

مدلسازی و صحه گذاری معادلات فضای حالت برای یک

مبدل ایزوله رزنانسی سری

رضا امجدی فرد^۱، محمد توکلی بینا^۲، حمید خالوزاده^۳، فرهاد باقراسکویی^۴، ولی طالب زاده^۵

^۱ دانشجوی دکتری مهندسی برق، گروه قدرت، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، r.amjadifard@ee.kntu.ac.ir

^۲ استاد، دانشکده مهندسی برق، گروه قدرت، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، tavakoli@eetd.kntu.ac.ir

^۳ استاد، دانشکده مهندسی برق، گروه کنترل، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، h_khaloozadeh@kntu.ac.ir

^۴ مربی، پژوهشکده سامانه های ماهواره، پژوهشگاه فضایی ایران، f.bagheroskouei@isrc.ac.ir

^۵ مربی، پژوهشکده سامانه های ماهواره، پژوهشگاه فضایی ایران، v.talebzadeh@isrc.ac.ir

پذیرش: ۱۳۹۹/۰۷/۲۸

ویرایش: ۱۳۹۹/۰۴/۱۱

دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۲۵

چکیده: امروزه مبدل های رزنانسی بدلیل قابلیت پیاده سازی تکنیک های سوئیچ زنی در ولتاژ صفر یا جریان صفر بسیار مورد توجه می باشند. استفاده از این دو تکنیک منجر به کاهش تلفات دینامیک در مبدل شده که نتیجه آن افزایش راندمان و کاهش نویز در مقایسه با مبدل های سوئیچینگ متداول با مدولاسیون پهنای پالس می باشد که از سوئیچ زنی سخت استفاده می کنند. اما در مقابل، به دست آوردن مدل سیگنال کوچک برای مبدل های رزنانسی بسیار پیچیده و دشوار می باشد زیرا مقدار متوسط متغیرهای حالت در هر سیکل سوئیچ زنی، برابر با صفر بوده و لذا نمی توان از روش های متداول نظیر متوسط گیری در فضای حالت استفاده نمود. در این مقاله از تکنیک توابع توصیف گسترده برای به دست آوردن معادلات حالت یک مبدل ایزوله رزنانسی سری استفاده شده است. به منظور صحه گذاری معادلات به دست آمده، روش میدل بروک پیشنهاد شده است. به کمک این روش می توان دیاگرام بد را با اعمال تغییرات و انجام چندین اندازه گیری بر روی یک مبدل، به دست آورد. بر این اساس در مرحله صحه گذاری، ابتدا یک مبدل رزنانسی طراحی و پیاده سازی شده است. در مرحله بعد با اعمال تغییرات ضروری برای بکارگیری روش میدل بروک، داده های مورد نیاز اندازه گیری و پس از پردازش، با نتایج حاصل از پیاده سازی معادلات استخراج شده در محیط متلب که مبتنی بر معادلات حالت به دست آمده می باشند، مقایسه می شوند. مقایسه نتایج، صحت معادلات حالت به دست آمده را تایید می کنند.

کلمات کلیدی: مبدل رزنانسی، تابع توصیف گسترده، معادلات فضای حالت، میدل بروک.

Modeling and Verification of the State Space Equation for an Isolated Series Resonant Converter

Reza Amjadifard, Mohammad Tavakoli Bina, Hamid Khaloozadeh,
Farhad Bagheroskouei, Vali Talebzadeh

Abstract: Resonant converter due to implementation of zero voltage switching (ZVS) or zero current switching (ZCS), are very interested. Although using these techniques, increases the efficiency and also decreases the generated EMI noise, obtaining the small-signal model of these

converters is very complicated. The state-space variables mostly change as a sinusoid curve, so the average of these variables is equal to zero. Therefore the traditional method such as state-space averaging is not applicable in order to obtaining the state space equation of the converter. In this article, the state space equation is obtained by using the extended describing functions. To verify the obtained equation, the Middlebrook method is suggested. By means of this method, the bode-plot of the open-loop transfer function could be obtained based on the existing hardware. So an isolated series resonant converter is implemented and the required signals are measured in order to draw the bode-plot of the open-loop transfer function based on Middlebrook method. Verification is performed by comparing the experimental results with simulation results.

Keywords: Resonant converter, Extended describing function, State-space equation, Middlebrook.

در نظر گرفته شده است. [۱۱] علاوه بر هارمونیک اصلی، هارمونیک‌های مرتبه بالاتر را نیز در محاسبات لحاظ نموده اما تنها دو ورودی کنترلی را در نظر گرفته است. در این مقاله علاوه بر اینکه سعی شده تا حداکثر متغیرهای حالت و پارامترهای کنترلی در معادلات لحاظ شوند، برای صحنه‌گذاری معادلات به دست آمده، روش میدل بروک پیشنهاد و جزئیات پیاده‌سازی آن تشریح شده است. استفاده از روش فوق برای صحنه‌گذاری در حالی است که [۶] تا [۱۰] از تجهیز بنام امپدانس آنالایزر برای این منظور استفاده کرده‌اند.

ساختار مقاله به این ترتیب تنظیم گردیده که در بند ۲ مدل سیگنال کوچک یک مبدل ایزوله سری رزناسی به کمک توابع توصیف گسترده به دست آمده و در بند ۳ نتایج پیاده‌سازی این معادلات به کمک نرم افزار متلب نشان داده شده است. در بند ۴، پیاده‌سازی سخت افزاری مبدل ایزوله همراه با جزئیات روش میدل بروک جهت به دست آوردن تابع انتقال حلقه باز مبدل ارائه شده است. نهایتاً در همین بند از مقاله نتایج حاصل از پیاده‌سازی روابط با آنچه از اندازه‌گیری‌های عملی حاصل شده است، مقایسه می‌شوند تا صحت معادلات به دست آمده از تحلیل‌های بند ۲ ارزیابی شوند.

۲- مدلسازی سیگنال کوچک برای مبدل رزناسی سری LLC

یک مبدل رزناسی ایزوله سری از نوع LLC در شکل ۱ نشان داده شده است. مدار تانک رزنانس شامل یک سلف و خازن سری شده در سمت اولیه ترانسفورماتور ایزوله کننده است. اندوکتانس مغناطیس کننده ترانسفورماتور نیز در مدار رزنانس تاثیر گذار بوده و به همین دلیل این مبدل LLC سری خوانده می‌شود.

مبدل‌های رزناسی سیستم‌هایی غیرخطی‌اند لذا داشتن یک مدل سیگنال کوچک خطی برای بررسی رفتار دینامیکی این مبدل‌ها بسیار مناسب بوده و به کمک آن می‌توان تابع انتقال مبدل را نیز به دست آورد. برای به دست آوردن معادلات حالت مبدل به کمک توابع توصیف گسترده، باید مطابق هفت گامی که در ادامه بیان خواهد شد عمل نمود.

۱- مقدمه

مبدل‌های رزناسی بدلیل قابلیت بکارگیری سوئیچینگ در ولتاژ صفر یا سوئیچینگ در جریان صفر، در مقایسه با سایر انواع مبدل‌های سوئیچینگ با مدولاسیون پهنای پالس از مزایای خاصی برخوردار هستند [۱]. مهمترین این مزیت‌ها، کمتر بودن تلفات سوئیچینگ و کاهش چشمگیر تداخل الکترومغناطیسی است. به همین دلیل مبدل‌های رزناسی در مقایسه با سایر مبدل‌های سوئیچینگ از چگالی توانی (وات بر متر مکعب یا وات بر کیلوگرم) بیشتری برخوردار هستند. در مقابل مدلسازی این نوع مبدل‌ها پیچیده‌تر بوده و بررسی رفتار دینامیکی آن‌ها دشوارتر می‌باشد چراکه روش‌های متداول نظیر متوسط‌گیری مداری و متوسط‌گیری در فضای حالت به منظور دستیابی به تابع انتقال آن‌ها قابل استفاده نیستند. دلیل این امر تغییرات سریع مقدار متغیرهای حالت در هر سیکل (یا وضعیت سوئیچ) از نظر باز و بسته بودن) می‌باشد. در روش متوسط‌گیری در فضای حالت، معادلات حالت برای بازه‌هایی از زمان نوشته می‌شوند که وضعیت سوئیچ صفر یا یک باشد. چون فرکانس‌های طبیعی یک مبدل سوئیچینگ با مدولاسیون پهنای پالس و نیز تغییرات سایر پارامترها نظیر ولتاژ ورودی و بار بسیار کندتر از فرکانس سوئیچینگ می‌باشند، می‌توان یک مقدار در حال تعادل برای هر پارامتر در بازه زمانی فوق در نظر گرفت [۲]. اما در مبدل‌های رزناسی فرکانس سوئیچینگ بسیار نزدیک به فرکانس رزنانس بوده و حالات دارای تغییراتی شبه-سینوسی با همین فرکانس هستند لذا روش متوسط‌گیری برای استخراج معادلات نهایی حالت قابل استفاده نیست. بر این اساس روش‌های دیگری نظیر مدلسازی بر اساس داده‌های نمونه برداری شده [۳] و [۴]، مدل معادل منابع [۵] و توابع توصیف گسترده [۶-۱۱] برای این دسته از مبدل‌ها پیشنهاد می‌شوند.

در این مقاله یک مبدل رزناسی سری از نوع ایزوله با شبکه سوئیچ تمام-پل در ورودی و یکسوساز تمام موج در خروجی، مورد بررسی قرار گرفته است. این درحالی است که در [۶] و [۷]، مبدل رزناسی غیر ایزوله (یک متغیر حالت کمتر) و در [۸]، [۹] و [۱۰]، مبدل رزناسی با شبکه سوئیچ از نوع نیم-پل بررسی شده است. همچنین در [۸] مرتبه سیستم کاهش یافته و در [۹] تنها یک پارامتر (کنترلی) یعنی ω_s در معادلات

وجود دارد که بتوان پس از بیان این متغیرها توسط سری فوریه، آن‌ها را با هارمونیک اصلی شان تقریب زد. تنها متغیری که با ولتاژ DC خود تقریب زده خواهد شد، ولتاژ خازن خروجی است. تقریب‌های فوق در روابط ۲ ارائه شده‌اند.

$$i_r(t) = i_s(t)\sin\omega_s t + i_c(t)\cos\omega_s t \quad (۲)$$

(الف)

$$v_{cr}(t) = v_s(t)\sin\omega_s t + v_c(t)\cos\omega_s t \quad (۲-ب)$$

$$i_m(t) = i_{ms}(t)\sin\omega_s t + i_{mc}(t)\cos\omega_s t \quad (۲-ج)$$

$$\frac{di_r}{dt} = \left(\frac{di_s}{dt} - \omega_s i_c\right)\sin\omega_s t + \left(\frac{di_c}{dt} + \omega_s i_s\right)\cos\omega_s t \quad (۲-د)$$

$$\frac{dv_{cr}}{dt} = \left(\frac{dv_s}{dt} - \omega_s v_c\right)\sin\omega_s t + \left(\frac{dv_c}{dt} + \omega_s v_s\right)\cos\omega_s t \quad (۲-ه)$$

$$\frac{di_m}{dt} = \left(\frac{di_{ms}}{dt} - \omega_s i_{mc}\right)\sin\omega_s t + \left(\frac{di_{mc}}{dt} + \omega_s i_{ms}\right)\cos\omega_s t \quad (۲-و)$$

در روابط فوق ω_s فرکانس سوئیچینگ (rad/sec) است. با وجود اینکه متغیرهای فوق شبه-سینوسی هستند اما تغییرات پوش آنها نسبت به زمان کند است و لذا همانگونه که در ادامه خواهید دید می‌توان رفتار دینامیکی مبدل را بر اساس تغییرات این پوش بیان نمود.

۲-۳ توابع توصیف گسترده

روش تابع توصیف گسترده یک روش قدرتمند ریاضی برای فهم، تحلیل، ارتقاء و طراحی سیستم‌های غیرخطی است. غالب سیستم‌ها غیرخطی هستند اما می‌توان در بازه‌های محدودی، عملکرد خطی داشته و به صورت خطی در نظر گرفته شوند. جملات غیرخطی در مجموعه معادلات (۱) را می‌توان با هارمونیک و مقدار DC آنها تقریب زد و به شکل معادلات (۳) بیان نمود.

$$v_{AB}(t) = f_1(d, v_{in})\sin\omega_s t \quad (۳)$$

(الف)

$$\text{sgn}(i_{sp})v'_o = f_2(i_{ss}, i_{sp}, v_{cf})\sin\omega_s t + f_3(i_{sc}, i_{sp}, v_{cf})\cos\omega_s t \quad (۳-ب)$$

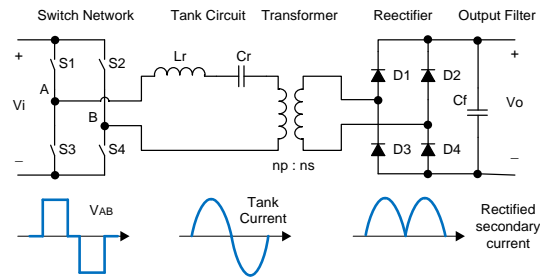
$$|i_{sp}| = f_4(i_{ss}, i_{sc}) \quad (۳-ج)$$

در روابط فوق i_{ps} و i_{ss} به ترتیب جملات سینوس و کسینوس از جریان ثانویه ترانسفورماتور هستند. i_{sp} نیز جریان ثانویه ترانسفورماتور می‌باشد. در معادلات (۳)، f_1, f_2, f_3, f_4 توابع توصیف گسترده نامیده می‌شوند. توابع غیر خطی فوق را می‌توان با بسط فوریه و در نظر گرفتن هارمونیک اصلی شان، در قالب معادلات (۴) بیان کرد. i_{ps} و i_{ss} به ترتیب جملات سینوس و کسینوس از جریان ثانویه ترانسفورماتور هستند. i_{sp} نیز جریان ثانویه ترانسفورماتور می‌باشد.

$$f_1(d, v_{in}) = \frac{4v_{in}}{\pi} \sin\left(\frac{\pi}{2}d\right) = v_{es} \quad (۴)$$

(الف)

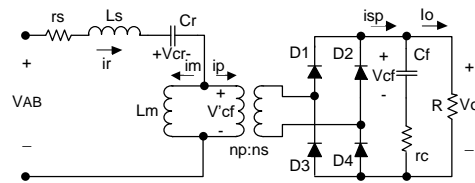
$$f_2(i_{ss}, i_{sp}, v_{cf}) = \frac{4i_{ss}}{\pi} v_{cf} = \frac{4i_{ps}}{\pi} v_{cf} = \frac{4n}{\pi} \frac{i_{ps}}{i_{pp}} v_{cf} = v_{ps} \quad (۴-ب)$$



شکل ۱: مبدل ایزوله رزنانسی سری LLC

۲-۱ معادلات فضای حالت

در گام نخست باید معادلات حالت را برای متغیرهای حالت نشان داده شده در شکل ۲ نوشت. این معادلات در قالب روابط ۱ ارائه شده‌اند.



شکل ۲: متغیرهای حالت در مبدل رزنانسی سری

$$V_{AB} = L_s \left(\frac{di_r}{dt}\right) + i_r r_s + V_{cr} + \text{sgn}(i_p)v'_o \quad (۱)$$

$$\text{where } \text{sgn}(i_p) = \begin{cases} -1, & \text{if } v'_o < 0 \\ +1, & \text{if } v'_o \geq 0 \end{cases} \quad (الف)$$

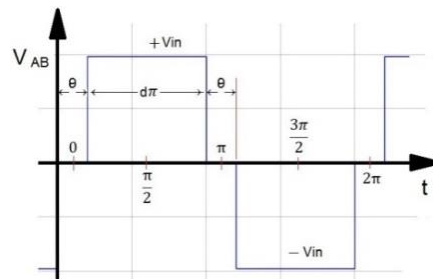
$$i_r = C_r \frac{dv_{cr}}{dt} \quad (۱-ب)$$

$$\text{sgn}(i_r - i_m)v'_o = L_m \frac{di_m}{dt} \quad (۱-ج)$$

$$|i_{sp}| = \left(1 + \frac{r_c}{R}\right) C_f \frac{dv_{cf}}{dt} + \frac{1}{R} v_{cf} \quad (۱-د)$$

$$v_o = v_{cf} + r_c(i_{sp} - I_o) \text{ or } v_o = r'_c \times \text{abs}(i_{sp}) + \left(\frac{r'_c}{R}\right) v_{cf} \text{ where } r'_c = r_c || R \quad (۱-ه)$$

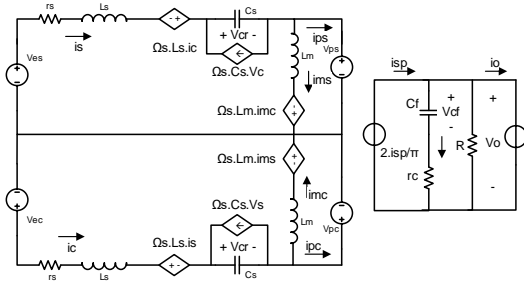
ولتاژ V_{AB} خروجی شبکه سوئیچ از نوع تمام-پل است که شکل موج آن شبه-مربعی بوده که در شکل ۳ نشان داده شده است. در این شکل d و θ به ترتیب معرف سیکل وظیفه و زمان مرده (بین دو پالس) هستند.



شکل ۳: ولتاژ خروجی شبکه سوئیچ

۲-۲ تقریب هارمونیک

در مبدل فوق جریان سلف i_r ، ولتاژ خازن v_{cr} و جریان اندوکتانس مغناطیس کننده ترانس i_m شبه-سینوسی هستند (شکل ۱). لذا این امکان



شکل ۴: مدار معادل سیگنال بزرگ مبدل رزناسی سری

$$f_3(i_{sc}, i_{sp}, v'_{cf}) = \frac{4 i_{sc}}{\pi i_{sp}} v'_{cf} = \frac{4 i_{pc}}{\pi i_{pp}} v'_{cf} \tag{ج-۴}$$

$$= \frac{4n i_{pc}}{\pi i_{pp}} v_{cf} = v_{pc}$$

where $i_{sp} = \sqrt{i_{ss}^2 + i_{sc}^2} = n \cdot i_{pp} = n \cdot \sqrt{i_{ps}^2 + i_{pc}^2}$

در روابط فوق i_{ps} و i_{pc} به ترتیب جملات سینوس و کسینوس از جریان اولیه ترانسفورماتور هستند. i_{pp} نیز جریان اولیه ترانسفورماتور است. نسبت تبدیل ترانسفورماتور (تعداد دور اولیه به ثانویه) با n نشان داده شده است. باید توجه داشت که شکل موج V_{AB} تقارن زوج داشته و لذا ضریب جمله کسینوس آن صفر است ($v_{ec} = 0$).

۲-۵ حل معادلات در حالت پایدار

در شرایط پایدار، متغیرهای حالت در معادلات (۵) با زمان تغییر نمی کنند. لذا برای یک نقطه کار انتخابی، عبارات شامل مشتق زمانی صفر بوده و مقادیر حالت پایدار به دست خواهند آمد (در ادامه با حروف بزرگ نشان داده شده اند). لذا می توان معادلات فوق را در حالت کار دائم مطابق معادلات (۶) بیان نمود.

$$-L_s \Omega_s I_c + (r_s + R_e) I_s + V_s - I_{ms} R_e = \frac{4}{\pi} V_{in} \sin\left(\frac{\pi D}{2}\right) \tag{۶-ا}$$

$$L_s \Omega_s I_s + (r_s + R_e) I_c + V_c - I_{mc} R_e = 0 \tag{۶-ب}$$

$$I_s + C_s \Omega_s V_c = 0 \tag{۶-ج}$$

$$I_c - C_s \Omega_s V_s = 0 \tag{۶-د}$$

$$R_e I_s + L_m \Omega_s I_{mc} - R_e I_{ms} = 0 \tag{۶-ه}$$

$$R_e I_c - L_m \Omega_s I_{ms} - R_e I_{mc} = 0 \tag{۶-و}$$

و یا به فرم ماتریسی، مطابق رابطه (۷) نوشت.

$$\begin{bmatrix} r_s + R_e & -L_s \Omega_s & 1 & 0 & -R_e & 0 \\ L_s \Omega_s & r_s + R_e & 0 & 1 & 0 & -R_e \\ 1 & 0 & 0 & C_s \Omega_s & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -C_s \Omega_s & 0 & 0 & 0 \\ R_e & 0 & 0 & 0 & -R_e & L_m \Omega_s \\ 0 & R_e & 0 & 0 & -L_m \Omega_s & -R_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s \\ I_c \\ V_s \\ V_c \\ I_{ms} \\ I_{mc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{4}{\pi} V_{in} \sin\left(\frac{\pi D}{2}\right) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{۷}$$

۲-۶ اعمال اختشاش و خطی سازی

در این مرحله فرض می کنیم هر یک از متغیرهای ورودی و حالت شامل یک جزء DC و یک نوسان AC با دامنه کم حول نقطه کار C می باشند (نظیر $d = D + \hat{d}$ و $v_{in} = V_{in} + \hat{v}_{in}$ ، $i_{mc} = I_{mc} + \hat{i}_{mc}$). با اعمال این تغییر در روابط (۵) و خطی سازی (با صرف نظر کردن از جملات DC و نیز جملاتی که شامل حاصلضرب چند نوسان می باشند) به معادلات زیر خواهیم رسید.

۲-۴ بالانس هارمونیکی

بالانس هارمونیکی روشی در حوزه فرکانس است که برای محاسبه پاسخ حالت پایدار معادلات تفاضلی غیرخطی استفاده می شود. برای این منظور ابتدا معادلات کیرشهف در حوزه فرکانس و برای تعداد مشخصی از هارمونیک ها (در این مقاله تنها هارمونیک اصلی در نظر گرفته شده است) نوشته می شود. سپس با توجه به اینکه ضرایب جملات دارای فرکانس تغییرات کمی در مقایسه با فرکانس رزنانس هستند، می توان مبدل را در وضعیت پایدار در نظر گرفت و ضرایب جملات سینوس و کسینوس را در دو طرف معادلات برابر دانست. لذا کافی است تا ابتدا روابط (۲) تا (۴) را در رابطه (۱) جایگذاری نمود و در ادامه ضرایب جملات سینوس، کسینوس و DC را در طرفین معادلات برابر قرار داد. نتیجه این عملیات در رابطه (۵) مشخص شده است.

$$v_{es} = L_s \left(\frac{di_s}{dt} - \omega_s i_s \right) + i_s r_s + v_s + \frac{4n i_{ps}}{\pi i_{pp}} v_{cf} \tag{۵-ا}$$

$$v_{ec} = L_s \left(\frac{di_c}{dt} + \omega_s i_s \right) + i_c r_s + v_s + \frac{4n i_{pc}}{\pi i_{pp}} v_{cf} \tag{۵-ب}$$

$$i_s = C_s \left(\frac{dV_s}{dt} - \omega_s v_c \right) \tag{۵-ج}$$

$$i_c = C_s \left(\frac{dV_c}{dt} + \omega_s v_s \right) \tag{۵-د}$$

$$L_m \left(\frac{di_{ms}}{dt} - \omega_s i_{mc} \right) = \frac{4n i_{ps}}{\pi i_{pp}} v_{cf} = v_{ps} \tag{۵-ه}$$

$$L_m \left(\frac{di_{mc}}{dt} + \omega_s i_{ms} \right) = \frac{4n i_{pc}}{\pi i_{pp}} v_{cf} = v_{pc} \tag{۵-و}$$

$$v_o = \frac{2}{\pi} r'_c (i_{sp}) + \left(\frac{r'_c}{r_c} \right) v_{cf} - r'_c i_o \tag{۵-ز}$$

روابط مشخص شده در (۵)، معادلات سیگنال بزرگ مبدل LLC هستند که در شکل ۴ به صورت مداری نشان داده شده اند. در رابطه (۵) متغیرهای حالت جدیدی که ضرایب جملات سینوس و کسینوس از متغیرهای اصلی هستند، مشاهده می شوند.

$$C = [r'_c K_3 \quad r'_c K_4 \quad 0 \quad 0 \quad -r'_c K_3 \quad -r'_c K_4 \quad \frac{r'_c}{r_c}] \quad (ج-۹)$$

$$D = [0 \quad 0 \quad -r'_c \quad 0] \quad (د-۹)$$

تابع انتقال مبدل (ولتاژ خروجی بازای تغییرات هر یک از پارامترهای ورودی نظیر تغییر فرکانس سوئیچینگ) نیز به کمک رابطه (۱۰) قابل محاسبه خواهد بود.

$$G_p(s) = C(SI - A)^{-1}B + D \quad (۱۰)$$

۳- پیاده‌سازی روابط

یک مبدل رزناسی با مشخصات ارائه شده در جدول ۱ در نظر گرفته شده است. دیاگرام بود برای این مبدل بازای ورودیهای مختلف در شکل ۵ رسم شده است. در شکل فوق ورودیها به ترتیب عبارتند از \hat{d} , \hat{v}_{in} , \hat{i}_o و $\hat{\omega}_{sn}$. بدیهی است که دیاگرام بود تابع نقطه کار مبدل بوده و با تغییر برخی پارامترها نظیر ولتاژ ورودی، جریان بار (ناشی از تغییر اندازه مقاومت بار)، تغییر خواهد نمود. شکل ۶ این تغییرات را برای $G_d = \hat{v}_o/\hat{d}$ در سه نقطه کار مختلف مشخص نموده است.

جدول ۱: مشخصات مبدل ایزوله رزناسی سری

پارامتر	نماد	مقدار
ولتاژ وردی (ولت)	Vi	۲۸
ولتاژ خروجی	Vo	۱۲
مقدار بار خروجی (اهم)	R	۵
سلف رزناس (میکروهناری)	Ls	۳۰
خازن رزناس (نانوفاراد)	Cs	۱۰۰
اندوکتانس مغناطیس کنندگی ترانسفورماتور (میکروهناری)	Lm	۱۵۴
فرکانس سوئیچینگ (کیلوهرتز)	fs	۱۰۰
خازن خروجی (میکروفاراد)	Cf	۱۵۰
مقاومت معادل سری با خازن خروجی یا ESR (اهم)	rc	۰.۰۱
مقاومت سری در مدار رزناس (اهم)	rs	۰.۱
نسبت تبدیل ترانسفورماتور (np/ms)	n	۰.۸۳

۴- پیاده سازی سخت افزاری

برای مقایسه نتایج محاسباتی با عملی، یک نمونه مبدل رزناسی ایزوله سری با مشخصاتی مشابه آنچه در جدول ۱ آمده است، طراحی و پیاده‌سازی شده است. اما برای صحت سنجی معادلات حالت به‌دست آمده در ۹، روش مبدل بروک (Middlebrook) پیشنهاد شده است [۱۲]. به کمک روش فوق می‌توان تابع انتقال حلقه باز سیستم (اندازه و فاز) را به‌دست آورد. در [۱۳] و [۱۴] جزئیاتی از پیاده سازی روش مبدل بروک و اجرای مناسب آن در مبدل‌های سوئیچینگ متداول نظیر باک، ارائه شده است. در ادامه این مقاله، ابتدا روش مبدل بروک تشریح داده شده و سپس منحنی اندازه و فاز تابع انتقال حلقه باز از روش فوق به‌دست آمده که نهایتاً با نتایج حاصل از پیاده‌سازی روابط استخراج شده در محیط متلب (شکل ۵) مقایسه خواهند شد.

$$\frac{d\hat{i}_s}{dt} = -\left(\frac{H_{ip} + r_s}{L_s}\right)\hat{i}_s - \left(\frac{\Omega_s L_s + H_{ic}}{L_s}\right)\hat{i}_c - \frac{1}{L_s}\hat{v}_s + \frac{H_{ip}}{L_s}\hat{i}_{ms} + \frac{H_{ic}}{L_s}\hat{i}_{mc} - \frac{H_{vcf}}{L_s}\hat{v}_{cf} + \frac{K_1}{L_s}\hat{v}_{in} + \frac{K_2}{L_s}\hat{d} - \omega_0 I_c \hat{\omega}_{sn} \quad (۷)$$

$$\frac{d\hat{i}_c}{dt} = \left(\frac{\Omega_s L_s - G_{ip}}{L_s}\right)\hat{i}_s - \left(\frac{G_{ic} + r'_s}{L_s}\right)\hat{i}_c - \frac{1}{L_s}\hat{v}_c + \frac{G_{ip}}{L_s}\hat{i}_{ms} + \frac{G_{ic}}{L_s}\hat{i}_{mc} - \frac{G_{vcf}}{L_s}\hat{v}_{cf} + \omega_0 I_s \hat{\omega}_{sn} \quad (ب-۷)$$

$$\frac{d\hat{v}_s}{dt} = \frac{1}{C_s}\hat{i}_s - \Omega_s \hat{v}_c - \omega_0 V_c \hat{\omega}_{sn} \quad (ج-۷)$$

$$\frac{d\hat{v}_c}{dt} = \frac{1}{C_s}\hat{i}_c + \Omega_s \hat{v}_s + \omega_0 V_c \hat{\omega}_{sn} \quad (د-۷)$$

$$\frac{d\hat{i}_{ms}}{dt} = \frac{H_{ip}}{L_m}\hat{i}_s + \frac{H_{ic}}{L_m}\hat{i}_c - \frac{H_{ip}}{L_m}\hat{i}_{ms} - \left(\frac{H_{ic} + L_m \Omega_s}{L_m}\right)\hat{i}_{mc} + \frac{H_{vcf}}{L_m}\hat{v}_{cf} - \frac{L_m I_{mc} \omega_0}{L_m}\hat{\omega}_{sn} \quad (ه-۷)$$

$$\frac{d\hat{i}_{mc}}{dt} = \frac{G_{ip}}{L_m}\hat{i}_s + \frac{G_{ic}}{L_m}\hat{i}_c - \frac{(G_{ip} - L_m \Omega_s)}{L_m}\hat{i}_{ms} - \frac{G_{ic}}{L_m}\hat{i}_{mc} + \frac{G_{vcf}}{L_m}\hat{v}_{cf} + I_{ms} \omega_0 \hat{\omega}_{sn} \quad (و-۷)$$

$$\frac{d\hat{v}_{cf}}{dt} = \frac{K_{is} r'_c}{r_c C_f}\hat{i}_s + \frac{K_{ic} r'_c}{r_c C_f}\hat{i}_c - \frac{K_{is} r'_c}{r_c C_f}\hat{i}_{ms} - \frac{K_{ic} r'_c}{r_c C_f}\hat{i}_{mc} - \frac{r'_c}{R r_c C_f}\hat{v}_{cf} + \left(\frac{r'_c}{r_c}\right)\hat{v}_{cf} \quad (ز-۷)$$

$$\hat{v}_o = r'_c K_{is} \hat{i}_s + r'_c K_{ic} \hat{i}_c - r'_c K_{is} \hat{i}_{ms} - r'_c K_{ic} \hat{i}_{mc} + \left(\frac{r'_c}{r_c}\right)\hat{v}_{cf} \quad (ح-۷)$$

حال می‌توان معادلات فوق را در قالب معادلات حالت زیر نوشت:

$$\frac{dx}{dt} = Ax + Bu \quad (۸)$$

$$y = Cx + Du \quad (ب-۸)$$

$$x = [\hat{i}_s \quad \hat{i}_c \quad \hat{v}_s \quad \hat{v}_c \quad \hat{i}_{ms} \quad \hat{i}_{mc} \quad \hat{v}_{cf}]^T \quad (ج-۸)$$

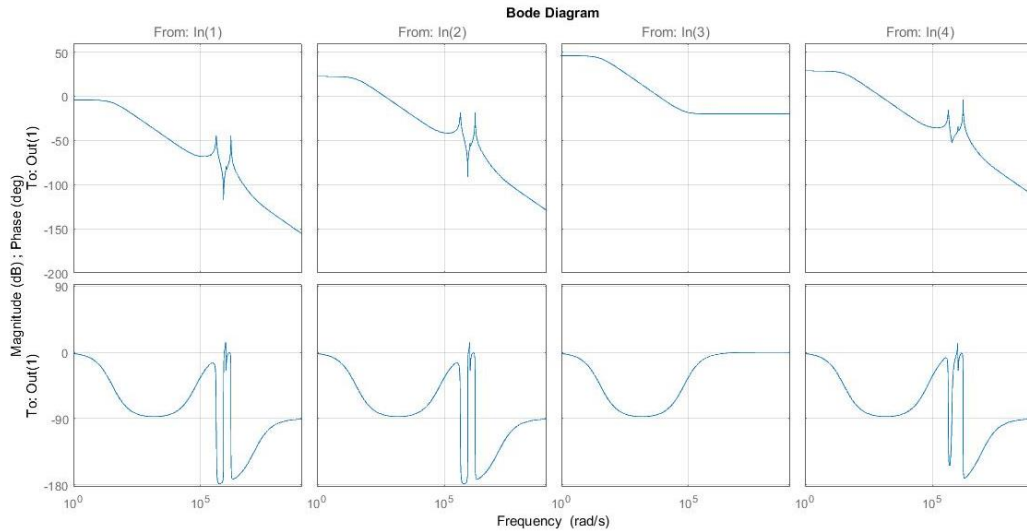
$$u = [\hat{v}_{in} \quad \hat{d} \quad \hat{i}_o \quad \hat{\omega}_{sn}]^T \quad (د-۸)$$

$$y = [\hat{v}_o] \quad (ه-۸)$$

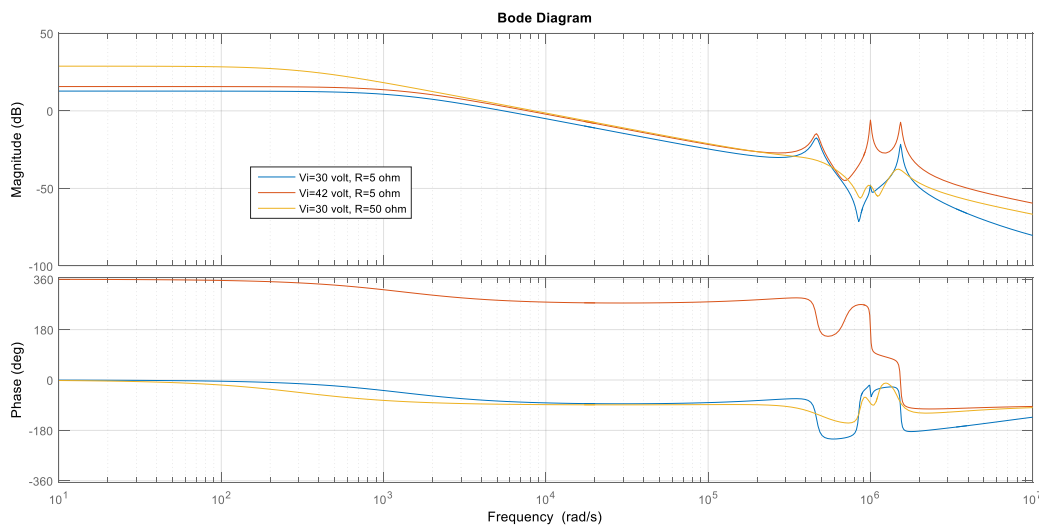
که مقادیر ماتریس‌های A, B, C و D به شرح زیر به‌دست خواهند آمد.

$$A = \begin{bmatrix} -\left(\frac{H_{ip} + r_s}{L_s}\right) & \left(\frac{\Omega_s L_s - H_2}{L_s}\right) & -\frac{1}{L_s} & 0 & \frac{H_1}{L_s} & \frac{H_2}{L_s} & -\frac{H_3}{L_s} \\ -\left(\frac{\Omega_s L_s + G_{ic}}{L_s}\right) & -\left(\frac{G_{ic} + r'_s}{L_s}\right) & 0 & -\frac{1}{L_s} & \frac{G_1}{L_s} & \frac{G_2}{L_s} & -\frac{G_3}{L_s} \\ \frac{1}{C_s} & 0 & 0 & \Omega_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_s} & -\Omega_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{H_{ip}}{L_m} & \frac{H_{ic}}{L_m} & 0 & 0 & -\frac{H_{ip}}{L_m} & -\left(\frac{H_2 - L_m \Omega_s}{L_m}\right) & \frac{H_3}{L_m} \\ \frac{G_{ip}}{L_m} & \frac{G_{ic}}{L_m} & 0 & 0 & -\frac{(G_{ip} + L_m \Omega_s)}{L_m} & -\frac{G_2}{L_m} & \frac{G_3}{L_m} \\ \frac{K_{is} r'_c}{r_c C_f} & \frac{K_{ic} r'_c}{r_c C_f} & 0 & 0 & -\frac{K_{is} r'_c}{r_c C_f} & -\frac{K_{ic} r'_c}{r_c C_f} & -\frac{r'_c}{R r_c C_f} \end{bmatrix} \quad (۹)$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{K_1}{L_s} & \frac{K_2}{L_s} & 0 & \omega_0 I_c \\ 0 & 0 & 0 & -\omega_0 I_s \\ 0 & 0 & 0 & \omega_0 V_c \\ 0 & 0 & 0 & -\omega_0 V_s \\ 0 & 0 & 0 & \omega_0 I_{mc} \\ 0 & 0 & 0 & -\omega_0 I_{ms} \\ 0 & 0 & -\frac{r'_c}{r_c C_f} & 0 \end{bmatrix} \quad (ب)$$

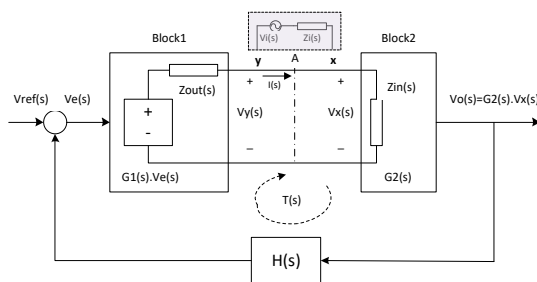


شکل ۵: دیاگرام بود مبدل رزناسی سری برای نسبت خروجی به ورودیهای مختلف



شکل ۶: دیاگرام بود تابع انتقال \hat{v}_o/\hat{d} در سه شرایط کاری مختلف

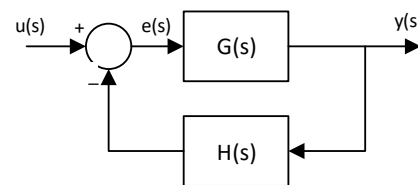
سیستم فوق، می‌توان به کمک دیاگرام بود رفتار اندازه و فاز $T(s)$ را به جای منظور نمودن بهره کلی سیستم مورد ارزیابی قرار داد. هرگاه مطابق شکل ۸ از یک نقطه (نقطه A) تابع انتقال G را به دو قسمت تفکیک کنیم. در نتیجه می‌توان تابع انتقال حلقه (باز) را مطابق رابطه (۱۲) نوشت.



شکل ۸: تفکیک تابع انتقال رو به جلو در یک سیستم حلقه بسته به دو قسمت

۴-۱ روش مبدل بروک

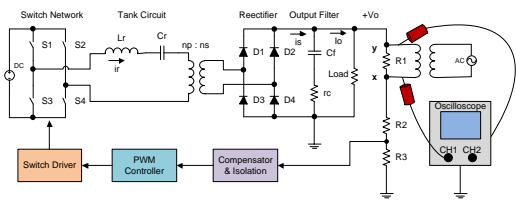
تابع انتقال یک سیستم حلقه بسته مطابق شکل ۷ را در نظر بگیرید.



شکل ۷: سیستم حلقه بسته

$$G_t(s) = \frac{y(s)}{u(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s).H(s)} = \frac{G(s)}{1 + T(s)} \quad (11)$$

در رابطه فوق حاصلضرب $G(s).H(s)$ با عنوان تابع انتقال حلقه (باز) خوانده شده و با $T(s)$ نشان داده می‌شود. در بررسی پایداری

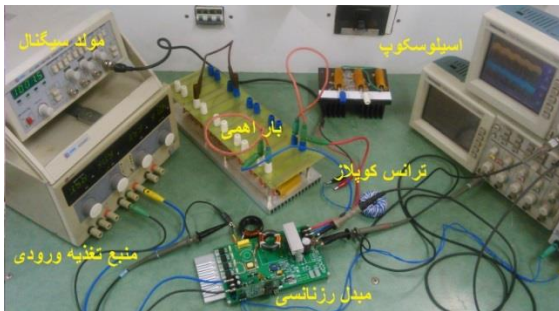


شکل ۹: چگونگی اعمال ولتاژ اغتشاش و اندازه‌گیری ولتاژ در نقاط X و Y

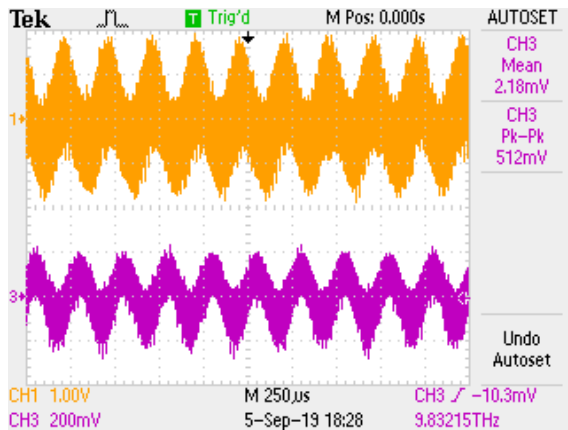
۲-۴ اندازه‌گیری‌های عملی

شکل ۱۰ چیدمان آزمون برای مبدل پیاده‌سازی شده را نشان می‌دهد. سیگنال سینوسی توسط یک سیگنال ژنراتور در فرکانس‌های مختلف تولید شده و توسط ترانس کوپلاژی که در شکل مشخص شده، به دو سر یک مقاومت که در مسیر فیدبک اضافه شده است اعمال می‌گردد. ولتاژهای دو سر ترانس توسط اسیلوسکوپ خوانده شده و در قالب فایل اکسل ذخیره می‌شوند. به کمک نرم افزار متلب و ماژول CFTOOL، اطلاعات اندازه و فاز برای هر سیگنال (ورودی و خروجی) در فرکانس‌های مختلف استخراج می‌شوند. با استفاده از این داده‌ها می‌توان منحنی بود تابع انتقال حلقه باز مبدل را رسم نمود.

شکل ۱۱ نمونه از ولتاژهای اندازه‌گیری شده توسط اسیلوسکوپ را نشان می‌دهد. در شکل ۱۲ منحنی‌های بود مبدل که از دو طریق محاسباتی و اندازه‌گیری حاصل شده اند، نشان داده شده و مقایسه شده-اند.



شکل ۱۰: نمایی از چیدمان آزمون



شکل ۱۱: نمونه از ولتاژهای اندازه‌گیری شده در فرکانس ۴kHz

$$T(s) = G1(s) \cdot \frac{Zin(s)}{Zin(s) + Zout(s)} \cdot G2(s) \cdot H(s) \quad (۱۲)$$

که در رابطه فوق $G1$ و $G2$ به ترتیب توابع انتقال بلوک‌های شماره یک و دو هستند. اما در عمل برای محاسبه تابع انتقال، یک ولتاژ اغتشاش با فرکانس مشخص (منبع $V_i(s)$ با امپدانس $Z_i(s)$)، مطابق آنچه در شکل ۸ نشان داده شده است به محل تفکیک (بین دو نقطه X و Y) اعمال می‌کنیم. نقطه تفکیک باید ویژگی‌های خاصی داشته باشد که در ادامه به آن اشاره خواهد شد. سپس باید ولتاژ در نقاط X و Y را توسط اسیلوسکوپ یا نظایر آن اندازه‌گیری نمود ($V_x(s)$ و $V_y(s)$). نسبت ولتاژ در نقطه Y به ولتاژ در نقطه X را تابع انتقال حاصل از اندازه‌گیری یا $T_v(s)$ می‌نامیم. حال می‌توان به کمک شکل ۸، رابطه‌ی بین $T_v(s)$ و $T(s)$ (تابع انتقال حلقه باز سیستم) را مطابق زیر به دست آورد:

$$V_e(s) = -H(s) \cdot G2(s) \cdot V_x(s) \quad (۱۳-الف)$$

$$V_y(s) = G1(s) \cdot V_e(s) + I(s) \cdot Zout(s) \quad (۱۳-ب)$$

$$V_y(s) = V_x(s) \cdot G1(s) \cdot G2(s) \cdot H(s) + I(s) \cdot Zout(s) \quad (۱۳-ج)$$

$$I(s) = V_x(s) / Zin(s) \quad (۱۳-د)$$

$$V_y(s) = V_x(s) \cdot G1(s) \cdot G2(s) \cdot H(s) + V_x(s) \cdot Zout(s) / Zin(s) \quad (۱۳-ه)$$

$$T_v(s) = V_y(s) / V_x(s) = G1(s) \cdot G2(s) \cdot H(s) + Zout(s) / Zin(s) \quad (۱۳-و)$$

$$T_v(s) = T(s) \left(1 + \frac{Zout(s)}{Zin(s)} \right) + \frac{Zout(s)}{Zin(s)} \quad (۱۳-ز)$$

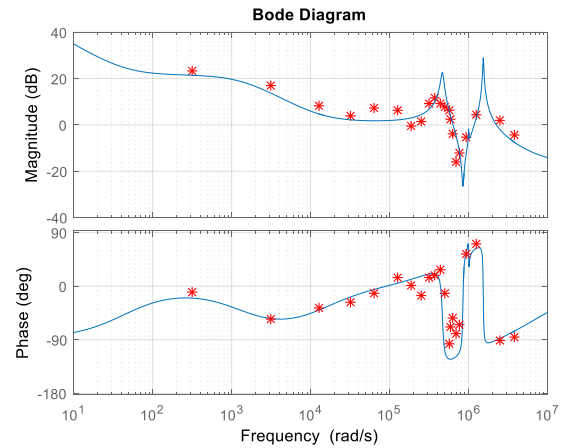
مطابق رابطه (۱۳-ز)، $T_v(s)$ یا همان تابع انتقال اندازه‌گیری شده توسط ابزارهای اندازه‌گیری (نظیر Vector Analyzer)، با مقدار تئوری $T(s)$ مرتبط می‌باشد. هرگاه نسبت امپدانس خروجی و ورودی در نقطه‌ای که اغتشاش اعمال می‌شود، به مراتب کوچکتر از یک باشد، مقدار $T_v(s)$ و $T(s)$ برابر خواهند شد. مناسب‌ترین نقطه برای اعمال ولتاژ اغتشاش در یک مبدل، محل نمونه برداری از ولتاژ خروجی است (در مسیر فیدبک). در این نقطه بدلیل وجود خازن بزرگ در خروجی (امپدانس کوچک در فرکانس‌های بالا) و نیز مقاومت بار (امپدانس کوچک در فرکانس‌های پایین) مقدار $Zout(s)$ بسیار کوچک خواهد بود. از طرف دیگر بدلیل وجود امپدانس بالا در مسیر فیدبک (غالباً از مرتبه ده کیلو اهم به بالا) مقدار $Zin(s)$ در مقایسه با $Zout(s)$ بسیار بزرگ است. لذا در عمل این نقطه محل مناسبی برای اعمال ولتاژ اغتشاش خواهد بود.

شکل ۹ نمایی از چگونگی اعمال ولتاژ و نقاط اندازه‌گیری را نشان می‌دهد. سیگنال اغتشاش یک سیگنال سینوسی با فرکانس مشخص و دامنه کوچک (در مقایسه با دامنه ولتاژ خروجی) است که از طریق یک ترانس ایزوله به دو سر یک مقاومت ($R1$) که اهم کمی دارد اعمال می‌شود. کانال یک اسیلوسکوپ، ولتاژ ورودی و کانال دوم آن، ولتاژ خروجی را اندازه‌گیری می‌کنند. کافی است برای فرکانس‌های مختلف شکل موج-های نقاط فوق را اندازه‌گیری کرده و مقدار اندازه و فاز آن‌ها را مشخص نمود. دیاگرام بود (Bode) با کمک این اطلاعات قابل رسم است.

سازی شده است. دیاگرام بود برای معادلات حالت به دست آمده و بر اساس مقادیر المان‌های پیاده سازی شده ترسیم و با داده‌های اندازه‌گیری شده مقایسه شده است. برای صحنه‌گذاری، منحنی‌های اندازه و فاز برای تابع انتقال حلقه-باز مبدل با بکارگیری روش مبدل بروک اندازه‌گیری و ترسیم شده است. به منظور استفاده از روش فوق، ایجاد برخی تغییرات در سخت افزار ضروری است که جزئیات آن همراه با تشریح کامل روش فوق در مقاله ارائه شده است. نهایتاً نتایج حاصل از سخت افزار، با داده‌های حاصل از پیاده‌سازی معادلات به دست آمده در محیط متلب مقایسه شده‌اند. این مقایسه صحت معادلات حالت به دست آمده را تایید می‌کند.

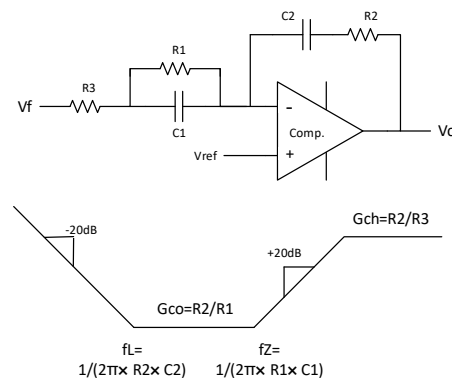
مراجع

- [1] Y. Wang, L. Yang, G. Li, S. Tu, "A Parameter Selection Method for Multi-Element Resonant Converters with a Resonant Zero Point," *Journal of Power Electronics*, Vol. 18, No. 2, pp. 332-342, March 2018.
- [2] R.W. Erickson, D. Maksimovic, *Fundamentals of Power Electronics*, 2th Ed. , Kluwer Academic Publishers, pp. 213-247, 2004.
- [3] M.Z. Youssef, H. Pinheiro, "A Sampled-Data Reduced Order Dynamic Model for a Self-Sustained Series-Parallel Resonant Converter," *European Power Electronics and Drives*, Vol. 15, Issue 1, 2005.
- [4] M.E. Elbuluk, G.C. Verghese, J.G. Kassakian, "Sampled-data modeling and digital control of resonant converters," *IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS*. Vol 3. no 3, JULY 1988. pp. 344 – 354.
- [5] Y. Murakami, T. Sato, K. Nishijima, T. Nabeshima, "Small Signal Analysis of LLC Current Resonant Converters Using Equivalent Source Model," *IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Florence, Italy, 23-26 Oct. 2016.
- [6] E.X. Yang, F.C. Lee, M.M. Jovanovic, "Small-signal modeling of series and parallel resonant converters," *APEC '92 Seventh Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition*, Boston, MA, USA, 23-27 Feb. 1992.
- [7] K. Aditya, S. Williamson, "Linearization and Control of Series-Series Compensated Inductive Power Transfer System Based on Extended Describing Function Concept," *Energies*, Vol. 9, Issue 11, 17 November 2016.
- [8] S. Tian, F.C. Lee, Q. Li, "Simplified Equivalent Circuit Model of Series Resonant Converter," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 31, Issue 5, May 2016.
- [9] H.P. Park, J.H. Jung, "Modeling and Feedback Control of LLC Resonant Converters at High Switching Frequency," *Journal of power*



شکل ۱۲: مقایسه داده‌های اندازه‌گیری شده با نتایج حاصل از پیاده‌سازی روابط در محیط متلب

لازم به ذکر است که برای رسم منحنی بود، بروش محاسباتی، باید تابع انتقال جبران کننده نیز لحاظ شود. بعبارت دیگر تابع انتقال حلقه باز از حاصل ضرب معادله ۱۰ در تابع انتقال جبران ساز، به دست خواهد آمد. جبران ساز استفاده شده در این مبدل در شکل ۱۳ نشان داده شده است. تابع انتقال این جبران ساز بر اساس مقادیر پیاده‌سازی شده در رابطه (۱۴) ارائه شده است.



شکل ۱۳: جبران ساز

$$\begin{aligned}
 G_c &= \frac{V_c}{(V^+ - V^-)} = \frac{V_c}{(V_{ref} - V_f)} \\
 &= \frac{(1 + R_1 C_1 s)(1 + R_2 C_2 s)}{C_2 s (R_1 R_3 C_1 s + (R_1 + R_3))} \\
 &= \frac{2.564(s^2 + 35267.8 \times s + 1598767)}{s^2 + 23214.1 \times s}
 \end{aligned} \quad (14)$$

۸- نتیجه‌گیری

در این مقاله دو هدف اصلی که عبارتند از استخراج معادلات حالت برای یک مبدل ایزوله رزناسی و صحنه‌گذاری آن توسط روش مبدل-بروک، با جزئیات مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به غیرخطی بودن مبدل رزناسی و نیز تغییرات سریع مقادیر متغیرهای حالت حین هر یک از حالات سوئیچینگ، استفاده از توابع توصیف گسترده و خطی سازی معادلات حاصل از این توابع پیشنهاد و استفاده گردید. برای صحنه‌گذاری معادلات به دست آمده، یک مبدل رزناسی ایزوله سری، طراحی و پیاده

electronics, Vol. 16, Issue 3, pp. 849-860, May 2016.

- [10] C.H. Chang, E.C. Chang, C.A. Cheng, H.L. Cheng, S.C. Lin, "Small Signal Modeling of LLC Resonant Converters Based on Extended Describing Function," 2012 International Symposium on Computer, Consumer and Control, Taichung, Taiwan, 4-6 June 2012.
- [11] J. Ma, X. Wei, L. Hu, J. Zhang, "Small-Signal Modeling of the LLC Half-Bridge Resonant Converter," Journal of Circuits, Systems and Computers vol. 28, no. 04, 2019.
- [12] R.D. Middlebrook, "Measurement of Loop Gain in Feedback Systems," International Journal of Electronics, Vol. 38, No. 4, pp. 485-512, 1975.
- [13] H. Choi, "Practical feedback loop design considerations for switched mode power supplies," Fairchild Semiconductor Power Seminar, pp. 489-498, 2010-2011.
- [14] Y. Panov, M.M. Jovanovic, "Small-signal measurement techniques in switching power supplies," Nineteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC 2004), Anaheim, CA, USA, 22-26 Feb. 2004.