

طراحی و ساخت تقویت کننده ترانزیستوری موج پیوسته RF با توان ۱۰ کیلووات جهت استفاده در شتابدهنده پر قدرت الکترون

علی محمد پور صالح^{۱*} - حسین خلفی^۱ - رضا افراز^۲ - محمد صادق ترمان^۲ - کاظم جوکار^۱

^۱ سازمان انرژی اتمی ، معاونت توسعه کاربرد پرتوها ، مجتمع پژوهشی یزد

^۲ شرکت مهندسی موج پردازان البرز

چکیده:

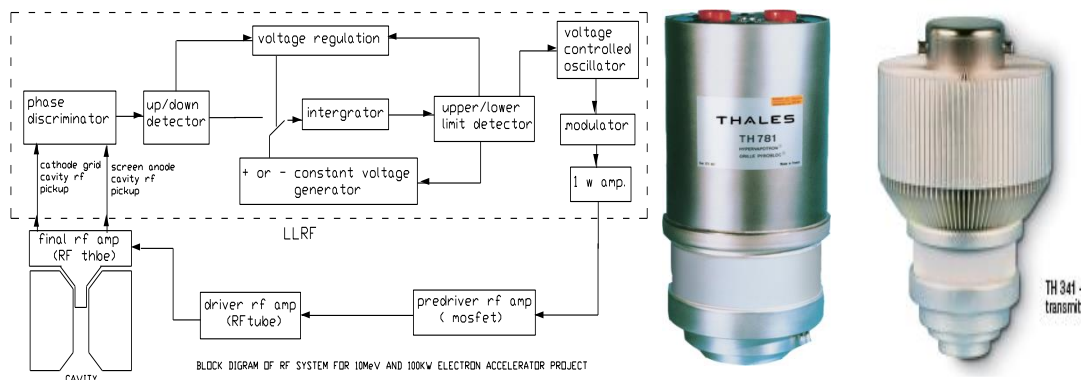
در این مقاله مراحل طراحی و ساخت تقویت کننده تمام ترانزیستوری موج پیوسته در فرکانس 107 MHz و توان نامی 10 kW تشریح میگردد. این تقویت کننده که برای اولین بار در کشور طراحی و ساخته شده است جایگزین سیستم لامپی موجود در سیستم RF شتابدهنده پر قدرت رودترون گردیده که نتایج حاصله بسیار رضایت بخش می باشد. هدف اصلی در این طرح قطع وابستگی به تقویت کننده های لامپی در شتابدهنده ها که در حال حاضر تکنولوژی ساخت آن در انحصار چندین کشور پیشرفته است می باشد تا بتوانیم علاوه بر دست یابی به این تکنولوژی و مزایای آن گامی موثر در توسعه و بومی سازی ساخت شتابدهنده ها در صنعت هسته ای کشور برداشته باشیم .

کلید واژه: شتابدهنده رودترون، سیستم RF، تقویت کننده ترانزیستوری، لامپ RF، باریکه الکترون

مقدمه:

سیستم RF در شتابدهنده وظیفه ایجاد امواج الکترومغناطیس و تشکیل میدان الکتریکی در یک محفظه شتاب رابرعده دارد. شتابدهنده رودترون دارای یک محفظه شتاب بصورت کواکسیال است که اعمال امواج رادیویی به این محفظه درمد TEM توسط سیستم RF باعث ایجاد رزونانس و تشکیل میدانهای الکتریکی و مغناطیسی ایستا می گردد. پارامترهای اصلی سیستم RF براساس انرژی و توان باریکه خروجی شتابدهنده تعیین میگردد و با توجه به انرژی 10 MeV و توان خروجی باریکه الکترونی در حد 100 kW در شتابدهنده رودترون میدان الکتریکی با پتانسیل 10 MV و جریان باریکه 10 mA مورد نیاز است که جهت ایجاد این میزان میدان الکتریکی و بمنظور تامین جریان باریکه 10 mA در خروجی شتابدهنده توان حداکثر اعمالی توسط تقویت کننده RF در حد 200 kW لازم است [1] و تقویت کننده سیستم RF باید قدرت تولید این توان را داشته باشد ولی رسیدن به این سطح توان در یک مرحله امکان پذیر نیست زیرا مدارات تقویت کننده الکترونیکی دارای یک سطح اشباع بوده و لذا می بایست برای دست یابی به سطح توان مورد نظر از چند طبقه تقویت کننده استفاده نمود همچنین بطور معمول جهت دست یابی به توانهای زیر یک کیلو وات از تقویت کننده های ترانزیستوری جهت دستیابی به توانهای بالاتر از لامپهای RF استفاده میگردد [2] در سیستم RF شتابدهنده رودترون موجود

جهت تقویت سیگنال در یک طبقه اول از تقویت کننده های ترانزیستوری استفاده شده و بقیه مراحل تقویت سیگنال بوسیله لامپهای RF انجام گرفته است. قسمتهای اصلی سیستم RF را می توان به چهار قسمت LLRF، طبقه پیش راه انداز (100W)، طبقه راه انداز (10kW)، طبقه تقویت کننده نهائی (200kW) تقسیم کرد که شکل ۱ تصویر بلوک دیاگرام و لامپهای تقویت کننده مورد استفاده در شتابدهنده رودترون را نشان میدهد [3]. استفاده از تقویت کننده های لامپی دارای مشکلات زیادی است و تکنولوژی ساخت لامپهای تقویت کننده RF در انحصار چند کشور صنعتی میباشد و معمولا سفارش ساخت و خرید این قطعه با توجه به نوع لامپ و استفاده خاص از آن مخصوصا "در شرایط کنونی با مشکل روبرو است، همچنین بدلیل طول عمر کوتاه لامپ، مرتبا" نیاز به تعویض دارد. بنابراین میبایست جهت قطع وابستگی وبومی سازی دانش فنی در این زمینه و همچنین سایر مشکلات فنی مربوط به لامپهای RF به فکر راه حل مناسبی بود. اولین بار ایده استفاده از تقویت کننده های ترانزیستوری به جای لامپی در شتابدهنده ها در شتابدهنده سینکروترون فرانسه مورد استفاده قرار گرفته است [4,5]



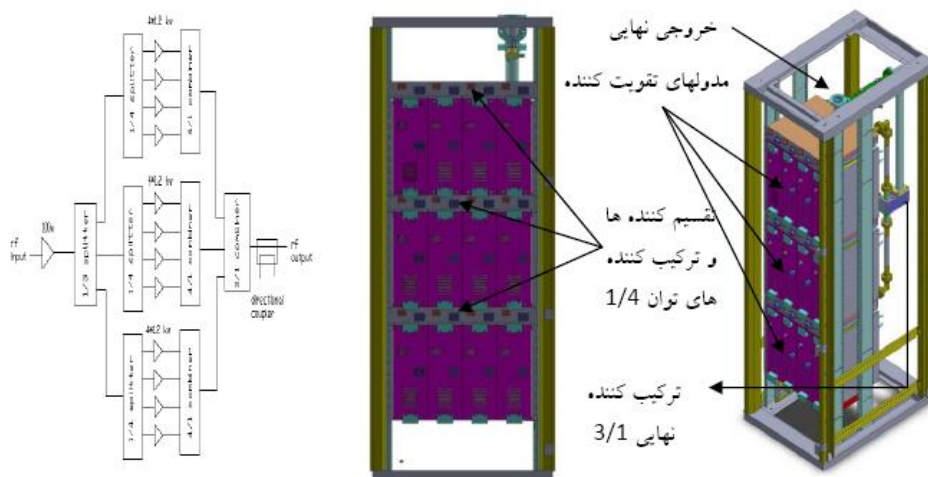
شکل ۱: اجزای مختلف سیستم RF شتابدهنده رودترون با استفاده از تقویت کننده های لامپی

ما نیز با توجه به مشکلات موجود در سیستم های تقویت کننده لامپی در شتابدهنده رودترون موجود در کشور و همچنین مزایای تقویت کننده های ترانزیستوری از جمله قابلیت مدولار بودن و تعمیرات و نگهداری راحت و طول عمر بالاتر اقدام به طراحی و ساخت تقویت کننده تمام ترانزیستوری جهت جایگزینی با تقویت کننده های لامپی در شتابدهنده ها نمودیم

روش کار:

چنانچه اشاره شد یکی از حلقه های سیستم RF شتابدهنده رودترون طبقه تقویت کننده 10kW میباشد که در اولین گام ما قصد داریم این طبقه را بصورت ترانزیستوری ساخته و آنرا جایگزین تقویت کننده لامپی موجود نمایم اولین مرحله جهت اجرای این طرح انجام طراحی شماتیک و انتخاب ترانزیستور مناسب برای طرح

میباشد با توجه به بررسیهای عملی صورت گرفت و مقایسه فنی و اقتصادی ترانزیستور BLF571 مبنای طراحی مدولهای تقویت کننده قرار گرفت. این ترانزیستور قادر به تامین توان ۶۰۰ وات در فرکانس مورد نظر (107MHz) است که با استفاده از دو عدد از این ترانزیستور و ترکیب پوش پول به شرط داشتن کولینگ مناسب میتوان به توان 1.2kW در هر مدول دست یافت [6] لیکن جهت اطمینان حداکثر توان هر مدول را 1kW در نظر میگیریم هر مدول شامل مدارات تطبیق امپدانس جهت انتقال توان با بار ۵۰ اهمی و همچنین سیرکولاتور جهت محافظت در برابر توان برگشتی است. شکل ۲ بلوک دیگر طراحی شده جهت یک تقویت کننده ترانزیستوری 10kW را نشان میدهد



مقادیر المانهای بکاررفته در مدار بر اساس فرکانس 107.5MHz که در واقع فرکانس رزونانس محفظه است محاسبه گردیده است هر مدول مجهز به یک منبع تغذیه سوئیچینگ با ولتاژ 50V dc و توان 2kW می باشد طراحی شبیه سازی مدولهای تقویت کننده در نرم افزار ads صورت گرفته است. برای رسیدن به توان 10kW موج پیوسته با در نظر گرفتن تلفات در بدترین شرایط مربوط به اجزای تقویت کننده خصوصا " ترکیب کننده توان میتوان با ترکیب ۱۲ عدد از مدولهای مذکور در سه طبقه مطابق شکل ۲ به توان مورد نظر دست یافت چنانچه در شکل ۲ مشاهده میگردد هر طبقه شامل چهار مدول تقویت کننده 1kW میباشد با توجه به این بلوک دیاگرام و با در نظر گرفتن گین مدولهای تقویت کننده توان 1W ارسالی از LLRF تا سطح 100w تقویت شده سپس این توان توسط یک تقسیم کننده توان 1/3 به سه قسمت تقسیم شده و به سه عدد تقسیم کننده 1/4 داده شده این توانها توسط دوازده مدول تا حد 1kW تقویت شده و سپس مطابق شکل ۲ با سه عدد ترکیب کننده توان 1/4 جمع شده و در نهایت خروجی این ترکیب کننده ها به ترکیب کننده نهایی 3/1 داده شده و توسط یک کوپلر جهتی به خروجی منتقل می شود لازم بذکر است که تقسیم کننده 1/4 و ترکیب کننده های توان 1/4 در یک مجموعه بصورت قرینه قرار دارد بطوری که در یک طرف تقسیم کننده و در یک طرف ترکیب کننده توان قرار دارد. طراحی کلیه تقسیم کننده ها و ترکیب کننده ها در نرم افزار SOLIDWORK و شبیه سازی آنها در نرم افزار CST صورت گرفته است. چنانچه گفتیم برای محافظت از آسیب دیدگی هر ماژول یک سیرکولاتور مناسب در خروجی وصل شده و میزان توان رفت و برگشت تحت نظر سیستم کنترل و مونیتورینگ قرار گرفته و

در صورت بروز خطا در هر کدام از ماژول‌ها، واحدهای در معرض خطر در زمان کمتر از 5uS از مدار خارج می‌شوند. دما، جریان و بقیه پارامترهای حیاتی هر ماژول به طور مداوم توسط واحد کنترل بررسی می‌شوند و جهت نمایش وضعیت سیستم به واحد نمایش محلی رک و پورت ارتباطی کامپیوتر فرستاده می‌شوند. جهت محاسبه کولینگ مناسب برای مدولهای تقویت کننده باید در نظر داشت که دمای صفحه مسی زیر ماژول حداکثر 65°C باشد و با توجه به دمای محیط حداکثر 45°C لازم است از یک هیت سینک با مقاومت حرارتی مناسب استفاده شود برای انتخاب یک هیت سینک مناسب میبایست شدت شارش مایع خنک کننده، دمای مایع خنک کننده، گرمای تولید شده توسط ترانزیستور و حداکثر دمای قابل تحمل آنرا در نظر داشت که با استفاده از این اطلاعات و روابط انتقال حرارت و همچنین شبیه سازی های صورت گرفته در نرم افزار ANSYS اقدام به طراحی سیستم کولینگ نمودیم و با توجه به نتایج حاصله در ساخت از هیت سینک آلومینیومی با مسیرهای گردش آب با لوله های مسی استفاده می نمودیم و ترانزیستور مذکور را از یک طرف و سیرکولاتور را از طرف دیگر با گریس مخصوص انتقال حرارت به این خنک کننده متصل کردیم. در شکل ۳ نمای دو طرف مدول تقویت کننده با توان 1kW و همچنین تصویری از ترکیب کننده های توان و سیستم نهائی مونتاژ شده که مورد تست نهائی نیز قرار گرفته است را مشاهده می کنید



شکل ۳: تقویت کننده ترانزیستوری ساخته شده با توان 10kW موج پیوسته و برخی از اجزای آن

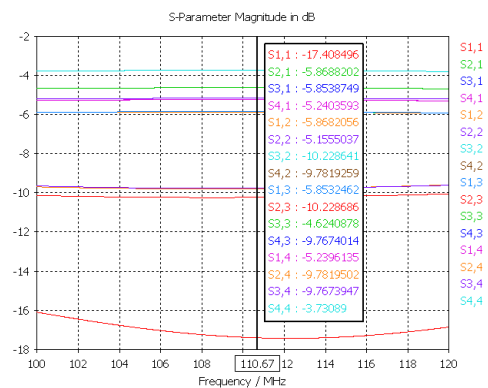
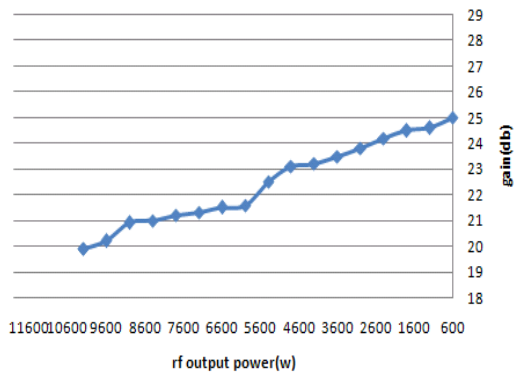
نتایج:

با توجه به محاسبات صورت گرفته از تستهای عملی و همچنین شبیه سازیهای انجام شده در نرم افزار های ADS، CST، ANSYS که در این طرح مورد استفاده قرار گرفته است پارامترهای بدست آمده مربوط به هر مدول تقویت کننده و سیرکولاتورها بترتیب در جدول ۱ و ۲ نشان داده شده است که با توجه به این جداول مشاهده میگردد که میزان VSWR و گین مناسب و مدار دارای تلفات کم و راندمان بالا می باشد

جدول ۱: پارامترهای مهم محاسبه شده در هر مدول جدول ۲: پارامترهای محاسبه شده در هر سیرکولاتورها

Parameter	Min	Max	Unit	parameter	value	unit
Frequency	106	108	MHz	Drain voltage(vs)	50	vdc
Isolation	20	-	dB	Supply current(is)	36	A dc
Insertion Loss	-	0.5	dB	VSWR	1.13	
VSWR	-	1.125	-	Temperature	-40,+80	c
Power(cw)	-	1200	W	Rf input	4.5	w
Temperature	0	+70	°C	Rf out put	1250	w
Impedance	50	50	Ω	Input return loss	-25	db
				Operating frequency	87-108	MHz
				Power gain(max)	25	db
				efficiency	76	%

نمودار مربوط به نتایج شبیه سازی پارامترهای S ترکیب کننده نهایی که با نتایج حاصله از تستهای عملی نیز کاملا سازگاری دارد در شکل ۴ نشان داده شده است



شکل ۴: پارامترهای S مربوط به ترکیب کننده نهایی
شکل ۵: اثر افزایش توان مدولها بر روی گین نهایی
با توجه به نتایج حاصل از شکل ۴ مشاهده میگردد که ترکیب کننده نهایی توان در کلیه پورتهای خود تطبیق امپدانس بسیار خوبی دارد که با توجه به آن می توان نتیجه گرفت که حداکثر انتقال توان در ترکیب توان صورت گرفته و تلفات توان بسیار ناچیز است. همچنین نتایج حاصل از اندازه گیری گین نهایی تقویت کننده با توجه به افزایش توان در تقویت کننده در بازه 20dB-25dB را در شکل ۵ نشان داده شده است که با توجه به آن مشاهده میگردد که این تقویت کننده در حالت موج پیوسته (CW) دارای گین مناسبی است.

بحث و نتیجه گیری :

با توجه به نتایج حاصله و رضایت بخش نحوه کار این تقویت کننده در سیستم RF شتابدهنده رودترون می توان به مزایای تقویت کنند های ترانزیستوری نسبت به لامپی پی برد در این تقویت کننده ها برخلاف سیستم لامپی نیازی به زمان آماده سازی یا پیش گرم ساز نیست ، طول عمر این سیستم بسیار بالا است در حالی که تقویت کننده لامپی طول عمر کوتاهی دارند و در بازه های زمانی کوتاه باید تعویض شود. تکنولوژی ساخت لامپ در انحصار چند کشور می باشد ولی تقویت کننده های ترانزیستور را می توان بومی سازی کرد. قابلیت اطمینان آنها بالاتر است و نیاز به ولتاژ با لاند دارند. تقویت کننده های ترانزیستوری ساختار مدولار دارند و لذاتعمیر و نگهداری آنها بسیار راحت و سریعتر است و لذا این روش جهت طراحی سیستم RF یک شتابدهنده بسیار مناسب است .

مراجع:

- [1] J. Pottier, "A new type of RF electron accelerator: the rhodotron", *nucl. instr. meth. phys. res.*, vol b40, 943-945, 1989
- [2] D. M. Pozar, "Microwave engineering" wiley, India, 621-698, third edition, 2007
- [3] Y. Jongen, M. Abs, J.M. Capdevil, D. Defrise, F. Genin, A. NGuyen "The Rhodotron, a new high-energy, high-power, CW electron accelerator" *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, vol 89, pp:60-64, 1994
- [4] F. Scarpa, A. Facco, V. Zviagintsev, Z. Lipeneng "A 2.5KW, low cost 352 MHz solid state amplifier for cw and pulsed operation", *proceedings of EPAC 2002, france, 2002*
- [5] P. Marchand, R. Lopes, J. Polian, F. Ribeiro, T. Ruan "Hig power 352 mhz solid state amplifier for synchrotron soleil" *EPAC2004, switzerland, 2004*
- [6] NXP company technical data "Product data sheet of hf/vhf power Idmos transistor, BLF574" www.nxp.com, 2009