

## ارزیابی و کاهش تداخل الکترومغناطیسی هدایتی در مبدل سوئیچینگ نوع فوروارد

محمد روح اله یزدانی<sup>(۱)</sup> - ناهید امینی فیل آبادی<sup>(۲)</sup>

(۱) استادیار - گروه برق، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد خوراسگان

(۲) کارشناس ارشد - شهرک علمی و تحقیقاتی اصفهان

تاریخ دریافت: زمستان ۱۳۸۹

تاریخ پذیرش: زمستان ۱۳۹۰

**خلاصه:** در مبدل‌های سوئیچینگ قدرت به خاطر تغییرات سریع ولتاژ و جریان، تداخل الکترومغناطیسی (EMI) ایجاد می‌شود. از جمله توپولوژیهای پرکاربرد سوئیچینگ در منابع تغذیه توان پایین و متوسط، مبدل سوئیچینگ فوروارد است که در آن نیاز به بازنشانی ترانسفورمر است. در این مقاله، برای پیش‌بینی سطح EMI هدایتی، ابتدا یک مبدل فوروارد با سیم‌پیچ بازنشاننده مدل‌سازی می‌شود. جهت ارزیابی نتایج مدل‌سازی، نتایج عملی اندازه‌گیری EMI نیز ارائه می‌شود. برای انتخاب بهینه روش بازنشانی مناسب از دید EMI، سه روش مختلف بازنشانی هسته به کمک نتایج عملی با هم مقایسه می‌شود. پس از انتخاب روش بازنشانی مناسب، دو روش کاهش EMI در این مبدل فوروارد پیشنهاد شده و تاثیر عملی کاهش EMI مبدل ارائه می‌شود.

**کلمات کلیدی:** تداخل الکترومغناطیسی، سازگاری الکترومغناطیسی، مبدل سوئیچینگ فوروارد، EMI.

### ۱- مقدمه

بخش تغذیه سیستم‌های الکتریکی و الکترونیکی به کمک رگولاتورهای خطی و یا مبدل‌های سوئیچینگ پیاده‌سازی می‌شود. مبدل‌های سوئیچینگ به دلیل بازده بالاتر نسبت به رگولاتورهای خطی به خصوص در توان‌های بالا ترجیح داده می‌شوند. ولی مبدل‌های قدرت سوئیچینگ به دلیل تغییرات سریع ولتاژ و جریان، تداخل الکترومغناطیسی ایجاد می‌کنند که می‌تواند در عملکرد وسایل الکترونیکی اختلال ایجاد کند. در این خصوص استانداردهای بین‌المللی نظیر استاندارد CISPR تدوین شده که باید مبدل برای قرار گرفتن زیر محدوده مجاز استانداردهای سازگاری الکترومغناطیسی (EMC) طراحی شود [۱]. از جمله مبدل‌های سوئیچینگ، مبدل فوروارد است که در منابع تغذیه توان پایین کاربرد وسیعی دارد. در [۲]، EMI هدایتی یک مبدل فوروارد دو سوئیچ که در آن بازنشانی هسته از طریق سیم پیچ اولیه ترانسفورمر و دیود انجام می‌شود، مدل‌سازی و بررسی شده است. هرچند تحقیقاتی در زمینه توپولوژی فوروارد ارائه شده که در آنها پتانسیل کاهش EMI وجود دارد [۲-۳]، ولی بررسی

تأثیر روش‌های مختلف بازنشانی هسته بر EMI مبدل نیز باید مدنظر قرار گیرد. در این مقاله، سه روش بازنشانی هسته از دید EMI مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ادامه، پس از معرفی مسأله تداخل الکترومغناطیسی در مبدل سوئیچینگ قدرت و نحوه اندازه‌گیری آن، روش مدل‌سازی مبدل فوروارد از دید EMI ارائه می‌شود که در آن، علاوه بر پارامیت‌های قطعات، پارامیت‌های مهم مسیرهای بورد مدار چاپی نیز لحاظ شده است. به کمک مدل‌سازی انجام شده، سطح طیف EMI پیش‌بینی می‌شود. نتایج اندازه‌گیری عملی EMI هدایتی برای ارزیابی مدل شبیه‌سازی و نیز مقایسه سه روش بازنشانی هسته آورده شده است. پس از انتخاب روش بازنشانی بهینه از دید EMI، برای کاهش مؤثر EMI، تأثیر روش کاهش تداخل الکترومغناطیسی با پیاده‌سازی عملی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

## ۲- EMI در مبدل های سوئیچینگ

در رابطه (۳)، حداکثر جریان سیم پیچ اولیه و حداکثر جریان سوئیچ است. مقدار عملی  $\Delta V_R$  نیز 5٪ تا 10٪ ولتاژ  $V_R$  است [۸]. مقدار خازن مدار باز نشاننده نیز از رابطه (۴) محاسبه می شود که در این رابطه،  $\Delta t$  زمان تخلیه خازن مدار باز نشاننده RCD می باشد که بر اساس  $D=0.33$  و فرکانس سوئیچینگ بدست آمده است. مقادیر طراحی شده مدار باز نشاننده RCD شامل مقاومت  $300\Omega$  و خازن  $210nF$  با دیود MUR460 می باشد. لازم به توضیح است که بر اساس این طراحی، تأثیر تلفات مدار باز نشاننده بر بازده مبدل، کم است.

## ۴- مدل سازی مبدل فوروارد

برای پیش بینی سطح EMI قبل از ساخت مبدل، نیاز است که عناصر پارازیتی مدار استخراج شوند [۱۰]. منابع و مسیرهای EMI شامل سه دسته عناصر پسیو، اکتیو و مدار چاپی (شامل چیدمان قطعات) است. در خصوص دسته اول، به عنوان مثال برای خازن، مقدار ESL و ESR، اثر خازنی را در فرکانس های بالای نویز تضعیف می کند [۱۱]. در ترانسفورمر، خازن میان سیم پیچی نقش مهمی در انتشار EMI مدار دارد [۱۲] که در این مقاله، برای ترانسفورمر پیچیده شده، علاوه بر مقدار سلف و مقاومت سیم پیچ اولیه، باز نشاننده و ثانویه، خازن های پارازیتی مابین سیم پیچی ها توسط LCR متر اندازه گیری شده است. در جریان نویز مود مشترک، خازن پارازیتی درین به زمین مدار، نقش اساسی دارد که در این مبدل توسط LCR متر در حدود  $10pF$  اندازه گیری شد. پس از ساخت مدار چاپی، مقاومت و سلف هر مسیر توسط LCR متر اندازه گیری شده است. به عنوان نمونه برای مسیر درین-اولیه ترانسفورمر، سلف حدود  $0.047\mu H$  و مقاومت در حدود  $1m\Omega$  به دست آمد. پس از استخراج پارازیت های هر مسیر مدار چاپی، مدل PCB به انضمام مدل قطعات پسیو و اکتیو در نرم افزار OrCAD16 اعمال شد که شماتیک این مدل در شکل (۴) (طرف اولیه) دیده می شود. همچنین برای مدل سازی EMI هدایتی، مدل مداری LISN شکل (۱) نیز در نرم افزار پیاده سازی شده است.

EMI هدایتی اندازه گیری شده در شبیه سازی از دو سر مقاومت های  $50\Omega$  متصل به LISN ( $R_S$  در شکل (۱)) که در حقیقت امپدانس ورودی اسپکترا آنالایزر است، به دست می آید [۴]. برای طیف فرکانسی EMI باید تبدیل فوریه این ولتاژ را در نظر گرفت که در شکل (۵) تبدیل فوریه آن (واحد ولت) تا فرکانس 30MHz نشان داده شده است. از آنجا که حدود مجاز استانداردهای EMC بر حسب dB $\mu V$  بیان می شود، برای مقایسه با استاندارد می توان با استفاده از رابطه (۵)، تبدیل سطح EMI در یک فرکانس به dB $\mu V$  را انجام داد.

$$dB\mu V = 20 \log\left(\frac{V}{\mu V}\right) \quad (5)$$

طبق شکل (۵)، پیک طیف در فرکانس سوئیچینگ یعنی 130KHz دارای مقدار  $81.8dB\mu V$  است. همچنین طبق شکل (۵-ب) در فرکانس 2.6MHz، پیک اصلی طیف EMI به  $94.7dB\mu V$  رسیده است.

تداخل الکترومغناطیسی به دو دسته هدایتی و تشعشعی تقسیم می شود [۴] که در این مقاله بر بخش هدایتی تمرکز شده است. EMI هدایتی شامل مود تفاضلی (DM) و مود مشترک (CM) است که در شکل (۱)، مسیر جریان آن ها نشان داده شده است. طبق شکل، EMI هدایتی از طریق سیم کشی های مشترک نظیر خطوط تغذیه انتقال می یابد. انتشار EMI تشعشعی که همان انتشار میدان الکترومغناطیسی است، از طریق محیط فیزیکی صورت می گیرد. اندازه گیری EMI هدایتی با شبکه تثبیت امپدانس خط (LISN) انجام می شود. طبق شکل (۱)، LISN جریان های انتشاری هدایتی با فرکانس بیش از منبع تغذیه را مجبور می کند که از میان کوپل خازن  $C_C$  و مقاومت  $R_S$  جاری شود که دو سر این مقاومت به اسپکترا آنالایزر متصل می شود.

## ۳- طراحی و ساخت مبدل سوئیچینگ فوروارد

مشخصات مبدل فوروارد طراحی شده در جدول (۱) خلاصه شده است [۶،۵]. سه روش برای جلوگیری از اشباع ترانسفورمر مبدل فوروارد شامل استفاده از سیم پیچ باز نشاننده، باز نشاننده RCD و دیود-زتر در این مقاله مورد ارزیابی قرار می گیرد که در شکل (۲)، این سه روش نشان داده شده است.

در این مبدل، برای دیودها از دیود سریع BYV32 و برای سوئیچ از ماسفت قدرت IRFP460 استفاده شده است. نتایج اندازه گیری عملی جریان (به کمک ولتاژ دو سر یک مقاومت  $R_{sense} = 0.5\Omega$ ) و ولتاژ سوئیچ مبدل فوروارد در شکل (۳) آورده شده است که با توجه به آن صحت طراحی مبدل تایید می شود. طبق شکل، در زمان خاموش شدن سوئیچ، پرتوهای ولتاژ و جریان وجود دارد که به دلیل جذب انرژی سلف ناشی ترانسفورمر توسط خازن سوئیچ در این زمان است. در این مبدل، تعداد دور سیم پیچ اولیه و سیم پیچ باز نشاننده ترانسفورمر برابر در نظر گرفته شده است، در نتیجه حداکثر مقدار D برابر ۰/۴ است [۶]. مدار باز نشاننده RCD که در شکل (۲-ب) دیده شد با توجه به روابط زیر طراحی شده است [۷،۸،۹].

$$R_{RCD} = \frac{V_R^2}{\left[ \frac{1}{2} I_m I_{Lm}^2 + \frac{1}{2} L_{LK} (I_{Lm} + n I_O)^2 \right] \cdot f_{sw}} \quad (1)$$

رابطه فوق با توجه به اینکه انرژی سلف ناشی و مغناطیس کنندگی در زمان باز نشانی باید با انرژی تلف شده در مقاومت برابر باشد، به دست آمده است. در این رابطه،  $V_R$  ولتاژ مقاومت مدار باز نشاننده RCD است و  $I_P$  حداکثر جریان سوئیچ بر اساس شکل (۳-ب) است که بر اساس دو رابطه زیر بیان می شوند:

$$V_R = \frac{\bar{D} V_{in}}{(1-D)} \quad (2)$$

$$I_P = I_{Lm} + n I_O \quad (3)$$

$$C_{RCD} = \frac{V_R \Delta t}{\Delta V_R R_{RCD}} \quad (4)$$

## ۵- اندازه گیری EMI هدایتی مبدل فرورارد

برای بررسی صحت روش شبیه‌سازی انجام شده، در این بخش نتایج عملی ارائه شده است. در شکل (۶) منبع تغذیه ساخته شده بر اساس طراحی مشاهده می‌شود. برای این کار EMI هدایتی مبدل فرورارد با سیم‌پیچ باز نشاننده هسته به کمک نمونه LISN ساخته شده و اسپکتروم آنالایزر اندازه‌گیری شد که در شکل (۷) مشاهده می‌شود. برای مقایسه طیف EMI اندازه‌گیری شده با حدود استاندارد، حد استاندارد CISPR 22 بر روی شکل (۷-ب) نشان داده شده است.

لازم به ذکر است در استاندارد CISPR 22 (کلاس A بخش 15) در گستره 10kHz-150kHz محدودیتی روی سطح EMI تعریف نشده است [۴]. بر اساس نتایج اندازه‌گیری، پیک EMI در فرکانس 4.8MHz به مقدار  $90\text{dB}\mu\text{V}$  رسیده است. با توجه به شکل (۷) دیده می‌شود که مدل‌سازی توانسته است با حدود  $5.2\%$  خطا، مقدار پیک EMI را نشان دهد. همچنین محدوده فرکانسی وقوع پیک اصلی به خوبی توسط مدل پیش‌بینی شده است. در سایر فرکانس‌ها، طیف EMI شبیه‌سازی، تغییرات نسبتاً مشابهی با طیف اندازه‌گیری شده در اکثر گستره فرکانسی دارد. علاوه بر مسائل مربوط به دقت شبیه‌سازی، تفاوت‌های موجود بین نتایج مدل‌سازی و شبیه‌سازی به دلیل صرف‌نظر کردن از پارازیت‌های کابل‌ها، LISN و خازن‌های مسیره‌های مدار چاپی در مدل است که به دلیل جلوگیری از پیچیده شدن مدل صرف‌نظر شده‌اند. در خصوص میزان EMI در فرکانس سوئیچینگ، پیک در فرکانس  $130\text{kHz}$  به مقدار  $83\text{dB}\mu\text{V}$  رسیده است که در مقایسه با مقدار شبیه‌سازی تنها در حدود  $1.5\%$  خطا را نشان می‌دهد. برای بررسی تأثیر روش‌های مختلف باز نشانی هسته بر روی EMI، در این مقاله مقایسه عملی طیف‌های EMI با استفاده از سه روش باز نشانی هسته مدنظر قرار گرفته است که در نمودار (۱) بر اساس نتایج اندازه‌گیری ارائه شده است.

با توجه به نمودار (۱) مشاهده می‌شود، هر چند سیم پیچ باز نشاننده از دید تلفات بهترین حالت است، ولی از دید EMC، در مجموع، مدار باز نشاننده RCD کارایی بهتری دارد. با قرار دادن مدار باز نشاننده RCD در مبدل فرورارد در محدوده فرکانسی 6-9MHz و 27-30MHz EMI مبدل زیر حد مجاز استاندارد CISPR22 قرار می‌گیرد.

بررسی نتایج عملی نشان می‌دهد که EMI مبدل با سیم پیچ باز نشاننده در محدوده 150kHz-18MHz نسبت به دو حالت دیگر بیشتر است که از جمله دلایل آن می‌توان به کوپل‌های ناخواسته مغناطیسی و همچنین وجود سلف ناشی از این سیم‌پیچ اشاره کرد که باعث وقوع تشدیدهای ناخواسته با دیگر عناصر پارازیتی مبدل می‌شود. لازم به ذکر است که در هر سه روش باز نشانی، مقدار طیف EMI مبدل در فرکانس  $130\text{kHz}$  مطابق شکل (۷-الف) در حدود  $83\text{dB}\mu\text{V}$  است.

## ۶- پیاده‌سازی دو روش کاهش EMI

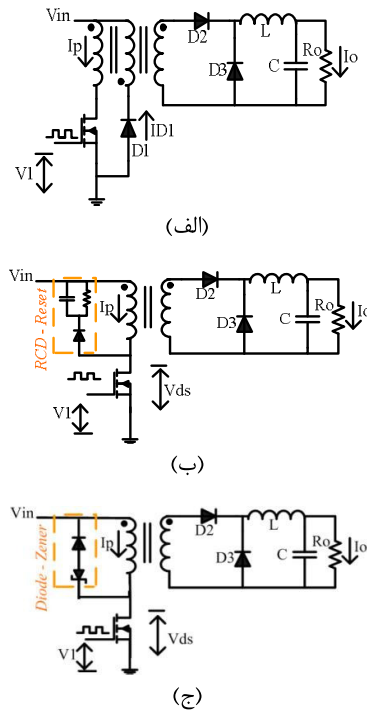
هر چند باز نشاننده RCD در مقایسه با دو روش باز نشانی دیگر، در مجموع سطح EMI کمتری در مبدل دارد و حتی در برخی محدوده‌های فرکانسی، استاندارد را برآورده می‌کند، ولی برای برآورده شدن کامل استاندارد نیاز به پیاده‌سازی روش‌های کاهش EMI است. با این حال، مبدل با روش باز نشانی RCD، پتانسیل برآورده کردن استاندارد را با روش‌های ساده‌تر کاهش EMI نسبت به دو روش دیگر دارد. در [۱۳]، روش‌های کاهش EMI دسته‌بندی و مرور شده است. در این مقاله دو روش کاهش EMI یعنی قرار دادن اسنابر سوئیچ و استفاده از فیلتر EMI بر روی مبدل فرورارد با مدار باز نشاننده RCD به عنوان یک راه‌حل مؤثر مورد ارزیابی قرار گرفته است. اسنابر سوئیچ برای کاهش  $dv/dt$  و  $di/dt$  سوئیچ IRFP460 استفاده شده است. مقادیر طراحی شده اسنابر سوئیچ با رویکرد تلفات کم شامل مقاومت  $300\Omega$  و خازن  $3.3\text{nF}$  با دیود MUR460 می‌باشد. برای بررسی تأثیر اسنابر سوئیچ بر روی EMI، مقایسه عملی طیف‌های EMI در نمودار (۲) بر اساس نتایج اندازه‌گیری ارائه شده است. با توجه به نمودار (۲) مشاهده می‌شود، هر چند اسنابر سوئیچ باعث کاهش طیف EMI در محدوده 15-27MHz می‌شود، اما استانداردهای مورد نظر را به طور کامل برآورده نمی‌کند. در نتیجه برای قرار گرفتن زیر حد مجاز استاندارد، یک فیلتر EMI در ورودی مبدل فرورارد با مدار باز نشاننده RCD قرار گرفت، مدار فیلتر EMI مورد استفاده در این مقاله در شکل (۸) آورده شده است. سپس طیف EMI مجدداً اندازه‌گیری شد که در شکل (۹) نتایج اندازه‌گیری نشان داده شده است.

با توجه به شکل (۹) مشاهده شد با استفاده از روش فیلتر EMI طیف مبدل تنها در محدوده 150-450kHz افزایش یافته و خارج از محدوده استاندارد CISPR 22 Class A می‌باشد و در بقیه محدوده فرکانسی استاندارد موردنظر برآورده شده است. برای استاندارد CISPR 22 Class A می‌توان از دیگر روش‌های ساده کاهش EMI تنها برای زیر محدوده 450kHz استفاده کرد.

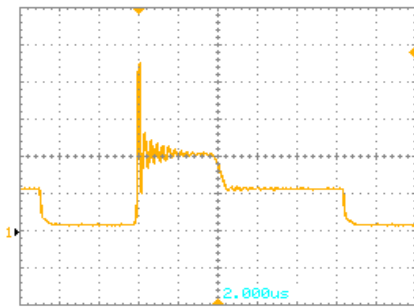
در این مقاله همچنین تأثیر تلفیق دو روش مزبور کاهش EMI یعنی اسنابر و فیلتر بررسی شده است که نتیجه اندازه‌گیری EMI در این حالت در شکل (۱۰) آورده شده است. با توجه به شکل (۱۰) مشاهده می‌شود با تلفیق این دو روش کاهش EMI، طیف EMI در محدوده 15-27MHz نسبت به حالتی که تنها از فیلتر EMI استفاده شده است به میزان چشم‌گیری کاهش می‌یابد.

## ۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله، روش مدل‌سازی یک مبدل سوئیچینگ فرورارد از دید EMI با لحاظ استخراج پارازیت‌های قطعات و مسیره‌های مدار چاپی ارائه شد. بر مبنای این مدل، طیف EMI هدایتی شبیه‌سازی شد. به کمک LISN ساخته شده، EMI گرفته شده از خط مثبت ورودی مبدل توسط اسپکتروم آنالایزر اندازه‌گیری شد و نتایج مدل‌سازی با اندازه‌گیری مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت که بیانگر کارایی مناسب



شکل (۲): الف) مبدل فرورارد با سیم پیچ بازنشاندن ب) مبدل فرورارد با مدار بازنشاندن RCD ج) مبدل فرورارد با مدار بازنشاندن Diode - Zener  
Fig. (2): Forward converter with a) Reset winding b) RCD reset c) Diode-zener reset



الف): محور افقی: 1μs/div محور عمودی: 50V/div

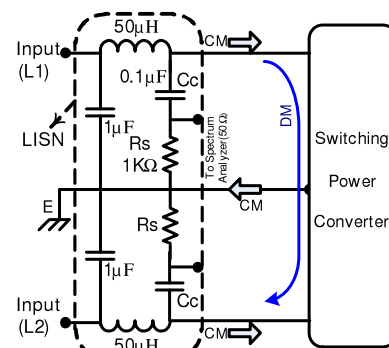


ب): محور افقی: 1μs/div محور عمودی: 0.5 A/div

شکل (۳): الف) شکل موج ولتاژ سوئیچ با سیم پیچ بازنشاندن ب) شکل موج جریان سوئیچ با سیم پیچ بازنشاندن

Fig. (3): a) Switch voltage waveform b) Current voltage waveform of forward converter with reset winding

مدل خصوصاً در پیش‌بینی پیک اصلی طیف EMI بود. همچنین سه روش بازنشانی هسته از دید EMI در توپولوژی فرورارد ارزیابی و مقایسه شد که نشان داد سطح کلی طیف EMI مبدل با مدار بازنشاندن RCD در مقایسه با دو مدار بازنشاندن دیگر کمتر است. برای کاهش بیشتر EMI و برآورده شدن استاندارد، دو روش کاهش تداخل الکترومغناطیسی یعنی فیلتر EMI و اسنابر سوئیچ در مبدل استفاده شد. نتایج عملی نشان داد که می‌توان با استفاده از فیلتر EMI استاندارد CISPR 22 Class A را در مبدل فرورارد با مدار بازنشاندن RCD برآورده کرد و تنها در محدوده 150-450kHz طیف مبدل خارج از محدوده استاندارد CISPR 22 Class A می‌باشد که می‌توان از دیگر روش‌های ساده کاهش EMI تنها برای زیر محدوده 450kHz استفاده کرد. همچنین با تلفیق این دو روش کاهش ساده و مؤثر، طیف EMI مبدل در محدوده 15-27MHz نسبت به حالتی که تنها از فیلتر EMI استفاده شد به میزان چشمگیری کاهش یافت. روش مدل‌سازی پیشنهادی و نیز تلفیق روش‌های کاهش EMI مطرح شده در دیگر مبدل‌های سوئیچینگ نیز قابل استفاده است.

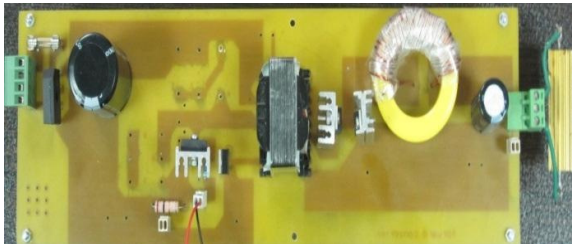


شکل (۱): مسیر مود تفاضلی و مشترک به همراه LISN استاندارد CISPR22  
Fig. (1): DM and CM paths and CISPR22 LISN

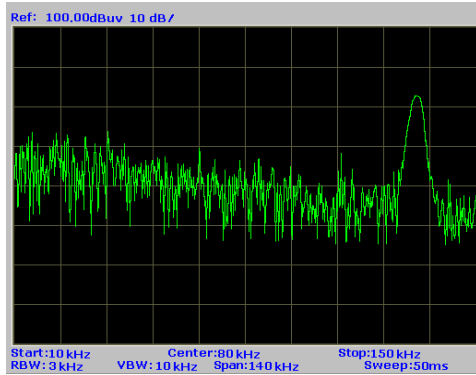
Table (1): Forward converter specification

جدول (۱): مشخصات مبدل فرورارد

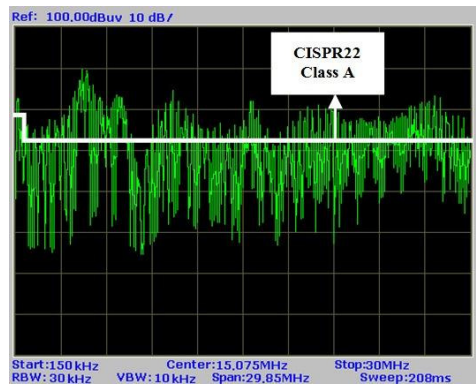
Main Switch	IRFP 460
Diode	BYV32
$f_s$	130kHz
$L_p, R_p$	149μH, 61mΩ
$L_{Reset}, R_{Reset}$	146μH, 60mΩ
$L_S, R_S$	96μH, 12mΩ
$C_o$	100μF
$L_o$	80 μH
D	0.33



شکل (۶): تصویر بخش قدرت مبدل سوئیچینگ فرورارد ساخته شده  
Fig. (6): Photo of the switching converter prototype- power section



(الف)



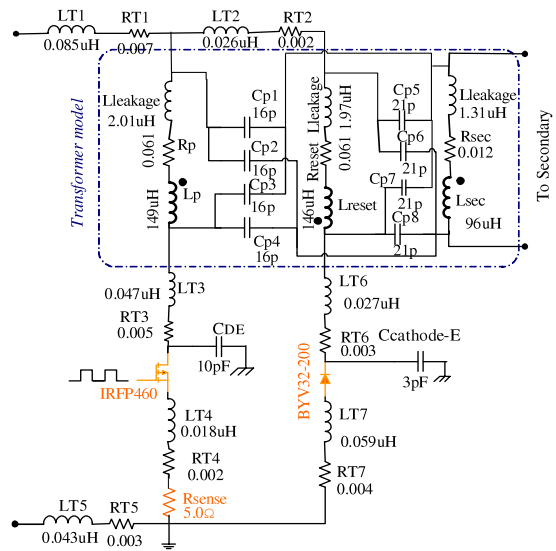
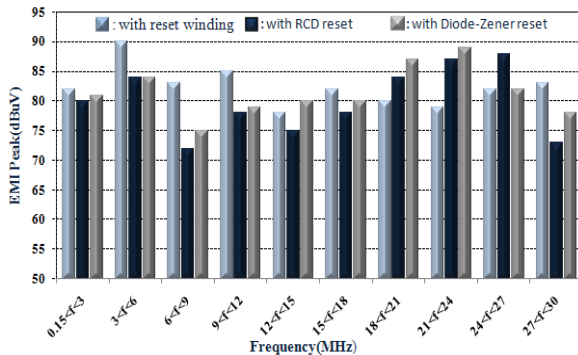
(ب)

شکل (۷): طیف EMI مبدل سوئیچینگ فرورارد (الف) فرکانس - 10kHz - 150 kHz (ب) فرکانس 150 kHz - 30MHz (محور عمودی- 20-100dB $\mu$ V)

Fig. (7): EMI spectrum of forward converter a) 10kHz - 150 kHz b) 150kHz - 30MHz (vertical scale: 20-100 dB $\mu$ V)

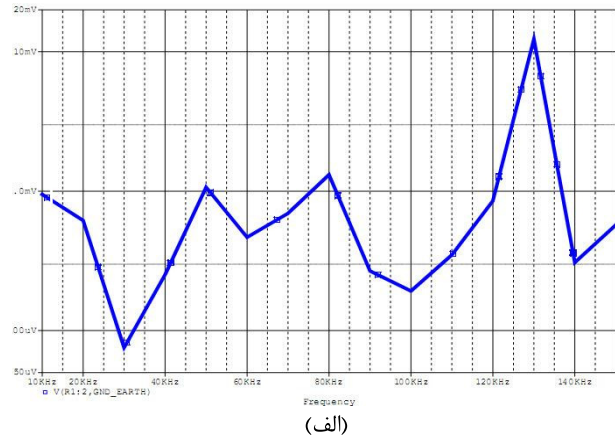
Chart (1): EMI peak comparison for three reset schemes

نمودار (۱): مقایسه پیک طیف EMI با سه روش بازنشانی هسته

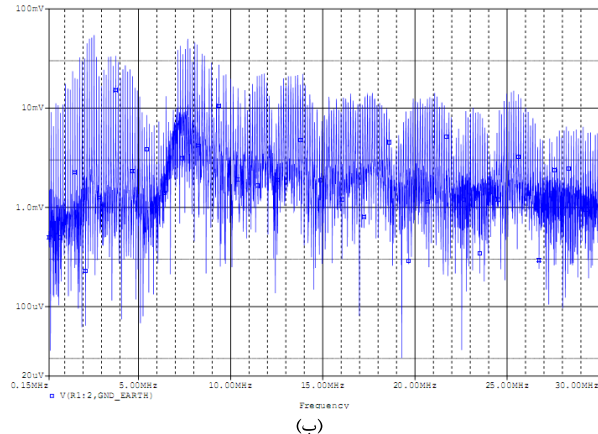


شکل (۴): مدل طرف اولیه مبدل فرورارد با لحاظ عنصر پارازیتی قطعات و PCB به همراه LISN جهت شبیه سازی EMI

Fig. (4): Forward converter primary model including components and PCB parasitics and LISN for EMI simulation



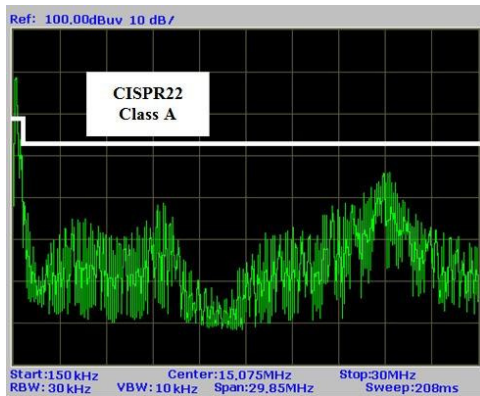
(الف)



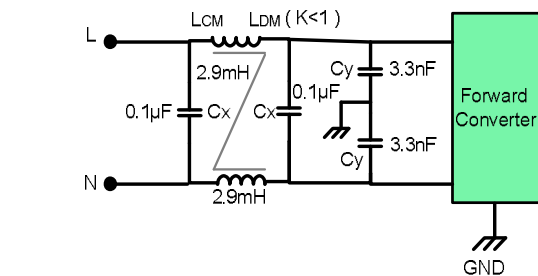
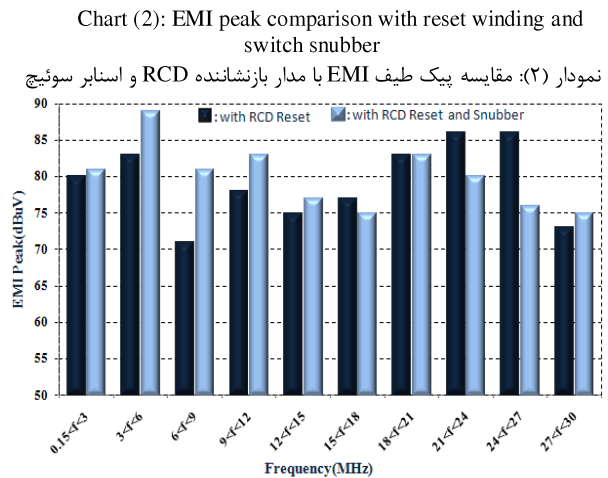
(ب)

شکل (۵): شبیه سازی طیف EMI مبدل در نرم افزار OrCAD (الف) محور عمودی: 20mV-50 $\mu$ V, محور افقی: 10kHz - 150 kHz (ب) محور عمودی: 20 $\mu$ V-100mV, محور افقی: 150kHz - 30MHz

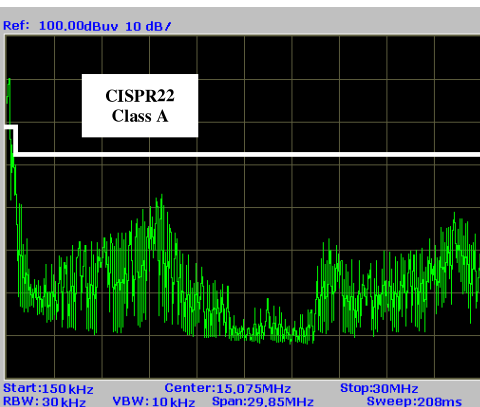
Fig. (5): EMI spectrum simulation in OrCAD a) Vertical scale: 300 $\mu$ V-15mV, Horizontal scale: 10kHz - 150 kHz b) Vertical scale: 30 $\mu$ V-70mV, Horizontal scale: 150kHz - 30MHz



شکل (۹): طیف EMI مبدل سوئیچینگ فرورارد با بازنشاندن RCD و فیلتر در ورودی مبدل (محور عمودی 20-100dB $\mu$ V)  
 Fig. (9): EMI spectrum with RCD reset and input EMI filter



شکل (۸): مدار فیلتر EMI مورد استفاده  
 Fig. (8): Utilized EMI filter



شکل (۱۰): طیف EMI مبدل سوئیچینگ فرورارد با بازنشاندن RCD و اسنابر سوئیچ و فیلتر در ورودی مبدل (محور عمودی 20-100dB $\mu$ V)  
 Fig. (10): EMI spectrum with RCD reset, switch snubber and input EMI filter

## References

- [1] IEC International Special Committee on Radio Interference, C.I.S.P.R., Information Technology Equipment Radio Disturbance Characteristics—Limits and Methods of Measurement, Publication 22, 1997.
- [2] P. Kong, S. Wang, F.C. Lee, Z. Wang, "Reducing common-mode noise in two-switch forward converter", IEEE Trans. Pow. Elec., Vol.26, No.5, pp.1522-1533, May 2011.
- [3] A. Abramovitz, T. Cheng, K. Smedley, "Analysis and design of forward converter with energy regenerative snubber", IEEE Trans. Pow. Elec., Vol.25, No.3, pp. -676, March 2010.
- [4] Clayton R. Paul, "Introduction to electromagnetic compatibility", John Wiley & Sons Publication, 2nd Edition, 2006.
- [5] M.H. Rashid, Power Electronics Handbook, Academic Press, 2001.
- [6] A.I. Pressman, "Switching power supply design", McGraw-Hill, 3<sup>rd</sup> Edition, 2009.
- [7] C.D. Bridge, "Clamp voltage analysis for RCD forward converters", In Proc. IEEE APEC, pp.959-965, 2000.
- [8] H.S. Choi (Fairchild Semiconductor), "Design guidelines for off-line forward converters using fairchild power switch", Application Note AN4134, 2004.
- [9] C.P. Basso, "Switch-mode power supplies spice simulations and practical designs", MC Graw-Hill, 2008.
- [10] M.R. Yazdani, H. Farzanehfard, J. Faiz, "EMI analysis and evaluation of an improved ZCT flyback converter", IEEE Trans. Pow. Elec., Vol.26, No.8, pp.2326-2334, Aug. 2011.
- [11] S. Wang, "Characterization and cancellation of high-frequency parasitics for EMI filters and noise separators in power electronics applications", PhD. Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, May 2005.
- [12] D. Cochrane, "Passive cancellation of common-mode electromagnetic interference in switching power converters", M.S. Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2001.
- [13]- M.R. Yazdani, H. Farzanehfard, J. Faiz, "Classification and comparison of EMI mitigation techniques in switching power converters – A review", J. of Pow. Elec. (JPE), Vol.11, No.5, pp.767-777, Sep. 2011.