

بررسی PWM تصادفی برای کاهش EMI برای حفاظت چارهای DC

مسعود صادقیان	عرفان شجاعی	رضا علیمردانی
دانشجوی کارشناسی ارشد	دانشجوی کارشناسی ارشد	دانشگاه آزاد اسلامی
دانشگاه شریف پردیس بین الملل	دانشگاه شریف پردیس بین الملل	واحد نجف آباد
m_Sadeghian@kish.Sharif.edu	e_shojaeibarjoei@kish.sharif.edu	r.alimardani@gmail.com

خلاصه - در این مقاله مدولاسیون تصادفی با مدولاسیون پهنای پالس (PWM) برای درایو یک موتور dc به وسیله چار کاهنده (باک) پل نیمه، به صورت نسبی مقایسه می شود. برای مقایسه این دو نوع مدولاسیون از یک بورد DSP2 استفاده می شود. این بورد از یک نوع سیگنال پروسور با نام TMS320C32 تشکیل شده است که امکان تغییر مدولاسیون های مختلف را به این بورد می بخشد. تاثیر آرایش تصادفی در انتشار فرکانس های غالب که به صورت عادی در فرکانس ثابت PWM وجود دارند توسط تخمین های شدت طیفی توان (PSD) در رنج فرکانس پایین ارزیابی می شود. پخش PSD یک روش خوب برای کاهش EMI هدایت شده در ترمینال های ورودی می باشد. در انتها برای یک نمونه نمایشی از یک بورد با دو مبدل قدرت (که به وسیله میکرو کنترلر PICF16F876 درایو شدند) برای اندازه گیری EMI تحت استانداردهای CISPR 25 یا EN 55025 استفاده می شود.

کلمات کلیدی - تداخل الکترومغناطیسی (EMI)، چار باک، شدت طیفی توان (PSD)، مدولاسیون پهنای پالس تصادفی (RPWM)

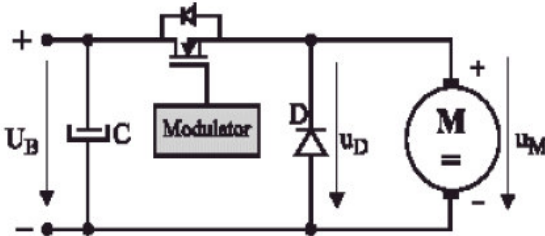
۱- مقدمه

می باشد که مشکل EMI هدایت شده و EMI تشعشعی را برای مبدل های قدرت سوئیچینگ در محیط کار مشخص می کند. امروزه برای آسایش انسان در اتومبیل ها نیاز استفاده از موتورهای dc مانند: حرکت آینه ها، پنجره ها، پمپ آب و غیره افزایش یافته است. موتورهای dc مشخصه های متغیری دارند و کاربردهای وسیعی در درایوهای با سرعت متغیر دارند. موتورهای dc می توانند گشتاور راه اندازی بزرگی داشته باشند و همچنین می توانند کنترل سرعتی در رنج وسیع داشته باشند. روشهای کنترل سرعت موتورهای dc ساده تر و ارزان تر از روشهای مشابه ac آن می باشند. با پیشرفت در تبدیل توان، تکنیک های کنترل و میکرو کامپیوترها رقابت جدی میان درایوهای موتور ac و درایوهای موتور dc به وجود آمد. با وجود اینکه آینده درایوهای ac بسیار روشن می باشد ولی درایوهای dc هم در بسیاری صنایع کاربرد دارند [1,2].

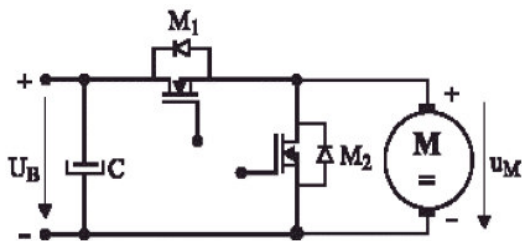
به تازگی استانداردهای تداخل الکترومغناطیسی (EMI) و سازگاری الکترومغناطیسی (EMC) مانند FCC، VDE، EN و CISPR نسبت به گذشته سختگیرتر شده اند. الکترونیک قدرت پیشرفته یک نظم مهندسی می باشد که ارتباط مستقیمی با تغییر توان الکتریکی با استفاده از قطعات نیمه هادی سریع دارد. بیشتر این قطعات نیمه هادی، کلیدهایی می باشند که طراح برای کاهش تلفات توان از آنها استفاده می کند. سوئیچینگ سریع این نیمه هادی ها سیگنالهایی با dv/dt و di/dt بالا به وجود می آورد که باعث پهنای باند بزرگی در پارازیتها می شوند. سیگنالهای با پهنای باند زیاد از میان المانهای قدرت می گذرند و محیط الکترومغناطیسی را توسط اختلال های ناخواسته تضعیف می کنند.

استاندارد CISPR 25 تأیید کننده انتشار EMC

می یابند و قدرت هارمونیک در یک طیف نویز با دامنه ای کوچک پخش می شود. پخش انرژی هارمونیک ها از میان طیف ممکن است به روشهای متنوعی صورت گیرد [5].



شکل (۱-الف): چاپر کاهنده (باک)



شکل (۱-ب): چاپر باک سنکرون

۳- نمونه های سوئیچینگ تصادفی

از میان مدولاسیون های تصادفی چهار نوع بیشتر مورد توجه می باشند که عبارتند از: مدولاسیون وضعیت پالس تصادفی (RPPM)، مدولاسیون پهنای پالس تصادفی (RPWM)، مدولاسیون فرکانس حامل با چرخه کار ثابت (RCFMFD) و مدولاسیون فرکانس حامل با چرخه کار متغیر (RCFMVD).

۳-۱- مشخصه های نمونه های مدولاسیون های

تصادفی

روش RPPM مشابه روش PWM کلاسیک می باشد که در آن فرکانس سوئیچینگ ثابت است. در این روش وضعیت پالس گیت بجای اینکه در ابتدای هر سیکل باشد در هر پریود سوئیچینگ می تواند به صورت تصادفی در هر کجای سیکل باشد. در روش RPWM پهنای پالس می تواند تغییر کند اما پهنای پالس متوسط باید با مقدار چرخه

در این مقاله تحقیقات سیستماتیکی برای استفاده از نمونه های مدولاسیون تصادفی در دو نوع مبدل DC-DC که در بالا بررسی شدند، ارائه می شود. در این دو نوع مبدل انتشارهایی بر مبنای اثرات مدولاسیون های تصادفی مختلف در PSD و بهینه سازی EMI و اندازه گیریهای مطابق بر CISPR 25 به وجود می آید [3].

۲- درایوهای چاپر

از چاپر برای کنترل ولتاژ آرمیچر در موتور dc استفاده می شود. مدار چاپر برای تغذیه یک موتور dc در شکل (۱-الف) نشان داده شده است. امروزه در چاپرها بیشتر از ماسفت های قدرت سریع که زمان کلید زنی کوتاه و همچنین $R_{DC(on)}$ کمی داشته باشند استفاده می شود. استفاده از این ماسفت ها تلفات هدایتی را کاهش می دهد ولی باعث ایجاد dv/dt و di/dt بالایی می شود. این امر را می توان در شکل (۱-الف) مشاهده کرد در این شکل ولتاژ خروجی چاپر با افت ولتاژ دو سر دیود ($V_d = -0.6V$) برابر می باشد. برای افزایش راندمان از چاپر باک سنکرون که در شکل (۱-ب) نشان داده شده است، استفاده می شود که در آن تلفات هدایتی در ماسفت ها کمتر از حالت قبل می باشد. ولتاژ متوسط موتور از رابطه (۱) بدست می آید که در این رابطه D ، نسبت کار در چاپر می باشد.

$$V_M = V_D = DV_B \quad (1)$$

در مبدلهای DC-DC متعارف ولتاژ خروجی معمولاً به وسیله چرخه کار در کلید اصلی کنترل می شود. چرخه کار و فرکانس سوئیچینگ در حالت پایدار ثابت نگه داشته می شوند بنابراین قدرت هارمونیک جریان ورودی و ولتاژ خروجی بر روی مضرهای فرکانس سوئیچینگ متمرکز می شوند. برای استفاده نمونه های سوئیچینگ تصادفی مختلف، قدرت هارمونیک می تواند در حوزه فرکانس پخش شود و حداکثر شدت طیفی توان (PSD) کمتر از نمونه PWM متداول می شود. هارمونیک های گسسته کاهش

(۲)

$$R_{RPPM} = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{T_s}$$

که در آن ε_1 و ε_2 به ترتیب حداقل و حداکثر وضعیت پالس در هر سیکل می باشند. اگر ε_1 برابر صفر باشد در این صورت T_s پریود سوئیچینگ نامی خواهد بود. برای RPWM از رابطه (۳) داریم:

(۳)

$$R_{RPWM} = \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{T_s} = d_2 - d_1$$

که در این رابطه $\alpha_k \in [\varepsilon_1, \varepsilon_2]$ و چرخه کار (d_k) بین حداقل مقدار ممکن d_1 و حداکثر مقدار ممکن d_2 تغییر می کند. برای RCFMFD و RCFMVD از رابطه (۴) داریم:

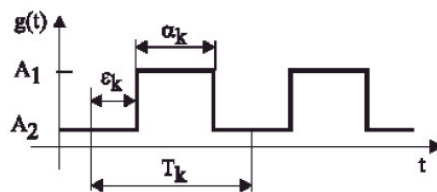
$$R_{RCFMFD} - R_{RCFMVD} = \frac{T_2 - T_1}{T_s} \quad (۴)$$

در این دو نوع مدولاسیون T_k بین حداقل مقدار ممکن T_1 و حداکثر مقدار ممکن T_2 تغییر می کند و چرخه کار (d_k) در RCFMFD بین $[\alpha_k / T_2, \alpha_k / T_1]$ تغییر می کند که در این روابط α_k ثابت می باشد.

۳-۳- شدت طیفی توان (PSD)

اکنون ما باید اثبات کنیم که طیف هارمونیکی در حالت مدولاسیون تصادفی به صورت اتفاقی می باشد و برای این کار باید از یک ابزار ریاضی مخصوص استفاده کرد. بر اساس تئوری پردازش تصادفی یک کمیته طبیعی در سوئیچینگ تصادفی می تواند یک طیف توانی باشد ولی نمی تواند یک طیف هارمونیکی باشد. تابع خود همبستگی برای یک پردازش تصادفی، یک میانگین استاتیکی اختصاصی می باشد که به مشخصه های سیگنال های تصادفی در حوزه زمان بستگی دارد. تبدیل فوریه (FT) تابع خود همبستگی، شدت طیفی توان را به وجود می آورد و باعث تبدیل حوزه زمان به حوزه فرکانس می شود. PSD

کار برابر باشد. در روش RCFMFD پریود سوئیچینگ تصادفی و چرخه کار ثابت می باشند در حالی که در روش RCFMVD پریود سوئیچینگ تصادفی و پهنای پالس ثابت می باشند. در روش RCFMVD چون پهنای پالس ثابت است و پریود سوئیچینگ تصادفی می باشد در نتیجه چرخه کار نیز تصادفی خواهد بود. با این وجود چرخه کار متوسط برابر مقدار مطلوب می باشد. با در نظر گرفتن شکل ۲ مشخصه های پالس هر کدام از مدولاسیون ها در جدول ۱ نشان داده شده است [6,7].



شکل ۲: سیگنال سوئیچینگ در مدولاسیون تصادفی

تابع سوئیچینگ $g(t)$ دارای دو سطح گسسته می باشد (A_1 و A_2) که برای توصیف رفتار مبدل های DC-DC کلاسیک استفاده می شوند. در شکل ۲، T_k مدت سیکل k ام می باشد، α_k مدت پالس گیت در سیکل k ام می باشد و ε_k زمان تاخیر پالس گیت می باشد. چرخه کار کلید که با d_k نشان داده می شود در سیکل k ام برابر α_k / T_k می باشد.

جدول ۱: مشخصه های نمونه های سوئیچینگ تصادفی متفاوت

مدولاسیون	T_k	α_k	ε_k	$d_k = \alpha_k / T_k$
PWM	ثابت	ثابت	صفر	ثابت
RPPM	ثابت	ثابت	تصادفی	ثابت
RPWM	ثابت	تصادفی	صفر	تصادفی
RCFMFD	تصادفی	تصادفی	صفر	ثابت
RCFMVD	تصادفی	ثابت	صفر	تصادفی

۳-۲- تعریف سطح تصادف

برای بررسی تاثیر سطح تصادف در یک متغیر تصادفی بر روی پخش قدرت هارمونیکی، یک سطح تصادف R برای هر کدام از روش های مدولاسیون تعریف می شود. برای RPPM از رابطه (۲) داریم:

توان را صاف می کنند که این حالت بر خلاف PWM معمولی می باشد. در PWM معمولی توان سوئیچینگ در مضرهای فرکانس سوئیچینگ پراکنده می باشد. بیشتر مدولاسیون ها RPWM و RCFMFD می باشند که در قسمت های f, g, c, b در شکل ۳ نشان داده شده اند. پخش PSD یک روش خوب برای کاهش EMI هدایت شده در ترمینال های ورودی می باشد که هدف اصلی ما نیز همین می باشد [10].

۴- تداخل الکترومغناطیسی (EMI)

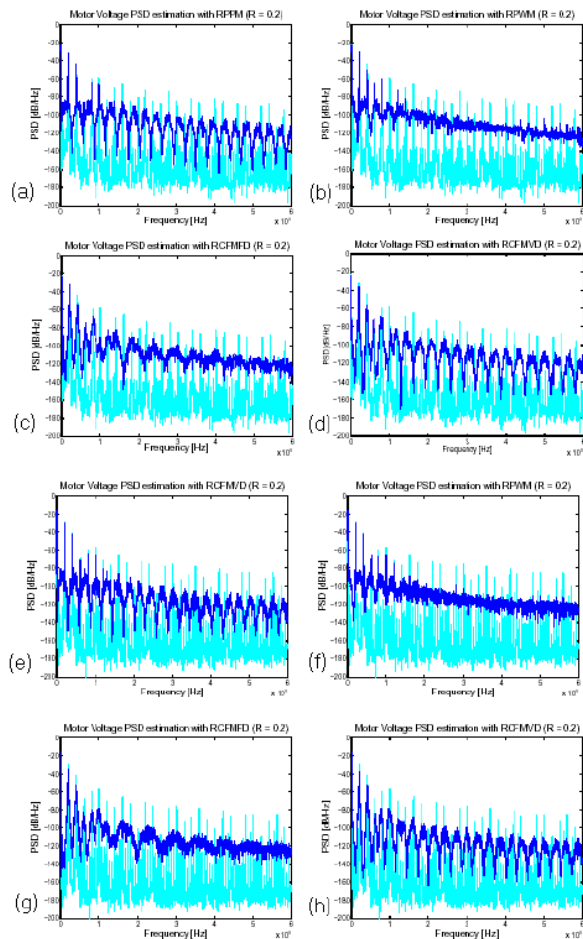
پیش بینی دقیق EMI می تواند طراح را برای جبران تنظیمات EMI و رفع مشکلات EMI قبل از ساخت برد نهایی کمک کند. المان های فعال مانند دیود ها و کلید ها، اصلی ترین منابع نویز در زمان کلید زنی در منابع تغذیه می باشند. ولتاژ و جریان حلقوی کلید ها بر روی EMI به شدت تاثیر می گذارند. به هر حال یک مدل المان فعال برای پیش بینی فرکانس حلقوی، دامنه، فرافشش و آفت و خیز های گذرا و همچنین طرح اولیه مدار معادل الکتریکی بر روی PCB نیز ضروری می باشد. در این مورد استفاده از نرم افزارهای تجاری شبیه سازی نظیر PSPICE هم بعلت محدودیت المان های موجود در کتابخانه آنها مشکل خواهد بود. به تازگی تعداد زیادی از مدل های نمونه Spice ارائه شده است. با این وجود نادرستی مقادیر پارامترهای مدل، برای شبیه سازیهای EMI، طراح را مجبور به تمرین و کسب تجربه کافی برای طراحی مناسب می کند.

۴-۱- چاپر باک جداگانه و EMI

چاپر باک در شکل ۱ یک نمونه مبدل پایه است که عملکرد مبدل های پیچیده تر را نیز می توان از آن الگو برداری کرد. نویز EMI توسط عملکرد مبدل و همچنین المانهای پراکنده پرازیتی ایجاد می شود. بر اساس مکانیسم ایجاد EMI این نویز به دو نوع تقسیم می شود: نویز مُد مشترک (CM) و نویز مُد دیفرانسیلی (DM). نویز

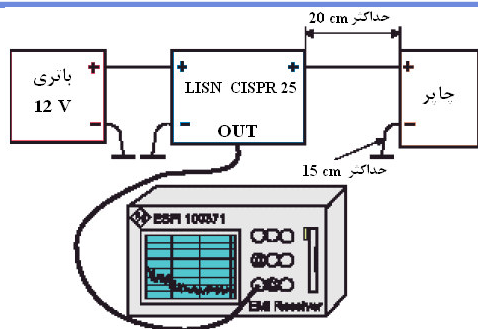
یا همان $S_p(f, R)$ همان شکل موج گذرا در شکل ۲ در RPWM و RPPM می باشد که از رابطه (۵) بدست می آید [4].

$$S_p(f, R) = f_s \left\{ E \left[|G(f)|^2 \right] - |E[G(f)]|^2 + f_s |E[G(f)]|^2 \sum_{K=-\infty}^{\infty} \delta(f - kf_s) \right\} \quad (5)$$

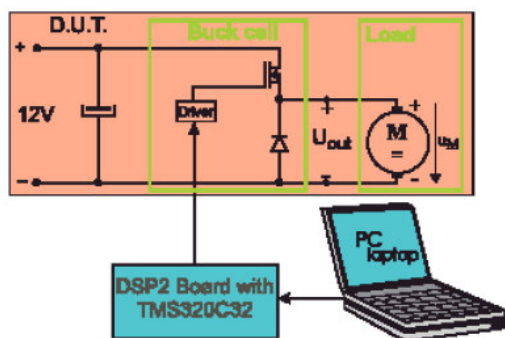


شکل ۳: تخمین های PSD برای ولتاژ موتور (R=0.2)

در رابطه (۵) f_s فرکانس سوئیچینگ نامی، $G(f)$ تبدیل فوریه یک سیکل از تابع سوئیچینگ $g(f)$ سطح تصادف R می باشد و $E[0]$ آپراتور پیش بینی می باشد. کلیه تخمین های PSD به وسیله نرم افزار MATLAB بدست آمده اند و نتایج آنها در شکل ۳ نشان داده شده است. در این شکل قسمت های a تا d مربوط به مبدل باک و قسمت های e تا h مربوط به مبدل باک سنکرون می باشند. کلیه مدولاسیون های پیشنهادی و مطرح شده طیف های



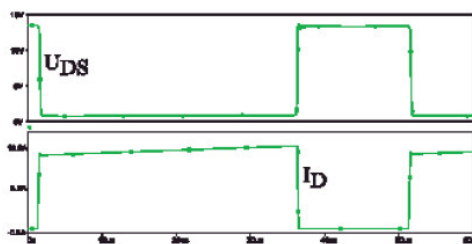
شکل (۵-الف): اندازه گیری EMI هدایت شده برای CISPR 25



شکل (۵-ب): درایو چاپر باک توسط برد DSP2 و PC

LISN برای جلوگیری از ایجاد نویز در شبکه نیرو و جلوگیری از مخدوش شدن نتایج اندازه گیری بکار می رود. همچنین از LISN برای معرفی یک امپدانس نسبتاً پایدار به جای امپدانس متغیر شبکه نیرو و تثبیت مسیر برگشت جریان های CM استفاده می شود. در این مورد برای رعایت محدودیت های نویز هدایت شده در CISPR25 از کابل هایی با طول معین بین مبدل و LISN استفاده می شود که مقادیر آنها در شکل (۵-الف) نشان داده شده است. در شکل (۵-ب) DUT توسط بورد DSP2 با PWM معمولی و مدولاسیون های تصادفی مختلف درایو شده است. نتایج نصب یک مبدل باک که در شکل ۱ و شکل (۵-ب) نشان داده شده است در اندازه گیری نویز هدایت شده با توجه به CISPR 25 در شکل ۶ نشان داده شده است. علت چنین سطح بالایی از نویز هدایت شده را می توان در سوئیچینگ سخت کلید اصلی و ساختمان مبدل قدرت پیدا کرد که از سلول قدرت باک، بورد سیگنال پروسسور DSP2 و یک کامپیوتر شخصی تشکیل می شود [3].

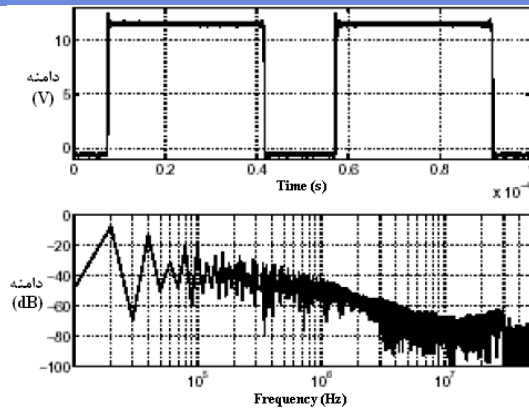
DM عمدتاً به علت جریان ضربانی مبدل (شکل ۴) بوجود می آید و با استفاده از فیلتر ورودی می توان آن را تضعیف کرد. در شکل ۱، خازن الکترولیتی که به عنوان فیلتر ورودی می باشد فقط برای کاهش نویز DM در برابر فرکانس سوئیچینگ می باشد.



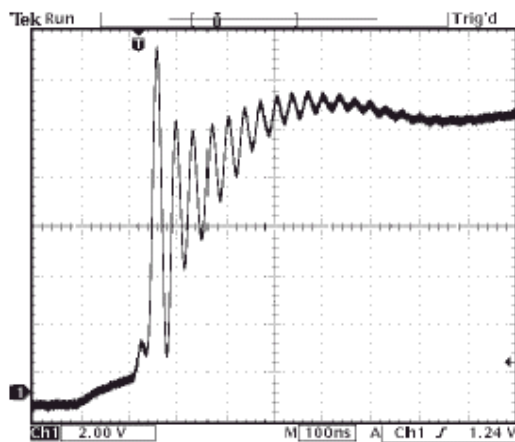
شکل ۴: منابع نویز CM و نویز DM

نویز CM بیشتر به علت dv/dt بالا و فرکانس نوسانهای تولید شده توسط اثر متقابل سوئیچینگ سریع المان های نیمه هادی (ماسفت ها) بوجود می آید. بر عکس نویز DM که بین دو خط تغذیه در مبدل می باشد، نویز CM بین خطوط تغذیه و زمین مبدل بوجود می آید. وقتی که اتصال های مبدل بر روی PCB پیاده سازی می شوند جریان CM از یک جریان جابجایی که از میان ظرفیت خازنی بین مسیر عبور جریان و صفحه زمین جاری می شود، تشکیل می شود. در مود **hard switching** بر عکس مود **soft switching** قسمت های سوئیچینگ جریان بار کامل را در زمان خاموش شدن و ولتاژ کل را در زمان روشن شدن انتقال می دهند (شکل ۴). هنگامی که نویز CM به ولتاژ سوئیچینگ و نویز DM به جریان سوئیچینگ بپیوندند، نویزهای CM و DM به صورت همزمان رخ می دهند.

اندازه گیری نویز هدایت شده در شکل (۵-الف) نشان داده شده است که در این شکل DUT یک چاپر باک می باشد و شبکه تثبیت کننده امپدانس خط (LISN) یک شبکه فیلتر پایین گذر تثبیت شده می باشد که برای اندازه گیری انتشار هدایت شده CM از خطوط تغذیه بکار می رود.



شکل (۶-ب): ولتاژ خروجی و طیف هارمونیکی



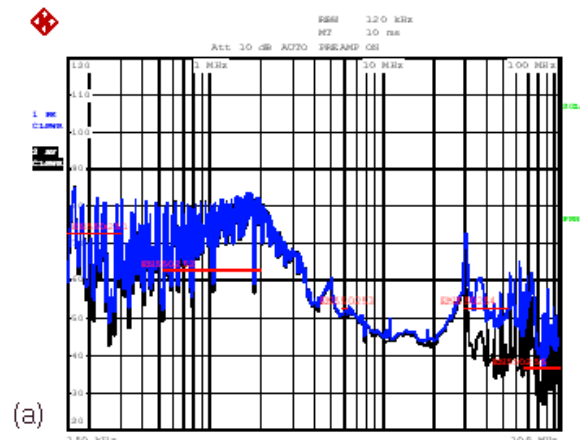
شکل (۶-پ): نوسان های ولتاژ خروجی

برای اندازه گیری نویز هدایت شده در سیستم ارزیابی ما یک برد نمایشی جدید را که شامل سلول قدرت باک به همراه یک سیستم محرکه (PIC16F876) می باشد را پیشنهاد می کنیم. این سیستم محرکه قابلیت ارسال پهنای باند را

CISPR 25 می شود. بنابراین یک برد جدید برای تبدیل DC-DC با سیستم درایو خودکار معرفی می شود که می توانید آن را در شکل ۷ مشاهده کنید. این برد به صورتی طراحی شده که بتواند به عنوان یک چاپر باک یا یک مبدل باک سنکرون کار کند. انتخاب چاپر باک یا مبدل باک سنکرون به درایو دو ماسفتی که در شکل ۷ نشان داده شده اند، بستگی دارد. در حالت اول (چاپر باک) M_1 با نسبت کار روشن است و M_2 خاموش می باشد و در حالت دوم

همانطور که در شکل (۶-الف) مشاهده می کنید یک مقدار زیاد نویز هدایت شده در فرکانس 30MHz وجود دارد که در شکل (۶-ب) نیز در سطح افزایشی در طیف هارمونیکی ولتاژ خروجی قابل مشاهده است. وجود نویز اضافی در فرکانس های بیشتر از 50MHz را می توان در زمان کوتاه خیز (زیاد شدن) و نوسان های ولتاژ خروجی جستجو کرد که آنها را می توان در شکل (۶-پ) مشاهده کرد.

با توجه به شکل (۶-الف) می توان دریافت که در کلیه نمونه های تصادفی اختلاف بین مقادیر متوسط و مقادیر پیک، حداکثر 8dB μ V می باشد که این امر یک نقطه شروع بسیار عالی برای پیشرفت در طراحی مدارهای جدید می باشد [9].



شکل (۶-الف): EMI در مبدل باک PWM با استفاده از برد DSP2 در مدولاسیون های مختلف دارا می باشد. به دلیل ظرفیت عددی محدود در میکرو کنترلرهای PIC فقط یک نمونه مدولاسیون تصادفی در سخت افزار قابل اجرا می باشد و آن RPWM می باشد.

۴-۲- چاپر باک سنکرون و EMI

سیستم کاری مبدل قدرت به این صورت می باشد که باعث سطح نویز هدایت شده بسیار بالا با توجه به

Power Electronics Specialists Conference, PESC'96, p.15 (1996).

- [3]. EN 55025 Document, Radio disturbance characteristics for protection of receivers used on board vehicles, boats, and on devices — Limits and methods of measurements (2004).
- [4]. A.M. Stanković, G.C. Verghese, and D.J. Perreault, IEEE Trans. On Power Electronics 10, 680 (1995).

[۵]. محمد ه. رشید "الکترونیک قدرت" ویرایش دوم ترجمه ابراهیم افجه ای و مجید مهاجر . ۱۳۸۶

[6]. F. Mihalič, M. Milanović, and C. Couto, International Journal of Electronics 90, 235 (2003).

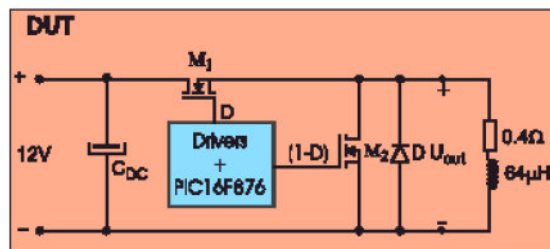
[7]. K.K. Tse, H.S. Chung, S.Y.R. Hui, and H.C. So, IEEE Trans. on Industrial Electronics 47, 253 (2000).

[8]. J.J. Goedbloed, Electromagnetic Compatibility (Prentice Hall, NY, 1992).

[۹]. دکتر عبدالعلی عبدی پور "نویز در مدارات و سیستمهای مخابرات الکترونیکی" ۱۳۸۳

[10]. T.G. Habetler and D.M. Divan, IEEE Trans. on Power Electronics 6,356 (1991).

(مبدل باک سنکرون) هر دو ماسفت به صورت همزمان روشن می شوند. برای عملکرد بهینه در فرکانس بالا (EMI هدایت شده کم) چندین خازن سرامیکی کوچک نزدیک رابط DC قرار می دهیم و برای اجتناب از فیلترهای EMI قدیمی در ترمینال های ورودی برای کاهش نویز فرکانس پایین، یک اسنابر خاموش را در طرف بالای کلید قرار می دهیم [8].



شکل ۷: مبدل DC-DC پیشرفته برای چاپر باک سنکرون

۵- نتیجه گیری

در این مقاله چهار نمونه از مدولاسیون های تصادفی بر روی PSD و EMI هدایت شده به صورت نسبی بررسی شدند. همچنین ثابت شد که کلیه نمونه های تصادفی می توانند به تدریج قدرت هارمونیکی فرکانس گسسته را در تمام طیف فرکانسی پخش کنند. اگر چه این تحقیقات کلیه نمونه های مورد بررسی را شامل می شود ولی RPWM و RCFMDF حداقل طیف هارمونیکی فرکانس پایین را دارا می باشند و بنابراین می توانند به عنوان بهترین انتخاب برای استفاده در مبدل های DC-DC باشند. با این وجود به دلیل محدودیتهای محاسباتی میکرو کنترلر PIC16F876 فقط می توان از RPWM برای تغییر اندازه گیری های EMI استفاده کرد.

مراجع :

- [1]. [1] D. Kos, F. Mihalič, and K. Jezernik, IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE'05, p.441 (2005).
- [2]. Randomized PWM for conductive EMI reduction in DC-DC choppers R. Redl, IEEE