

صلاة الاضلاع



دانشگاه تهران

پردیس دانشکده های فنی
دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

مطالعه شکست الکتریکی به منظور طراحی کلید بسته
شونده با زمان عملکرد زیر نانو ثانیه با فشار کمتر از یک
اتمسفر

نگارش: احسان هاشمی

اساتید راهنما:

دکتر کاوه نیایش، دکتر امیر عباس شایگانی اکمل

پایان نامه جهت دریافت درجه کارشناسی ارشد

در

رشته: مهندسی برق-قدرت

شهریور ۱۳۸۷



دانشگاه تهران
پردیس دانشکده های فنی
پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی برق

**بررسی و شبیه سازی شکست الکتریکی به منظور طراحی کلید بسته شونده با
زمان عملکرد زیر نانو ثانیه در فشار کمتر از اتمسفر**

نگارش: احسان هاشمی

از این پایان نامه در تاریخ ۳۰ / ۶ / ۸۷ در مقابل هیأت داوران دفاع گردید و مورد تصویب قرار گرفت.

معاون آموزشی و تحصیلات تکمیلی پردیس دانشکده های فنی: دکتر جواد فیض
رئیس دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر: دکتر پرویز جبهه دار مارالانی
معاون پژوهشی و تحصیلات تکمیلی دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر: دکتر سعید نادر اصفهانی
اساتید راهنما: دکتر کاوه نیایش، دکتر امیر عباس شایگانی اکمل
عضو هیأت داوران: دکتر حسین محسنی
عضو هیأت داوران: دکتر حسن منصف
عضو هیأت داوران: دکتر اصغر اکبری

تعهدنامه اصالت اثر

اینجانب، احسان هاشمی تأیید می‌کنم که مطالب مندرج در این پایان نامه، حاصل کار پژوهشی اینجانب است و دستاوردهای پژوهشی دیگران، که در این نوشته از آنها استفاد شده است، مطابق مقررات ارجاع گردیده است. در ضمن، این پایان نامه قبلاً برای اهراز هیچ مدرک هم سطح یا بالاتر ارایه نشده است. کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر متعلق به دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه تهران می باشد.

احسان هاشمی

قدردانی

در ابتدا بر خود لازم می بینم از پدر و مادر عزیزم که همواره مشوق و مایه دلگرمی من بوده اند یاد کرده و تقدیر به عمل آورم.

از اساتید راهنما آقایان دکتر کاوه نیایش و کتر امیر عباس شایگانی اکمل به خاطر راهنمایی ها و مساعدت های بی دریغشان در جهت پیشبرد این پایان نامه قدردانی می کنم. همچنین بابت حمایت ها و همفکری های استاد گرامی دکتر حسین محسنی از ایشان کمال تشکر را به عمل می آورم.

در تکمیل این پایان نامه دوستانی چند مرا یاری نمودند که در اینجا بر خود لازم می بینم از این عزیزان قدر دانی نمایم. از آقایان مهندس ادريس عاقب و مهندس جواد کمیجانی به دلیل همیاری در به ثمر رساندن شبیه سازی شکست الکتريکی، آقای مهندس جویا جدیدیان به خاطر همکاری در بخش مدلسازی پلاسما و آقای مهندس سامان برزی به دلیل همیاریشان در پردازش و بهبود کیفیت تصاویر کمال تشکر را به عمل می آورم.

این پایان نامه حاصل همیاری همه این عزیزان با اینجانب می باشد.

احسان هاشمی

شهریور ۱۳۸۷

مطالعه شکست الکتریکی به منظور طراحی کلید بسته شونده با زمان عملکرد زیر نانو ثانیه با فشار کمتر از یک اتمسفر

نام و نام خانوادگی: احسان هاشمی

شماره دانشجویی: ۸۱۰۱۸۵۱۱۹

رشته تحصیلی و گرایش: مهندسی برق گرایش قدرت - سیستم و فشار قوی

دانشکده: مهندسی برق و کامپیوتر

مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد

تاریخ دفاع: ۱۳۸۷/۶/۳۰

اساتید راهنما: دکتر کاوه نیایش و دکتر امیر عباس شایگانی اکمل

چکیده پایان نامه کارشناسی ارشد:

کلید های بسته شونده دارای فاصله هوایی موسوم به اسپارک گپ^۱ کاربرد وسیعی در مهندسی فشار قوی و توان پالسی دارند. مبنای عملکرد این کلید ها مبتنی بر شکست الکتریکی می باشد. در این پایان نامه، هدف شبیه سازی شکست الکتریکی به منظور طراحی کلید بسته شونده با زمان عملکرد زیر نانو ثانیه بوده است.

کلید هایی با زمان شکست بسیار کوتاه در سیستم های رادار با پهنای باند بسیار بالا، محدود کننده های پلاسما^۲ و سیستم های شکل دهنده پالس در مهندسی توان پالسی به کار می رود.

در فصل اول این پایان نامه مختصری راجع به مهندسی توان پالسی و معرفی کلیات سیستم های تولید پالس بیان می گردد. در ادامه نقش و انواع کلید در مهندسی توان پالسی معرفی می شود. از میان این کلید ها، کلید های بسته شونده با عایق گازی که شامل دو الکتروود در محیط گازی می باشند و برای رسیدن به زمان عملکرد بسیار کوتاه (کمتر از نانو ثانیه) استفاده می شوند مورد بررسی قرار می گیرد.

در فصل دوم مکانیزم های فیزیکی حاکم بر شکست الکتریکی به طور مفصل بیان می شود و معادلات حل شده برای مدل سازی شکست الکتریکی معرفی می گردد.

در فصل سوم روش و نتایج شبیه سازی شکست الکتریکی به طور مشروح بیان شده و اثر پارامتر های مختلف در شکست الکتریکی بررسی می شود.

در فصل چهارم مختصری راجع به معادلات توصیف کننده فیزیک پلاسمای گازی بحث می شود و در ادامه رفتار کانال پلاسمای ایجاد شده در اثر شکست الکتریکی مورد بررسی قرار می گیرد.

فصل پنجم شامل جمع بندی و بیان نکات مهم ذکر شده در فصول قبلی می باشد.

¹ Spark gap switches

² Plasma limiters

فهرست مطالب

| | |
|----|---|
| ۱ | ۱. مقدمه ای بر انواع کلید های مرسوم در مهندسی توان پالسی |
| ۱ | ۱.۱ مقدمه بر مهندسی توان پالسی |
| ۲ | ۲.۱ خصوصیات تکنولوژی توان پالسی |
| ۳ | ۳.۱ کلیدهای معمول در سیستم های توان پالسی |
| ۴ | ۱.۳.۱ کلیدهای گازی |
| ۱۰ | ۲.۳.۱ کلیدهای بسته شونده نیمه هادی |
| ۱۱ | ۳.۳.۱ کلیدهای مغناطیسی |
| ۱۲ | ۴.۳.۱ کلیدهای بازشونده نیمه هادی |
| ۱۳ | ۵.۳.۱ کلیدهای بازکننده پلاسمایی |
| ۱۵ | ۶.۳.۱ فیوزهای انفجاری |
| ۱۶ | ۴.۱ مقایسه ساختارهای مختلف از نظر محدوده عملکرد |
| ۱۹ | ۲. توصیف مکانیزم های فیزیکی حاکم بر روند شکست الکتریکی |
| ۲۰ | ۱.۲ تقویت میدان الکتریکی |
| ۲۴ | ۲.۲ تابش میدانی و حرارتی-میدانی الکترون از طریق اعمال میدان الکتریکی |
| ۳۸ | ۳.۲ تابش انفجاری الکترون |
| ۴۵ | ۴.۲ مکانیزم های افزایش تعداد الکترون و تلف در شکست گازی |
| ۴۵ | ۱.۴.۲ یونیزاسیون در اثر برخورد |
| ۴۶ | ۲.۴.۲ مکانیزم های تلف در شکست گازی |
| ۴۷ | ۱.۲.۴.۲ باز ترکیب (دیونیزاسیون) |
| ۴۷ | ۲.۲.۴.۲ چسبیدن الکترون |
| ۴۷ | ۳.۲.۴.۲ تلفات تحریک |
| ۴۸ | ۳.۴.۲ مکانیزم های شکست |
| ۴۸ | ۱.۳.۴.۲ مکانیزم تاونزند |
| ۵۲ | ۲.۳.۴.۲ گسترش ستون نور |
| ۵۳ | ۵.۲ مروری مختصر بر فعالیت های انجام شده در زمینه شکست الکتریکی در رژیم نانو ثانیه |
| ۵۶ | ۳. شبیه سازی و حل معادلات توصیف کننده شکست الکتریکی |
| ۶۰ | ۱.۳ مرحله اول: پیاده سازی ساختار الکترون ها جهت شبیه سازی |

| | |
|----|---|
| ۶۴ | ۲.۳ مرحله دوم: محاسبه توزیع پتانسیل و میدان الکتریکی |
| ۶۷ | ۳.۳ مرحله سوم: محاسبه ضرایب یونیزاسیون |
| ۶۸ | ۴.۳ مرحله چهارم: حل معادلات یونیزاسیون |
| ۶۹ | ۵.۳ مرحله پنجم: محاسبه جریان بین الکترودها به منظور تعیین لحظه وقوع شکست الکتریکی |
| ۷۰ | ۶.۳ نتایج شبیه سازی |
| ۷۴ | ۷.۳ تعیین شرایط بهینه فشار بر اساس نتایج شبیه سازی |
| ۸۱ | ۸.۳ بررسی اثر خوردگی الکترودها در طی روند وقوع شکست الکتریکی |
| ۸۳ | ۹.۳ بررسی اثر تغییرات جزئی ابعاد الکترودها در پارامترهای شکست الکتریکی |
| ۸۵ | ۴. بررسی رفتار کانال پلاسمای تشکیل شده در اثر وقوع شکست الکتریکی |
| ۸۵ | ۱.۴ مکانیزم های حاکم بر پلاسمای گازی |
| ۸۶ | ۲.۴ مدل سازی کانال پلاسمای تشکیل شده در اثر شکست الکتریکی |
| ۹۲ | ۵. نتیجه گیری |
| ۹۴ | مراجع |
| ۹۸ | ضمیمه: مقالات ارائه شده از پایان نامه |

فهرست جداول

| | |
|----|---|
| ۱ | فصل اول |
| ۱ | جدول (۱.۱): مقادیر معمول در مهندسی توان پالسی |
| ۴ | جدول (۲.۱): انواع کلیدها |
| ۱۷ | جدول (۳.۱): مقایسه عملکرد کلیدهای مختلف (بسته شونده) |
| ۱۹ | فصل دوم |
| ۲۳ | جدول (۱.۲): مدار موثر β و سطح ساطع کننده الکترون برای N برآمدگی |
| ۲۵ | جدول (۲.۲): تابع کار فلزات مختلف به کار رفته در سطح الکتروود |
| ۴۴ | جدول (۳.۲): خصوصیات فلزات مختلف به کار رفته در ساختار الکتروود |
| ۵۰ | جدول (۴.۲): توصیف پارامترهای مربوط به معادله (۳۳.۲) |
| ۵۰ | جدول (۵.۲): مقادیر به دست آمده برای ضریب A و B برای گازهای مختلف |
| ۵۶ | فصل سوم |
| ۷۶ | جدول (۱.۳): اطلاعات شکست مربوط به پالس ولتاژ ۱۰۰۰ پیکو ثانیه |
| ۷۶ | جدول (۲.۳): اطلاعات شکست مربوط به پالس ولتاژ ۵۰۰ پیکو ثانیه |
| ۸۱ | جدول (۳.۳): مقادیر مربوط به متغیر حالت و حالت های ماده متناظر با آن |
| ۸۴ | جدول (۴.۳): بررسی اثر تغییر شعاع انحنای بر زمان شکست |
| ۸۴ | جدول (۵.۳): بررسی اثر تغییر فاصله الکتروودها بر زمان شکست |
| ۸۵ | فصل چهارم |
| ۹۱ | جدول (۲.۴): تغییرات اندوکتانس کانال پلاسما بر حسب زمان |

فهرست اشکال

| | |
|----|---|
| ۱ | فصل اول |
| ۲ | شکل (۱.۱): پارامترهای یک پالس |
| ۳ | شکل (۲.۱): بلوک دیاگرام یک سیستم تولید توان پالسی نمونه |
| ۵ | شکل (۳.۱): نمایی از کلید تریگاترون با ساختار های الکتروود تریگر متفاوت |
| ۶ | شکل (۴.۱): دیاگرام مداری یک کلید سه الکتروود |
| ۷ | شکل (۵.۱): نمایی از کلید ایگنیترون |
| ۸ | شکل (۶.۱): دو ساختار مختلف کلید ریل-گپ |
| ۸ | شکل (۷.۱): نمایی از کلید تخلیه سطحی |
| ۹ | شکل (۸.۱): شماتیک کلی کلید چند طبقه، نمونه ساخته شده برای ولتاژ ۶ مگا ولت و مدار معادل این نوع کلید |
| ۱۰ | شکل (۹.۱): شماتیک کلی یک کلید سوادو-اسپارک گپ |
| ۱۱ | شکل (۱۰.۱): مقایسه محدوده عملکرد کلیدهای مختلف نیمه هادی |
| ۱۱ | شکل (۱۱.۱): نمایی از یک مدار با استفاده از کلید های مغناطیسی |
| ۱۲ | شکل (۱۲.۱): نمایی از یک مدار فشرده کننده پالس و شکل موجهای مربوط به هر طبقه |
| ۱۳ | شکل (۱۳.۱): نحوه عملکرد کلیدهای |
| ۱۳ | شکل (۱۴.۱): نمایی از ساختار کلید PEOS |
| ۱۴ | شکل (۱۵.۱): مراحل مختلف عملکرد کلید PEOS |
| ۱۴ | شکل (۱۶.۱): شماتیک ساختاری و عملکردی کلیدهایی با پلاسمای متحرک |
| ۱۵ | شکل (۱۷.۱): نمایی از ساختار یک نمونه فیوز انفجاری |
| ۱۶ | شکل (۱۸.۱): طبقه بندی کلیدهای مختلف از نظر مقیاس چگالی انرژی و انتقال حالت |
| ۱۷ | شکل (۱۹.۱): مقایسه محدوده عملکرد کلیدهای مختلف از دید ماکزیمم ولتاژ و جریان قابل تحمل |
| ۱۹ | فصل دوم |
| ۱۹ | شکل (۱.۲): فلوجارت روند وقوع شکست الکتریکی در گاز |
| ۲۰ | شکل (۲.۲): افزایش شدت میدان الکتریکی بر روی ناهمواری های سطح الکتروود |

- شکل (۳.۲): مقدار β برای ساختارهای مختلف برآمدگی های میکروسکوپی در سطح الکتروود... ۲۱
- شکل (۴.۲): تغییرات ضریب موثر β و سطح موثر تابش الکترون بر حسب تغییرات میدان الکتریکی اعمالی..... ۲۳
- شکل (۵.۲): تغییرات چگال جریان تزریقی از الکتروود بر حسب تغییرات β ۲۶
- شکل (۶.۲): ابر کروی الکترون تشکیل شده در نوک برآمدگی موجود بر روی کاتد..... ۲۶
- شکل (۷.۲): تغییرات چگالی الکترون تزریق شده از الکتروود بر حسب تغییران ضریب β ۲۸
- شکل (۸.۲): تغییرات میدان الکتریکی بارر فضایی در مقایسه با میدان الکتریکی خارجی بر حسب تغییرات شعاع حجم حاوی بار الکتریکی..... ۲۹
- شکل (۹.۲): میدان الکتریکی بارهای فضایی بر حسب ضریب β در مقایسه میدان اعمالی برای شعاع های مختلف حجم بار فضایی..... ۳۰
- شکل (۱۰.۲): گذرای خاموش شدن و روشن شدن تابش الکترون از سطح الکتروود..... ۳۲
- شکل (۱۱.۲): نوسانات میدان الکتریکی در برآمدگی الکتروود..... ۳۳
- شکل (۱۲.۲): تعادل بین میدان الکتریکی ناشی از بارهای فضایی و میدان تقویت شده نوک برآمدگی موجود در سطح الکتروود ۳۳
- شکل (۱۳.۲): انرژی پتانسیل یک الکترون در نزدیکی سطح فلز..... ۳۶
- شکل (۱۴.۲): تبخیر و انفجار برجستگی های روی الکتروود..... ۳۹
- شکل (۱۵.۲): رفتار جریان در روند وقوع تابش انفجاری الکترون..... ۴۰
- شکل (۱۶.۲): زمان تاخیر وقوع تابش انفجاری الکترون برای تنگستن بر حسب..... ۴۳
- شکل (۱۷.۲): تغییرات زمان تاخیر برای تابش انفجاری الکترون بر حسب ضریب تقویت میدان الکتریکی برای فلزات مختلف..... ۴۴
- شکل (۱۸.۲): نمودار تغییرات جریان بر حسب ولتاژ اعمالی..... ۴۹
- شکل (۱۹.۲): ساختار بهمن الکترونی..... ۵۱
- شکل (۲۰.۲): روند پیشرفت ستون نوری..... ۵۳

۵۶ فصل سوم.....

- شکل (۱.۳): قسمتی از شبکه شامل نقطه 0 و چهار نقطه اطراف آن..... ۵۷
- شکل (۲.۳): فلوجارت روند حل معادلات توصیف کننده شکست الکتریکی..... ۵۹
- شکل (۳.۳): ساختار الکتروودهای در نظر گرفته شده به منظور شبیه سازی..... ۶۲
- شکل (۴.۳): شکل موج ولتاژ اعمالی به الکتروود ها..... ۶۳

- شکل (۵.۳): توزیع پتانسیل و شدت میدان الکتریکی به ازای ولتاژ نهایی..... ۶۵
- شکل (۶.۳): توزیع شدت میدان الکتریکی به ازای ولتاژ نهایی..... ۶۶
- شکل (۷.۳): توزیع چگالی الکترون در زمان های مختلف در طی فرآیند شکست..... ۷۰
- شکل (۸.۳): توزیع چگالی الکترون در زمان های مختلف در طی فرآیند شکست..... ۷۱
- شکل (۹.۳): توزیع چگالی الکترون برای ساختار های صفحه-صفحه و سوزن- سوزن در پله های زمانی مختلف..... ۷۳
- شکل (۱۰.۳): تغییر زمان شکست برحسب فشار به ازای دو پیک ولتاژ مختلف..... ۷۳
- شکل (۱۱.۳): تغییر زمان شکست برحسب فشار به ازای دو زمان صعود مختلف..... ۷۴
- شکل (۱۲.۳): نمودار تابع هدف برای پالس ولتاژ ۱۰۰۰ پیکو ثانیه..... ۷۵
- شکل (۱۳.۳): نمودار تابع هدف برای پالس ولتاژ ۵۰۰ پیکو ثانیه..... ۷۶
- شکل (۱۴.۳): زمان شکست برای هوا برحسب فشار به ازای سه فاصله الکتروود متفاوت..... ۷۸
- شکل (۱۵.۳): زمان شکست برای آرگون برحسب فشار به ازای سه فاصله الکتروود..... ۷۸
- شکل (۱۶.۳): ولتاژ شکست برای هوا برحسب فشار به ازای سه فاصله الکتروود..... ۷۹
- شکل (۱۷.۳): ولتاژ شکست برای آرگون برحسب فشار به ازای سه فاصله الکتروود..... ۷۹
- شکل (۱۸.۳): ولتاژ شکست برای آرگون و هوا برحسب فشار به ازای فاصله الکتروود ۲ میلیمتر ۸۰
- شکل (۱۹.۳): ولتاژ شکست برای آرگون و هوا برحسب فشار به ازای فاصله الکتروود ۲ میلیمتر ۸۰
- شکل (۲۰.۳): توزیع دما در نقاط مختلف فضا..... ۸۲
- شکل (۲۱.۳): متغییر حالت در نقاط مختلف فضا..... ۸۳

فصل چهارم..... ۸۵

- شکل (۱.۴): توزیع سرعت الکترون ها در لحظات..... ۸۹
- شکل (۲.۴): توزیع چگالی شاز مغناطیسی در لحظات..... ۹۱

۱. مقدمه ای بر انواع کلید های مرسوم در مهندسی توان پالسی

۱.۱ مقدمه بر مهندسی توان پالسی

مهندسی توان پالسی^۱ علم تولید و به کارگیری پالس های ولتاژ و جریان با مشخصات زمانی به خصوص و با دامنه های متفاوت می باشد. پالس های ولتاژی و جریانی با مشخصات مختلف هر کدام دارای کاربرد های به خصوصی در شاخه های متفاوت علوم می باشند. این کاربرد ها شامل کاربرد های نظامی، پزشکی، شیمیایی و حتی کاربرد در صنایع سنگین می باشد. تکنولوژی تولید پالس هایی با توان بالا یعنی^۲ HPPT، اولین بار در دهه ۶۰ در آمریکا و شوروی سابق مطرح گردید. حدود رایج کمیت ها در این علم در جدول زیر آمده است.

| | |
|-------------|----------------------------------|
| انرژی | $10^7 - 10^9$ ژول |
| توان | $10^{14} - 10^6$ وات |
| ولتاژ | $10^3 - 10^7$ ولت |
| جریان | $10^3 - 10^7$ آمپر |
| چگالی جریان | $10^{11} - 10^6$ آمپر بر مترمربع |
| طول پالس | $10^{-5} - 10^{-10}$ ثانیه |

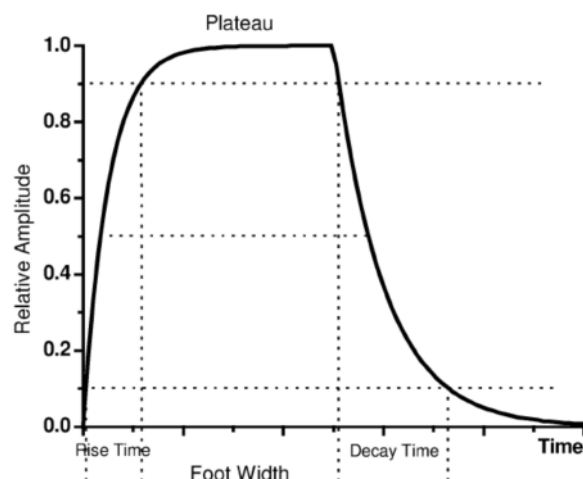
جدول (۱.۱): مقادیر معمول در مهندسی توان پالسی

افزایش تقاضا نسبت به مولدهایی با توان بالا و نیز انتقال اینگونه توانها به بار^۳ منجر به توسعه و گسترش روزافزون تکنولوژی توان پالسی گردیده است. همانطور که از جدول بالا بر می آید، علاوه بر انرژی و توان پالس، شکل پالس اعم از زمان صعود و زمان نزول و نیز زمانی که می بایست پالس در ماکزیمم خود ثابت باقی بماند نیز دارای اهمیت می باشد. شکل کلی یک پالس و زمانهای ذکر شده در شکل (۱.۱) به نمایش در آمده است.

^۱ Pulsed power engineering

^۲ High Pulsed Power Technology

^۳ Load



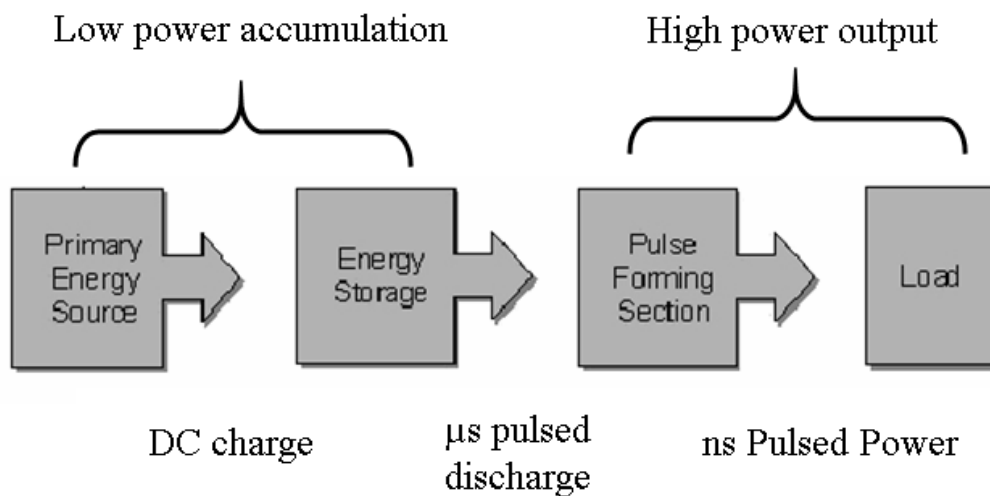
شکل (۱.۱): پارامترهای یک پالس

۲.۱ خصوصیات تکنولوژی توان پالسی [۱]

توانهای الکتریکی معمول که در شبکه های الکتریکی امروزی منتقل می گردند، مداوم و در سطح بسیار پایینی می باشند و انرژی الکتریکی، پیوسته و بتدریج به بارها منتقل می گردد. مثلا برای بارهای خانگی معمول، انرژی نسبتا زیادی برای این بارها ارسال گردد، اما چون این مقدار انرژی در زمان طولانی منتقل شده است، نیازی به تامین توان زیادی برای این بارها نمی باشد. در تکنولوژی HPPT، نیاز به محدوده وسیعی از انرژی است و چون در زمان بسیار کوچکی نیاز به این سطح انرژی می باشد، توانهای بسیار بالایی (تا حدود چند ترا وات^۴) نیاز می باشد. از دید عملی، این تکنولوژی نیازمند تجهیزات بسیار پیچیده و تکنولوژیهای خاص می باشد. با این وجود، اصولی که این علم بر آن استوار شده است، نسبتا ساده می باشد. ایده اصلی این تکنولوژی، نگه داشتن انرژی در یک منبع انرژی اولیه در سطح توان و چگالی توان پایین به صورت موقت می باشد. سپس انرژی بسرعت از منبع ذخیره آزاد گردیده و به شکل توان پالسی در می آید. بعد از فشرده سازی مجدد توان در یک شکل دهنده پالس^۵، این توان در سطح بالا و با چگالی زیاد به بار منتقل می گردد. شکل (۲.۱)، ساختار کلی و اساس عملکرد یک سیستم نمونه تولید توان پالسی را نمایش می دهد.

⁴ Tera Watt

⁵ Pulse forming system



شکل (۲.۱): بلوک دیاگرام یک سیستم تولید توان پالسی نمونه [۲]

همانطور که در شکل نیز مشاهده می گردد، در وهله اول نیاز به یک منبع ذخیره انرژی مناسب می باشد. ذخیره انرژی می تواند به طرق مختلف انجام گردد. برای مثال می توان انرژی را در فترها به صورت مکانیکی، در گازهای فشرده، در باتریهای الکتروشیمیایی، در میدان الکتریکی و یا میدان مغناطیسی و ... ذخیره نمود. از میان روشهای مذکور، ذخیره انرژی الکتریکی در خازنها و ذخیره انرژی مغناطیسی در سلفها از استقبال بیشتری برخوردار گردیده اند.

میزان تقویت توان به کمک ساختار شماتیکی که در شکل (۲.۱) نشان داده شده است، می توان تا ۱۰ میلیون بار نسبت به سطح توان اولیه باشد. در آخرین طبقه مولد نیز انرژی و یا توان به صورت الکترومغناطیسی می باشد و در نهایت و بسته به نوع بار، می تواند به یکی از انواع مختلف تبدیل گردد.

یکی از بخش های مهم سیستم های تولید توان پالسی سیستم شکل دهنده پالس می باشد. این بخش از سیستم وظیفه تغییر شکل پالس مورد نظر را متناسب با کاربرد مورد نظر به عهده دارد. از جمله ادوات مهم به کار رفته در این بخش از سیستم کلیدها می باشند که به خصوص نقش تعیین کننده ای در مشخصات زمانی پالس خروجی دارند. در این بخش انواع کلیدهای به کار رفته در سیستم های توان پالسی را به طور مختصر مورد بررسی قرار داده و در فصول آینده به طور خاص به کلیدهای بسته شونده گازی پرداخته خواهد شد.

۳.۱ کلیدهای معمول در سیستم های توان پالسی

در کاربردهای توان پالسی، اغلب نیاز به کلیدهایی می باشد که بتوانند در محدوده توانهای تا چندین تراوات عمل کنند. زمان صعود، شکل و دامنه پالس خروجی مولد به شدت وابسته به نحوه

عملکرد کلیدهای مورد استفاده می باشد، لذا اینگونه کلیدها می بایست خصوصیات ویژه ای داشته باشند که برخی از آنها عبارتند از:

- تحمل ولتاژهای بسیار بالا قبل از بسته شده و هدایت
- عملکرد فوری بعد از تریگر شدن و انتقال بسیار سریع از وضعیت عایق کامل قبل از تریگر شدن به رسانای خوب بعد از عملکرد (در مورد کلیدهای بسته شونده)
- قابلیت بازیابی بسیار سریع از وضعیت رسانایی به حالت عایق کامل و تحمل ولتاژ بعد از باز شدن
- زمان جیتراً^۶ بسیار کم برای عملکرد در حد نانو ثانیه

با توجه به خصوصیات مذکور، کلیدهای معمول در صنعت برق و یا هرگونه کلیدی که عملکرد مکانیکی دارد، قابلیت استفاده در این تکنولوژی را دارا نمی باشد. بر اساس تکنیکی که برای انتقال انرژی استفاده می شود، می توان کلیدهای مورد استفاده را به دو دسته کلی تقسیم بندی نمود: کلیدهای باز شونده و بسته شونده. کلیدهای باز شونده برای سیستمهای ذخیره راکتیو استفاده می گردد و از نوع بسته شونده در سیستم های ذخیره خازنی بهره گرفته می شود. برخی از انواع کلی این دو نوع کلید را می توان در جدول (۲.۱) مشاهده نمود.

| کلیدهای بسته شونده | کلیدهای باز شونده |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> ➤ کلیدهای گازی ➤ کلیدهای بسته شونده نیمه هادی ➤ کلیدهای مغناطیسی | <ul style="list-style-type: none"> ➤ کلیدهای باز شونده نیمه هادی^۷ ➤ کلیدهای بازکننده پلاسمایی (SOS) ➤ فیوزهای انفجاری |

جدول (۲.۱): انواع کلیدها

۱.۳.۱ کلیدهای گازی [۲]

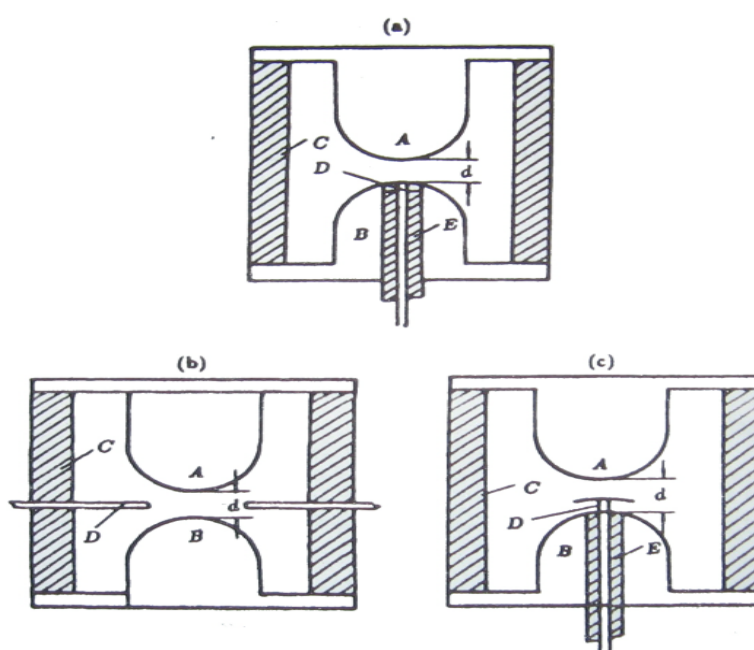
تقریباً همه انواع کلیدهای گازی بر اساس پدیده یونیزاسیون و شکست در گازها عمل می نمایند. گازها در حالت معمول به صورت عایق عمل می نمایند و در صورت ایجاد یونیزاسیون مانند هادی عمل می کنند. توانایی گازها را در هدایت جریان، میزان یونیزاسیون ایجاد شده تعیین می نماید. گازی که به شدت یونیزه شده باشد می تواند مانند هادی عمل نماید. در تکنولوژی کلیدها استفاده از یک منبع خارجی برای تزریق الکترونهاى اولیه در گاز برای تسريع عمل یونیزاسیون معمول می باشد.

^۶ Jitter time

^۷ Semiconductor Opening Switches

این منبع خارجی می تواند به صورت اعمال ولتاژ بین الکتروود تریگر و کاتد و ایجاد یک جرقه اولیه و یا تاباندن پرتوهای پراورژی مانند لیزر و یا اشعه های نورانی به گاز باشد.

کلیدهای گازی از نظر ساخت و نحوه عملکرد ساده می باشند و نیز محدوده عملکرد وسیعی دارند. این نوع کلیدها قابلیت هدایت جریان از چند آمپر تا چندین مگاآمپر و نیز تحمل ولتاژ تا چند مگاولت را دارا می باشند. اکثر این نوع کلیدها به صورت سه الکتروود ساخته می شوند که دو عدد آن، الکتروودهای اصلی جهت هدایت جریان و الکتروود سوم برای تریگر نمودن استفاده می گردد. شکل (۳.۱) نمونه از این نوع ساختار را نشان می دهد که به تریگاترون^۸ موسوم است.



شکل (۳.۱): نمایی از کلید تریگاترون با ساختارهای الکتروود تریگر متفاوت. A و B الکتروودهای اصلی، C ساختار عایقی و نگهدارنده، D الکتروود تریگر و E ساختار عایقی جدا کننده الکتروود تریگر از الکتروود اصلی می باشند. [۳]

از مزایای تریگاترون عبارتند از:

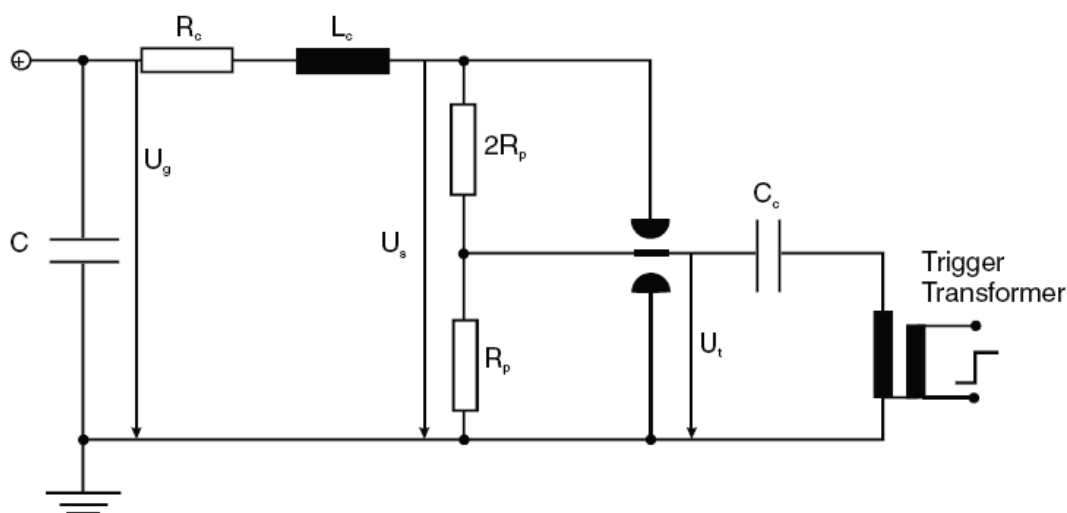
- محدوده گسترده تریگر کردن: فاصله هوایی اصلی با حدود ۲۵ درصد ولتاژ اعمالی به کلید می تواند تریگر شود که در این ولتاژ کم، تاخیر و جیتز بسیار کم می شود.
- توانایی تریگر شدن مناسب: این نوع کلید تاخیر و جیتز نسبتاً کوچکی تولید می نماید. برای فاصله هوایی برای تحمل ولتاژ ۱۰۰ کیلوولت، تاخیر در حدود ۲۰ تا ۳۰ نانوثانیه با جیتز کمتر از ۵ نانوثانیه را می توان تولید نمود.
- ساختار ساده: این نوع، ساختار بسیار ساده تری نسبت به باقی ساختارها دارد.

برخی از معایب و ضعف های این نوع کلیدها عبارتند از:

⁸ Trigatron

- نیاز به منبعی برای تریگر: این کلید نیاز به منبعی با توانایی کافی دارد تا بتواند ولتاژی با زمان صعود بسیار کم و دامنه قابل مقایسه با ولتاژ اعمالی به الکترودهای اصلی ایجاد نماید که به جریان قابل ملاحظه ای نیاز دارد.
- ایزولاسیون الکتریکی مدار تریگر: در هنگام وصل کلید، الکتروود تریگر به ولتاژ آند متصل می گردد. بنابراین نیاز به اضافه کردن المانی مانند مقاوت سری با مدار تریگر وجود دارد که البته اینگونه المانها بر عملکرد کلید تاثیر می گذارند.
- خوردگی الکتروود تریگر: در کاربردهای جریان بالا، ممکن است خوردگی الکتروود تریگر، مکانیزم تریگر را تحت تاثیر قرار دهد.

در شکل (۴.۱) ، نمونه ای از مدار فرمان و اعمال پالس جهت تریگر نمودن کلید نمایش داده شده است.



شکل (۴.۱) : دیاگرام مداری یک کلید سه الکتروده

یکی دیگر از کلیدهای گازی که در گذشته کاربرد وسیعی داشته است، ایگنیترون^۹ می باشد. در این نوع کلید، از جیوه به عنوان ماده تریگر کننده استفاده می شود. همانطور که می دانیم کشش سطحی مابین جیوه و فلزات دیگر بسیار کم می باشد و به همین دلیل در سطح تماس آنها اتصال خوبی برقرار نمی گردد و در نتیجه این تماس مقاومت بالایی دارد. وقتی الکتروود ایگنیتور^{۱۰} را در جیوه قرار می دهند و به آن پالسی اعمال می گردد، به خاطر تلفات و گرمای بالای ایجاد شده در سطح تماس، جیوه بخار می گردد و در گاز پخش می گردد. برای جلوگیری از پاشیده شدن جیوه بر روی آند، صفحه ای بر روی آن قرار می دهند که به نام بافل^{۱۱} شناخته می شود. نمایی از این نوع کلید در شکل (۵.۱) نشان داده شده است.

^۹ Ignitron

^{۱۰} Igniter

^{۱۱} Baffle