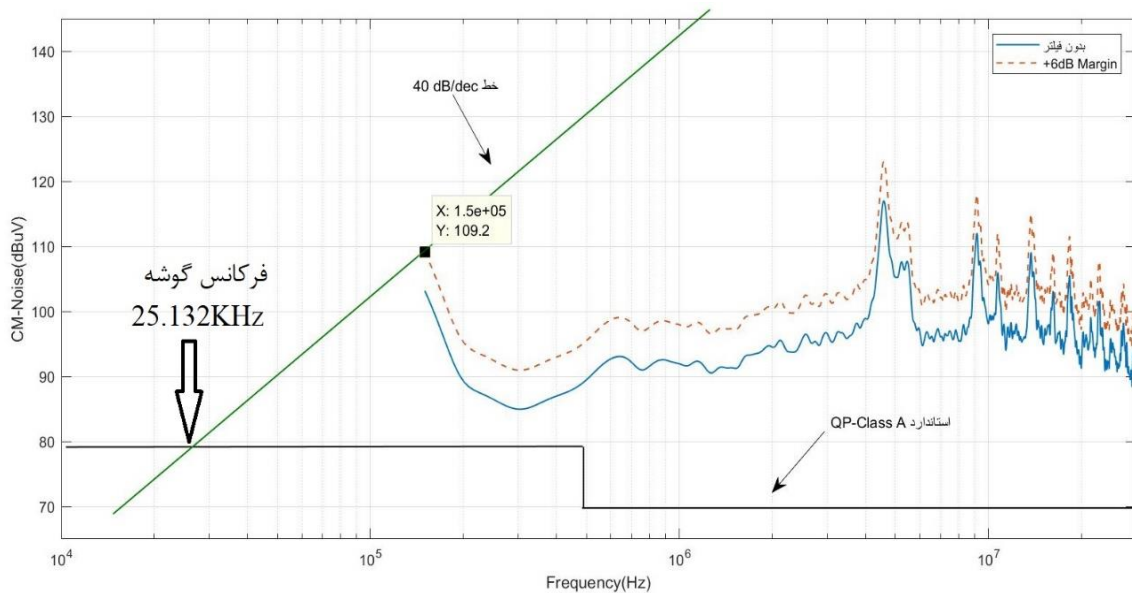
شکل (۳-۱۵) مقدار حداقل میرایی مورد نیاز مود مشترک



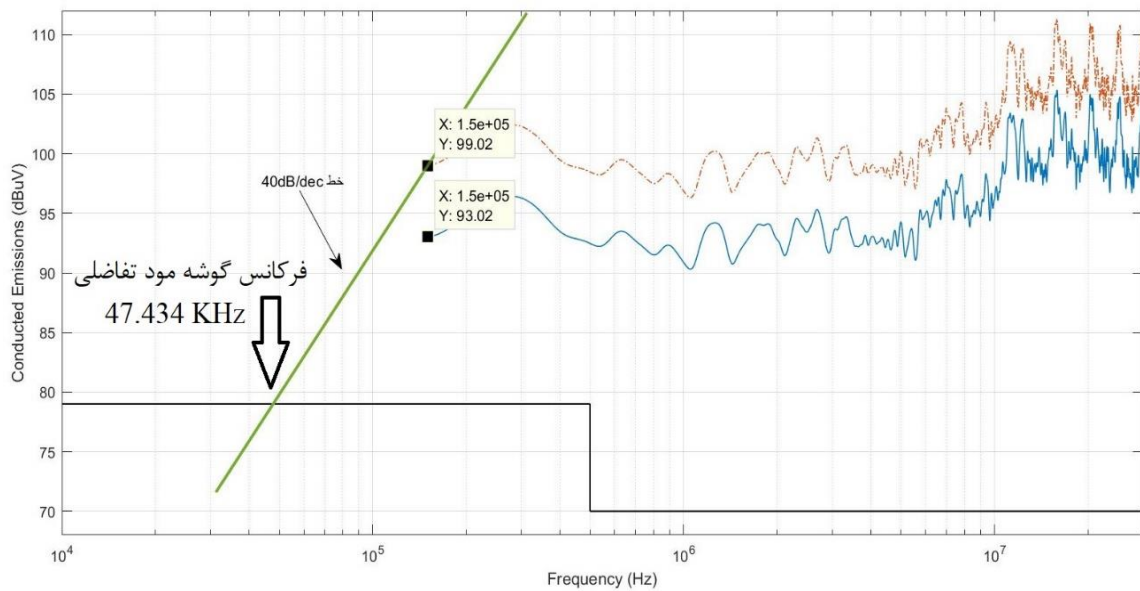
شکل (۳-۱۶) مقدار حداقل میرایی مورد نیاز مود تفاضلی

مود مشترک با توجه به شکل (۳-۱۵) ، در فرکانس ۱۵۰ KHz به ۲۵dB میرایی نیاز می‌باشد و در مود تفاضلی به ۱۴dB میرایی نیاز است. به منظور حصول اطمینان از کارکرد فیلتر و همچنین در نظر گرفتن عوامل مختلفی که ممکن است برخی از سیگنال‌ها را از بین برده باشند، مقدار ۶dB به عنوان ضریب اطمینان در نظر گرفته می‌شود که این مسئله در شکل (۳-۱۷) و شکل (۳-۱۸) به ترتیب برای

مودهای مشترک و تفاضلی نشان داده شده است. با توجه به توضیحات ارائه شده در بخش ۲-۹-۱، فرکانس گوشه با در نظر گرفتن ۶dB ضریب اطمینان، ۲۵/۱۳۲KHz برای مود مشترک و ۴۷/۴۳۴KHz برای مود تفاضلی بدست می‌آید.



شکل (۳-۱۷) تعیین فرکانس گوشه برای انتشار هدایتی مود مشترک



شکل (۳-۱۸) تعیین فرکانس گوشه برای انتشار هدایتی مود تفاضلی

خط توپر بیان کننده سطح انتشار هدایتی اینورتر، و خط فاصله‌ها بیانگر انتشار هدایتی با در نظر



گرفتن ۶dB ضریب اطمینان در هر یک از مدهای مشترک و تفاضلی می‌باشد. در این شکل‌ها خط ۴۰dB/dec نیز ترسیم شده است و محل طاقی این خط با سطح استاندارد، معرف فرکانس گوشه خواهد بود.

### ۵-۳-۳ تعیین مقدار المان‌های فیلتر مود مشترک و تفاضلی

اولین پارامتری که معمولاً تعیین می‌شود، خازن مود مشترک است. با توجه به توضیحات ارائه شده در بخش ۲-۹-۳ و محدود کردن جریان نشتی به ۰/۵mA، می‌توان مقدار خازن Y را برای دو نوع از خازن‌های سرامیکی و خازن غشا پلی‌پروپیلن فلزی<sup>۱</sup> محاسبه کرد که به صورت زیر خواهد بود. با در نظر گرفتن ولتاژ ۲۲۰V برای شبکه AC و با توجه به رابطه (۲-۸) مقدار  $C_{rated} = 5.6nF$  بدست می‌آید. از آنجا که خازن‌ها دارای مقادیر استاندارد می‌باشند و هر مقداری را نمی‌توان در اختیار داشت، نزدیک مقدار به ظرفیت خازن محاسبه شده،  $4/7nF$  برای خازن غشا پلی‌پروپیلن فلزی بدست می‌آید. و جهت داشتن خازنی از نوع سرامیکی با توجه به رابطه (۲-۱۲)،  $C_{rated} = 4.1nF$  بدست می‌آید و مشابه حالت قبل نزدیک‌ترین مقدار  $3/9nF$  می‌باشد. خازن  $4/7nF$  از نوع Y1 و خازن  $3/9nF$  از نوع Y2 است.

پس از تعیین خازن، می‌توان مقدار سلف مورد نیاز برای مود مشترک را تعیین کرد. با توجه به رابطه (۲-۱۵)، استفاده از خازن بزرگتر سبب کاهش مقدار سلف چوک مود مشترک می‌شود. در حقیقت داشتن سلف بزرگتر سبب ایجاد میرایی بهتری می‌شود. به همین منظور با در نظر گرفتن  $C_Y = 4.7nF$  و با توجه به رابطه (۲-۱۵)، مقدار  $L_{CM} = 4.3mH$  بدست می‌آید.

از آنجا که از اندوکتانس نشتی چوک مود مشترک، به عنوان سلف مود تفاضلی استفاده می‌شود

<sup>1</sup> Metallized Polypropylene Film Capacitor

بایستی ابتدا چوک مود مشترک ساخته شود و در نهایت با اندازه‌گیری اندوکتانس نشتی چوک مود مشترک می‌توان خازن مود تفاضلی را تعیین کرد.

به همین منظور با توجه به بخش ۲-۳-۴ مقدار اندوکتانس نشتی برای چوک مورد نظر برابر با  $47/4 \mu F$  خواهد بود. بعد از تعیین مقدار اندوکتانس مود تفاضلی بایستی مقدار خازن در این وضعیت تعیین شود. به همین منظور با استفاده از رابطه (۲-۱۷) مقدار خازن  $X$  برابر با  $0/24 \mu F$  بدست می‌آید که نزدیک‌ترین خازن به مقدار محاسبه شده خازن  $0/33 \mu F$  می‌باشد.

## **فصل ۴: نتایج شبیه سازی و آزمایشگاهی**

## ۱-۴ مدل‌سازی و تعیین پارامترهای خازن Y

با توجه به آنکه مقدار دقیق خازن با مقدار نامی بیان شده بر روی خازن متفاوت است، لذا داشتن مشخصه امپدانس-فرکانس برای استخراج مقدار دقیق خازن الزامی می‌باشد. به همین منظور با استفاده از یک تحلیگر شبکه<sup>۱</sup>، نمودار واقعی خازن  $4/7nF$  مورد نظر، بدست آمده است که این مشخصه در شکل (۱-۴) به نمایش گذاشته شده است. هر المانی دارای مقادیر پارازیتی می‌باشد که نقطه برگشت منحنی در این شکل بیانگر همین المان‌های پارازیتی می‌باشد. به منظور استخراج مقدار حقیقی خازن بایستی، مقدار امپدانس خازن را در نقطه‌هایی با فرکانس پایین، که مقدار سلف پارازیتی خازن کمتر است محاسبه کنیم. به همین منظور در نقطه  $30\text{KHz}$  مقدار امپدانس که برابر با  $1246$  اهم است را در نظر می‌گیریم و با توجه به رابطه امپدانس خازن مقدار واقعی خازن بدست می‌آید که در رابطه (۱-۴) بیان شده است.

$$Z_c = \frac{-j}{\omega C} \Rightarrow |C| = \frac{1}{2\pi \times 30\text{KHz} \times 1246} = 4.3nF \quad (1-4)$$

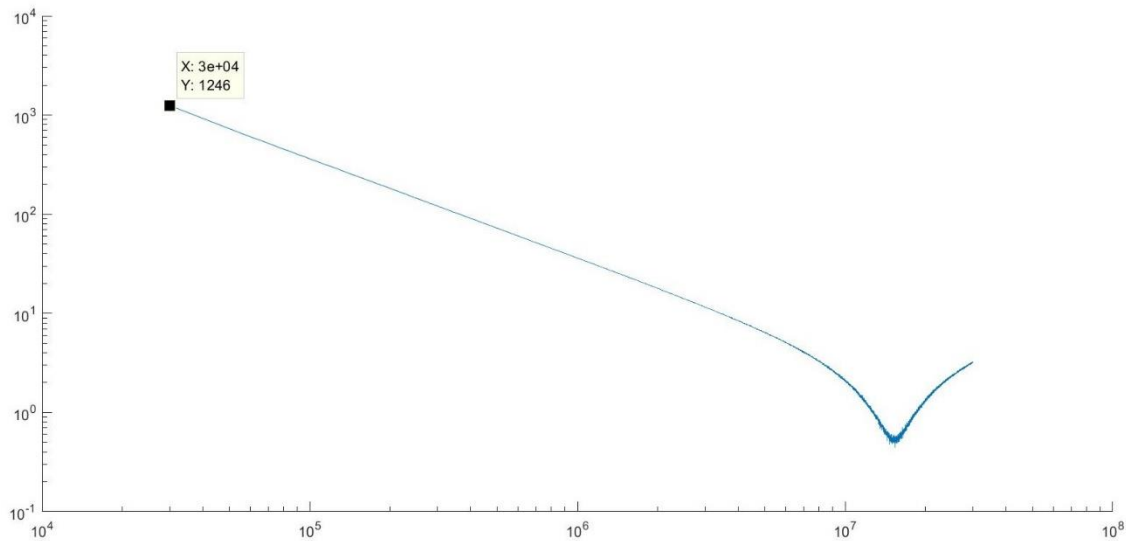
به منظور دسترسی به  $ESL^2$  و  $ESR^2$  خازن بایستی، خازن را در نقطه تشدید مورد بررسی قرار داد. به همین منظور از مدار معادل خازن برای شبیه سازی استفاده می‌کنیم که در شکل (۲-۴) این مدار معادل به نمایش گذاشته است. به منظور دستیابی به مقدار سلف سری خازن، لازم است خازن را در نقطه تشدید تحلیل نماییم. در نقطه تشدید که  $f_{resonance} = 15.3\text{MHz}$  است، مقدار سلف و خازن برابر خواهند بود و از رابطه (۲-۴) این سلف سری بدست می‌آید. همچنین مقدار امپدانس در

---

<sup>1</sup> Network Analyzer

<sup>2</sup> Equivalent Series Inductance

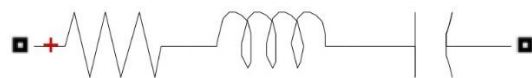
<sup>3</sup> Equivalent Series Resistance



شکل (۱-۴) مشخصه امپدانس-فرکانس خازن ۴/۷nF Rifa

$$ESR=0.53 \text{ Ohm}$$

$$C=4.3nF$$



$$ESL=0.25nH$$

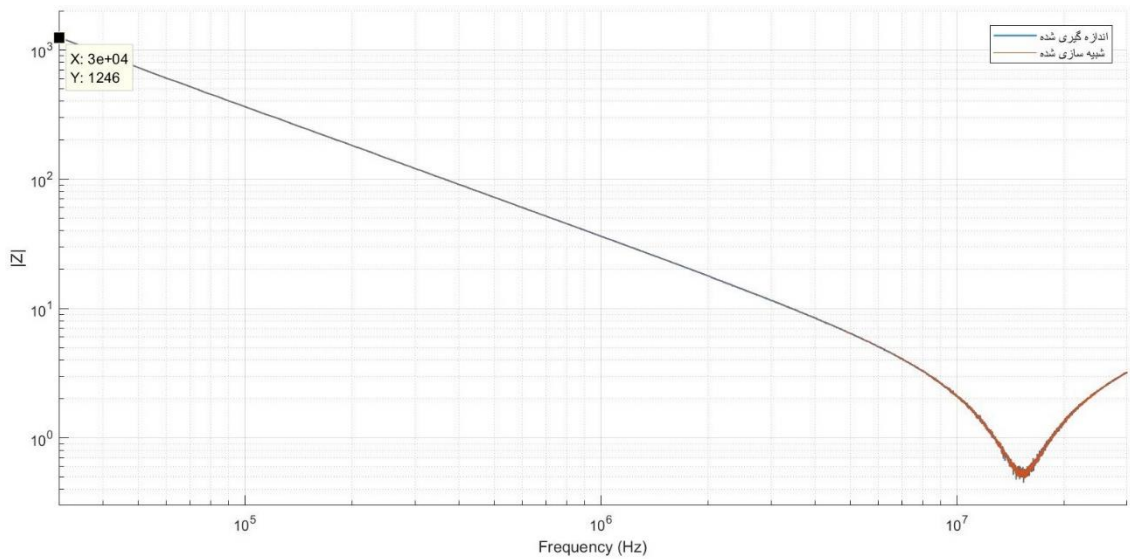
شکل (۲-۴) مدار معادل خازن و استخراج داده‌ها از طریق شبیه‌سازی

نقطه تشدید به دلیل برابر بودن مقدار سلف و خازن، به صورت مقاومتی خالص خواهد بود که در واقع بیانگر تلفات مربوط به خازن می‌باشد. در این نقطه مقدار امپدانس برابر با  $0.53 \Omega$  می‌باشد که در حقیقت بیانگر ESR خازن می‌باشد. در شکل (۳-۴) مقایسه بین مدل شبیه‌سازی شده و مقادیر اندازه‌گیری شده توسط تحلیلگر شبکه نشان داده شده است.

$$|Z_C|_{f_{resonance}} = |Z_L|_{f_{resonance}} \Rightarrow ESL = \frac{1}{4 \cdot \pi^2 \cdot f_{resonance}^2 \cdot C} \quad (۲-۴)$$

$$\Rightarrow ESL = \frac{1}{4 \times \pi^2 \times 4.3nF \times (15.3MHz)^2} = 0.25nH$$

با توجه به آنکه در محاسبه مقدار چوک مود مشترک، مقدار خازن را ۴/۷nF در نظر گرفته



شکل (۳-۴) شبیه سازی و اندازه گیری خازن  $4/7nF$  Rifa مربوط به فیلتر مود مشترک

بودیم و بعد از استخراج داده های واقعی خازن، به مقدار  $4/3nF$  رسیدیم الزام محاسبه مجدد چوک مود مشترک وجود دارد. به همین منظور با استفاده از رابطه (۲-۱۵) مقدار سلف مود مشترک،  $4/67mH$  بدست می آید.

## ۲-۴ طراحی چوک مود مشترک

پس از تعیین مقدار سلف مورد نیاز برای کاهش دادن سطح انتشار هدایتی مود مشترک و رساندن آن به زیر سطوح استاندارد تعیین شده، بایستی چوک مورد نظر طراحی شود. در روند طراحی، اولین پارامتری که بایستی تعیین شود سایز سیم می باشد. طراحی چوک مورد نظر بر اساس مرجع [۳۵] می باشد. اگر جریان عبوری از سیم را به  $4A$  محدود کنیم (جریان گذرنده از خطوط  $3A$  می باشد)، سطح مقطع سیم مورد استفاده را می توانیم از معادله (۳-۴) تعیین کنیم

$$A(mm^2) = \frac{I(A)}{J(A/mm^2)} \quad (3-4)$$

که A سطح مقطع سیم و J چگالی جریان می باشد. چگالی جریان یک پارامتر طراحی می باشد که در واقع توانایی سیم برای عبور جریان در واحد سطح را نشان می دهد و به عبارت دیگر بیان کننده سیستم خنک سازی سیم پیچ می باشد، زیرا هر چه سیستم خنک سازی قوی تر باشد، سیم توانایی بیشتری برای عبور جریان دارد. این عدد با توجه به سیستم خنک سازی عددی بین ۲ تا ۱۰ می تواند در نظر گرفته شود. از آنجا که در فیلتر مورد نظر سیستم خنک سازی وجود ندارد، چگالی جریان را ۵/۵ فرض می کنیم، که در نتیجه سطح مقطع سیم  $0.73 \text{ mm}^2$  بدست می آید که بایستی این سطح مقطع با مقادیر سیم های استاندارد مقایسه شود و نزدیک ترین مقدار را انتخاب کرد. به عنوان مثال جدول (۴-۱) مقادیر استاندارد سیم AWG<sup>۱</sup> را نشان می دهد.

از آنجا که در انتخاب سیم با محدودیت روبه رو هستیم بایستی سطح مقطع سیم با مقادیر استاندارد تطبیق داده شود. همچنین باید توجه داشت که سطح مقطع سیم را نمی توان کمتر از مقدار محاسبه شده در نظر گرفت. از این رو سطح مقطع سیم برابر با  $0.823 \text{ mm}^2$  در نظر گرفته می شود و قطر سیم  $1.024 \text{ mm}$  بدست می آید.

مرحله یک بخش تکرار شدنی است و امکان این اتفاق وجود دارد که برای تعیین هسته مناسب نیاز باشد چند بار محاسبات لازم را انجام دهیم، زیرا ممکن است فضای کافی جهت سیم پیچی تمام دورها وجود نداشته باشد. برای این منظور ابتدا یک هسته انتخاب می شود تا صحت فضای کافی سیم پیچی بررسی شود. معادله اصلی برای تعیین تمام پارامترها در رابطه (۴-۴) داده شده است. مرحله بعدی، انتخاب سایز و مواد هسته می باشد که به تعداد دور مورد نیاز بستگی دارد.

---

<sup>1</sup> American wire gauge

جدول (۱-۴) مقادیر استاندارد سیم AWG

معیار AWG	قطر هادی (mm)	سطح مقطع هادی (mm <sup>2</sup> )
۱۴	۱,۶۲۸	۲,۰۸
۱۵	۱,۴۵۰	۱,۶۵
۱۶	۱,۲۹۱	۱,۳۱
۱۷	۱,۵۰	۱,۰۴
۱۸	۱,۰۲۴	۰,۸۲۳
۱۹	۰,۹۱۲	۰,۶۵۳
۲۰	۰,۸۱۲	۰,۵۱۸
۲۱	۰,۷۲۳	۰,۴۱۰
۲۲	۰,۶۴۴	۰,۳۲۶

در رابطه (۴-۴)،  $I.C.$  نشان دهنده محیط داخلی<sup>۱</sup> هسته،  $N_{max}$  بیشترین تعداد دور ممکن که می‌توان بر روی هسته پیچید و  $N_{required}$  مقدار دور مورد نیاز است که بایستی از حداکثر دور ممکن کمتر باشد. در این معادله  $A_L$  ضریبی از هسته می‌باشد که بیانگر توانایی هسته جهت تولید سلف می‌باشد.

<sup>1</sup> Inner Circumference



$$I.C = \pi (D_{innercore} - D_{wire}) \quad (4-4)$$

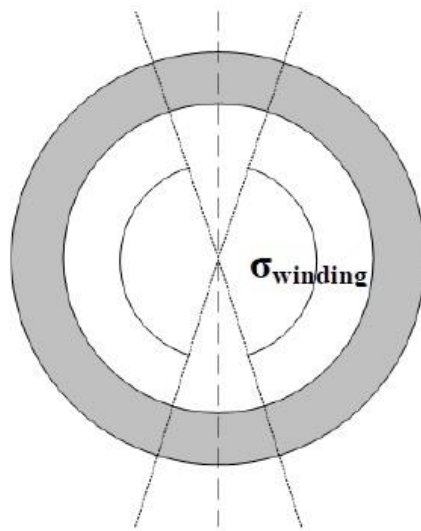
$$N_{max} = \frac{\sigma_{wire}}{360^\circ} \frac{I.C}{D_{wire}}$$

$$N_{required} = 1000 \sqrt{\frac{L_{CM}}{A_L}}$$

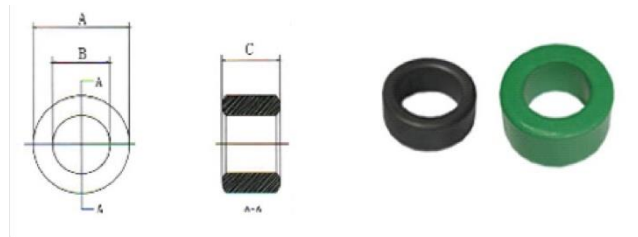
$$N_{required} \leq N_{max}$$

این ضریب به صورت  $\mu H/N^2$  تعریف می‌شود که N بیانگر تعداد دور سیم‌پیچی می‌باشد. همانطور که در شکل (۴-۴) مشاهده می‌شود،  $\sigma_{winding}$  نشان دهنده حداکثر زاویه‌ای است که نیمی از هسته را پوشش می‌دهد که به صورت رایج آن را ۱۶۰ درجه در نظر می‌گیرند. همچنین  $L_{CM}$  مقدار سلف مورد نیاز بر حسب mH می‌باشد.

به منظور طراحی، از یک هسته Ferrite Mn-Zn با ابعاد ۳۸-۲۲-۱۵ استفاده شده است که در شکل (۴-۵)، هسته انتخابی به نمایش گذاشته شده.



شکل (۴-۴) حداکثر زاویه قابل سیم‌پیچی [۳۵]



Mn-Zn  
↓

型号 Type	A	B	C	Wt(g/prs)	PC40	TY-5K	TY-7K	TY-10K
T36*23*13	36.0±0.6	23.0±0.6	13.0±0.3	38	2700	6400	8700	11600
T36*23*15	36.0±0.6	23.0±0.6	15.0±0.3	43.8	3100	7400	10100	13400
T37*22*15	37.0±0.7	22.0±0.7	15.0±0.3	50.6	3600	8600	11700	15600
T38*19*13	38.0±0.7	19.0±0.7	13.0±0.3	56.6	4100	9900	13500	18000
T38*22*15	38.0±0.7	22.0±0.7	15.0±0.3	54.9	3800	9000	12300	16400
T38*19*22	38.0±0.8	19.0±0.5	22±0.6	89	7600	15200	21800	30400
T38*19*25.4	38.0±0.8	19.0±0.5	25.4±0.6	104	8700	17540	24560	35100
T38*25*15	38.1±0.7	25.4±0.7	15.0±0.3	46.8	2900	6900	9400	12600
T40*24*16	40.0±1.0	24.0±0.7	16.0±0.5	61	4080	8160	11200	16300
T40*5.4*1	40±0.76	5.4±0.25	1.0±0.1	6	920	2200	3000	4000

شکل (۴-۵) ابعاد هسته Ferrite Mn-Zn انتخاب شده و  $A_L$  مربوط به هسته



شکل (۴-۶) هسته Ferrite Mn-Zn با ۱۷ دور سیم پیچی با قطر هادی ۱/۰۲۴mm، با اندوکتانس مود مشترک ۴/۷mH با توجه به مقدار چوک مود مشترک که ۴/۶۷mH محاسبه شد و با استفاده از رابطه (۴-۴) تعداد دور سیم پیچی ۱۶/۸ دور بدست می آید که با رند شدن عدد، تعداد دور سیم پیچی ۱۷ دور

می‌شود و مقدار چوک با ۱۷ دور برابر با  $4/7\text{mH}$  بدست می‌آید. هسته انتخابی و نوع سیم‌پیچی در شکل (۴-۶) به نمایش گذاشته شده است

همانطور که قبلاً بیان گردید، از اندوکتانس نشتی به منزله سلف مود تفاضلی استفاده می‌شود. به همین منظور استخراج پارامترهای چوک طراحی شده توسط اندازه‌گیری، الزامی می‌باشد.

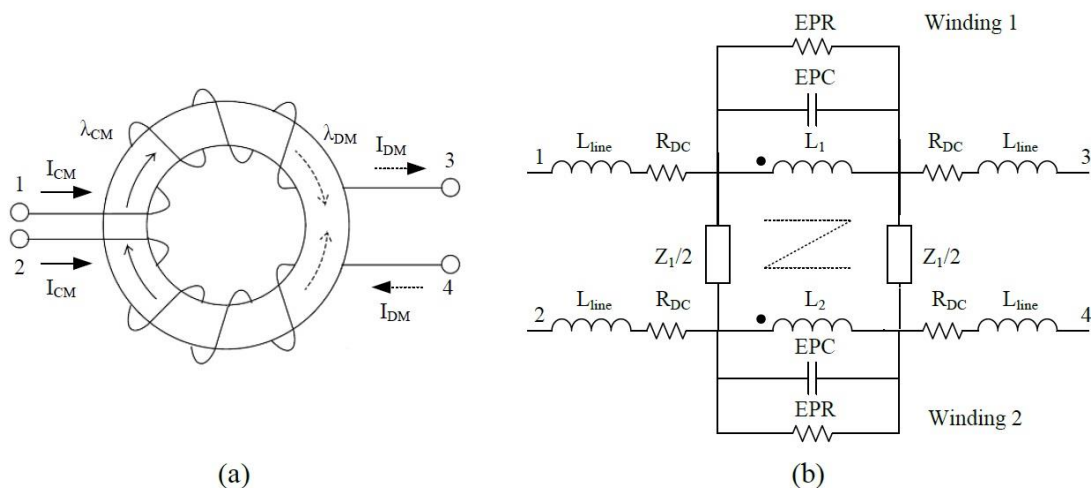
### ۳-۴ مدل سازی چوک مود مشترک

از یک چوک مود مشترک به صورت گسترده برای سرکوب کردن جریان انتشار هدایتی مود مشترکی استفاده می‌شود که توسط مدار قدرت، به زمین متصل است. شکل (۴-۷) (a) ساختار کلی از یک چوک مود مشترک می‌باشد که در آن شار پیوندی،  $\lambda_{CM}$  (خط توپر) برای جریان نویز مود مشترک، به دلیل هم جهت بودن شار تولیدی در دو سیم قدرت، دو برابر شده است و  $\lambda_{DM}$  (خط فاصله‌ها) برای نویز مود تفاضلی به دلیل آنکه در دو جهت مخالف هستند، همدیگر را خنثی می‌کنند. شکل (۴-۷) (b) مدل مداری فرکانس بالا از یک چوک مود مشترک را نشان می‌دهد. مدل بیان شده بر اساس مرجع [۲۳] می‌باشد.

که  $L_1$  و  $L_2$  اندوکتانس خودی سیم‌پیچ‌های ۱ و ۲ هستند.  $EPC^1$  خازن موازی معادل یک سیم‌پیچی است. چون سیم‌ها بر روی هسته مغناطیسی پیچیده شده‌اند و یا می‌توانند این سیم‌ها بر روی هم پیچیده شوند، به نظر می‌رسد که خازن سیم‌پیچی در فرکانس‌های بالا غالب شود.  $EPR^2$  مقاومت موازی معادل سیم‌پیچی است که بیانگر تلفات هسته می‌باشد.  $L_{Line}$  نشان دهنده تلفات سرگردان ناشی از اتصال سیم هاست که به صورت کلی مقدار بسیار ناچیزی می‌باشد.  $R_{DC}$  مقاومت

<sup>1</sup> Equivalent Parallel Capacitance

<sup>2</sup> Equivalent Parallel Resistance



شکل (۷-۴) (a) ساختار چوک مود مشترک، (b) مدل مداری فرکانس بالا چوک مود مشترک [۲۳]

DC سیم‌پیچی است، که به طور کلی برای فیلترهای خطوط قدرت در حدود چند میلی اهم می‌باشد.  $Z_1$  نشان دهنده امپدانس اتصال بین دو سیم‌پیچ می‌باشد، که غالب آن به صورت خازنی خواهد بود.

#### ۴-۳-۱ استخراج اندوکتانس مود مشترک $L_{CM}$

ولتاژ القا شده در سیم‌پیچی‌های ۱ و ۲ ناشی از جریان نويز مود مشترک در رابطه (۵-۴) داده شده است. به دلیل آنکه شار پیوندی در این ساختار افزایش می‌یابد، امپدانس مود مشترک  $L_{CM}$ ، برابر با جمع اندوکتانس خودی و متقابل است.

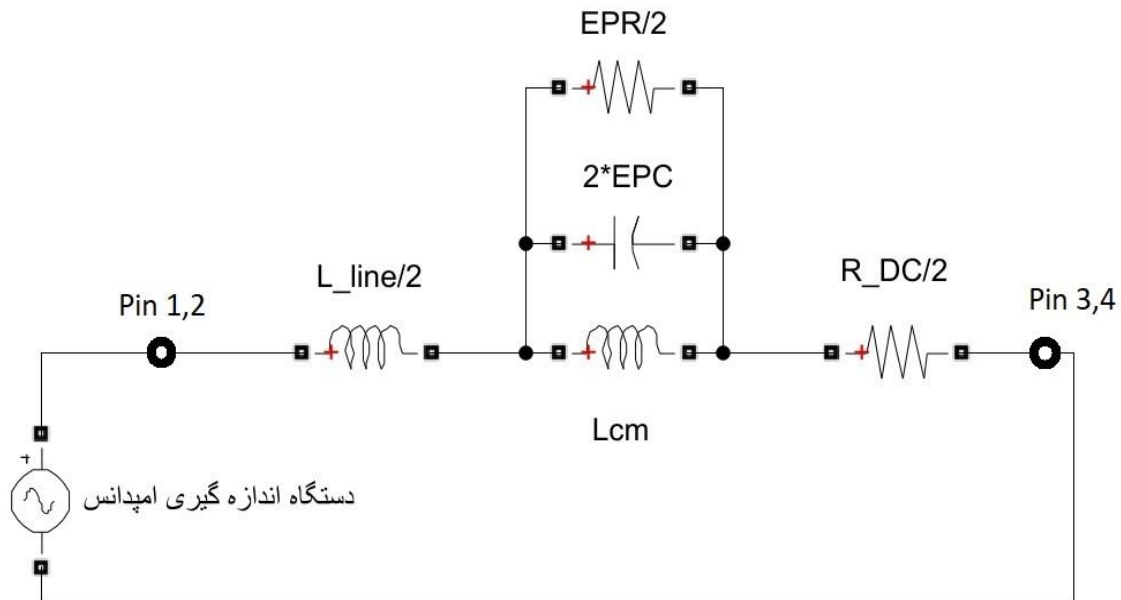
$$V_1 = i_{CM} \cdot R_{DC} + \frac{d\lambda_1}{dt} \approx \frac{di_{CM}}{dt} (M_{12} + L_1) \quad (۵-۴)$$

$$V_2 = i_{CM} \cdot R_{DC} + \frac{d\lambda_2}{dt} \approx \frac{di_{CM}}{dt} (M_{21} + L_2)$$

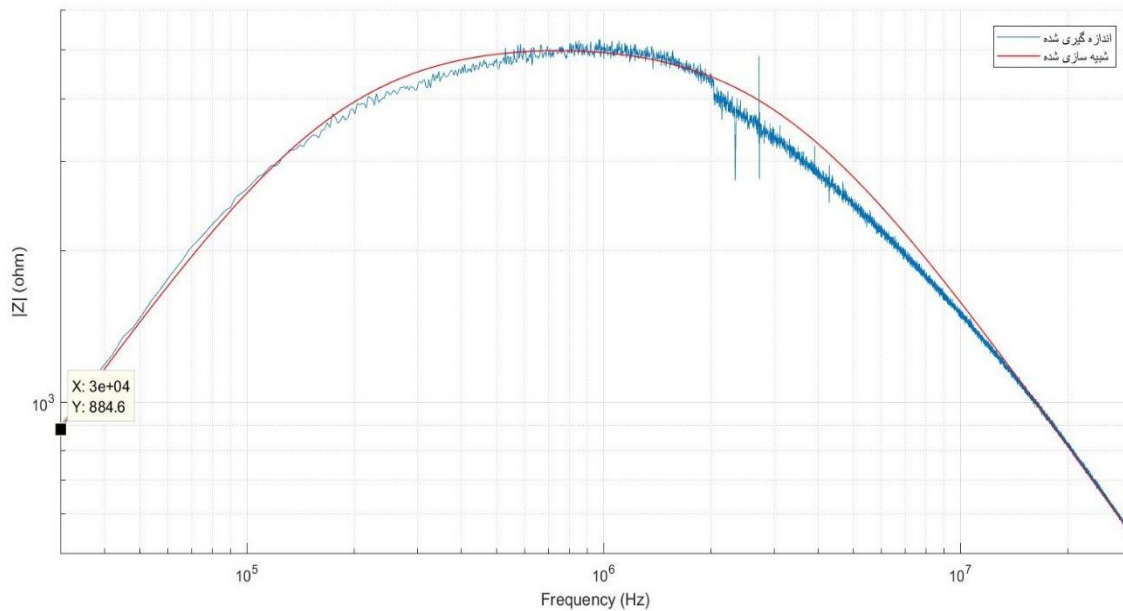
$$L_{CM} = M_{12} + L_1 = M_{21} + L_2$$

$L_{CM}$  با اندازه‌گیری امپدانس دو سر چوک وقتی که پین‌های ۱ و ۲ و پین‌های ۳ و ۴ اتصال کوتاه شده‌اند بدست می‌آید. تاثیرات امپدانس  $Z_1$  در این مورد نادیده گرفته شده است. مدار معادل دو سیم‌پیچ موازی شده در شکل (۸-۴) نشان داده شده است.

به منظور دستیابی به مدل امپدانسی از چوک در حالت مود مشترک، مدل شبیه سازی شده و اندازه گیری واقعی ارائه شده است، که در شکل (۹-۴) نشان داده شده است.



شکل (۸-۴) مدار معادل دیده شده از طرف دستگاه اندازه گیر، جهت محاسبه  $L_{CM}$



شکل (۹-۴) منحنی امپدانس-فرکانس برای مقایسه حالت اندازه گیری شده و شبیه سازی اندوکتانس چوک مود مشترک، جهت ارائه مدل مداری

انتظار می رود در فرکانس های پایین اندوکتانس غالب باشد، بنابراین  $L_{CM}$  توسط رابطه (۶-۴)

محاسبه شود.

$$L_{CM} = \frac{Z_{CM}}{2\pi f_{CM}} \quad (6-4)$$

که  $Z_{CM}$  امپدانس مود مشترک در فرکانس پایین  $f_{CM}$  است. برای چوک تحت آزمون،  $Z_{CM}$  اندازه‌گیری شده در فرکانس ۳۰ KHz برابر با ۸۸۴/۶ اهم است که  $L_{CM}$  برابر با ۴/۷mH خواهد شد. بقیه پارامترها نظیر اندوکتانس سرگردان سیم متناسب با طول سیم تخمین زده می‌شود، که در مقایسه با اندوکتانس مود مشترک، مقدار ناچیزی است. برای این مجموعه نیز این مقدار در مقایسه با اندوکتانس مود مشترک مقدار بسیار کمتری خواهد بود. هر دو نتایج، دقت مدل را تحت تاثیر قرار نخواهد داد، زیرا این مقادیر فقط در فرکانس‌های بالا و پایین موثر خواهد بود. EPC در نقطه تشدید طبق (۸-۴) محاسبه می‌شود.

$$EPC = \frac{1}{4\pi^2 \cdot f_R^2 \cdot L_{CM}} \quad (7-4)$$

که  $Z_R$  امپدانس در فرکانس تشدید  $f_R$  است. با توجه به اندازه‌گیری  $Z_R$  که در فرکانس ۰/۹MHz برابر با ۴/۹۷۷ کیلو اهم است، EPC محاسبه می‌شود و برابر با ۶pF به دست می‌آید. EPR بدین منظور استفاده شده است که بتوان تلفات هسته را مدلسازی کرد. به عبارتی این پارامتر تقریباً برابر با امپدانس در نقطه تشدید است، ولی برای تطبیق دادن منحنی اندازه‌گیری شده با مقدار شبیه سازی شده از روش سعی و خطا استفاده می‌کنیم و در نهایت مقدار EPR برابر با ۴/۹۷۷ کیلو اهم می‌شود.

### ۴-۳-۲ بدست آوردن اندوکتانس نشتی

چوک مود مشترک که قبلا تشریح شد، شبیه یک ترانسفورمر است اگر پین ۲ و ۴ به عنوان اولیه و پین ۱ و ۳ به عنوان سیم پیچ ثانویه در نظر گرفته شود یا به صورت برعکس. از اینرو همانطور که در شکل (۴-۱۰) (a) نشان داده شده است، اگر پین ۳ و ۴ را به هم متصل کنیم، ولتاژ بین پین ۲ و ۴ (سیم پیچ ۲) و پین ۱ و ۳ (سیم پیچ ۲) برابر است با :

$$V_2 = i_{DM} \cdot R_{DC} + \frac{d\lambda_2}{dt} \approx \frac{di_{DM}}{dt} (L_2 - M_{12}) \quad (۸-۴)$$

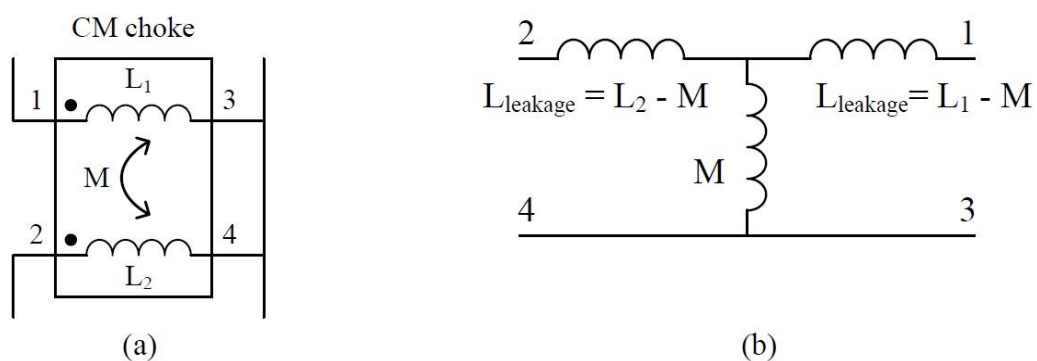
$$V_1 = i_{DM} \cdot R_{DC} + \frac{d\lambda_1}{dt} \approx \frac{di_{DM}}{dt} (L_1 - M_{21})$$

و اندوکتانس نشتی برابر است با تفاضل اندوکتانس خودی و متقابل، که در معادله (۴-۹) بیان

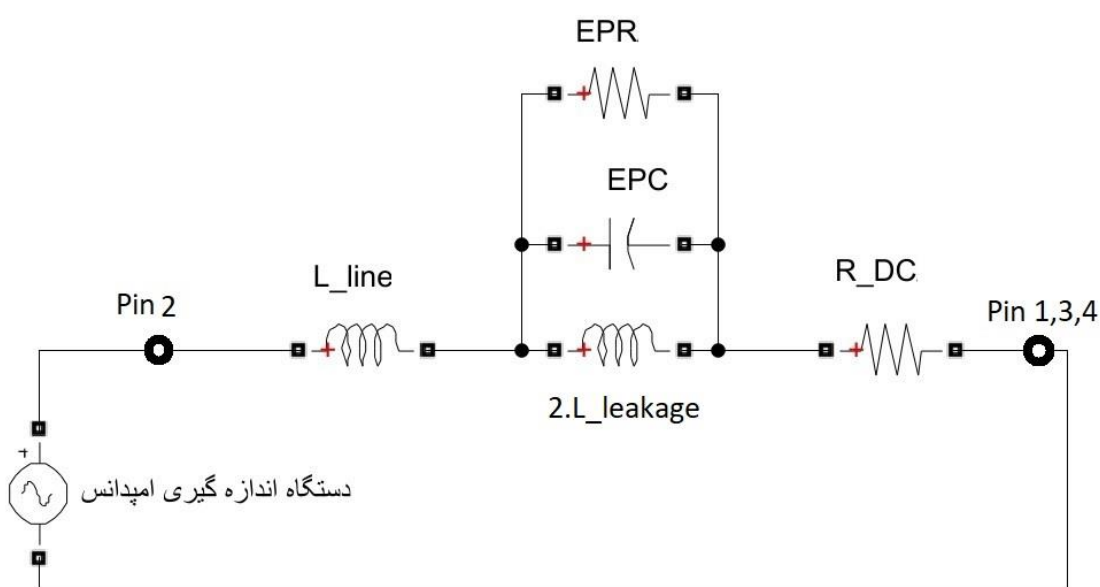
شده است

$$\begin{aligned} L_{Leakage} &= L_2 - M_{12} = L_1 - M_{21} \\ M &= M_{12} = M_{21} \end{aligned} \quad (۹-۴)$$

مدار معادل یک ترانسفورمر در شکل (۴-۱۰) (b) نشان داده شده است. که  $M$  اندوکتانس متقابل بین دو سیم پیچ می باشد. برای بدست آوردن اندوکتانس نشتی، پین های ۱، ۳ و ۴ اتصال کوتاه می شود و امپدانس بین پین ۲ و پین های اتصال کوتاه شده ۳، ۱ و ۴ اندازه گیری می شود. به دلیل آنکه اندوکتانس نشتی بسیار کمتر از  $M$  است، امپدانس اندازه گیری شده، با دو برابر اندوکتانس نشتی غالب می شود. با فرض آنکه اندوکتانس نشتی برای سیم پیچ های ۱ و ۲ برابرند، مدار معادل نهایی برای محاسبه  $L_{Leakage}$  به دست می آید که در شکل (۴-۱۱) نشان داده شده است.



شکل (۱۰-۴) (a) طرحی از یک چوک مود مشترک (b) مدار معادل برای اندوکتانس نشتی

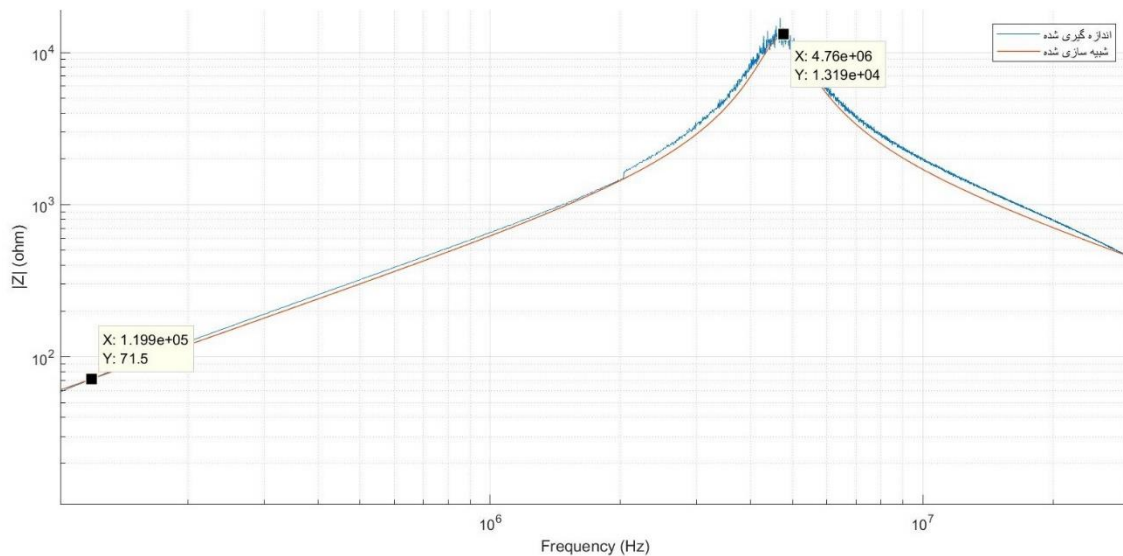


شکل (۱۰-۴) مدار معادل دیده شده از طرف دستگاه اندازه گیر، جهت محاسبه  $L_{Leakage}$

همانند مرحله قبل، به دلیل کوچک بودن اندوکتانس خط و مقاومت DC، در مقایسه با سایر پارامترها، می توان از آنها صرف نظر کرد. به منظور محاسبه اندوکتانس نشتی، که مقدار EPC نسبت به سلف بسیار کمتر است، در فرکانس پایین بایستی اندوکتانس نشتی محاسبه شود. به همین منظور با استفاده از رابطه (۱۰-۴) مقدار  $L_{Leakage}$  به دست می آید.

$$L_{Leakage} = \frac{1}{2} \cdot \frac{Z_{Leakage}}{2\pi f_{Leakage}} \quad (10-4)$$





شکل (۴-۱۲) منحنی امپدانس-فرکانس برای مقایسه حالت اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی اندوکتانس نشی چوک مود مشترک، جهت ارائه مدل مداری

که  $Z_{Leakage}$  مقدار امپدانس در فرکانس  $f_{Leakage}$  می‌باشد. با توجه به شکل (۴-۱۲) مقدار  $Z_{Leakage}$  در فرکانس  $119/9\text{KHz}$  برابر با  $71/5\ \Omega$  است که در نتیجه  $L_{Leakage}$  برابر با  $47/4\ \mu F$  خواهد بود. EPC در فرکانس  $4/76\text{MHz}$  محاسبه می‌شود که برابر با  $117\text{fF}$  و EPR برابر با  $M\Omega$  می‌شود.

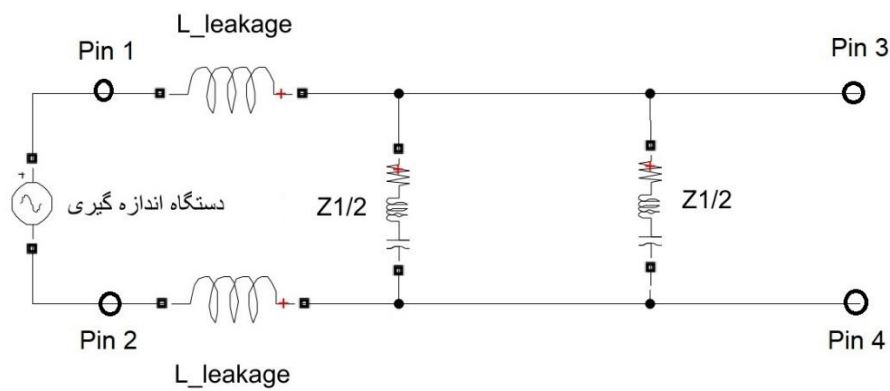
### ۳-۳-۴ بدست آوردن امپدانس $Z_1$

آخرین اندازه‌گیری جهت مدل کردن چوک مود مشترک، امپدانس  $Z_1$  می‌باشد. بدین منظور امپدانس بین پین‌های ۱ و ۲ وقتی که پین‌های ۳ و ۴ به صورت باز در نظر گرفته شده‌اند، اندازه‌گیری می‌شود. مدار معادل دیده شده از طرف دستگاه اندازه‌گیری در این حالت در شکل (۴-۱۳) نشان داده شده است.

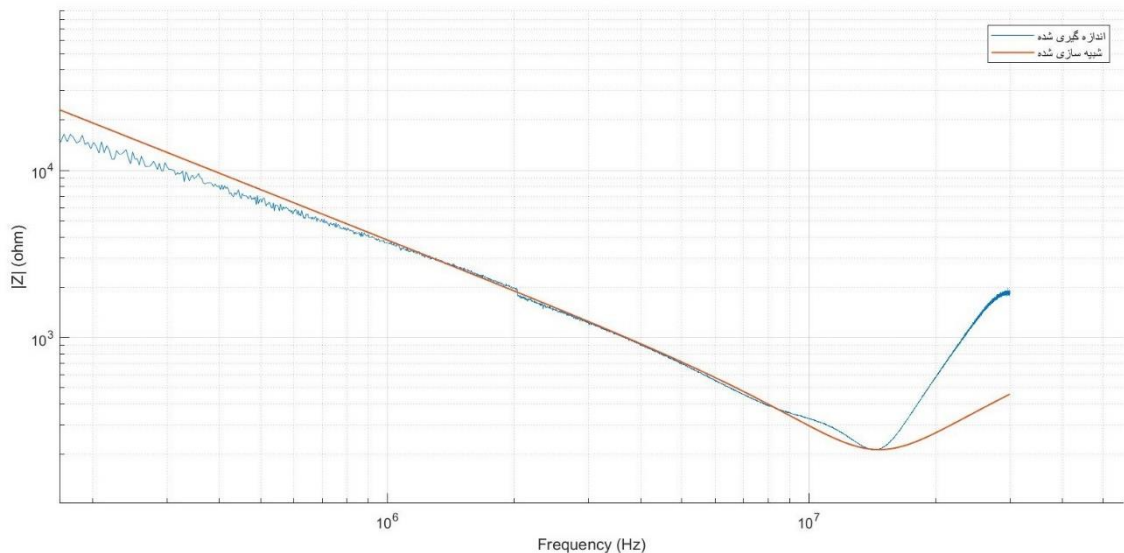
به منظور محاسبه خازن مقدار امپدانس در فرکانس‌های میانی در نظر گرفته می‌شود و با توجه به رابطه مقدار خازن محاسبه می‌شود.

$$C = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2\pi f_{measure} \cdot Z_{measure}} \quad (11-4)$$

که  $Z_{measure}$  امپدانس در فرکانس میانی  $f_{measure}$  خواهد بود. در فرکانس  $1/148\text{MHz}$  مقدار امپدانس برابر با  $3352\ \Omega$  می‌باشد که در نتیجه مقدار  $C$ ،  $0.2\text{pF}$  بدست می‌آید. مقدار اندوکتانس و مقاومت در نقطه تشدید به ترتیب  $1/417\ \mu\text{H}$  و  $106/9\ \Omega$  بدست می‌آید که مدل شبیه سازی شده و مقادیر واقعی اندازه‌گیری در شکل (۱۴-۴) نشان داده شده است.



شکل (۱۳-۴) مدار معادل دیده شده از طرف دستگاه اندازه‌گیری، برای محاسبه  $Z_1$



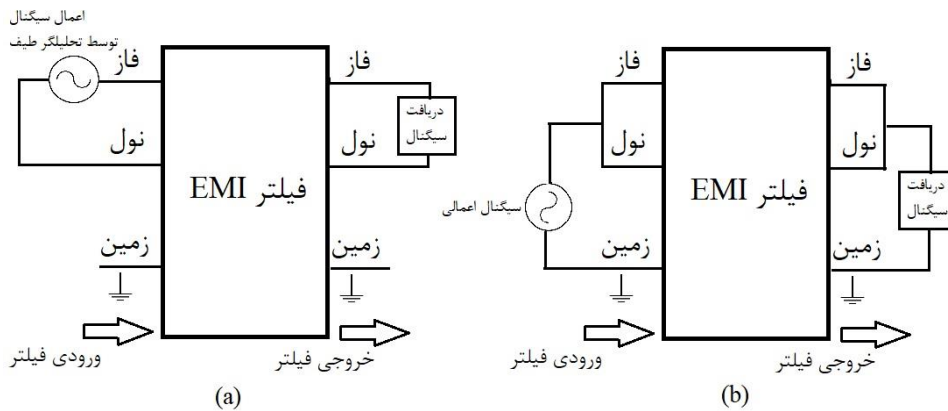
شکل (۱۴-۴) منحنی امپدانس-فرکانس برای مقایسه حالت اندازه‌گیری شده و شبیه سازی شده امپدانس  $Z_1$ ، جهت ارائه مدل مداری

## ۴-۴ بررسی عملکرد فیلتر

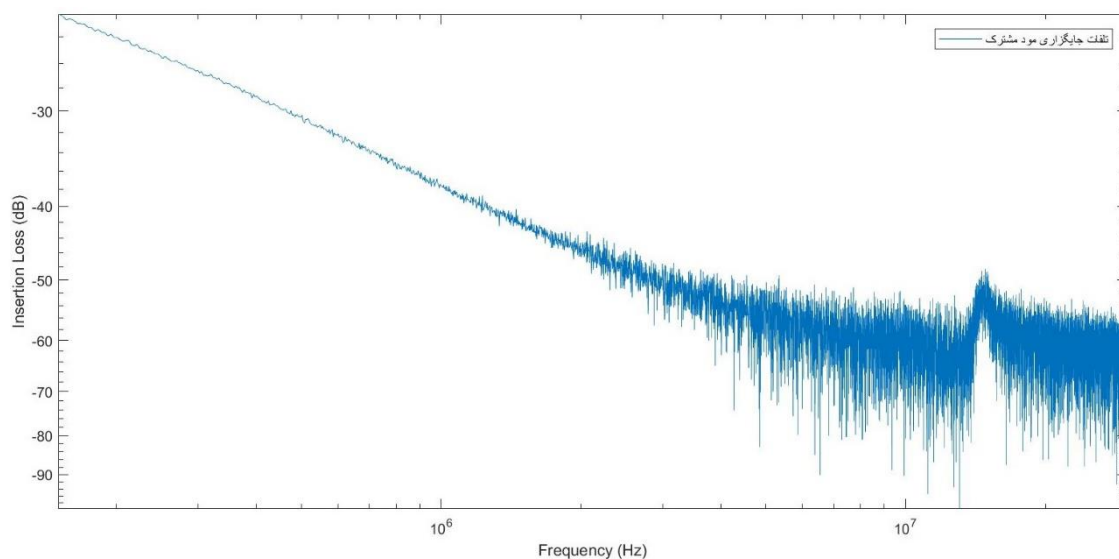
به منظور صحت عملکرد فیلتر بایستی آنرا در مدار قرار داد تا عملکرد فیلتر را مورد بررسی قرار گیرد. اما قبل از قرار گرفتن فیلتر در مدار می‌توان از معیار تلفات جایگذاری برای بررسی عملکرد فیلتر استفاده کرد که در بخش ۴-۴-۱ عملکرد فیلتر به ازای هسته Mn-Zn تشریح شده است.

### ۱-۴-۴ تلفات جایگذاری فیلتر با هسته Mn-Zn

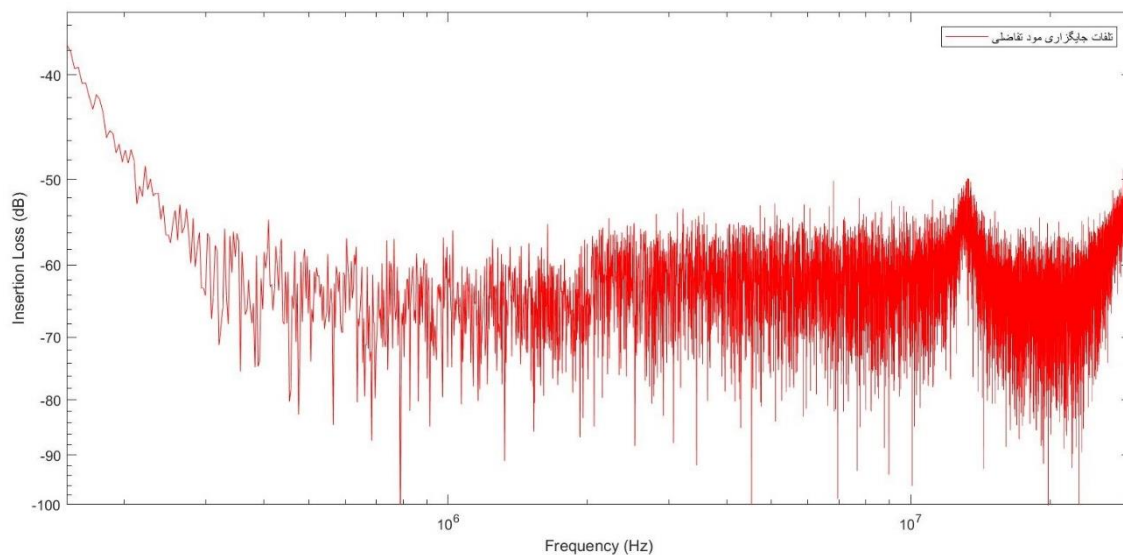
به منظور بررسی عملکرد فیلتر، قبل از قرار گرفتن در مدار قدرت، می‌توان با استفاده از محاسبه تلفات جایگذاری که معیاری برای توانایی فیلتر در جهت کاهش سیگنال‌های مزاحم می‌باشد، عملکرد فیلتر را مورد بررسی قرار داد. به همین منظور با استفاده از تحلیلگر شبکه مقدار تلفات جایگذاری برای هر دو مود مشترک و تفاضلی را بدست آوردیم که به ترتیب در شکل (۴-۱۶) و شکل (۴-۱۷) به نمایش گذاشته شده است. به منظور محاسبه تلفات گزاری در مود مشترک و تفاضلی با توجه با توضیحات ارائه شده در بخش ۲-۲-۳ مدار معادل برای هر یک از مودهای تفاضلی و مشترک به ترتیب در شکل (۴-۱۵) (a) و (b) نشان داده شده است.



شکل (۴-۱۵) مدار معادل برای اندازه‌گیری (a) مود تفاضلی (b) مود مشترک



شکل (۴-۱۶) تلفات جایگذاری مود مشترک فیلتر به ازای هسته Mn-Zn

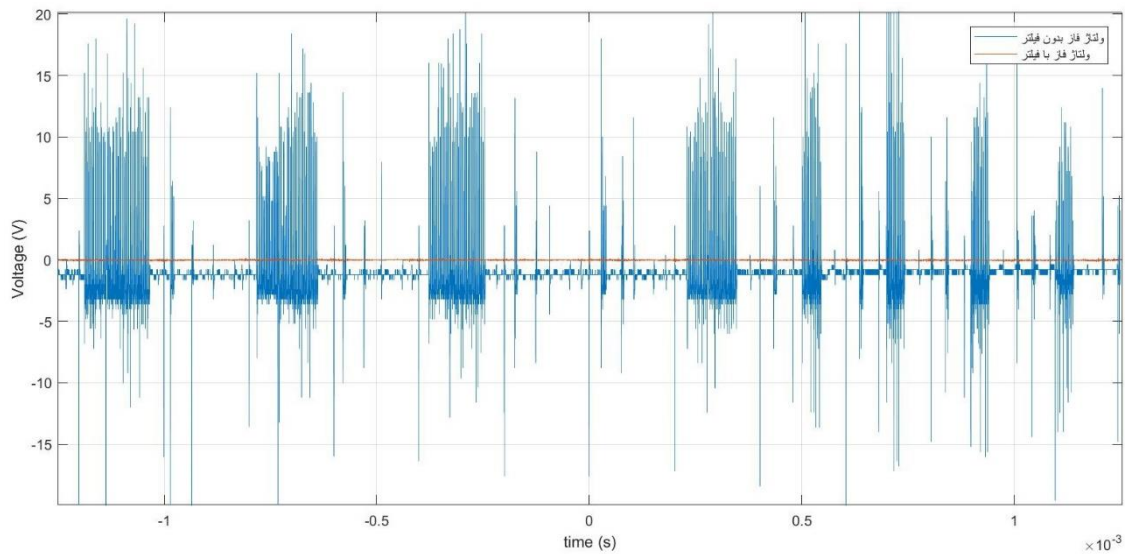


شکل (۴-۱۷) تلفات جایگذاری مود تفاضلی فیلتر به ازای هسته Mn-Zn

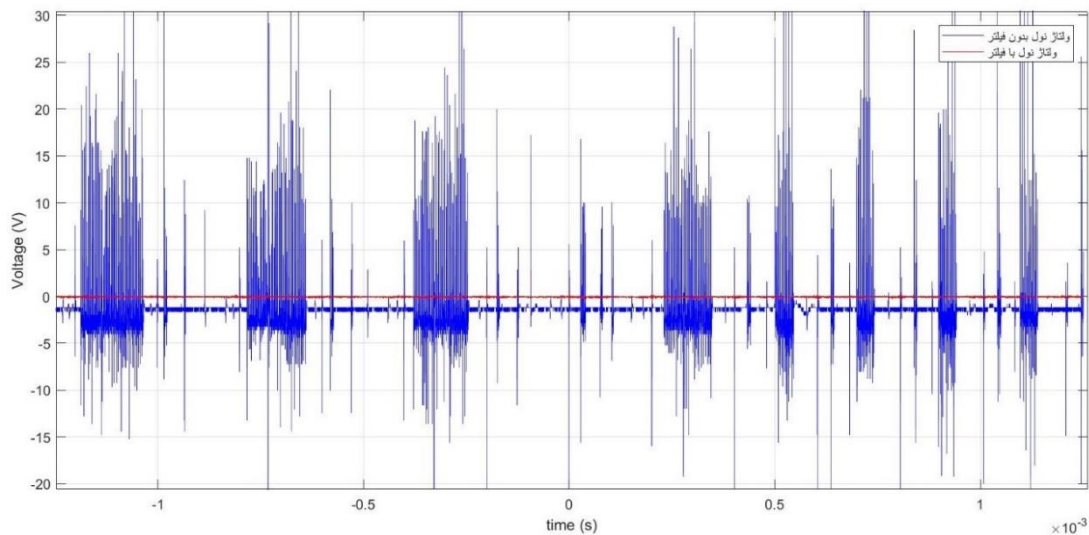
#### ۴-۴-۲ انتشار هدایتی بعد از اعمال فیلتر

به منظور بهتر دیده شدن عملکرد فیلتر در شکل (۴-۱۸) و شکل (۴-۱۹)، ولتاژ فاز و نول خروجی LISN در حالت بدون فیلتر و با فیلتر، با استفاده از اسیلوسکوپ به نمایش گذاشته شده است. همچنین در شکل (۴-۲۰) و شکل (۴-۲۱) تصویر عکس برداری شده‌ای از ولتاژ نویز خروجی فاز و نول

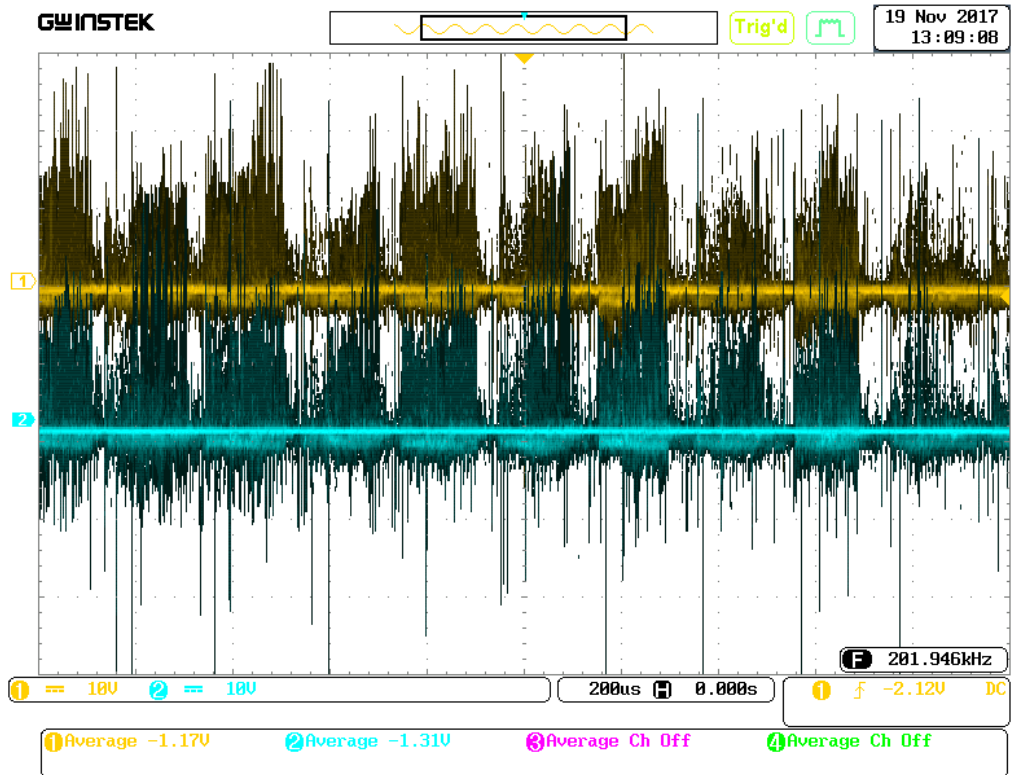
LISN در حالت بدون فیلتر و با فیلتر نشان داده شده است. با توجه به کوچک بودن ولتاژ نویز خروجی LISN در حالت حضور فیلتر EMI، در مقایسه با حالت بدون فیلتر و بهتر دیده شدن نویز، ولتاژهای دیده شده در این حالت ده برابر بزرگ شده است. در این شکل خطوط زرد رنگ مربوط به ولتاژ فاز و خطوط آبی رنگ مربوط به ولتاژ نول LISN می‌باشد.



شکل (۴-۱۸) ولتاژ فاز خروجی LISN در حالت بدون فیلتر و با فیلتر



شکل (۴-۱۹) ولتاژ نول خروجی LISN در حالت بدون فیلتر و با فیلتر

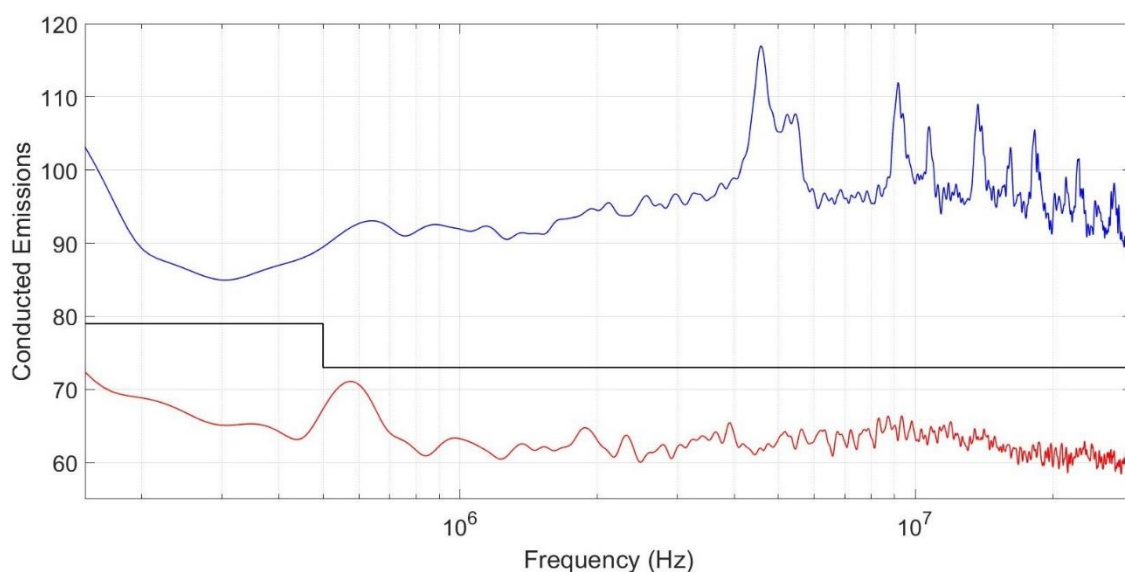


شکل (۴-۲۰) تصویر اسیلوسکوپ برای ولتاژ فاز و نول خروجی LISN بدون فیلتر



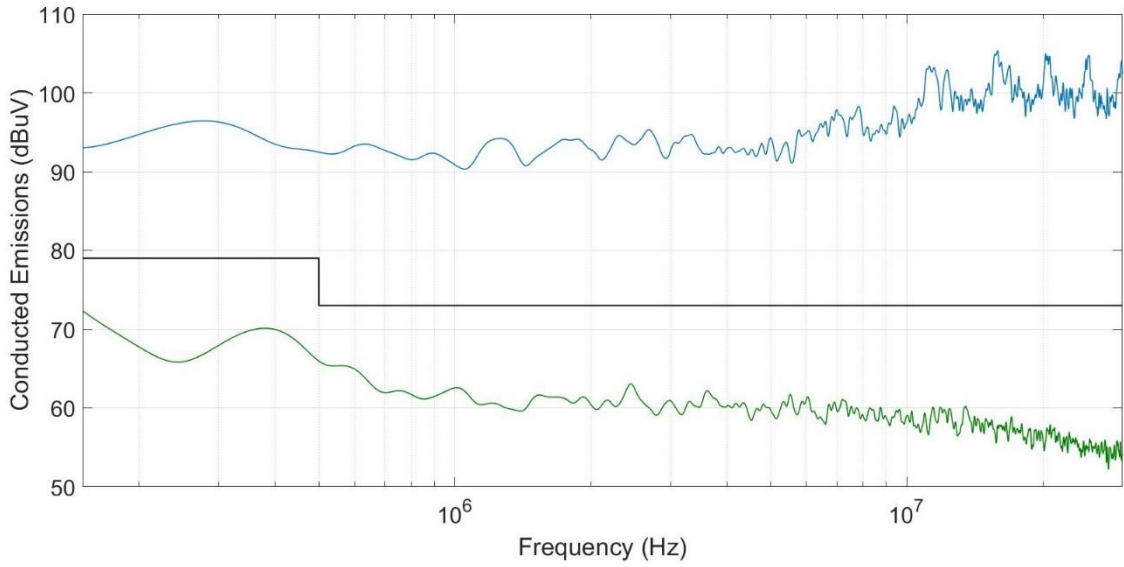
شکل (۴-۲۱) تصویر اسیلوسکوپ برای ولتاژ فاز و نول خروجی LISN با فیلتر

در ادامه، مطلوب است که انتشار هدایتی مود مشترک، مورد بررسی قرار گیرد. به همین منظور انتشار هدایتی مود مشترک در حالت بدون فیلتر (خطوط قرمز) و با فیلتر (خطوط آبی) در شکل (۴-۲۲) مقایسه شده است. در ضمن این مقایسه، سطح استاندارد نیز ترسیم شده است. همچنین کارکرد فیلتر برای انتشار هدایتی مود تفاضلی در دو حالت عدم حضور فیلتر (خطوط آبی) و با فیلتر (خطوط سبز) در شکل (۴-۲۳) نشان داده شده است.

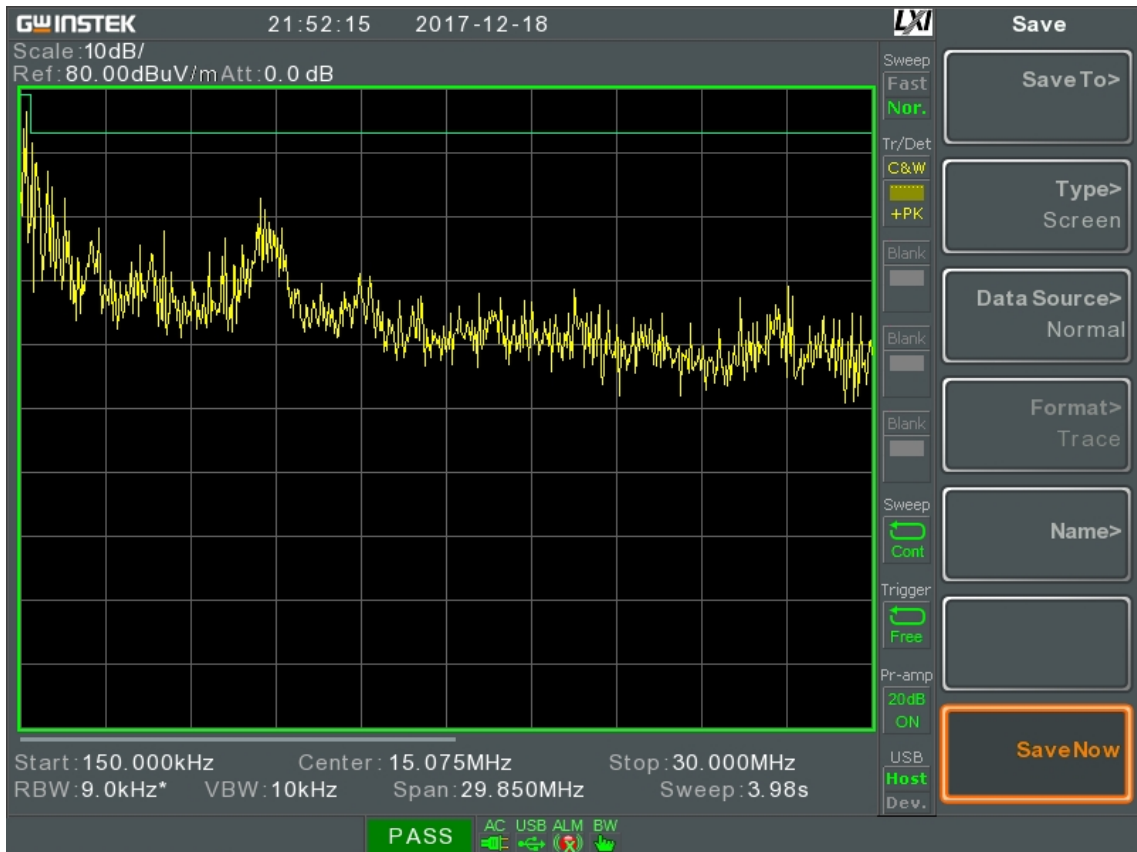


شکل (۴-۲۲) انتشار هدایتی مود مشترک در حالت بدون فیلتر و با فیلتر

همانطور که مشاهده می‌شود فیلتر طراحی شده توانسته است سطح انتشار هدایتی را به طور قابل توجهی کاهش دهد. به منظور صحت عملکرد فیلتر، با استفاده از تحلیلگر طیف، اندازه‌گیری انتشار هدایتی مود مشترک انجام پذیرفت که در شکل (۴-۲۴) نشان داده شده است. در این حالت انتشار هدایتی مود مشترک بدون استفاده از تضعیف‌کننده اندازه‌گیری شده است. روش تحلیل در این حالت شبه قله می‌باشد و استاندارد ترسیمی در شکل، CISPR11-Class A می‌باشد.



شکل (۴-۲۳) انتشار هدایتی مود تفاضلی در حالت بدون فیلتر و با فیلتر



شکل (۴-۲۴) اندازه‌گیری انتشار هدایتی مود مشترک ، بدون استفاده از تضعیف‌کننده



#### ۳-۴-۴ بهبود تلفات جایگذاری با استفاده از هسته نانوکریستال

از آنجا که تلفات جایگذاری معیاری برای توانایی فیلتر در جهت کاهش سیگنال‌های مزاحم می‌باشد می‌توان عملکرد فیلتر را در شرایط مختلف با استفاده از تلفات جایگذاری مورد بررسی قرار داد.

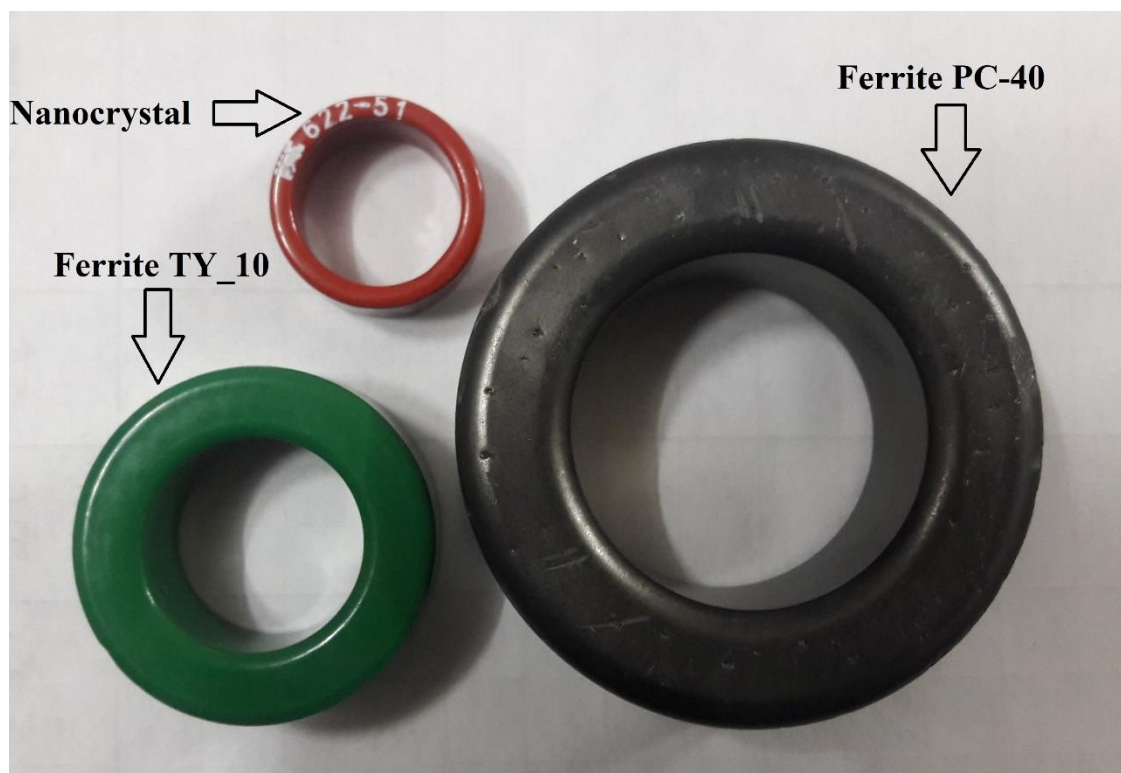
به منظور کاهش حجم و وزن فیلتر مطلوب است که المان حجیم و سنگین فیلتر را که چوک مود مشترک می‌باشد در صورت امکان بهبود بخشیم. به همین منظور با استفاده از یک هسته نانوکریستال می‌توان این کار را انجام داد که در جدول (۲-۴) مقایسه‌ای بین اندازه، وزن و  $A_L$  دو چوک نانوکریستال، فریت PC-40 و فریت TY-10 انجام پذیرفته است.

در جدول (۲-۴) مشاهده می‌شود، هسته نانوکریستال از لحاظ حجم، وزن و مقدار توانایی برای ایجاد سلف بسیار بهتر از هسته‌های فریت می‌باشد. در شکل (۲۵-۴) تصویری از مقایسه ابعاد سه هسته مذکور قرار گرفته است.

خواص هسته‌های نانوکریستال تنها به بحث اندازه و وزن آن‌ها محدود نمی‌شوند. ماده اصلی هسته نانوکریستال مورد استفاده، VITROPERM 500F و ماده هسته فریت TY-10، Mn-Zn می‌باشد. وابستگی نفوذپذیری به فرکانس ( $\mu(f)$ ) در VITROPERM 500F و فریت تفاوت اساسی

جدول (۲-۴) مقایسه بین هسته‌های فریت و نانوکریستال

نوع هسته	ابعاد هسته (mm)	وزن هسته (g)	$(nH/N^2) A_L$	حداکثر مقدار سلف با سیم ۱mm (mH)
Ferrite PC-40	۶۳-۳۸-۲۵	۳۰۰	۶۳۰۰	۲*۶/۸۶
Ferrite TY-10	۳۸-۲۲-۱۵	۵۴/۹	۱۶۴۰۰	۲*۱۳/۷
Nanocrystal	۲۵-۲۰-۱۰	۹/۹	۲۲۵۰۰	۲*۱۵/۲

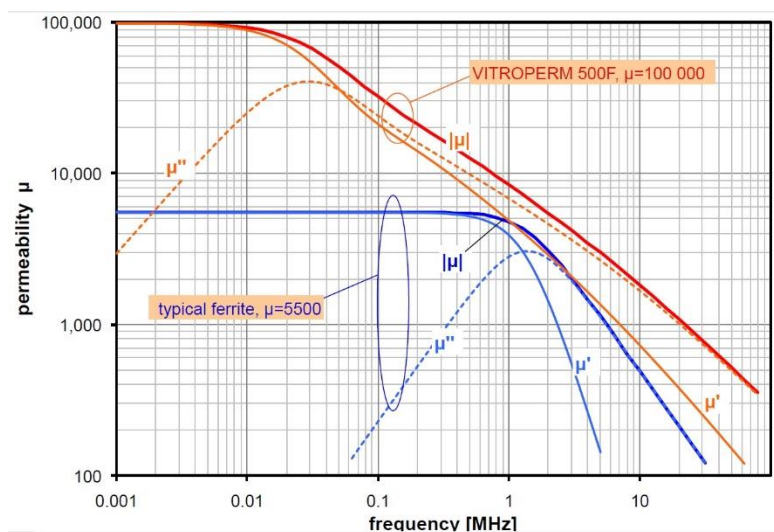


شکل (۴-۲۵) مقایسه بین ابعاد هسته‌های فریت و نانوکریستال

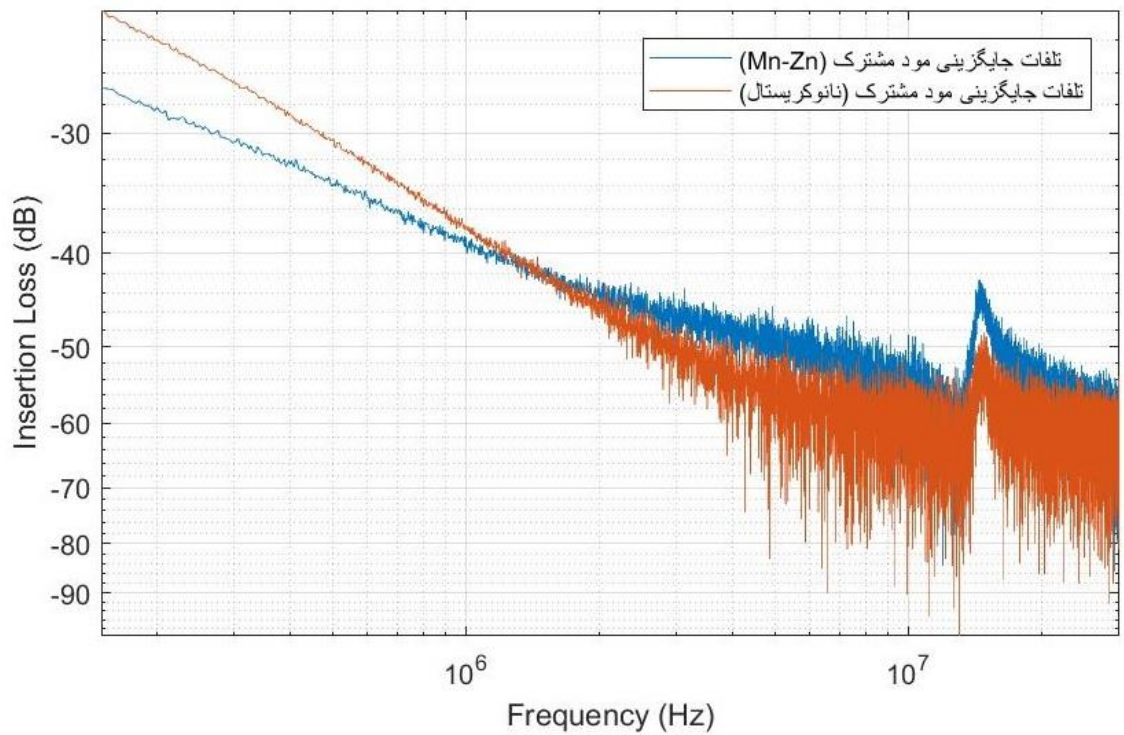
دارند.  $\mu(f)$  به ازای  $\mu = 5000$  تا فرکانس حدود  $1\text{ MHz}$  مشخصه‌ای تخت دارد. در این بازه تخت، خواص میرایی توسط  $\mu'$  تعیین می‌شود و اندازه امپدانس غالباً سلف خواهد بود. اگر تشدید خودی چوک در این بازه قرار بگیرد، منحنی میرایی باند باریکی می‌شود و سیگنال خروجی از فیلتر شبیه سیگنال نویز خواهد بود. این در حالی است که در هسته نانوکریستال بخش تخت منحنی  $\mu(f)$  تا فرکانس  $10\text{ KHz}$  می‌باشد و این باعث می‌شود که تشدید خودی چوک خارج از این محدوده باشد و رفتار چوک در ناحیه تشدید بهتر باشد. همچنین به دلیل آنکه منحنی B-H در هسته نانوکریستال سطح بالاتری نسبت به هسته‌های فریت دارد، نگرانی برای به اشباع رفتن هسته در هسته‌های نانوکریستال بسیار کمتر می‌باشد [۴۱]. نمودار مربوط به منحنی B-H در پیوست الف آورده شده است.

با توجه به توضیحات ارائه شده انتظار داریم تلفات جایگذاری در هسته نانوکریستال نسبت به هسته فریت Mn-Zn بهتر باشد. به همین منظور در شکل (۴-۲۷) برای مود مشترک، مقایسه‌ای بین

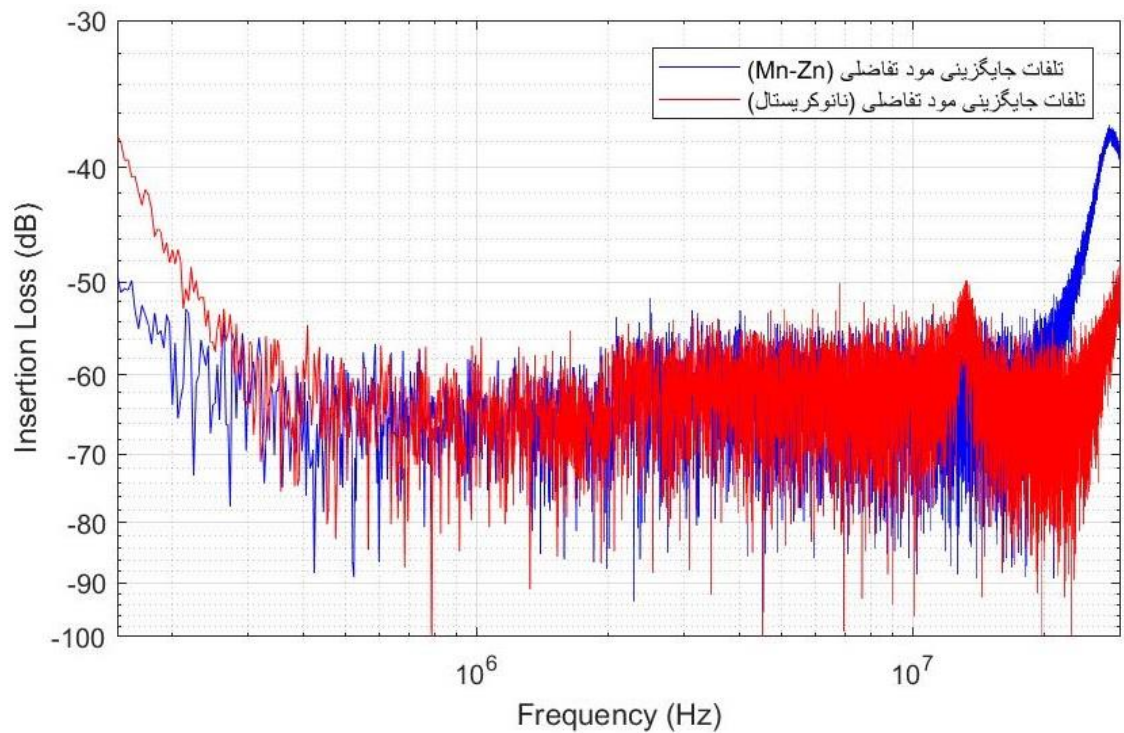
این دو انجام پذیرفته است که به طور واضح می‌توان بهبود عملکرد فیلتر در مود مشترک برای فرکانس‌های بالا را مشاهده کرد. این مقایسه برای مود تفاضلی نیز در بیان گردیده است. قابل ذکر است که در این حالت برای رسیدن به  $4/7\text{mH}$  اندوکتانس کافی است  $14/5$  دور سیم‌پیچی انجام شود، که بایستی این عدد رند شود. با پیچیدن  $15$  دور مقدار سلف به  $5\text{mH}$  می‌رسد و به دلیل زیاد شدن مقدار سلف میرایی افزایش می‌یابد و نمی‌توان مقایسه خوبی انجام داد. با  $14$  دور مقدار  $4/4\text{mH}$  را خواهیم داشت. فرض ما بر  $14$  دور بوده است تا بتوان مقایسه را به خوبی انجام داد. مقدار کاهش تلفات جایگذاری در فرکانس‌های پایین به دلیل کمتر بودن سلف مود مشترک کاملاً قابل پیشی بینی می‌باشد. با استفاده از هسته نانوکریستال با  $14$  دور سیم‌پیچی توانستیم در فرکانس‌های بالا رفتار بهتری از فیلتر داشته باشیم. این در حالی است که در حالت قبل نیاز به  $17$  دور سیم‌پیچی داشته ایم و رفتار فیلتر در فرکانس‌های بالا نسبت به این حالت ضعیف‌تر می‌باشد.



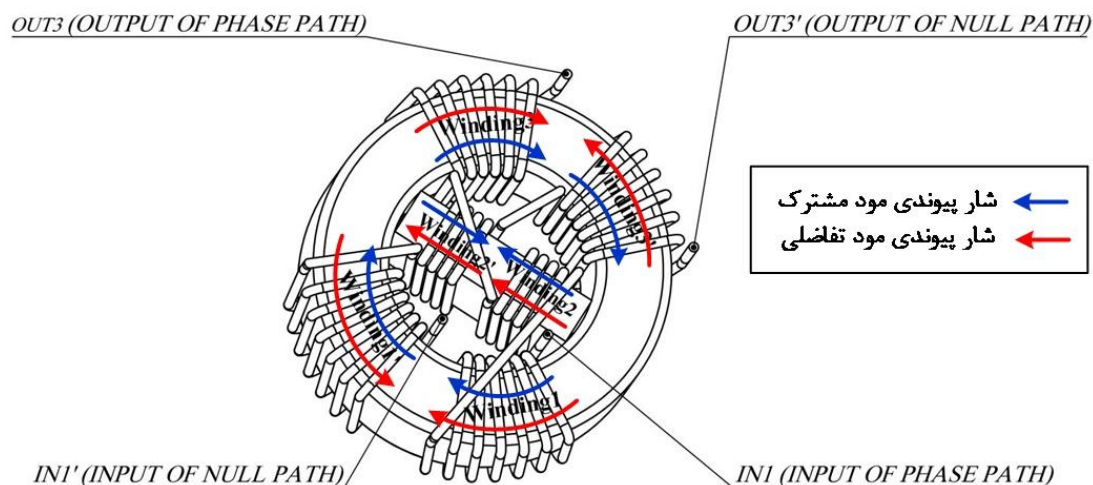
شکل (۴-۲۶) مقایسه منحنی نفوذپذیری هسته نانوکریستال و فریت [۴۱]



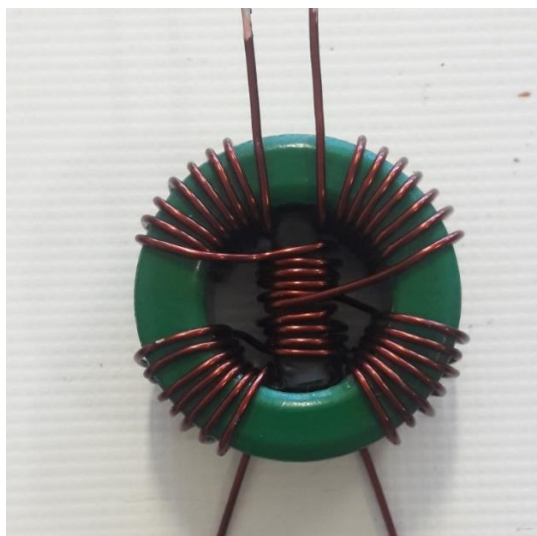
شکل (۴-۲۷) مقایسه تلفات جایگذاری مود مشترک هسته نانوکریستال و فریت Mn-Zn



شکل (۴-۲۸) مقایسه تلفات جایگذاری مود تفاضلی هسته نانوکریستال و فریت Mn-Zn



شکل (۴-۲۹) جهت شارها در مود مشترک و تفاضلی برای روش جدید سیم پیچی



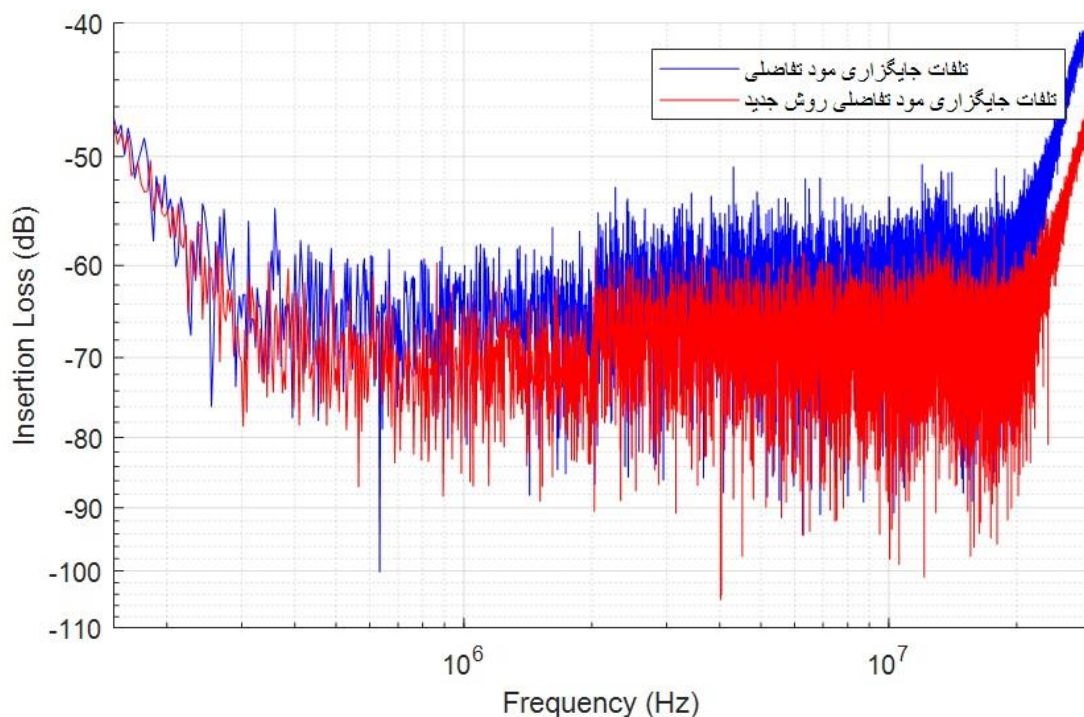
شکل (۴-۳۰) سیم پیچی هسته فریت Mn-Zn با روشی جدید جهت افزایش توانایی فیلتر در مود تفاضلی

#### ۴-۴-۴ بهبود تلفات جایگذاری مود تفاضلی با روش جدید سیم پیچی

همانطور که در بخش‌های ۲-۷-۲ و ۲-۸ بیان گردید به منظور بهبود عملکرد فیلتر در مود

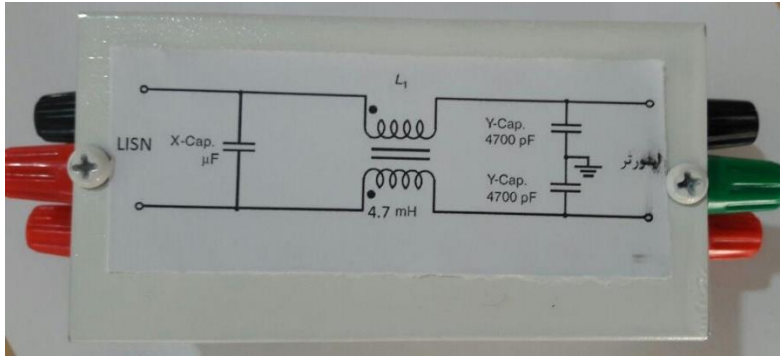
تفاضلی می توان از سلف‌های کمکی استفاده کرد.

در این روش مدلی برای سیم پیچی ارائه گردیده است که ضمن عدم تغییر سلف مود مشترک،



شکل (۴-۳۱) مقایسه تلفات جایگزاری مود تفاضلی هسته فریت Mn-Zn در حالت سیم‌پیچی ساده و روش سیم‌پیچی جدید

سلف مود تفاضلی که فقط مربوط به اندوکتانس نشتی چوک بوده است، افزایش یابد. همانطور که در شکل (۴-۲۹) نشان داده شده است، در وسط هسته از یک تیغه فریت برای مسیر دادن به شارهای نشتی استفاده شده است. در ضمن این اقدام، استفاده از چند دور سیم‌پیچی بر روی این تیغه وسط و با رعایت جهت سیم‌پیچی و هم جهت کردن شارها در مود تفاضلی سبب افزایش سلف مود تفاضلی می‌شود. این در حالی است که با خنثی کردن شار تولید شده توسط سیم‌پیچی‌های تیغه وسط در مود مشترک، باعث عدم تغییر اندوکتانس مود مشترک خواهیم شد. نحوه سیم‌پیچی در شکل (۴-۳۰) نشان داده شده است که به منظور صحت روش سیم‌پیچی و افزایش توانایی فیلتر در مود تفاضلی، تلفات جایگزاری فیلتر در مود تفاضلی برای ۱۴ دور سیم‌پیچی، در دو حالت سیم‌پیچی ساده و روش سیم‌پیچی جدید در شکل (۴-۳۱) به نمایش گذاشته شده است. تلفات جایگزاری در مود تفاضلی با استفاده از روش جدید سیم‌پیچی بهبود یافته است. این بهبود در فرکانس‌های بالا بسیار مشهودتر است. نسخه نهایی فیلتر در شکل (۴-۳۲) نشان داده شده است.



شکل (۴-۳۲) نسخه نهایی فیلتر تداخلات الکترومغناطیسی برای اینورتر





## **فصل ۵: نتیجه‌گیری و پیشنهادات**

## ۵-۱ نتیجه گیری

امروزه شاهد استفاده گسترده از منابع تغذیه کلیدزنی با ساختارهای مختلف هستیم. المان‌هایی که عمل کلیدزنی را انجام می‌دهند عامل اصلی به وجود آمدن تداخلات الکترومغناطیسی هستند. از طرفی، افزایش فرکانس کلیدزنی و همچنین حرکت به سمت مجتمع‌سازی مبدل‌ها باعث افزایش تداخلات الکترومغناطیسی شده است. تداخلات الکترومغناطیسی تولید شده سبب اختلال در عملکرد خود مبدل و سایر مبدل‌ها می‌شود. از این‌رو الزام کاهش سطح انتشار هدایتی جز ملزومات مبدل‌ها می‌باشد.

در این پایان نامه، طراحی و پیاده‌سازی فیلتر تداخلات الکترومغناطیسی برای اینورتر سه فاز برای کاهش سطح انتشار هدایتی تا سطوح استاندارد انجام پذیرفته است. به منظور اندازه‌گیری صحیح سطح انتشار هدایتی، بایستی تنظیمات اندازه‌گیری فراهم شود که نمونه آزمایشگاهی از تنظیمات اندازه‌گیری پیاده‌سازی شده است. با اندازه‌گیری سطح انتشار هدایتی در مود مشترک و تفاضلی، و مشخص شدن مقدار میرایی مورد نیاز، طراحی و ساخت فیلتر انجام پذیرفت و با قرار دادن فیلتر در مدار اینورتر و اندازه‌گیری مجدد سطح انتشار هدایتی در مود مشترک و تفاضلی، مشاهده گردید که در فرکانس ۱۵۰ KHz مقدار سطح انتشار هدایتی در مود مشترک، ۳۱dB کاهش یافته است. مقدار سطح انتشار هدایتی در مود تفاضلی برابر با ۲۰dB بوده است. به منظور بهبود عملکرد فیلتر در فرکانس‌های بالا، با استفاده از هسته نانوکریستال در هر یک از مودهای مشترک و تفاضلی، رفتار فیلتر در مود مشترک تا ۶dB بهبود یافته است.

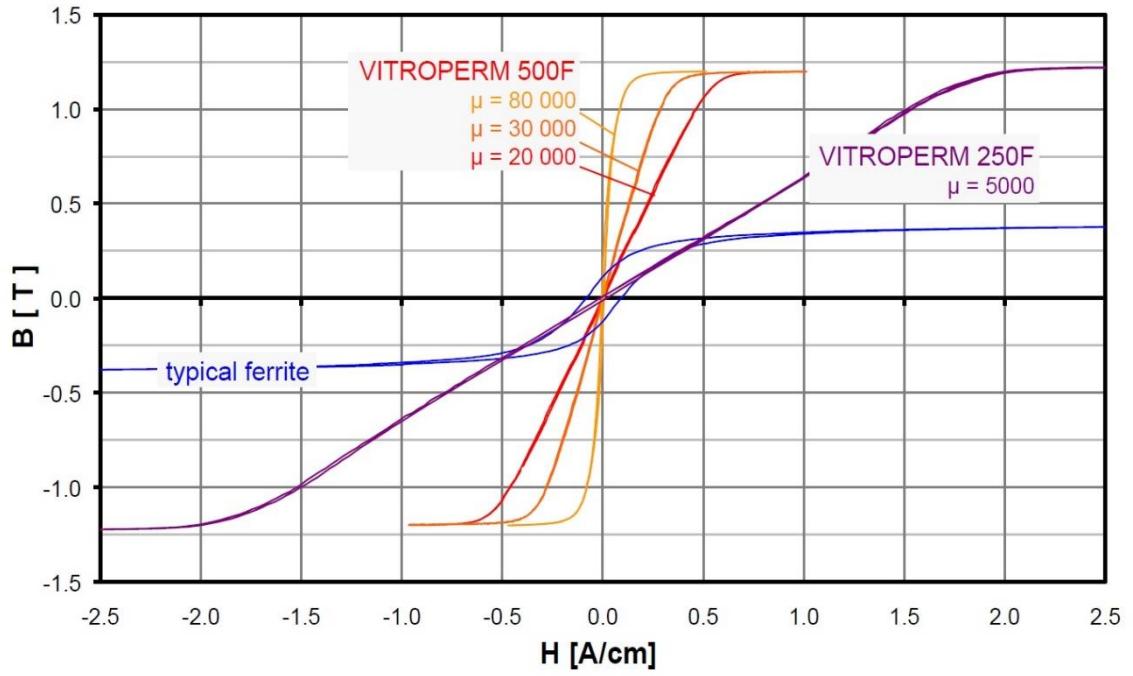
به منظور بهبود عملکرد فیلتر در مود تفاضلی برای فرکانس‌های بالا، روش جدیدی برای

سیم‌پیچی مطرح گردیده است، که عملکرد فیلتر تا ۴dB بهبود یافته است

## ۲-۵ پیشنهادات

- ۱- طراحی و پیاده‌سازی فیلتر با در نظر گرفتن امپدانس‌های متصله به فیلتر جهت مدل‌سازی فیلتر و محاسبه تلفات جایگذاری.
- ۲- استفاده از تکنیک‌های جدید سیم‌پیچی به منظور بهبود مشخصه تلفات جایگذاری و همچنین روش‌های جدید سیم‌پیچی به منظور افزایش اندوکتانس نشتی بدون تخریب سایر مشخصه‌های سیستم.
- ۳- مدل‌سازی چوک مود مشترک در روش جدید سیم‌پیچی جهت تحلیل بیشتر داده‌ها.
- ۴- بررسی و تاثیر عملکرد یک فیلتر EMI، در حرارت یا نویز صوتی سیستم‌هایی که در مجاورت تجهیز تولیدکننده EMI قرار دارند.

منحنی B-H هسته نانوکریستال با ماده اصلی VETROPERM



- [1] H. W. Ott, *Electromagnetic compatibility engineering*. John Wiley & Sons, 2011.
- [2] R. Vimala, "Conducted emi modeling separation and filter analysis for isolated ac dc converters," PHD.thesis, Anna University, 2013.
- [3] F. Costa and D. Magnon, "Graphical analysis of the spectra of EMI sources in power electronics," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 20, no. 6, pp. 1491-1498, 2005.
- [4] K. L. Kaiser, *Electromagnetic compatibility handbook*. CRC press, 2004.
- [5] T. Laszio, *Electromagnetic compatibility in power electronics*. New York: IEEE Press, 1995.
- [6] C. E. Cuellar Quispe, "HF characterization and modeling of magnetic materials for the passive components used in EMI filters," PHD.thesis, Lille Nors-de France, 2013.
- [7] Q. Liu, "Modular approach for characterizing and modeling conducted EMI emissions in power converters," PHD. thesis, Blacksburg, Virginia, 2005.
- [8] X. Huang, "Frequency domain conductive electromagnetic interference modeling and prediction with parasitics extraction for inverters," PHD.thesis, Blacksburg, Virginia, 2004.
- [9] C. R. Paul, *Introduction to electromagnetic compatibility*. John Wiley & Sons, 2006.
- [10] A. Ogunsola and A. Mariscotti, *Electromagnetic Compatibility in Railways: Analysis and Management*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [11] N. J. Carter, "The past, present and future challenges of aircraft EMC," in *Electromagnetic Compatibility, 2003. EMC'03. 2003 IEEE International Symposium on*, 2003, vol. 1, pp. 1-4: IEEE.
- [12] A. Nejadpak, A. Sarikhani, and O. A. Mohammed, "Analysis of radiated EMI and noise propagation in three-phase inverter system operating under different switching patterns," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 49, no. 5, pp. 2213-2216, 2013.
- [13] A. Rosales, A. Sarikhani, and O. A. Mohammed, "Evaluation of radiated electromagnetic field interference due to frequency swithcing in PWM motor drives by 3D finite elements," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 47, no. 5, pp. 1474-1477, 2011.

- [14] S. Ogasawara, H. Ayano, and H. Akagi, "Measurement and reduction of EMI radiated by a PWM inverter-fed AC motor drive system," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 33, no. 4, pp. 1019-1026, 1997.
- [15] Y. Koyama, M. Tanaka, and H. Akagi, "Modeling and analysis for simulation of common-mode noises produced by an inverter-driven air conditioner," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 47, no. 5, pp. 2166-2174, 2011.
- [16] R. L. Ozenbaugh and T. M. Pullen, *EMI filter design*. CRC press, 2011.
- [17] S. Wang, F. Luo, and F. C. Lee, "Characterization and design of three-phase EMI noise separators for three-phase power electronics systems," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 26, no. 9, pp. 2426-2438, 2011.
- [18] *55011 Industrial, scientific and medical equipment—Radio-frequency disturbance characteristics—Limit and methods of measurement (IEC/CISPR 11: 2009)*.
- [19] *Part 15 Radio Frequency Devices. Code of Federal Regulation 47 CFR Ch. I (10–1–98 Edition)*, 1998.
- [20] T. Williams, *EMC for product designers*. Newnes, 2011.
- [21] P.-S. Chen and Y.-S. Lai, "Effective EMI filter design method for three-phase inverter based upon software noise separation," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 25, no. 11, pp. 2797-2806, 2010.
- [22] S. Wang, "Modeling and design of EMI noise separators for multiphase power electronics systems," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 26, no. 11, pp. 3163-3173, 2011.
- [23] K. Tsai, "EMI Modeling and Characterization for Ultra-Fast Switching Power Circuit Based on SiC and GaN Devices," PHD, The Ohio State University, 2013.
- [24] N. Idir, R. Bausiere, and J. J. Franchaud, "Active gate voltage control of turn-on di/dt and turn-off dv/dt in insulated gate transistors," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 21, no. 4, pp. 849-855, 2006.
- [25] N. Boudjerda, A. Boudouda, M. Melit, B. Nekhoul, K. E. K. Drissi, and K. Kerroum, "Optimized dual randomized PWM technique for reducing conducted EMI in DC-AC converters," in *EMC Europe 2011 York*, 2011, pp. 701-706: IEEE.
- [26] M. L. Heldwein, H. Ertl, J. Biela, and J. W. Kolar, "Implementation of a transformerless common-mode active filter for offline converter

- systems," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 5, pp. 1772-1786, 2010.
- [27] S. Wang, Y. Y. Maillet, F. Wang, D. Boroyevich, and R. Burgos, "Investigation of hybrid EMI filters for common-mode EMI suppression in a motor drive system," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 25, no. 4, pp. 1034-1045, 2010.
- [28] V. Tarateeraseth, "EMI filter design: Part III: Selection of filter topology for optimal performance," *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*, vol. 1, no. 2, pp. 60-73, 2012.
- [29] G. Ala, G. C. Giaconia, G. Giglia, M. C. Di Piazza, and G. Vitale, "Design and performance evaluation of a high power-density emi filter for PWM inverter-fed induction-motor drives," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 52, no. 3, pp. 2397-2404, 2016.
- [30] *UL 1283-Standard for Electromagnetic Interference Filters*, 2005.
- [31] C. Domínguez-Palacios, J. Bernal, and M. Prats, "Characterization of Common Mode Chokes at High Frequencies with Simple Measurements," *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017.
- [32] M. J. Nave, "On modeling the common mode inductor," in *Electromagnetic Compatibility, 1991. Symposium Record., IEEE 1991 International Symposium on*, 1991, pp. 452-457: IEEE.
- [33] M. Kovacic, Z. Hanic, S. Stipetic, S. Krishnamurthy, and D. Zarko, "Analytical wideband model of a common-mode choke," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, no. 7, pp. 3173-3185, 2012.
- [34] J.-L. Kotny, X. Margueron, and N. Idir, "High-frequency model of the coupled inductors used in EMI filters," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, no. 6, pp. 2805-2812, 2012.
- [35] Y. Maillet, "High-density discrete passive EMI filter design for Dc-Fed motor drives," M.S, Blacksburg, Virginia 2008.
- [36] *EN 132 400 (June 1994)/IEC 384-14 (2nd)-Fixed capacitors for electromagnetic interference suppression and connection to the supply mains-experiences gained by Quinel*, 1995.
- [37] *EMI Suppressors - Safety Considerations* Available: [http://www.kemet.com/Lists/ProductCatalog/Attachments/154/F9000\\_GenInfo\\_EMISupp.pdf](http://www.kemet.com/Lists/ProductCatalog/Attachments/154/F9000_GenInfo_EMISupp.pdf)
- [38] C. L. Wiggins and D. W. Stewart, "EMI line filter," 1997.
- [39] *60950-1 Information technology equipment –Safety*, 2005.
- [40] *Capacitor for RFI suppression for the AC line : basic facts*. Available: <http://archive.eettaiwan.com/www.eettaiwan.com/ARTICLES/20>

**01AUG/PDF/2001AUG23\_AMD\_AN1519.PDF?SOURCES=DOWNLOAD**

- [41] *EMC products based on Nanocrystalline VITROPERM*. Available: [http://www.vacuumschmelze.com/fileadmin/Medienbibliothek\\_2010/Downloads/KB/NanocrystallineVITROPERM-EMC-Products-2016\\_01.pdf](http://www.vacuumschmelze.com/fileadmin/Medienbibliothek_2010/Downloads/KB/NanocrystallineVITROPERM-EMC-Products-2016_01.pdf)



## **Abstract**

This thesis investigates the design and implementation of electromagnetic interference filter for a three-phase inverter aimed to reduce the conductive emission level. In this design, common and differential modes of conducted emissions are brought to standard levels. To design, the conducted emission level must be first measured, and due to correct measurement, the test setup must be provided. In the next step, after measuring the conducted emission and comparing it to the standard level, the minimum amount of attenuation required to pass the EMC standards is calculated, and with the required attenuation, the desired filter design can be done. By determining the minimum required attenuation, the corner frequency can be calculated for both common and differential modes. This frequency is calculated according to the filter structure, and then filter elements are determined. During the determination of the filter elements, the leakage current is also considered which is limited by standards. Leakage current is the criterion for determining the capacitor of the common mode. After determining the corner frequency and capacitor of the common mode, the required choke value is obtained in a common mode. The differential mode filter can be designed in the same way with this difference that in this case, the leakage current limitation is not meaningful, so there is more freedom to choose the inductor and capacitor. In order to check the function of the filter, it was made according to the design. The filter efficiency for providing the required attenuation and bringing the conducted emission level to below the defined standard level was evaluated. The results indicate a significant reduction in the conducted emission level in inverter. Further, the insertion loss of filtering has been improved using a nanocrystal core as well as a new winding method.

Keywords: EMI filter, Inverter, Corner Frequency, Common mode, Differential mode, EMC standard, Insertion Loss



**Shahrood University of Technology**

**Faculty of Electrical and Robotic Engineering**

**M.Sc Thesis in Power Electronic and Machin Engineering**

# **EMI Filter Design and Implementation in Inverter**

By:  
Abolfazl Saadi

Supervisor:  
Dr. Ali Dastfan

January 2018