

طراحی و ساخت رله های جدید ولتاژ بالا در توکامک IR-T1

محمد رضا حنطه زاده*

مرکز تحقیقات فیزیک پلاسما، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

علیرضا طالبی طاهر

مرکز تحقیقات فیزیک پلاسما، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

مجید برقی

مرکز تحقیقات فیزیک پلاسما، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

محمد کاظم سالم

مرکز تحقیقات فیزیک پلاسما، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

رضا آروین

مرکز تحقیقات فیزیک پلاسما، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

علی نیک محمدی

مرکز تحقیقات فیزیک پلاسما، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

چکیده:

به طور کلی هر توکامک شامل چند سیم پیچ برای گرم کردن، به جلو راندن و محبوس کردن پلاسماست و معمولاً لازم است تا جریان بسیار زیاد چند کیلو آمپری را در مدت زمان بسیار کوتاه از مرتبه چند میلی ثانیه از آن ها عبور داد. برای این منظور و همچنین پرهیز از اختلال ناشی از این جریان، بانک خازنی شارژ و بعد با استفاده از سوئیچ های جریان بالا یا ایگنایترون، جریان در سیم پیچ ها تخلیه می گردد. در صورت عدم عملکرد مطلوب ایگنایترون لازم است تا ولتاژ خازن ها تخلیه شود. و برای این تخلیه نیز از کلیدهای مخصوصی به نام رله های ولتاژ بالا استفاده میشود. این کلید ها اگر از طراحی درستی برخوردار نباشند، ممکن است تا خود باعث بروز مشکلاتی شوند. بنابر این با توجه به مشکلاتی که رله های ولتاژ بالای اولیه در سیستم توکامک IR-T1 داشت، سعی شد تا رله های جدید به گونه ای طراحی شوند که از کارآیی مطلوب برخوردار باشند. در این راستا به عواملی از قبیل جنس و شکل جوشن ها، فاصله بین آن ها، طراحی بوبینی که به شکل مناسب جوشن بالایی را جذب کرده و سپس رله را رها کند توجه شد. همچنین اصلاحاتی نیز بر روی فرمان رله ها انجام گرفت.

واژه های کلیدی: رله ولتاژ بالا؛ توکامک IR-T1، ایگنایترون، جوشن

* عهده دار مکاتبات

(۱) مقدمه:

رله ها، سوئیچ های مکانیکی هستند که به جای عملکرد دستی با یک سیگنال فعال می شوند و بسته به طراحی آن ها این سیگنال میتواند پنوما تیکی یا الکتریکی باشد. نکته مهم در رله های ولتاژ بالا این است که فضای بین کنتاکت های آن باید دارای ویژگی عایقی به حد کافی باشد و یکی از روش های دسترسی به این نکته فاصله به حد کافی بزرگ بین آن هاست. لازم به ذکر است که اجزای رله را میتوان در محیطی با ویژگی دی الکتریکی بالاتر از هوا نیز غوطه ور ساخت. رله های قدیمی ولتاژ بالای توکامک IR-T1 عملکرد مطلوبی نداشتند و در طراحی جدید سعی شد تا این مشکلات تا سر حد امکان برطرف شوند. برخی از محاسن رله های جدید عبارتند از:

(۱) زمان انتقال بهتر

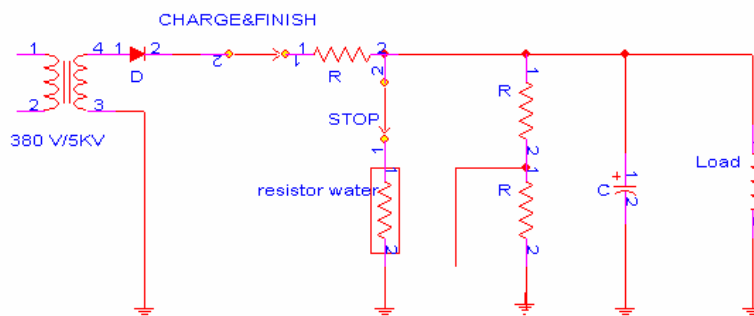
(۲) بهینه سازی زمان سوئیچینگ

(۳) زمان قوس زنی بسیار کوتاه

در طراحی رله ها و نحوه عملکرد آنها لازم است تا به جنس کنتاکتها، فاصله بین آنها و یا بطور کلی آرایش کنتاکتها و همچنین طراحی مکانیکی سیستم توجه داشته باشیم. به هنگام بروز قوس الکتریکی نیز با توجه به مشکلاتی که ممکن است فراهم شود و در قسمتهای بعدی مقاله به آنها خواهیم پرداخت، لازم است تا زمان قوس زنی را بسیار کوتاه نمود. کنتاکت ایده آل در یک رله باید از جنس فلزی با رسانائی بسیار بالا و از لحاظ شیمیایی نیز دارای سطوح بسیار تمیز باشد (بدون اکسیداسیون سطحی). همچنین دارای مساحت سطح مؤثری نیز باشند. در حالت باز، این کنتاکتها در حالت ایده آل باید دارای ویژگی دی الکتریکی نامتناهی به منظور ایزولاسیون باشند. در حالت واقعی و اینکه چه شرایطی برقرار باشد وضعیت پیچیده است و مجموعه این شرایط است که مشخص می کند تا رله در عمل چگونه رفتار کند. با توجه به این نکات سعی شد تا در عمل و در طراحی رله های جدید به یک حالت بهینه برای کنتاکتها دسترسی پیدا کنیم. باید توجه داشت که **wear resistance** کنتاکت و هم چنین اثرات حرارتی نیز تأثیر خواهند داشت (۴-۱).

(۲) شارژ و دشارژ خازن ها

در شکل (۱) نمای ساده ای از مدار شارژ و دشارژ خازن ها نشان داده شده است:



شکل (۱): نمای ساده مدار شارژ و دشارژ بانک خازنی

بدلیل عدم عملکرد ایگنایترون ممکن است تا ولتاژ خازن اصلا تخلیه نگردد. بنابر این باید ولتاژ خازن ها را به طریق دیگری تخلیه کرد. در این سیستم معمولا از مقاومت آبی که در مسیر قرار دارد استفاده می گردد که مقاومت آن حدود چند اهم است. لذا جریان تخلیه در حدود چند صد آمپر خواهد بود. آب به دلیل بالا بودن ظرفیت گرما یی ویژه اش برای این کار بسیار مفید است. برای تخلیه از کلید های مخصوصی به نام **High Voltage Relay** استفاده می شود. همانگونه که اشاره شد اگر این کلید ها از طراحی درستی برخوردار نباشند در هنگام تخلیه و نزدیک شدن جوشن های آن به هم جرقه زده و جوشن ها در محل اتصال ذوب شده و به هم می چسبند. بنابر این قادر به تخلیه دوباره خازن ها نبوده و باعث توقف آزمایشات می شود. به این ترتیب اهمیت این رله ها با قابلیت کاری مطلوب و برای مدت زمان طولانی مشخص می شود^(۵).

۳) مطالعات تئوری و عملی:

الف) محاسبات جریان عبوری:

ظرفیت خازن های به کار رفته متفاوت بوده، ولی حد اکثر آن 36mF است.

$$180\ \mu\text{F} = 36\ \text{mF} \times 200 \quad \text{C}_{\text{Toroidal}}$$



شکل (۲): شمایی از بانک خازنی توکامک IR-T1

حد اکثر ولتاژی که آن ها را شارژ می کند، 5kV است. در بدترین شرایط که ایگنایترون عمل نکند، این ولتاژ باید در مقاومت آبی تخلیه گردد. مقاومت آب موجود در حدود $50\ \Omega$ است. هر مقاومت آبی برای تخلیه دو سری خازن تعبیه شده است (شکل ۳).



شکل (۳): جعبه مقاومت آبی موجود در مسیر

بنابر این جریان عبوری ماکزیمم $I^{\max} = 5000/50 = 100A$ است. برای چنین جریانی میتوان از کابل نمره 6mm استفاده نمود. ولی از آنجایی که ولتاژ بالاست باید حتماً از کابل مخصوص ولتاژ بالا با قابلیت عایقی 10kVolt استفاده کرد.

ب) تعیین جنس و شکل جوشن ها :

همانگونه که در ابتدا اشاره شد پارامترهای متفاوتی وجود دارند که هرکدام به نوعی بر عملکرد رله ها تأثیر خواهند گذاشت. در جدول (۱) نرخ از آنها لیست شده است.

جدول (۱): معرفی پارامترهای مختلف و چگونگی تأثیر آنها

INFLUENCE ON ELECTRICAL CONTACTS		
Influences	Parameters	Effect
electrical	<ul style="list-style-type: none"> current voltage 	heating, melting, material migration, chemical reactions, fritting, electrical discharge, contact resistance
thermal	<ul style="list-style-type: none"> arc 	melting of contact material, material migration
mechanical	<ul style="list-style-type: none"> friction pressure 	deformation, wear, cold welding, contact resistance
ambient conditions	<ul style="list-style-type: none"> dust gases 	increased wear, particles, formation of chemical layers and corrosion
chemical	<ul style="list-style-type: none"> oxidation 	contact resistance, inorganic and organic layers, corrosion

INFLUENCE ON SWITCHING CONTACTS DEPENDING ON LOAD RANGE			
Load range	Main influences	Contact material	Considerations
dry circuit < 100mV, < 10mA low level switching < 1V, < 10mA	<ul style="list-style-type: none"> mechanical chemical 	<ul style="list-style-type: none"> gold plated materials 	contact resistance, sealed relays, wipe movement, twin contacts, outgas free and wear resistant plastic material
intermediate level < 15V, < 300mA	<ul style="list-style-type: none"> mechanical chemical electrical 	<ul style="list-style-type: none"> AgNi 0.15 AgNi 10 (AgSnO₂) (AgCdO) 	sealed relays, fritting, material transfer, contact resistance, outgassing
power contacts 10-400V, 300mA-30A	<ul style="list-style-type: none"> electrical chemical 	<ul style="list-style-type: none"> AgNi 0.15 AgNi 10 AgSnO₂ AgCdO 	electrical life, contact welding, electrical wear, high temperatures, isolation properties, corrosion for sealed relays

مهمترین نکته در ساخت رله های ولتاژ بالا، جنس و شکل جوشن ها می باشد. در این راستا جوشن هایی با اشکال و جنس های مختلف ساخته شد و تحت شرایط بحرانی تخلیه، مورد آزمایش قرار گرفتند. همچنین تکه ای از جوشن رله ای که در شرایط مشابه کار می کند را با روش PIXE مورد تجزیه و تحلیل قرار دادیم که مشخص شد از مس خالص، یکنواخت و بدون روکش استفاده شده است.

بطور کلی روکش بدلیل ضخامت کم پس از چند بار تخلیه و جرقه های شدید ذوب شده و باعث چسبیدن جوشن ها می گردد. (روکش طلا معمولاً برای جریانهای زیاد و ولتاژ کم مورد استفاده قرار می گیرند). در مورد شکل جوشن ها نیز پس از آزمایشات متعدد نتیجه گرفتیم که جوشن بالایی باید به شکل مخروطی و جوشن پائینی به شکل مسطح باشد (شکل ۴). در این حالت بهترین توزیع جریان در سطح جوشنها ایجاد خواهد شد و از ذوب نقطه ای جوشن ها جلوگیری بعمل می آید.



شکل (۴): جوشنهای رله جدید

۴- طراحی بوبین و روش جذب و رها کردن رله :

جذب جوشن بالایی با زدن کلید Start (شکل ۵) و توسط یک بوبین انجام می گیرد که با عبور جریان یکسو شده از آن به یک آهنربا تبدیل شده و هسته داخلی را که از جنس آهن نرم و یا آهن بگیر است بالا می کشد و جوشن بالایی نیز به همراه آن بالا آمده و از جوشن پائینی جدا می گردد.

در تمام مدت شارژ و دشارژ سریع (توسط ایگنایترون)، رله به همین حالت می ماند و در آخر با زدن کلید Stop، رله ها رها شده و جوشن بالایی روی جوشن پائینی سقوط می کند و دشارژ نهایی از طریق مقاومت آبی انجام می پذیرد.

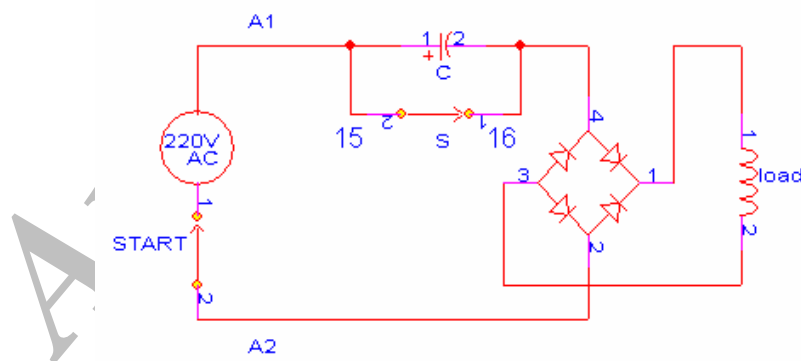
الف) بخش مکانیکی

از آنجا که در موقع کار، اختلاف پتانسیل بین دو جوشن به حدود 5kv می رسد لذا فاصله آن دو باید به اندازه ای باشد تا هوای بین آنها یونیزه نشده و باعث جرقه زدن ناخواسته نگردد. همچنین از آنجا که پس از رها شدن رله، جوشن و هسته داخلی بدلیل نیروی وزن پائین می آیند، لذا فاصله آنها باید به اندازه ای باشد که هنگام نزدیک شدن جوشن ها و شروع جرقه زدن، سرعت کافی داشته باشد تا زمان جرقه (اسپارک) حداقل شود زیرا هر چه قدر زمان جرقه بیشتر باشد، امکان ذوب شدن و در نتیجه چسبیدن جوشن ها بیشتر خواهد شد. همچنین استوانه عایقی که جوشن بالایی را حمل می کند باید دارای ضریب دی الکتریک مطلوبی باشد تا جرقه های حاصل از تخلیه و نیز ولتاژ بالای روی آن به هنگام شروع تخلیه بر روی قسمت کنترل رله تاثیر نگذارد. به همین دلیل آن را از جنس فیبراستخوانی انتخاب نمودیم.

از طرف دیگر قسمت بالایی این استوانه بایستی از جنس آهن نرم و یا آهن بگیر باشد تا با عبور جریان از بوبین بتواند جذب گشته و بالا بیاید. در ضمن با قطع جریان بلافاصله خاصیت جذب را از دست داده و رها شود. نکته دیگر در طراحی این قسمت ایجاد یک شیار و مهار آن توسط یک میله کوچک است، بطوری که استوانه داخلی موقع حرکت نتواند بچرخد و راستای برخورد جوشن بالایی و پائینی بهم نخورد. این میله باید چنان دقیق و خوب تراشیده شود تا ضمن عملکرد صحیح، کمترین اصطکاک را ایجاد کند.

ب) محاسبات مربوط به بوبین :

برای جذب رله ها و نگه داشتن جوشن در موقع آزمایش از روشی استفاده کردیم که در شکل زیر نشان داده شده است :



شکل (۵): مدار رله

چنانچه در شکل دیده می شود با زدن کلید start ولتاژ ۲۲۰ ولت پس از یکسو شدن به دو سر رله اعمال می گردد (کنتاکت رله زمانی بسته بوده و خازن از مدار خارج شده است) و بنابراین رله با قدرت زیاد جذب می گردد ولی بعد از مدت زمانی معین که تایمر را روی آن تنظیم کرده ایم (این زمان را ۵ ثانیه قرار دادیم) با باز شدن اتصال رله زمانی، خازن وارد مدار شده و قسمتی از ولتاژ روی آن می افتد و بنابراین ولتاژ و جریان عبوری از رله کاهش

می یابد. این جریان باید به اندازه ای باشد که اولاً بتواند جوشن ها را در بالا نگه دارد و ثانیاً اتلاف حرارتی زیادی بوجود نیاورد. چون اگر رله خیلی داغ شود باعث انبساط آهن داخلی شده و داخل استوانه گیر می کند.

۵) اصلاح فرمان رله ها :

در سیستم قدیمی با توجه به نقشه های کلیدهای کنترلی (شکل ۶) به شکل زیر عمل می کنند :

۱) با زدن دکمه start رله های 3J1-0 و 3J1-1 تا 3J1-10 عمل می کنند البته به شرط آنکه کلیدهای k1 تا k10 بسته شده باشند. بنابراین با زدن هر کلید فقط می توان خازن مربوط به همان میدان را شارژ نمود. (البته رله 3J1-0 مستقل از کلیدها عمل می کند)

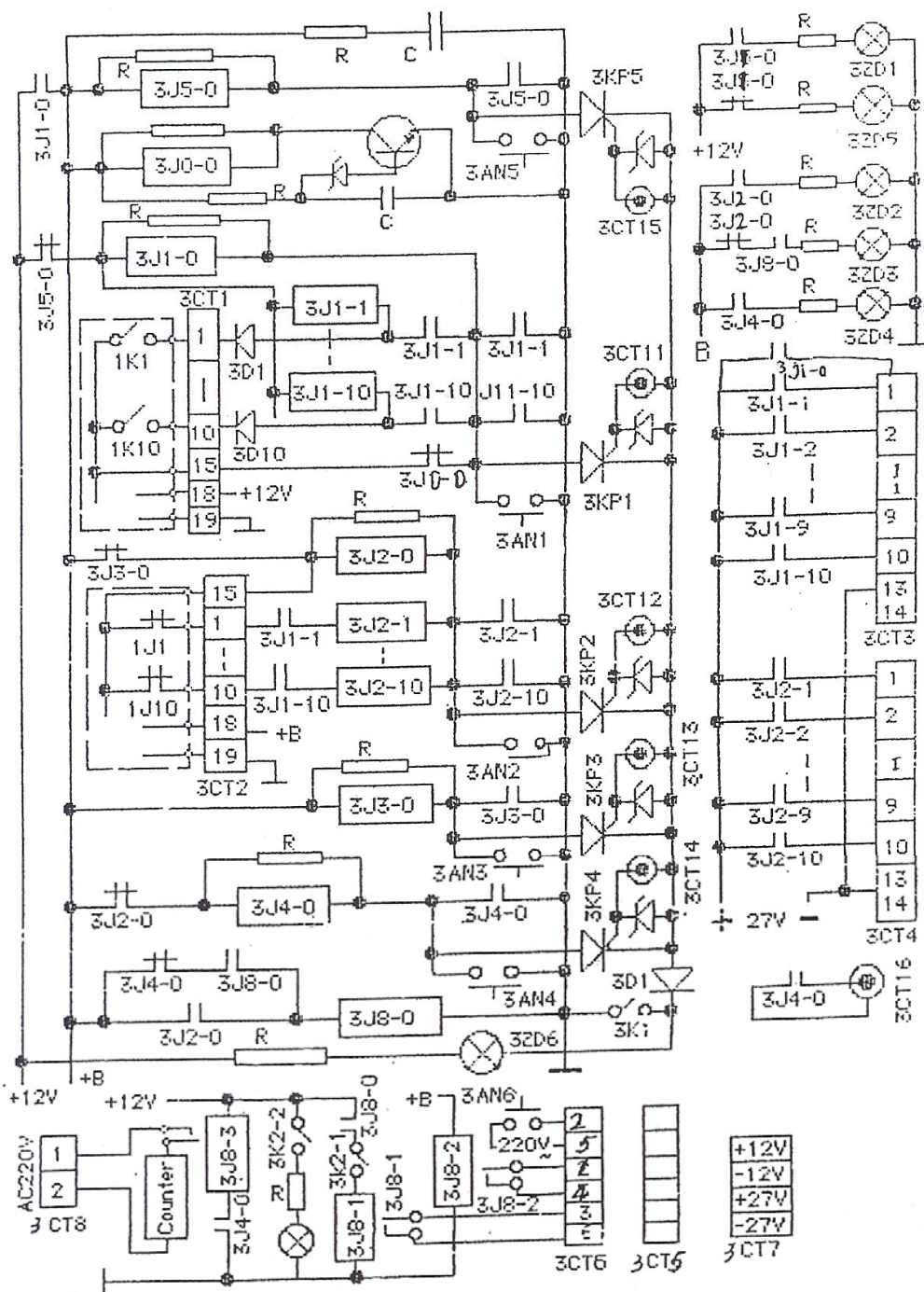
مثلاً با بسته شدن 3J1-1 ولتاژ +27V به پایه 1 کانکتور 3CT3 اعمال می گردد که این پایه خود به پایه 7 کانکتور CT01(1) وصل شده است.

بنابراین رله J06 عمل می کند. با عمل کردن J06 ولتاژ 220 ولت به بوبین J02 رسیده و باعث عمل کردن آن می شود. بنابراین کنتاکت بسته J02 باز شده و مسیر خازن از مقاومت آبی جدا می شود. (بهمین ترتیب مسیر رله J08 برای رله J04)

۲) با زدن کلید charge رله های 3J2-1 تا 3J2-10 عمل می کنند. البته شرط عملکرد هر یک از آنها عمل نمودن رله های 3J1 مربوط به هر میدان است. بنابراین اگر کلید مربوط به هر میدان زده نشده باشد 3J1 مربوطه عمل نکرده و بنابراین 3J2 متناظر با آن نیز عمل نمی کند.

مثلاً با بسته شدن 3J2-1 ولتاژ +27V به پایه 1 کانکتور 3CT4 و از آنجا به پایه 10 CT01(1) می رود. بدین ترتیب رله J07 عمل خواهد کرد. با عملکرد J07 بوبین J03 عمل کرده و مسیر شارژ خازن بسته می گردد و همچنین مسیر لامپ کوچک روی Rack قطع می گردد. روشن بودن این لامپ نشانگر اتمام عمل charge می باشد. از طرف دیگر با عملکرد J07 و سپس J03 مسیر بوبین J01 نیز بسته شده و J01 عمل می کند. با بسته شدن کنتاکت های J01 مسیر برق اصلی به ترانس ولتاژ بالای T فراهم می گردد و بنابراین خازن شروع به شارژ می نماید. (البته به شرط آنکه کلید چاقویی مربوط به برق ورودی بسته شده باشد).

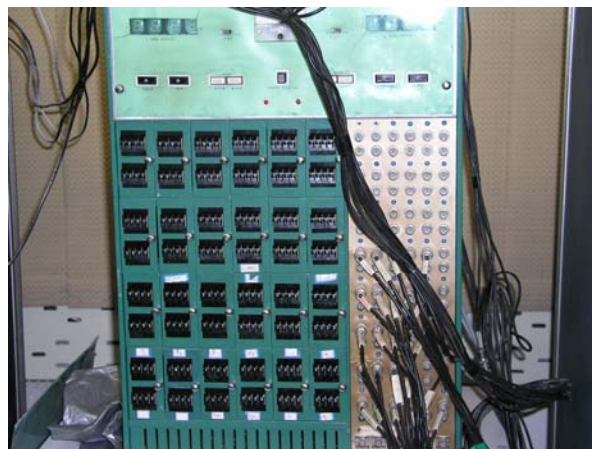
۳) نمونه ولتاژ هر خازن همیشه با مقدار تنظیم شده آن مقایسه می شود و وقتی به اندازه مطلوب رسید مسیر شارژ خازن قطع می گردد.



شکل (۶): مدار اصلی سیستم کنترل

وقتی همه خازنها به مقدار تنظیم شده رسیدند چراغ مربوط به Charge finish روشن می گردد. کلید Charge finish تعبیه شده روی پنل برای وقتی است که بخواهیم عمل شارژ را زودتر از موعد قطع کنیم. (۴) با کلید Discharge پیغام تریگر به همه تایمرها رفته و از طریق این تایمرها و طبق زمان بندی تنظیم شده توسط اپراتور، سیگنال مناسب برای عملکرد ایگنایترون ها صادر می گردد.

۵) در آخرین مرحله با زدن کلید stop رله های H-V J02 و J04 قطع شده و مسیر تخلیه نهایی خازن از طریق مقاومت آبی فراهم می گردد.



شکل (۷): تابلوی فرمان شارژ و دشارژ خازنها و تابلوی تنظیم زمان تخلیه

در سیستم جدید اولاً می خواهیم با زدن start همه رله های H.V عمل کرده و مسیر مقاومت آبی قطع گردد. زیرا تعبیه یک مدار تقسیم ولتاژ با رله زمانی برای هر خازن مقرون به صرفه نیست. بنابراین عملکرد این رله ها باید مستقل از 3J1-1 تا 3J1-10 و کلیدهای k1 تا k10 باشد. بدین ترتیب کافیست یکی از کنتاکتهای باز 3J1-0 را به جای فرمان همه رله ها استفاده می کنیم. بدین ترتیب با زدن دکمه start و عملکرد 3J1-0، همه رله های H.V نیز عمل می کنند.

تغییر بسیار مهم دیگری که در فرمان رله ها انجام گرفت عملکرد همزمان رله های J02 و J03 با کلید start بود. بدین ترتیب که یک سر کنتاکت J06 (سری که به بولین J02 رفته است) را به سر کنتاکت J07 (سری که به بولین J03 رفته است) وصل می کنیم. با تغییر فوق با زدن دکمه start اولاً همه رله های H.V مربوط به مسیر مقاومت آبی عمل می کنند و مسیر فوق قطع می گردد و رله های مسیر شارژ برای خازنهای انتخاب شده بسته می شود و ثانیاً مسیر شارژ خازنها به مدار تغذیه H.V وصل میگردد. حال با زدن دکمه charge فقط J01 عمل می کند و خازنها شروع به شارژ می کنند. وقتی که شارژ به پایان رسید و discharge توسط ایگنایترون انجام پذیرفت ولتاژ منفی باقیمانده روی خازنها از طریق رله J03 و دیودهای یکسو ساز تخلیه می گردند بنابراین اگر پس از عمل دشارژ سریع، حدود ۱۰ ثانیه منتظر بمانیم، مشاهده می شود که عملاً ولتاژ منفی زیادی روی خازنها باقی نمی ماند و ما اصولاً جرقه های زیادی را روی رله ها نخواهیم داشت. بدین ترتیب عمر جوشن ها افزایش یافته و احتمال وقفه در آزمایشها به حداقل ممکن خواهد رسید.

نکته آخر وجود میکروسوییچ بالای رله ها است که با قطع و وصل آن می توان از عملکرد صحیح رله ها مطمئن گردید. این نکته برای پروژه کامپیوتری کردن سیستم کنترل توکامک از اهمیت به سزایی برخوردار است.

از آنجا که هر مدار شارژر برای دو سری خازن بکار رفته است، بنابراین نمی توان فرمان قطع شارژ فقط به Jo1 اعمال کرد. در مورد سری دوم مثل تروئیدال ۲ (T2) و ورتیکال ۲ (vert2) می باید کلید Jo5 را همچنان در مدار گذاشت .

۶) انجام آزمایش:

الف) اندازه گیری ولتاژها و جریان عبوری از مدار :

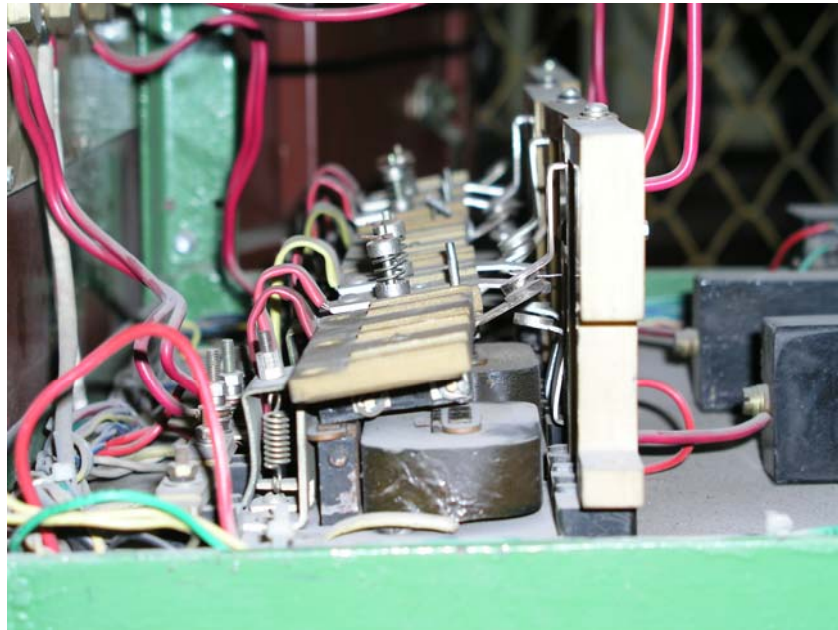
هر ۶ رله را با هم موازی کرده و اندازه گیریهای زیر را انجام دادیم :
جدول (۲):

کلید وصل است و خازن در مدار نیست	تایمر عمل کرده و کلید قطع شده و خازن وارد مدار گردیده است
جریان کل مدار	$I = 1.8A$
جریان هر رله	$I_1 = 0.3A$
ولتاژ دو سر خازن	$V_C = 0$
ولتاژ ورودی دو سر پل	$V_{in\ ac} = 220V$
ولتاژ ورودی دو سر پل	$V_{in\ dc} = 0$
ولتاژ دو سر بوبین	$V_{L\ dc} = 195V$
	$V_{L\ ac} = 94V$

توجه : خازن بکار رفته $C = 12\mu F$ می باشد .

ب) تست رله ها بدون شارژ و دشارژ

- به فاصله زمانی ۲۰ ثانیه رله ها را قطع و وصل کردیم و این عمل را ۳۰ بار انجام دادیم. بوبین ها مقدار کمی گرم شدند ولی مشکل خاصی نداشتند .
رله هایی را که کمی گیر می کنند با رله های بهتر عوض نمودیم .
- رله را وصل کرده و حدود ۳۰ دقیقه روشن نگه داشتیم. بوبین ها به اندازه ای گرم شده بودند که کارکرد قابل اعتمادی نداشتند. گرچه عملاً در هر شات رله ها حدود ۳ دقیقه روشن می مانند. با این آزمایش به این نتیجه می رسیدیم که بهتر است بین هر دو شات متوالی حدود ۲ دقیقه زمان بدهیم تا از خنک شدن بوبین ها مطمئن گردیم.
- بعد از حدود ۴۶ دقیقه وصل بودن رله ها ، هسته میانی عملاً آنقدر گرم و منبسط می شدند که قادر به برگشت نبودند. پس از خنک شدن می توانیم دوباره آزمایش را تکرار کنیم. در شکل (۸) و (۹) شمائی از رله های قدیمی و رله های جدید نشان داده شده است.



شکل (۸): نمایی از رله های H.V قدیم



شکل (۹): نمایی از رله های H.V جدید

ج) تست رله ها با شارژ کامل :

برای اطمینان از توازن کامل رله ها، باید هر یک را بطور جداگانه شارژ نموده و بدون زدن کلید discharge و فقط با زدن کلید stop آنرا در مقاومت آبی تخلیه نمود. در این حالت با نگاه کردن به دو جوشن و تخلیه و مقدار جرقه روی هر یک، می توان از بالانس بودن آنها مطمئن شد و گرنه باید با اضافه و کم کردن واشرهای مسی مناسب آنها را بالانس نمود.

در شکل های زیر می توان رله های HV قدیم و جدید را با هم مقایسه نمود .

نتایج حاصل و تشریح آنها

به هنگام عملکرد رله، قوس الکتریکی بین کنتاکتهای رله ایجاد می شود. عوامل حدی بسیار زیادی وجود دارند که توانایی عملکرد رله را مشخص می کنند و تا حدودی به بعضی از آنها اشاره شد. مطالعه قوس الکتریکی ما را در فهم بهتر عواملی که می توانند به عملکرد بهتر رله منجر شوند کمک می کند. این عوامل گرچه بسیار پیچیده اند اما می توان ارتباطی بین تئوری ماکروسکوپی قوس الکتریکی و پدیده های واقعی که عملاً به وقوع می پیوندند برقرار نمود. اصول فیزیکی و تئوری قوس الکتریکی مفصلاً در مقالات بررسی شده اند^(۷ و ۶). معادله اصلی ای که پدیده های حرارتی قوس را توصیف می کند همان معادله موازنه توان الکتریکی است در محیطی است که جریان از آن عبور می کند و به صورت زیر نوشته می شود:

$$\frac{dw}{dt} = P_{in} - P_{out} = ui - P_0 \quad (1)$$

که در آن I جریان قوس، u ولتاژ قوس و P_0 توان اتلافی است که بواسطه افت حرارتی حاصل می شود و $\frac{dw}{dt}$ نیز مشتق زمانی انرژی ذخیره شده است.

با توجه به اینکه مقاومت قوس با انرژی حرارتی در تناسب است می توان چنین نوشت:

$$R = R(w) \Rightarrow \frac{dR}{dt} = \frac{dR}{dw} \cdot \frac{dw}{dt} = \frac{dR}{dw} \cdot (ui - p_0) \quad (2)$$

با انجام فرضیات ساده کننده و بعنوان مثال با فرض استوانه ای بودن ستون قوس و تعریف انرژی ذخیره شده در واحد حجم می توان چنین نتیجه گرفت

$$R = R_0 \frac{w}{w_0} \quad (3)$$

که R_0 مقاومت واحد حجم و w_0 نیز انرژی ذخیره شده در واحد حجم است. پس نتیجه می گیریم که

$$\frac{dR}{dw} = \frac{R_0}{w_0} \quad (4)$$

و

$$P_{out} = P_0 \cdot \frac{w}{w_0} \quad (5)$$

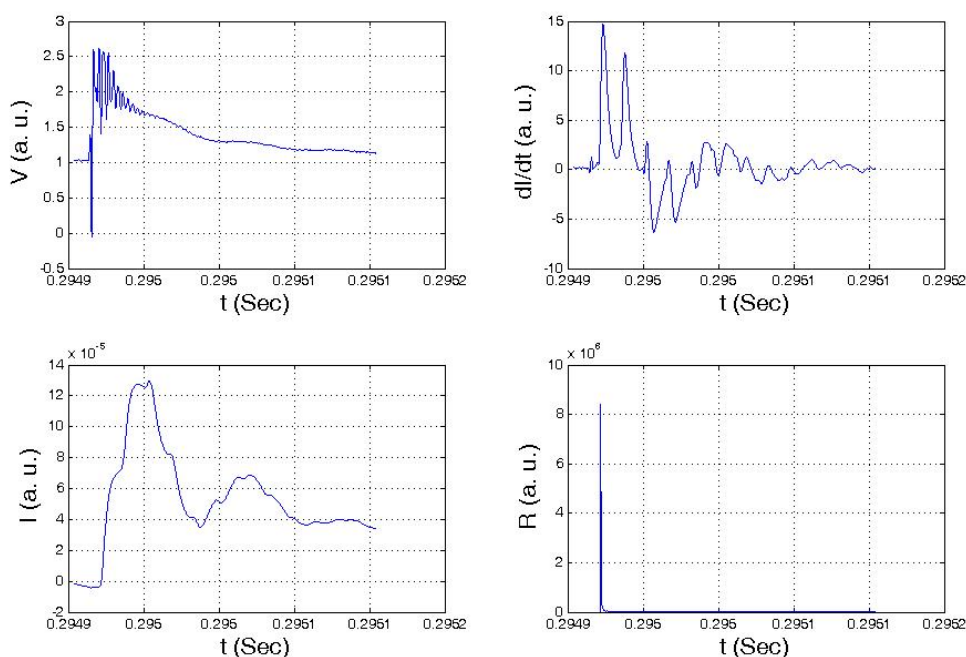
و با جایگذاری داریم:

$$\frac{1}{R} \cdot \frac{dR}{dt} = \frac{1}{w_0} (ui - p_0) \quad (6)$$

بدیهی است در صورتیکه توان داده شده به قوس برابر صفر باشد داریم:

$$\frac{1}{R} \frac{dR}{dt} = -\frac{p_0}{w_0} = -\frac{1}{\tau} \quad (7)$$

به این ترتیب با تعریف $\tau = \frac{W_0}{P_0}$ به عنوان ثابت زمانی قوس الکتریکی ملاحظه می شود جوابی که معادله فوق را ارضاء میکند بصورت $R = R_0 \cdot e^{-t/\tau}$. این ثابت زمانی برای قوس براین دلالت دارد که معیاری و تحت تأثیر پدیده های مختلف تغییرات داریم. با توجه به روشهای عددی می توان پارامترهای تأثیرگذار را تعریف نمود و نحوه تأثیر پدیده های داخلی را به کمک آنها در معادله ماکروسکوپی قوس بررسی کرد.



شکل (۱۰): منحنی ولتاژ، جریان، تغییرات زمانی جریان و مقاومت

در شکل (۱۰) نمونه ای از منحنی های ولتاژ - جریان - تغییرات زمانی جریان و هم چنین مقاومت نسبت به زمان داده شده است. با توجه به منحنی مقاومت ملاحظه می شود که این تغییرات با فرم ارائه شده توسط مدل کاملاً مطابقت دارد. لازم به ذکر است که در همه منحنی ها مقادیر با واحدهای اختیاری داده شده اند. در صورت بررسی و یا شبیه سازی عددی می توان نتایج حاصل از تئوری و عملی را با هم منطبق نموده و در ارتباط با پارامترهای آزاد و ارزیابی آنها اقدام نمود.

References:

- 1- Farquhar, D., *Developments in power – system protection*, IEE international conference on developments in power system protection publication **249**, 145 (1985).
- 2- Black burn, J. L., *Protective relaying Principles and applications*, second edition, MARCEL DEKKER, INC, (1997).
- 3- Horowitz, S. H., *Protective relaying for power systems*, IEEE press (1980).
- 4- Oakes, M., *Improved Protection in high-voltage systems.*, Elect. Rov, 357 (1986).
- 5- GEC Measurements, *Protective relays application guide 2nd of balding and mansell Ltd.*, London and Wisbeck, (1982).
- 6- Hrabovsky, M. and Havel, V., *General formulation of arc equation*. Proc. Of 3rd symp. On switch arc, lodz 89 (1977), poland
- 7- Santiago, N. and Portela, C., *Modelling of dynamic arc behavior* CIGRE colloquium, 128 (1989).

Archive of SID