

ارزیابی یک مبدل فرورود تک سوییچه از دید ریپل جریان ورودی و EMI هدایتی

نرگس سلطانیان^۱ و محمد روح اله یزدانی^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد الکترونیک دانشگاه آزاد اسلامی واحد خوراسگان، soltanian.narges@gmail.com

^۲ استادیار دانشگاه آزاد اسلامی واحد خوراسگان، yazdani@khuisf.ac.ir

چکیده - در این مقاله یک مبدل فرورود کاهش ریپل جریان ورودی با بهره‌گیری از سلف نشستی ترانسفورمر ارزیابی گردیده است. استفاده از یک خازن کلمپ بین دو سیم پیچ اولیه در مبدل فرورود با سیم پیچ ثانویه نه تنها ریپل جریان ورودی را بدون استفاده از فیلتر LC خارجی کاهش می‌دهد بلکه از جهش‌های ولتاژ دو سر سوییچه اصلی در اثر سلف نشستی ترانسفورمر، در هنگام خاموش شدن نیز جلوگیری می‌نماید. بررسی‌های تئوری بر روی این مبدل انجام شده است. جهت بررسی صحت نتایج تئوری، این مبدل برای توان خروجی ۸۰ وات طراحی و نتایج شبیه‌سازی با نرم افزار Orcad ارائه گردیده است.

کلید واژه - مبدل فرورود با سیم پیچ ثانویه (TFC)، مبدل فرورود تک سوییچه (SSF)، مبدل فرورود کاهش ریپل (FRR)

استفاده می‌شود [3]. در تکنیک استفاده از خازن‌های پارازیتی، اندوکتانس مغناطیسی و خازن‌های پارازیتی رزونانس کرده و ترانس را به صورت اتوماتیک ریست می‌کنند [4]. استفاده از دو سوییچه جهت ریست اتوماتیک ترانس در مبدل فرورود یکی از روش‌های دیگر ارائه شده است. مشکل این مدار نیاز به استفاده از ماسفت اضافی می‌باشد [5]. مبدل فرورود اکتیو کلمپ یکی از تکنیک‌های ریست ترانس است. قسمت اکتیو مبدل، خازن کلمپ را ریست می‌کند. از ویژگی‌های این مبدل این است که علاوه بر کلمپ ولتاژ سوییچه در خاموشی، شرایط سوییچینگ در روشن بودن را نیز فراهم می‌کند. همچنین بازده در این مبدل بهبود یافته است. در این مبدل نیاز به سوییچه اضافی می‌باشد و تلفات هدایتی نیز ۵۰-۳۰ درصد افزایش می‌یابد [6]-[7]. استفاده همزمان دو یا چند مبدل به صورت زوجی می‌تواند تلفات توان و استرس جریان روی سوییچه‌ها را توزیع کند. با استفاده از ساختار در هم تنیده ریپل‌های جریان خروجی به صورت موثری کاهش می‌یابد [8]-[9]. در مبدل پیشنهادی از دو سوییچه اکتیو و دو اکتیو کلمپ مبدل فرورود به صورت همزمان استفاده شده است. سوییچه‌های اصلی در هر دو مبدل سوییچه کمکی برای دیگری جهت رسیدن ZVS محسوب می‌شوند. این مبدل به سوییچه اضافی برای ZVS و افزایش ضریب تبدیل نیاز

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 ترجیح داده می‌شوند. از جمله مبدل‌های سوئیچینگ، مبدل فرورود است که در منابع تغذیه توان پایین کاربرد وسیعی دارد. در این مبدل به علت عدم تخلیه جریان سلف، نیاز به ساز و کار ریست هسته ترانس می‌باشد. انرژی ذخیره شده در سلف‌های نشستی در طی جاری شدن جریان نمی‌تواند به بار منتقل شود که باعث ایجاد اسپایک‌های ولتاژ و نوسانات فرکانس بالای نا مطلوب می‌شود. مبدل فرورود دارای جریان ورودی جهش دار است، این جریان باعث ایجاد تداخل الکترومغناطیسی (EMI) می‌شود که در عملکرد عادی سیستم‌های مجاور تاثیر منفی می‌گذارد [1]. تکنیک‌های زیادی برای رسیدن به این اهداف پیشنهاد شده است.

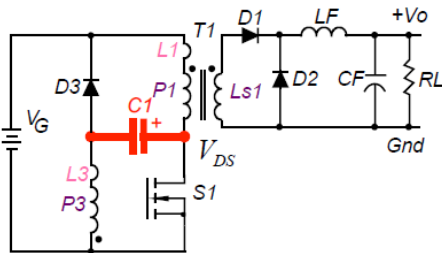
یکی از این تکنیک‌ها، مبدل فرورود کلاسیک است در این روش از سیم پیچ سوم در ترانس استفاده می‌شود [1]. مبدل پیشنهادی دیگر فرورود RCD است [2]. در مبدل پیشنهادی LCDD اسنابر، برای ریست سیم پیچ از مدار اسنابر کم تلف

۲۰۲۱ آبان ماه ۱۳۹۴ - دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)

جریان بار است.

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_3 C_1}} \ll f_s \quad (1)$$

f_o فرکانس طبیعی بین L_3 و C_1 است.



شکل ۱: مدار مبدل فرورود کاهش ریپل ارزیابی شده [11]

وضعیت (۱) بازه زمانی $[T_0 - T_1]$:

عملکرد مدار با خاموش بودن سویچ در T_0 آغاز می گردد. قبل از انرژی از منبع ورودی V_G منتقل می شود و در خازن C_1 ذخیره می گردد. i_{c1} قسمتی از جریان بار را در P_1 و i_G قسمت دیگر جریان بار را در P_3 فراهم می کند به طوری که جمع این دو جریان برابر با جریان بار منعکس شده است. در زمان T_0 :

$$i_G = i_{L1}, \quad i_{C1} = i_{L3}, \quad i_{mag} \ll i_o, \quad i_G + i_{C1} = \frac{i_o}{n} \quad (2)$$

با خاموش شدن سویچ در T_0 به علت روشن شدن D_1 و D_2 سیم پیچ های P_1 و P_3 و $LS1$ متصل می شوند. i_G و i_{c1} به صورت خطی تا رسیدن به جریان بار منعکس شده کاهش می یابند.

$$i_G = i_{L1} = i_c - \frac{V_G}{L_1} (t - T_0) \quad (3)$$

$$i_{C1} = i_{L3} = i_a - \frac{V_G}{L_3} (t - T_0) \quad (4)$$

زمانی که V_{DS} به مقدار $2V_G$ برسد دیود D_3 روشن می شود و $V_{DS} = 2V_G$ کلمپ می شود. $-V_G$ و $-V_{C1}$ روی سیم پیچ های P_1 و P_3 برای شروع ریست هسته اعمال می شود. در لحظه T_1 دیود D_1 خاموش می شود و جریان بار در دیود D_2 می چرخد.

$$i_G = i_{L1} = i_b \quad (5)$$

$$i_{C1} = i_{L3} = -i_b \quad (6)$$

ندارد. عدم نیاز به مکانیزم تقسیم جریان پیچیدگی کنترل جریان را کاهش می دهد. به علت اتصال همزمان ترانس های ثانویه، این مبدل برای کاربردهای توان بالا مناسب است [9]. مبدل پیشنهادی دیگر اسنابر احیا کننده فرورود تک سویچ است. این مبدل علاوه بر داشتن ویژگی های اسنابرهایی بدون تلفات به اندوکتانس مجزا هم نیازی ندارد. در صورتی که مبدل درست طراحی شود، ریست ترانس و شرایط ZVS و ZCS را فراهم می کند. این مبدل انرژی نشتی را جذب کرده و انرژی بازیافتی را، هم به بار و هم به منبع منتقل می کند [10].

در این مقاله یک مبدل فرورود کاهش ریپل (FRR) با بهره گیری از سلف نشتی ترانسفورمر ارزیابی شده است [11]. در این مبدل از یک خازن کلمپ بین دو سیم پیچ اولیه در مبدل فرورود با سیم پیچ ثانویه (TFC) استفاده شده است. عملکرد این مبدل در بخش دوم بیان شده است. یک نمونه از این مبدل با توان ۸۰ وات در بخش سوم طراحی شده است. در بخش چهارم جهت بررسی صحت نتایج تئوری شبیه سازی مبدل در نرم افزار Orcad ارائه گردیده است.

۲- شرح و عملکرد مدار

شکل ۱ مبدل فرورود ارزیابی شده را نشان می دهد [11]. قسمت اول این مبدل شامل سویچ S_1 ، خازن کلمپ C_1 ، دیود D_3 و ترانسفورمر T_1 است. ترانسفورمر T_1 متشکل از سیم پیچ های P_1 و P_3 در اولیه و سیم پیچ $LS1$ در ثانویه با نسبت تبدیل $(N:N:1)$ است. قسمت دوم مبدل از دیودهای D_1 و D_2 و فیلتر خروجی L_f ، C_f تشکیل شده است.

مبدل پنج وضعیت عملکرد مختلف در یک سیکل سوئیچینگ دارد. شکل موج های تئوری و مدار معادل هر وضعیت در شکل های ۲ و ۳ نمایش داده شده است [11].

برای ساده سازی تحلیل مبدل در حالت دایمی، فرضیات زیر در نظر گرفته می شود.

- سلف خروجی به اندازه کافی بزرگ است به طوری که

معادل منبع جریان I_o در نظر گرفته می شود.

- خازن کلمپ به اندازه کافی بزرگ است به طوری که

ولتاژ آن ثابت در نظر گرفته می شود.

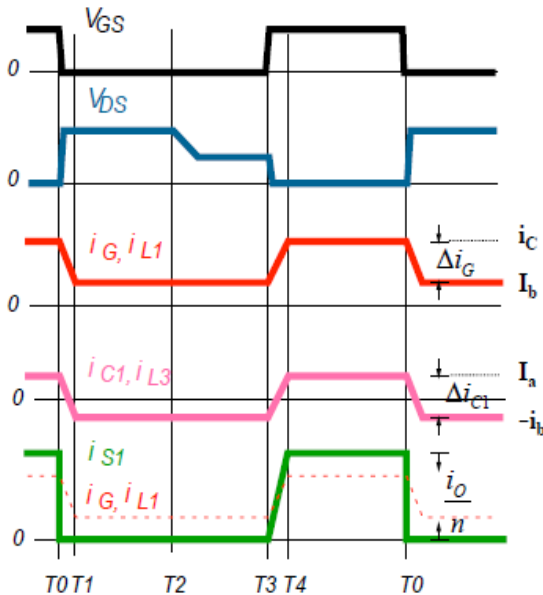
- $i_o \ll I_{mag}$ به طوری که I_{mag} جریان مغناطیسی و i_o

۲۰۲۰ آبان ماه ۱۳۹۴ - دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)

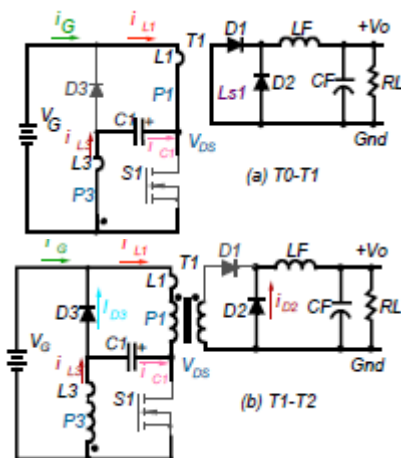
انرژی از منبع ورودی V_G و V_{C1} منتقل می شود. به سیم پیچ P1 و V_{C1} به سیم پیچ P3 اعمال می شود. i_{c1} قسمتی از جریان بار را در P3 و i_G قسمت دیگر جریان بار را در P1 فراهم می کند به طوری که جمع این دو جریان برابر با جریان بار منعکس شده است.

$$i_G + i_{C1} = \frac{i_o}{n} \quad (15)$$

در لحظه T0 سویچ S1 خاموش شده و سیکل بعدی شروع می شود.



شکل ۲: شکل موج های تئوری مبدل ارزیابی شده [11]



وضعیت (۲) بازه زمانی $[T1 - T2]$:

در این بازه جریان مغناطیسی در دیود D3 برای فراهم کردن ریست هسته ترانس جاری می شود. خازن C1 منبع ورودی به علت پلاریته عکس سیم پیچ های P1 و P3 ولتاژ هم را خنثی می کنند، شارژ می شود. در لحظه T2 بالانس ولت ثانیه برای ترانس فراهم شده و دیود D3 خاموش می شود.

$$V_{DS} = 2V_G \quad (7)$$

$$i_G = i_{L1} = i_b = -i_{C1} = -i_{L3} \quad (8)$$

وضعیت (۳) بازه زمانی $[T2 - T3]$:

در این بازه V_{DS} به علت اندوکتانس مغناطیسی و خازن ماسفت، با مدل رزونانسی کاهش می یابد. به علت فقدان انرژی مغناطیسی در سیم پیچ های ترانس به مقدار V_G کلمپ می شود. خازن C1 در حال شارژ شدن است و V_{C1} نیز به مقدار V_G کلمپ می شود.

$$V_{DS} = V_G \quad (9)$$

$$i_G = i_{L1} = i_b = -i_{C1} = -i_{L3} \quad (10)$$

وضعیت (۴) بازه زمانی $[T3 - T4]$:

در لحظه T3 سویچ S1 روشن می شود و برای جریان ها داریم:

$$i_G = i_{L1} = i_b = -i_{C1} = -i_{L3} \quad (11)$$

به علت روشن شدن دیودهای D1 و D2 سیم پیچ های P1 و P3 و $LS1$ متصل می شوند. اندوکتانس نشستی $L1$ و $L3$ با ولتاژ مثبتی فراهم می شود. i_{c1} و i_G به صورت خطی تا رسیدن به جریان بار منعکس شده افزایش می یابند.

$$i_G = i_{L1} = i_b + \frac{V_G}{L_1} (t - T_3) \quad (12)$$

$$i_{C1} = i_{L3} = -i_b + \frac{V_G}{L_3} (t - T_3) \quad (13)$$

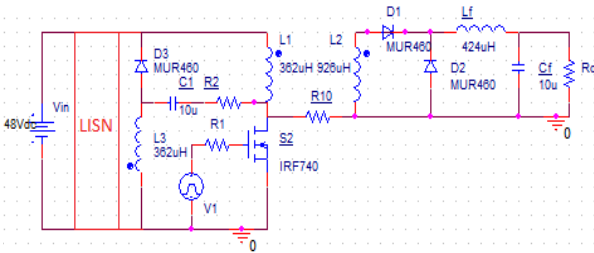
در لحظه T4 دیود D2 خاموش می شود.

$$i_G + i_{C1} = i_c + i_a = \frac{i_o}{n} \quad (14)$$

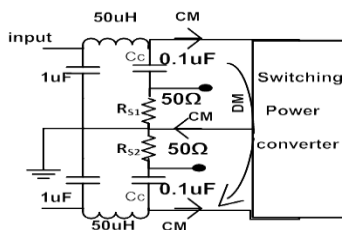
وضعیت (۵) بازه زمانی $[T4 - T0]$:

۲۰۲۰ آبان ماه ۱۳۹۴ - دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)

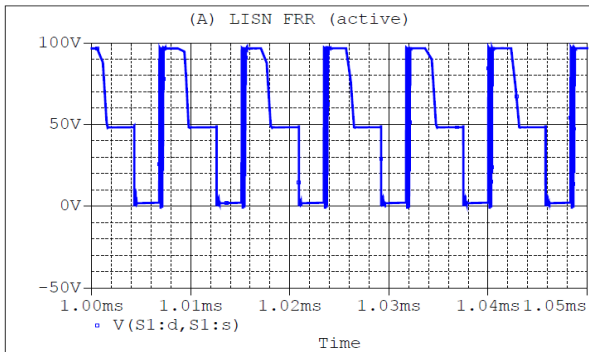
شده در قسمت قبل در نرم افزار Orcad مطابق شکل ۴ شبیه سازی شده است. شکل ۵ مدار LISN استفاده شده در ورودی را نشان می دهد [12]. در شکل ۶ نتایج شبیه سازی مبدل پیشنهادی در نرم افزار Orcad نمایش داده شده است.



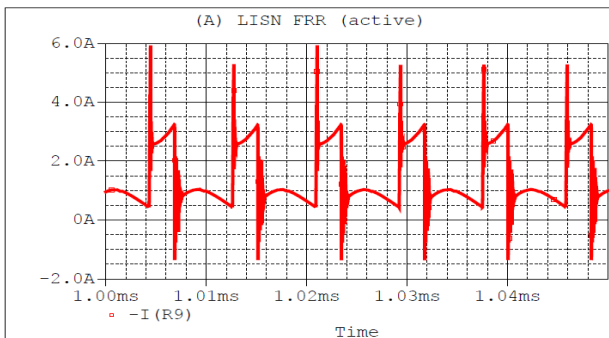
شکل ۴: شماتیک شبیه سازی مبدل ارزیابی شده



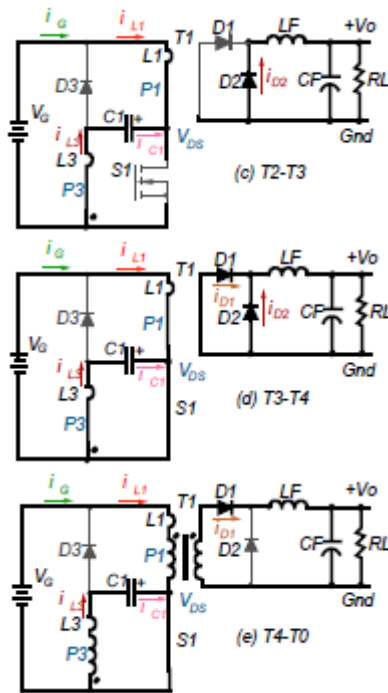
شکل ۵: مدار LISN طبق استاندارد CISPR22 [12]



الف) شکل موج ولتاژ سویچ



ب) شکل موج جریان ورودی



شکل ۳: مدار معادل عملکرد مد های مختلف [11]

۳- طراحی مبدل

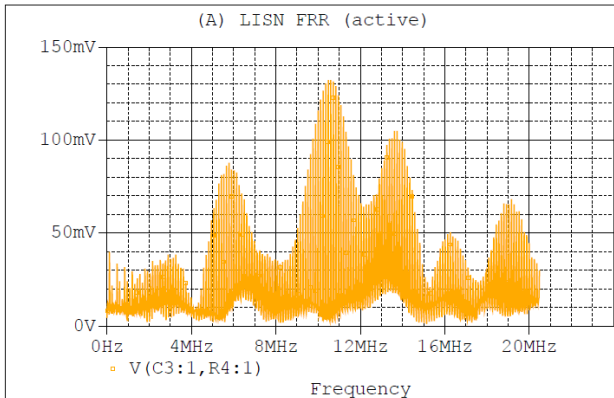
برای تایید عملکرد مبدل ارزیابی شده ، مبدل مطابق با جدول شماره (۱) طراحی شده است. مبدل با توان خروجی ۸۰ وات، ولتاژ ورودی ۴۸ ولت، ولتاژ خروجی ۲۴ ولت و فرکانس ۱۲۰ کیلو هرتز به عنوان مثال طراحی در نظر گرفته شده است.

جدول (۱): مشخصات مبدل ارزیابی شده

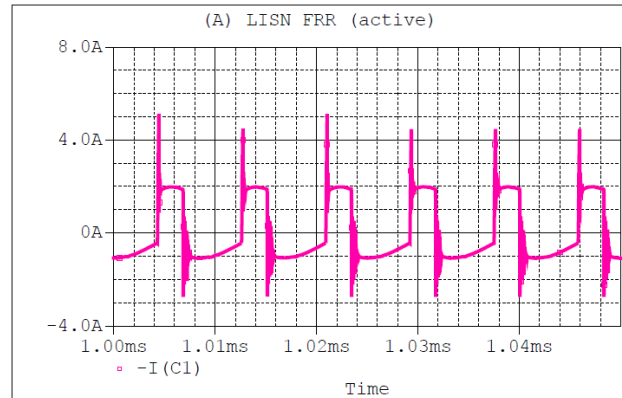
پارامتر	مقدار
S1	IRF740
T1	1:1:1.6
D1,D2,D3	MUR460
C1	10uF
L1,L2,L3	362uH,926uH,362uH
Lf,Cf	424uH,10uF
Ro	7.2Ω

۴- نتایج شبیه سازی

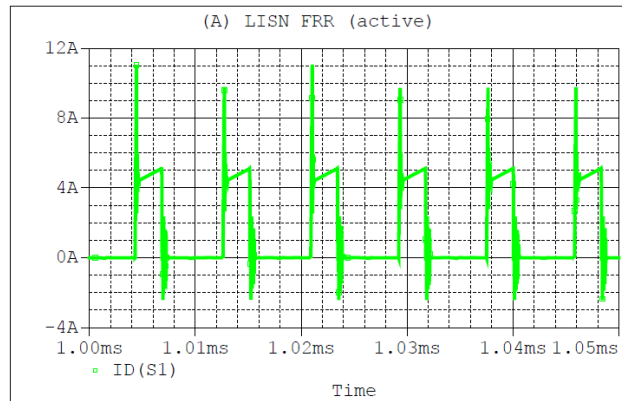
به منظور بررسی صحت مبدل ارزیابی شده ، مدار طراحی



شکل ۷: شکل موج طیف EMI مبدل ارزیابی شده



ج) شکل موج جریان خازن



د) شکل موج جریان سویچ

۵- نتیجه گیری

در این مقاله یک مبدل فرورارد کاهش ریپل جریان ورودی با بهره گیری از سلف نشتی ترانسفورمر ارزیابی گردیده است. با استفاده از این مبدل نه تنها ریپل جریان ورودی بدون استفاده از فیلتر LC خارجی کاهش یافته، جهش های ولتاژ دو سر سویچ اصلی در اثر سلف نشتی ترانسفورمر، در هنگام خاموش شدن نیز از بین رفته است.

مراجع

- [1] Batarseh, Issa, Power electronic circuits. John Wiley, pp. 135-141, 2004.
- [2] C. S. Leu, G. Hua, F. C. Lee and C. Zhou, "Analysis and design of RCD clamp forward converter," HFRC Proceedings, pp. 198-208, 1992.
- [3] M. Domb and R. Redl, "Nondissipative turnoff Snubber in a forward converter: Analysis design procedure, and experimental verification," in Proc. PCI, , pp. 54-68 1985.
- [4] J. A. Cobos et al, "Resonant reset forward topologies for low output voltage on board converters," *IEEE APEC Proceedings*, pp. 703- 708, 1994.
- [5] M. Jabbari, and H. Farzanehfard, "Family of Soft Switching Resonant DC-DC converters", *IET Power Electron.*, Vol. 2, Iss. 2, pp. 113-124, 2009.
- [6] S. S. Lee, S. W. Choi, and G. W. Moon, "High-efficiency activeclamp forward converter with transient current build-up (TCB) ZVS technique," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, no. 1, pp. 310-318, Feb. 2007.
- [7] H. Wu, Y. Xing, "Families of Forward Converters Suitable for Wide Input Voltage Range Applications," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 29, No. 11, pp. 81-86, Nov. 2014.
- [8] H. Wu, P. Xu, W. Liu, and Y. Xing, "Series-Input Interleaved Forward Converter With a Shared Switching Leg for Wide Input Voltage Range Applications," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 60, No. 11, pp. 65-72, Nov. 2013.

شکل ۶: شکل موج های مبدل ارزیابی شده، الف) ولتاژ سویچ (ب) جریان ورودی (ج) جریان خازن (د) جریان سویچ

EMI هدایتی اندازه گیری شده در شبیه سازی از دو سر مقاومت های 50Ω متصل به LISN که در حقیقت امپدانس ورودی اسپکترا آنالایزر است، به دست می آید [13]. برای طیف فرکانسی EMI باید تبدیل فوریه این ولتاژ را در نظر گرفت که در شکل ۷ تبدیل فوریه آن تا فرکانس 20MHz نشان داده شده است. از آنجا که حدود مجاز استانداردهای EMC بر حسب $\text{dB}\mu\text{V}$ بیان می شود، برای مقایسه با استاندارد می توان با استفاده از رابطه (۱۶)، تبدیل سطح EMI در یک فرکانس به $\text{dB}\mu\text{V}$ را انجام داد.

$$\text{dB}\mu\text{V} = 20\log\left(\frac{V}{1\mu\text{V}}\right) \quad (16)$$

طبق شکل ۷، در فرکانس 10.50MHz، پیک اصلی طیف EMI دارای مقدار $102.41\text{dB}\mu\text{V}$ است.

[9] Yu-Kang Lo, "Analysis and Design of an Interleaved Active-Clamping Forward Converter," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, no. 4, pp. 54-60, Aug. 2007.

[10] A. Abramovitz, Tang. Cheng, and K. Smedley, "Analysis and Design of Forward Converter With Energy Regenerative Snubber," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 25, no. 3, pp. 54-60, Mar. 2010.

[11] Ching-Shan Leu., "Improved Forward Topologies for DC-DC Applications with Built-in Input Filter," Ph. D. Dissertation, VPI&SU, January, 2006.

[۱۲] سعید رحمانی میاندشتی، محمد روح اله یزدانی، " مقایسه و ارزیابی سطح تداخل الکترومغناطیسی در مبدل فلای بک تک سوئیچ و دو سوئیچ"، کنفرانس ملی ایده های نو در مهندسی برق، اولین کنفرانس، ۱۳۲-۱۲۷، ۱۳۹۱.

[13] Clayton R. Paul, Introduction to Electromagnetic Compatibility, John Wiley & Sons Publication, Second Edition, 2006 .