



# Technovations of Electrical Engineering in Green Energy System

Research Article

(2023) 2(2):51-69

## A Soft Switching Boost Converter with an Active Coupled Inductor Snubber Circuit

Hadi Faezi<sup>1</sup>, PhD, Majid Zamani<sup>2</sup>, PhD, Mohammad Ali Latifzadeh<sup>1</sup>, PhD<sup>1</sup> Department of Electrical and Computer Engineering, Malek-Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.<sup>2</sup> Faculty of Applied Sciences, Malek-Ashtar University of Technology, Isfahan, Iran.

### Abstract:

In this paper, a new soft switching boost converter is presented. A lossless active snubber circuit including an auxiliary switch, three diodes, a capacitor and a coupled-inductor provides soft switching conditions for the main switch and the output diode, so that the main switch and the output diode operate under ZCS and ZVS conditions, respectively. They turn on and off under the ZCS condition. The operation of the snubber circuit is associated with low current stress on the main switch and low current and voltage stress on the output diode. The proposed converter is able to maintain the smooth switching condition in a wide range of output load and input voltage variations. Working principles, steady state analysis and design procedure of this converter are discussed in detail. Also, to confirm the theoretical results, a laboratory sample is made and tested. It should be noted that, The laboratory results confirm the theoretical results comprehensively.

**Keywords:** Dc-dc converter, Boost converter, Soft-switching, Active snubber cell, Coupled inductor.

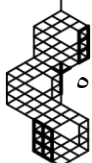
**Received:** 10 January 2023

**Revised:** 30 March 2023

**Accepted:** 10 April 2023

**Corresponding Author:** Dr. Majid Zamani, ma.zamani@sutech.ac.ir

DOI: <http://dx.doi.org/10.30486/teeges.2023.1977331.1059>





مقاله پژوهشی

## فناوری‌های نوین مهندسی برق در سیستم انرژی سبز

## یک مبدل بوست کلید زنی نرم با مدار اسنابر اکتیو سلف تزویج شده

هادی فائزی<sup>۱</sup>، دکتری، مجید زمانی<sup>۲</sup>، دکتری، محمدعلی لطیف زاده<sup>۱</sup>، دکتری

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

۲- پژوهشکده علوم و فناوری اپتیک و لیزر، مجتمع دانشگاهی علوم کاربردی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین شهر، اصفهان، ایران

**چکیده:** در این مقاله یک مبدل بوست جدید با شرایط کلید زنی نرم ارائه شده است. در این ساختار پیشنهادی یک مدار اسنابر فعال بدون تلفات شامل یک کلید کمکی، سه دیود، یک خازن و یک سلف تزویج، شرایط کلید زنی نرم را برای کلید اصلی و دیود خروجی فراهم می‌کنند. بدین صورت که کلید اصلی به ترتیب تحت شرایط ZCS و ZVS و دیود خروجی تحت شرط ZCS روشن و خاموش می‌شوند. عملکرد مدار اسنابر با تنش جریان پایین روی کلید اصلی و تنش پایین جریانی و ولتاژی روی دیود خروجی همراه است. مبدل پیشنهادی قادر است در یک رنج وسیعی از تغییرات بار خروجی و ولتاژ ورودی شرایط کلید زنی نرم را فراهم کند. اصول کاری، بررسی حالت دائم و طراحی این مبدل با جزئیات در این مقاله بحث گردید. همچنین برای تأیید نتایج تئوری یک نمونه آزمایشگاهی ساخته و تست شده است. با توجه به نتایج حاصل از تست‌های آزمایشگاهی، نتایج تئوری تأیید شده است.

**واژه‌های کلیدی:** مبدل dc-dc، مبدل بوست، کلید زنی نرم، مدار اسنابر اکتیو، سلف تزویج شده.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۱۱/۲۰

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۰۱/۱۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۱/۲۱

نویسنده‌ی مسئول: دکتر مجید زمانی، ma.zamani@sutech.ac.ir

DOI: <http://dx.doi.org/10.30486/teegees.2023.1977331.1059>

امروزه، در کاربردهای متنوع صنعتی مانند  $PFC^1$ ، پیل سوختی<sup>۲</sup> و سلول‌های خورشیدی به‌طور گسترده‌ای از مبدل بوست<sup>۳</sup> استفاده می‌شود. مبدل بوست پایه دارای کلید زنی سخت<sup>۴</sup> بوده که معمولاً در مد پیوسته کار می‌کند. از معایب اصلی آن بازیابی معکوس<sup>۵</sup> دیود خروجی همراه با تلفات کلید زنی کلید اصلی است. به منظور دستیابی به وزن پایین، ابعاد کوچک و قابلیت اطمینان بالا بایستی فرکانس این مبدل افزایش یابد، اما معایب ذکرشده منجر به افزایش تلفات کلید زنی، افزایش  $EMI^6$  و کاهش بازده می‌شود. بهترین روش برای کاهش تلفات کلید زنی، اصلاح بازده و افزایش قابلیت اطمینان، به‌کارگیری روش‌های کلید زنی نرم<sup>۷</sup> مبتنی بر مبدل بوست است [۱]. تاکنون چندین مبدل بوست با به‌کارگیری راهکار کلید زنی نرم که تنها از قطعات پسیو استفاده کرده‌اند، پیشنهاد شده است [۱۰-۲]. مزیت این ساختارها، داشتن مدار کنترلی شبیه به مبدل بوست کنترل شده بر پایه  $PWM^8$  است. به‌رحال عملکرد این نوع اسنابر<sup>۹</sup>ها با تنش ولتاژ و جریان بر روی کلید اصلی همراه است. در [۴-۲] مدار اسنابر پسیو<sup>۱۰</sup>، شرایط کلید زنی نرم را تنها در زمان خاموش شدن کلید فراهم نموده است. مدار اسنابر در [۱۰-۵] شرایط کلید زنی نرم را برای دیود خروجی و کلید اصلی فراهم کرده است. به‌عنوان مثال در [۱۱] مدار اسنابر پسیو با استفاده از دو سلف تزویج شده<sup>۱۱</sup>، دو دیود و دو خازن شرایط  $ZCS^{12}$  و  $ZVS^{13}$  را برای کلید اصلی به ترتیب هنگام روشن شدن و خاموش شدن آماده می‌کنند. در [۱۰] مدار اسنابر پسیو با استفاده از یک دیود و یک سلف تزویج شده شرایط  $ZVS$  را برای کلیدهای یک مبدل پیشنهادی بوست سنکرون<sup>۱۴</sup> فراهم کرده است. در مقاله‌های مختلف، تعداد زیادی مبدل بوست با کلید زنی نرم با استفاده از مدارهای اسنابر اکتیو<sup>۱۵</sup> ارائه شده‌اند [۲۳-۱۰]. در این مدارها یک کلید کمکی به همراه تعدادی قطعه پسیو به مبدل بوست مبتنی بر  $PWM$  اضافه شده و شرایط کلید زنی نرم را برای کلید اصلی و خود مدار اسنابر فراهم کرده است. در [۸] کلید اصلی به‌صورت سخت روشن شده و با  $ZCS$  خاموش شده است، ضمن اینکه مدار اسنابر اکتیو به‌صورت سخت خاموش شده است. با کمک یک مدار کنترل در [۱۲] به قیمت افزایش فرکانس کلید زنی مدار اسنابر، مشکلات [۸] حل شده و شرایط کلید زنی نرم برای تمامی قطعات نیمه‌هادی فراهم شده است. در [۱۳] مدار اسنابر اکتیو از یک سلف تزویج شده، یک سلف و یک خازن تشکیل شده و شرایط کلید زنی نرم را برای تمامی نیمه‌هادی‌ها فراهم می‌کند. ضمناً این مدار قادر است با مبدل‌های دیگر علاوه بر بوست نیز کار کند. در [۱۴] ایده سلف تزویج شده [۱۳] به مبدل‌های دو جهته اعمال شده و خانواده‌ای از مبدل‌های دو جهته  $ZVT^{16}$  حاصل شده است. نیمه‌هادی‌های این مبدل‌ها قادرند بدون در نظر گرفتن جهت توان در محدوده وسیعی از نرخ وظیفه<sup>۱۷</sup> تحت شرایط کلید زنی نرم کار کنند. در [۲۰-۱۵] برخلاف وجود شرایط کلید زنی نرم برای همه نیمه‌هادی‌ها، عملکرد اسنابر موجب ایجاد تنش جریان و ولتاژ بر روی کلید اصلی، کمکی یا دیود خروجی شده است. در [۲۱] یک مبدل بوست با اسنابر فعال ارائه شده است به طوریکه شرایط کلید زنی نرم بدون اضافه شدن تنش اضافی به کلید اصلی فراهم می‌شود اما تلفات هدایتی ناشی از جریان چرخشی اسنابر در طول رزونانس و نیاز به یک کلید کمکی با آمپراژ قابل مقایسه با کلید اصلی از معایب این مبدل به‌شمار می‌رود. همچنین اسنابر اکتیو پیشنهادی در [۲۲] دارای عملکرد مشابه با [۲۱] بوده اما از میان کلید کمکی جریان بالایی عبور کرده و تنش دیود خروجی بالا است. در [۲۲] یک مدار بوست با اسنابر اکتیو فلائی‌بک<sup>۱۸</sup> برای کاربردهای توان بالا پیشنهاد شده است. در این مدار اسنابر، کلید اصلی بدون تحمل جریان اضافی، کلید کمکی بدون تحمل تنش ولتاژ و جریان قابل ملاحظه و هر دو تحت کلید زنی نرم کار می‌کنند و قله جریان چرخشی داخل مدار اسنابر پایین است. به‌رحال مدار اسنابر فلائی‌بک برای بازیابی انرژی ذخیره‌شده در خازن اسنابر به خروجی به زمان نیاز دارد که امکان محدود شدن فرکانس کاری مبدل وجود دارد.

در این مقاله یک مبدل بوست با کلید زنی نرم با مدار اسنابر سلف تزویج شده پیشنهاد شده است. اصول کاری مبدل پیشنهادی و مبدل‌های ارائه شده در [۲۲، ۲۳] تقریباً مشابه هستند، به‌طوری که مدار اسنابر آن‌ها شامل یک سلف، یک خازن و یک مدار فعال کمکی است که در هر دوره کلید زنی، انرژی خازن اسنابر را به خروجی منتقل می‌کند.

مدارهای فعال در مبدل‌های [۲۲، ۲۳] و مبدل پیشنهادی در نحوه انتقال انرژی خازن اسنابر به خروجی باهم تفاوت دارند. مدار فعال مبدل پیشنهادی در مقایسه با [۲۲] با یک عدد سلف تزویج کمتر در طول انتقال انرژی، دارای جریان چرخشی کمتری بوده که منجر به تلفات هدایتی پایین‌تری داخل مدار اسنابر شده است. مدار فعال مبدل [۲۲] از نوع فلائی‌بک است که انرژی ذخیره‌شده در خازن اسنابر را ابتدا به یک خازن در سمت خروجی منتقل کرده و سپس به خروجی منتقل می‌کند. این مدار از یک کلید کمکی و قطعات دیگر شامل خازن اسنابر، سلف، ترانسفورمر و سه دیود تشکیل شده است. همچنین یک سلف دیگر به منظور روشن شدن کلید اصلی



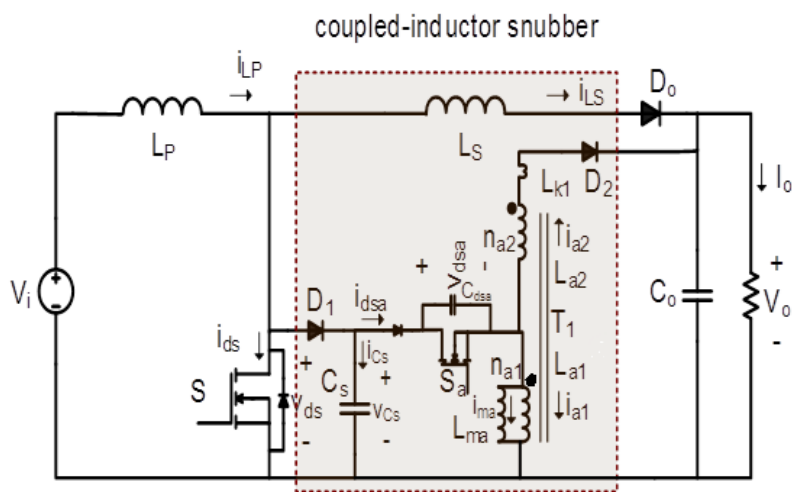
تحت شرایط ZCS با کلید اصلی بصورت سری قرار گرفته است. در مقایسه با [۲۲]، مدار فعال پیشنهادی به صورت فوروارد<sup>۱۹</sup> بوده به نحوی که قادر است در زمان کمتر و با هسته مغناطیسی کوچک تری انرژی خازن اسنابر را به خروجی منتقل کند. به هر حال در مدار فعال پیشنهادی از یک کلید کمکی شناور استفاده شده است که قدری مدار فرمان را پیچیده می کند. در مدار پیشنهادی ما، مدار کمکی بصورت فورواردی کار می کند و سلف پراکندگی آن در انتقال انرژی خازن اسنابر به خروجی بصورت رزنانسی شرکت می کند. در مدار کمکی [۲۲] از ترانسفورمر برای ایجاد شرایط کلید زنی نرم استفاده کرده است که این ترانسفورمر بصورت فلای بک کار می کند و ترانسفورمر فلای بک دارای سلف نشستی است که در [۲۲] برای مهار انرژی ذخیره شده در سلف نشستی (پراکندگی) هیچگونه تمهیدی اندیشیده نشده است. از طرفی در مدار پیشنهادی ما ترانسفورمر بصورت اتوترانس استفاده شده است که موجب کاهش تعداد دور سیم پیچ می شود که منجر به کاهش حجم و وزن نسبت به مدار پیشنهادی [۲۲] شده است. همچنین تعداد قطعات استفاده شده در مدار اسنابر پیشنهادی ما نسبت به [۲۲] کاهش یافته است. در ادامه تحلیل حالت دائمی، طراحی و نتایج شبیه سازی و آزمایشگاهی مدار بوست کلید زنی نرم پیشنهادی بررسی شده است.

## ۲- معرفی ساختار و تحلیل حالت دائمی مدار پیشنهادی

شکل ۱ مبدل بوست کلید زنی نرم پیشنهادی را نشان داده است. مبدل پیشنهادی شامل یک مبدل بوست و یک مدار اسنابر اکتیو سلف تزویج شده است. سلف تزویج شده  $T_1$  با سلف<sup>۲۰</sup> پراکندگی  $L_{k1}$ ، سلف های مغناطیس کنندگی  $L_{ma}$  و یک ترانسفورماتور ایده آل مدل شده است. سلف  $L_p$  به همراه کلید اصلی  $S$  و دیود خروجی  $D_o$  مبدل بوست را تشکیل داده اند. مدار اسنابر اکتیو سلف تزویج شده شامل دیودهای  $D_1, D_2, D_{sa}$ ، خازن  $C_s$ ، سلف تزویج شده  $T_1$ ، کلید کمکی  $S_a$  و سلف  $L_s$  است. وظیفه سلف  $L_s$  کاهش مشکل بازیابی معکوس دیود خروجی، فراهم کردن شرط ZCS برای کلید اصلی هنگام روشن شدن و ایجاد شرط ZCS برای دیود خروجی در لحظات روشن و خاموش شدن است. خازن اسنابر  $C_s$  شرط ZVS را برای کلید اصلی هنگام خاموش شدن فراهم کرده است. مابقی مدار اسنابر، انرژی ذخیره شده در خازن اسنابر را در هر دوره کلید زنی به خروجی منتقل کرده و از تلف شدن این انرژی داخل کلید اصلی جلوگیری می کنند.

برای تحلیل حالت دائم مبدل بوست کلید زنی نرم فرضیات زیر در نظر گرفته شده است:

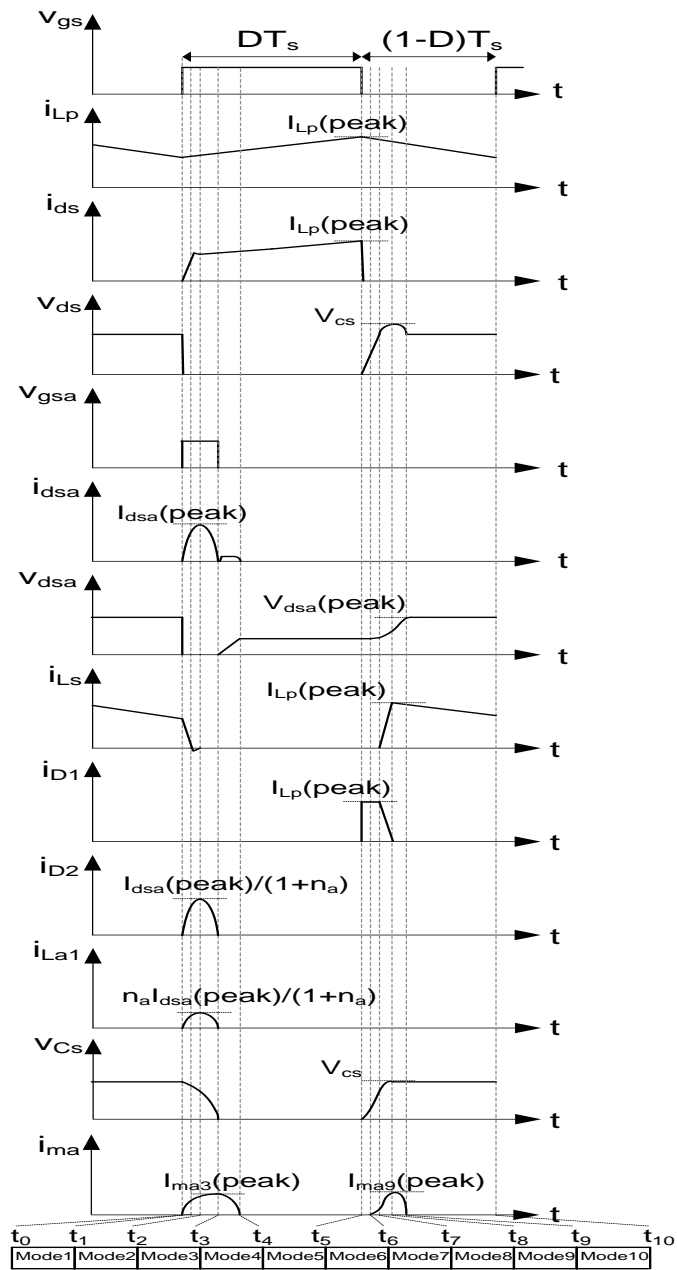
- از خازن درین سورس کلید اصلی صرف نظر شده است.
- ولتاژهای ورودی و خروجی عاری از ریپل هستند.
- بازده مبدل ۱۰۰ درصد است.
- ریپل جریان ورودی  $i_{LP}$  ناچیز است.



شکل (۱): شماتیک مداری مبدل بوست کلید زنی نرم پیشنهادی



عملکرد مبدل بوست کلید زنی نرم پیشنهادی در ۱۰ وضعیت عملکرد (CCM) در سرتاسر یک دوره کلید زنی تشریح شده است. شکل‌های ۲ و ۳ به ترتیب شکل موج‌های کلیدی و توزیع جریان داخل مدار پیشنهادی در وضعیت‌های عملکرد مختلف، در یک دوره کلید زنی نشان داده است. در ادامه هر وضعیت عملکرد با جزئیات توضیح داده شده است.



شکل (۲): منحنی‌های کلیدی مبدل بوست پیشنهادی

**وضعیت ۱**  $[t_0, t_1]$ : این وضعیت با روشن شدن هم‌زمان کلیدهای اصلی  $S$  و کمکی  $S_a$  آغاز می‌شود. جریان دیود خروجی به دلیل وجود سلف  $L_s$  به صورت خطی کاهش می‌یابد بنابراین مشکل بازیابی معکوس دیود خروجی بهبود یافته و جریان کلید اصلی  $i_{ds}$  به صورت خطی افزایش می‌یابد. معادله جریان کلید اصلی به صورت زیر است:

$$i_{ds}(t) = \frac{V_o}{L_s}(t - t_0) \quad (1)$$

در این فاصله، همپوشانی میان مشخصه‌های ولتاژ و جریان کلید اصلی کاهش یافته و کلید اصلی تحت شرط ZCS روشن می‌شود. همچنین دیود خروجی با ZCS خاموش می‌شود. هنگامی که کلید کمکی روشن می‌شود یک رزونانس بین خازن اسنابر  $C_s$  و سلف





پراکندگی سلف تزویج شده  $T_1$  یعنی  $L_{k1}$  از میان کلید کمکی  $S_a$  سلف تزویج شده  $T_1$  و ولتاژ خروجی شروع می‌شود. با فرض  $n_a = (n_{a2}/n_{a1})$  معادلات زیر برای جریان  $i_{Cs}$  و ولتاژ خازن  $V_{Cs}$  حاصل می‌شوند.

$$i_{Cs}(t) = -i_{dsa}(t) = \frac{1}{Z_1} (v_{Cs}(t_0) - \frac{V_0}{1+n_a}) \sin \omega_1(t-t_0) \quad (2)$$

$$v_{Cs}(t) = (v_{Cs}(t_0) - \frac{V_0}{1+n_a}) \cos(\omega_1(t-t_0)) + \frac{V_0}{1+n_a} \quad (3)$$

که  $\omega_1$  و  $Z_1$  به ترتیب فرکانس و امپدانس مشخصه مدار رزونانس هستند و به صورت زیر بیان می‌شوند.

$$\omega_1 = \frac{1+n_a}{\sqrt{C_s L_{k1}}} \quad (4)$$

$$Z_1 = \frac{1}{1+n_a} \sqrt{\frac{L_{k1}}{C_s}} \quad (5)$$

در این وضعیت جریان مغناطیس کنندگی  $i_{ma}$  از میان سلف مغناطیس کنندگی مدار اسنابر  $L_{ma}$  جاری می‌شود. معادله جریان  $i_{ma}$  از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$i_{ma}(t) = \frac{1}{L_{ma} \omega_1} (v_{Cs}(t_0) - \frac{V_0}{1+n_a}) \sin(\omega_1(t-t_0)) + \frac{V_0}{L_{ma}(1+n_a)} (t-t_0) \quad (6)$$

بر اساس معادله ۲ شیب افزایش جریان در کلید کمکی به صورت سینوسی است به طوریکه کلید کمکی به صورت نرم و تحت ZCS روشن می‌شود. نرخ جریان کلید کمکی توسط معادله ۲ تعیین می‌شود. این وضعیت با انتقال کامل جریان از دیود خروجی اصلی به کلید اصلی پایان می‌یابد.

**وضعیت ۲ [t1,t2]:** در این وضعیت دیود خروجی بایاس معکوس شده و شیب جریان دیود خروجی در حین خاموش شدن توسط سلف  $L_s$  محدود شده و مشکل بازیابی معکوس دیود خروجی رفع شده است.

**وضعیت ۳ [t2,t3]:** در این وضعیت کلیدهای اصلی و کمکی هر دو روشن بوده و دیود خروجی خاموش است. در انتهای این وضعیت انرژی ذخیره شده در خازن اسنابر به طور کامل به خروجی منتقل می‌شود.

**وضعیت ۴ [t3,t4]:** این وضعیت با خاموش شدن کلید کمکی آغاز می‌شود. جریان مغناطیس کنندگی هسته  $T_1$  یعنی  $i_{ma}$  از طریق سلف مغناطیس کنندگی  $L_{ma}$  خازن پراکندگی کلید کمکی  $C_{dsa}$  و خازن  $C_s$  با رزونانس، بازیابی شده و ولتاژ  $V_{dsa}$  را مقداری بالا می‌برد. از آنجائیکه مقدار جریان مغناطیس کنندگی  $i_{ma}$  کوچک است، مدت زمان این وضعیت نیز کوتاه است. همچنین به دلیل سری شدن خازن  $C_{dsa}$  با خازن  $C_s$  مقدار شارژ خازن  $C_s$  ناچیز است. معادلات زیر جریان مغناطیس کنندگی  $i_{ma}$  و ولتاژ  $V_{dsa}$  را توصیف می‌کنند.

$$i_{ma}(t) = i_{ma}(t_3) \cos(\omega_4(t-t_3)) \quad (7)$$

$$v_{dsa}(t) = \frac{i_{ma}(t_3)}{C_{xx} \omega_4} \sin(\omega_4(t-t_3)) \quad (8)$$

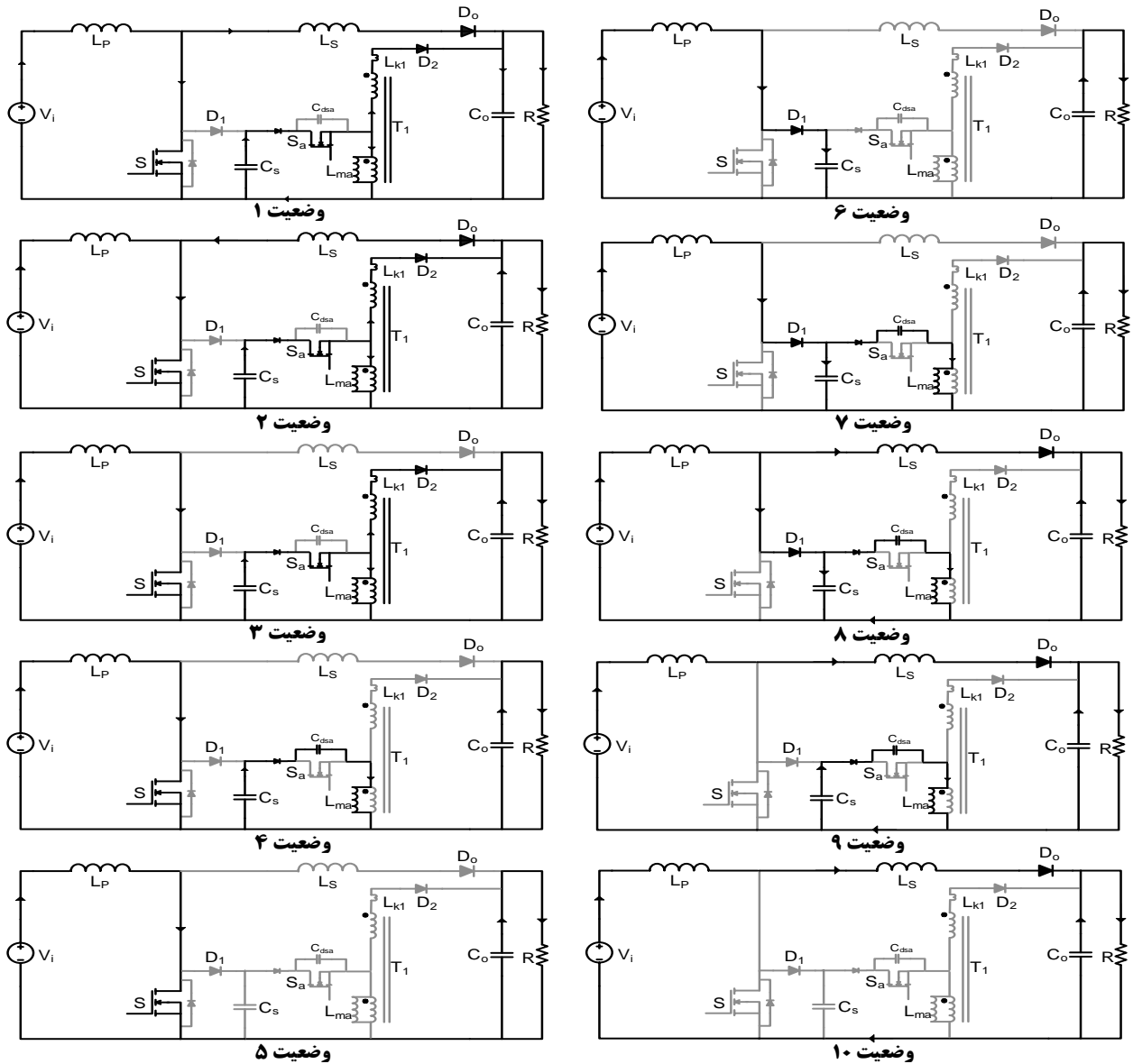
به طوریکه:

$$\omega_4 = \frac{1}{\sqrt{C_{xx} L_{ma}}} \quad (9)$$

$$C_{xx} = \frac{C_s C_{dsa}}{C_s + C_{dsa}} \quad (10)$$

**وضعیت ۵ [t4,t5]:** این وضعیت پس از بازیابی کامل هسته  $T_1$  آغاز می‌شود. در این فاصله مبدل بوست پیشنهادی مانند مبدل بوست پایه کار می‌کند به طوریکه کلید اصلی وصل بوده و دیود خروجی قطع است. مقدار ولتاژ خازن  $C_s$  تقریباً صفر بوده و آماده است تا زمان خاموش شدن کلید اصلی اختلاف جریان بین  $I_{Lp}$  و  $I_{Ls}$  را جذب کند. همچنین مقدار ولتاژ  $V_{dsa}$  تا وضعیت ۷ ثابت است.





شکل (۳): توزیع جریان داخل مبدل بوست پیشنهادی در وضعیت‌های مختلف

**وضعیت ۶**  $[t_5, t_6]$ : این وضعیت با خاموش شدن کلید اصلی  $S$  آغاز می‌شود. در این زمان دیود  $D_1$  تحت  $ZVS$  وصل شده و جریان  $I_{Lp}$  خازن  $C_s$  را شارژ می‌کند. معادله زیر ولتاژ  $V_{Cs}$  را توصیف می‌کند.

$$v_{Cs} = \frac{I_{Lp}}{C_s} (t - t_5) \quad (11)$$

مدت زمان این وضعیت برابر است با:

$$t_7 - t_6 = \frac{C_s}{I_{Lp}} v_{dsa}(t_6) \quad (12)$$

در این وضعیت ولتاژ  $V_{ds}$  با ولتاژ  $V_{Cs}$  برابر بوده بنابراین همپوشانی میان مشخصه‌های ولتاژ و جریان کلید اصلی کاهش یافته و کلید اصلی تحت شرط  $ZVS$  خاموش می‌شود.

**وضعیت ۷**  $[t_6, t_7]$ : هنگامی که ولتاژ  $V_{Cs}$  به مقدار  $v_{dsa}(t_6)$  می‌رسد این وضعیت آغاز می‌شود. به دلیل کوچک بودن خازن  $C_{dsa}$  تغییرات ولتاژ  $V_{Cs}$  به‌طور مستقیم به سلف  $L_{ma}$  اعمال شده و جریان  $i_{ma}$  را ایجاد می‌کند. این جریان از خازن  $C_{dsa}$  عبور کرده و آن را شارژ می‌کند معادلات زیر جریان  $i_{ma}$  و ولتاژ  $v_{dsa}$  را توصیف می‌کنند.



$$i_{ma} = \frac{I_{Lp}}{2L_{ma}C_s}(t-t_6)^2 \quad (13)$$

$$v_{dsa} = v_{dsa}(t_6) + \frac{I_{Lp}}{6L_{ma}C_sC_{dsa}}(t-t_6)^3 \quad (14)$$

**وضعیت ۸ [t7,t8]:** هنگامی که ولتاژ  $V_{ds}$  به مقدار ولتاژ خروجی  $V_o$  می‌رسد دیود خروجی وصل شده و این وضعیت آغاز می‌شود. یک مدار رزونانس شامل خازن اسنابر  $C_s$ ، سلف  $L_s$  و ولتاژ خروجی تشکیل می‌شود. روابط ولتاژها و جریان‌های  $V_{Cs}$ ،  $V_{Ls}$ ،  $i_{Cs}$  و  $i_{Ls}$  به صورت زیر به دست می‌آیند.

$$v_{Cs}(t) = \frac{I_{Lp}}{C_s\omega_8} \sin \omega_8(t-t_7) + V_o \quad (15)$$

$$i_{Ls}(t) = I_{Lp}(1 - \cos \omega_8(t-t_7)) \quad (16)$$

$$v_{Ls}(t) = L_s\omega_8 I_{Lp} \sin(\omega_8(t-t_7)) \quad (17)$$

$$i_{Cs}(t) = I_{Lp} \cos(\omega_8(t-t_7)) \quad (18)$$

که  $\omega_8$  برابر است با:

$$\omega_8 = \frac{1}{\sqrt{C_s L_s}} \quad (19)$$

حداقل نرخ ولتاژ کلید اصلی از رابطه ۱۵ به دست می‌آید. در این وضعیت به دست آوردن روابط دقیق برای ولتاژ  $V_{dsa}$  و جریان  $I_{Lm}$  پیچیده است بنابراین با تقریب مناسب از روابط ۱۳ و ۱۴ استفاده شده است.

**وضعیت ۹ [t8,t9]:** این وضعیت با رسیدن جریان سلف  $L_s$  به مقدار  $I_{Lp}$  آغاز می‌شود در این لحظه دیود  $D_1$  تحت ZVS قطع شده و مقدار ولتاژ خازن اسنابر  $V_{Cs}$  برابر با  $V_{Cs}(t_8)$  است. یک مدار رزونانس بین خازن اسنابر  $C_s$ ، سلف مغناطیس‌کنندگی  $L_{ma}$  و خازن درین سورس کلید کمکی  $C_{dsa}$  تشکیل می‌شود. جریان مغناطیس‌کنندگی  $I_{Lm}$  و ولتاژ خازن درین-سورس کلید کمکی از روابط زیر به دست می‌آیند.

$$i_{ma}(t) = i_{ma}(t_8) \cos(\omega_9(t-t_8)) - \quad (20)$$

$$C_{dsa}\omega_9(v_{dsa}(t_8) - v_{Cs}(t)) \sin(\omega_9(t-t_8))$$

$$v_{dsa}(t) = (v_{dsa}(t_8) - v_{Cs}(t)) \cos(\omega_9(t-t_8))$$

$$+ \frac{i_{ma}(t_8)}{C_{dsa}\omega_9} \sin(\omega_9(t-t_8)) + v_{Cs}(t) \quad (21)$$

که:

$$\omega_9 = \frac{1}{\sqrt{C_{dsa} L_{ma}}} \quad (22)$$

نرخ ولتاژ کلید کمکی از رابطه ۲۱ به دست می‌آید و ولتاژ حالت خاموشی دیود  $D_2$  از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$v_{D2} = (v_{Cs} - v_{dsa}(t_{11}))n_a - V_o \quad (23)$$

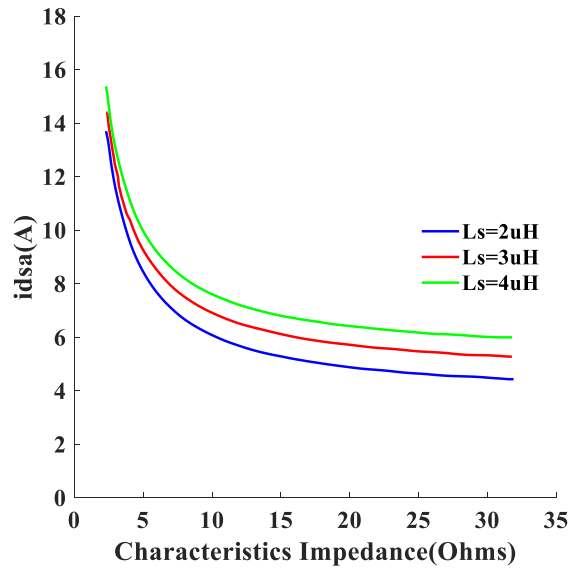
**وضعیت ۱۰ [t9,t10]:** این وضعیت پس از بازیابی کامل هسته  $T_1$  آغاز می‌شود به طوری که مبدل بوست پیشنهادی مانند مبدل بوست قراردادی عمل می‌کند.

### ۳- طراحی مدار بوست پیشنهادی

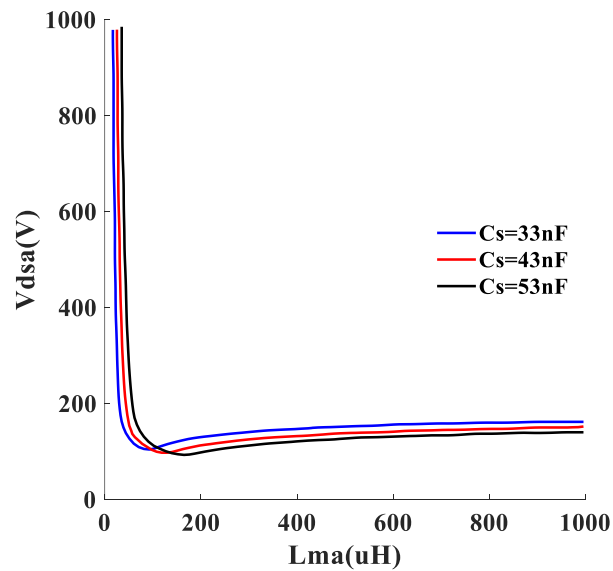
در این بخش روند طراحی مبدل بوست پیشنهادی به همراه یک مثال بیان شده است. با توجه به اینکه طراحی مدار بوست در [۲۳] بیان شده است، از بیان آن صرف نظر کرده و در ادامه تنها طراحی مدار اسنابر اکتیو سلف تزویج شده بررسی شده است. برای طراحی مدار اسنابر از منحنی شکل‌های ۴ تا ۶ حاصل شده از معادلات بخش ۲ استفاده شده است.



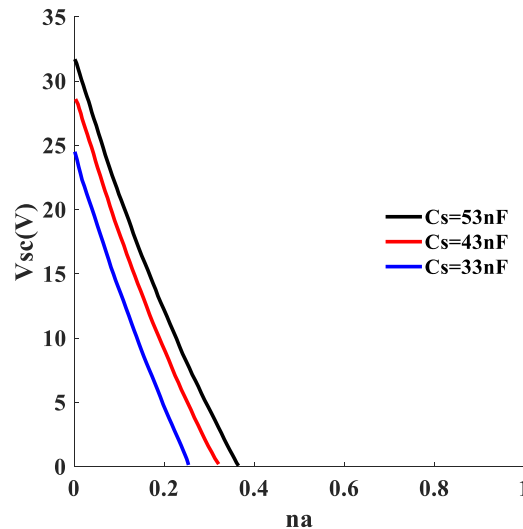




شکل (۴): تغییرات جریان کلید کمکی  $i_{dsa}$  برحسب امپدانس مشخصه رزونانس مدار کمکی به ازای مقادیر مختلف  $L_s$



شکل (۵): تغییرات ولتاژ ولتاژ  $V_{dsa}$  برحسب سلف  $L_{ma}$  و به ازای مقادیر مختلف  $C_s$



شکل (۶): تغییرات مقدار ولتاژ  $V_{sc}$  در انتهای وضعیت ۳ برحسب تعداد دور  $na$  و به ازای مقادیر مختلف  $C_s$



مشخصات مبدل بوست پیشنهادی نمونه به صورت زیر است: توان خروجی ۱۰۰ وات، ولتاژ ورودی ۳۰ ولت، ولتاژ خروجی ۶۰ ولت، قله تا قله جریان سلف اصلی ۱۰ درصد بیشینه جریان متوسط و بازده ۹۰ درصد. مراحل طراحی به صورت زیر است:

### ۳-۱- محاسبه متوسط و قله جریان ورودی:

با توجه به اینکه ولتاژ خروجی ۶۰ ولت و ولتاژ ورودی ۳۰ ولت است و با فرض بزرگ بودن سلف ورودی مقدار قله جریان ورودی  $I_{LP}$  که مدار اسنابر باید جذب کند برابر است با:

$$I_{LP} = \frac{P_o}{\eta V_{in}} = \frac{100}{.90 * 30} = 3.7A \quad (24)$$

### ۳-۲- انتخاب امپدانس مشخصه مدار رزونانس مدار اسنابر:

امپدانس مشخصه مدار رزونانس اسنابر طبق رابطه ۴ تعریف می شود. مقدار امپدانس مشخصه روی هر دو مدت زمان تخلیه انرژی خازن اسنابر و قله جریان عبوری از کلید کمکی تأثیر می گذارد، به طوریکه هرچه مقدار امپدانس مشخصه بالاتر، زمان تخلیه بالاتر و قله جریان کمتر می شود. شکل ۴ رابطه میان قله جریان کلید کمکی و امپدانس مشخصه به ازای مقادیر مختلف  $L_s$  را نشان داده است. در اینجا با انتخاب مقدار امپدانس مشخصه ۸ اهم مقدار قله جریان کلید ۷/۵ آمپر و زمان تخلیه خازن اسنابر ۸۲۷ نانوثانیه به دست آمده است. مقدار سلف  $L_s$  از یک طرف علاوه بر رفع مشکل بازیابی معکوس دیود خروجی شرایط کلید زنی نرم را برای کلید اصلی و دیود خروجی به ترتیب در زمان روشن شدن و خاموش شدن نیز فراهم کرده است. از طرف دیگر انتخاب مقدار بالا برای سلف  $L_s$  موجب افزایش تنش ولتاژ بر روی کلید اصلی در هنگام خاموش شدن شده است. بنابراین در انتخاب آن باید مصالحه کرده و اینجا مقدار  $L_s = 3\mu H$  انتخاب شده است.

### ۳-۳- انتخاب مقادیر برای خازن اسنابر $C_s$ :

خازن  $C_s$  شرط کلید زنی نرم ZVS را برای کلید اصلی هنگام خاموش شدن فراهم می کند که از یک طرف افزایش مقدار آن مطابق شکل ۵ و رابطه ۱۶ موجب کاهش تنش ولتاژی بر کلیدهای کمکی و اصلی شده و از طرف دیگر افزایش مقدار خازن  $C_s$  مطابق رابطه ۲ موجب افزایش مقدار قله جریان کلید کمکی می شود. در اینجا مقدار ۳۳ نانو فاراد انتخاب شده است.

### ۳-۴- انتخاب مقادیر برای سلف $L_{k1}$ :

با توجه به مقدار امپدانس مشخصه ۸ اهم مقدار سلف  $L_{k1}$  برابر ۵/۸ میکروهنری به دست آمده است.

### ۳-۵- انتخاب نسبت دور $n_a$ :

از آنجائی که ولتاژ  $V_{cs}$  بر اساس معادله ۱۵ به ولتاژ خروجی نیز وابسته است ممکن است با یک نسبت دور خاص در انتهای رزونانس یعنی انتهای وضعیت ۳ مقدار ولتاژ  $V_{cs}$  صفر نشود که این پدیده در شکل ۶ نشان داده شده است که با تنظیم نسبت دور  $n_a$  می توان این مقدار را صفر کرد. با  $C_s = 33nF$  و به ازای نسبت دور  $n_a$  بالاتر از ۲۵ مقدار این ولتاژ صفر شده است. به عبارت دیگر اگر  $n_a$  کمتر از ۲۵ انتخاب شود مقدار ولتاژ  $V_{cs}$  پس از اتمام رزونانس صفر نخواهد شد.

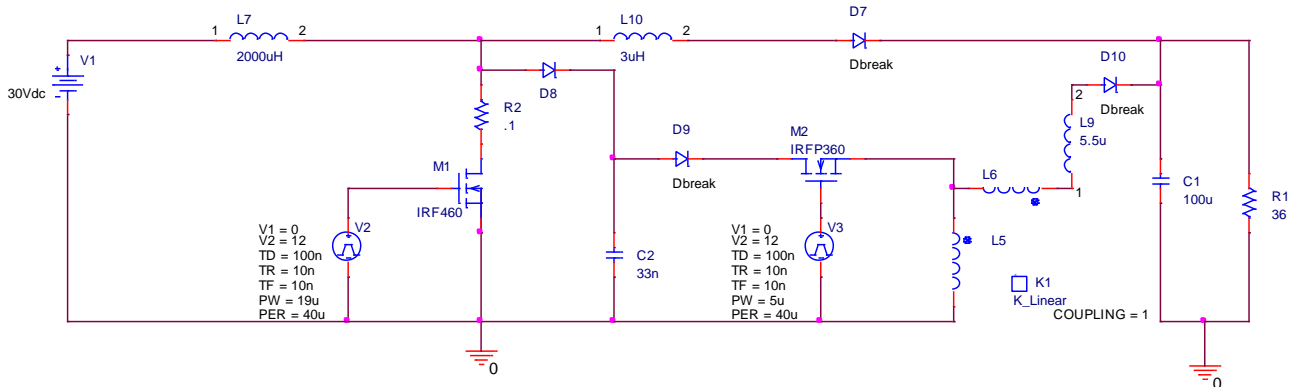
### ۳-۶- انتخاب سلف $L_{ma}$ :

همچنین به ازای  $C_s = 33nF$ ، مطابق شکل ۵ برای  $L_{ma}$  بزرگتر از ۱۰۰ میکرو هنری قله ولتاژ کمکی در محدوده قبل قبولی قرار گرفته است. در اینجا  $n_a$  برابر ۶ و  $L_{ma}$  برابر با ۱۶۰ میکرو هنری انتخاب شده است.



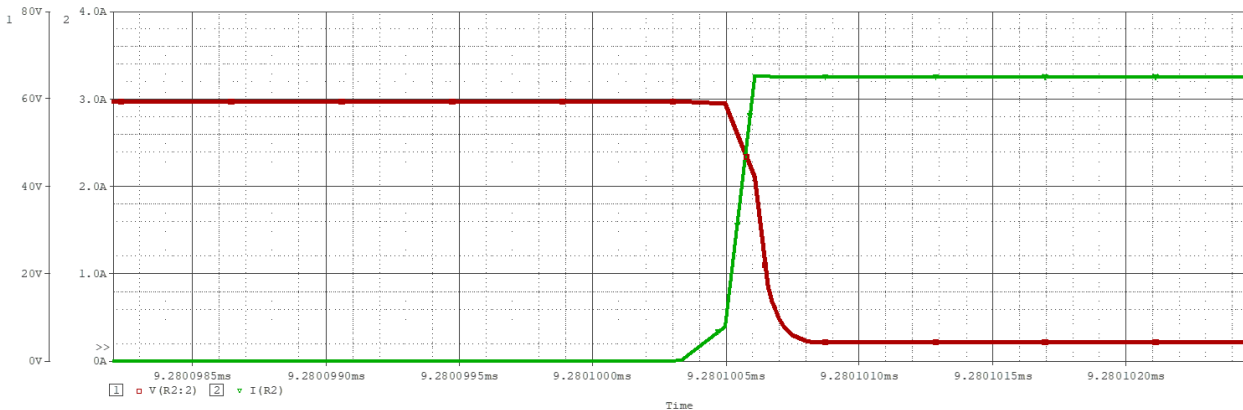
#### ۴- نتایج شبیه سازی مدار بوست پیشنهادی

با توجه به اعداد به دست آمده در قسمت طراحی، شماتیک شبیه سازی این مبدل پیشنهادی که به کمک نرم افزار PSPICE انجام شده است، در شکل ۷ ارائه گردیده است. در این مدار از دو سلف تزویج شده  $L_5$  و  $L_6$  برای مدلسازی اتوترانسفورمر استفاده شده است. همچنین سلف پراکندگی ترانسفورمر با سلف  $L_9$  مدلسازی شده است.

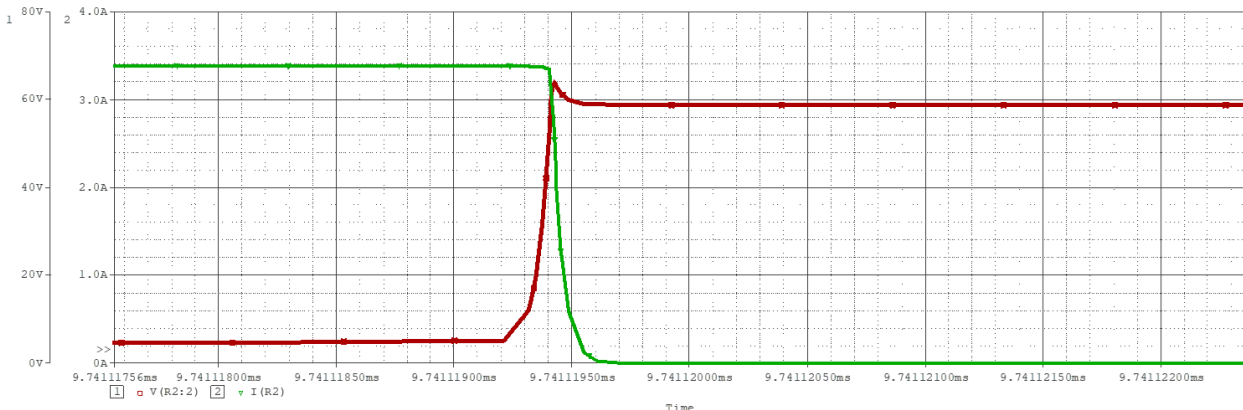


شکل (۷): شماتیک مدار شبیه سازی مبدل پیشنهادی در نرم افزار PSPICE

ابتدا مدار بوست در حالت کلید زنی سخت و بدون مدار اسنابر را شبیه سازی نموده که نتایج آن در شکل ۸، شکل موج های شبیه سازی شده جریان  $i_{ds}$  و ولتاژ  $v_{ds}$  در حالت بدون اسنابر و تحت بار نامی نشان داده شده است. مطابق با شکل ۸، جریان  $i_{ds}$  و ولتاژ  $v_{ds}$  در لحظات روشن و خاموش شدن کلید اصلی کاملاً همپوشانی داشته که این امر باعث ایجاد تلفات کلید زنی بالایی می شود.

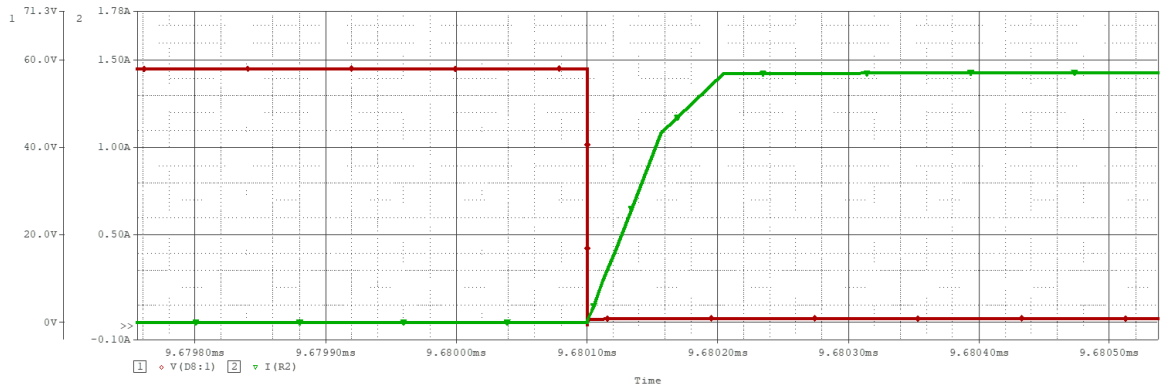


الف) لحظه روشن شدن

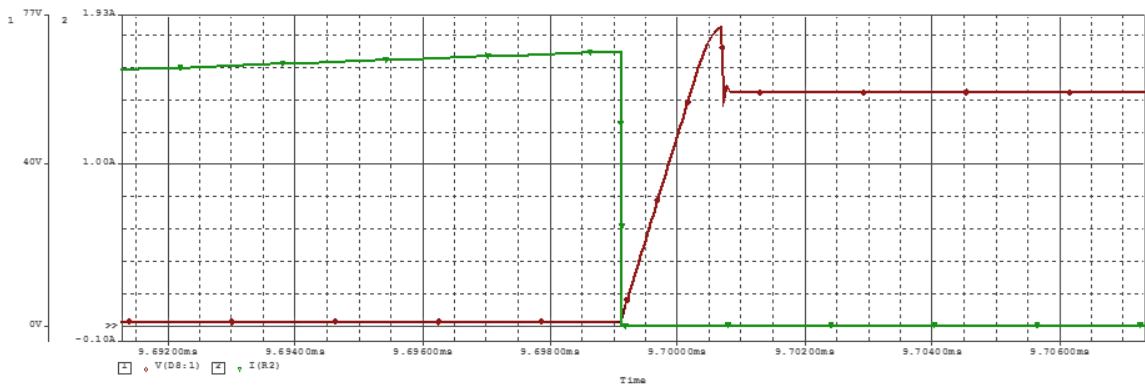


ب) لحظه خاموش شدن

شکل (۸): شکل موج های شبیه سازی مربوط به جریان  $i_{ds}$  (رنگ سبز) و ولتاژ  $V_{ds}$  (رنگ قرمز) از کلید اصلی بدون اسنابر و تحت بار نامی

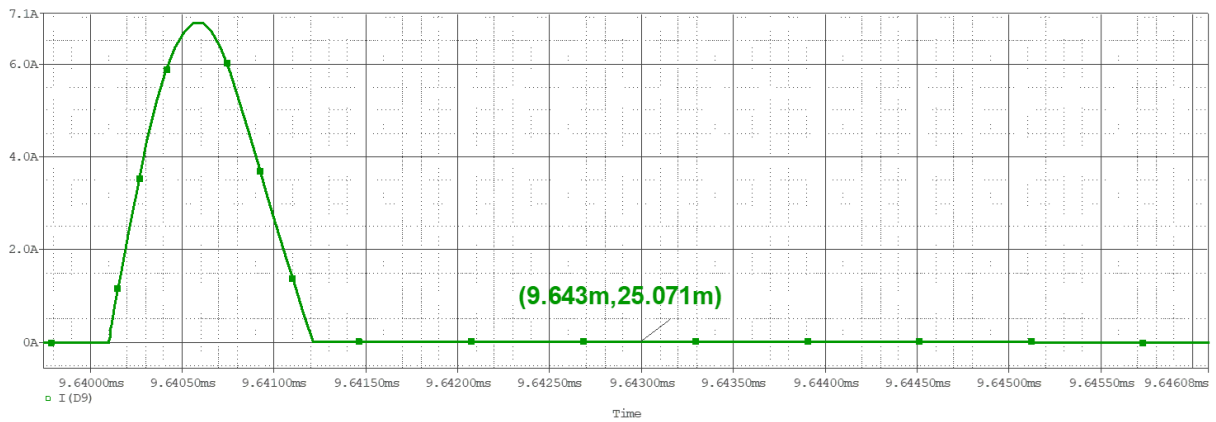


الف) لحظه روشن شدن

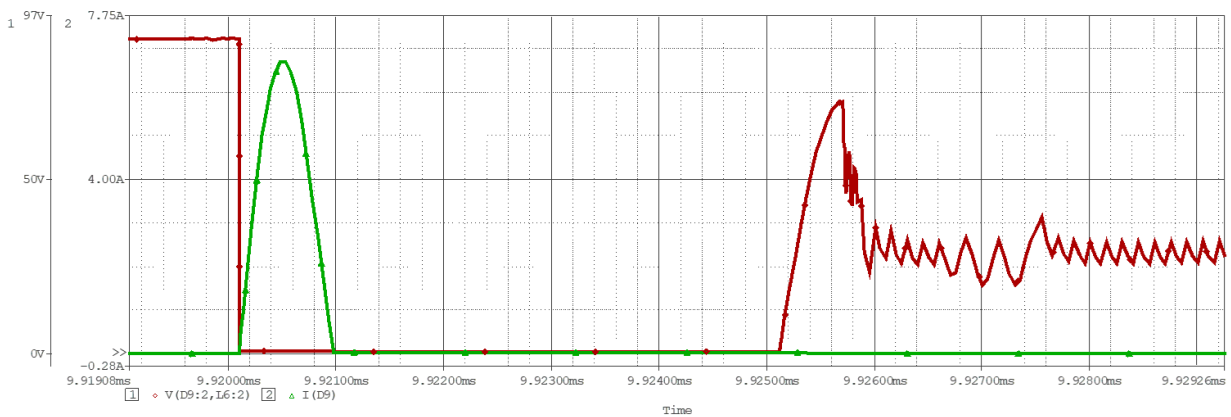


ب) لحظه خاموش شدن

شکل (۹): شکل موج‌های شبیه سازی مربوط به جریان  $i_{ds}$  (رنگ سبز) و ولتاژ  $V_{ds}$  (رنگ قرمز) از کلید اصلی با اسنابر و تحت بار نامی



الف



ب

شکل (۱۰): الف) جریان عبوری از کلید کمکی  $i_{ds}$ ، ب) جریان  $i_{ds}$  و ولتاژ کلید کمکی  $v_{ds}$



شکل ۹، شکل موج‌های شبیه‌سازی شده جریان  $i_{ds}$  و ولتاژ  $v_{ds}$  با اسنابر پیشنهادی و تحت بار نامی را نشان می‌دهد. طبق این شکل، اسنابر سلف تزویج شده پیشنهادی، همپوشانی بین جریان  $i_{ds}$  و ولتاژ  $v_{ds}$  را در لحظات روشن شدن و خاموش شدن کلید اصلی کم کرده بطوریکه کلید در حالت نزدیک به جریان صفر و ولتاژ صفر به ترتیب روشن و خاموش شده است. در شکل ۱۰ الف شکل موج شبیه‌سازی مربوط به جریان عبوری از کلید کمکی  $S_a$  ناشی از رزونانس  $Lk1$  و  $Cs$  نشان داده شده است. همچنین در شکل ۱۰ ب شکل موج‌های شبیه‌سازی ولتاژ و جریان مربوط به کلید کمکی بصورت همزمان نشان داده شده است که در لحظه روشن و خاموش شدن کلید کمکی، جریان عبوری از کلید صفر است و کلید زنی نرم این کلید را تایید می‌کند. شکل ۱۱، شکل موج‌های ولتاژ خازن اسنابر به همراه ضربه جریان عبوری از  $L_5(L_{a1})$  را نشان داده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، ولتاژ خازن در انتهای نیم دوره وظیفه رزونانس کاملاً تخلیه شده و آماده می‌شود تا هنگام خاموش شدن کلید اصلی اختلاف جریان بین  $L_p$  و  $L_s$  را جذب کند.



شکل (۱۱): شکل موج‌های ولتاژ خازن اسنابر و جریان  $L_5(L_{a1})$

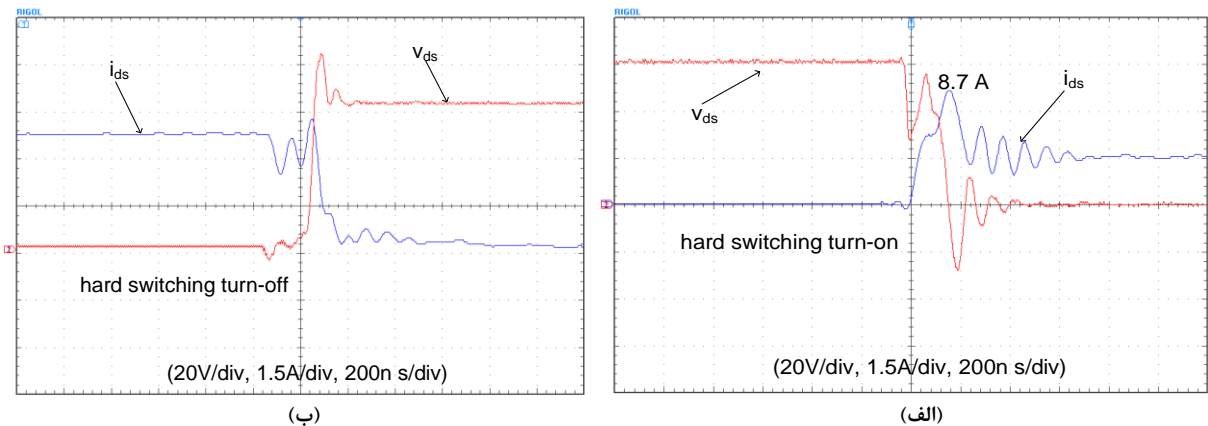
## ۵- نتایج آزمایشگاهی

به منظور اعتبار سنجی و صحت سنجی عملکرد مبدل بوست پیشنهادی، یک نمونه آزمایشگاهی ۱۰۰ وات ساخته شد و مورد آزمایش قرار گرفت. مشخصات این مبدل در جدول ۱ بیان شده است. در شکل ۱۲، شکل موج‌های اندازه‌گیری شده جریان  $i_{ds}$  و ولتاژ  $v_{ds}$  در حالت بدون اسنابر و تحت بار نامی نشان داده شده است. مطابق با شکل ۱۲، جریان  $i_{ds}$  و ولتاژ  $v_{ds}$  در لحظات روشن و خاموش شدن کلید اصلی کاملاً همپوشانی داشته که این امر باعث ایجاد تلفات کلید زنی بالایی می‌شود. همچنین در لحظه روشن شدن، بازیابی معکوس دیود خروجی باعث ایجاد قله تنش جریان ۸/۵ آمپر روی کلید اصلی شده است. شکل ۱۳، شکل موج‌های اندازه‌گیری شده جریان  $i_{ds}$  و ولتاژ  $v_{ds}$  با اسنابر پیشنهادی و تحت بار نامی را نشان می‌دهد. طبق این شکل، اسنابر سلف تزویج شده پیشنهادی، همپوشانی بین جریان  $i_{ds}$  و ولتاژ  $v_{ds}$  را در لحظات روشن شدن و خاموش شدن کلید اصلی کم کرده بطوریکه کلید در حالت نزدیک به جریان صفر و ولتاژ صفر به ترتیب روشن و خاموش شده است. همچنین قله تنش جریان ناشی از بازیابی معکوس دیود خروجی بر روی کلید اصلی از ۸/۵ آمپر به ۴/۵ آمپر کاسته شده است. متأسفانه عملکرد اسنابر پیشنهادی تنش ولتاژی به اندازه ۲۰ ولت در لحظه خاموش شدن بر روی کلید اصلی وارد نموده است. بنابراین اسنابر پیشنهادی با صرف نظر از این تنش ولتاژ، تقریباً مشکلات مبدل بوست پایه را مرتفع کرده است.



جدول (۱): مشخصات نمونه آزمایشگاهی تحت آزمایش

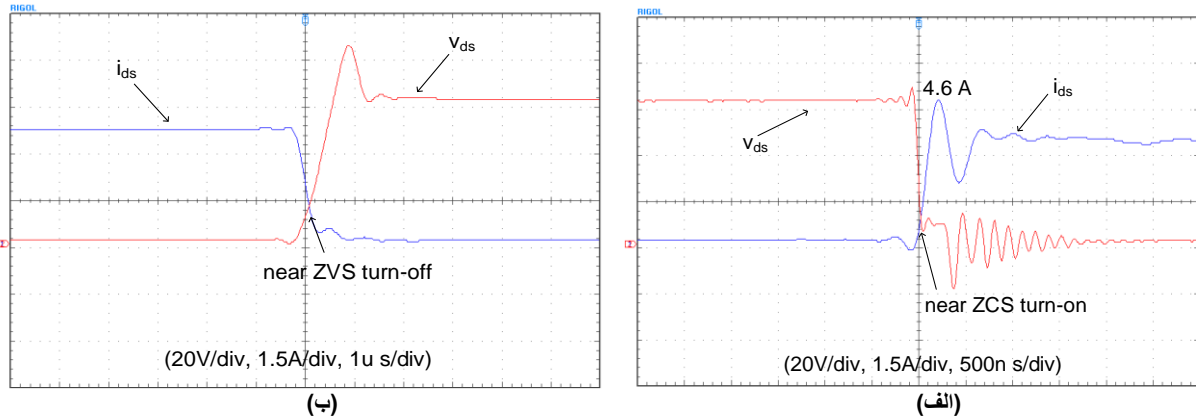
مقدار	نماد	نام
30V	$V_i$	ولتاژ ورودی
60V	$V_o$	ولتاژ خروجی
25KHz	$f_s$	فرکانس کلیدزنی
100W	$P_o$	توان خروجی
SR3100 (two)	D1	دیود
SR3100	D2	دیود
DSEI60-06A	Do	دیود
SR3100	Dsa	دیود
CH610060	T	هسته اصلی
ETD35	T1	هسته کمکی
IRF640	S	کلید اصلی
IRFP360	Sa	کلید کمکی
2m	LP	سلف اصلی
160uH	Lma	سلف کمکی
5.45 uH	Lk1	سلف رزونانس
33nF	Cs	خازن اسنایپر
48uF	Co	خازن خروجی
3uH	Ls	سلف اسنایپر
100	NLp	تعداد دور سیم پیچ اولیه
=13	Lp	AWG1
=23	La1,La2	AWG2
7	na1	تعداد دور La1
4	na2	تعداد دور La2



شکل (۱۲): شکل موج‌های اندازه‌گیری شده جریان  $i_{ds}$  و ولتاژ  $V_{ds}$  از کلید اصلی بدون اسنایپر و تحت بار نامی.

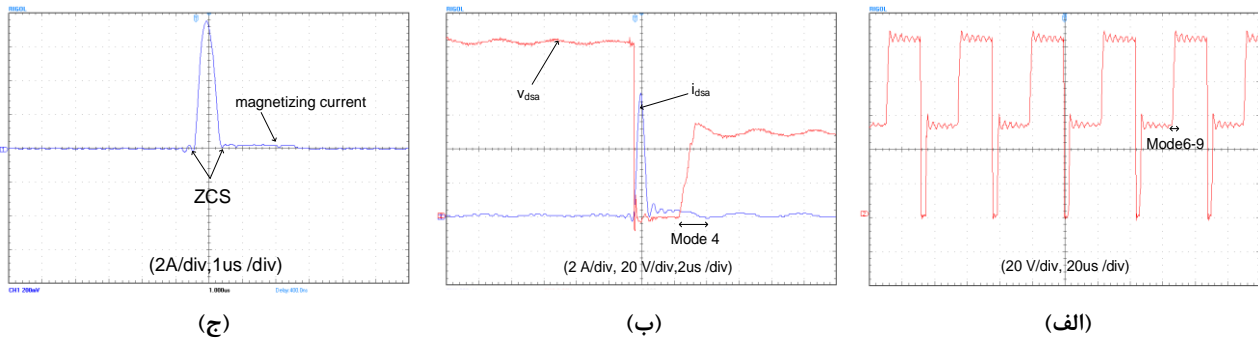
(الف) لحظه خاموش شدن، (ب) لحظه روشن شدن





شکل (۱۳): شکل موج‌های اندازه‌گیری شده جریان  $i_{ds}$  و ولتاژ  $V_{ds}$  از کلید اصلی با اسنابر و تحت بار نامی (الف) لحظه خاموش شدن، (ب) لحظه روشن شدن

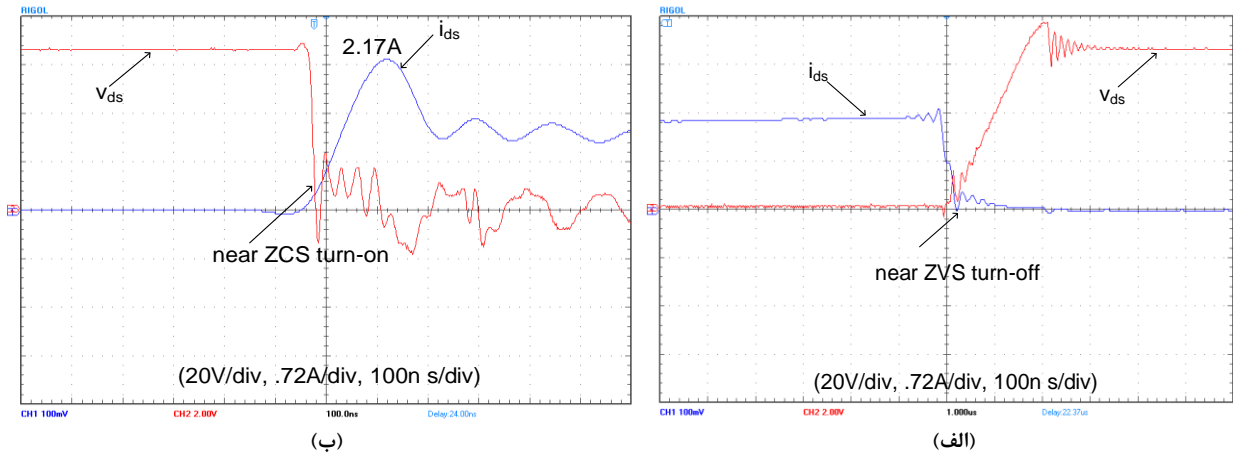
در شکل ۱۴ ج ضربه جریان عبوری از کلید کمکی  $S_a$  ناشی از رزونانس  $L_{k1}$  و  $C_s$  نشان داده شده است. عرض این پالس ۸۰۰ نانوثانیه و قله آن ۷/۵ آمپر است که این مقادیر صحت طراحی را تأیید می‌کنند. همچنین در این شکل مشخص است که کلید کمکی  $S_a$ ، دیود کمکی  $D_a$  و دیود  $D_2$  تحت شرط ZCS روشن و خاموش می‌شوند. شکل ۱۴ ب نشان می‌دهد، در زمانی که کلید کمکی خاموش می‌شود (وضعیت ۴) یک رزونانس بین  $C_s$ ،  $L_{ma}$  و  $C_{dsa}$  رخ داده و هم‌زمان با صفر شدن جریان مغناطیس‌کنندگی  $i_{ma}$  ولتاژ  $V_{dsa}$  به سطح ۵۶ ولت رسیده است. شکل ۱۴ الف نشان داده است زمانی که کلید اصلی روشن می‌شود ولتاژ کلید کمکی همان‌طور که در وضعیت‌های ۶ تا ۹ پیش‌بینی شده بود از سطح ۵۶ ولت به ۱۱۰ ولت می‌رسد.



شکل (۱۴): (الف) ولتاژ کلید کمکی  $V_{dsa}$  (ب) جریان  $I_{dsa}$  و ولتاژ کلید کمکی  $V_{dsa}$  (ج) جریان عبوری از کلید کمکی  $I_{dsa}$

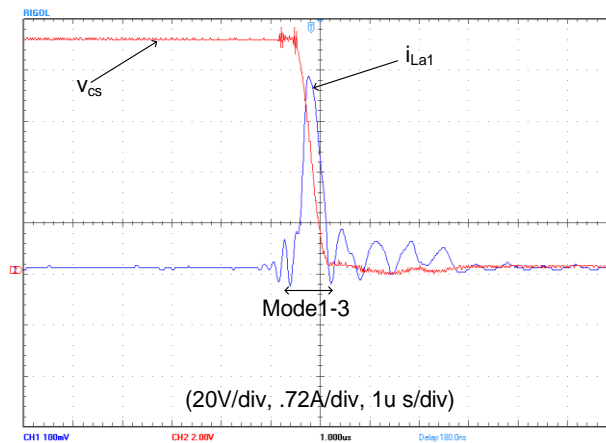
شکل ۱۵، شکل موج‌های جریان و ولتاژ کلید اصلی در لحظات روشن و خاموش شدن در ۱/۳ بار نامی را نشان داده است. همان‌طور که می‌توان دید کلید اصلی مانند بار نامی به صورت نرم روشن و خاموش می‌شود. بنابراین اینکه اسنابر پیشنهادی قابلیت فراهم نمودن شرایط کلید زنی نرم برای محدوده وسیع بار خروجی را دارد، مورد تأیید قرار گرفته است. با توجه به سازوکار عملکرد مدار پیشنهادی می‌توان گفت که بازه عملکرد نرم به با وابستگی ندارد و بازه عملکرد نرم آن بصورت وسیع است زیرا

- ۱- زمانیکه سوئیچ اصلی روشن می‌شود، کلید اصلی بعلت وجود سلف  $L_s$  همیشه و بدون وابستگی به بار بصورت نرم روشن می‌شود.
- ۲- سوئیچ اصلی بعلت وجود خازن اسنابر  $C_s$  همیشه بصورت نرم خاموش می‌شود. از آنجائیکه مدار کمکی در هر سیکل انرژی ذخیره شده در خازن  $C_s$  را به خروجی منتقل می‌کند. بنابراین ولتاژ خازن  $C_s$  زمانیکه کلید کمکی خاموش می‌شود، صفر است.
- ۳- مدار کمکی دارای ورودی و خروجی (با فرض ثابت بودن ولتاژ خروجی) ثابت است. بنابراین وابسته به تغییر بار نیست.



شکل (۱۵): شکل موج‌های اندازه‌گیری شده جریان  $I_{ds}$  و ولتاژ  $V_{ds}$  از کلید اصلی با اسنابر و تحت بار ۱/۳ نامی، (الف) لحظه روشن شدن، (ب) لحظه خاموش شدن

شکل ۱۶، شکل موج‌های ولتاژ خازن اسنابر به همراه ضربه جریان عبوری از  $L_{a1}$  را نشان داده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، ولتاژ خازن در انتهای نیم دوره وظیفه رزونانس کاملاً تخلیه‌شده و آماده می‌شود تا هنگام خاموش شدن کلید اصلی اختلاف جریان بین  $L_s$  و  $L_p$  را جذب کند.

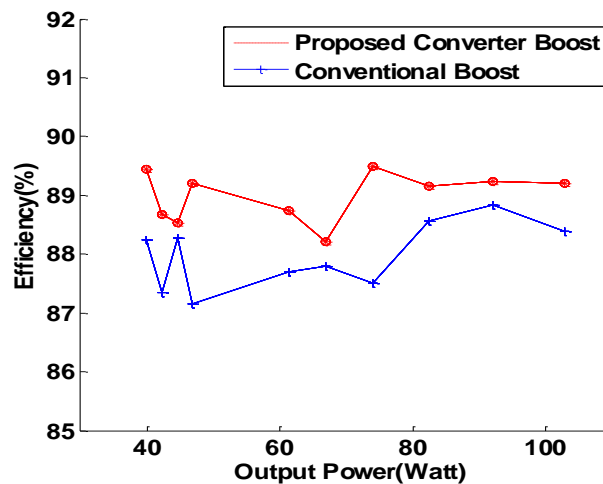


شکل (۱۶): شکل موج‌های ولتاژ خازن اسنابر و جریان  $L_{a1}$

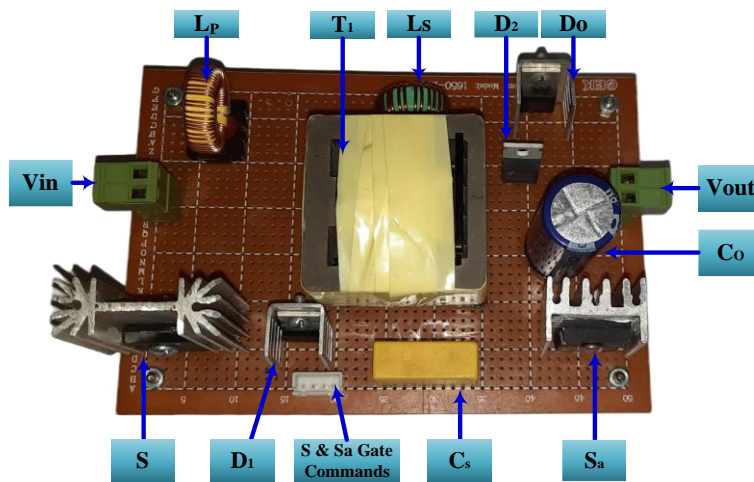
علت‌های مختلفی باعث تفاوت در نتایج عملی و تئوری می‌شود از جمله می‌توان به وجود اثرات تلفات مجاورتی و اثرات پوستی در سلف و ترانسفورمر پیچیده شده در آزمایشگاه اشاره نمود که در مدل شبیه‌سازی لحاظ نشده است. عامل دوم وجود سلف، خازن و مقاومت مربوط به مدارچاپی ساخته شده است که معمولاً در مدل شبیه‌سازی از آنها صرف‌نظر می‌شود. اثرات دمایی قطعات نیز از دیگر علل تفاوت نتایج است. در محیط آزمایشگاهی رفتار قطعات بسته به دما قطعاً تغییر می‌کند ولی در شبیه‌سازی تمام قطعات را در یک دمای ثابت مثلاً دمای محیط (۲۷ درجه سانتیگراد) بصورت ثابت فرض می‌کنند. البته با وجود تفاوت نتایج حاصل از شبیه‌سازی و نتایج عملی از آنجا که تا حد بسیار بالایی نتایج شبیه‌سازی با نتایج عملی مطابقت دارد و اختلاف بین نتایج کم است با فرض یکسان بودن نتایج برای تایید طراحی به خوبی قابل اعتماد و استناد می‌باشند.

شکل ۱۷، منحنی بازده اندازه‌گیری شده مبدل بوست پیشنهادی و مبدل بوست پایه را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد مبدل بوست پیشنهادی دارای بازده بالاتری بوده و بیشینه بازده آن ۸۹/۵ درصد در بار ۷۳ وات است. ضمناً بازده بار نامی ۸۹/۲ درصد است که نسبت به بازده بوست پایه (۸۸/۳۸ درصد) ۱ درصد بازده بهبود یافته است. تأثیر اسنابر پیشنهادی در بهبود بازده تحت توان و فرکانس بالا جاییکه تلفات کلید زنی قابل‌ملاحظه است بیشتر خواهد بود. نمونه آزمایشگاهی ساخته‌شده مبدل پیشنهادی نیز در شکل ۱۸ ارائه شده است.





شکل (۱۷): مقایسه بازده اندازه‌گیری شده مبدل بوست پیشنهادی و مبدل بوست پایه



شکل (۱۸): تصویر مدار پیاده‌سازی شده در محیط آزمایشگاهی

## نتیجه‌گیری

در این مقاله یک مبدل بوست جدید با کلید زنی نرم پیشنهاد شده است. این مبدل از یک مدار اسنابر سلف تزویج شده شامل یک کلید کمکی، یک خازن، یک جفت سلف تزویج شده و سه عدد دیود بهره گرفته است. مدار اسنابر بدون تلفات، شرایط کلید زنی نرم را برای کلید اصلی فراهم کرده است به طوری که کلید اصلی تحت شرایط نزدیک به ZCS و ZVS به ترتیب روشن و خاموش شده است. به علاوه به خاطر مدار اسنابر، دیود خروجی تحت شرط ZCS روشن و خاموش شده و مشکل بازبایی معکوس آن حل شده است. همچنین این مبدل قادر است در محدوده وسیع تغییرات بار خروجی به صورت کلید زنی نرم کار کند. عملکرد مدار به همراه تحلیل حالت دائمی به طور جزئی بررسی شده و یک نمونه آزمایشگاهی از مبدل پیشنهادی ساخته و آزموده شده است که نتایج آزمایشگاهی نتایج تئوری را تأیید می‌کند. همچنین بازده مبدل پیشنهادی اندازه‌گیری شده و بیشینه بازده ۸۹/۵ درصد در بار ۷۳ وات به دست آمد.



- [1] H. Bahrami, E. Adib, S. Farhangi, H. Iman-Eini and R. Golmohammadi, "ZCS-PWM interleaved boost converter using resonance-clamp auxiliary circuit", *IET Power Electronics*, vol. 10, no. 3, pp. 405-412, 2017, doi: 10.1049/iet-pel.2016.0267.
- [2] M. Delzendeh Sarfejo, H. Allahyari, H. Bahrami, A. Afifi, M. Latif Zadeh, E. Yavari and M. Ghavidel Jalise, "A passive compensator for imbalances in current sharing of parallel-SiC MOSFETs based on planar transformer", *IET Power Electronics*, vol. 14, no. 14, pp. 2400-2412, 2021, doi: 10.1049/pel2.12188.
- [3] H. Bahrami, H. Allahyari and E. Adib, "An improved wide ZVS soft-switching range PWM bidirectional forward converter for low power applications with simple control circuit", *IET Power Electronics*, 2022, doi: 10.1049/pel2.12334.
- [4] C.J.Tseng, and C.L. Chen, "Passive lossless snubbers for DC/DC converters," in *proc.IEEE circuits, Devices Syst.*, vol. 145, no. 6, pp. 396-401, 1998, doi: 10.1109/APEC.1998.654027.
- [5] H. Bahrami, H. Iman-Eini, B. Kazemi and A. Taheri, "Modified step-up boost converter with coupled-inductor and super-lift techniques", *IET Power Electronics*, vol. 8, no. 6, pp. 898-905, 2015, doi: 10.1049/iet-pel.2014.0691.
- [6] T. H. Li. River, H.S.H. Chung, and K. T. S. Anson, "Passive snubber for boost PFC with minimum voltage and current stress," *IEEE Transaction on Power Electronics*, vol.55, no. 1, pp.471-473, Jan. 2008, doi: 10.1109/ECCE.2009.5316217.
- [7] T.Zhan, Y.Zhang, J. Nie, Y. Zhang, Zhao. Zhengming, "A novel soft-switching boost converter with magnetically coupled resonant snubber," *IEEE Transaction on Power Electronics*, vol. 29, no. 11, pp. 5687-5680, 2014, doi: 10.1109/TPEL.2013.2295887.
- [8] C. J. Tseng and C. L. Chen, "A passive snubber cell for non-isolated PWM dc/dc converters," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 45, pp.593-601, Aug. 1998, doi:10.1109/41.704887.
- [9] R.T.H Li and H.S.h Chung, "A Passive Lossless Snubber Cell with Minimum Stress and Wide Soft Switching Range", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 25, no.7, pp. 1725-1738, 2011, doi: 10.1109/TPEL.2010.2042074.
- [10] X. Zhang, L.Jiang, J.Deng, Li.Siqi; Z. Chen, "Analysis and design of a new soft-switching boost converter with a coupled inductor," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no.8, pp. 4270 - 4277, 2014, doi: 10.1109/TPEL.2013.2285708.
- [11] M. Nikbakht, S. Abbasian, M. Farsijani and K. Abbaszadeh, "An ultra-high gain Double switch quadratic boost coupled inductor-based converter," *2022 13th Power Electronics, Drive Systems, and Technologies Conference (PEDSTC)*, 2022, pp. 167-172, doi: 10.1109/PEDSTC53976.2022.9767244.
- [12] N. Altintas, A. F. Bakan, and Ismail Aksoy "A Novel ZVT-ZCT-PWM Boost Converter" *IEEE transactions on power electronics*, vol.29, no. 1, January 2014, doi: 10.1109/TPEL.2013.2252197.
- [13] N. Lakshminarasamma, V. Ramanarayanan, "A Family of Auxiliary Switch ZVS-PWM DCDC Converters with Coupled Inductor," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol.22, no.5, pp. 2008-2017, Sept. 2007, doi: 10.1109/TPEL.2007.904225.
- [14] H. Bahrami, H. Allahyari and E. Adib, "A Self-Driven Synchronous Rectification ZCS PWM Two-Switch Forward Converter with Minimum Number of Components," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 69, no. 12, pp. 12842-12850, Dec. 2022, doi: 10.1109/TIE.2021.3131876.
- [15] M. Fazeli-Hasanabadi, A. Shoaee, K. Abbaszadeh and H. Allahyari, "An Interleaved High Step-Up Dual-Input Single-Output DC-DC Converter for Electric Vehicles," *2022 13th Power Electronics, Drive Systems, and Technologies Conference (PEDSTC)*, 2022, pp. 145-149, doi: 10.1109/PEDSTC53976.2022.9767251.
- [16] S. Y. R. Hui, K. W. Eric Cheng, "A fully soft-switched extended-period quasi-resonant power factor correction circuit," *IEEE Trans. on Power Electronics.*, vol. 12, no. 5, pp. 922-930, 1997, doi: 10.1109/63.623011.
- [17] S. Saha, B. Majumdar, T. Halder and S. K. Biswas, "A New fully soft-switched Boost Converter with reduced conduction losses," *IEEE PEDS*, Vol. 1, pp. 107-112, 2005, doi: 10.1109/PEDS.2005.1619669.
- [18] H. Allahyari, M. D. SarfeJo, H. Bahrami, A. Afify, A. Shoaee and M. Latifzadeh, "Planar Transformer with None Overlapping Winding as Current Balancing Compensator for Paralleled SiC MOSFETs,"



- 2022 30th International Conference on Electrical Engineering (ICEE), 2022, pp. 784-790, doi: 10.1109/ICEE55646.2022.9827032.
- [19] H. S. Choi and B. H. Cho, "Novel zero-current-switching (ZCS) PWM switch cell minimizing additional conduction loss," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 49, no. 1, pp. 165–172, Feb. 2002, doi: 10.1109/41.982260.
- [20] A. Shoaie, K. Abbaszadeh and H. Allahyari, "A Single-Inductor Multi-Input Multi-Level High Step-Up DC-DC Converter Based on Switched-Diode-Capacitor Cells for PV Applications," in *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics*, 2022, doi: 10.1109/JESTIE.2022.3173178.
- [21] A.F., Bakan, H., Bodur, and I., Aksoy, "A Novel ZVT -ZCT PWM DC-DC Converter", *11th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE2005)*, Dresden, Sept. 2005, pp. 1-8, doi: 10.1109/EPE.2005.219462.
- [22] P., Das, and G., Moschopoulos, "A Comparative Study of Zero-Current-Transition PWM Converters", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol.54, pp. 1319-1328, June 2007, doi: 10.1109/TIE.2007.891663 .
- [23] A. Mondzik, R. Stala, S. Piróg, A. Penczek, P. Gucwa and M. Szarek, "High Efficiency DC–DC Boost Converter with Passive Snubber and Reduced Switching Losses," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 69, no. 3, pp. 2500-2510, March 2022, doi: 10.1109/TIE.2021.3063874.

## زیر نویس ها

- 
- 1 Power Factor Correction(PFC)
  - 2 Fuel cell systems
  - 3 Boost converter
  - 4 Hard switching
  - 5 Reverse recovery
  - 6 Electromagnetic interference (EMI)
  - 7 Soft switching
  - 8 Pulse width modulation(PWM)
  - 9 Snubber
  - 10 Pasive
  - 11 Coupled inductor
  - 12 Zero current switching (ZCS)
  - 13 Zero voltage switching (ZVS)
  - 14 Synchronic
  - 15 Active
  - 16 Zero-voltage-transition(ZVT)
  - 17 Duty cycle
  - 18 Flyback
  - 19 Forward
  - 20 Inductance