

طراحی و شبیه‌سازی فیلتر سازگاری الکترومغناطیسی برای مبدل فلای‌بک

آتیلا اسکندر نژاد^{۱*}، عبدالعزیز کلته^۱، نوروز عبداللهی^۱

چکیده

تجهیزات الکترونیکی نیازمند ولتاژ تغذیه با مقادیر مختلفی می‌باشند که در شرایط تغییر ولتاژ منبع و جریان بار بتواند ولتاژی تثبیت شده در خروجی ایجاد نماید. مبدل فلای‌بک گزینه مناسبی است زیرا می‌تواند چندین سطح ولتاژی در ثانویه ایجاد کند. نکته دیگر آن است که امروزه به دلیل بالا بودن فرکانس سوئیچینگ، مولفه‌های الکترومغناطیسی با توان قابل توجهی از سمت مبدل به خطوط تغذیه هدایت شده و همچنین به فضای اطراف تشعشع باید که باعث تولید آلودگی الکترومغناطیسی و تداخل رادیویی EMI شود. در این مقاله روشی موثر و عملی برای طراحی و تنظیم فیلتر سازگاری الکترومغناطیسی EMC ارائه می‌شود. تنظیم مقادیر فیلتر مبتنی بر متوسط-گیری مدار نویز با در نظر گرفتن امپدانس معادل آن می‌باشد. در اغلب روش‌های پیشنهادی برای طراحی فیلتر، منبع نویز را به صورت یک منبع جریان ایده‌آل فرض کرده و امپدانس معادل نویز را در نظر نمی‌گیرند. این موضوع از دقت طراحی کاسته و مانع از فیلتر شدن درست مولفه‌ها در برخی فرکانس‌ها می‌شود. در این مقاله متوسط‌گیری مداری از کل ساختار مبدل با در نظر گرفتن عناصر پارازیتی انجام می‌شود زیرا هر چه مدل ارائه شده به ساختار واقعی نزدیک‌تر باشد فیلتر کارآئی بیشتری داشته و به طور موثرتری مولفه‌های مزاحم رادیویی را از بین می‌برد. در انتها، شبیه‌سازی نرم‌افزاری نشان‌دهنده دقت و کارآئی روش پیشنهادی در طراحی فیلتر EMI است.

دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۱۰/۲۶

کلمات کلیدی: سازگاری الکترومغناطیسی، فیلتر هدایتی، مبدل فلای‌بک، مدل نویزی

پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۲۸

۱- مقدمه

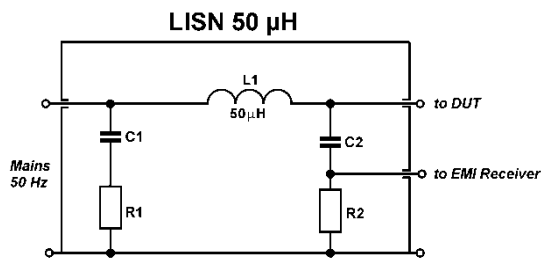
تداخل الکترومغناطیسی از خصوصیات جدایی ناپذیر منابع تغذیه سوئیچینگ است. منابع تغذیه خطی چنین مشکلی ندارند ولی به دلیل رانندمان پایین استفاده از نوع سوئیچینگ ترجیح داده می‌شود زیرا اتلاف انرژی و هزینه کمتری دارند. مشکل تداخل الکترومغناطیسی در این منابع را با بکارگیری روش‌های فیلترینگ مناسب می‌توان تصحیح کرد. با پیشرفت صنعت نیمه هادی، فرکانس کار سوئیچ‌های ترانزیستوری به طرز چشم‌گیری افزایش یافته است این امر موجب کاهش حجم سلف، ترانس، سایر قطعات و در نهایت حجم کلی مدار می‌شود. ولی به موازات آن هارمونیک‌های فرکانس سوئیچینگ به محدوده رادیویی نزدیک‌تر شده و مشکل نویزهای الکترومغناطیسی

جدی‌تر می‌گردد به خصوص در محیط‌هایی که نیازمند امنیت رادیویی و مخابراتی هستند مانند [1]. بحث نویزهای رادیویی در منابع تغذیه سوئیچینگ به دو دسته تشعشعی (Emission) و هدایتی (Conduction) تقسیم‌بندی می‌شوند. نویز تشعشعی از طریق هوا به اطراف پخش می‌گردد. با قرار دادن توری‌های مشبک رسانا که به قفس فارادی (Faraday Cage) مشهورند و اتصال آن به زمین مدار، می‌توان یک مسیر کم امپدانس در مقایسه با هوا برای امواج الکترومغناطیسی ایجاد کرده و مولفه‌های مزاحم را به دام انداخت، به طوری که الباقی توان منتشره کمتر از سطح مجاز استاندارد باشد تا مشکلی برای سایر ادوات مخابراتی ایجاد نشود و محیط امن الکترومغناطیسی برقرار گردد، البته نویز تشعشعی موضوع مرجع [2] مورد بحث مقاله نمی‌باشد. نویز هدایتی از طریق راهیابی مولفه‌های فرکانس بالای جریان مبدل به سیم‌های انتقال ایجاد می‌شود. نویزهای

۱. گروه مهندسی برق، واحد علی‌آباد کتول، دانشگاه آزاد اسلامی، علی‌آباد کتول، ایران

* پست الکترونیک نویسنده مسئول:
eskandarnjad@aliabadiu.ac.ir

نویز را با یک منبع جریان مدل کرده و امپدانس معادل نویز موازی با آن را در نظر نمی‌گیرند. این کار موجب عدم کارایی فیلتر در برخی فرکانس‌ها می‌شود، همچنین احتمال وقوع رزونانس بین اجزای فیلتر و امپدانس نویز وجود دارد. با افزایش فرکانس مبدل، تاثیر امپدانس نویز در تنظیم عناصر فیلتر اهمیت بیشتری پیدا می‌کند [5]. در مقاله حاضر روشی تحلیلی برای تعیین مقادیر اجزای فیلتر هدایتی در هر دو حالت مشترک و تفاضلی ارائه می‌شود، سپس روش پیشنهادی با نرم افزار شبیه‌ساز برای یک مبدل فلای بک آزمایش می‌شود. مبدل فلای بک استعداد خوبی برای ایجاد سطوح ولتاژهای تغذیه مختلف از یک منبع تغذیه واحد مانند باتری را دارد. در انتها با انجام شبیه‌سازی، کارایی فیلتر محک زده می‌شود.



شکل ۲- ساختار شبکه LISN

۲- نویز هدایتی مبدل سوئیچینگ

نویز هدایتی که توسط مبدل سوئیچینگ ایجاد می‌شود به دو مولفه تفاضلی (i_d) و مولفه مشترک (i_c) تقسیم‌بندی می‌شود. معمولاً مولفه مشترک توان بالاتری داشته و تداخل بیشتری ایجاد می‌کند. در صورتی که مقدار کل نویز اندازه‌گیری شده از خطوط مثبت و منفی تغذیه را با i_{N+} و i_{N-} نشان دهیم مولفه‌های تفاضلی و مشترک از رابطه (۱) و (۲) بالعکس از رابطه (۳) تعیین می‌شوند [6].

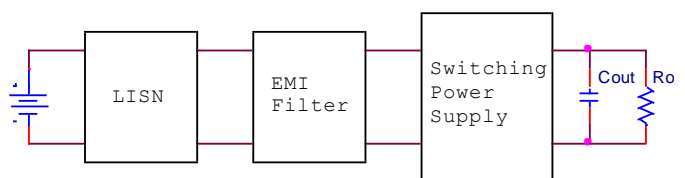
$$i_d = \frac{(i_{N+}) - (i_{N-})}{2} \quad (1)$$

$$i_c = \frac{(i_{N+}) + (i_{N-})}{2} \quad (2)$$

$$i_{N+} = i_c + i_d, \quad i_{N-} = i_c - i_d \quad (3)$$

از دستگاه آنالیزگر طیف فرکانسی (Spectrum Analyzer) برای اندازه‌گیری و نمایش سطح نویز استفاده می‌شود که دو ورودی آن به شبکه LISN متصل می‌شود. ساختار

هدایتی به دو مولفه مشترک (Common Mode) و تفاضلی (Differential Mode) تقسیم می‌گردند. فرض کنید ورودی منبع تغذیه سوئیچینگ به وسیله یک جفت سیم مثبت و منفی به طول چند متر به دو پایانه باتری متصل است. اگر مولفه نویز هدایتی مشترک از منبع تغذیه خارج شده و به سیم انتقال راه یابد این سیم مانند یک آنتن خوب باعث انتشار نویز به محیط اطراف می‌شود یا اینکه نویز راه یافته به سیم به سایر دستگاه‌هایی که از آن سیم تغذیه می‌شوند وارد شده و مشکلاتی برای آن‌ها ایجاد کنند. مولفه‌های تفاضلی نویز هدایتی دارای دامنه یکسان ولی اختلاف فاز ۱۸۰ درجه می‌باشد، یعنی اگر مولفه‌ای در فرکانس معین از سیم مثبت خارج شود همان مولفه با آن فرکانس و دامنه معین در حال ورود از سیم منفی می‌باشد. اما مولفه‌های مشترک نویز هدایتی هم فاز هستند، یعنی از هر دو سیم باهم وارد یا باهم خارج می‌شوند. فیلتر سازگاری الکترومغناطیسی در ورودی مبدل سوئیچینگ قرار می‌گیرد تا مانع از ورود و خروج مولفه‌های نویز هدایتی گردد [3]. منظور از ممانعت ورود، تضعیف دامنه نویز در طیف فرکانس به حدی کمتر از سطح مجاز استاندارد است تا مزاحمتی برای سایر دستگاه‌های اطراف ایجاد نکند. شکل ۱ ساختار عمومی مبدل سوئیچینگ هنگام تست نویز را نشان می‌دهد.



شکل ۱- ساختار عمومی مبدل هنگام تست نویز

برای اندازه‌گیری دامنه مولفه‌های نویز هدایتی از یک مدار استاندارد به نام شبکه تثبیت‌کننده امپدانس خط ($LISN^1$) استفاده می‌شود که بین ورودی مبدل و منبع تغذیه قرار می‌گیرد. در شکل ۲ ساختار مداری این شبکه مشاهده می‌شود [4].

فیلتر سازگاری برای حذف مولفه نویز هدایتی از دو زیر فیلتر یکی برای مولفه مشترک و دیگری برای مولفه تفاضلی تشکیل می‌شود. برخی روش‌های طراحی فیلتر بر اساس آزمایش و خطا استوار بوده و در برخی دیگر منبع

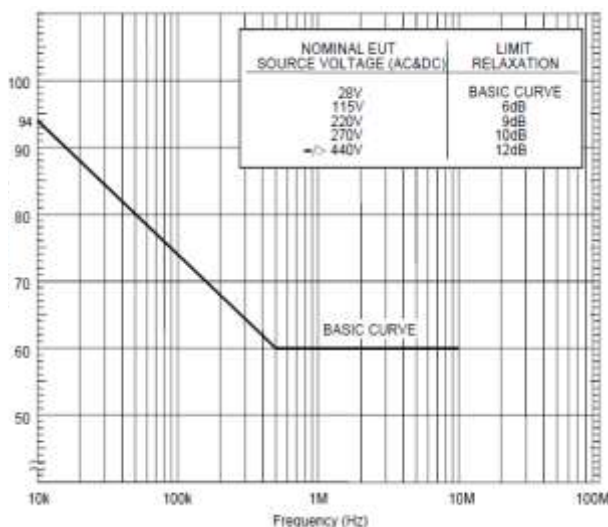
¹ Line Impedance Stabilization Network

هدایتی منتقل شونده از طریق خطوط تغذیه است که از فرکانس 10KHz تا 10MHz را شامل می‌شود [8].

شکل ۴، منحنی استاندارد مخصوص نویز هدایتی را نشان می‌دهد طراحی فیلتر باید طوری باشد تا توان نویز هدایتی اندازه‌گیری شده با شبکه تثبیت کننده کمتر از این منحنی گردد [9]. در ادامه مبدل فلای‌بک جهت شبیه‌سازی معرفی شده سپس نویز هدایتی آن بدون قرارگیری فیلتر ارائه می‌شود در ادامه فیلتر سازگاری با استفاده از روش یاد شده طراحی خواهد شد. در انتها نویز هدایتی مبدل پس از قرارگیری مبدل ارائه شده و کارایی روش پیشنهادی مورد بحث قرار می‌گیرد.

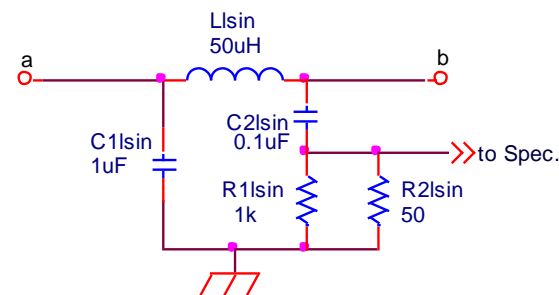
جدول ۱- مقادیر مجاز نویز در بازه‌های مختلف فرکانسی

Requirement	Description
CE101	Conducted Emissions, Power Leads, 30 Hz to 10 kHz
CE102	Conducted Emissions, Power Leads, 10 kHz to 10 MHz
CE106	Conducted Emissions, Antenna Terminal, 10 kHz to 40 GHz
CS101	Conducted Susceptibility, Power Leads, 30 Hz to 150 kHz
CS103	Conducted Susceptibility, Antenna Port, Intermodulation, 15 kHz to 10 GHz
CS104	Conducted Susceptibility, Antenna Port, Rejection of Undesired Signals, 30 Hz to 20 GHz
CS105	Conducted Susceptibility, Antenna Port, Cross-Modulation, 30 Hz to 20 GHz
CS106	Conducted Susceptibility, Transients, Power Leads
CS109	Conducted Susceptibility, Structure Current, 60 Hz to 100 kHz
CS114	Conducted Susceptibility, Bulk Cable Injection, 10 kHz to 200 MHz
CS115	Conducted Susceptibility, Bulk Cable Injection, Impulse Excitation
CS116	Conducted Susceptibility, Damped Sinusoidal Transients, Cables and Power Leads, 10 kHz to 100 MHz
RE101	Radiated Emissions, Magnetic Field, 30 Hz to 100 kHz
RE102	Radiated Emissions, Electric Field, 10 kHz to 18 GHz
RE105	Radiated Emissions, Antenna Spurious and Harmonic Outputs, 10 kHz to 40 GHz
RS101	Radiated Susceptibility, Magnetic Field, 30 Hz to 100 kHz
RS103	Radiated Susceptibility, Electric Field, 2 MHz to 40 GHz
RS105	Radiated Susceptibility, Transient Electromagnetic Field



شکل ۴- منحنی حد مجاز نویز هدایتی طبق استاندارد

داخل شبکه LISN طوری است که مانع از راه‌یابی نویزهای خارجی به دستگاه اندازه‌گیر شده و فقط نویزهای هدایتی منبع تغذیه سوئیچینگ به دستگاه راه می‌یابد. مدل کردن دقیق یک شبکه LISN کمی پیچیده است از مدار شکل ۳ با اطمینان کافی و دقت مناسب برای نمایش شبکه LISN و تحلیل فرکانسی آن استفاده می‌شود.

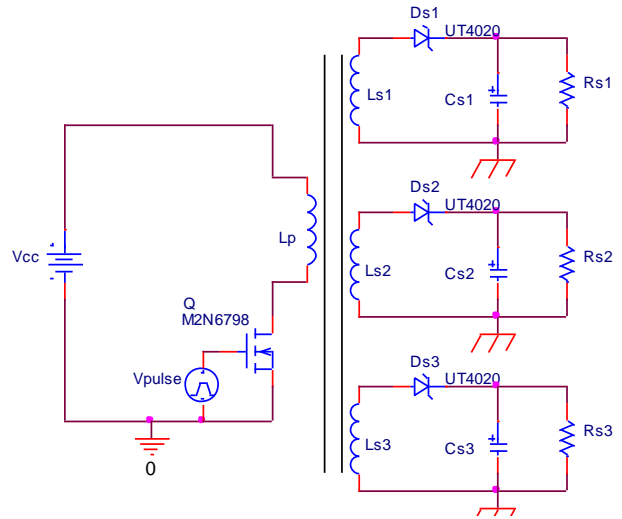


شکل ۳- مدار شبکه LISN

یک جفت از مدار شکل فوق در داخل شبکه LISN وجود دارد که در مسیر جفت سیم تغذیه مبدل مطابق مدار شکل ۳ قرار می‌گیرند. در شکل ۳، گره a در سمت خط تغذیه ورودی و سیم b در سمت مبدل می‌باشد. خازن C1sin به همراه سلف L1sin مانع از ورود نویزهای خارجی و به تبع آن خطا در اندازه‌گیری می‌گردد و خازن C2sin و سلف L1sin مسیری کم امپدانس برای نویزها به طرف دستگاه آنالیزگر طیف ایجاد می‌کند. افت ولتاژ نویزی روی R1sin توسط مقاومت R2sin که بیان‌گر امپدانس استاندارد پراب ورودی دستگاه آنالیزگر است نمایش داده می‌شود. برای محدود ساختن نویزهای رادیویی تولید شده توسط دستگاه‌های مختلف، استانداردهایی وضع شده که حداکثر مجاز دامنه‌های نویز هدایتی و تشعشعی را در بازه معین فرکانس بر دسیبل میکروولت (dbuv) تعیین می‌کند [7]. شرایط این استانداردها در کشورهای مختلف و برحسب اینکه کاربرد دستگاه مورد نظر در محیط خانگی، صنعتی و یا نظامی باشد متفاوت است. با توجه به موضوع پژوهشی در این مقاله از استاندارد STD-MIL-461F استفاده می‌شود که راجع به مقادیر مجاز نویزهای رادیویی هدایتی و تشعشعی در کاربردهای دقیق و حساس است. داده‌های این استاندارد در سال ۲۰۲۰ به روز رسانی شده و خود دارای زیر قسمت‌هایی می‌باشد که در جدول ۱ آورده شده است. سطر دوم جدول یعنی CE102، مربوط به نویز

۳- مبدل فلای‌بک و طرح مداری آن

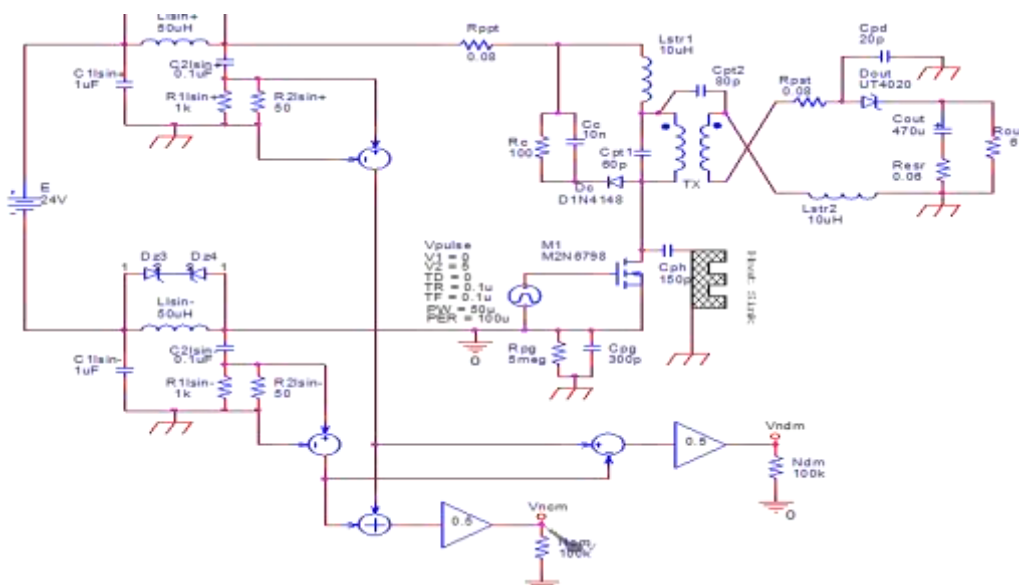
شکل ۵، مبدل فلای‌بک با چندین ولتاژ ثانویه را نشان می‌دهد هرگاه سوئیچ Q وصل شود جریان در اولیه افزایش یافته و انرژی در هسته ترانس ذخیره می‌شود، سپس با قطع سوئیچ انرژی ذخیره شده در هسته به سیم‌پیچ‌های ثانویه منتقل گردیده و به نسبت دور ثانویه سطوح ولتاژهای مختلف تولید می‌گردد [10].



شکل ۵- مدار ساده مبدل فلای‌بک با چند خروجی

شکل ۶، آرایش بسط یافته مدار شکل ۵ است که در آن تا حد امکان عناصر پارازیتی مانند مقاومت سیم‌پیچ‌ها و خازن‌های پراکنده و اندوکتانس اولیه آورده شده‌اند تا نتایج شبیه‌سازی به مقادیر حقیقی نزدیک‌تر گردند.

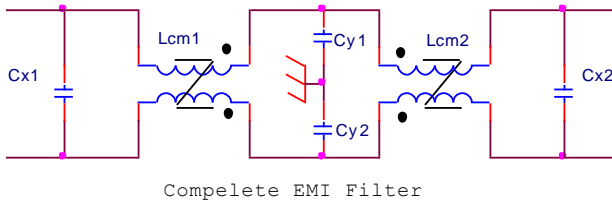
ولتاژ ورودی مبدل ۲۴ ولت بوده و پس از آن بلوک LISN قرار می‌گیرد، شبکه تثبیت کننده LISN برای اندازه‌گیری سطح نویز در ورودی مبدل قرار دارد. دو بخش LISN مشابه، متصل به پایه های تغذیه ورودی قرار دارند که با تعیین مجموع و تفاضل آن‌ها مولفه های نویزی حالت مشترک و تفاضلی ایجاد می‌شوند همانند آنچه که در روابط (۱) و (۲) بیان گردید. به اولیه ترانس مبدل، شاخه کلمپ D_C, C_C, R_C برای میرا ساختن ولتاژهای لحظه‌ای سوئیچ متصل است. برای تحلیل دقیق‌تر، خازن‌های پراکندگی C_{PT1} و C_{PT2} به ترانس سوئیچینگ متصل بوده و اندوکتانس پراکندگی L_{Str1} و L_{Str2} به‌طور سری با آن قرار دارد. خازن‌های C_{PH} و C_{PD} به ترتیب خازن‌های پارازیتی دیود و هیت-سینک هستند. زمین تغذیه با علامتهای GND و زمین بدنه با علامت GND نشان داده شده است. همچنین نماد R_{PG} و C_{PG} ، مقاومت و خازن معادل بین زمین تغذیه و زمین بدنه می‌باشد. خازن‌های پراکندگی نقش مهمی در ایجاد مسیر انتقال برای مولفه هدایتی نویز فرکانس بالا دارند که در شکل ۶ انواع خازن پراکندگی میان اولیه و ثانویه ترانس، ترانزیستور و هیت‌سینک و دیود-بدنه آورده شده تا نتایج شبیه‌سازی به شرایط واقعی نزدیک‌تر گردد. لذا انتظار می‌رود فیلتر EMI طراحی شده جهت سازگاری با استاندارد دقیق‌تر عمل خواهد کرد. ولتاژ خروجی مبدل ۱۲ ولت با جریان ۲ آمپر است و سوئیچ مدار با فرکانس 10kHz کلیدزنی می‌گردد.



شکل ۶- آرایش بسط یافته مبدل فلای بک با اجزای پارازیتی

۴- روش پیشنهادی

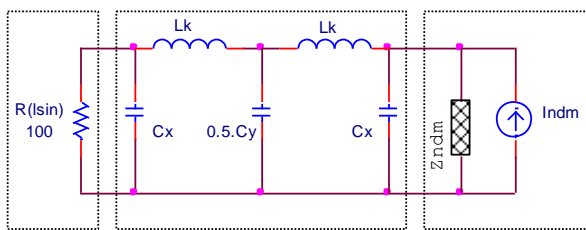
فیلتر سازگاری الکترومغناطیسی برای نویز هدایتی، خود از دو زیر فیلتر یکی برای مولفه تفاضلی و دیگری برای مولفه مشترک تشکیل می‌شود. برای زیر فیلتر تفاضلی از آرایش Π استفاده می‌شود که در شکل ۷ آورده شده است. خازن C_{X1} و C_{X2} در دو طرف موجب اتصال کوتاه شدن مولفه های نویز تفاضلی می‌شوند. همچنین در صورت کافی بودن می‌توان از اندوکتانس نشستی ترانس زیر فیلتر حالت مشترک، به جای L_{DM} استفاده کرد تا نیازی به گذاردن سلف جداگانه ای نباشد. مقدار اندوکتانس نشستی یک ترانس سوئیچینگ حدود 0.5% تا 2.5% اندوکتانس کل آن می‌باشد. در صورتی که این مقدار اندوکتانس نشستی برای جبران سلف زیر فیلتر تفاضلی کافی نباشد می‌توان یک سلف خارجی را نیز به آن اضافه کرد. برای زیر فیلتر مشترک بهتر است از آرایش T استفاده شود، چون اندوکتانس بازوها موجب ایجاد امپدانس بالایی در فرکانس نویز مولفه مشترک می‌گردد. این آرایش در شکل ۸ ملاحظه می‌شود. القای متقابل در ترانس فیلتر حالت مشترک هم-جهت هستند تا با فرض هم‌راستا بودن مولفه مشترک نویز با یکدیگر خنثی گردند. خازن‌های C_{Y1} و C_{Y2} به زمین بدنه دستگاه وصل اند تا مسیر کم امپدانس در مقایسه با خازن‌های پارازیتی ایجاد کنند و به این صورت قسمت بیشتری از نویز از آن‌ها عبور کند. با ترکیب دو زیر فیلتر تفاضلی و مشترک، فیلتر EMC نهایی ایجاد می‌شود. با توجه به کوچک بودن L_{dm} اندوکتانس پراکندگی فیلتر مشترک برای آن کافی است.



Compelete EMI Filter

شکل ۸- ساختار نهایی فیلتر سازگاری الکترومغناطیسی

شکل ۹، مدار معادل نویز کل مبدل در حضور فیلتر EMC و شبکه LISN را برای حالت تفاضلی نشان می‌دهد. عناصری از فیلتر حالت مشترک یا شبکه LISN که به زمین بدنه متصل هستند در برابر مولفه تفاضلی به طور سری مدل می‌شوند.

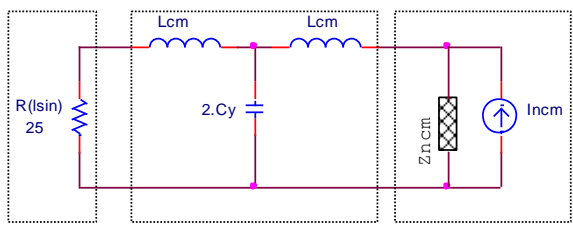


Equivalent DM of LISN Equivalent DM of Filter Equivalent DM of SPS Noise

شکل ۹- مدار معادل نویزی مبدل در حالت تفاضلی

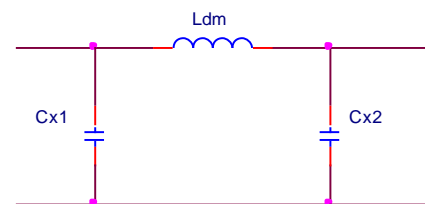
در شکل ۹، نمادهای I_{NDM} و Z_{NDM} به ترتیب معرف منبع نویز و امپدانس نویز تفاضلی مبدل فلای‌بک است. مقدار I_{NDM} متناسب با دامنه تغییرات ولتاژی عناصر نیمه هادی بوده و مقدار Z_{NDM} متناسب با میزان امپدانس پارازیتی و پراکنده در مسیر حلقه مولفه تفاضلی نویز می‌باشد. به عنوان قاعده باید امپدانس خازن C_X به اندازه کافی کوچک‌تر از امپدانس نویز Z_{NDM} باشد و L_K بزرگ‌تر از آن. تا مولفه تفاضلی نتواند از فیلتر عبور کند.

شکل ۱۰، مدار معادل نویزی مبدل در حضور فیلتر EMC و شبکه LISN را در حالت مد مشترک نشان می‌دهد. خازن‌های تفاضلی در این حالت خنثی شده و مقاومت های شبکه LISN نیز موازی می‌گردند، زیرا مولفه های نویز حالت مشترک، زاویه فاز یکسانی دارند.

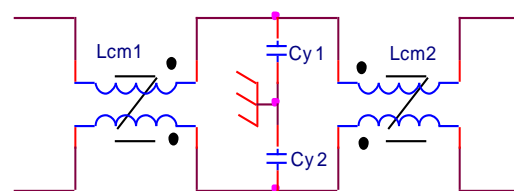


Equivalent CM of LISN Equivalent CM of Filter Equivalent CM of SPS Noise

شکل ۱۰- مدار معادل نویزی مبدل در حالت مشترک



Differential Mode EMI Filter



Common Mode EMI Filter

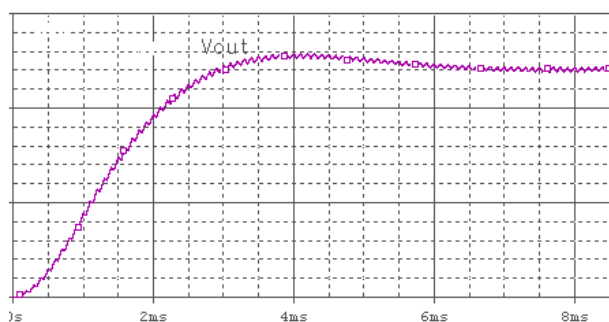
شکل ۷- بخش تفاضلی (بالا) و مشترک (پایین) فیلتر EMI

فرکانس برابر 20dbuv یا ضریب 0.1 تضعیف خواهد بود. مقدار سلف تفاضلی L_{DM} مورد نیاز، بیشتر از اندوکتانس پراکندگی سلف حالت مشترک L_{CM} است، لذا کمبود آن با اضافه کردن سلف خارجی جبران می‌گردد. نهایتاً این طراحی ضریب تضعیف موفقی با حاشیه 0.01 طبق استاندارد ارائه کرده است.

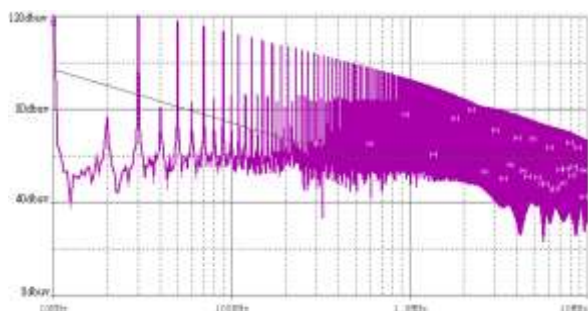
جدول ۲- مقادیر نهایی اجزای فیلتر

قطعه	مقدار
C_{X1}, C_{X2}	0.47uF
C_{Y1}, C_{Y2}	3.3nF
L_{CM1}, L_{CM2}	0.8mH
L_{DM}	50uH

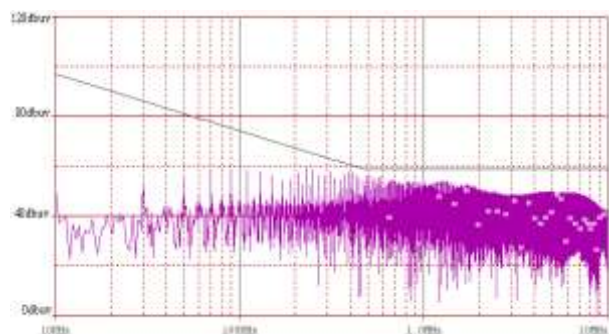
شکل زیر ولتاژ خروجی مبدل هنگام راه‌اندازی می‌باشد.



شکل ۱۱- ولتاژ خروجی مبدل هنگام راه‌اندازی



شکل ۱۲- نویز هدایتی مبدل بدون فیلتر گذاری



شکل ۱۳- نویز هدایتی مبدل پس از فیلتر گذاری

در شکل ۱۰، نمادهای I_{NCM} و Z_{NCM} به ترتیب معادل منبع نویز و امپدانس نویز مشترک مبدل فلای بک است. مقدار I_{NCM} گویای میزان تغییرات جریانی و ولتاژی عناصر نیمه هادی بوده و Z_{NCM} گویای میزان امپدانس پارازیتی و پراکنده در مسیر حلقه مولفه مشترک نویز می‌باشد. به عنوان قاعده باید امپدانس خازن C_Y به اندازه کافی کوچک‌تر از امپدانس نویز Z_{NCM} باشد و نیز L_{CM} بزرگ‌تر از آن باشد تا مولفه مشترک نتواند از فیلتر عبور کند.

۵- نتایج شبیه‌سازی مدار پیشنهادی

برای اجرای شبیه‌سازی نیاز به تعیین مقدار امپدانس نویز مبدل می‌باشد به این منظور کافی است یک مقاومت سری با شبکه LISN گذاشته و به تدریج افزایش یابد، هرگاه که دامنه نویزی که روی مقاومت LISN افت می‌کند نصف شود در این حالت اندازه امپدانس نویز برابر مقاومت خواهد بود. در هر صورت پس از اندازه‌گیری امپدانس نویز، خازن‌های تفاضلی X باید امپدانسی به اندازه کافی کوچک‌تر از امپدانس نویز داشته باشد و سلف مشترک L_{CM} امپدانسی به مراتب بزرگ‌تر از آن ایجاد کند. قطب‌های فیلتر نویزهای تفاضلی و مشترک که از درجه سوم می‌باشد. مقادیر نهایی اجزای فیلتر را در جدول ۲ می‌بینید. توصیه می‌شود خازن‌ها از نوع میکا و با عناصر پارازیتی کم انتخاب شوند و جهت میرایی رزونانس احتمالی، مقاومت صد اهمی با خازن C_{X1} موازی می‌گردد.

جهت اطمینان از درستی طراحی مبدل، ولتاژ خروجی آن در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود. ولتاژ خروجی دائم برابر ۱۲ ولت بوده که در مدت حدود ۶ میلی ثانیه به آن می‌رسد. نمودارهای ۱۲ و ۱۳ نویز هدایتی مبدل سوئیچینگ به ترتیب قبل و بعد از فیلترگذاری را از فرکانس 10 KHz تا 10 MHz نشان می‌دهد. خط راست به رنگ سیاه در مرکز محور حد مجاز استاندارد را بیان می‌کند. همان‌طور که می‌بینید در نمودار ۱۲، بخش اعظم مولفه نویز فراتر از حد مجاز استاندارد بوده که پس از فیلترگذاری در نمودار ۱۳ این مشکل با حاشیه امنیت مناسب حل شده است. مقادیر فیلتر با ید طوری تعیین شود تا در فرکانس مشخص، میزان تضعیف مطلوب را ایجاد کند. مثلاً اگر دامنه نویز در یک فرکانس برابر 80dbuv بوده و حد مجاز استاندارد برابر 60dbuv باشد مقدار مطلوب تضعیف در آن

۶- نتیجه گیری

EMC با مدل سازی متوسط مداری به دست می آید. در انتها شبیه سازی برای مبدل نمونه در محیط نرم افزار Orcad/Spice انجام شده که گویای درستی کارکرد مبدل در شرایط دائم و صحت طراحی فیلتر پیشنهادی می باشد. به عنوان مقایسه با کارهای قبلی، در طراحی ارائه شده در [11]، دامنه نویزهای هدایتی در برخی نقاط از سقف استاندارد تجاوز می کند و بالاتر بودن فرکانس سوئیچینگ آن تلفات کلیدزنی را بیشتر کرده است، همچنین در [12] تعداد عناصر فیلتر بیشتر و مدار آن پیچیده تر است که خود منجر به افزایش هزینه ساخت و کاهش راندمان خواهد گردید و با اضافه کردن قطب جدید به تابع تبدیل سیستم حاشیه پایداری حلقه کنترلی کاهش خواهد یافت. در انتها با توجه به اینکه تمامی اجزای فیلتر پیشنهادی در این مقاله از نوع غیرفعال هستند لذا پیشنهاد می شود در کاربردهای ویژه و جهت حصول حاشیه تضعیف بیشتر نویز، از عناصر فعال نیز در ساختار فیلتر استفاده گردد.

با افزایش فرکانس سوئیچینگ کلیدهای نیمه هادی، بحث سازگاری الکترومغناطیسی در منابع تغذیه اهمیت بیشتری پیدا کرده است. تمرکز این مقاله روی طراحی فیلتر نویز رادیویی هدایتی می باشد که از مبدل به خطوط تغذیه منتقل شده و مانند آنتن از آن تشعشع می یابد. در این مقاله یک روش تحلیلی و موثر در طراحی فیلتر EMC معرفی گردید که بر اساس طراحی جداگانه زیر فیلترهای تفاضلی و مشترک بنا نهاده شده است. با قرار دادن شبکه LISN و اتصال آن به آنالیزگر طیف رادیویی می توان مقدار تضعیف لازم در هر فرکانسی را تعیین کرد، تا مبدل سوئیچینگ شرایط مطلوب استاندارد مربوطه را تامین کند. سپس با توجه به تضعیف لازمه، مقادیر دقیق اجزای زیر فیلترهای تفاضلی و مشترک به طور جداگانه محاسبه می شوند. آنگاه با ترکیب دو زیر فیلتر، مدار نهایی فیلتر

مراجع

- [1] D. E. Quevedo and G. C. Goodwin, "Control of EMI from Switch-Mode Power Supplies via Multi-Step Optimization", Proceedings of the 2004 American Control Conference, USA, January 2004, pp. 1123-1128.
- [2] A. Manjunath and M.L. Sudheer, "Conducted EMI Model for Flyback PFC Converter", International Journal of Recent Technology and Engineering, Vol. 8, No. 3, 2019, pp. 6916-6923.
- [3] J. Yao, Y. Li, Z. Ma and Sh. Wang, "Advances of Modeling and Reduction of Conducted and Radiated EMI in Flyback Converters", IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), USA, 2020, pp. 834-839.
- [4] Y. Li, H. Zhang, S. Wang, H. Sheng, C. P. Chng and S. Lakshmikanthan, "Investigating Switching Transformers for Common Mode EMI Reduction to Remove Common Mode EMI Filters and Y-Capacitors in Flyback Converters," IEEE Journal of Emerging and Power Electronics, Vol. 6, 2018, pp. 2287-2301.
- [5] Y. Li, S. Wang and H. Sheng, "Investigate and Reduce Capacitive Couplings in a Flyback Adapter With a DC-Bus Filter to Reduce EMI", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 35, 2020, pp. 6963-6973.
- [6] J. Yao, Y. Li, S. Wang, X. Huang and X. Lyu, "Analysis and Reduction of Radiated EMI in High-Frequency GaN IC-based Active Clamp Flyback Converters", IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2020, pp. 664-671.
- [7] M. R. Yazdani, H. Farzanehfard, and J. Faiz, "EMI Analysis and Evaluation of an Improved ZCT Flyback Converter", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 26, 2011, pp. 2326-2334.
- [8] S. Tammana and S. Yellampalli, "EMI Design for DC-DC Converters", International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE), Vol. 7, March 2019, pp. 74-79.
- [9] H. Li et al., "Conducted EMI simulation of switched mode power supply", IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, USA, 2009, pp. 155-160.
- [10] L. Xie, X. Ruan, H. Zhu and Y. Lo, "Common-Mode Voltage Cancellation for Reducing the Common-Mode Noise in DC-DC Converters", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 68, No. 5, 2021, pp. 3887-3897.
- [11] Ashritha M. and M L Sudheer, "Conducted EMI Model for Flyback PFC Converter", International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE), Vol. 8, No.3, 2019, pp. 6916-6923.

[12] I. Lou, Q. Sun, W. You and Y. Sh, "Analytical Calculation of Conducted EMI in Flyback Converters", Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility & Signal Integrity (APEMC), 2016, pp. 241-248.

Design and simulation of an EMC filter for a flyback converter

Atila Skandarnezhad^{1,*}, AbdolAziz Kaltah, Noruz Abdollahi

1. Department of Electrical Engineering, Aliabad Katoul Branch, Islamic Azad University, Aliabad Katoul, Iran.

Email: eskandarnejad@aliabadiu.ac.ir

*Corresponding Author.

ABSTRACT

Electronic equipment's require supply voltage with different values that can create a stabilized voltage at the output in the conditions of changing the source voltage and load current. The fly-back switching converter is a suitable option for producing different voltages in such conditions. Due to the high frequency switching, the electromagnetic components with significant power are directed from the converter side to the power lines and also radiated to the surrounding space, which causes electromagnetic pollution and EMI radio interference. In this article, an effective and practical method for designing and adjusting the EMC electromagnetic compatibility filter is presented. Adjusting the filter values is based on averaging the noise circuit by considering its equivalent impedance. In most of the proposed methods for filter design, the noise source is assumed as an ideal current source and the equivalent impedance of the noise is not considered. This reduces the accuracy of the design and prevents the correct filtering of the components in some frequencies. In this article, the circuit averaging of the entire structure of the converter is done by considering the parasitic elements, because the closer the presented model is to the real structure, the more effective the filter is, and the more effectively it removes radio interference components. In the end, the software simulation shows the accuracy and efficiency of the proposed method in EMI filter design.

Keywords:

Flyback converter, Electromagnetic compatibility, Noise model, Conducted mode filter
