طراحی و شبیه سازی منبع تغذیه سوئیچینگ ولتاژ بالا (5kW, 60kV) با توپولوژی تشدیدی سری– موازی با کاربرد در مولدهای اشعه ایکس

جعفری، حسین* [۱] هاشمی نژاد، سید محمد[۲]

[۱] دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی هسته ای و فیزیک، گروه مهندسی گداخت هسته ای

[۲] دانشگاه آزاد تهران مرکز، گروه فیزیک هسته ای

چکیده:

منابع تغذیه سوئیچینگ دارای ویژگی های منحصر به فردی هستند که از جمله‌ی آنها می توان راندمان بالا، ابعاد کوچک، پایداریو کنترل پذیری بالا اشاره نمود.

یکی از کاراترین مبدل های سوئیچینگ قابل استفاده در تامین بارهای توان/ ولتاژ بالا، مبدل تشدید سری- موازی می‌باشد. در این مقاله به طراحی و شبیه سازی یک مبدل تشدیدی سری–موازی به منظور کاربرد در ولتاژ و توان بالا پرداخته شده است. پس از صحت سنجی نتایج شبیه سازی، فاز ساخت آن در دستور کار قرار گرفت. برای داشتن راندمان بالا و وارد آمدن استرس‌های کمتر به المانهای سوئیچینگ، شرایط کلید زنی در جریان صفر به کمک نمونه-گیری از جریان خروجی انجام شد. همچنین برای پایداری سطح ولتاژ خروجی، یک جبرانساز تناسبی- انتگرالی (نوع PI) در مدار گنجانده شده که منجر به overshoot و undershoot کمتر از ۴ درصد شد. در انتها با محاسبه تلفات مدار راندمان ۹۵ درصد برای این منبع تغذیه حاصل گردید.

کلمات کلیدی منبع تغذیه سوئیچینگ، مولد اشعه ایکس، رزونانس سری- موازی

مقدمه:

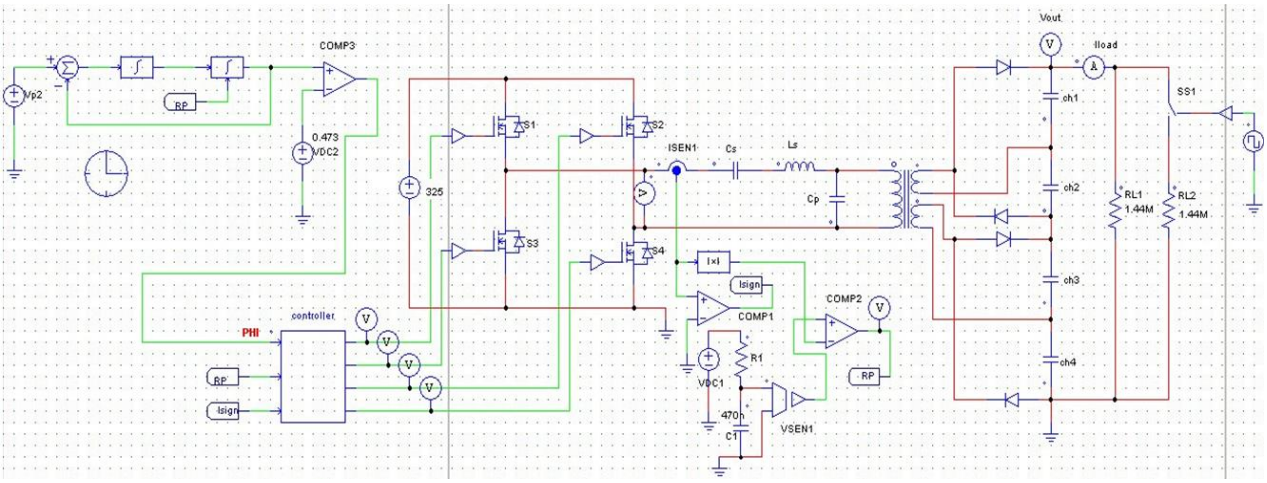
سال های بسیاری است که سیستم های پیشرفته‌ی صنعتی و تحقیقاتی در حوزه تصویربرداری اشعه ایکس یا کاربردهای مختلف لیزری از مبدل های ویژه ای به منظور راه اندازی و تغذیه زیر سیستم های خود بهره می گیرند. از مهمترین چالش های موجود در استفاده‌ی صنعتی از سیستم های تصویربرداری، نیاز به منابع تغذیه توان بالا/ ولتاژ بالا به صورت پک های قابل حمل می باشد. این منابع تغذیه، ضمن اینکه باید از قابلیت اطمینان و راندمان بالایی در تامین توان زیر سیستم های مربوطه بهره‌مند باشند، باید با حفظ شرایط عایقی مربوط به عناصر ولتاژ بالا، ابعاد کوچکی را نیز به خود اختصاص دهند. منابع تغذیه سوئیچینگ دارای ویژگی های منحصر به فردی هستند که از جمله‌ی آنها می توان راندمان بالا، ابعاد بسیار کوچک، پایداری و کنترل پذیری بالا اشاره نمود. یکی از کاراترین مبدل های DC-

DC قابلیت استفاده در تامین توان بارهای مورد نظر، استفاده از مبدل DC-DC تشدید سری- موازی می باشد. این مبدل ضمن توانایی در تامین ولتاژ و توان های بالا، دارای راندمان بالایی بوده و اتلاف نسبتا اندکی را در بخش های مختلف خود دارد.

طراحی مدار و الزامات فنی

در این قسمت به طراحی قسمت‌های مختلف مبدل و مدار کنترل پرداخته می‌شود. نمای کلی مدار شبیه سازی شده در شکل ۱ نمایش داده شده و در آن بلوکهای مختلف برای بحث نشانه گذاری شده است.

اولین بخش مدار کنترل، مدار همزمان ساز یا مدار سوئیچینگ جریان- صفر (ZCS)[1] است. برای عملکرد در حالت ZCS باید فرکانس کلید زنی با فرکانس رزونانس مدار تشدید یکی شود. برای انجام این کار از ساختار پیشنهاد شده در مرجع [2] و [3] استفاده شده است. در این ساختار یک سیستم حلقه بسته وظیفه تولید یک سیگنال دندان اره‌ای دارد که با پالس ریست کننده هم زمان شده است. این قسمت از مدار در شکل ۱ قرار گرفته است. برای شبیه سازی مدار کنترل در نرم افزار PSIM از یک بلوک کنترل که قابیت برنامه نویسی دارد، استفاده شده است. پالس ریست با عبور از صفر جریان تولید می‌شود می‌شود. این پالس به پایه ریست یک انتگرال گیر اعمال شده و با یک شدن پالس خروجی انتگرال گیر صفر شده و حافظه قبلی آن از بین می‌رود.



شکل ۱: طرح کلی مبدل تشدیدی سری-موازی.

بر روی سیگنال دندان اره‌ای تولید شده یک مقایسه کننده قرار داده شده است. صفر سیگنال دندان اره‌ای با ورود پالس رخ می‌دهد. با افزایش دامنه سیگنال از صفر اگر مقدار ولتاژ VC بیشتر از دامنه سیگنال باشد خروجی مقایسه کننده صفر است و با افزایش دامنه خروجی مقایسه کننده یک می‌شود. با تغییر میزان VC می‌توان تاخیر زمانی ایجاد شده بین سیگنال دندانه اره ای و دامنه پالس را کنترل کرد. از این تاخیر زمانی برای کنترل دیوتی سایکل سیگنال مدار

[1] Zero Current Switching

سوئیچینگ استفاده می‌شود. از منظری این طراحی مشابه یک حلقه قفل شده فاز[1]عمل می‌کند به این صورت که فرکانس موج دندان اره‌ای خروجی به طور اتوماتیک توسط سیگنال دندانه اره ای با فرکانس رزونانس مدار سوئیچینگ هم آهنگ می‌شود و اثر تغییر در فرکانس مدار رزونانس ناشی از بارگذاری مبدل و همچنین تغییرات فرکانس ناشی از خطای المانها و اثرات حرارتی در مدار فیدبک جبران می‌شود و مبدل همیشه در حالت بالای رزونانس کار خواهد کرد. مزیت این طراحی این است که با هم‌آهنگ شدن فرکانس کلید زنی با فرکانس سوئیچینگ راندمان مدار بالا می-رود و همچنین فشار کمتری به المانهای سوئیچینگ به دلیل عملکرد در ZCS وار می‌آید.

بخش بعدی از این مدار مدار کنترل سؤیچ های قدرت است. در این قسمت به یک کنترل کننده دیجیتال برای اعمال پالسها به درایور سیگنالهای قدرت نیاز داریم. این مدار باید بتواند با توجه به وضعیت جریان رزونانسی و سیگنال تولید شده از مدار تاخیر اندازZCS را تغییر دهد. همچنین مدار باید دارای حافظه باشد که وضعیت قبلی سوئیچها را در خود حفظ کند. با توجه به فرکانس کاری مدار که نزدیک به 300KHZ است استفاده از یک تراشه‌ی سرعت بالای CPLD مناسب می‌باشد. مدار کنترل کننده باید چهار سیگنال گیت برای درایورهای سوئیچهای قدرت فراهم کند. این چهار سیگنال از لحاظ منطقی باید حالت‌های نشان داده شده در جدول۱ را داشته باشند.

جدول۱: حالات مختلف سیگنالهای گیت در مبدل سری-موازی.

Switch / Current state	S1	S2	S3	S4
State 1	On	Off	Off	On
State2	On	On	Off	Off
State3	Off	On	On	Off
State4	Off	Off	On	On

بخش مهم دیگر این منبع تغذیه مدار نمونه گیر جریان و فیدبک است. برای نمونه گیری از جریان سلف رزونانسی از یک ترانسفورماتو جریان در شبیه سازی استفاده شده است. در عمل می‌توان این ترانس را با پیچیدن سیم بر روی یک هسته تروید ساخته و سیم حامل جریان را از مرکز هسته عبور داد.

یکی از الزامات مهم در طراحی مبدل‌های سویچینگ عملکرد سافت استارت می‌باشد. در لحظه راه اندازی مبدل دامنه سیگنال خروجی کم است و سیگنال خطای تولید شده در مقایسه کننده حلقه فیدبک زیاد خواهد بود و موجب می-شود دیوتی سایکل حد اکثر به سویچها اعمال شده و فشار زیادی به آنها وارد آید. از این رو تدابیری اندیشیده می‌شود که در لحظه راه اندازی جریان زیادی از المانهای قدرت عبور نکند. در طراحی انجام شده در شکل ۱ یک مدار RC قرار داده شده است. خروجی این مدار سیگنال رفرنس حلقه فیدبک است. در لحظه راه اندازی مبدل خازن تخلیه هست و مقدار سیگنال رفرنس کم می‌باشد و با گذشت زمان خازن شارژ شده و مقدار این سیگنال افزایش می‌یابد. ثابت زمانی این مدار برابر 2ms در نظر گرفته شده است.

[1] Phase Locked Loop

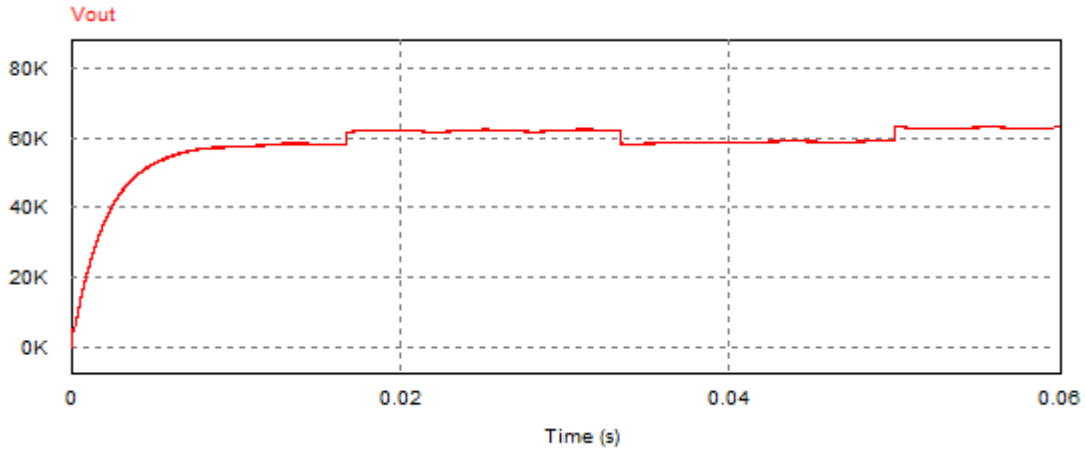
نتایج شبیه سازی و بحث:

مقادیر پارامترهای اصلی مدار طبق طراحی انجام شده به قرار زیر است:

$Vo = 60kV, Io = 82mA, Po = 5kW$
$V_{in} = 325V, n = 15$
$R_s = 100m\Omega, C_s = 30nF, C_p = 12nF, L_s = 24.3\mu H$
$C_{h1}, C_{h2}, C_{h3}, C_{h4} = 2nF$.

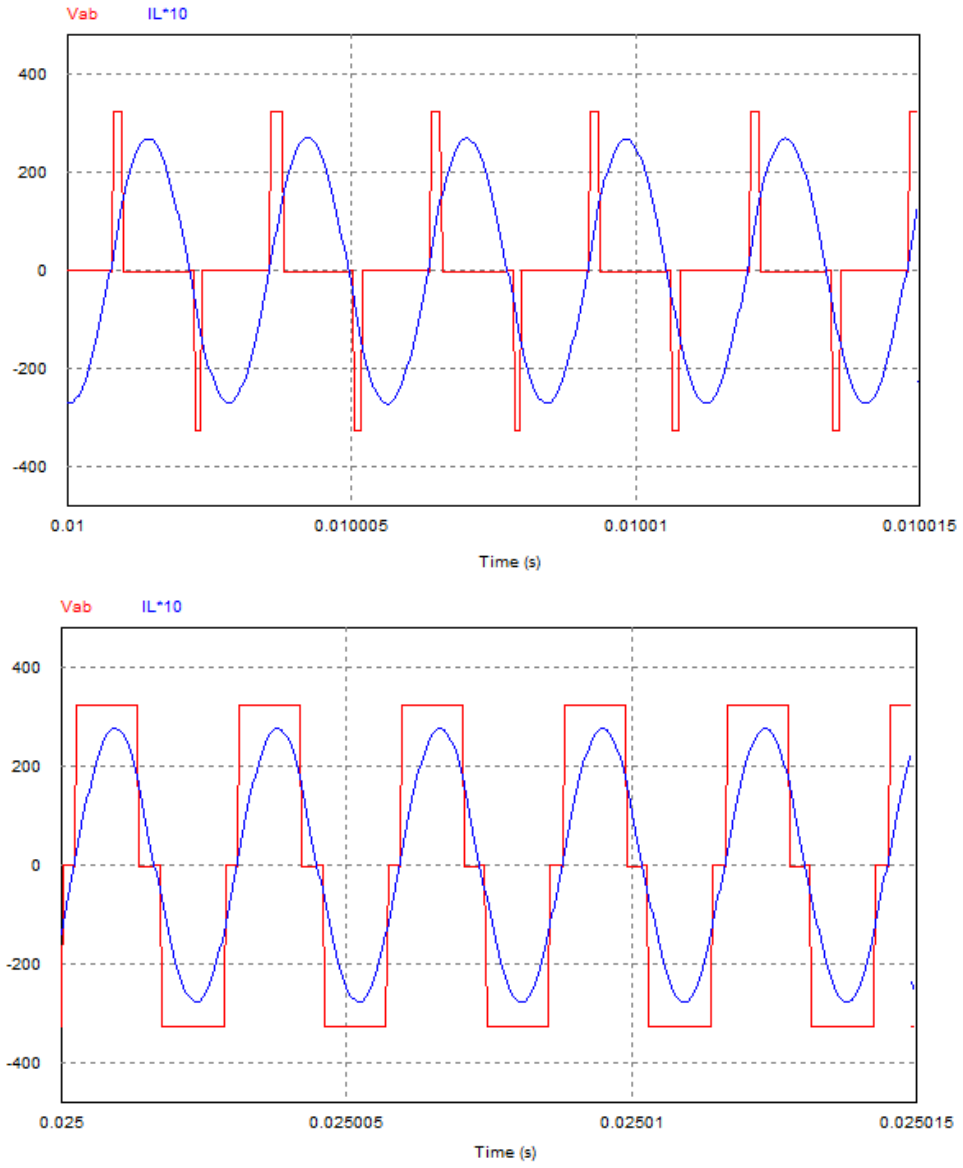
در بالا Rs مقاومت نشتی سیم پیچ رزونانسی است. همچنین برای مقاومت نشتی ترانسفورماتور در سمت اولیه نیز همین مقدار در نظر گرفته شده است.

در شکل ۲ نمودار ولتاژ خروجی با راه اندازی مبدل در بار کامل نشان داده شده است. در لحظه راه اندازی بار در مدار قرار ندارد و با گذشت زمان بار کامل اعمال شده و مجدد بار از مدار خارج شده و این عمل تکرار شده است. مقدار overshoot و undershoot در ولتاژ خروجی به ازای بیشترین مقدار تغییر بار در خروجی همانطور که از شکل ۲ مشخص است کمتر از ۴% می‌باشد. با تغییر بار میزان دیوتی سایکل برای ثابت نگه داشتن ولتاژ خروجی تغییر می‌کند همچنین فرکانس کلید زنی نیز به طور اتوماتیک با فرکانس رزونانس جدید منطبق می‌شود (چون بار در نظر گرفته شده برای شبیه سازی به صورت اهمی است میزان تغییرات فرکانس کوچک می‌باشد).



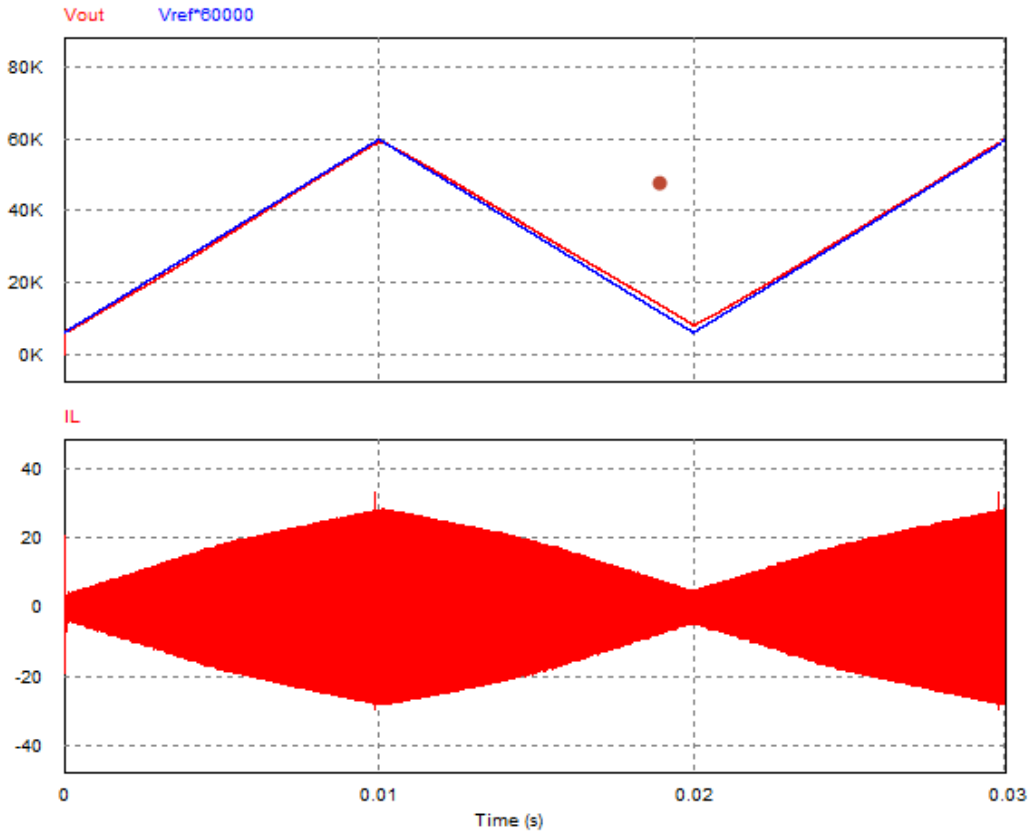
شکل۲: ولتاژ خروجی مبدل در حالت بار کامل و بدون بار.

در شکل ۳ ولتاژ Vab در خروجی مدار پل سوئیچینگ با جریان رزونانسی سلف نشان داده شده است. تصویر اول در حالت بی باری مبدل است که دیوتی سایکل کوچکی دارد و تصویر دوم در حالت بار کامل که دیوتی سایکل بالایی را دارد.



شکل ۳: تغییر دیوتی سایکل مبدل در حالت بدون بار (تصویر بالا) و بار کامل (تصویر پایین)- خط قرمز Vab و خط آبی ده برابر جریان سلف رزونانسی.

در شکل ۴ تغییر ولتاژ خروجی و جریان رزونانسی در حالت بار کامل مبدل با تغییر ولتاژ رفرنس نشان داده شده که مشاهده می‌شود ولتاژ خروجی به خوبی تغییرات ولتاژ رفرنس را دنبال می‌کند. با کم شدن ولتاژ رفرنس و به دنبال آن ولتاژ خروجی مبدل، جریان سلف رزونانسی و در نتیجه جریان سوئیچ‌های قدرت کاهش می‌یابد.



شکل ۴: شکل بالا ولتاژ خروجی مبدل با تغییر ولتاژ رفرنس و شکل پایین جریان سلف رزونانسی.

محاسبه تلفات مبدل:

نتایج بدست آمده برای حالت بار کامل از شبیه سازی روی هرکدام از ماسفت‌های قدرت 15W (مقدار موثر جریان حدود ۱۴ آمپر می‌باشد)، تلفات سلف رزونانسی(ناشی از مقاومت نشتی سلف) برابر 40W، تلفات ترانس 100W و تلفات مدار نمونه گیر ولتاژ 7.5Wوات می‌باشند. همچنین تلفات دیودهای یکسوساز خروجی هرکدام 10 وات می‌باشد. در نهایت راندمان مبدل با توجه به نتایج شبیه سازی حدود ۹۵ درصد است. در ساختار عملی تلفات ترانزیستورها به دلیل تاخیر در کلید زنی کمی بیشتر از این مقدار خواهد شد برای همین منظور ترانزیستور پیشنهاد شده قدرت باید تحمل توان بالاتری را از مقدار نتیجه شده از شبیه سازی باید داشته باشد. در حالت بی باری با توجه به تغییر نکردن زیاد جریان رزونانسی تلفات مبدل تغییر زیادی نکرده است و به قرار زیر است. تلفات روی هرکدام از ماسفتهای قدرت 14W، تلفات سلف رزونانسی(ناشی از مقاومت نشتی سلف) برابر 38W، تلفات ترانس 80W و تلفات مدار نمونه گیر ولتاژ 7.5Wوات می‌باشند.

نتیجه گیری

در این مقاله نحوه طراحی و شبیه سازی یک منبع تغذیه ولتاژ/توان بالا توضیح داده شد و نتایج شبیه سازی ارائه گشت. با استفاده از توپولوژی تشدیدی و همچنین فراهم آوردن شرایط ZCS و ZVS برای این مبدل تلفات آن کاهش پیدا کرده و راندمان بالایی در حدود ۹۵٪ در نتایج شبیه سازی حاصل شد. همچنین جبرانساز PI مناسبی جهت کنترل حلقه بسته در مدار قرار داده شد و مقدار انحراف از مقدار رفرنس به ازای تغییر شدید در بار خروجی کمتر از۴٪ بود که برای کاربردهای مورد نظر مقدار بسیار مناسبی است.

مراجع:

[1] F. da S. Cavalcante and J. W. Kolar, "Design of a 5kW High Output Voltage Series-Parallel Resonant DC-DC Converter," Proc. 34th IEEE Power Electron. Spec. Conf. (PESC 2003), vol. 4, pp. 1807–1814, 2003.
[2] H. Pinheiro, P. K. Jian, and G. Joós, "Self-sustained oscillating resonant converters operating above the resonant frequency," IEEE Trans. Power Electron., vol. 14, no. 5, pp. 803–815, 1999.
[3] T. B. Soeiro, S. Member, J. Mühlethaler, J. Linnér, P. Ranstad, and J. W. Kolar, "Automated Design of a High Power High Frequency LCC Resonant Converter for Electrostatic Precipitators," vol. 60, no. 11, pp. 1–14, 2012.
[4] h aighner, "Method for regulating and/or controlling a welding current source with a resonance circuit," US 6849828 B2, 2005.