

## کاهش EMI مد مشترک در منبع تغذیه فلای بک با پیاده‌سازی روش خنثی‌سازی خازن گرماگیر

محمد روح اله یزدانی<sup>(۱)</sup> - مریم فاضل<sup>(۲)</sup>

(۱) استادیار - دانشکده مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اصفهان (خوراسگان)

(۲) کارشناس - شهرک علمی و تحقیقاتی اصفهان

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۹/۱۸

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۴/۲۷

**خلاصه:** سازگاری الکترومغناطیسی در منابع تغذیه سوئیچینگ که خود از منابع نویز هستند، اهمیت ویژه‌ای دارد. تداخل الکترومغناطیسی (EMI) به شکل هدایتی و یا تشعشعی به بخشهای حساس می‌رسد و در کار آنها اختلال می‌کند. از طرف دیگر، استانداردهای سازگاری الکترومغناطیسی، اجبار دیگری را در کاهش نویز مبدلهای سوئیچینگ ایجاد کرده است. بخش مهمی از نویز ناشی از جریان نویز مد مشترک عبوری از عناصر پارازیتی به سمت زمین مدار است. از جمله مهمترین عناصر پارازیتی از دید نویز مد مشترک، خازن ناشی از گرماگیر کلید (خازن مد مشترک) است. در این مقاله یک روش خنثی‌سازی خازن گرماگیر به کمک مدار پسیو در یک مبدل ایزوله نوع فلای بک ۵۰W پیشنهاد و در نرم افزار OrCAD مدل‌سازی شده است. همچنین نتایج اندازه‌گیری عملی EMI مد مشترک در نمونه ساخته شده مبدل فلای بک معمولی و فلای بک پیشنهادی برای بررسی دقت مدل‌سازی ارائه می‌شود. بر اساس نتایج عملی، کاهش قابل ملاحظه سطح EMI مد مشترک بعد از پیاده‌سازی روش خنثی‌سازی خازن گرماگیر تأیید می‌شود.

کلمات کلیدی: تداخل الکترومغناطیسی مد مشترک، سازگاری الکترومغناطیسی، خازن پارازیتی گرماگیر، منبع تغذیه سوئیچینگ فلای بک

## Common-Mode EMI Reduction in Switching Flyback Power Supply by Implementing Cancellation Method of Heat-Sink Capacitor

Mohammad Rouhollah Yazdani<sup>(1)</sup> - Maryam Fazel<sup>(2)</sup>

(1) Assistant Professor - Department of Electrical Engineering, Khorasgan Branch, Islamic Azad University, Esfahan, Iran

mro\_yazdani@yahoo.com

(2) MSc. - Isfahan Science and Technology Town

maryamfazel@rocketmail.com

Electromagnetic compatibility in switching power converters which are noise sources themselves, has a special importance. Electromagnetic interference (EMI) in the form of conducted or radiated reaches to sensitive sections and interferes with their operation. On the other, electromagnetic compatibility (EMC) standards causes another forces to reduce noise in switching converters. Major part of noise is due to the common-mode (CM) current passes through parasitic elements to the circuit ground (Earth). One of the important parasitic elements from the CM noise viewpoint is the switch heat-sink capacitor (common-mode capacitor). In this paper, a cancellation method of the heat-sink capacitor via a passive circuit is proposed in a 50W isolated flyback converter and is also modeled in OrCAD software. Also, experimental measurement results of the CM electromagnetic interference in regular and proposed flyback converter prototypes are presented to examine the modeling accuracy. Based on the experimental results, significant reduction of CM-EMI is verified after applying the cancellation method of the heat-sink capacitor.

**Index Terms:** Common-mode electromagnetic interference(EMI), electromagnetic compatibility, heat-sink parasitic capacitor, switching flyback converter.

۱- مقدمه

فیلتر هم کاهش یابند [۳]. از طرف دیگر، می‌توان در خود توپولوژی مبدل سوئیچینگ، عناصر پارازیتی را کاهش داد [۵]. چند روش برای حذف خازن پارازیتی نظیر حذف خازن بین دو سیم‌پیچی ترانسفورمر [۵] و خازن سلف مبدل بوست وجود دارد [۷-۹]. هر چند تحقیقات اندکی در زمینه کاهش تأثیر خازن پارازیتی گرماگیر از دید EMI در مبدلهای غیر ایزوله صورت گرفته است، ولی نیاز است در مبدل ایزوله فلای بک که علاوه بر خازن پارازیتی گرماگیر، سایر عناصر پارازیتی نظیر سلف نشستی ترانس نقش مهمی در ایجاد EMI دارند، این موضوع به طور دقیق بررسی شود. به همین دلیل در این مقاله، علاوه بر ارائه یک روش مدلسازی پیشنهادی برای پیش‌بینی سطح EMI روشی برای حذف خازن پارازیتی بیان می‌شود و تأثیر آن بر کاهش نویز CM مورد بررسی قرار می‌گیرد. در نهایت، نتایج عملی جهت تأیید نتایج شبیه‌سازی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲- EMI در مبدلهای سوئیچینگ

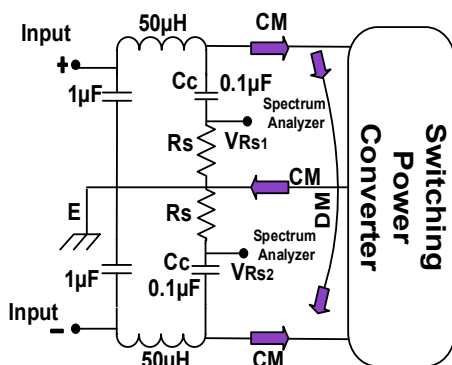
به طور کلی جریان EMI هدایتی در ایجاد انتشارات تشعشعی نیز نقش دارد و لذا کاهش EMI هدایتی برای کاستن از سطح کل نویز بسیار مهم است. EMI هدایتی شامل مد تفاضلی (DM) و مد مشترک است که از طریق سیم کشی‌های مشترک نظیر خطوط تغذیه می‌تواند انتقال یابد.

اندازه‌گیری EMI هدایتی با یک شبکه تثبیت امپدانس خط (LISN) مشخص شده طبق استاندارد انجام می‌شود. برای نمونه LISN استاندارد CISPR22 در شکل (۱) نشان داده شده است [۱۲].

EMI در دو بخش مد مشترک و مد تفاضلی به صورت زیر به دست می‌آید که کل هدایتی مجموع این دو مقدار است:

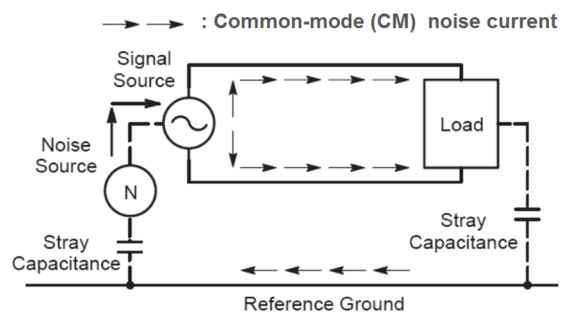
$$V_{com} = \frac{V_{Rs1} + V_{Rs2}}{2} \quad (1)$$

$$V_{diff} = \frac{V_{Rs1} - V_{Rs2}}{2} \quad (2)$$



شکل (۲): مسیر جریان مد تفاضلی و مشترک به همراه LISN استاندارد CISPR22  
Fig. (2): Common and differential current paths in addition to CISPR 22 LISN

تداخل امواج الکترومغناطیسی (EMI) به دو بخش هدایتی و تشعشعی تقسیم می‌شود [۱۱]. EMI هدایتی انرژی الکترومغناطیسی نامطلوبی است که از منبع آن به گیرنده از طریق سیمها و کابلها کوپل می‌شود [۱۶]. به طور کلی جریان نویز EMI هدایتی انتشارات تشعشعی بیشتری را نیز در مقایسه با EMI مد تفاضلی ایجاد می‌کند و لذا کاهش EMI مد مشترک (CM) برای کاستن از سطح کل نویز بسیار مهم است. جریان نویز مد مشترک هدایتی از طریق سیم کشی‌های مشترک نظیر خطوط تغذیه به سمت زمین مشترک جاری شده و مسیر خود را از طریق خازنهای پارازیتی مطابق شکل (۱) می‌بندد. در الکترونیک قدرت بررسی رفتار نویز مد مشترک تولید شده در مبدلهای قدرت سوئیچینگ برای جلوگیری از تداخل امواج الکترومغناطیسی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. خازنهای پارازیتی در شکل (۱) بین گره‌هایی که بیشترین dv/dt را دارد، سهم زیادی را در تولید نویز CM در الکترونیک قدرت دارند. در جریان نویز مد مشترک، خازن پارازیتی درین به زمین مدار، نقش اساسی دارد. این خازن مد مشترک شامل دو خازن یکی ناشی از خود گرماگیر و دیگری ناشی از مسیر درین و صفحه زمین روی مدار چاپی است. جریان CM از شارژ و دشارژ این خازن پارازیتی که به گره دارای بیشترین dv/dt نسبت به زمین مدار است، ایجاد می‌شود [۱].



شکل (۱): مسیر جریان نویز مد مشترک (CM)

Fig.(1): Common-mode (CM) noise current path

خازن پارازیتی بین گره‌هایی که بیشترین dv/dt را دارد، سهم زیادی در تولید نویز CM در الکترونیک قدرت دارند. در جریان نویز مد مشترک، خازن پارازیتی درین به زمین مدار، نقش اساسی دارد. این خازن مد مشترک شامل دو خازن یکی ناشی از خود گرماگیر و دیگری ناشی از مسیر درین و صفحه زمین روی مدار چاپی است. جریان CM از شارژ و دشارژ این خازن پارازیتی که به گره دارای بیشترین dv/dt نسبت به زمین مدار است، ایجاد می‌شود [۱].

روشهای مختلفی برای کاهش نویز مد مشترک (CM) وجود دارد [۲-۱]. راههای عمومی برای جلوگیری از نویز CM از یک یا دو طبقه فیلتر EMI استفاده می‌کنند [۲] که معمولاً قیمت و حجم سیستم را افزایش می‌دهد و در فرکانسهای بالا نیاز است که خود عناصر پارازیتی

کلید قابل دسترس، از رابطه فوق مقدار  $N_p/N_m$  محاسبه می‌شود. سپس از بالانس ولت ثانیه، مقدار  $D$  به صورت زیر محاسبه می‌شود:

(۵)

$$(V_s - V_Q)D = (V_{om} + V_D) \left[ \frac{N_p}{N_m} \right] (1 - D)$$

(۶)

$$D = \frac{(V_{om} + V_D)}{(V_s - V_Q) \frac{N_m}{N_p} + V_{om} + V_D}$$

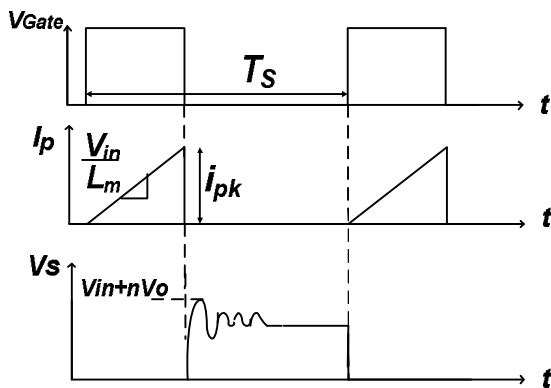
متوسط سطح پالس جریان ( $I_{aps}$ ) در اولیه به صورت زیر به دست می‌آید:

$$I_{aps} = \frac{P_m}{V_s D}$$

(۷)

و با فرض بازده نزدیک به ۸۰٪ [۱۴]:

$$\bar{I}_{aps} = \frac{1.25 P_o}{V_s D} \quad (۸)$$



شکل (۴): ولتاژ گیت، جریان سوئیچ ( $I_p$ ) و ولتاژ سوئیچ ( $V_s$ )

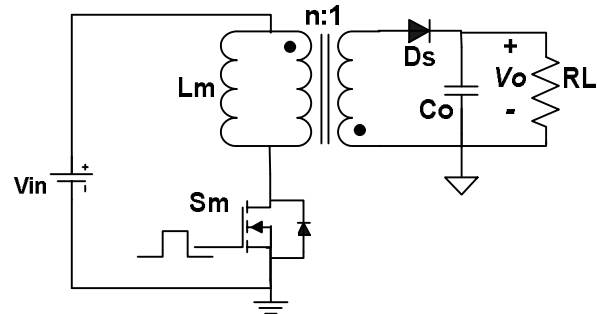
Fig. (4): Gate voltage, switch current ( $I_p$ ) and voltage ( $V_s$ )

Table. (1): Specification of the flyback converter

جدول (۱): مشخصات مبدل فلائی بک.

پارامتر	مقادیر
$P_o$	50W
$V_{in}$	70v
$V_o$	12v
$D$	0.4
$f_s$	130 kHz

برای اطمینان از قرار گرفتن مدار در حالت CCM مقدار تغییرات جریان سوئیچ ( $\Delta I_Q$ ) و سلف مغناطیس کنندگی ( $L_m$ ) بزاء بدترین حالت که مبدل در مرز DCM قرار می‌گیرد، تعیین می‌شود. نهایتاً بر اساس فرمولهای فوق و مرجع [۱۴] طراحی طبق اطلاعات جدول (۱) انجام شده است. طبق فرمولهای طراحی سیم‌پیچ اولیه در حدود 0.8mH و ثانویه در حدود 0.06mH به دست می‌آید.



شکل (۳): مبدل سوئیچینگ فلائی بک

Fig. (3): Flyback switching converter

### ۳- طراحی مبدل فلائی بک

مبدل فلائی بک از نظر حجم و قیمت نسبت به مبدلهای غیر ایزوله نظیر بک، چون به سلف در ولتاژ خروجی نیاز ندارد، دارای مزیت است و لذا این مبدل در ولتاژهای بالا و توان‌های پایین به علت سادگی به صورت وسیع مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۳]. در شکل (۲) مبدل روشن بودن کلید، انرژی در سلف مغناطیس کنندگی ترانسفورمر ذخیره می‌شود و در زمان خاموش بودن کلید، این انرژی به خروجی منتقل می‌شود. عملکرد این مبدل به دو حالت هدایت پیوسته (CCM) و هدایت گسسته (DCM) تقسیم می‌شود. اگر در پایان هر پریود، انرژی در هسته ترانسفورمر کاملاً تخلیه نشده باشد در ناحیه CCM و در غیر این صورت در ناحیه DCM عمل می‌نماید.

شکل موجهای ولتاژ و جریانهای سوئیچ و دیود در شکل (۴) نشان داده شده است. مشخصات مبدل فلائی بک طراحی شده [۱۴] بر اساس روند زیر انجام می‌شود. در حالت جریان پیوسته ماکزیمم ولتاژ معکوس سوئیچ در حالت خاموش رابطه مستقیم با نسبت تبدیل ترانسفورمر یعنی  $N_p/N_m (=n)$  دارد و چون معمولاً ولتاژ ورودی بسیار بزرگتر از ولتاژ خروجی است بنابراین این نسبت از یک خیلی بزرگتر است و طبق رابطه زیر مقدار حداکثر ولتاژ معکوس سوئیچ، PRV قابل ملاحظه می‌شود:

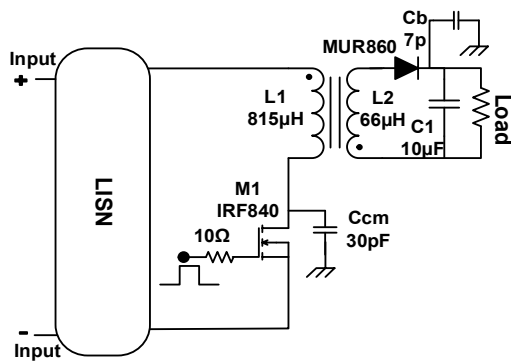
$$PRV = \bar{V}_s + \frac{N_p}{N_m} (V_{om} + V_D) \quad (۳)$$

چون در لحظه خاموش شدن کلید راهی برای تخلیه سلف نشتی وجود ندارد، این باعث پرش ولتاژ در دو سر کلید می‌گردد. با در نظر گرفتن پرش ولتاژ ناشی از سلف نشتی می‌توان نوشت:

$$PRV^* = 1.3 \left[ \bar{V}_s + \frac{N_p}{N_m} (V_{om} + V_D) \right] \quad (۴)$$

کلید انتخابی با داشتن مدار حفاظتی باید حداقل قابلیت تحمل ولتاژ  $PRV^*$  را داشته باشد. چون بالا بردن PRV قابل تحمل کلید، قیمت آن را به شدت افزایش می‌دهد، معمولاً با در نظر گرفتن PRV یک

EMI هدایتی اندازه‌گیری شده در شبیه‌سازی از دو سر مقاومتهای  $50\Omega$  متصل به LISN (شکل (۲)) که در حقیقت امپدانس ورودی اسپیکترام آنالایزر است، به دست می‌آید. برای به دست آوردن بخش مد مشترک، از رابطه (۱) در نرم‌افزار استفاده می‌شود و نهایتاً برای طیف فرکانسی EMI مد مشترک باید تبدیل فوریه ولتاژ رابطه (۱) را در نظر گرفت که در شکل (۶)، تبدیل فوریه آن تا فرکانس  $30\text{MHz}$  نشان داده شده است.



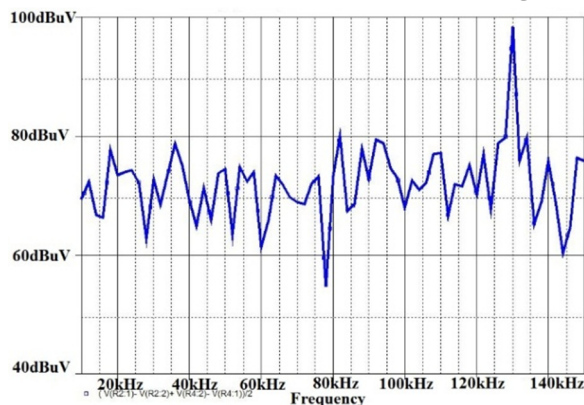
شکل (۵): مدار شبیه‌سازی مبدل فلای بک.

Fig. (5): Simulation circuit of the flyback converter

از آنجا که حدود مجاز استانداردهای EMC بر حسب  $\text{dB}\mu\text{V}$  بیان می‌شود، برای مقایسه با استاندارد از رابطه زیر، تبدیل سطح EMI در یک فرکانس به  $\text{dB}\mu\text{V}$  انجام شده است.

$$\text{dB}\mu\text{V} = 20 \log \frac{V}{1\mu\text{V}} \quad (9)$$

طبق شکل (۶-الف) پیک طیف در فرکانس  $130\text{kHz}$  دارای مقدار  $98/7\text{dB}\mu\text{V}$  است. همچنین طبق شکل (۶-ب) در فرکانس  $1/6\text{MHz}$ ، پیک اصلی طیف EMI برای این خازن به  $125\text{dB}\mu\text{V}$  رسیده است.



(الف) (الف)

#### ۴- شبیه‌سازی EMI مبدل فلای بک

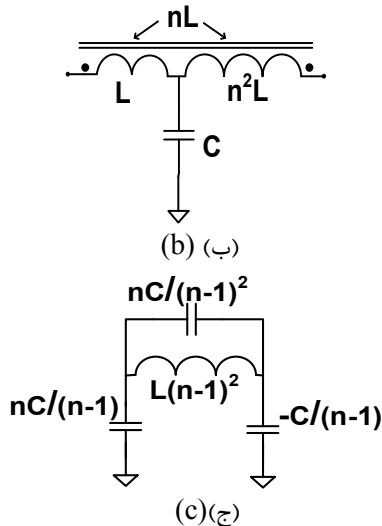
برای رسیدن به یک مدل نسبتاً دقیق و کارآمد جهت پیش‌بینی سطح EMI قبل از ساخت مبدل، نیاز است که عناصر پارازیتی مدار شناسایی و استخراج شوند [۱۵]. یکی از مهمترین عناصر پارازیتی خازن درین به زمین (ارت) مدار است که نقش مهمی در ایجاد جریان نویز مد مشترک دارد. به همین دلیل، در این تحقیق تمرکز بر این عنصر پارازیتی است. این خازن شامل دو خازن یکی ناشی از گرمابر و دیگری ناشی از مسیر درین و صفحه زمین روی مدار چاپی است. مقدار معادل این دو خازن موازی برای مبدلهای توان پایین مشابه این مقاله، در عمل در گستره چند ده پیکوفاراد می‌باشد [۱۰]. بدنه فلزی منبع تغذیه به دلیل ملاحظیات EMC مربوط به شیلد در منابع تغذیه به ارت وصل می‌شود. در این مقاله برای جلوگیری از برق دار شدن هیت سینک از عایق بین هیت سینک و کلید استفاده شده است. همچنین در منبع تغذیه ساخته شده گرماگیر به بدنه فلزی جعبه اتصال الکتریکی ندارد و در این شرایط اندازه‌گیری عملی به کمک LCR متر خازن پارازیتی درین به ارت را در حدود  $30\text{pF}$  نشان داد.

برای قطعات اکتیو نظیر کلید و دیود، برای مدلسازی از مدل نرم‌افزار که عناصر پارازیتی را در بر داشته باشد، استفاده شده است. به عنوان مثال در این مقاله برای ماسفت، مدل رفتاری آنالوگ (ABM) سطح سه در نرم‌افزار OrCAD16 استفاده شده است که شامل عناصر پارازیتی اصلی نظیر  $C_{gs}$  و  $C_{gd}$  و  $C_{ds}$  است. همچنین برای مدل ترانسفورمر بر اساس اندازه‌گیری عملی، پارازیت‌های اندازه‌گیری شده است. در شبیه‌سازی پارامترهای ترانسفورمر ساخته شده شامل اندوکتانس دقیق هر سیم‌پیچ، مقاومت سیم‌پیچ، سلف نشی ترانس، خازن‌های میان سیم‌پیچی به کمک LCR متر اندازه‌گیری شده و در مدل مبدل لحاظ شده است. این پارامترها در جدول (۲) آورده شده است. برای مدلسازی اندازه‌گیری EMI هدایتی، باید مدار شبکه تثبیت امپدانس خط (LISN) مشخص شده طبق استاندارد شکل (۲) مدلسازی شود. در شکل (۵)، مدار مبدل به همراه خازن پارازیتی  $C_{CM}$  و LISN نشان داده شده است. برای جلوگیری از حجیم شدن شکل، جزئیات مدل ترانسفورمر در این شکل نشان داده نشده است ولی در شبیه‌سازی طبق جدول (۲) لحاظ شده است.

Table (2): Specification of the converter transformer

جدول (۲): مشخصات ترانسفورمر مبدل.

پارامتر	مقادیر
اندوکتانس سیم‌پیچ اولیه $L_1$	$815\mu\text{H}$
اندوکتانس نشی سیم‌پیچ اولیه $L_1$	$22\mu\text{H}$
مقاومت سیم‌پیچ اولیه $L_1$	$0.23\Omega$
اندوکتانس سیم‌پیچ ثانویه $L_2$	$62.8\mu\text{H}$
اندوکتانس نشی سیم‌پیچ ثانویه $L_2$	$1.8\mu\text{H}$
مقاومت سیم‌پیچ ثانویه $L_2$	$0.21\Omega$
خازن‌های میان سیم‌پیچی	$\sim 52\text{pF}$



شکل (۷): (الف) مدار با دو سیم‌پیچ تزویج معکوس و خازن زمین شده (ب) مدار معادل بدون تزویج (ج) مدار معادل بعد از تبدیل  $Y-\Delta$ .  
 Fig. (7): a) Circuit with two inverse-coupled windings b) equivalent circuit without coupling c) equivalent circuit after  $Y-\Delta$  conversion

در مدار معادل، خازن  $C$  به صورت سه خازن در شکل (۶-ج) در می‌آید. یکی از خازن‌ها به حالت موازی با سیم‌پیچ و دو خازن دیگر در دو طرف سیم‌پیچی قرار می‌گیرند. بر اساس مقدار  $n$  بزرگتر از یک، دو خازن در دو سمت سیم‌پیچ مقادیر مثبت یا منفی به خود می‌گیرند [۸]:

$$n > 1 \Rightarrow \begin{cases} \frac{nC}{n-1} > 0 \\ -\frac{C}{n-1} < 0 \end{cases} \quad (10)$$

اگر این خازن منفی تولید شده، در مدار به صورت موازی با خازن پارازیتی کلید قرار گیرد می‌تواند اثر آن را خنثی کند. بنابراین خنثی‌سازی ایده‌آل، زمانی صورت می‌گیرد که خازن پارازیتی با خازن منفی تولید شده دارای مقادیر برابر باشند. همچنین در عمل به دلیل ضریب تزویج کمتر از یک، خنثی‌سازی کامل رخ نمی‌دهد.

#### ۶- طراحی مدار خنثی‌ساز در مبدل فلای بک

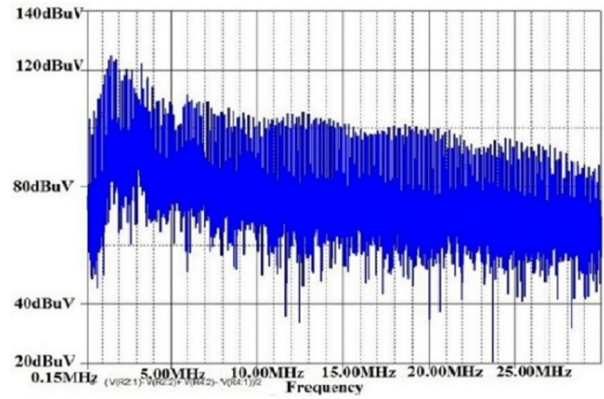
طبق روابطی که در تبدیل ستاره-مثلث به دست آمد، مقدار سلف مغناطیس‌کننده مبدل فلای بک در طرف اولیه، بعد از عمل حذف برابر با  $(n-1)^2 L$  است که باید با سلف مبدل ( $L_B$ ) برابر باشد. در نتیجه مقدار  $L$  طبق رابطه زیر به دست می‌آید:

$$L = \frac{L_B}{(n-1)^2} \quad (11)$$

این معادله نشان می‌دهد که برای کاهش مقدار  $L$  باید  $n$  خیلی از یک بیشتر باشد. مقدار  $C$  را نیز می‌توان از رابطه زیر به دست آورد:

$$C = (n-1)C_{CM} \quad (12)$$

مقادیر محاسبه شده برای سلف و خازن مدار خنثی‌ساز در مبدل فلای بک در جدول (۳) خلاصه شده است.

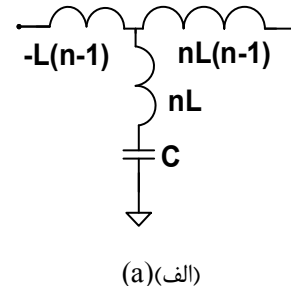


(ب) (ب)

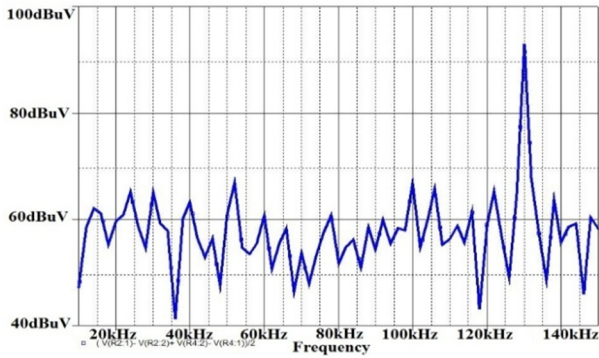
شکل (۶): شبیه‌سازی EMI مد مشترک فلای بک معمولی در نرم‌افزار OrCAD (الف) محور عمودی: ۴۰-۱۰۰ dBμV، محور افقی: ۱۰k-۱۵۰k MHz (ب) محور عمودی: ۲۰-۱۴۰ dBμV، محور افقی: ۱۵۰k-۳۰ MHz  
 Fig. (6): OrCAD simulation of the CM-EMI in regular flyback converter a) Vertical axis: 40-100dBμV, Horizontal axis: 10k-150kHz, b) Vertical axis: 20-140dBμV, Horizontal axis: 150k-30MHz

#### ۵- معرفی تکنیک خنثی‌سازی خازن پارازیتی

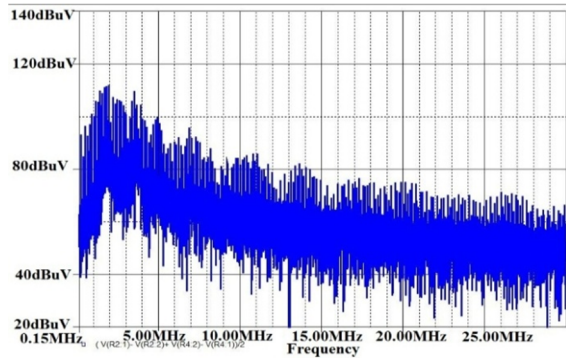
در این قسمت یک روش برای حذف خازن پارازیتی گرماگیر بیان می‌شود. در این روش از تزویج دو سلف و یک خازن کوچک برای حذف خازن پارازیتی استفاده می‌شود. در خیلی از کاربردها برای مبدلهای سوئیچینگ قدرت مانند باک، فوروارد، بوست، باک-بوست و فلای بک کلیدهای قدرت به یک سیم‌پیچ القا متصل هستند. اگر بتوان یک خازن منفی با کمک این سیم‌پیچ القا تولید کرد می‌توان خازن پارازیتی را تا حد زیادی خنثی کرد. در شکل (۷-الف) مدار مورد نظر که از خود خازن منفی نشان می‌دهد، آورده شده است [۲]. با به دست آوردن مدار معادل شکل (۷-ب) و نیز تبدیل ستاره-مثلث، شکل (۷-ج) به دست می‌آید که نشانگر وجود خازن منفی است. در این تبدیل فرض شده که ضریب تزویج دو سیم‌پیچ نزدیک یک باشد. بر اساس این شکل، اگر یکی از سیم‌پیچها دارای مقدار  $L$  و دیگری  $n^2 L$  باشد، اندوکتانس متقابل دو سیم‌پیچی برابر  $nL$  می‌شود (شکل (۷-ب)).



(الف) (ا)



(ب) (ب)



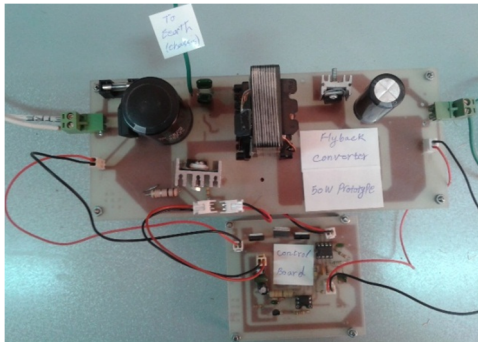
(ج) (ج)

شکل (۸): (الف) مدار شبیه‌سازی مبدل پیشنهادی با خنثی‌سازی خازن گرماگیر (ب) شبیه‌سازی طیف EMI مبدل در نرم افزار OrCAD محور عمودی: 40-100dB $\mu$ V, محور افقی: 10k-150kHz, (ج) محور عمودی: 20dB $\mu$ V-140dB $\mu$ V, محور افقی: 150k-30MHz

Fig. (8): a) Simulation circuit of the proposed flyback with heat-sink capacitor cancellation converter b) EMI spectrum simulation in OrCAD software Vertical axis: 40-100dB $\mu$ V, Horizontal axis: 10k-150kHz, c) Vertical axis: 20-140dB $\mu$ V, Horizontal axis: 150k-30MHz

### ۸- نتایج عملی اندازه‌گیری EMI هدایتی مد مشترک مبدل فلای بک

نتایج عملی در این قسمت برای بررسی صحت شبیه‌سازی ارائه شده است. مبدل فلای بک ۵۰W بر اساس مقادیر طراحی و قطعات استفاده شده در شبیه‌سازی ساخته شده است. مبدل ساخته شده در شکل (۹) نشان داده شده است.



شکل (۹): تصویر مبدل فلای بک ساخته شده

Fig. (9): Photo of the flyback converter prototype

Table III. Values of  $C_{CM}$  and inductor and capacitor of the compensation circuit

جدول (۳): مقادیر  $C_{CM}$  و سلف و خازن مدار خنثی ساز

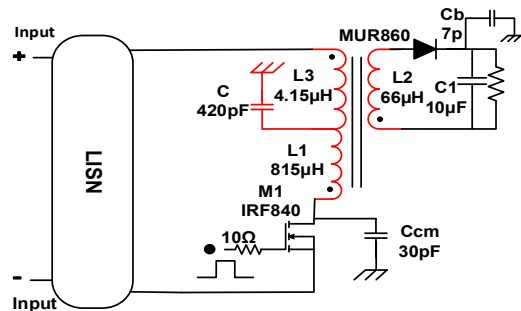
پارامتر	مقادیر
$C_{CM}$	30 pF
C	420 pF
L	4.15 $\mu$ H

اندوکتانس سیم‌پیچ جبران‌ساز افزوده شده برابر  $1/3 \mu$ H و مقاومت سیم‌پیچ آن  $0.48 \Omega$  است. همچنین مقادیر خازنهای میان سیم‌پیچی با حضور این سیم‌پیچ کوچک تغییر محسوسی نکرد.

### ۷- شبیه‌سازی مبدل فلای بک با استفاده از روش خنثی‌سازی خازن پارازیتی

در این قسمت تأثیر استفاده از روش خنثی‌سازی بر روی میزان کاهش نویز CM در مبدل فلای بک بررسی می‌شود. در شکل (۸-الف) مدار طراحی شده برای فلای بک با استفاده از روش حذف خازن پارازیتی نشان داده شده است. طبق شکل سه سیم‌پیچ  $L_1$  و  $L_2$  و  $L_3$  با هم تزویج داشته و علاوه بر نقش ترانسفورمر فلای بک، نقش ایجاد خازن منفی برای خنثی‌سازی خازن پارازیتی کلید را دارند. به عبارت دیگر، در این مقاله به جای استفاده از یک ترانسفورمر برای انتقال توان به خروجی و یک ترانسفورمر برای ایجاد خازن منفی، از یک ترانسفورمر با یک هسته استفاده شده و دو سیم‌پیچ اصلی به همراه سیم‌پیچ جبران ساز (شکل ۷) روی آن تزویج می‌شوند که یک مزیت مهم در مبدل پیشنهادی محسوب می‌شود. در شکل (۸-ب و ج) طیف نویز CM برای این مبدل در دو بازه فرکانسی آورده شده است. طیف CM بر اساس ولتاژهای گرفته شده از مقاومت‌های LISN در شکل (۲) و رابطه (۱) و انجام عمل تبدیل فوریه سریع در نرم‌افزار OrCAD بر روی ولتاژ به دست آمده از رابطه (۱) به دست می‌آید.

پیک طیف EMI مد مشترک پیش‌بینی شده در شکل (۸-ب)، در فرکانس ۱۳۰kHz مقدار پیک برابر ۹۳dB $\mu$ V است. همچنین طبق شکل (۸-ج) در فرکانس ۱/۹۵MHz، پیک اصلی طیف EMI برای این خازن به ۱۱۱dB $\mu$ V رسیده است.



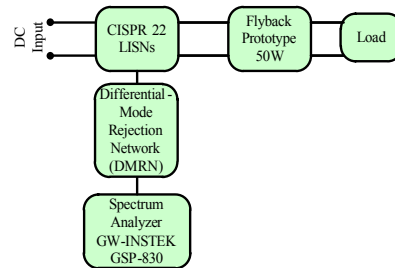
(الف) (ا)

تنظیم شده است. بر اساس آن، پیک EMI در فرکانس ۱۳۰kHz به مقدار ۹۴dBμV رسیده است.

شکل (۱۲-الف) نشان می‌دهد که مدلسازی توانسته است با حدود ۵٪ خطا، مقدار پیک EMI را پیش‌بینی کند. همچنین در شکل (۱۲-ب) در فرکانس ۱/۳MHz به مقدار ۱۰۵ dBμV رسیده است که بیانگر این است که مدلسازی با حدود ۱۶٪ خطا، مقدار پیک EMI مد مشترک را پیش‌بینی کرده است.

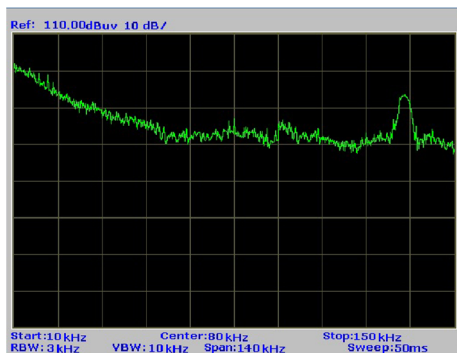
در ادامه نیز مبدل پیشنهادی بر اساس روش حذف خازن پارازیتی کلید ساخته شد که نتایج عملی اندازه‌گیری در شکل (۱۳) آورده شده است. بر اساس نتایج اندازه‌گیری در شکل (۱۳-الف)، پیک EMI مد مشترک در فرکانس ۱۳۰kHz به مقدار ۹۲dBμV رسیده است. بر اساس شکل (۱۴) می‌توان گفت که مدل‌سازی توانسته است با حدود ۱٪ خطا، مقدار پیک اصلی EMI مد مشترک را در فرکانس ۱۳۰kHz نشان دهد. همچنین مقدار پیک اصلی EMI مد مشترک در فرکانس ۲/۸MHz در عمل به ۹۴/۵dBμV رسیده است که بیانگر این است که با حدود مقدار ۱۴٪ خطا، مقدار پیک اصلی توسط مدلسازی، پیش‌بینی شده است.

برای اندازه‌گیری EMI هدایتی منبع تغذیه فلای بک از نمونه LISN ساخته شده بر اساس استاندارد CISPR22، حذف کننده بخش مد تفاضلی (DMRN) و اسپکتروم آنالایزر استفاده شد که در این بخش، نتایج عملی اندازه‌گیری EMI هدایتی مد مشترک ارائه می‌شود. در شکل (۱۰) نحوه ارتباط تجهیزات برای اندازه‌گیری مشاهده می‌شود.

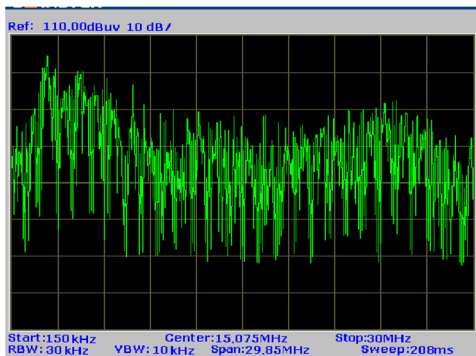


شکل (۱۰): نحوه ارتباط تجهیزات برای اندازه‌گیری EMI هدایتی مد مشترک  
Fig. (10): Block diagram and connection of equipment for conducted CM-EMI measurement

در شکل (۱۱) چیدمان تجهیزات اندازه‌گیری به همراه نمونه منبع ساخته شده نشان داده شده است.



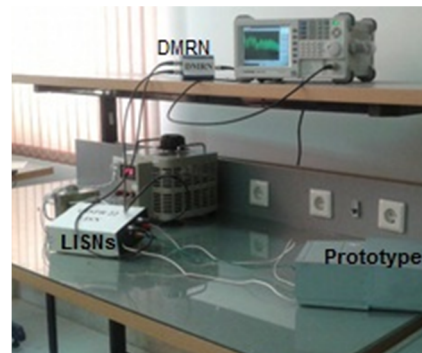
(الف) (a)



(ب) (b)

شکل (۱۲): اندازه‌گیری عملی طیف EMI مد مشترک در مبدل فلای بک معمولی (الف) محور عمودی: ۳۰-۱۱۰dBμV، محوری افقی: ۱۰k-۱۵۰ kHz (ب) محور عمودی: ۳۰-۱۱۰ dBμV، محوری افقی: ۱۵۰k-۳۰ MHz

Fig. (12): Measurement of the CM-EMI spectrum in regular flyback converter a) Vertical axis: 30-110dBμV, Horizontal axis: 10k-150kHz, c) Vertical axis: 30-110dBμV, Horizontal axis: 150k-30MHz

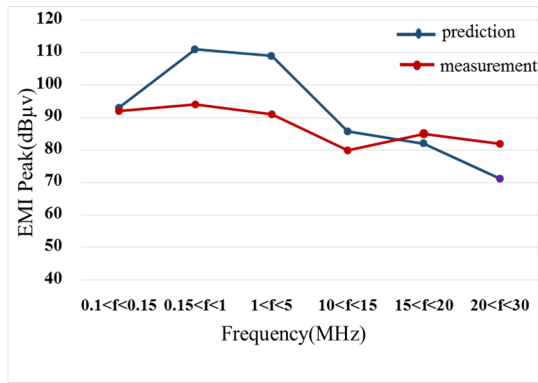


شکل (۱۱): چیدمان تجهیزات اندازه‌گیری

Fig. (11): Measurement test setup

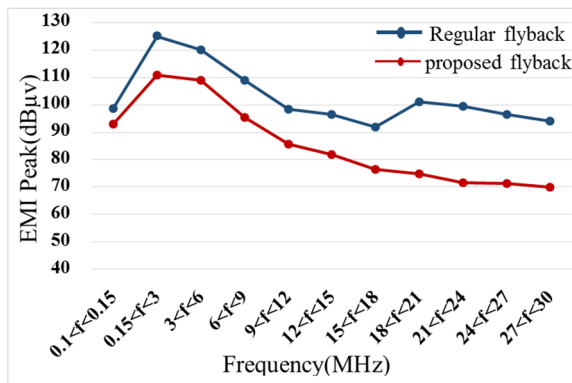
همانگونه که در شکل (۱۱) دیده می‌شود ترمینال خروجی LISN به یک ماژول حذف مد تفاضلی وصل می‌شود. این ماژول در حقیقت یک شبکه مداری است که با حذف مد تفاضلی نویز مد مشترک را در خروجی بر اساس فرمول (۱) ارائه می‌دهد. خروجی این ماژول به اسپکتروم آنالایزر متصل است.

نتایج اندازه‌گیری برای مبدل فلای بک معمولی در شکل (۱۲) آورده شده است که حداکثر مقدار دامنه برابر ۱۱۰dBμV و اندازه هر خانه عمودی برابر ۱۰dBμV تنظیم شده است. محور افقی برای دو گستره‌ی فرکانسی ۱۰k-۱۵۰kHz و ۱۵۰k-۳۰MHz تنظیم شده است. تفکیک-پذیری پهنای باند (RBW) اسپکتروم آنالایزر مدل GSP-830 با توجه به حالت‌های تنظیمی این اسپکتروم آنالایزر در محدوده فرکانسی ۱۰k-۱۵۰kHz برابر ۳kHz و برای ۱۵۰k-۳۰MHz برابر ۳۰kHz



شکل (۱۴): اندازه پیک اصلی طیف EMI مد مشترک در نتایج مدلسازی و اندازه‌گیری عملی در مبدل پیشنهادی با خازن خنثی ساز  
Fig. (14): CM-EMI main peak of simulation and experimental results in proposed converter with cancellation capacitor

برای ارزیابی میزان کاهش EMI مد مشترک در مبدل فلای بک پیشنهادی نسبت به مبدل فلای بک معمولی، مقدار پیک اصلی EMI مد مشترک در بازه‌های مختلف فرکانسی برای دو مبدل بر اساس نتایج عملی در شکل (۱۵) آورده شده است. طبق نمودار دیده می‌شود که پیک اصلی به میزان قابل توجهی یعنی ۱۴dBμV کاهش پیدا کرده است. در اکثر بازه‌های فرکانسی دیگر نیز، سطح EMI کاهش پیدا کرده است. با این حال به دلیل وجود فاصله هوایی در ترانسفورمرهای مبدل فلای بک و نرسیدن به ضریب تزویج یک، حالت ایده‌آل یعنی خنثی‌سازی کامل اثر خازن پارازیتی سوئیچ در مبدل فلای بک رخ نمی‌دهد که نتایج عملی اندازه‌گیری هم این موضوع را تأیید می‌کند.



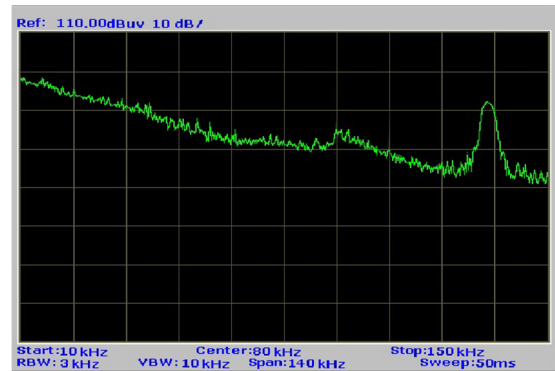
شکل (۱۵): پیک اصلی طیف EMI مد مشترک در مبدل فلای بک معمولی و فلای بک با خازن خنثی‌ساز در بازه‌های مختلف فرکانسی.  
Fig. (15): CM-EMI main peaks in regular and proposed converters for various frequency ranges

### ۹- نتیجه‌گیری

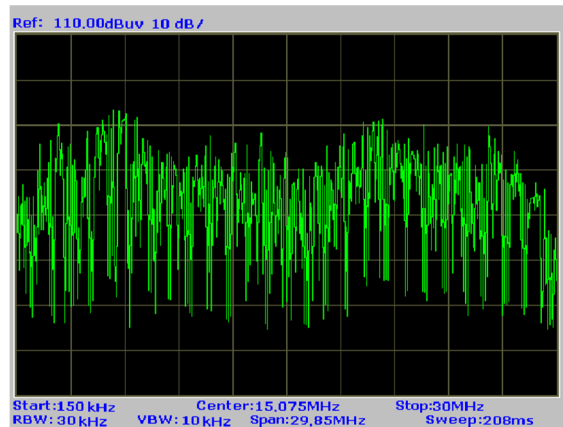
در این مقاله، روش مدلسازی مبدل فلای بک از دید EMI مد مشترک با تکیه بر خازن پارازیتی گرماگیر کلید ارایه شد که با استفاده از آن طیف EMI هدایتی مد مشترک پیش‌بینی شد. یک روش برای حذف این خازن پارازیتی با استفاده از تزویج دو سیم‌پیچ و یک خازن کوچک بررسی شد و مبدل فلای بک پیشنهادی به کمک این روش پسو

همچنین محدوده فرکانسی وقوع پیک اصلی به خوبی توسط مدل پیش‌بینی شده است. علاوه بر مسائل مربوط به دقت شبیه‌سازی، تفاوت‌های موجود بین نتایج مدلسازی و شبیه‌سازی به دلیل صرفنظر کردن از پارازیت‌های کابل‌ها، LISN و خازن‌های مسیرهای مدار چاپی در مدل است که به دلیل جلوگیری از پیچیده شدن مدل صرفنظر شده‌اند.

برای دید بهتر، در شکل (۱۴)، مقادیر پیک اصلی طیف EMI برای نتایج مدلسازی و اندازه‌گیری عملی در مبدل پیشنهادی با خازن خنثی‌ساز آورده شده است. در این مقاله سطح EMI هدایتی به کمک شبیه‌سازی مداری با نرم‌افزار OrCAD انجام گرفت. لازم به ذکر است در صورت وجود داده‌های مدلسازی محاسباتی و نیز داده‌های نقطه به نقطه اندازه‌گیری عملی برای ارزیابی دقیق کیفیت مدلسازی می‌توان از روش FSV استفاده کرد [۱۷]. در این روش، هر گروه داده به دو اندازه تفاوت دامنه (ADM) و اندازه تفاوت ویژگی (FDM) تجزیه می‌شود و بر اساس آنها اندازه اختلاف عمومی برای مقایسه نتایج به دست می‌آید.



(الف) (a)



(ب) (b)

شکل (۱۳): اندازه‌گیری عملی طیف EMI مد مشترک در مبدل فلای بک پیشنهادی الف) محور عمودی: ۳۰dBμV-۱۱۰dBμV، محور افقی: ۱۰k-۱۵۰k MHz، ب) محور عمودی: ۳۰dBμV-۱۱۰dBμV، محور افقی: ۱۵۰k-۳۰k MHz

Fig. (13): Measurement of the CM-EMI spectrum in proposed flyback converter a) Vertical axis: 30-110dBμV, Horizontal axis: 10k-150kHz, c) Vertical axis: 30-110dBμV, Horizontal axis: 150k-30MHz



کاهش موثر EMI هدایتی مد مشترک خصوصاً در پیک اصلی (حدود  $14\text{dB}\mu\text{V}$  کاهش) و در نتیجه بهبود سازگاری الکترومغناطیسی شود.

معرفی شد و مورد شبیه‌سازی قرار گرفت. برای بررسی درستی نتایج شبیه‌سازی، نتایج عملی طیف EMI هدایتی مد مشترک نیز آورده شد که علاوه بر تأیید مناسب بودن مدل‌سازی، مشاهده شد خنثی‌سازی خازن پارازیتی بین درین سوئیچ اصلی و خازن گرماگیر می‌تواند باعث

### References

- [1] L. Xing, J. Sun, "Conducted common-mode EMI reduction by impedance balancing", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 7, No. 3, pp. 1084–1089, Mar. 2012.
- [2] M.R. Yazdani, N.A. Filabadi, J. Faiz, "Conducted electromagnetic interference evaluation of forward converter with symmetric topology and passive filter", IET Power Electronics, Vol. 7, No. 5, pp. 113–1120, 2014.
- [3] R. Chen, J.D. van Wyk, S. Wang, W.G. Odendaal, "Improving the characteristics of integrated EMI filters by embedded conductive layers", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 20, No. 3, pp. 611–619, May 2005.
- [4] B.J. Pierquet, T.C. Neugebauer, D.J. Perreault, "Inductance compensation of multiple capacitors with application to common- and differential-mode filters", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 21, No. 6, Nov. 2006.
- [5] S. Wang, F.C. Lee, "Analysis and applications of parasitic capacitance cancellation techniques for EMI suppression", IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 57, No. 9, pp. 3109–3117, Sep. 2010.
- [6] D. Fu, S. Wang, P. Kong, F.C. Lee, "Novel techniques to suppress the common-mode EMI noise caused by transformer parasitic capacitances in DC–DC converters", IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 60, No. 11, pp. 4968–4977, 2013.
- [7] S. Wang, F.C. Lee, J.D. van Wyk, "Design of inductor winding capacitance cancellation for EMI suppression", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 21, No. 6, pp. 1825–1832, Nov. 2006.
- [8] S. Wang, F.C. Lee, "Common-mode noise reduction for power factor correction circuit with parasitic capacitance cancellation", IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility, Vol. 49, No. 3, pp. 537–542, Aug. 2007.
- [9] A.J. McDowell, T.H. Hubing, "Parasitic inductance cancellation for surface mount shunt capacitor filters", IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility, Vol. 56, No. 1, pp. 74–82, Feb. 2014.
- [10] D. Cochrane, D.Y. Chen, D. Boroyevich, "Passive cancellation of common-mode noise in power electronic circuits", IEEE Trans. Power Electronics, Vol. 18, No. 3, pp. 756–763, May 2003.
- [11] C.R. Paul, "Introduction to electromagnetic compatibility", John Wiley & Sons Publication, Second Edition, 2006.
- [12] 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, Edition 6, 2008.
- [13] E. Adib, H. Farzanehfard, "Family of zero current zero voltage transition PWM converters", IET Power Electronics, Vol. 1, No. 1, pp. 144–153, Jun. 2008.
- [14] A.I. Pressman, Switching Power Supply Design, McGraw-Hill, 3rd Edition, 2009.
- [15] M.R. Yazdani, H. Farzanehfard, J. Faiz, "EMI analysis and evaluation of an improved ZCT flyback converter", IEEE Trans. Power Electronics, Vol. 26, no. 8, pp. 2326–2334, Aug. 2011.
- [16] Q. Liu, "Modular approach for characterizing and modeling conducted EMI emissions in power converters", Ph.D Dissertation, Virginia Tech, 2005.
- [17] S.M.M. Mirtalaei, S.H.H. Sadeghi, R. Moini, "A combined method-of-moments and near-field measurements for EMI evaluation of switched-mode power supplies", IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 61, No. 4, pp. 1811–1818, Apr. 2014.