

تحلیل دینامیکی مبدل فوروارد فلای‌بک با اثر ESR خازن خروجی و مقایسه آن با مبدل فلای‌بک

سید محسن احمدی^۱ نویدرضا ابجدی^۲ سید وحید میرمقتدایی^۳ احسان ادیب^۴

۱- دانشجوی دکتری- دانشکده فنی و مهندسی- دانشگاه شهرکرد - شهرکرد- ایران

moh.ahmadi@stu.sku.ac.ir

۲- دانشیار- دانشکده فنی و مهندسی- دانشگاه شهرکرد - شهرکرد- ایران

abjadi.navidreza@sku.ac.ir

۳- استادیار- دانشکده فنی و مهندسی- دانشگاه شهرکرد - شهرکرد- ایران

mirmoghtadaei@sku.ac.ir

۴- دانشیار- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی اصفهان - اصفهان- ایران

e.adib@iut.ac.ir

چکیده: در این مقاله، دینامیک یک مبدل فلای‌بک با در نظر گرفتن اثر مقاومت سری خازن خروجی (ESR) بر اساس محاسبه تابع انتقال ورودی کنترلی به خروجی و بر مبنای روش مدل‌سازی مقدار متوسط مورد بررسی قرار می‌گیرد. رفتار دینامیکی ناکمینه فاز، یک رفتار ذاتی از مبدل فلای‌بک است که با جایگزین شدن آن با مبدل فوروارد فلای‌بک به ازای برخی از مقادیر پارامترهای مبدل امکان کمینه فاز شدن رفتار دینامیکی فراهم می‌شود. محاسبه تابع انتقال این مبدل با توجه به وابسته شدن متغیرهای حالت پیچیده است لذا در اینجا از یک روش جدید به منظور محاسبه تابع انتقال با در نظر گرفتن اثر مقاومت سری خازن خروجی استفاده شده است. رفتار دینامیکی هر دو مبدل فلای‌بک و فوروارد فلای‌بک با در نظر گرفتن اثر مقاومت سری خازن خروجی توسط نتایج شبیه‌سازی کامپیوتری مقایسه شده است. همچنین نمونه آزمایشگاهی از هر دو مبدل ساخته شده است و نتایج اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی بهبود پاسخ دینامیکی در مبدل فوروارد فلای‌بک را نشان داده است.

واژه‌های کلیدی: تابع انتقال، فلای‌بک، فوروارد فلای‌بک، کمینه فاز، مقاومت سری خازن

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.61186/jiaeee.21.2.35

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۰۱/۰۷

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۴۰۲/۰۳/۱۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۳/۲۹

نام نویسنده‌ی مسئول: نویدرضا ابجدی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - شهرکرد- دانشگاه شهرکرد- دانشکده‌ی فنی مهندسی

۱- مقدمه

یکی از مبدل‌های توان DC-DC که در منابع تغذیه کوچک بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد مبدل فلای‌بک است. برخی از کاربردهای این مبدل شامل شارژرها، واحدهای توزیع توان در هواپیماهای کوچک، وسایل نقلیه، سیستم‌های توان مخابراتی، تغذیه PC ها و ... است. از مهمترین ویژگی این مبدل می‌توان به ساختار ساده، امکان مجزاسازی الکتریکی خروجی نسبت به ورودی و قابلیت اطمینان بالا اشاره نمود. یکی از مبدل‌های توان که ساختار خیلی نزدیک به مبدل فلای‌بک دارد مبدل فوروارد فلای‌بک است. در این مبدل یک خازن اضافی با خروجی ترانسفورمر سری شده است تا علاوه بر عملکرد فلای‌بکی یک مسیر فوروارد نیز برای انتقال انرژی ایجاد شود (شکل (۲)). یکی از موضوعات مهم در استفاده از مبدل‌های کلیدزنی به ویژه مبدل فلای‌بک، رفتار پاسخ دینامیکی است که مستلزم استفاده از یک روش مناسب برای مدل‌سازی مبدل است.

برای بررسی رفتار پاسخ دینامیکی مبدل فلای‌بک یک روش بسیار کارآمد؛ روش مدل‌سازی مقدار متوسط است [۲، ۱]. در استخراج مدل مقدار متوسط فضای حالت اغلب از مقاومت معادل سری اجزای مداری صرف‌نظر می‌شود و متغیرهای حالت به عنوان بخش‌های خطی در نظر گرفته می‌شوند. چنین فرضیاتی منجر به عدم دقت در ثابت‌های زمانی متناظر و همچنین شکل موج‌ها می‌شود. از طرف دیگر مبدل فلای‌بک بطور ذاتی غیر کمینه فاز بوده که ناشی از وجود صفر سمت راست در تابع انتقال ورودی کنترلی به خروجی است. وجود این صفر باعث کند شدن پاسخ خروجی مبدل می‌شود.

در [۳] عملکرد مبدل در مد ناپیوسته و در [۴] استفاده از مدولاسیون لبه پیشرو برای حذف اثر صفر سمت راست مبدل پیشنهاد شده‌اند. در [۵] برای کمینه فاز شدن مبدل بوست از روش اصلاح ساختار استفاده شده است که در آن یک تزویج مغناطیسی برای ایجاد یک مسیر مستقیم برای انتقال انرژی به خروجی پیشنهاد شده است. در [۶] نیز از یک ساختار اصلاح شده برای از بین بردن اثر صفر سمت راست در یک مبدل فلای‌بک استفاده شده است.

در [۷] نشان داده شده است که صفر سمت راست از یک مبدل بوست مبتنی بر سلف تزویج با استفاده از دوره چرخ آزاد (freewheeling) در عملکرد مبدل قابل حذف شدن است. این ویژگی ناشی از درجه آزادی اضافی در کنترل انتقال انرژی به خازن خروجی می‌باشد.

اجزای پارازیتی یک مبدل کلیدزنی نقش مهمی در رفتار پاسخ دینامیکی مبدل دارد. بطور ویژه یکی از پارامترهای تأثیرگذار بر رفتار دینامیکی مبدل فلای‌بک و شکل موج‌های آن، مقاومت معادل سری (ESR_s) خازن خروجی است. مقاومت معادل سری خازن یک صفر سمت چپ در تابع انتقال ایجاد کرده و با تأثیرگذاری بر صفر و قطب‌های مبدل؛ پاسخ سیگنال کوچک آن را تحت تأثیر قرار می‌دهد. مقاومت معادل سری خازن خروجی هر چقدر بزرگتر باشد با وجود اینکه مبدل را پایدارتر

می‌کند اما باعث بهبود دینامیک مبدل نخواهد شد. ضمن اینکه مقدار ESR بزرگ منجر به کاهش راندمان مبدل فلای‌بک نیز خواهد شد که این باعث حادثر شدن موضوع پایین بودن راندمان مبدل فلای‌بک در مقایسه با مبدل‌های دیگر می‌شود. در حقیقت یکی از روش‌های بهبود دینامیک مبدل انتخاب خازن خروجی با ESR پایین است. تغییر ESR می‌تواند بهره حلقه را جابه‌جا کرده و بنابراین فرکانس نقطه عبور از صفر ($Crossover frequency$) نیز جابه‌جا شود و این یعنی پهنای باند جدید برای مبدل ایجاد می‌شود [۸]. البته لازم است توجه شود که دما می‌تواند بر ESR خازن‌ها و سلف‌ها تأثیرگذار باشد.

در [۹] مدل فضای حالت مبتنی بر متوسط‌گیری یک مبدل فلای‌بک با در نظر گرفتن مقاومت سری معادل سلف به عنوان یک المان پارازیتی ارایه شده است.

مدل سیگنال کوچک مبدل فلای‌بک PWM^2 در مد هدایت پیوسته (CCM^2) با در نظر گرفتن اثر اجزای پارازیتی در [۱۰] آورده شده است. در [۱۱] برای کاهش انرژی اندوکنانس ناشی ترانسفورمر که نقش یک المان پارازیتی را دارد از یک مبدل فلای‌بک اکتیو کلمپ استفاده شده است. در [۱۲] آنالیز سیگنال کوچک مدل مرتبه دوم فلای‌بک با استفاده از مدل متوسط فضای حالت و همچنین با در نظر گرفتن اثر مدار اسنابر و با اثر اجزای پارازیتی انجام شده است. در [۱۳] یک بلوک دیاگرام سیستماتیک برای مبدل فلای‌بک کنترل شده با مد پیک جریان برای ارزیابی جزییات دینامیکی در فرکانس‌های کلیدزنی بالا پیشنهاد شده است. از مهمترین ویژگی‌های مبدل فوروارد فلای‌بک می‌توان به کمترین استفاده از کلید، ساختار ساده و قابلیت اطمینان بالا اشاره نمود [۱۴، ۱۵]. همچنین در مقایسه با مبدل فلای‌بک این مبدل قابلیت انتقال توان بالاتری دارد. در [۱۶] به دلیل ساختار ساده از یک مبدل فوروارد فلای‌بک برای ایجاد یک مدار متعادل ساز خودکار برای باتری‌های لیتیوم یون استفاده شده است.

در این مقاله تأثیر مقاومت معادل سری خازن خروجی بر رفتار خروجی مبدل فوروارد فلای‌بک بر اساس مطالعه رفتار مبدل فلای‌بک با در نظر گرفتن اثر ESR بررسی شده است. اما مبدل فوروارد فلای‌بک به ازای تغییر برخی از پارامترهای مدار به دلیل وجود مسیر فوروارد امکان کمینه فاز شدن را بطور ذاتی دارد لذا در این مقاله مدل دینامیکی این مبدل براساس یک روش جدید با در نظر گرفتن اثر مقاومت معادل سری خازن تحت مطالعه قرار گرفته است و اثبات می‌شود که برخلاف مبدل فلای‌بک که ذاتاً ناکمینه فاز است این مبدل امکان کمینه فاز شدن به ازای تغییر برخی از پارامترهای مدار را دارد. همچنین اثر مقاومت ESR خازن خروجی بر رفتار پاسخ دینامیکی مبدل نیز بررسی شده است.

با توجه به اثرگذاری مقاومت معادل سری خازن خروجی بر عملکرد دینامیکی مبدل اثر این المان در مدل‌سازی مقدار متوسط مبدل در نظر گرفته شده است. از اینرو در بخش دوم این مقاله نحوه محاسبه تابع انتقال ورودی کنترلی به خروجی مبدل فلای‌بک در مد پیوسته که دارای صفر سمت راست ذاتی است با در نظر گرفتن اثر ESR خازن

ب) وضعیت کلید خاموش:

$$KCL A: C \frac{dv_{co}}{dt} - ni_{Lm} + i_o = 0 \quad (4)$$

$$KVL B: \frac{L_m}{n} \frac{di_{Lm}}{dt} = -r_{co} i_c - v_{co} \quad (5)$$

$$KVL C: v_{co} + r_{co} i_c - R_L i_o = 0 \quad (6)$$

بعد از ساده سازی و مرتب نمودن معادله ها:

$$\frac{di_{Lm}}{dt} = \frac{-nr_{co}}{k_2} i_{Lm} - \frac{v_{co}}{k_2} \quad (7)$$

$$\frac{dv_{co}}{dt} = \frac{R_L n}{c_o(R_L + r_{co})} i_{Lm} - \frac{v_{co}}{c_o(R_L + r_{co})} \quad (8)$$

$$y = v_o = \frac{-L_m}{n} \left(\frac{-nr_{co}}{k_2} i_{Lm} - \frac{v_{co}}{k_2} \right) \quad (9)$$

$$k_1 = \frac{R_L}{R_L + r_{co}} \quad (10)$$

$$k_2 = \frac{L_m}{n} + \frac{r_{co} L_m}{n R_L} \quad (11)$$

$$k_3 = \frac{n R_L r_{co}}{R_L + r_{co}} \quad (12)$$

۲-۲- تابع انتقال مبدل فلای یک با اثر ESR خازن

خروجی

با استفاده از روش مدل متوسط تابع انتقال ورودی کنترلی به خروجی مبدل فلای یک با در نظر گرفتن اثر ESR خازن خروجی به صورت رابطه (۱۳) حاصل می شود که شامل دو صفر و دو قطب است. در حقیقت تابع انتقال مبدل فلای یک بدون اثر ESR دارای دو قطب سمت چپ و فقط یک صفر در سمت راست است اما در نظر گرفتن اثر ESR منجر به اضافه شدن یک صفر در سمت چپ می شود.

$$F_{Fly}(S) = \frac{v_o(S)}{d(S)} = \frac{a_1 + a_2 S + a_3 S^2}{b_1 + b_2 S + b_3 S^2} \quad (13)$$

$$a_1 = v_{in} k_1 k_2 n (R_L + r_{co})^2 (D - 1)^2 \quad (14)$$

$$a_2 = v_{in} c_o k_1 k_2 n r_{co} (R_L + r_{co})^2 (D - 1)^2 - k_1 D k_2^2 (R_L + r_{co}) \quad (15)$$

$$a_3 = -v_{in} c_o k_1 k_2^2 D r_{co} (R_L + r_{co}) \quad (16)$$

$$b_1 = L_m (R_L (1 - D)^2 + r_{co} (1 - D))^2 \quad (17)$$

$$b_2 = L_m c_o n r_{co} ((R_L + r_{co}) (1 - D) + k_2 (R_L (1 - D)^2 + r_{co} (1 - D))) \quad (18)$$

$$b_3 = L_m c_o k_2 (R_L + r_{co}) (R_L (1 - D)^2 + r_{co} (1 - D)) \quad (19)$$

۳-۲- اثر ESR در ولتاژ خروجی مبدل فلای یک

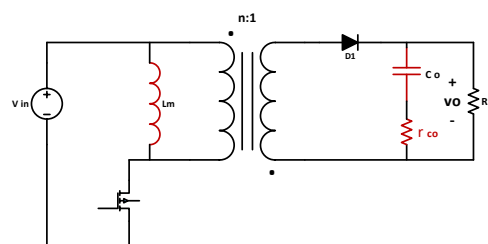
ولتاژ خروجی در مبدل فلای یک با در نظر گرفتن اثر ESR خازن به صورت مجموع دو مولفه ولتاژ خازن خالص و ولتاژ دو سر مقاومت معادل سری قابل بیان است:

خروجی ارائه شده است. در بخش سوم مدل متوسط مبدل فوروارد فلای یک ارائه شده است. با توجه به وابستگی بین متغیرهای حالت در مبدل فوروارد فلای یک در وضعیت خاموش بودن کلید و پیچیده شدن نحوه استخراج مدل متوسط برای این مبدل، تابع انتقال ورودی کنترلی به خروجی مبدل فوروارد فلای یک براساس یک روش ابداعی جدید، پیشنهاد شده است که در آن مبدل به دو بخش فوروارد و فلای یک تقسیم شده و تابع انتقال هر کدام محاسبه شده و در نهایت تابع انتقال مجموع آنها که بیانگر تابع انتقال معادل مبدل فوروارد فلای یک است بدست آمده است. در بخش چهارم نتایج مدل سازی و شبیه سازی کامپیوتری مبدل های فلای یک و فوروارد فلای یک با در نظر گرفتن اثر صفر سمت راست و اثر مقاومت سری خازن بر صفر سمت راست ارائه شده است. در بخش پنجم نیز نتایج عملی پیاده سازی مبدل فوروارد فلای یک و مقایسه رفتار دینامیکی این مبدل با مبدل فلای یک معمولی با در نظر گرفتن مقاومت سری خازن آورده شده است.

۲- دینامیک مبدل فلای یک با در نظر گرفتن اثر

پارامترهای مبدل

پاسخ گذرای مبدل های توان فقط به معماری مدار و شمای کنترلی وابسته نیست بلکه به خازن خروجی و امان های پارازیتی نیز وابستگی دارد. روش های مدل سازی با جزییات برای مبدل های DC-DC بطور گسترده ای برای اهداف طراحی بکار گرفته شده اند [2,12,17]. مدل های متوسط متنوعی از مبدل PWM فلای یک ارائه شده اند که در اغلب آنها اثر ESR خازن خروجی دیده نشده است. در صورتیکه این پارامتر بسیار مهمی در مبدل فلای یک بوده و اثر ویژه ای روی دینامیک و کارایی مبدل دارد.



شکل (۱): مبدل فلای یک با در نظر گرفتن ESR خازن خروجی

۱-۲- معادله های حالت مربوط به مبدل فلای یک با در

نظر گرفتن اثر ESR

الف) وضعیت کلید روشن :

$$L_m \frac{di_{Lm}}{dt} = v_{in} \quad (1)$$

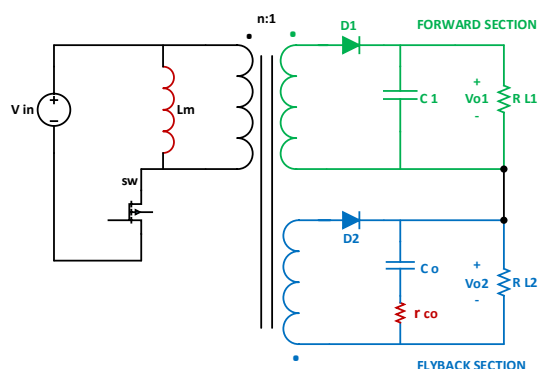
$$C_o \frac{dv_{co}}{dt} = \frac{-v_{co}}{R_L + r_{co}} \quad (2)$$

$$y = v_o = \frac{R_L v_{co}}{R_L + r_{co}} \quad (3)$$

آوردن مدل متوسط، متغیرهای حالت مبدل فوروارد فلای یک شامل جریان سلف مغناطیس کنندگی ترانسفورمر، ولتاژ خازن سری (V_{C1}) و ولتاژ خازن خروجی (V_{CO}) در نظر گرفته می‌شوند (شکل (۲)). اما استفاده از روش مدل متوسط برای مبدل فوروارد فلای یک باعث می‌شود که متغیرهای حالت در وضعیت کلید خاموش به یکدیگر وابسته شده و محاسبه مدل متوسط پیچیده شود. لذا به منظور تعیین تابع انتقال ورودی کنترلی به خروجی مبدل در این مقاله از یک روش جدید و ابداعی استفاده شده است. در این روش، ساختار مبدل به دو بخش فوروارد و فلای یک مجزا سازی می‌شود و تابع انتقال هر کدام از بخش‌ها به طور جداگانه محاسبه شده و سپس تابع انتقال مجموع محاسبه می‌شود.

از آنجاییکه مبدل فوروارد فلای یک از ترکیب دو بخش فوروارد و فلای یک ایجاد می‌شود لذا با مجزا کردن مبدل به این دو بخش، تابع انتقال ورودی کنترلی به خروجی بر اساس گام‌های زیر حاصل می‌شود:

- مجزا نمودن مبدل به صورت ترسیم شده در شکل (۳)
- محاسبه تابع انتقال هر کدام از اجزای مشخص شده (بخش فوروارد و بخش فلای یک)
- جمع تابع انتقال بدست آمده برای هر کدام از بخش‌ها بر اساس اصل جمع آثار و تعیین تابع انتقال مبدل



شکل (۳): مبدل فوروارد فلای یک مجزا شده با در نظر گرفتن ESR خازن خروجی

با مجزا نموده مبدل فوروارد فلای یک به دو بخش فوروارد و فلای یک (مطابق شکل (۳))؛ مقاومت بار برای هر یک از این دو بخش براساس روابط زیر حاصل می‌شود:

$$R_{L1} = \frac{V_{in} R_L}{\frac{n}{1-D} V_{in}} \quad (22)$$

$$R_{L2} = \frac{\frac{D}{1-D} V_{in} R_L}{\frac{n}{1-D} V_{in}} \quad (23)$$

۳-۱- تابع انتقال بخش فوروارد

در شکل (۴) مدار بخش فوروارد در وضعیت کلید روشن و کلید خاموش نشان داده شده است.

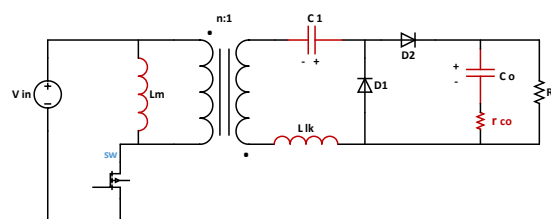
$$V_o = V_{CO} + V_{ESR} \quad (20)$$

$$V_{ESR} = r_{CO} C_o \frac{dv_{CO}}{dt} \quad (21)$$

ولتاژ دو سر مقاومت معادل سری خازن (V_{ESR}) به عواملی همچون نرخ تغییرات ولتاژ خازن و اندازه مقاومت معادل سری خازن بستگی دارد. در صورتیکه فرکانس کلید زنی مبدل تغییر کند باعث تغییر نرخ تغییرات ولتاژ شده که روی ولتاژ خروجی تاثیر خواهد گذاشت. افزایش فرکانس کلید زنی می‌تواند در کاهش اثر V_{ESR} در ولتاژ خروجی نقش مفیدی داشته باشد. از طرف دیگر کاهش اندازه مقاومت معادل سری نیز نقش بسیار موثری در کاهش ریبیل ناشی از V_{ESR} در ولتاژ خروجی خواهد داشت. در این مقاله نشان داده می‌شود که بزرگ بودن ESR منجر به پایدارتر شدن مبدل می‌شود اما بزرگ تر شدن ESR باعث افزایش ریبیل ولتاژ خروجی و تلفات خواهد شد.

۳-۲- مدل سازی مبدل فوروارد فلای یک با در نظر گرفتن ESR خازن خروجی

ساختار مبدل فوروارد فلای یک با اضافه کردن یک خازن سری خروجی ترانسفورمر مبدل فلای یک و موازی کردن یک دیود با حاصل خروجی ترانسفورمر و خازن سری به صورت شکل (۲) حاصل می‌شود. در این مبدل وقتی کلید روشن است ولتاژ منبع ورودی روی اولیه ترانسفورمر قرار گرفته و با روشن شدن دیود D1، خازن C1 را شارژ نموده و دیود D2 خاموش می‌شود. در این حالت بار خروجی از طریق ولتاژ خازن خروجی تغذیه می‌شود. با خاموش شدن کلید جهت جریان در ثانویه معکوس شده و باعث خاموش شدن دیود D1 و روشن شدن دیود D2 خواهد شد. در این حالت ولتاژ خازن سری C1 و ولتاژ ثانویه ترانسفورمر دو سر بار قرار خواهند گرفت.



شکل (۴): مدار معادل مبدل فوروارد فلای یک

مبدل فلای یک دارای دو مد عملکرد در وضعیت کلید خاموش است. در مد اول همه انرژی ذخیره شده در اندوکتانس مغناطیس کنندگی ترانسفورمر قبل از روشن شدن کلید بطور کامل به ثانویه منتقل می‌شود (مد هدایت ناپیوسته) اما در مد دوم بخشی از انرژی ذخیره شده در اندوکتانس مغناطیس کنندگی به ثانویه منتقل می‌شود (مد هدایت پیوسته).

تابع انتقال مبدل فلای یک در مد انتقال انرژی کامل به طور ذاتی دارای یک صفر سمت راست است اما در مد انتقال انرژی غیر کامل هیچ صفری در سمت راست ندارد.

توصیف دینامیک مبدل فوروارد فلای یک با استفاده از مدل متوسط و بر اساس تعیین تابع انتقال ورودی کنترلی به خروجی است. برای بدست

$$F_{Forward} = \frac{2DT_s R_{L1} \left(\frac{v_{in}}{n} - v_{o1} \right)}{(D^2 T_s R_{L1} + 2L_{lk}) + 2L_{lk} c_1 S} \quad (33)$$

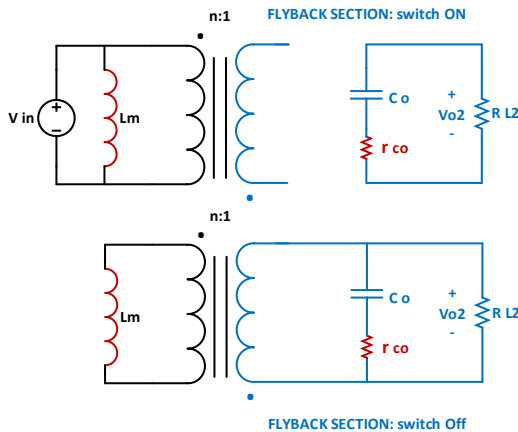
که با جایگذاری V_{o1} :

$$F_{Forward} = \frac{4DL_{lk}T_s R_{L1} V_{in}}{n(D^2 T_s R_{L1} + 2L_{lk})(D^2 T_s R_{L1} + 2L_{lk} + 2L_{lk} R_{L1} c_1 S)} \quad (34)$$

از رابطه فوق مشاهده می شود که تابع انتقال بخش فرورارد فقط دارای یک قطب در سمت چپ محور حقیقی است.

۳-۲- تابع انتقال بخش فلای بک

مدار معادل بخش فلای بک مبدل فرورارد فلای بک به صورت شکل (۵) است. تابع انتقال خروجی v_{o2} به ورودی کنترلی قسمت فلای بک مبدل فرورارد فلای بک نیز مطابق با معادله های ۱۳ تا ۱۹ است. البته کافی است در این معادله ها R_{L2} با R_L جایگزین شود.



شکل (۵): مدار معادل بخش فلای بک در وضعیت کلید روشن و کلید خاموش

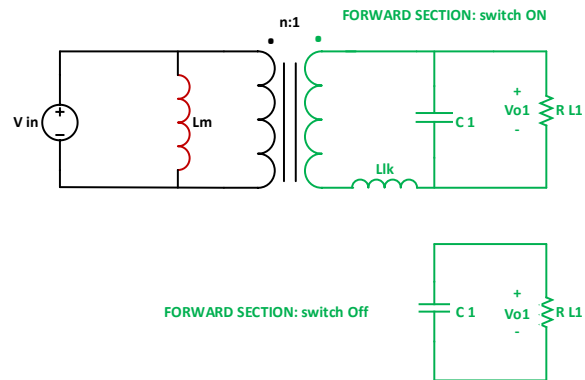
تابع انتقال مبدل فلای بک با در نظر گرفتن اثر ESR دارای دو قطب پایدار، یک صفر در سمت راست صفحه و یک صفر در سمت چپ است. صفر سمت راست مبدل فلای بک ذاتاً در سمت راست صفحه است که بیانگر غیر کمینه فاز بودن آن است و با تغییر پارامترهای مبدل تحت هیچ شرایطی به تنهایی کمینه فاز نمی شود.

۳-۳- تابع انتقال مجموع بخش های فرورارد و فلای بک

با توجه به اینکه ولتاژ خروجی مبدل فرورارد فلای بک حاصل جمع ولتاژ خروجی بخش های فرورارد و فلای بک است لذا بر اساس اصل جمع آثار تابع انتقال ورودی کنترلی به خروجی برای مبدل فرورارد فلای بک از حاصل جمع توابع انتقال ورودی کنترلی به خروجی هر یک از بخش های فرورارد و فلای بک حاصل می شود.

$$v_o = v_{o1} + v_{o2} \quad (35)$$

$$F_{ForwardFlyback} = F_{Forward} + F_{Flyback} = \frac{-S^3 p_4 + S^2 p_3 + S p_2 + p_1}{n(R_{L1} T_s D^2 + 2L_{lk})(R_{L1} T_s D^2 + 2L_{lk}(1 + R_{L1} c_1 S))(q_3 S^2 + q_2 S + q_1)} \quad (36)$$



شکل (۴): مدار معادل بخش فرورارد در وضعیت کلید روشن و کلید خاموش

جریان دیود $D1$ به صورت زیر تعیین می شود:

$$I_{pD1} = \frac{\left(\frac{v_{in}}{n} - v_{o1} \right) \langle d \rangle T_s}{L_{lk}} \quad (24)$$

$$\langle i_{D1} \rangle = \frac{I_{pD1} \langle d \rangle}{2} = \frac{\left(\frac{v_{in}}{n} - v_{o1} \right) \langle d \rangle^2 T_s}{2L_{lk}} \quad (25)$$

جریان خازن $C1$ در گره خروجی:

$$c_1 \frac{d\langle v_{o1} \rangle}{dt} = \langle i_{D1} \rangle - \frac{\langle v_{o1} \rangle}{R_{L1}} \quad (26)$$

$$\frac{d\langle v_{o1} \rangle}{dt} = \frac{\left(\frac{v_{in}}{n} - v_{o1} \right) \langle d \rangle^2 T_s}{2L_{lk} c_1} - \frac{\langle v_{o1} \rangle}{R_{L1} c_1} \quad (27)$$

با خطی سازی معادلات حول نقطه کار و صرف نظر از عوامل غیر خطی مرتبه بالا و تغییرات ولتاژ ورودی؛ معادله خطی شده به صورت زیر بدست می آید:

$$\hat{v}_{o1} = \left(\frac{-D^2 T_s}{2L_{lk} c_1} - \frac{1}{R_{L1} c_1} \right) \hat{v}_{o1} + \left(\frac{V_{in} 2DT_s - 2DV_{o1} T_s}{2L_{lk} c_1} \right) \hat{d} + \left(\frac{V_{in} D^2 T_s - D^2 V_{o1} T_s}{2L_{lk} c_1} - \frac{V_{o1}}{R_{L1} c_1} \right) \quad (28)$$

و معادله ولتاژ خروجی:

$$y = \hat{v}_{o1} \quad (29)$$

در حالت دائم:

$$V_{o1} = \frac{V_{in} D^2 T_s R_{L1}}{D^2 T_s R_{L1} + 2L_{lk}} \quad (30)$$

برای شرایط تغییرات سیگنال کوچک:

$$\hat{v}_{o1} = A \hat{v}_{o1} + B \hat{d} \quad (31)$$

که در آن:

$$B = \frac{V_{in} 2DT_s - 2DV_{o1} T_s}{2L_{lk} c_1} \quad (32)$$

$$A = \frac{-D^2 T_s}{2L_{lk} c_1} - \frac{1}{R_{L1} c_1} \quad (33)$$

و نهایتاً تابع انتقال خروجی v_{o1} به ورودی کنترلی عبارتست از:

هسته فریت از نوع EE42/21/20 و طبق معادله (۶۰)، تعداد دور اولیه ترانسفورمر برابر با ۶۳ دور و تعداد دور ثانویه آن برابر با ۹ دور محاسبه می‌شود. بعد از سیم‌پیچی ترانسفورمر و تنظیم اندوکتانس مغناطیس‌کنندگی روی مقدار ۲,۵ میلی هانری، مقدار اندوکتانس نشتی سیم پیچ ترانسفورمر اندازه‌گیری می‌شود. مقادیر انتخاب شده برای مبدل فوروارد فلای بک به منظور عملکرد در مد هدایت پیوسته و قرار داشتن در محدوده کمینه فازی در جدول (۲) آورده شده است.

جدول (۱): مشخصات کلی مبدل فوروارد فلای بک

50 w	توان
150 v	ولتاژ ورودی
24 v	ولتاژ نامی خروجی
50 kHz	فرکانس کلید زنی
10 μ F	خازن بخش فوروارد c1
47 μ F	خازن خروجی co

جدول (۲) مقادیر نهایی طراحی مبدل فوروارد فلای بک کمینه فاز در

مد CCM

2.5 mH	اندوکتانس مغناطیس‌کنندگی هسته
20 μ H	اندوکتانس نشتی سیم پیچ هسته
7	نسبت دور اولیه به ثانویه
50%	ضریب وظیفه نامی

به منظور بررسی رفتار دینامیکی مبدل فوروارد - فلای بک و مقایسه آن با مبدل فلای بک، این دو مبدل در نرم افزار MATLAB مورد شبیه سازی قرار گرفته است. بخشی از شبیه‌سازی‌ها مربوط به تعیین تابع انتقال مبدل‌ها است که در بخش‌های ۳ و ۴ روابط ریاضی آن محاسبه شد. بدین منظور مقادیر ولتاژ ورودی و خروجی و توان مبدل‌ها به صورت یکسان در نظر گرفته شده است. مقادیر پارامترهای هر دو مبدل در جدول (۳) بیان شده است.

جدول (۳) پارامترهای مبدل فوروارد فلای بک و فلای بک متداول

فلای بک	فوروارد - فلای بک	
20 mH	2.5 mH	اندوکتانس مغناطیس‌کنندگی هسته
5 μ H	5 μ H	اندوکتانس نشتی سیم پیچ هسته
7	7	نسبت دور اولیه به ثانویه
150 v	150 v	ولتاژ ورودی
50 w	50 w	توان
24 v	24 v	ولتاژ نامی خروجی
50 kHz	50 kHz	فرکانس کلید زنی
EE42/21/20	EE42/21/20	نوع هسته
-	10 μ F	خازن بخش فوروارد c1

$$p_1 = V_{in} n \left(T_s R_{L1} (R_{L1} R_{L2} T_s n (D^6 - 2D^5 + D^4)(R_{L2} + r_{co}) + 4L_{lk} R_{L2} D(1 + D(D-1)^2(R_{L2} + r_{co}) + (nr_{co} - 2) + D)) \right) + 4L_{lk}^2 R_{L2} n ((D-1)^2(R_{L2} + r_{co})) \quad (37)$$

$$p_2 = (-L_m D(R_{L2} + r_{co})(D^4 R_{L1}^2 T_s^2 + 4D^2 R_{L1} T_s L_{lk} + 4L_{lk}^2)) + V_{in} \left(n^2 (4L_{lk}^2 R_{L2} (R_{L2} + r_{co})(c_o r_{co} + c_1 R_{L1})(1 - D)^2 + c_o D^4 R_{L1}^2 T_s^2 R_{L2} r_{co} (R_{L2} + r_{co})(1 - D)^2 + D L_{lk} R_{L1} R_{L2} T_s (2c_1 D R_{L1} (R_{L2} + r_{co})(1 - D)^2 + 4c_o r_{co} D(D^2 r_{co} + D(R_{L2} + r_{co}) - R_{L2}))) \right) + 4L_m c_o D L_{lk} R_{L1} T_s n r_{co} (R_{L2} (1 - D)^2 r_{co} (1 - D)) \quad (38)$$

$$p_3 = -2L_m c_1 D L_{lk} R_{L1} (D^2 R_{L1} T_s (R_{L2} + r_{co}) + 2L_{lk} (R_{L2} + r_{co})) + V_{in} \left(4c_1 c_o L_{lk}^2 R_{L1} R_{L2} n^2 r_{co} (R_{L2} + r_{co}) + D c_o 2c_1 L_{lk} R_{L1} R_{L2} n^2 r_{co} (-4L_{lk} (R_{L2} + r_{co}) + D(R_{L2} + r_{co})(2(L_{lk} - D R_{L1} T_s) + R_{L1} T_s (1 + D^2))) + L_m (4L_{lk} (R_{L1} T_s (R_{L2} (2R_{L2} (1 - D)^2 - 3r_{co} D)) + r_{co}^2 (1 - D)^2 - L_{lk} r_{co} (R_{L2} + r_{co})) - D^4 R_{L1}^2 T_s^2 r_{co} (R_{L2} + r_{co})) \right) \quad (39)$$

$$p_4 = 2L_m V_{in} c_1 c_o D L_{lk} R_{L1} (D^3 R_{L1} T_s r_{co} (R_{L2} + r_{co}) + 2D L_{lk} r_{co} (R_{L2} + r_{co})) \quad (40)$$

$$q_1 = R_{L2} n (1 - D)^2 \quad (41)$$

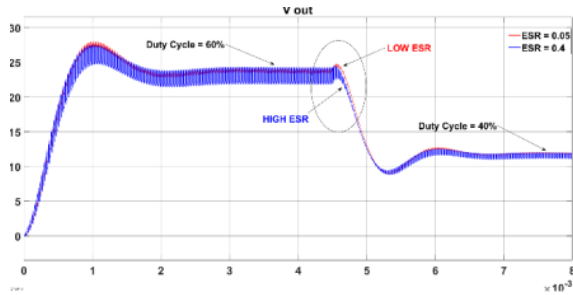
$$q_2 = c_o r_{co} n (L_m (R_{L2} (1 - D)^2 + r_{co} (1 - D)) - R_{L2}^2 n (D^3 - 3D^2 + 3D) + R_{L2} n r_{co} (D - 1)^2) \quad (42)$$

$$q_3 = L_m c_o ((D - 1) R_{L2}^2 + R_{L2} r_{co} (D^2 - 3D + 2) r_{co}^2 (1 - D)) \quad (43)$$

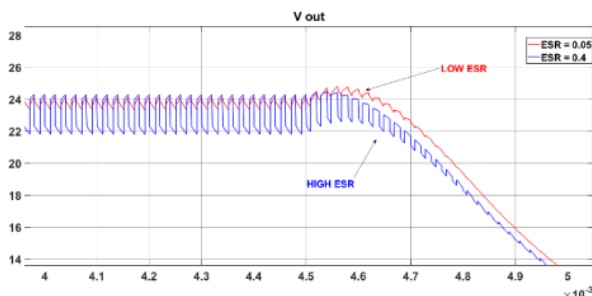
مبدل فوروارد فلای بک با در نظر گرفتن اثر ESR خازن خروجی دارای سه قطب پایدار و سه صفر در تابع انتقال خود است که یکی از این صفرها در سمت چپ صفحه بوده و صفر دوم براساس مقادیر پارامترهای مبدل می‌تواند در سمت چپ یا راست صفحه قرار گیرد و لذا مبدل فوروارد فلای بک بر خلاف مبدل فلای بک می‌تواند به ازای برخی از مقادیر پارامترهای مداری خود کمینه فاز باشد.

۴- مدل سازی و شبیه‌سازی کامپیوتری

مبدل فوروارد فلای بک با مشخصات کلی بیان شده در جدول (۱) طراحی شده است. با انتخاب نسبت تبدیل ۷ و ضریب وظیفه ۵۰ درصد برای این مبدل اندوکتانس مغناطیس‌کنندگی متناظر با آنها برابر با ۲,۵ میلی هانری است که مبدل را در مد پیوسته نگه می‌دارد. با انتخاب



شکل (۷): پاسخ ولتاژ خروجی مبدل فلای یک به تغییر ضریب وظیفه به ازای مقادیر مختلف ESR



شکل (۸): اثر ESR خازن خروجی روی دینامیک ولتاژ خروجی مبدل فلای یک

جدول (۴) تاثیر پارامترهای مبدل فلای یک بر دینامیک مبدل

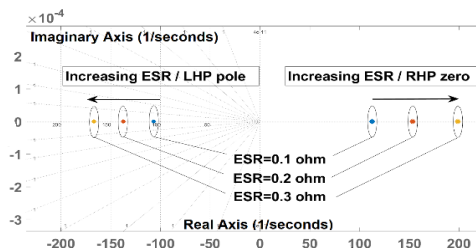
پارامتر مبدل	تاثیر بر صفر سمت راست	تاثیر بر صفر سمت چپ
افزایش r_c	بدون تغییر	نزدیک شدن به مبدا
افزایش Duty Cycle	نزدیک شدن به مبدا	بدون تغییر
افزایش نسبت تبدیل	دور شدن از مبدا	بدون تغییر
افزایش L_m	نزدیک شدن به مبدا	بدون تغییر
افزایش L_{lk}	بدون تغییر	بدون تغییر
افزایش C	بدون تغییر	نزدیک شدن به مبدا
افزایش R_L	دور شدن از مبدا	بدون تغییر

۴-۲- رفتار دینامیکی مبدل فوروارد - فلای یک به ازای تغییر ESR خازن خروجی

در این قسمت یک مبدل فوروارد فلای یک به عنوان یک مبدل توان در منابع تغذیه کلیدزنی با توان نامی ۵۰ وات و تبدیل ولتاژ ۱۵۰ ولت به ۲۴ ولت DC در نظر گرفته شده است (جدول (۳)). همانگونه که در بخش چهارم نشان داده شد تابع انتقال ورودی کنترلی به خروجی مبدل فوروارد فلای یک دارای سه قطب پایدار است و علاوه بر آن اگر در محاسبه تابع انتقال اثر مقاومت معادل سری خازن خروجی در نظر گرفته نشود تابع انتقال فقط دو صفر دارد که محل آنها بستگی

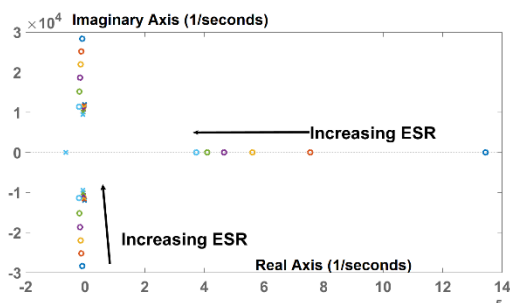
۴-۱- رفتار دینامیکی مبدل فلای یک با تغییر پارامترهای مبدل

تغییر هر یک از پارامترهای مبدل فلای یک بر روی دینامیک مبدل تاثیرگذار هستند که از بین آنها پارامتر ESR تاثیر معنی داری بر رفتار تابع انتقال و محل صفر و قطبهای مبدل فلای یک دارد. وجود ESR باعث اضافه شدن یک صفر در سمت چپ می شود و اضافه شدن صفر سمت چپ در تابع انتقال حلقه باز یک سیستم، منجر به افزایش پهنای باند سیستم حلقه بسته شده و لذا پایداری سیستم بهبود یافته و سرعت سیستم افزایش می یابد (کاهش زمان خیز). از طرف دیگر افزایش مقدار ESR منجر به دور شدن صفر سمت راست و قطب سمت چپ از مبدا می شود که مفهوم آن بهبود وضعیت پایداری و کاهش اثر غیر کمینه فازی است. البته باید به این نکته توجه داشت که افزایش پهنای باند منجر به عبور نویز فرکانس بالا می شود. اثر دور شدن صفر سمت راست براساس تغییر ESR به ازای مقادیر ۰.۱ اهم تا ۰.۳ اهم برای یک ظرفیت خازن خروجی ثابت ۴۷ میکروفاراد در شکل (۶) نشان داده شده است. اما از طرف دیگر براساس رابطه (۲۰) افزایش ESR منجر به افزایش رپل ولتاژ خروجی می شود که در شکل های (۷) و (۸) نشان داده شده است.



شکل (۶): اثر افزایش ESR خازن خروجی روی صفر سمت راست و قطب مبدل فلای یک

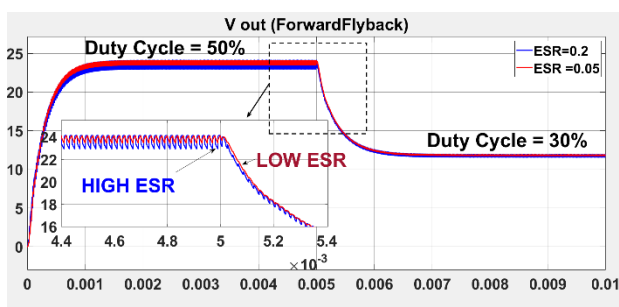
در شکل (۷) پاسخ ولتاژ خروجی مبدل فلای یک با تغییر ضریب وظیفه از ۶۰٪ به ۴۰٪ و به ازای مقادیر ESR ۰.۰۵ و ۰.۴ اهم نشان داده شده است. همانطور که قابل مشاهده است به ازای افزایش ESR میزان بالازدگی ولتاژ ناشی از تغییر ضریب وظیفه کاهش می یابد اما همین کاهش ESR منجر به افزایش رپل ولتاژ شده است (شکل (۸)). اندوکتانس نشی سیم پیچ ترانسفورمر نیز روی دینامیک مبدل فلای یک تاثیر گذار است. با افزایش اندوکتانس نشی، ولتاژ لحظه ای دو سر کلید افزایش می یابد. تاثیر پارامترهای مبدل فلای یک بر روی دینامیک مبدل در جدول (۴) آورده شده است. دور شدن صفر سمت راست و چپ از مبدا منجر به بهبودی وضعیت پایداری و کاهش اثر غیر کمینه فازی و در نتیجه کاهش بالازدگی و پایین زدگی می شود.



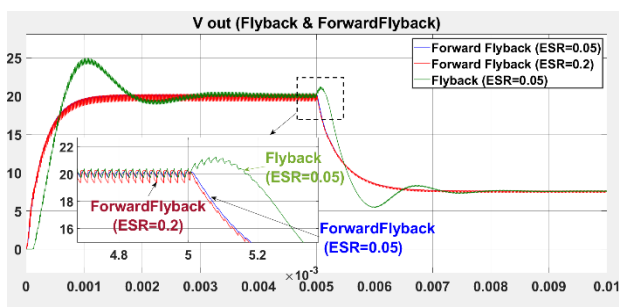
شکل (۱۱): اثر افزایش مقاومت معادل سری خازن خروجی بر محل صفرهای سیستم

در شکل (۱۲) رفتار ولتاژ خروجی مبدل فوروارد - فلای یک به ازای مقادیر ESR خازن خروجی ۰,۰۵ و ۰,۲ اهم نشان داده شده است. در این مبدل بطور مشابه با مبدل فلای یک افزایش مقدار ESR منجر به افزایش ریبیل ولتاژ خروجی می‌شود.

در شکل (۱۳) رفتار دینامیکی ولتاژ خروجی به ازای تغییر ولتاژ از ۲۰ به ۸ ولت به ازای مقادیر ESR خازن خروجی ۰,۰۵ و ۰,۲ اهم برای مبدل فوروارد - فلای یک و ESR خازن خروجی ۰,۰۵ اهم برای مبدل فلای یک نشان داده شده است. در این شکل ضریب وظیفه برای مبدل فوروارد فلای یک از ۴۵ درصد به ۲۲ درصد تغییر کرده که در ناحیه کمینه فاز مبدل قرار دارد و مشاهده می‌شود که هیچگونه بالازدگی در پاسخ خروجی دیده نمی‌شود اما در پاسخ خروجی مبدل فلای یک اثر نا کمینه فازی دیده می‌شود.



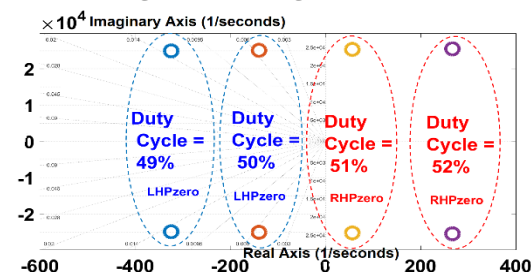
شکل (۱۲): ولتاژ خروجی مبدل فوروارد فلای یک به ازای تغییر ضریب وظیفه



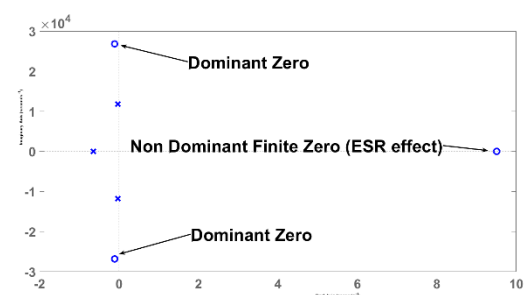
شکل (۱۳): ولتاژ خروجی مبدل فلای یک و فوروارد - فلای یک

به پارامترهای مبدل داشته و به ازای برخی از پارامترها ممکن است در سمت چپ یا در سمت راست محور قرار گیرند. به عبارت دیگر مبدل فوروارد فلای یک بر خلاف مبدل فلای یک (که ذاتاً ناکمینه فاز است) به ازای برخی از پارامترهای مبدل امکان کمینه فاز شدن را دارد. این موضوع در شکل (۹) به ازای مقادیر مختلف ضریب وظیفه نشان داده شده است. اما اگر در محاسبه تابع انتقال مبدل فوروارد فلای یک اثر مقاومت معادل سری خازن در نظر گرفته شود تابع انتقال علاوه بر دو صفر فوق دارای یک صفر دیگر نیز خواهد بود که این صفر متناظر با ESR خازن خروجی و یک صفر محدود غیر غالب است (شکل (۱۰)). بطور کلی در نظر گرفتن اثر ESR خازن خروجی علاوه بر اینکه باعث ایجاد یک صفر در سمت راست صفحه می‌شود محل صفرها را نیز تحت تاثیر قرار می‌دهد.

حداکثر ضریب وظیفه‌ای که مبدل فوروارد - فلای یک با مشخصات جدول (۳) و بدون در نظر گرفتن صفر ناشی از ESR خازن خروجی کمینه فاز باقی می‌ماند ۵۰ درصد است لذا ضریب وظیفه نامی برای عملکرد این مبدل برابر با همین مقدار در نظر گرفته شده است. به ازای ضریب وظیفه‌های مختلف ولی کمتر از ۵۰ درصد با افزایش مقدار ESR خازن خروجی دو صفر اصلی که در سمت چپ صفحه قرار دارند از مبدا دور شده و صفر متناظر با ESR به مبدا نزدیک می‌شود. در شکل (۱۱) اثر مقادیر مختلف ESR خازن خروجی بر محل صفرهای سیستم به ازای تغییر مقادیر ESR از ۰,۱ تا ۰,۶ اهم نشان داده شده است. این نشان می‌دهد که هر چقدر مقدار مقاومت معادل سری خازن خروجی مبدل کوچکتر شود ریبیل ولتاژ خروجی مبدل کاهش می‌یابد.



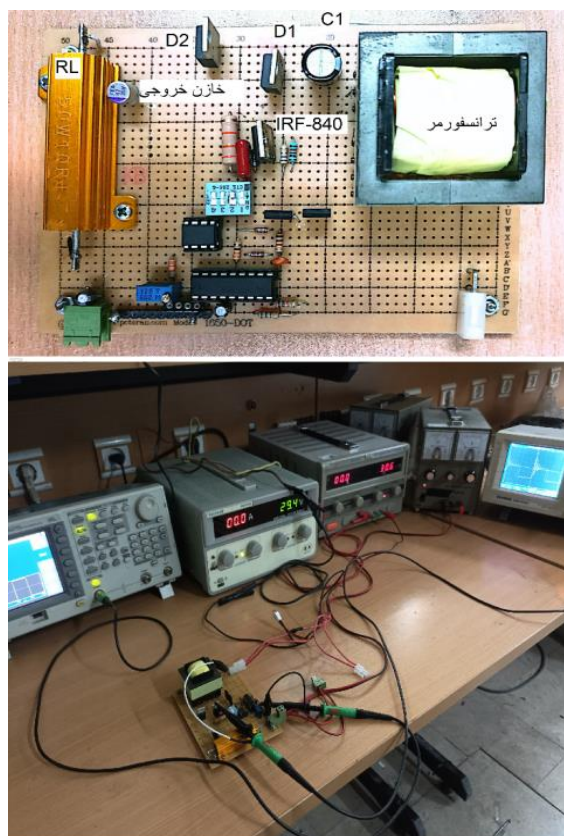
شکل (۹): محل صفرهای غالب مبدل فوروارد - فلای یک به ازای ضریب وظیفه‌های مختلف (کمتر از ۵۰ درصد کمینه فاز و بیشتر از ۵۰ درصد نا کمینه فاز)



شکل (۱۰): محل صفر و قطب‌های مبدل فوروارد - فلای یک

۵- نتایج پیاده‌سازی عملی مبدل فلوئید-فلائی‌بک و مقایسه آن با مبدل فلوئید-فلائی‌بک

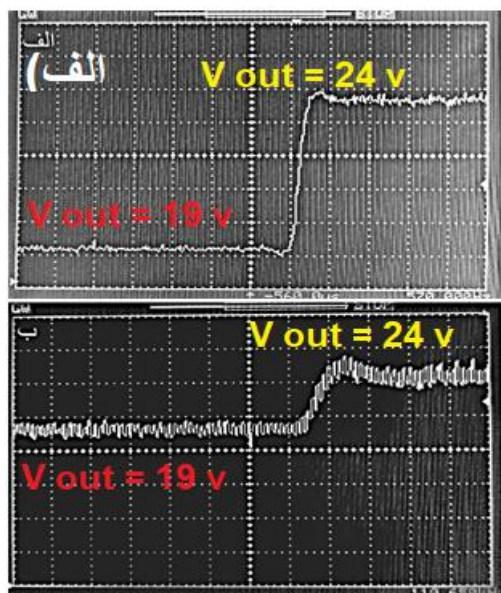
به منظور ارزیابی عملی رفتار دینامیکی مبدل فلوئید-فلائی‌بک یک نمونه آزمایشگاهی از مبدل‌های فلوئید-فلائی‌بک و فلوئید-فلائی‌بک ساخته شده است. در شکل (۱۴) تصویر این نمونه آزمایشگاهی نشان داده شده است. مقادیر پارامترهای این مبدل در جدول (۳) ارائه شده است.



شکل (۱۴): مدار عملی آزمایشگاهی مبدل فلوئید-فلائی‌بک و فلوئید-فلائی‌بک

در شکل (۱۵-الف) ولتاژ خروجی مبدل فلوئید-فلائی‌بک به ازای تغییر پله‌ای ضریب وظیفه با ESR خازن خروجی کم نشان داده شده است. در این شکل اثر ESR خازن خروجی به صورت پایین زدگی در تغییر پله‌ای ولتاژ خروجی به ازای تغییر ضریب وظیفه از ۵۵٪ به ۶۰٪ نشان داده شده است. ولتاژ خروجی مبدل در ضریب وظیفه ۵۵٪ برابر با ۱۹ ولت و در ضریب وظیفه ۶۰٪ برابر با ۲۴ ولت است. در شکل (۱۵-ب) خازن خروجی با یک خازن با ESR بالا جایگزین شده و ولتاژ خروجی نشان داده شده است. در این شکل سطح ولتاژ خروجی مبدل وقتی از خازن با ESR بالا استفاده شده است برابر با ولتاژ خروجی با خازن با ESR پایین است اما همانطور که مشاهده می‌شود طبق رابطه (۲۱) افزایش مقدار ESR خازن خروجی منجر به افزایش رپل ولتاژ خروجی شده است. بطور متناظر با مبدل فلوئید-فلائی‌بک در شکل (۱۶) ولتاژ خروجی

مبدل فلوئید-فلائی‌بک به ازای تغییر ضریب وظیفه از ۳۵٪ به ۴۵٪ برای ایجاد پله ولتاژ مشابه با فلوئید-فلائی‌بک نشان داده شده است. همانطور که مشخص است مبدل فلوئید-فلائی‌بک به دلیل اضافه شده یک بخش فلوئید-فلائی‌بک این امکان را دارد که در ضریب وظیفه پایین‌تری نسبت به مبدل فلوئید-فلائی‌بک ولتاژ خروجی مطلوب و مشابه با فلوئید-فلائی‌بک را ایجاد کند ضمن اینکه اگر محدوده ضریب وظیفه مبدل فلوئید-فلائی‌بک در محدوده کمتر از ۵۱٪ باشد مبدل کمینه فاز بوده و پاسخ دینامیکی بهتری نسبت به مبدل فلوئید-فلائی‌بک نشان می‌دهد. در شکل (۱۶-الف) ولتاژ خروجی با خازن خروجی با ESR پایین و در شکل (۱۶-ب) با ESR بالا به ازای تغییر ولتاژ خروجی از ۱۲ ولت به ۲۴ ولت نشان داده شده است.



شکل (۱۵): تغییر ولتاژ خروجی مبدل فلوئید-فلائی‌بک از ۱۹ به ۲۴ ولت (الف) با ESR پایین (ب) با ESR بالا

- [2] S. Cúk, R. Middlebrook, "A General Unified Approach to Modeling Switching DC to DC Converters in Discontinuous Conduction Mode", In Proc. IEEE PESC'77, pp. 36-57, 1977.
- [3] J. Sun, D. Mitchell, M. Greuel, P. Krein, R. Bass, "Averaged Modeling of PWM Converters Operating in Discontinuous Conduction Mode", IEEE Trans., Power Electron., vol. 16, pp. 482-492, July 2001.
- [4] D. Sable, B. Cho, R. Ridley, "Use of Leading-Edge Modulation to Transform Boost and Flyback Converters into Minimum-Phase-Zero Systems", IEEE Trans. Power Electron., vol. 6, no. 4, pp. 704-711, Oct. 1991.
- [5] B. Poorali, E. Adib, "Right-Half-Plane Zero Elimination of Boost Converter using Magnetic Coupling with Forward Energy Transfer", IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2019.
- [6] A. Goudarzian, A. Khosravi, H. Raeisi, "Modeling, Design and Control of a Modified Flyback Converter with Ability of Right-Half-Plane Zero Alleviation in Continuous Conduction Mode", Engineering Science and Technology, j. jestch, Journal, 2021.
- [7] A. Meghna, Vaghela. Mahmadasraf, A. Mulla "Tri-State Coupled Inductor Based High Step-Up Gain Converter Without Right Hand Plane Zero", IEEE Trans. On Circuits and Systems Vol. 70, Issue 6, June 2023
- [8] Ch. Basso, "Designing Control Loops for Linear and Switching Power Supplies", A Tutorial Guide, Boston, London, Jan., 2012.

[۹] سلیمی، مهدی. "روش جدیدی برای طراحی و انتخاب پارامترهای

کنترل کننده‌ی مد لغزشی در منابع تغذیه‌ی سوییچینگ فلای بک".

مجله مهندسی برق و الکترونیک ایران. ۱۳۹۸؛ ۱۶ (۳): ۱-۱۲.

- [10] M. Kazimierzczuk, S. Nguyen, "Small-Signal Analysis of Open-Loop PWM Flyback DC-DC Converter for CCM", In Aerospace and Electronics Conference, 1995. NAECON, 1995., Proceedings of the IEEE 1995 National, vol. 1. IEEE, pp. 69-76 vol.1., May 1995.
- [11] D. Sable, B. Cho, R. Ridley, "Elimination of the Positive Zero in Fixed Frequency Boost and Flyback Converters", In Proc., IEEE APEC, pp. 205-211, 1990.
- [12] M. Sucu, "Parametric Average Value Modeling of Flyback Converters in CCM and DCM including Parasitics and Snubbers", Master of Applied Science in the faculty of graduate studies, The University of British Columbia, October 2011.
- [13] Sh. Yuar Chen, "Small-Signal Model for a Flyback Converter with Peak Current Mode Control", IET Power Electron., Vol. 7, pp. 805-810, 2014.
- [14] J. Kim, J. Choe J. Lai, "Forward-Flyback Converter for LED Driving with Reduced Number of Components", 2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Cincinnati, pp. 3684-3687, 2017.
- [15] H. Lee, H. Choe, S. Ham, B. Kang, "High-Efficiency Asymmetric Forward-Flyback Converter for Wide Output Power Range", in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 32, no. 1, pp. 433-440, Jan. 2017.

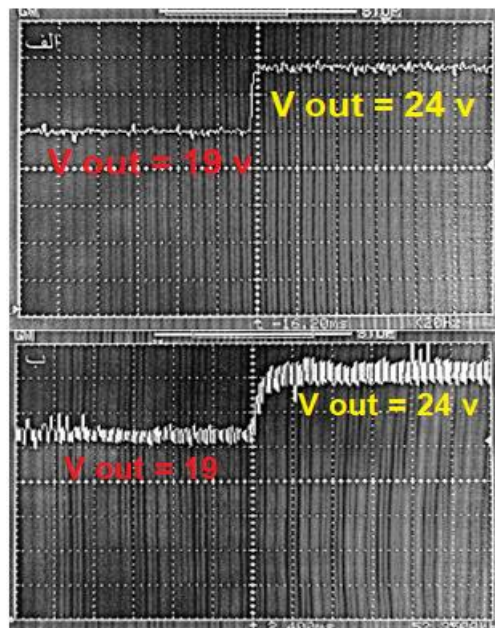
[۱۶] خلیلی، حمید. ابریشمی‌فر، سیدادیب. اسکویی، فرهاد باقر. "مدار

متعادل‌ساز خودکار و سریع برای باتری‌های لیتیم-یون سری شده

مبتنی بر مبدل ترکیبی فوروارد-فلایبک"، مجله مهندسی برق و

الکترونیک ایران. ۱۴۰۰؛ ۱۸ (۴): ۱۴۹-۱۵۴.

- [17] V. Vorperian, "Simplified Analysis of PWM Converters using the Model of the PWM Switch Parts 1 and 2", IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, vol. 26 no. 3, pp. 490-505, 1990.



شکل (۱۶): تغییر ولتاژ خروجی مبدل فوروارد - فلای بک از ۱۹ به ۲۴

ولت؛ الف) با ESR پایین ب) با ESR بالا

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله رفتار دینامیکی مبدل‌های فلای بک و فوروارد فلای بک با استفاده از تابع انتقال ورودی کنترلی به خروجی و براساس مدل مقدار متوسط بدست آمده است. تابع انتقال مبدل فلای بک ذاتاً دارای یک صفر سمت راست است. اضافه شدن یک خازن سری در خروجی ترانسفورمر مبدل فوروارد فلای بک باعث ایجاد یک مسیر فوروارد در این مبدل می‌شود که این می‌تواند شرایط کمینه فاز شدن رفتار دینامیکی مبدل را فراهم کند. در نظر گرفتن اثر پارامترهای پارازیتی مبدل نیز رفتار دینامیکی مبدل را تحت تاثیر قرار می‌دهد. لذا رفتار دینامیکی مبدل فوروارد فلای بک نسبت به مبدل فلای بک با در نظر گرفتن مقاومت سری خازن خروجی مورد بررسی قرار گرفته است. مقاومت سری معادل خازن خروجی مبدل‌های فلای بک و فوروارد - فلای بک نقش به سزایی در رفتار دینامیکی پاسخ خروجی مبدل‌ها دارد. به منظور تایید عملی تفاوت موجود در رفتار دینامیک مبدل‌های فلای بک و فوروارد - فلای بک یک مدل آزمایشگاهی از این مبدل‌ها ساخته شده است که اندازه‌گیری‌های عملی انجام شده روی آنها، رفتار مورد انتظار از نتایج شبیه‌سازی کامپیوتری را تایید نموده است. در این مقاله نشان داده شده است که برخلاف مبدل فلای بک که ذاتاً نا کمینه فاز است مبدل فوروارد فلای بک می‌تواند در محدوده‌ای از ضرایب وظیفه کمینه فاز باشد. همچنین نشان داده شده که کاهش مقاومت سری خازن خروجی در هر دو مبدل منجر به بهبود رفتار دینامیکی آنها می‌شود.

مراجع

- [1] R. Erickson, D. Maksimovic, "Fundamentals of Power Electronics", Springer Netherlands, 2001.

زیر نویس ها

¹ Equivalent Series Resistance

² Pulse Width Modulation

³ Conduction Mode Continuous