

Protection Considerations of High Power Vacuum Tubes Against Reflected Power Fault

Sh. Kaboli ^{*1}

* Associate Professor of Sharif University, Tehran, Iran

(Received: 28/03/2020; Accepted: 01/08/2020)

Abstract

The ceramic fracture in output RF1 window is one of the most important failure factors in high power vacuum tubes. Fast protection systems are used to protect the tube. These protection systems are activated with some measured variables such as the level of backward RF power. On the other hand, a fast protection system can be activated with noise. Therefore, a tradeoff must be done between the response time of the protection system and its sensitivity to the noise. There are many methods to determine the response time of the protection system. The level of allowable power loss in the tube failure process is one of the conventional figures of merit for protection response time determination. However, these methods are conservative and the resulted response time is usually less than the critical time which is necessary for protecting the tube. In this paper, an experimental investigation is presented about the relation between the response time of the tube protection system and the crack growth in the ceramic of RF window. It is shown that the twin growth in ceramic can be a reliable figure of merit for the response time calculation of the tube protection system.

Keywords: Vacuum Tube, Reflected Power, Fault, Protection

* Corresponding author E-mail: kaboli@sharif.edu

ملاحظات حفاظت لامپ خلا توان بالا در برابر خطای برگشت توان

شهریار کابلی*

دانشیار، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

(دریافت: ۱۳۹۹/۰۱/۰۹، پذیرش: ۱۳۹۹/۰۵/۱۱)

چکیده

لامپ‌های میکروویو یکی از اجزا مهم فرستنده‌های مخابراتی محسوب می‌شوند و در توان‌های بالا جایگزینی ندارند. مسئله برگشت توان موج در دهانه موجبر خروجی این لامپ‌ها در توان‌های بالا مشکلاتی به وجود می‌آورد. یکی از این مشکلات آسیب به سرامیک دهانه خروجی لامپ است که وظیفه جدا کردن خلا داخل لامپ را از محیط بیرونی برعهده دارد. برای حل این مشکل معمولاً سامانه‌های حفاظتی در منابع تغذیه لامپ وجود دارد که با قطع ولتاژهای تغذیه، لامپ را حفاظت می‌کند. چالشی که وجود دارد این است که اگر این سامانه حفاظت خیلی سریع باشد به نویز خیلی حساس می‌شود و باعث اختلال در عملکرد عادی فرستنده خواهد شد. از طرف دیگر اگر سامانه حفاظت کند باشد نمی‌تواند از لامپ محافظت کند. لذا تعیین دقیق سرعت سامانه حفاظتی بسیار مهم است. در این مقاله موضوع آسیب ناشی از خطای برگشت توان خروجی بر سرامیک دهانه خروجی لامپ مورد بررسی قرار می‌گیرد. با استفاده از تحلیل‌های میکروسکوپی این موضوع نشان داده می‌شود که قبل از رشد ترک در موجبر خروجی لامپ ساختارهای بلوری دوتایی به وجود می‌آیند. دما رخداد این ساختارهای دوتایی به‌عنوان معیاری برای فعال شدن سامانه حفاظت لامپ پیشنهاد می‌شود. نتایج آزمایشگاهی در تایید ایده مقاله ارائه می‌شود.

کلیدواژه‌ها: لامپ خلا، توان برگشتی، خطا، حفاظت

۱- مقدمه

که در یک لامپ خلا توان بالا رخ می‌دهد، خطای برگشت توان موج به دهانه موجبری خروجی لامپ است [۴]. البته لامپ‌ها تا حدی از توان برگشتی را می‌توانند تحمل کنند که با شاخص $VSWR^{10}$ مجاز لامپ در دهانه خروجی توسط کارخانه سازنده مشخص می‌شود. برای مواردی که توان برگشتی بیشتر است از یک جداکننده^{۱۱} در خروجی لامپ استفاده می‌شود که در صورت برگشت توان زیاد مانع ورود آن به دهانه خروجی لامپ شود. شکل (۱) نمودار بلوکی مسیر توان را در چنین حالتی نشان می‌دهد. اما در این بین حالتی وجود دارد که این ایزولاتور هم نمی‌تواند در صورت برگشت توان مانع اعمال آن به لامپ شود و آن وقتی است که توان خروجی لامپ بلافاصله و قبل از عبور از ایزولاتور به داخل لامپ برمی‌گردد. این مسئله در شکل (۲) نشان داده شده است. یکی از علل برگشت توان بلافاصله از خروجی لامپ، رخداد شکست الکتریکی در اتصال موجبری خروجی لامپ است. برگشت توان به این صورت باعث تلفات زیادی در لامپ می‌شود و عمدتاً منجر به شکسته شدن سرامیک دهانه خروجی لامپ، از بین رفتن آبی پوشش سطح کاتد و از بین رفتن لامپ می‌شود. نمودار زمانی این رخداد در شکل (۳) نشان داده شده است.

امروزه لامپ‌های خلا^۱، در زمینه‌های مختلف پزشکی، صنعتی، مخابراتی و آزمایشگاه‌های تحقیقاتی کاربردهای گسترده‌ای دارند [۱-۲]. این لامپ‌ها به‌عنوان تقویت‌کننده و یا تولیدکننده موج فرکانس رادیویی^۲ در کاربردهای فوق به‌کار می‌روند. به‌عنوان نمونه‌هایی از این لامپ‌ها تریود^۳، تترود^۴ و پنتود^۵ در فرکانس‌های تا چند صد مگاهرتز کاربرد دارند. در فرکانس‌های بالاتر می‌توان از مگنترون^۶، کلاسترئون^۷ و لامپ امواج رونده^۸ نام برد. ساختار این لامپ‌ها عموماً به‌صورت یک لوله خلا است که در داخل آن ساختاری برای تولید و یا تقویت امواج قرار دارد. از بین منابع تغذیه لامپ، منبع تغذیه کاتد لامپ بسیار مهم است چون انرژی باریکه الکترون^۹ داخل لامپ عمدتاً توسط آن تامین می‌شود. لذا حفاظت لامپ عمدتاً به معنی مدیریت انرژی تحویلی توسط این منبع تغذیه است [۳]. یکی از شایع‌ترین و مخرب‌ترین خطاهایی

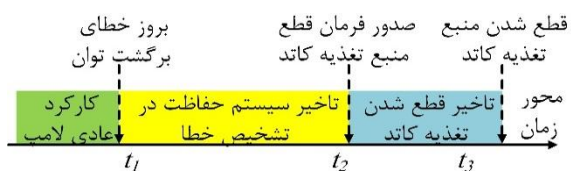
* نویسنده مسئول: kaboli@sharif.edu

- ¹ Vacuum Tubes
- ² Radio Frequency (RF)
- ³ Triode
- ⁴ Tetrode
- ⁵ Pentode
- ⁶ Magnetron
- ⁷ Klystron
- ⁸ Traveling Wave Tube
- ⁹ Electron Beam

¹⁰ Voltage Standing Wave Ratio

¹¹ Isolator

حساسیت آن به نویز زیاد می‌شود. از طرف دیگر اگر سامانه حفاظت با تاخیر عمل کند ممکن است این تاخیر در قطع کردن تغذیه کاتد در حالتی که واقعا خطای برگشت توان رخ داده است به سرامیک دهانه خروجی لامپ آسیب بزند. به این ترتیب تعیین دقیق سرعت پاسخ لازم در مدار حفاظت تغذیه کاتد لامپ یکی از مهم‌ترین چالش‌های سامانه حفاظت لامپ است.



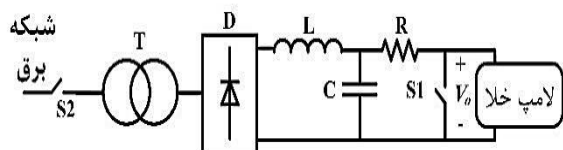
شکل (۴): نمودار زمانی حفاظت منبع تغذیه کاتد لامپ.

در این مقاله دیدگاه کاملا جدیدی برای تعیین زمان پاسخ سامانه حفاظت منبع تغذیه کاتد لامپ خلا ارائه می‌شود. تحلیل‌های میکروسکوپی انجام شده بر روی موجبر خروجی یک لامپ آسیب‌دیده نشان می‌دهد که در ساختار بلوری موجبر دوقلویی‌هایی^۲ به وجود آمده‌اند. ایجاد دوقلویی‌ها ناشی از دما بالا و در طی فرایند گداختگی^۳ فلز رخ می‌دهد. از آن‌جا که ایجاد دوقلویی‌ها بلافاصله قبل از شکست سرامیک رخ می‌دهد، می‌تواند به‌عنوان یک معیار بسیار مطمئن برای حفاظت لامپ به کار رود.

در بخش دوم این مقاله به مرور سامانه حفاظت لامپ خلا پرداخته می‌شود. در بخش سوم اثرات توان برگشتی بر موجبر خروجی یک لامپ آسیب‌دیده توان بالا بررسی می‌شوند. در بخش چهارم سامانه حفاظتی بر اساس تحلیل‌های بخش سوم طراحی شده و نتایج آزمایشگاهی آن ارائه می‌شوند. در بخش پنجم نتیجه‌گیری از کارهای انجام شده در این مقاله ارائه می‌شود.

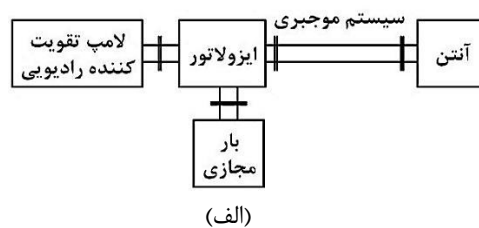
۲- منبع تغذیه فشار قوی و سامانه حفاظت لامپ

شکل (۵) نمودار بلوکی منبع تغذیه فشار قوی کاتد یک لامپ خلا را نشان می‌دهد. در این منبع تغذیه، ولتاژ AC برق ورودی به کمک یک ترانسفورماتور افزایش‌دهنده ولتاژ T افزایش دامنه پیدا می‌کند. سپس این ولتاژ پس از عبور از یکسوساز D یکسو می‌شود و به وسیله فیلتر تشکیل شده از سلف سری L و خازن C به ولتاژ DC مناسب برای کاتد لامپ تبدیل می‌شود.

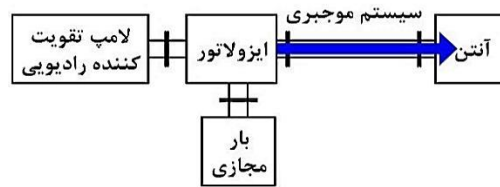


شکل (۵): نمودار بلوکی منبع تغذیه و حفاظت تیغه‌ای.

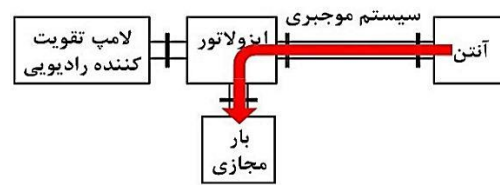
در صورت رخ دادن خطا حتی اگر ورودی منبع تغذیه را قطع نماییم باز هم انرژی ذخیره شده در خازن در لامپ تخلیه می‌شود.



(الف)



(ب)

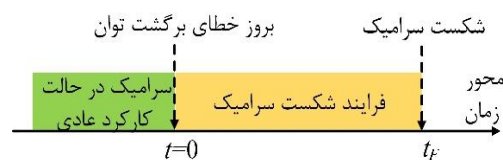


(ج)

شکل (۱): برگشت توان خروجی در لامپ، الف: نحوه اتصالات، ب: انتقال توان به بار، ج: مسیر توان برگشتی در حالت خطا در خروجی.



شکل (۲): برگشت توان از دهانه موجبری خروجی به لامپ به دلیل شکست الکتریکی.



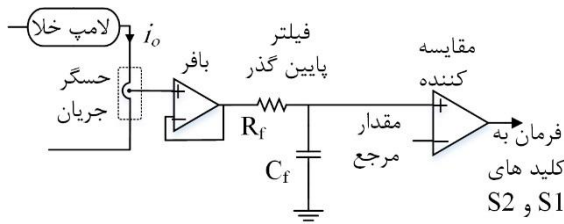
شکل (۳): نمودار زمانی فرایند شکست سرامیک دهانه خروجی لامپ.

برای جلوگیری از آسیب به سرامیک دهانه موجبری لامپ باید منبع تغذیه کاتد لامپ که عمده انرژی لامپ را تامین می‌کند در هنگام بروز خطا قطع شود. این اتفاق باید حتما قبل از زمان t_F در شکل (۳) رخ دهد. در غیر این صورت شکست سرامیک حتمی خواهد بود. این کار با استفاده از سامانه حفاظت در منبع تغذیه کاتد لامپ انجام می‌شود. در مورد خطای برگشت توان به داخل لامپ چند روش برای تشخیص وجود دارد که از متداول‌ترین آن‌ها قرائت جریان بدنه^۱ لامپ و قرائت توان برگشتی می‌باشند [۵-۶]. شکل (۴) نمودار زمانی فرایند تشخیص خطا و قطع منبع تغذیه کاتد لامپ را نشان می‌دهد.

چالشی که وجود دارد این است که اگر سامانه حفاظت خیلی سریع باشد از نظر حفاظت لامپ خیلی موفق عمل می‌کند اما

^۲ Twins
^۳ Annealing

^۱ Body Current



شکل (۷): نمودار مداری سامانه تشخیص خطا.

در این شکل که سامانه سنتی تشخیص خطا را در لامپ نشان می‌دهد، از جریان لامپ برای حفاظت استفاده شده است. معمولاً این جریان، جریان بدنه لامپ است. فیلتر پایین‌گذر نشان‌دهنده شده با محدود کردن پهنای باند سامانه تشخیص خطا نویزپذیری آن را کاهش می‌دهد اما در عوض با ایجاد تاخیر زمانی باعث می‌شود لامپ مدت بیشتری در حالت خطا بماند. به این ترتیب این که فرمان خطای مدار حفاظت تیغه‌ای با چه تاخیری صادر شود یک سوال اساسی است و در بخش بعدی مقاله برای آن یک ایده کاملاً جدید ارائه می‌شود.

۳- روش پیشنهادی بر اساس اثر برگشت توان بر دهانه موجبری لامپ

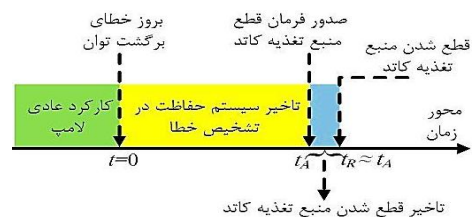
بر هر ساختار بلوری که تحت تنش قرار گیرد رابطه (۱) حاکم است [۹].

$$\dot{\epsilon}_{\text{applied}} = \dot{\epsilon}_{\text{dislocation}} + \dot{\epsilon}_{\text{twin}} \quad (1)$$

در این رابطه $\dot{\epsilon}_{\text{applied}}$ نرخ تنش وارد شده^۳، $\dot{\epsilon}_{\text{dislocation}}$ نرخ حرکت نابجای^۴ ساختار بلوری و $\dot{\epsilon}_{\text{twin}}$ نرخ ایجاد دوقلویی^۵ است. نرخ ایجاد دوقلویی خیلی بیشتر از نرخ حرکت نابجای بلورها است. به عبارت دیگر هنگامیکه یک ساختار بلوری تحت تنش قرار می‌گیرد ابتدا سعی می‌کند با ایجاد دوقلویی انرژی تنش وارد شده را میرا کند. اگر زمان اعمال یا مقدار تنش افزایش یابد آنگاه فرایند حرکت نابجای ساختار بلوری آغاز می‌شود و ساختار انبساط می‌یابد. در فرایند انبساط و بسته به مقدار چقرمگی^۶ ساختار بلوری، رشد ترک^۷ در ساختار آغاز می‌شود [۱۰].

در صورتی که خطای توان برگشتی در دهانه خروجی لامپ رخ دهد تلفات دهانه موجبری افزایش می‌یابد. تلفات حرارتی باعث انبساط موجبر خروجی لامپ که سرامیک دهانه خروجی نیز در آن بخش قرار دارد می‌شود و تنش مکانیکی به وجود آمده آنقدر به

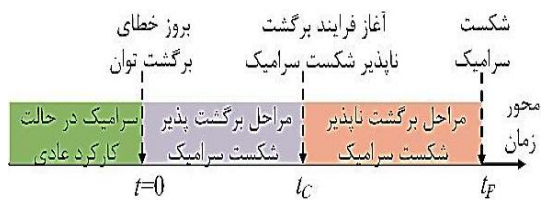
بنابراین باید امکان حفاظت بار در مقابل تخلیه انرژی خازن خروجی در نظر گرفته شود. یک راهکار ساده این است که خازن فیلتر خروجی منبع تغذیه تا حد ممکن کوچک باشد تا انرژی ذخیره شده در آن کاهش یابد. برای نمونه در یک لامپ خاص انرژی تخلیه شده در لامپ در هنگام وقوع خطای اتصال کوتاه باید کمتر از ۱۰J باشد. با فرض ولتاژ خروجی ۱۰kV برای منبع تغذیه نتیجه می‌شود خازن خروجی می‌باید کمتر از ۲۰۰nF باشد. اما این خازن با این مقدار کم نمی‌تواند ریبِل بسیار کم مطلوب را در این منبع تغذیه تامین کند. به دست آوردن ریزموج^۱ خروجی مورد نظر منبع تغذیه با خازن خروجی کم یکی از مشکلات اساسی منابع تغذیه فشار قوی است. راه کار دیگر استفاده از خازن خروجی بزرگ و مناسب برای کاهش ریبِل به همراه یک حفاظت مناسب است به طوری که بتوان در موقع اتصال کوتاه بار، از تخلیه انرژی خازن در بار جلوگیری نمود. یک روش اساسی برای جلوگیری از تلف شدن بیش از حد انرژی ذخیره شده در خازن C و انرژی ورودی از منبع تغذیه در لامپ استفاده از مدار حفاظت تیغه‌ای^۲ می‌باشد [۷]. مدار حفاظت تیغه‌ای انرژی ذخیره شده در فیلتر خازنی منبع تغذیه را هنگام ایجاد خطا به جای لامپ به کلید سری S1 در شکل (۵) منحرف می‌نماید و از صدمه دیدن لامپ جلوگیری می‌کند. مدار حفاظت تیغه‌ای به صورت موازی دو سر منبع بار قرار می‌گیرد و هنگام رخ دادن خطا در لامپ خروجی را اتصال کوتاه می‌نماید و از تلف شدن انرژی در لامپ جلوگیری می‌کند. حفاظت تیغه‌ای باعث اتصال کوتاه سریع لامپ می‌شود و حالت‌های گذرا عناصر فیلتر خروجی منبع تغذیه را بر کاتد لامپ بی‌اثر می‌کند. به این ترتیب نمودار زمانی فرایند حفاظت لامپ از شکل (۴) به صورت شکل (۶) در می‌آید. کوتاه شدن حالت گذرای قطع منبع تغذیه کاتد بسیار مطلوب است و به حفظ سلامت لامپ در خطای برگشت توان بسیار کمک می‌کند. اکنون که این بخش از زمان حفاظت تقریباً به صفر رسیده است ($t_A \approx t_R$)، مسئله مهم تعیین صحیح زمان تشخیص خطا یعنی بازه زمانی $t=0$ تا t_A است. همان‌طور که قبلاً گفته شد کاهش این زمان از نظر حفاظت لامپ بسیار مطلوب است اما منجر به حساسیت سامانه حفاظت به نویز می‌شود [۸]. به همین دلیل معمولاً در این بخش مقداری تاخیر مانند شکل (۷) وارد می‌کنند.



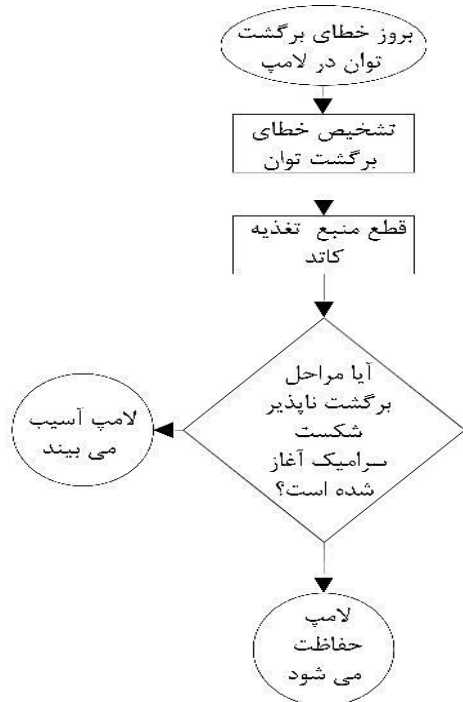
شکل (۶): نمودار زمانی حفاظت بهبود یافته منبع تغذیه کاتد لامپ با استفاده از حفاظت تیغه‌ای.

³ Applied Strain Rate⁴ Dislocation Motion⁵ Twinning⁶ Toughness⁷ Crack¹ Ripple² Crowbar

ج- ضریب هدایت گرمایی سرامیک‌ها به خوبی فلزات نیست. در نتیجه قرائت دما باید در تمام نقاط سرامیک انجام شود که کار دشواری است. این کار در فلزاتی مانند مس به دلیل هدایت حرارتی خوب آن می‌تواند فقط در یک نقطه انجام شود.



(الف)



(ب)

شکل (۸): تفکیک زمانی فرایند شکست سرامیک به دو بخش برگشت پذیر و برگشت ناپذیر، الف: نمودار زمانی، ب: فلوجارت مراحل حفاظت.

شکل (۹) عکس میکروسکوپی از موجبر خروجی یک لامپ امواج رونده توان بالا را نشان می‌دهد که در اثر خطای برگشت توان آسیب دیده است و سرامیک دهانه آن ترک خورده است. دوقلویی‌های ایجاد شده در ساختار بلوری موجبر به خوبی مشخص هستند.

شکل (۱۰) ساختار بلوری سطح موجبر خروجی این لامپ را در حالت سالم نشان می‌دهد که در آن خطای برگشت توان رخ نداده است. مشاهده می‌شود که اثرات گداختگی و رشد دوقلویی‌ها در آن دیده نمی‌شود. بنابراین دمای موجبر به‌عنوان یک معیار قابل اطمینان از مسئله توان برگشتی در دهانه خروجی لامپ می‌تواند به کار رود.

سرامیک فشار می‌آورد که باعث شکست آن می‌شود [۱۱]. بنابراین این نتیجه به دست می‌آید که چون مهم‌ترین وظیفه سامانه حفاظت لامپ جلوگیری از شکست سرامیک دهانه موجبری خروجی لامپ است، اگر قطع شدن تغذیه کاتد قبل از پایان زمان ایجاد دوقلویی‌ها در سرامیک دهانه لامپ باشد قطعاً این سرامیک وارد فرایند شکست نمی‌شود و لامپ آسیب نمی‌بیند. با این توضیح یکبار دیگر شکل (۳) مورد توجه قرار می‌گیرد. در این شکل بازه زمانی شکست سرامیک را می‌توان به دو بخش مطابق شکل (۸) تقسیم کرد. بخش اول از زمان $t=0$ تا t_c که مربوط به تغییرات برگشت پذیر در سرامیک است طوری که اگر تنش روی سرامیک برطرف شود رشد ترک در سرامیک آغاز نمی‌شود [۱۲]. در این بازه است که سرامیک با ایجاد دوقلویی، تنش وارد شده به خود ناشی از انبساط موجبر خروجی لامپ را میرا می‌کند. بخش دوم از زمان t_c تا t_F است که مربوط به بازه رشد ترک می‌باشد. این بخش برگشت ناپذیر می‌باشد و در صورت آغاز آن، رشد ترک در سرامیک اجتناب ناپذیر است. بنابراین اگر رشد دوقلویی‌ها در سرامیک تشخیص داده شود به‌عنوان یک معیار بسیار مطمئن از آستانه بروز شکست می‌تواند برای صدور فرمان قطع منبع تغذیه کاتد به کار رود.

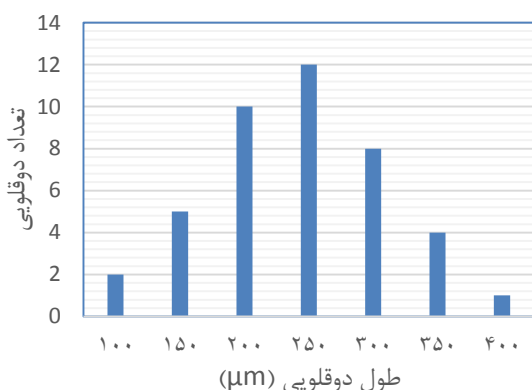
اکنون مسئله این است که سامانه حفاظت چگونه از رشد دوقلویی‌ها در سرامیک آگاه شود. نکته بسیار مهم که ایده فوق را به صورت یک رهیافت به موضوع حفاظت لامپ تبدیل می‌کند این است که تنش وارد شده به موجبر خروجی لامپ به صورت تنش حرارتی است. موجبر فلزی است و معمولاً از مس ساخته می‌شود. در فلزاتی که در اثر افزایش درجه حرارت تحت فرایند گداختگی قرار می‌گیرند، رابطه معناداری بین رشد دوقلویی‌ها و دما وجود دارد. به همین دلیل در این مقاله دمای موجبری که سرامیک در داخل آن قرار دارد به‌عنوان معیار رشد دوقلویی‌ها مطرح می‌شود. به عبارت دیگر اصل ایده این مقاله تشخیص رشد دوقلویی‌ها در سرامیک است اما چون برای این تشخیص در سرامیک مشکلاتی وجود دارد، از یک واسطه خیلی نزدیک که موجبر خروجی لامپ است برای این کار استفاده می‌شود. مشکلات تشخیص دوقلویی‌ها در سرامیک شامل موارد زیر است.

الف- سرامیک در مسیر توان خروجی لامپ است و قرائت دمای آن و نصب حسگر دما مشکل است. در موجبر خروجی لامپ که از فلز مس با هدایت حرارتی خوب ساخته شده است، قرائت دما می‌تواند از دیواره بیرونی موجبر و به سادگی انجام شود.

ب- رابطه دما و رشد دوقلویی‌ها در سرامیک‌ها به اندازه فلزات دقیق و مشخص نیست.



شکل (۱۲): ساختار بلوری سطح موجبر مسی در دمای ۱۲۰°C.



شکل (۱۳): توزیع آماری دوقلوئی‌ها در سطح موجبر در دمای ۱۲۰°C.

شکل (۱۴) (الف) نمودار مداری کلید حفاظت تیغه‌ای را نشان می‌دهد. با توجه به ولتاژ بالا کاتد لامپ که در اینجا ۱۰ kV است، از ۱۵ عدد تریستور با ولتاژ نامی ۱ kV استفاده شده است. فرمان تریستورها توسط ترانسفورمر پالس T با چند ثانویه و یک اولیه مشترک صادر می‌شود. دیود D از بروز ولتاژ منفی روی گیت-کاتد تریستورها جلوگیری می‌کند و مقاومت R برای توزیع یکنواخت ولتاژ روی تریستورها در حالت قطع به کار می‌رود.

شکل (۱۴) (ب) مدار ساده شده سامانه حفاظت را نشان می‌دهد. مقاومت R2 برای جلوگیری از صفر شدن مقاومت معادل لامپ در حالت خطا قرار داده شده است. سلف برای کنترل پخش جریان تریستورها قرار داده شده است. در اثر بروز خطا برگشت توان در لامپ تریستورها توسط مدار تشخیص خطا فعال می‌شوند. از این لحظه به بعد جریان خازن فیلتر C، جریان تریستورها و جریان لامپ به ترتیب بر طبق معادلات زیر بیان می‌شوند.

$$i_{fc}(t) = \frac{V_{DC}}{R_1} + \left(\frac{V_{DC}}{R_1 + R_2} - \frac{V_{DC}}{R_1} \right) e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (2)$$

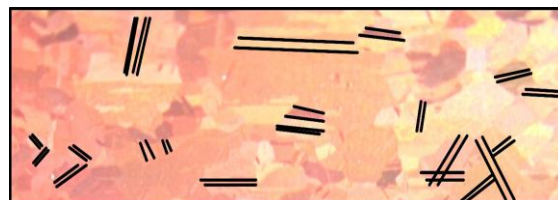
$$i_{cb}(t) = \frac{V_{DC}}{R_1} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (3)$$

$$i_f(t) = i_{fc}(t) - i_{cb}(t) = \frac{V_{DC}}{R_1 + R_2} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (4)$$

که در این رابطه‌ها V_{DC} ولتاژ DC روی خازن C است و ثابت زمانی τ بر طبق رابطه (۵) به دست می‌آید:



(الف)



(ب)

شکل (۹): اثر گداختگی در اثر گرمای شدید در موجبر خروجی لامپ، الف: ساختار بلوری سطح موجبر، ب: محل ایجاد دوقلوئی‌ها.



شکل (۱۰): ساختار بلوری سطح موجبر مسی خروجی لامپ سالم که تحت خطای برگشت توان قرار نگرفته است.

۴. طرح سامانه حفاظت

سامانه حفاظت لامپ که به صورت حفاظت تیغه‌ای می‌باشد از یک حسگر^۱ دما روی سطح خارجی موجبر خروجی لامپ به عنوان حسگر خطای توان برگشتی استفاده می‌کند. نکته مهم در اینجا تعیین دمایی است که باید به عنوان آستانه خطا به کلید حفاظت تیغه‌ای فرمان دهد. برای تعیین این دما چند آزمایش گداختگی روی موجبر خروجی لامپ انجام شده است. شکل (۱۱) ساختار بلوری سطح موجبر را در دمای ۸۰°C نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که هنوز دوقلوئی‌ها تشکیل نشده‌اند ولی مرز بین بلورها در حال مشخص شدن است. شکل (۱۲) ساختار بلوری سطح موجبر را در دمای ۱۲۰°C نشان می‌دهد. رشد دوقلوئی‌ها آغاز شده است و این مقدمه‌ای برای انبساط موجبر است. به همین دلیل این دما به عنوان معیار حفاظت لامپ انتخاب می‌شود. شکل (۱۳) نمودار آماری ابعاد و تعداد دوقلوئی‌ها را در این دما نشان می‌دهد.

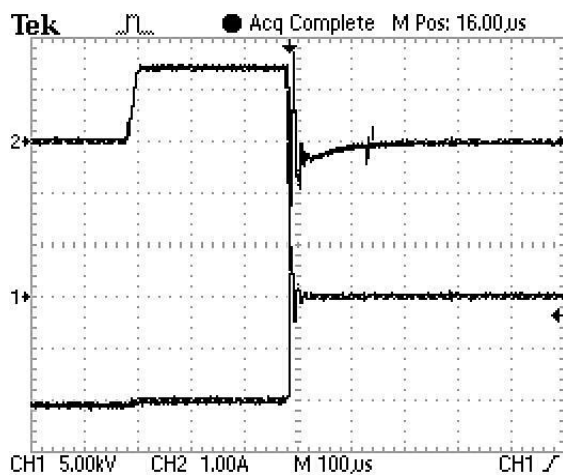


شکل (۱۱): ساختار بلوری سطح موجبر مسی در دمای ۸۰°C.

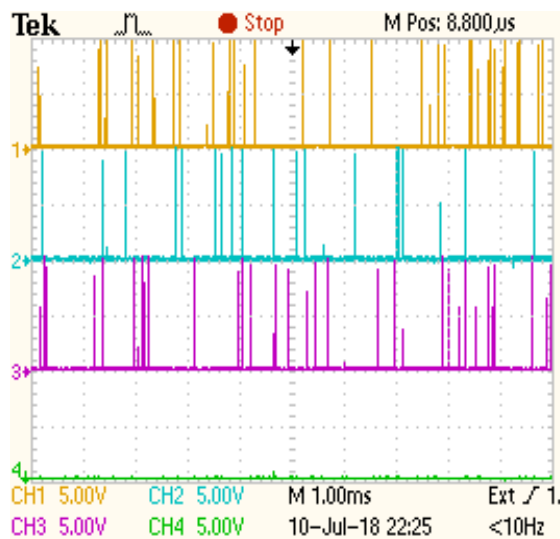
¹ Sensor

جدول (۱): مشخصات سامانه مورد آزمایش.

ولتاژ نامی لامپ	۱۰ kV
جریان نامی لامپ	۱۰۰ mA
مقاومت R1	۶ kΩ
مقاومت R2	۵۰ Ω
سلف L_{cb}	۱۰۰ μH
خازن C	۲۰ μF



شکل (۱۵): شکل موج‌های جریان لامپ و ولتاژ کاتد در زمان تشخیص خطا.



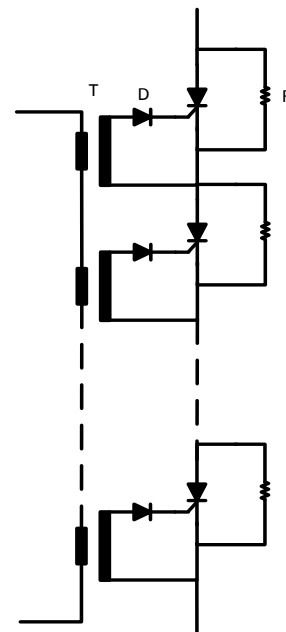
شکل (۱۶): شکل موج‌های فرمان خطا به کلید حفاظت تیغه‌ای در حالت‌های مختلف سرعت پاسخ سامانه حفاظت، کانال ۱: تاخیر ۱۰ μs، کانال ۲: تاخیر ۲۰ μs، کانال ۳: تاخیر ۵۰ μs، کانال ۴: تاخیر ۳۰۰ μs.

۵- نتیجه گیری

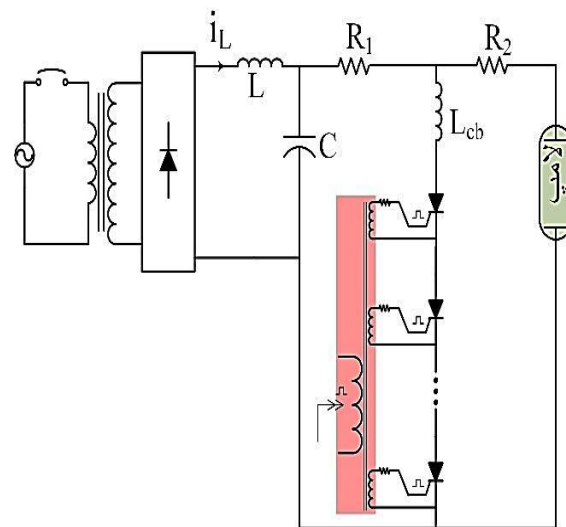
در این مقاله روش جدیدی برای تشخیص به موقع خطای برگشت توان در لامپ‌های توان بالا ارائه شد. نتایج این پژوهش به شرح زیر خلاصه می‌شوند.

$$\tau = \frac{L_{cb}}{(R_1 \parallel R_2)} \quad (۵)$$

شکل (۱۵) ولتاژ کاتد و جریان لامپ را در حالت خطا نشان می‌دهد. در این حالت مقادیر مورد آزمایش بر طبق جدول (۱) می‌باشند [۷]. ملاحظه می‌شود که با تاخیر حدود ۳۰۰ μs ولتاژ کاتد لامپ صفر شده است و عمل حفاظت به خوبی انجام شده است. شکل (۱۶) شکل موج‌های فرمان خطا به کلید حفاظت تیغه‌ای در حالت‌های مختلف سرعت پاسخ سامانه حفاظت را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت سامانه حفاظت و کاهش تاخیر آن، میزان نویزپذیری افزایش یافته است.



(الف)



(ب)

شکل (۱۴): سامانه حفاظت پیشنهادی، الف: ساختار مدار کلید S1 در حفاظت تیغه‌ای، ب: الگوی مدار.

- Fault for Pulsed Power Applications,” IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 33, no. 5, pp. 3779–3790, 2018.
- [4] Y. Satio, N. Matuda, S. Anami, A. Kinbara, J. Horikoshi, and J. Tanaka, “Breakdown of alumina RF windows,” IEEE Transactions on Electrical Insulation, vol. 24, no. 6, pp. 1029–1032, 1989.
- [5] S. R. Jang, J. H. Seo, and H. J. Ryoo, “Development of 50-kV 100-kW Three-Phase Resonant Converter for 95-GHz Gyrotron,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 63, no. 11, pp. 6674–6683, 2016.
- [6] S. Mohsenzade, M. Zarghany, M. Aghaei, and S. Kaboli, “A High-Voltage Pulse Generator with Continuously Variable Pulsewidth Based on a Modified PFN,” IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 45, no. 5, pp. 849–858, 2017.
- [7] K. Pouresmaeil and S. Kaboli, “A Reopened Crowbar Protection for Increasing the Resiliency of the Vacuum Tube High-Voltage DC Power Supply Against the Vacuum Arc,” IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 47, no. 5, pp. 2717–2725, 2019.
- [8] S. Mohsenzade, M. Zarghani, and S. Kaboli, “A Voltage Balancing Scheme for Series-connected IGBTs to Increase Their Expected Lifetime in Pulsed Load Applications,” IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 9, no. 1, pp. 461–471, 2021.
- [9] F. Zhao, L. Wang, D. Fan, B. X. Bie, X. M. Zhou, T. Suo, Y. L. Li, M. W. Chen, C. L. Liu, M. L. Oi, M. H. Zhu, and S. N. Luo, “Macrodeformation Twins in Single-Crystal Aluminum,” Physical Review Letter, vol. 116, no. 7, pp. 075501-1-075501-5, 2016.
- [10] H. Matsuo, M. Mitsuhashi, K. Ikeda, S. Hatab, and H. Nakashima, “Electron microscopy analysis for crack propagation behavior of alumina,” International Journal of Fatigue, 32, pp. 592-598, 2010.
- [11] H. Ao, H. Asano, F. Naito, N. Ouchi, J. Tamura, and K. Takata, “Impedance matching of pillbox-type RF windows and direct measurement of the ceramic relative dielectric constant,” Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A, vol. 737, pp. 65-70, 2014.
- [12] J. Castaing, A. He, K. P. D. Lagerlof, and A. H. Heuer, “Deformation of sapphire (α -Al₂O₃) by basal slip and basal twinning below 700°C,” Philosophical Magazine, vol. 84, no. 11, pp. 1113–1125, 2004.
- الف- خطای برگشت توان باعث بروز تلفات قابل توجه در دهانه خروجی لامپ شده و منجر به ایجاد ترک در سرامیک دهانه لامپ می‌شود.
- ب- رشد دوقلوبی‌ها معیاری برای فاز برگشت‌پذیر شکست سرامیک است.
- ج- با قرائت دمای موجبر خروجی می‌توان با یک واسطه مطمئن به دمایی که فرایند برگشت‌ناپذیر شکست سرامیک آغاز می‌شود دست یافت.
- د- دمایی که فرمان قطع منبع تغذیه کاتد در آن رخ می‌دهد با آزمایش‌های گداختگی حدود ۱۲۰ C به‌دست می‌آید که با یک حسگر دما روی سطح خارجی موجبر قابل قرائت است.
- ه- حفاظت تیغه‌ای با تاخیر ۳۰۰ μ s می‌تواند ولتاژ کاتد لامپ را به صفر برساند که از نظر حفاظت لامپ عدد مناسبی است.
- و- تحلیل‌های میکروسکوپی ارائه شده در زمان حقیقی امکان اجرا ندارند. این تحلیل‌ها برای تعیین زمان حفاظت مناسب ارائه شدند. بنابراین نتیجه این تحلیل‌ها است که به‌صورت یک زمان حفاظت مناسب در زمان حقیقی عمل می‌کند.

۶- مراجع

- [1] H. Zibaeinejad and H. Abiri, “Analysis of Cathode Shape Effect on the Performance of Realistic Magnetron,” Scientific Journal of Radar, vol. 5, no. 4, 2018. (In Persian)
- [2] A. Farajzadeh and S. Kaboli, “Analysis of Spark Gap Shape Effect on the Output Voltage of Blumlein Bipolar Pulse Former,” Scientific Journal of applied electromagnetics, vol. 7, no. 2, 2020. (In Persian)
- [3] S. Mohsenzade, M. Zarghany, and S. Kaboli, “A Series Stacked IGBT Switch With Robustness Against Short-Circuit

Protection Considerations of High Power Vacuum Tubes against Reflected Power Fault

Sh. Kaboli*

* Associate Professor of Sharif University, Tehran, Iran

Email Address: kaboli@sharif.edu

(Received: 00/00/2021; Accepted: 00/00/2021)

Abstract

The ceramic fracture in output RF¹ window is one of the most important failure factors in high power vacuum tubes. Fast protection systems are used to protect the tube. These protection systems are activated with some measured variables such as the level of backward RF power. On the other hand, a fast protection system can be activated with noise. Therefore, a tradeoff must be done between the response time of the protection system and its sensitivity to the noise. There are many methods to determine the response time of the protection system. The level of allowable power loss in the tube failure process is one of the conventional figures of merit for protection response time determination. However, these methods are conservative and the resulted response time is usually less than the critical time which is necessary for protecting the tube. In this paper, an experimental investigation is presented about the relation between the response time of the tube protection system and the crack growth in the ceramic of RF window. It is shown that the twin growth in ceramic can be a reliable figure of merit for the response time calculation of the tube protection system.

Keywords: Vacuum tube, Reflected power, Fault, Protection

* Corresponding Author E-mail: kaboli@sharif.edu