

طراحی و ساخت مجموعه آزمایشگاهی تولید جریان ضربه صاعقه با ولتاژ باقیمانده یک میلیون ولت

علیرضا امیدخدا، جعفر جعفری بهنام، سیدمحمدصادق میرغفوریان، عبدالله گرائیلی و حمیدرضا صادق محمدی

تخلیه آن به صورت سری، ولتاژهای بالا تولید می‌گردد. در [۳] عملکرد این مولدها در تولید ولتاژ ضربه صاعقه و سوئیچینگ بررسی و روابط نظری مربوط بیان شده است. همچنین برای یک مولد ضربه ۸ طبقه مقاومت‌های پیشانی و پشت و سایر المان‌های مدار، محاسبه و شبیه‌سازی شده و نتایج آن با مقادیر آزمون‌های آزمایشگاهی مقایسه گردیده است. ساختار و اجزای یک مولد ولتاژ ضربه ۱۸۰۰ کیلوولتی و محدودیت‌های کاربردی این مولد در [۴] بیان شده و نتایج شبیه‌سازی‌ها و آزمون‌های آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. در [۵] نیز مدل‌سازی مولد ولتاژ ضربه در محیط نرم‌افزار MATLAB انجام گرفته است.

در مورد جریان ضربه^۲ ساخت تجهیزات جهت تولید این جریان‌ها مستلزم انجام ملاحظات پیرامون مقدار پیک جریان ضربه، میزان ولتاژ باقیمانده^۳، نوع شکل موج و نوع آزمون مورد نظر (کارخانه‌ای^۴ یا نمونه‌ای) است. یکی از روش‌های تولید جریان‌های ضربه استفاده از روش چیدمان فشرده^۵ می‌باشد که در این صورت جریان‌های ۱۰ تا ۲۰۰ کیلوآمپر قابل دستیابی است [۶]. به دلیل یک‌طبقه بودن ساختار این مولدها، تنها امکان دستیابی به ولتاژ خروجی ۱۰۰ کیلوولت و در مواد خاص حداکثر تا ۲۰۰ کیلوولت (در صورت امکان تأمین خازن‌هایی با سطح ولتاژ نامی ۲۰۰ کیلوولت) فراهم می‌باشد.

آزمون کارخانه‌ای می‌تواند بر روی واحد کامل برق‌گیر^۷، یک واحد مجزا^۸ و یا تک‌تک المان‌ها انجام گیرد و بنابراین الزامی به اعمال ولتاژهای بالا در این آزمون وجود ندارد. اما آزمون نوعی^۹ جریان ضربه صاعقه باید الزاماً بر روی واحد کامل برق‌گیر انجام گرفته و میزان پیک آن ۰/۵، ۱ و ۲ برابر جریان تخلیه نامی برق‌گیر باشد [۷]. بنابراین در آزمون‌های نمونه‌ای، تأمین ولتاژ باقیمانده تا حد چند صد کیلوولت (متناسب با ولتاژ نامی برق‌گیر) ضروری بوده، لذا در این نوع آزمون‌ها نمی‌توان از روش چیدمان فشرده استفاده نمود.

روش دیگر جهت تولید جریان‌های ضربه بر اساس ایجاد تغییراتی در مولدهای ولتاژ ضربه چندطبقه و اتصال کوتاه پایانه آنها می‌باشد [۶]. در این صورت امکان افزایش ولتاژ خروجی فراهم بوده و بنابراین محدودیتی در تولید ولتاژ باقیمانده برق‌گیرها وجود ندارد. همچنین با تغییر آرایش مدار، امکان انجام تست‌های استقامت عابقی ضربه (صاعقه و سوئیچینگ) نیز وجود داشته و بنابراین محدوده گسترده‌ای از تست‌های جریان و ولتاژ ضربه با این مجموعه قابل انجام و صرفه اقتصادی قابل توجهی به دلیل

چکیده: تولید جریان‌های ضربه جهت انجام آزمون‌های تحقیقاتی و کنترل کیفی کاربرد وسیعی داشته که در این حوزه انجام آزمون‌های نوعی بر روی برق‌گیرهای فشارقوی تا سطوح مورد نظر شبکه انتقال کشور، نیازمند به کار بردن مولدهای ضربه‌ای است که هم‌زمان با توانایی تولید جریان ضربه با دامنه و شکل مورد نظر استانداردهای بین‌المللی، قابلیت تأمین ولتاژ باقیمانده در سطوح چند صد کیلوولت را دارا باشد. در این مقاله مراحل طراحی و ساخت یک مجموعه تولید و اندازه‌گیری جریان ضربه صاعقه ده کیلوآمپری با قابلیت تولید ولتاژ باقیمانده یک میلیون ولت بیان و به نوآوری انجام گرفته در طراحی راکتور هسته هوای یکپارچه چند تپ اشاره شده است. اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی صحت عملکرد این مجموعه جهت انجام آزمون‌های نوعی جریان ضربه صاعقه و فراهم شدن امکان انجام این آزمون‌ها در داخل کشور را نشان می‌دهد.

کلیدواژه: مولد جریان ضربه، مولد ولتاژ ضربه، آزمون جریان ضربه صاعقه، آزمون‌های نوعی برق‌گیرهای فشارقوی.

۱- مقدمه

صاعقه یکی از پدیده‌های شگفت‌انگیز جهان آفرینش می‌باشد که می‌تواند صدمات وسیعی به تجهیزات الکتریکی وارد آورد. در این میان تجهیزات مخابراتی، هوانوردی و سیستم‌های قدرت الکتریکی در معرض بیشترین آسیب‌ها بوده و بدین منظور آزمون‌های ضربه جریانی و ولتاژی جهت سنجش عملکرد این تجهیزات انجام می‌گیرد. انجام این آزمون‌ها نیازمند مولدهای ضربه پر قدرتی است که قابلیت تولید جریان‌ها و ولتاژهای ضربه با شکل موج‌های مطابق با استانداردهای مربوط را دارا باشد.

طراحی و ساخت یک مولد ولتاژ ضربه تا سطح ولتاژ ۱۰۰ کیلوولت و جریان ۵ میلی‌آمپر در [۱] بررسی شده و عملکرد یک برق‌گیر SPD^۱ با اعمال ولتاژ مورد ارزیابی قرار گرفته است. اما برای تولید ولتاژهای بسیار بالا (تا چند میلیون ولت) عمدتاً از مولدهای ولتاژ ضربه چندطبقه^۲ که بر اساس روش مدار Marx طراحی می‌گردند استفاده می‌شود [۲]. در مدار Marx با شارژ یک مجموعه بانک خازنی طبقاتی به صورت موازی و

این مقاله در تاریخ ۲۸ مرداد ماه ۱۳۹۴ دریافت و در تاریخ ۳۱ شهریور ماه ۱۳۹۵ بازنگری شد.

علیرضا امیدخدا، مرکز مهندسی فشارقوی، جهاد دانشگاهی علم و صنعت، تهران، (email: aomidkhoda@jdevs.com)

جعفر جعفری بهنام، مرکز مهندسی فشارقوی، جهاد دانشگاهی علم و صنعت، تهران، (email: jbehnam@jdevs.com)

سیدمحمدصادق میرغفوریان، مرکز مهندسی فشارقوی، جهاد دانشگاهی علم و صنعت، تهران.

عبدالله گرائیلی، مرکز مهندسی فشارقوی، جهاد دانشگاهی علم و صنعت، تهران، حمیدرضا صادق محمدی، پژوهشکده برق جهاد دانشگاهی، تهران، (email: mohammadis@acecr.ac.ir)

3. Impulse Current

4. Residual Voltage

5. Routine Test

6. Compact Table-Top

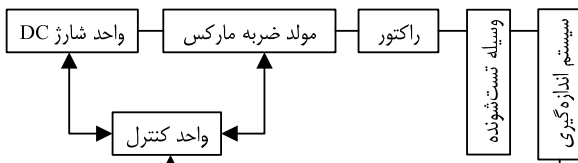
7. Complete Arrester

8. Unit

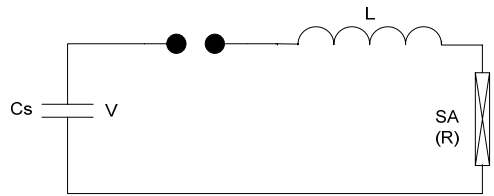
9. Type Test

1. Surge Protection Device

2. Multi Stage Impulse Voltage Generator



شکل ۲: بلوک دیاگرام اجزای مختلف مولد ضربه جریانی.



شکل ۳: شماتیک مداری تولید جریان ضربه.

همان طور که ذکر شد در این طرح، تولید جریان ضربه بر اساس ایجاد تغییراتی در آرایش مولد ولتاژ ضربه صورت می‌گیرد. اصول روش این است که در مولد ولتاژ ضربه با شارژ یک مجموعه بانک خازنی طبقاتی به صورت موازی و تخلیه آنها به صورت سری ولتاژهای بالا ایجاد شده و از طریق مقاومت‌های پیشانی و پشت بر روی تجهیز تحت آزمون اعمال می‌شود. در [۴] ساختار و اجزای مولد ولتاژ ضربه مورد بررسی قرار گرفته است.

تبدیل یک مولد ولتاژ ضربه به مولد جریان ضربه با اتصال کوتاه نمودن مقاومت‌های پیشانی و قراردادن اندوکتانس سری مناسب در مدار، امکان‌پذیر می‌باشد. در این صورت جریان ضربه به تجهیز تحت آزمون اعمال و هم‌زمان مقادیر بالای ولتاژ که جهت انجام آزمون‌های نوعی بر روی واحد کامل برق‌گیرهای فشارقوی لازم است، تأمین می‌شود. در شکل ۲ بلوک دیاگرام این مجموعه مشاهده می‌شود.

۲-۲ مبانی نظری مولد جریان ضربه

موج جریان ضربه صاعقه از نوع نوسانی میراث‌شونده^۵ است. در این حالت حالت با توجه به شماتیک مداری شکل ۳ روابط ذیل برقرار است [۱۰] تا

[۱۲]

$$i = \frac{V}{\omega L} [e^{-\alpha t} \sin(\omega t)] \quad (۲)$$

$$T_1 = \frac{1}{\omega} \tan^{-1} \frac{\omega}{\alpha} \quad (۳)$$

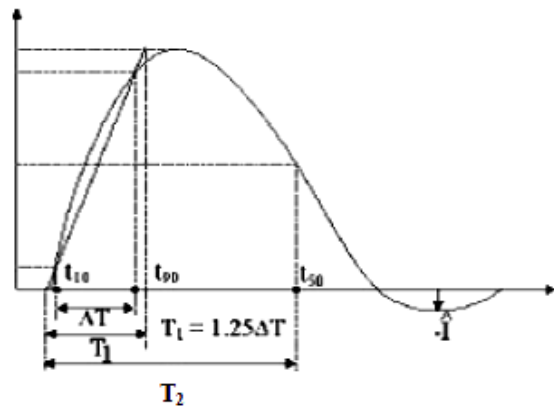
$$T_r = \frac{\pi}{\omega} \quad (۴)$$

که ω و α عبارتند از

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC_s} - \frac{R^2}{4L^2}} \quad (۵)$$

$$\alpha = \frac{R}{2L} \quad (۶)$$

در این روابط i جریان ضربه، t زمان، T_1 زمان رسیدن به مقدار پیک، T_r زمان کاهش به ۵۰٪ مقدار پیک، L میزان اندوکتانس مسیر، C_s ظرفیت بانک خازنی، V ولتاژ شارژ بانک خازنی و R تابع رفتار تجهیز تحت آزمون می‌باشد.



شکل ۱: شکل موج جریان ضربه صاعقه.

ساختار چندمنظوره این مولد قابل تصور می‌باشد. در طراحی مولد جریان ضربه صاعقه موضوع این مقاله از روش اخیر استفاده شده و امکان انجام آزمون‌های نمونه‌ای روی برق‌گیرهای فشارقوی تا حداکثر سطح ولتاژ شبکه انتقال برق کشور، مد نظر قرار گرفته است.

در این مقاله پس از بیان الزامات تعیین‌شده توسط استاندارد، روابط نظری مربوط به تولید شکل موج جریان ضربه بیان و مقادیر المان‌های مدار، جهت تولید شکل موج جریان ضربه صاعقه محاسبه شده است. سپس با مدل‌سازی مدار مولد جریان ضربه صاعقه، شبیه‌سازی‌های در محیط نرم‌افزار MATLAB انجام گرفته و در انتها نتایج اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی پس از ساخت مجموعه ارائه و میزان تطابق آن با محاسبات و شبیه‌سازی‌ها بررسی شده و قابلیت مجموعه در انجام آزمون‌های نمونه‌ای روی برق‌گیرهای فشارقوی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۲- طراحی مولد جریان ضربه

۱-۲ الزامات استاندارد

در شکل ۱ جریان ضربه صاعقه آمده است. در خصوص آزمون جریان ضربه صاعقه مشخصاتی در [۷] و [۸] مطابق ذیل ذکر شده است.

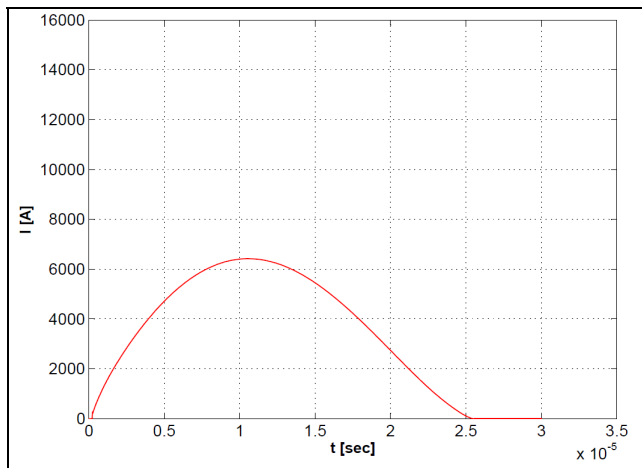
زمان پیشانی موج مجازی^۱ (T_1) ۸ میکروثانیه و زمان نیم‌پشت موج^۲ موج^۳ (T_r) ۲۰ میکروثانیه می‌باشد. زمان پیشانی موج مجازی از حاصل ضرب عدد ۱/۲۵ در مدت زمان افزایش جریان از ۱۰٪ تا ۹۰٪ مقدار پیک جریان به دست می‌آید.

زمان نیم‌پشت موج مدت زمان بین مبدأ مجازی^۳ (تقاطع خط مماس بر نقاط ۱۰٪ و ۹۰٪ مقدار پیک جریان با محور زمان) تا لحظه کاهش جریان به ۵۰٪ مقدار پیک می‌باشد. در [۹] جهت محاسبه T_r ، (۱) ارائه شده است

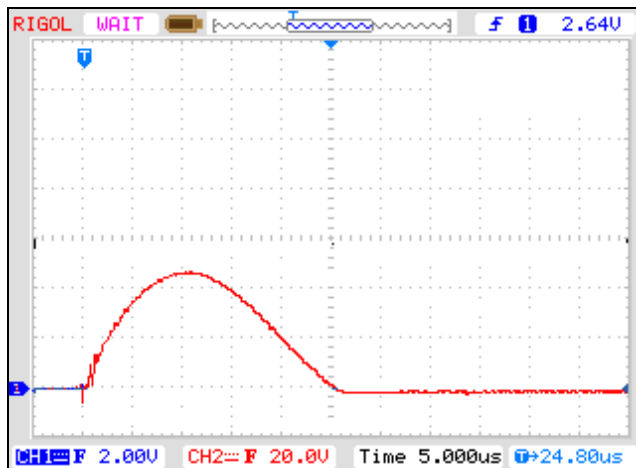
$$T_r = t_{0.5} - \frac{9t_{0.1} - t_{0.9}}{8} \quad (۱)$$

که $t_{0.1}$ ، $t_{0.5}$ و $t_{0.9}$ به ترتیب زمان ۱۰٪، ۵۰٪ و ۹۰٪ جریان پیک می‌باشد. محدوده مجازی^۴ زمان پیشانی موج مجازی، ± 1 میکروثانیه و محدوده مجازی^۲ زمان نیم‌پشت موج، ± 2 میکروثانیه است.

1. Virtual Front Time
2. Time to Half Value on the Tail
3. Virtual Origin
4. Tolerance



(ب)



(الف)

شکل ۴: نمودارهای اعمال جریان ضربه صاعقه روی مدار پایلوت، (الف) شبیه‌سازی و (ب) اندازه‌گیری عملی.

جدول ۱: المان‌های مداری محاسبه‌شده مولد جریان ضربه صاعقه.

اندوکتانس مسیر (μH)	مقاومت پشت موج هر طبقه (Ω)	ظرفیت خازنی معادل مدار (nF)	ظرفیت خازنی هر طبقه (nF)	ولتاژ خروجی مولد (kV)	آرایش مولد ۱۲ طبقه سری	ردیف
۳۸۰	۳۹۰	۱۶۶٫۷	۲۰۰۰	۱۲۰۰		۱

برق‌گیر ZNO^۱ با ولتاژ نامی ۷۵ کیلوولت انجام گرفت. شکل موج جریان ضربه صاعقه که از شبیه‌سازی و آزمون عملی مدار پایلوت به دست آمده است در شکل ۴ مشاهده می‌شود. با توجه به شکل ۴ مقادیر T_r و T_f به ترتیب ۸/۵ و ۱۹/۵ میکروثانیه در شبیه‌سازی و ۸/۸ و ۱۹/۹ در اندازه‌گیری عملی به دست آمده که مطابقت با شکل موج جریان ضربه صاعقه استاندارد دارد. بنابراین با توجه به نتایج تست پایلوت می‌توان نتیجه گرفت (۸) جهت محاسبه اندوکتانس راکتور قابل اعتماد می‌باشد.

۲-۴ طراحی راکتور

جهت ایجاد نوسان در موج جریان ضربه از یک راکتور فشارقوی استفاده می‌شود. برای پیشگیری از پدیده اشباع مغناطیسی، طراحی این راکتور به صورت هسته هوا^۲ انجام گرفته است. روابط نظری مربوط به محاسبه اندوکتانس راکتورهای هسته هوا در [۱۳] و [۱۴] آمده است. در [۱۳] با انجام مدل‌سازی رایانه‌ای و استفاده از روش‌های حل عددی در محیط نرم‌افزارهای FastHenry و Ansys Maxwell دقت این روابط در محاسبه اندوکتانس راکتورهای هسته هوا بررسی و اثبات گردیده است.

نوآوری انجام‌شده در طراحی این راکتور استفاده از ایده راکتور یکپارچه چند تپ (به جای توزیع اندوکتانس در طبقات مولد) می‌باشد. با توجه به بررسی‌های تجربی انجام‌شده، محاسبه مقدار اندوکتانس معادل سلف‌های هسته هوای طبقات مولد، از قانون جمع اندوکتانس‌های سری، دقت مناسبی نداشته و با مقداری انحراف همراه است. به عنوان مثال اگر جهت تولید جریان ضربه صاعقه در یک مولد ۱۲ طبقه، نیاز به اندوکتانس ۴۲۰ میکروهنری باشد، با قراردادن سلف‌های ۳۵ میکروهنری در هر طبقه، مقدار اندوکتانس معادل طبقات از ۴۲۰ میکروهنری انحراف خواهد داشت. بنابراین طراحی راکتور به صورت یکپارچه و با چندین تپ مختلف انجام گرفت تا بتوان به سادگی اندوکتانس مورد نیاز را (که از طریق محاسبه یا شبیه‌سازی تعیین شده است) در مدار قرار داد. مزیت دیگر این

در موج جریان ضربه صاعقه استاندارد $T_r = 8 \mu s$ و $T_f = 20 \mu s$ می‌باشد. برای محاسبه L با جایگذاری مقادیر T_r و T_f در (۳) و (۴) پارامترهای α و ω به دست آمده و از طریق (۶) مقدار L قابل محاسبه است، ولی از آنجا که مقدار R به رفتار تجهیز تحت آزمون (عملکرد غیر خطی برق‌گیر) ارتباط دارد، این روش جهت محاسبه L دشوار خواهد بود. جهت به دست آوردن رابطه‌ای ساده‌تر با صرف نظر کردن از اثر مقاومت R ، از روابط حاکم بر مدارات LC داریم

$$L = \frac{1}{C_s (\pi f)^2} \quad (7)$$

که در آن مقدار C_s با توجه به آرایش مدار تعیین می‌شود. در موج جریان صاعقه زمان نیم‌سیکل اول در حدود ۲۵ میکروثانیه می‌باشد که در نتیجه مقدار f حدود ۲۰ کیلوهرتز به دست می‌آید. با جایگذاری این مقدار در (۷)، مقدار L طبق (۸) قابل تخمین می‌باشد

$$L = \frac{6.33 \times 10^{-11}}{C_s} \quad (8)$$

در جدول ۱ مقادیر به دست آمده جهت المان‌های مداری مولد جریان ضربه صاعقه ۱۲ طبقه آمده است.

۲-۳ بررسی مدار پایلوت

جهت بررسی امکان استفاده از (۸) جهت محاسبه مقدار اندوکتانس مورد نیاز، انجام آزمون جریان ضربه صاعقه در یک مدار پایلوت مطابق با شکل ۳ مورد تحقیق قرار گرفت. در این مدار از یک بانک خازنی ۱۰۰۰ نانوفاراد ۲۰۰ کیلوولت به عنوان C_s استفاده شد. با استفاده از (۸) مقدار اندوکتانس L ، ۶۳ میکروهنری تخمین زده می‌شود.

به کمک نرم‌افزار ۷.۰.۴[®] Simulink MATLAB در ابتدا شبیه‌سازی مدار پایلوت انجام گرفت. در این شبیه‌سازی از یک برق‌گیر با ولتاژ نامی ۷۵ کیلوولت به عنوان تجهیز تحت آزمون استفاده شد. در مرحله بعد با ساخت یک راکتور با همین مقدار، آزمون عملی بر روی یک دستگاه

1. Zinc Oxide
2. Air Core

۴- شبیه‌سازی‌ها

مدار معادل مولد جریان ضربه صاعقه در شکل ۵ آمده است. در این شکل SA برق‌گیر تحت تست، Lr اندوکتانس راکتور، Cs ظرفیت خازنی معادل مولد، CM ظرفیت خازنی مقسم اندازه‌گیری، SG اسپارک گپ، Rt مقاومت پشت موج معادل مولد، D دیود یکسوساز و T ترانسفورماتور فشارقوی می‌باشد.

جهت شبیه‌سازی از نرم‌افزار ۷.۰.۴ Simulink MATLAB[®] استفاده شده که در این شبیه‌سازی‌ها برای مدل‌نمودن تجهیز تحت آزمون مشخصات فنی اعلام‌شده توسط سازنده مورد استفاده قرار گرفته است. لازم به ذکر است که در شبیه‌سازی انجام‌شده از مدل دقیق‌تری استفاده شده که در آن تک‌تک طبقات مدار مدل‌سازی شده و همچنین پارامترهای مربوط به اتصالات، اندوکتانس طبقات و خازن‌های پراکنده‌گی، مقاومت‌های شارژ طبقات و مدل دقیق مقسم اندازه‌گیری با مقاومت میراکننده لحاظ شده است (شکل ۶).

شبیه‌سازی برای دو سطح از عملکرد مدار انجام گرفته است. در سطح اول مدار ۱۲ طبقه با قابلیت تولید حداکثر ولتاژ قابل حصول با مجموعه، مورد شبیه‌سازی قرار گرفته است. در این مورد یک برق‌گیر با ولتاژ نامی ۱۹۸ کیلوولت به عنوان تجهیز تحت آزمون استفاده شده است. هدف از این شبیه‌سازی، تصدیق عملکرد مولد جریان در آرایش ولتاژ خروجی حداکثری و اعمال جریان ضربه صاعقه استاندارد با دامنه حداقل ۱۰ کیلوآمپر در ولتاژ باقیمانده مورد نظر می‌باشد.

همان‌طور که ذکر شد در طراحی این مولد جریان ضربه، امکان نیل به جریان‌های بالاتر از طریق موازی‌سازی طبقات (افزایش ظرفیت خازنی معادل مدار) وجود دارد. البته این عمل منجر به کاهش ولتاژ خروجی مولد شده و بنابراین جهت وسیله‌های تست‌شونده با ولتاژ نامی کمتر قابل استفاده می‌باشد. سطح دوم شبیه‌سازی‌ها جهت بررسی این موضوع انجام گرفته است. در این حالت آرایش مدار مولد ضربه به صورت ۳ واحد ۴ طبقه موازی بوده و از یک برق‌گیر با ولتاژ نامی ۷۵ کیلوولت به عنوان تجهیز تحت آزمون استفاده شده است.

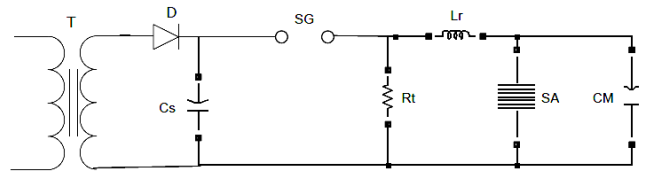
در جدول ۲ المان‌های مداری مولد جریان ضربه صاعقه جهت انجام شبیه‌سازی‌ها آمده است. در این جدول مقدار Lr با توجه به (۸) و سایر مقادیر با توجه به [۴] تعیین شده است.

در جدول ۳ نتایج این شبیه‌سازی‌ها در ولتاژهای شارژ مختلف آمده است (هر طبقه مولد قابلیت شارژ تا ۱۰۰ کیلوولت را دارد).

در شکل ۷ نیز نمودار مربوط به جریان و ولتاژ تجهیز تحت آزمون برای سطح ولتاژ شارژ ۸۰٪ از جدول ۳ آمده است. با توجه به شکل ۷ و جدول ۳، جریان فراتر از ۱۰ کیلوآمپر در شارژ طبقات با ولتاژ ۸۵ کیلوولت حاصل شده و زمان‌های T_1 و T_p نیز در محدوده استاندارد می‌باشد. همچنین شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد دستیابی به جریان ۱۴/۵ کیلوآمپر روی برق‌گیر ۱۹۸ کیلوولتی و جریان ۲۷ کیلوآمپر روی برق‌گیر ۷۵ کیلوولتی در ولتاژ شارژ ۱۰۰٪ امکان‌پذیر می‌باشد.

۵- نتایج اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی

مجموعه تولید و اندازه‌گیری جریان و ولتاژ ضربه ۱۲۰۰ کیلوولت ۱۲۰ کیلوآمپر توسط مرکز مهندسی فشارقوی جهاد دانشگاهی علم و صنعت طراحی و ساخته شده است (شکل ۸). از این مجموعه می‌توان در دو حالت تولید ولتاژ ضربه صاعقه $1/2/50 \mu s$ و تولید جریان ضربه صاعقه $8/20 \mu s$ مطابق با استانداردهای بین‌المللی [۷]، [۱۵] و [۱۸] بهره‌برداری



شکل ۵: مدار معادل کلی مولد جریان ضربه صاعقه.

طرح امکان انجام تنظیمات پارامترهای T_1 و T_p جهت فرارگرفتن آنها در محدوده استاندارد از طریق تغییر تپ می‌باشد، در صورتی که در طرح توزیع طبقاتی، این امکان وجود ندارد. محل فرارگرفتن این راکتور در خروجی مولد و به صورت سری با برق‌گیر تحت آزمون می‌باشد.

۳- سیستم اندازه‌گیری ولتاژ و جریان

اندازه‌گیری جریان ضربه و ولتاژ باقیمانده باید به صورت هم‌زمان انجام گیرد [۷] و بر همین اساس دو سیستم اندازه‌گیری ولتاژی و جریانی در نظر گرفته شده است.

سیستم اندازه‌گیری ولتاژ ضربه باید مطابق با الزامات [۱۵] باشد. همچنین حذف نوسانات فرکانس بالا ناشی از اندوکتانس سلول‌های خازنی مقسم، باید در نظر گرفته شود [۱۶] و [۴].

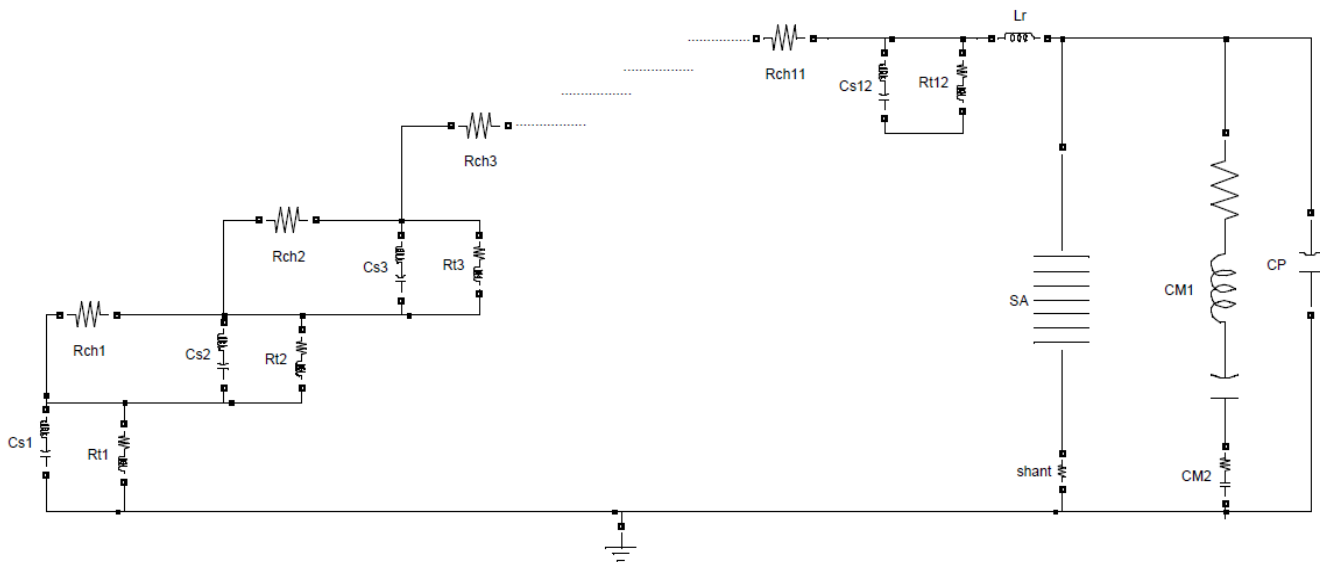
جهت اندازه‌گیری جریان ضربه استفاده از شنت جریان کوآکسیال اندوکتانس پایین^۱ روش مناسبی است [۶]. مقاومت الکتریکی این شنت کوچک انتخاب می‌شود تا قابلیت اندازه‌گیری جریان‌های تا چند صد کیلوآمپر فراهم شود. جهت جلوگیری از اثر عبور جریان‌های بالا بر روی اندازه‌گیری، باید اندوکتانس پراکنده‌گی شنت تا حد امکان پایین و همچنین مقاومت اهمی شنت نسبت به مقاومت مدار ناچیز باشد. از مزیت‌های استفاده از شنت کوآکسیال پاسخ فرکانسی بسیار مناسب و اندوکتانس پراکنده‌گی پایین می‌باشد [۱۲]. در مواردی که افت ولتاژ روی شنت نسبت به ولتاژ تجهیز تحت آزمون قابل توجه باشد استفاده از شنت موجب کاهش دقت اندازه‌گیری ولتاژ می‌شود (خصوصاً در مواردی که وسیله تحت آزمون، تجهیزات ولتاژ پایین باشد). دلیل بروز این خطای اندازه‌گیری، سری بودن شنت با وسیله تست‌شونده و ایجاد افت ولتاژ معمولاً بین ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ ولت روی آن می‌باشد [۱۷].

روش دیگر جهت اندازه‌گیری جریان‌های ضربه استفاده از کویل رکوفسکی^۲ می‌باشد. استفاده از کویل رکوفسکی تأثیری بر اندازه‌گیری ولتاژ تجهیز تحت آزمون ندارد ولی دقت این روش برای اندازه‌گیری شکل موج‌های جریان ضربه نسبت به روش استفاده از شنت پایین‌تر بوده و موجب ایجاد تغییرات جزئی در شکل موج ثبت‌شده می‌شود [۱۷].

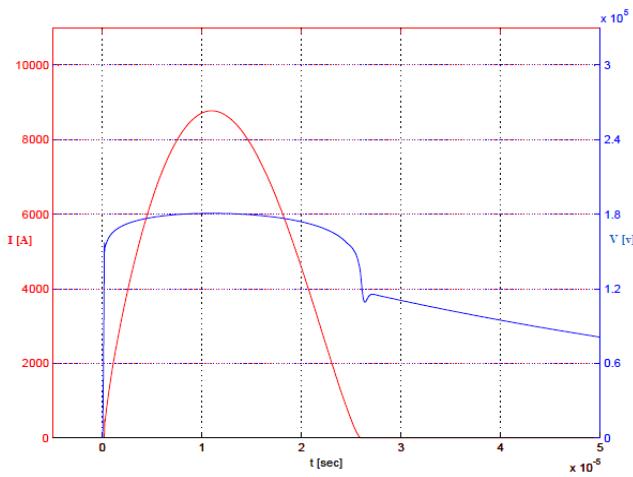
روش کار در این اندازه‌گیری بر اساس القای الکترومغناطیسی بوده و هیچ‌گونه اتصال الکتریکی بین کویل رکوفسکی و مدار جریان ضربه وجود ندارد. تغییرات ایجادشده در شکل موج اندازه‌گیری‌شده شامل اختلالاتی است که از القانات مغناطیسی ناشی می‌شود. در [۱۲] شیلد مناسب کویل و مدار اندازه‌گیری و همچنین در صورت لزوم استفاده از فیلترهای دیجیتال جهت حذف نویزهای اندازه‌گیری مورد بررسی قرار گرفته است.

با توجه به کاربری مجموعه محل بحث در حوزه تست تجهیزات ولتاژ بالا و تأثیر ناچیز افت ولتاژ روی شنت در اندازه‌گیری ولتاژ، از شنت کوآکسیال در سیستم اندازه‌گیری جریان ضربه استفاده شده است.

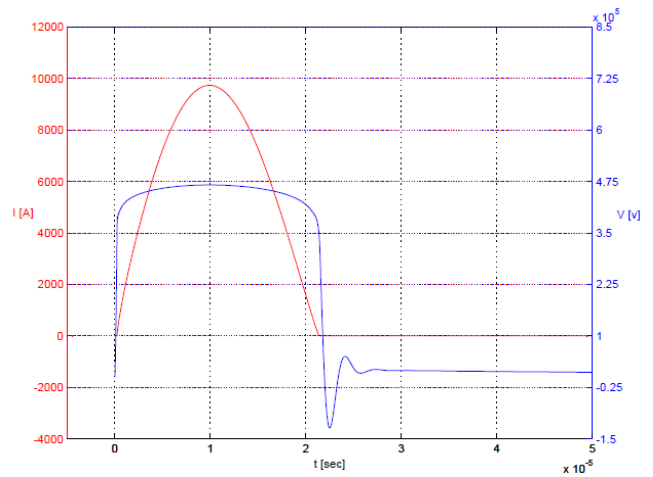
1. Coaxial Low Inductance Shant
2. Rogowski Coil



شکل ۶: مدار شبیه‌سازی کامپیوتری مولد جریان ضربه صاعقه.



(ب)



(الف)

شکل ۷: نمودارهای ولتاژ باقیمانده (آبی‌رنگ) و جریان (قرمز رنگ) در شبیه‌سازی با ولتاژ شارژ ۸۰٪، (الف) برق گیر ۱۹۸ کیلوولتی و (ب) برق گیر ۷۵ کیلوولتی.

جدول ۲: المان‌های مداری مولد جریان ضربه صاعقه جهت انجام شبیه‌سازی‌ها.

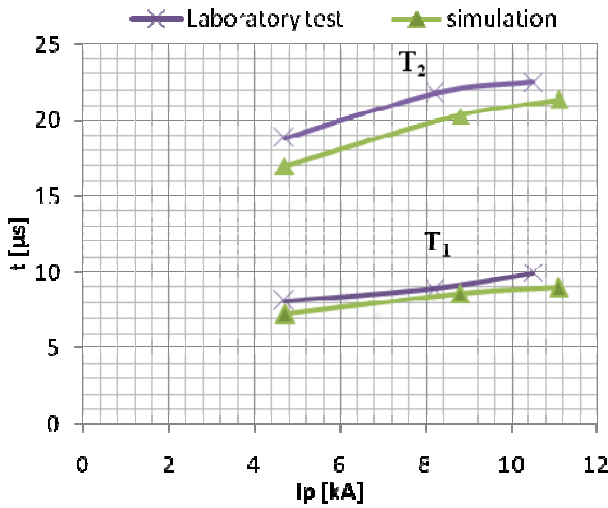
Lr (μH)	Rt (Ω)	Cs (nF)	ظرفیت خازنی هر طبقه (nF)	ولتاژ خروجی مولد (kV)	ولتاژ نامی برق‌گیر تحت تست (kV)	آرایش مولد	ردیف
۳۱۵	۳۹۰	۱۶۶۷	۲۰۰۰	۱۲۰۰	۱۹۸	۱۲ طبقه سری	۱
۲۴	۲۴۴	۲۶۶۶	۲۰۰۰	۳۰۰	۷۵	۳ واحد ۴ طبقه موازی	۲

جدول ۳: نتایج شبیه‌سازی‌ها در دو سطح عملکرد مولد جریان ضربه صاعقه.

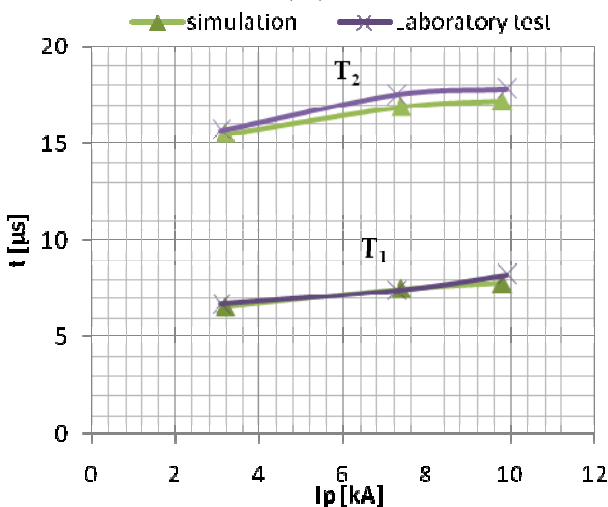
ولتاژ باقیمانده (kV)	جریان پیک (kA)	T_r (μs)	T_f (μs)	ولتاژ شارژ مولد (kV)	ولتاژ شارژ هر طبقه (%)	ولتاژ نامی برق‌گیر تحت تست (kV)	ردیف
۴۳۶	۳٫۰۵	۱۴٫۸	۵٫۸	۶۰۰	۵۰	۱۹۸	۱
۴۵۹	۷٫۴	۱۶٫۹	۷٫۵	۸۴۰	۷۰		
۴۶۶٫۵	۹٫۸	۱۷٫۲	۷٫۸	۹۶۰	۸۰		
۴۷۰	۱۰٫۹	۱۷٫۴	۷٫۹	۱۰۲۰	۸۵		
۴۷۸	۱۴٫۵	۱۷٫۷	۸٫۲	۱۲۰۰	۱۰۰		
۱۷۴	۴٫۷	۱۷	۷٫۳	۲۱۰	۷۰	۷۵	۲
۱۸۰٫۵	۸٫۸	۲۰٫۳	۸٫۶	۳۴۰	۸۰		
۱۸۳	۱۱٫۱	۲۱٫۴	۹	۲۵۵	۸۵		
۱۹۳٫۲	۲۷٫۳	۱۷٫۹	۸	۳۰۰	۱۰۰		

در این قسمت نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی انجام گرفته بیان می‌شود. آرایش مجموعه در این آزمون‌ها مشابه آرایش‌های به کار رفته در

نمود. لازم به ذکر است که قابلیت تولید ولتاژهای سوئیچینگ نیز توسط این مجموعه با اضافه نمودن المان‌های مقاومتی مخصوص وجود دارد.



(الف)



(ب)

شکل ۱۰: مقایسه اندازه‌گیری آزمایشگاهی T_1 و T_2 با حالت شبیه‌سازی، (الف) برق‌گیر ۱۹۸ کیلوولتی و (ب) برق‌گیر ۷۵ کیلوولتی.

اندازه‌گیری‌ها ارائه شده است. با توجه به نتایج به دست آمده و مقایسه جداول ۳ و ۴ حداکثر اختلاف دو حالت اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی‌ها برای T_1 (۱۰٪)، T_2 (۱۰٪)، پیک جریان (۷/۳٪) و ولتاژ باقیمانده (۷/۴٪) می‌باشد (جدول ۵). در شکل ۱۰ نیز مقایسه پارامترهای T_1 و T_2 در اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی‌های کامپیوتری نشان داده شده است.

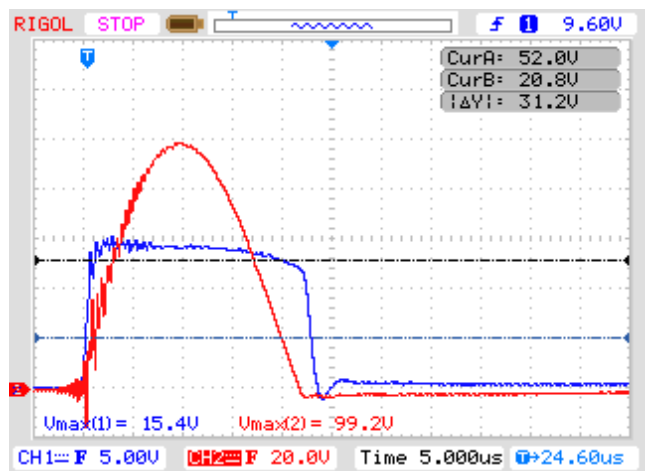
این تفاوت‌ها می‌تواند ناشی از تلورانس مجاز مشخصات نمونه تحت تست با مشخصات اعلام‌شده از سوی سازنده، تغییرات دمایی محیط و اکتیو پارت نمونه تحت تست در حین انجام آزمون آزمایشگاهی و همچنین امیدانس‌های مربوط به اتصالات باشد که اثرات آنها در بهره‌برداری عملی با پیش‌بینی تپ‌های متعدد روی راکتور به آسانی قابل پوشش است. این نتایج تطابق قابل قبول اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی با شبیه‌سازی‌های انجام‌شده را نشان می‌دهد.

۶- نتیجه‌گیری

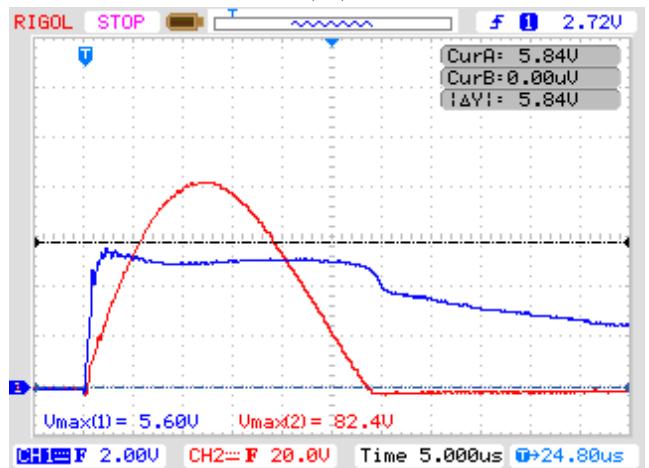
در این مقاله طراحی، شبیه‌سازی و ساخت مجموعه تولید جریان ضربه صاعقه با ولتاژ باقیمانده یک میلیون ولت، مورد بررسی قرار گرفت و انجام موفقیت‌آمیز آزمون نوعی جریان ضربه صاعقه بر روی برق‌گیرهایی با ولتاژهای نامی ۷۵ و ۱۹۸ کیلوولت در جریان با دامنه ۱۰ کیوآمپر،



شکل ۸: مجموعه مولد ۱۲۰۰ کیلوولت ۱۲۰ کیلوژول جریان ضربه صاعقه ساخته‌شده.



(الف)



(ب)

شکل ۹: نمودارهای ولتاژ باقیمانده (آبی‌رنگ) و جریان (قرمز رنگ) در تست عملی با ولتاژ شارژ ۸۰٪، (الف) برق‌گیر ۱۹۸ کیلوولتی و (ب) برق‌گیر ۷۵ کیلوولتی.

شبیه‌سازی‌ها در دو سطح بوده (جدول ۳) و از دو عدد برق‌گیر فشارقوی با ولتاژهای نامی ۱۹۸ و ۷۵ کیلوولت نیز جهت نمونه تحت آزمون استفاده شده است. در شکل ۹ اندازه‌گیری شکل موج‌های جریان و ولتاژ در شارژ ۸۰٪ آمده است. مقایسه شکل‌های ۷ و ۹ اخذ شکل موج‌های مناسب جریان و ولتاژ را در اندازه‌گیری آزمایشگاهی نشان می‌دهد. در جدول ۴ نیز پارامترهای مختلف حایز اهمیت در آزمون جریان ضربه و نتایج

جدول ۴: نتایج اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی در دو سطح عملکرد مولد جریان ضربه صاعقه.

ولتاژ نامی برق گیر (kV)	ولتاژ شارژ هر طبقه (%)	ولتاژ شارژ مولد (kV)	T_r (μ s)	T_f (μ s)	جریان پیک (kA)	ولتاژ باقیمانده (kV)
۱۹۸	۵۰٫۳	۶۰۰	۶٫۷	۱۵٫۷	۳٫۱	۴۲۸
۷۵	۶۹٫۷	۸۳۶	۷٫۴	۱۷٫۵	۷٫۳	۴۵۹
	۸۰	۹۶۰	۸٫۲	۱۷٫۸	۹٫۹	۴۷۳
	۷۰	۲۱۰	۸٫۱	۱۸٫۸	۴٫۷	۱۶۵
	۷۹٫۶	۲۳۸٫۸	۸٫۹	۲۱٫۸	۸٫۲	۱۷۶
	۸۴٫۶	۲۵۲٫۸	۹٫۹	۲۲٫۵	۱۰٫۵	۱۸۰

جدول ۵: حداکثر اختلاف اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی با شبیه‌سازی‌ها.

T_r (%)	T_f (%)	جریان پیک (%)	ولتاژ باقیمانده (%)
۱۰	۱۰	۷٫۳	۷٫۴

- [8] C. H. Stuckenholtz and M. Gamlin, "Overview of impulse current test standards and the impact on test equipment," in *Proc. Int. Conf. on Lightning Protection, ICLP'12*, 6 pp., Vienna, Austria, 2-7 Sept. 2012.
- [9] P. Yutthagowith and N. Pattanadech, "A program for design of impulse current generator circuits," in *Proc. Int. Conf. on Condition Monitoring and Diagnosis, CMD'08*, 4 pp., Beijing, China, 21-24 Apr. 2008.
- [10] S. Pack and S. Jauffer, "Evaluation of an impulse current test generator using numerical simulation tool," in *Proc. Int. Conf. on Power Systems Transients, IPST'03*, 4 pp., New Orleans, USA, 28 Sept.- 2 Oct. 2003.
- [11] M. S. Naidu and V. Kamaraju, *High Voltage Engineering*, 2nd Edition, Tata McGraw-Hill, 1998.
- [12] Y. Lin and Q. Zhou, "Impulse current testing system for simulating lightning effect," in *Proc. Int. Conf. on Audio, Language, and Image Processing, ICALIP'14*, pp. 656-661, 7-9 Jul. 2014.
- [13] L. F. Shatz and C. W. Christensen, *Numerical Inductance Calculations Based on First Principles*, Nov. 2014, PLoS ONE 9(11): e111643. doi: 10.1371/journal.pone.0111643.
- [14] J. Vasilj, P. Sarajcev, and R. Goic, "Modeling of current-limiting air-core series reactor for transient recovery voltage studies," *Electric Power Systems Research*, vol. 117, pp. 185-191, Dec. 2014.
- [15] IEC Publication 60060-2, *High Voltage Test Techniques, Part 2: Measuring Systems*, 2010.
- [16] E. Kuffel, W. S. Zaengl, and J. Kuffel, *High Voltage Engineering Fundamentals*, 2nd Edition, Published by Butterworth-Heinemann, 2000.
- [17] I. A. Metwally, "Self-integrating rogowski coil for high-impulse current measurement," *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, vol. 59, no. 2, pp. 353 - 360, Feb. 2010.
- [18] IEC Publication 60060-1, *High Voltage Test Techniques, Part 1: General Definitions and Test Requirements*, Edition 3.0, 2010-09.

نشان داده شد. آزمون‌های آزمایشگاهی تطابق عملکرد این مجموعه با استانداردهای بین‌المللی را نشان داده و حکایت از کارایی خوب و ایجاد امکان انجام آزمون‌های نوعی جریان ضربه صاعقه بر روی برق‌گیرهای فشارقوی تا سطح ولتاژ ۴۰۰ کیلوولت را در داخل کشور دارد.

در زمینه بهبود عملکرد مولد جریان ضربه صاعقه، مواردی نظیر امکان افزایش میزان جریان‌دهی مولد از طریق افزایش طبقات مولد، پیشگیری از آسیب مقاومت شنت حین بروز خطا در تجهیز تحت آزمون، ارتقای سطوح جریانی مجموعه جهت انجام آزمون بر روی برق‌گیرهای ۴۰۰ کیلوولت و ... وجود دارند که می‌تواند موضوعاتی جهت مطالعات آتی باشد.

سپاس‌گزاری

طراحی و ساخت این مجموعه به سفارش شرکت انتقال برق پارس و با حمایت مدیران محترم آن شرکت از انجام پژوهش در کشور و در جهت تولید ملی این مجموعه انجام شده است.

ساخت این مجموعه آزمایشگاهی که برای اولین بار در کشور صورت گرفته است متضمن کار مهندسی قابل توجهی بوده که ماحصل تلاش شبانه‌روزی همکاران مرکز مهندسی فشارقوی جهاد دانشگاهی علم و صنعت می‌باشد. همچنین از حمایت‌های مدیریت محترم جهاد دانشگاهی علم و صنعت، همکاری صمیمانه مدیریت و پرسنل شرکت انتقال برق پارس خصوصاً جناب آقای مهندس جوادی تقدیر و سپاس‌گزاری می‌شود.

مراجع

- [1] A. Ur-Rehman and N. Khan, "Design and fabrication of a high voltage lightning impulse generator," *Engineering*, vol. 8, no. 3, pp. 69-73, Mar. 2016.
- [2] P. Yash, S. Rahul, and S. Dave, "Multistage impulse voltage generator," *International J. of Advance Research in Engineering, Science & Technology*, 5 pp., 2016.
- [3] S. Fathima, N. Mariya, and S. Ali, "Performance of a multi-stage impulse generator," *International J. of Ethics in Engineering & Management Education*, vol. 2, no. 2, pp. 57-63, Feb. 2015.
- [4] ع. امیدخدا، ج. جعفری بهنام و س. م. ص. میرغفوریان، "طراحی و ساخت مجموعه آزمایشگاهی تولید ولتاژ ضربه صاعقه و سوئیچینگ ۱۸۰۰ کیلوولت ۱۸۰ کیلوژول،" *مجموعه مقالات بیست و سومین کنفرانس مهندسی برق ایران*، صص. ۳۲۴-۳۱۹، تهران، ۲۴-۲۰ اردیبهشت ۱۳۹۴.
- [5] M. Jayaraju, I. Daut, and M. Adzman, "Impulse voltage generator modelling using MATLAB," *World J. of Modelling and Simulation*, vol. 4, no. 1, pp. 57-63, 2008.
- [6] K. Schon, *High Impulse Voltage and Current Measurement Techniques*, Springer International Publishing Switzerland, 2013.
- [7] IEC Publication 60099-4, *Metal Oxide Arresters without Gaps for AC Systems*, Edition 2.2, 2009-05.

علیرضا امیدخدا مدرک خود را در مقطع کارشناسی برق در سال ۱۳۸۵ از دانشگاه شهید عباسپور دریافت نمود و هم‌اکنون در مقطع کارشناسی ارشد برق قدرت در دانشگاه شهید بهشتی مشغول به تحصیل می‌باشد. ایشان از سال ۱۳۸۷ با مرکز مهندسی فشارقوی جهاد دانشگاهی علم و صنعت در حال همکاری می‌باشد. زمینه‌های علمی و تحقیقاتی مورد علاقه نامبرده شامل موضوعات مربوط به مهندسی فشارقوی از جمله برقیگیرها، کلیدهای قدرت و آزمون‌های اتصال کوتاه است.

جعفر جعفری بهنام متولد ۱۳۵۰ در همدان بوده و تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق- قدرت در سال ۱۳۸۱ در دانشگاه آزاد واحد تهران جنوب و کارشناسی ارشد مهندسی برق- قدرت از دانشگاه علم و صنعت ایران در سال ۱۳۹۵ به پایان رسانده است. ایشان همکاری خود را از سال ۱۳۷۶ در مرکز مهندسی فشارقوی جهاد دانشگاهی علم و صنعت آغاز نموده و در حال حاضر مدیر آن مرکز می‌باشد.

سیدمحمدصادق میرغفوریان متولد ۱۳۳۵ تهران بوده مدرک کارشناسی مهندسی برق قدرت را در سال ۱۳۵۷ از دانشگاه علم و صنعت ایران اخذ کرد و تحصیلات مقاطع M-Phil. و دکتری خود را در رشته مهندسی برق به ترتیب در سال‌های ۲۰۰۹ و ۲۰۱۳ میلادی از دانشگاه منچستر انگلستان به پایان رساند. نامبرده از سال ۱۳۵۹ به عنوان عضو هیأت علمی جهاد دانشگاهی علم و صنعت مشغول به فعالیت اشتغال داشت. علاوه بر فعالیت‌های گسترده پژوهشی و صنعتی، تدریس دروس طرح خطوط هوایی انتقال و ماشین‌های الکتریکی از جمله فعالیت‌های آموزشی ایشان در دانشگاه‌های مختلف به شمار می‌آید. دکتر سیدمحمدصادق میرغفوریان در چهارم تیر ماه بر اثر عارضه قلبی دار فانی را وداع گفت.

عبدالله گرایلی متولد گرگان بوده و تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق قدرت در دانشگاه علم و صنعت و کارشناسی ارشد مهندسی صنایع مدیریت سیستم و بهره‌وری در دانشگاه مازندران به پایان رسانده است. ایشان از سال ۱۳۵۹ عضو جهاد دانشگاهی علم و صنعت بوده و هم اکنون نیز به عنوان عضو هیأت علمی به صورت پاره وقت با مرکز مهندسی فشارقوی جهاد دانشگاهی علم و صنعت همکاری دارد.

حمیدرضا صادق محمدی متولد ۱۳۳۸ در تهران بوده و تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق با گرایش مخابرات و کارشناسی ارشد مهندسی الکترونیک به ترتیب در سال‌های ۱۳۶۲ و ۱۳۶۶ از دانشگاه علم و صنعت ایران و در مقطع دکتری در رشته مهندسی برق با گرایش مخابرات را در سال ۱۳۷۵ از دانشگاه نیو ساوت ولز استرالیا پایان رساند. وی در سال ۱۳۶۰ به جهاد دانشگاهی پیوست و تاکنون مسئولیت‌های مختلفی را در این جهاد بر عهده داشته است و در حال حاضر به عنوان عضو هیأت علمی با مرتبه دانشیار پژوهش و معاون پژوهشی- آموزشی پژوهشکده برق جهاد دانشگاهی به فعالیت اشتغال دارد.

زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: پردازش سیگنال، پردازش صحبت، شناسایی گوینده و الگوریتم‌های بهینه‌سازی. از دکتر صادق محمدی تاکنون بیش از ۶۰ مقاله در مجلات و همایش‌های معتبر داخلی و خارجی انتشار یافته است. ایشان از بدو تأسیس نشریه مهندسی برق و مهندسی کامپیوتر ایران از انتشارات پژوهشکده برق جهاد دانشگاهی در سال ۱۳۸۲ مسئولیت سردبیری این نشریه را عهده‌دار بوده است.