

ارائه یک روش نوین در سیستم انتقال توان بدون سیم القایی برای کاربرد در شارژر باطری قلب مصنوعی

محمد هادی داداشی^۱، سید محمد مهدی میر طلایی^۲

۱- دانشکده مهندسی برق، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، اصفهان، ایران

۲- دانشکده مهندسی برق، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، اصفهان، ایران

Mhd.project2007@gmail.com

خلاصه

انرژی لازم برای شارژ یک باطری قلب مصنوعی را می توان بدون اتصال فیزیکی با استفاده از روش القای الکترومغناطیسی انتقال داد. در این مقاله، یک سیستم انتقال توان بدون سیم القایی با مبدل dc-dc تمام پل شیفت فاز رزونانس سری ارائه گردیده شده است. مبدل پیشنهادی با استفاده از تانک رزونانسی سری، سلف اشباع و اعمال پالس های کنترلی با فرکانس ثابت، کلید زنی ولتاژ صفر برای ساق پیش فاز و کلید زنی جریان صفر برای ساق پس فاز به دست می آید و توان خروجی با استفاده از تکنیک شیفت فاز کنترل می گردد. در مبدل پیشنهادی، شرایط کلید زنی نرم برای پهنای وسیعی از تغییرات بار به دست می آید. توپولوژی، وضعیت های کاری مبدل پیشنهادی مورد بررسی قرار گرفته شده است و صحت تجزیه و تحلیل تئوری توسط نتایج شبیه سازی تایید می گردد.

کلمات کلیدی: قلب مصنوعی، کلید زنی ولتاژ صفر (ZVS)، کلید زنی جریان صفر (ZCS)، جبران ساز اندوکتانس، ساق.

۱. مقدمه

امروزه انتظار می رود انرژی الکتریکی لازم برای شارژ دستگاه های کمک گردش خون داخل بدن بدون شکافتن پوست انتقال یابد. برای پیاده سازی این روش به یک منبع تغذیه با قابلیت شارژ بدون سیم باطری در داخل بدن نیاز داریم. معمولاً در اینگونه کاربرد ها، فاصله بین سیم پیچ هابرابر با ضخامت پوست بیمار در رنج ۱ الی ۲ سانتی متر می باشد [۱]. دستگاه های کمکی گردش خون الکتریکی همچون قلب مصنوعی یا دستگاه های کمکی بطنی به طور معمول در آن ها از موتورهای DC بدون جاروبک به جای پمپ استفاده می شود [۲]. اینگونه دستگاه ها معمولاً به ۱۵ الی ۳۵ وات توان برای عملکرد احتیاج دارند و قادر به تغذیه توسط یک پک باطری قابل حمل و یک مبدل dc-dc هستند.

مبدل های به کار برده شده در سیستم های انتقال توان بدون سیم القایی را می توان بسته به توان انتقالی مد نظر و کاربرد آن ها دسته بندی نمود. از جمله معروف ترین مبدل های به کار برده شده در این گونه سیستم ها مبدل های کلاس E، مبدل های فلای بک، مبدل های نیم پل و تمام پل، مبدل های شیفت فاز، مبدل های رزونانسی و شبه رزونانسی هستند [۳]-[۶].

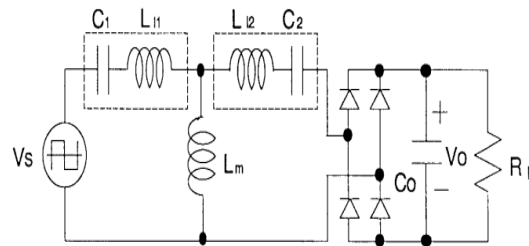
در این مقاله یک روش نوین کلید زنی نرم برای سیستم انتقال توان بدون سیم القایی ارائه شده است که با رزونانس با المان های سیستم، شرایط را برای کلید زنی نرم و انتقال توان ماکزیمم برای یک قلب مصنوعی با توان خروجی ۴۸ وات و ولتاژ خروجی ۲۴ ولت فراهم می کند. این روش هم چنین قابلیت کنترل توان خروجی را با استفاده از تکنیک شیفت فاز مبدل و کلید زنی نرم برای رنج تغییرات وسیعی از بار را دارد.

۲. آنالیز و طراحی سیستم انتقال توان بدون سیم القایی با خازن های جبران ساز

امروز محققان، تحقیقات متعددی بر روی توپولوژی های جبران ساز های خازنی انجام داده اند [۸]. توپولوژی سری سری (SS) یکی از توپولوژی پر کاربرد در میان آن ها است. این توپولوژی در بین سایر توپولوژی ها از ماکزیمم ظرفیت توان انتقالی و پایداری بالاتری برخوردار است [۸]. شماتیک مداری یک سیستم انتقال توان بدون سیم همراه با جبران ساز های سری - سری در شکل ۱ نشان داده شده است.

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد

^۲ استادیار



شکل ۱ - شماتیک مدار پیشنهادی

در شکل فوق V_s منبع ولتاژ مربعی، L_m اندوکتانس مغناطیسی، L_{L1} و L_{L2} به ترتیب اندوکتانس نشتی سیم پیچ اولیه و ثانویه می باشد. اندوکتانس

های اولیه و ثانویه به شرح زیر می باشند:

$$L_1 = L_{L1} + L_m \quad (1)$$

$$L_2 = L_{L2} + L_m \quad (2)$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}} \quad (3)$$

فرکانس رزونانس در این مدار به منظور انتقال حداکثر توان به بار در دو طرف مدار یکسان در نظر گرفته می شود. ضریب کوپلینگ مغناطیسی

در این مدار

$$k = \frac{L_m}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (4)$$

می باشد.

۳. عملکرد مبدل

در این فصل به بررسی مبدل dc-dc تمام پل شیفت فاز رزونانسی با کلید زنی ولتاژ صفر جریان صفر برای سیستم انتقال توان بدون سیم در این مدار برای تثبیت جریان در صفر و جلوگیری از رزونانس از یک سلف اشباع استفاده می گردد. نحوه عملکرد سلف اشباع به اینگونه می باشد که با عملکرد تیز در جریان های بیش از حد نامی خود، اشباع گردیده و از مدار خارج می گردد.

به منظور ساده سازی تجزیه و تحلیل در حالت ماندگار، فرضیات زیر در نظر گرفته می شود:

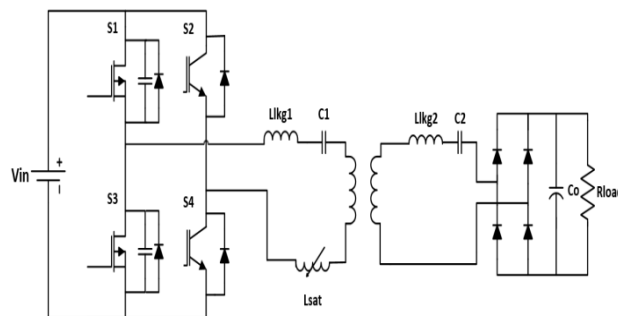
۱- تمام کلید ها ایده ال در نظر گرفته می شوند.

۲- مدل سیستم انتقال توان بدون سیم القایی را با یک ترانس ایده آل همراه با سلف نشتی مدل می کنیم.

۳- C_{out} به میزان کافی بزرگ در نظر گرفته می شود که V_o را بتوان یک ولتاژ dc بدون رپل در نظر گرفت.

۴- فرکانس کلید زنی برابر یا مقداری بزرگتر از تانک رزونانسی در نظر گرفته می شود.

۵- تعداد دور سیم پیچ های اولیه و ثانویه برابر در نظر گرفته می شوند.



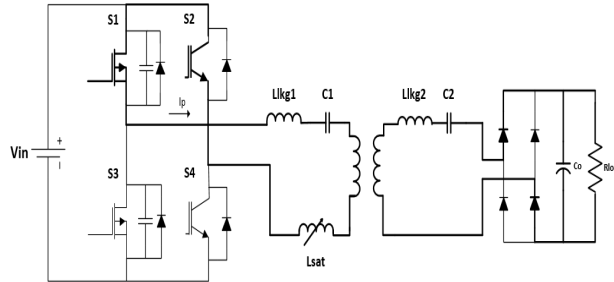
شکل ۲ - شماتیک مبدل تمام پل شیفت فاز رزونانسی جدید در سیستم های انتقال توان بدون سیم

وضعیت های عملکرد مبدل پیشنهادی به شرح زیر می باشد.

شکل موج های ولتاژ اولیه ترانسفورماتور (V_{p1})، جریان اولیه (I_{p1}) و ثانویه و ولتاژ گیت کلید های مبدل DC-DC تمام پل شیفت فاز رزونانسی با کلید زنی در ولتاژ صفر و جریان صفر پیشنهادی در شکل ۱۰ برای شرایط عملکرد پایدار نشان داده شده است.

۱.۳ وضعیت اول ($t < t_0$)

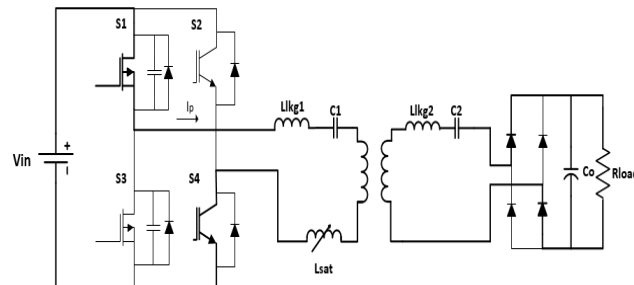
در وضعیت اول کلید های S1 و S2 در حال هدایت هستند و جریان در اولیه و ثانویه به ترتیب صفر و ماکزیمم است. بار هم چنان توسط انرژی ذخیره شده در تانک رزونانسی ثانویه تغذیه می گردد و در سمت اولیه، سلف اشباع با نشان دادن امپدانس بزرگ از خود، جریان را در صفر تثبیت می نماید. شماتیک این وضعیت در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳ - شماتیک مدار ارائه شده در فاصله زمانی ($t < t_0$)

۲.۳ وضعیت دوم ($t_0 < t < t_1$)

در ابتدا این وضعیت، کلید S2 تحت شرایط کلید زنی جریان صفر خاموش می گردد. سپس بعد از گذر زمان مرده بین کلید ها، کلید S4 تحت شرایط کلید زنی جریان صفر روشن می گردد. در این وضعیت سلف اشباع در مدار می باشد و از تغییرات جریان جلوگیری می کند و هم چنین بار توسط انرژی ذخیره شده در تانک رزونانس ثانویه تغذیه می گردد. شماتیک مدار معادل این وضعیت در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴ - شماتیک مدار ارائه شده در فاصله زمانی ($t_0 < t < t_1$)

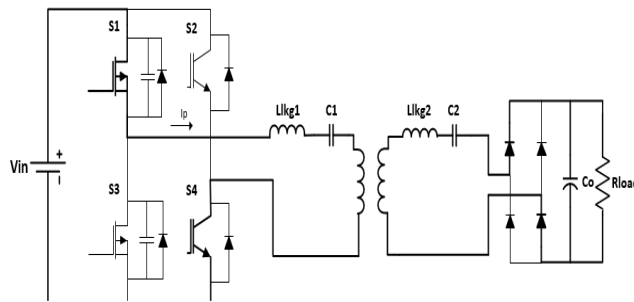
از تغییرات جریان در این وضعیت به دلیل کوتاه بودن بازه صرفه نظر می شود.

$$I_p(t_0) = \quad (5)$$

$$I_p(t_1)$$

۳.۳ وضعیت سوم ($t_1 < t < t_2$)

این وضعیت با اشباع گردیدن سلف اشباع شروع می گردد و با قرار گرفتن ولتاژ Vs در ورودی تانک رزونانسی اولیه، جریان های اولیه و ثانویه در طی

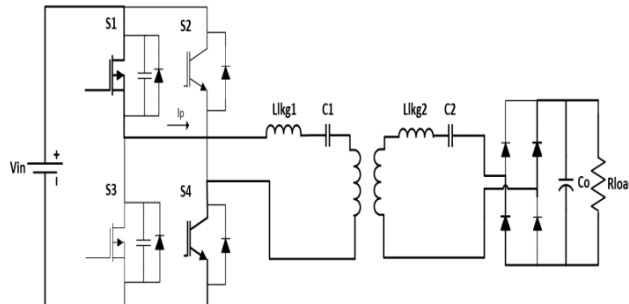


شکل ۵ - شماتیک مدار ارائه شده در فاصله زمانی $(t_1 < t < t_2)$

رزونانس به ترتیب شروع به افزایش و کاهش می‌یابد. این وضعیت، وضعیت انتقال توان نامیده می‌شود و تا زمانی که جریان ثانویه صفر نگردیده، ادامه می‌یابد. شماتیک مدار معادل این وضعیت در شکل ۵ نشان داده شده است.

۴.۳ وضعیت چهارم $(t_2 < t < t_3)$

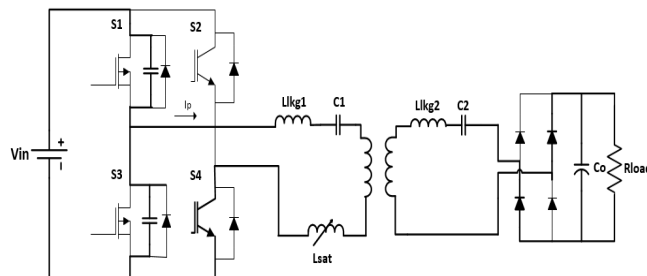
در ابتدای این وضعیت جریان ثانویه صفر و منفی می‌گردد. لذا دیود های پل دیودی جریان منفی را از خود عبور می‌دهند. شماتیک مدار معادل این وضعیت در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶ - شماتیک مدار ارائه شده در فاصله زمانی $(t_2 < t < t_3)$

۵.۳ وضعیت پنجم $(t_3 < t < t_4)$

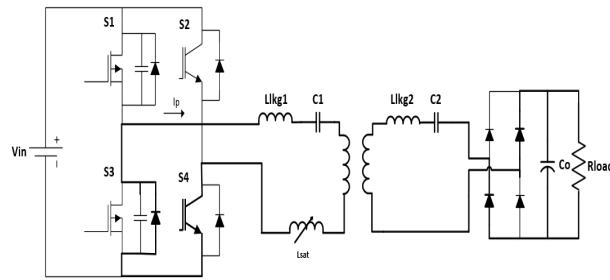
در این وضعیت با رسیدن جریان در حدود صفر، سلف اشباع وارد مدار گردیده و جریان را کلمپ می‌گرداند تا از ادامه رزونانس جلوگیری شود. در این وضعیت کلید S_1 تحت کلید زنی ولتاژ صفر خاموش می‌گردد و سپس خازن های C_{s1} و C_{s3} توسط انرژی ذخیره شده در سلف اشباع و سلف نشتی به ترتیب شارژ و دشارژ می‌گردند. این وضعیت هم چنین تا زمانی ادامه می‌یابد که خازن C_{s3} کاملاً تخلیه گردیده و ولتاژ دو سر آن صفر گردد. شماتیک مدار در این وضعیت در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۷ - شماتیک مدار ارائه شده در فاصله زمانی $(t_3 < t < t_4)$

۶.۳ وضعیت ششم $(t_4 < t < t_5)$

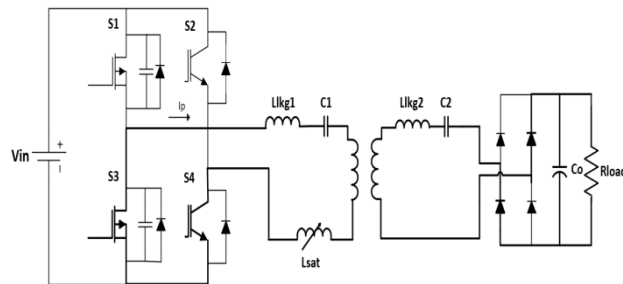
در ابتدای این وضعیت دیود بدنه S_3 روشن گردیده و شرایط را برای روشن شدن کلید S_3 تحت کلید زنی ولتاژ صفر فراهم می کند. شماتیک این وضعیت در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۸- شماتیک مدار ارائه شده در فاصله زمانی $(t_4 < t < t_5)$

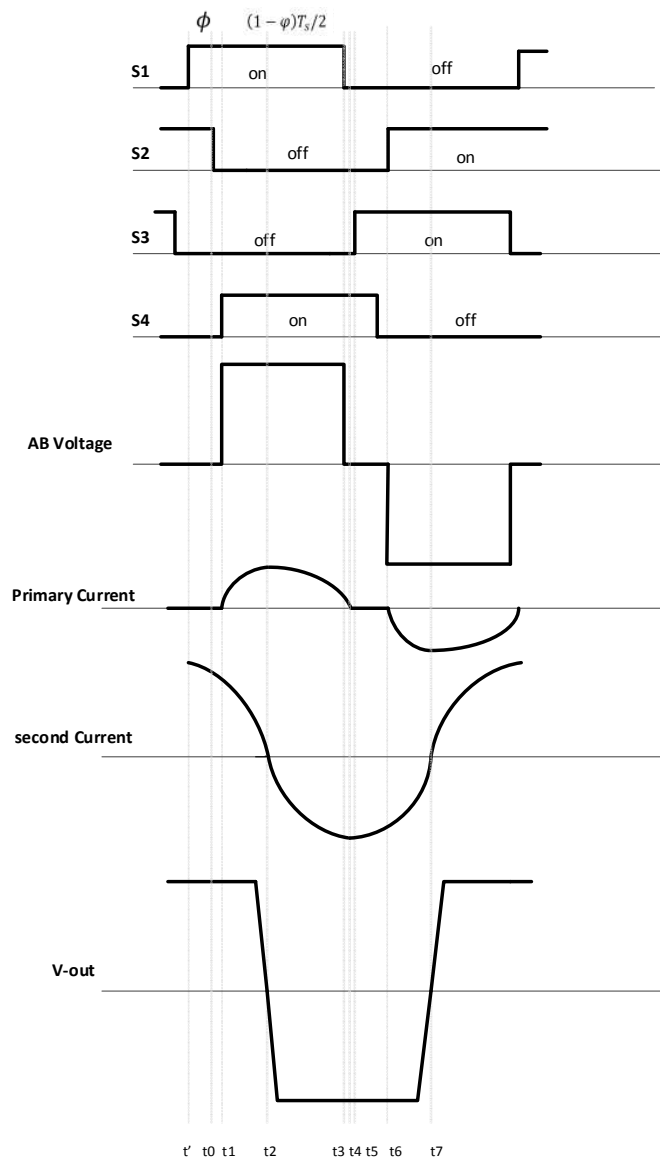
۷.۳ وضعیت هفتم $(t_5 < t < t_6)$

در ابتدای این وضعیت کلید S_3 تحت کلید زنی ولتاژ صفر روشن می گردد. شماتیک مداری این وضعیت در شکل ۹ نشان داده شده است.



شکل ۹ - شماتیک مدار ارائه شده در فاصله زمانی $(t_5 < t < t_6)$

از وضعیت هفتم به بعد به طور مشابه وضعیت ها تکرار می شوند تا یک دوره تناوب به اتمام رسد.



شکل ۱۰- شکل موج های اصلی مدار مبدل dc-dc تمام پل شیفت فاز روناسی در سیستم انتقال توان بدون سیم القایی

۴. شرایط کلیدزنی نرم

انرژی لازم برای شارژ و دشارژ خازن های خروجی S_1 و S_3 و کلیدزنی ولتاژ صفر شاخه پیش فاز توسط انرژی ذخیره شده در اندوکتانس نشستی اولیه و اندوکتانس مغناطیسی و اندوکتانس سلف اشباع تامین می گردد. به این منظور می بایست مجموع انرژی ذخیره شده در اندوکتانس نشستی و سلف اشباع بزرگتر از انرژی ذخیره شده در خازن های ساق پیش فاز باشند. بنا براین داریم:

$$L_m + L_{sat} + L_{lk g1} \gg L_r \quad (6)$$

$$C_{s1} = C_{s2} \quad (7)$$

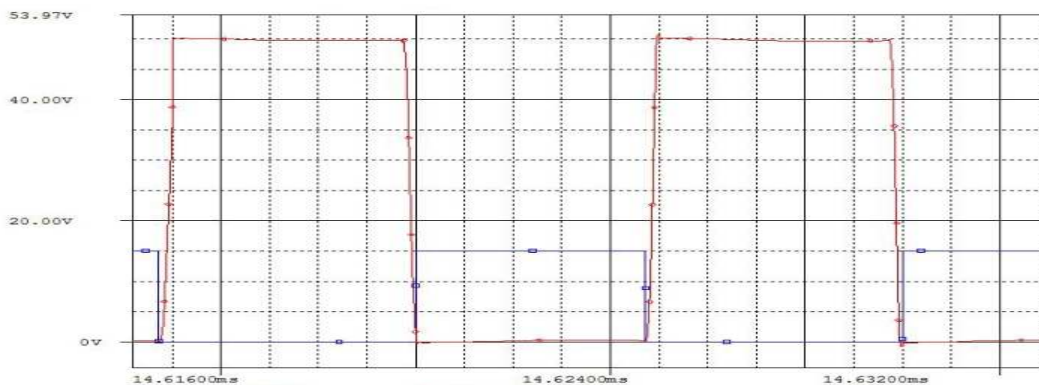
از طرفی برای کسب شرایط کلیدزنی جریان صفر برای شاخه پس فاز از آن جا که فرکانس کلیدزنی مبدل برابر با فرکانس تانک رزونانس است و فاصله زمانی بین t_4 و t_6 بزرگتر یا مساوی نصف دوره تناوب است، رزونانس جریان اولیه را مجبور به صفر نمودن می کند و هیچ محدودیتی در جهت ایجاد شرایط کلیدزنی نرم برای ساق پس فاز نخواهیم داشت.

۵. نتایج شبیه سازی

برای ارزیابی عملکرد مبدل پیشنهادی از نتایج شبیه سازی بر روی یک ساختار واقعی شارژر باتری قلب مصنوعی که مشخصات آن در جدول ۱ ذکر شده، استفاده می گردد [۹].

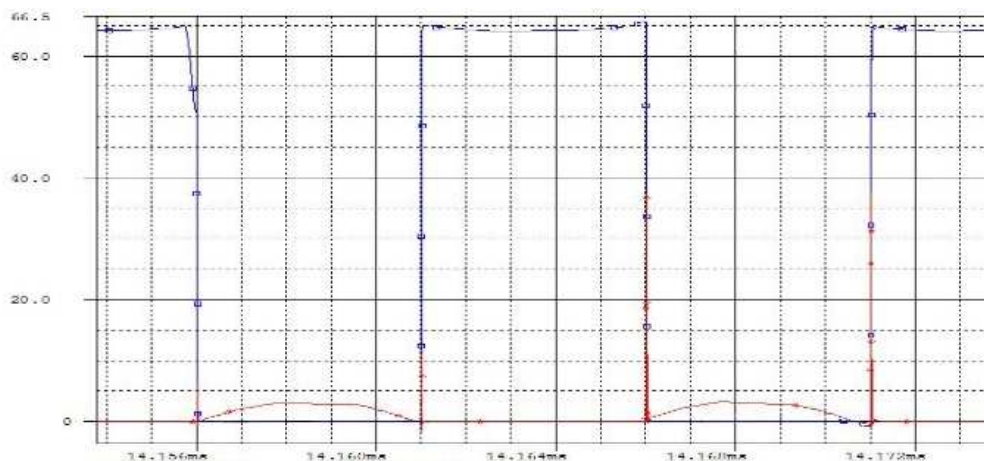
جدول ۱ - مقادیر المان های مدار طراحی شده

$L_m=36.6\mu\text{H}$	$L_1=L_2=100\mu\text{H}$
$V_{in}=70\text{ v}$	$C_1=C_2=26.4\text{nF}$
$L_{sat}=100\mu\text{H}$	$R_L=10$
$V_{out}=24\text{v}$	$P_{out}=48\text{w}$
$R_{load} = 10$	



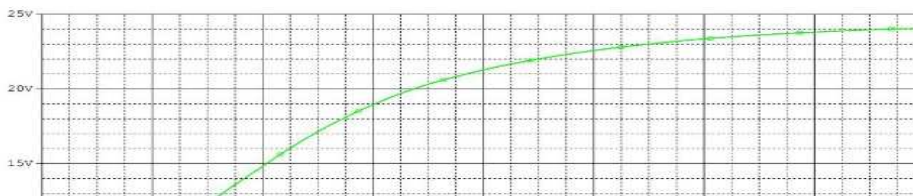
شکل ۱۱ - ولتاژ درین-سورس و گیت-سورس کلید S_1

همان طور که مشاهده می شود کلید S_1 تحت شرایط کلید زنی ولتاژ صفر روشن و خاموش می گردد.

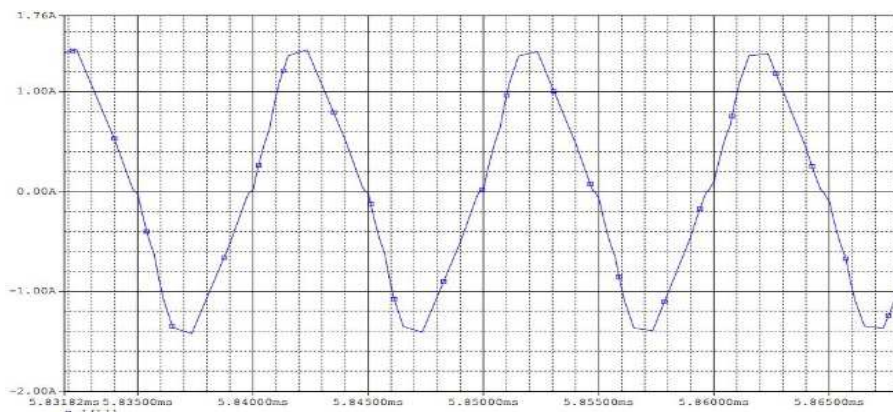


شکل ۱۲ - ولتاژ درین-سورس و جریان کلید S_2

همان طور که در شکل فوق مشاهده می گردد، کلید ساق پس فاز S_2 تحت کلید زنی جریان صفر خاموش و روشن می گردد.



شکل ۱۳ - ولتاژ خروجی



شکل ۱۴- جریان سمت اولیه

شکل های ۱۴ و ۱۵ شکل موج های ولتاژ خروجی و جریان اولیه را نشان می دهند. همان طور که مشاهده می شود جریان برای مدت کوتاهی در شکل ۱۵ صفر مانده است و شرایط را برای کلید زنی جریان صفر ساق پس فاز فراهم می نماید.

۶. نتیجه گیری

در این مقاله، یک مبدل dc-dc تمام پل شیفت فاز رزونانسی با کلید زنی جریان صفر-ولتاژ صفر برای شارژر بدون سیم قلب مصنوعی پیشنهاد شده است که با استفاده از دو جبران ساز خازنی سری در دو طرف مدار، شرایط را برای کلید زنی نرم کلید ها و انتقال توان ماکزیمم فراهم می کند و با استفاده از تکنیک شیفت فاز، ولتاژ خروجی را تنظیم می گرداند. این مبدل دارای مزایای زیادی هم چون حداقل المان اضافی، کلید زنی نرم برای پهنای وسیعی از بار، حذف سلف فیلتر خروجی و هم چنین مدار کنترلی ساده است. سیستم انتقال توان بدون سیم القایی پیشنهادی به خوبی قابلیت عملکرد در توان های متوسط و بالا را به خاطر قابلیت کار در فرکانس های بالا و شرایط کلید زنی نرم آن دارد. صحت عملکرد صحیح مبدل پیشنهادی با نتایج شبیه سازی برای یک قلب مصنوعی واقعی با توان خروجی ۴۸ وات مورد تایید قرار گرفته است.

۷. مراجع

1. Ghahary, A. and Cho, B.H. (1990), "Design of a transcutaneous energy transmission system using a series resonant converter," in IEEE Power Electronics Specialists Conf, pp 1-8.
2. Schuder, J.C. and Stephenson, H.E. (1965), "Energy transport to a coil which circumscribes a ferrite core and is implanted within the body," IEEE Trans. Bio-Med. Eng, **12** (4), pp 154-163.
3. Thrimawithana, D.J. and Madawala, U.K. (2013), "A Generalized Steady-State Model for Bidirectional IPT Systems," Power Electronics, IEEE Transactions on, **28** (5), pp. 4681-4689.
4. Simard, G. and Sawan, M. and Massicotte, D. (2010), "High-Speed OQPSK and Efficient Power Transfer Through Inductive Link for Biomedical Implants," Biomedical Circuits and Systems, IEEE Transactions on, **4** (3), pp 192-200.
5. Aldhafer, S. and Luk, P.C.K and Whidborne, J.F. (2014), "Tuning Class inverters applied in inductive links using saturable reactors," IEEE Trans. Power Electron, **29** (6), pp 2969 - 2978.
6. Suetsugu, T and Kazimierczuk, M.K. (2004), "Analysis and design of Class-E amplifier with shunt capacitance composed of nonlinear and linear capacitances," Circuits and Systems I, Regular Papers, IEEE Transactions on, **51** (7), pp 1261-1268.
7. Mecke, R. and Rathge, C. (2004), "High frequency resonant inverter for contactless energy transmission over large air gap," in Proc. 35th Annu. IEEE Power Electron. Spec. Conf, pp 1737-1743.
8. Y. H. Chao, J. Shieh, C. T. Pan, and W. C. Shen, W.C (2007), "A closed-form oriented compensator analysis for series-parallel loosely coupled inductive power transfer systems," in Proc. Power Electron. Spec. Conf, pp 1215-1220.
9. Gyu, B.j. and Cho, B.H. (1998), "An energy transmission system for an artificial heart using leakage inductance compensation of transcutaneous transformer," Power Electronics, IEEE Transactions on, **13** (6), pp 1013-1022.