



طراحی مکانیکی سیستم اندازه‌گیری ولتاژ بالا بر اساس تغییرات ظرفیت خازنی

صادقچه، زهرا^(۱)؛ ابراهیمی بسابی، احسان*^(۱)؛ صالحی، محمد^(۲)؛ قاسمی، فرشاد^(۲)

^۱ دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده فیزیک و مهندسی هسته‌ای، گروه فیزیک هسته‌ای

^۲ سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون، پژوهشکده فیزیک و شتابگرها

چکیده:

برای اندازه‌گیری بار جمع شده (ولتاژ) در پایانه ولتاژ بالای شتاب‌دهنده‌های الکترواستاتیک نیاز به روشی است که بار ذخیره شده پس از اندازه‌گیری، اتلاف نشود. این روش *generating voltmeter* نامیده می‌شود، که بر مبنای تغییرات ظرفیت خازنی بین *GVM* و پایانه ولتاژ بالای شتاب‌دهنده عمل می‌کند. در این سیستم اندازه‌گیری از یک روتور چرخان که بین پایانه و استاتور قرار دارد، برای تغییرات ظرفیت خازنی استفاده می‌کنند. انتخاب یک *GVM* مطلوب هدف اصلی این پژوهش می‌باشد. شبیه‌سازی‌ها برای اندازه‌گیری شتاب‌دهنده داینامیترن 500 kV می‌باشد، که نتایج ارزیابی شده آن شامل بار، جریان و میدان الکتریکی القاشده و نیز برخی دیگر از نتایجی است که در مقاله گزارش شده است.

کلمات کلیدی: شتاب‌دهنده الکترواستاتیک، پایانه ولتاژ بالا، *Generating Voltmeter (GVM)*، *CST STUDIO SUITE*

مقدمه:

روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری ولتاژ بالا مانند مقاومت سری، مقسم ولتاژ، *Spark Gap* و *Generating Voltmeter* وجود دارد. در روش‌های مقاومت سری، مقسم ولتاژ و *Spark Gap* سیستم اندازه‌گیری مستقیماً به پایانه ولتاژ بالا متصل می‌شود، اما در روش *GVM* اتصال مستقیمی با پایانه ولتاژ وجود ندارد؛ بنابراین در این روش جریان از پایانه ولتاژ بالا از طریق سیستم اندازه‌گیری اتلاف نمی‌شود. که این مزیتی بسیار مهم برای روش *GVM* می‌باشد و به همین دلیل است که از *GVM* برای اندازه‌گیری ولتاژ منابع با حساسیت بالا مخصوصاً شتاب‌دهنده الکترواستاتیک استفاده می‌کنند [۱،۲]. عملکرد *GVM* بر مبنای تغییرات ظرفیت خازنی بین استاتور و پایانه ولتاژ بالا می‌باشد، به این صورت که یک استاتور با هندسه‌ی پروانه‌ای شکل مقابل پایانه ولتاژ بالا قرار می‌گیرد، سپس یک روتور مشابه با همان هندسه بین پایانه ولتاژ بالا و استاتور می‌چرخد. با چرخش روتور سطح موثری که مقابل پایانه ولتاژ قرار می‌گیرد تغییر می‌کند، که این تغییرات سطح باعث تغییرات ظرفیت خازنی می‌شود [۳،۴]. در این پژوهش ابتدا مبانی نظری *GVM* را بررسی نموده و سپس به بررسی تعداد پره‌های ایده‌آل استاتور و روتور، همچنین بررسی فاصله مناسب پایانه ولتاژ بالا و استاتور می‌پردازیم.

* e.ebrahimi@shahroodut.ac.ir



مبانی نظری :

بار ذخیره شده روی خازن به صورت رابطه (۱) بیان می‌شود:

$$Q(t) = C(t)V \quad (1)$$

با مشتق‌گیری بار روی خازن نسبت به زمان، جریان بصورت رابطه (۲) نمایش داده می‌شود.

$$d/dt Q(t) = d/dt (C(t)V) \rightarrow I = V d/dt C(t) + C(t) d/dt V \quad (2)$$

با فرض ثابت بودن ولتاژ، مشتق زمانی ولتاژ صفر می‌شود. رابطه (۲) به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$d/dt V = 0 \rightarrow I = V d/dt C(t) \quad (3)$$

تغییرات ظرفیت خازن نسبت به زمان متناوب است، بنابراین تابع تغییرات ظرفیت خازن به صورت رابطه (۴) محاسبه می‌شود.

$$C(t) = A + B\sin(\varphi) \quad , \quad \varphi = \omega t \quad , \quad \omega = \omega' b \quad (4)$$

b تعداد پره‌های روتور و ω' سرعت چرخش روتور می‌باشد. برای بدست آوردن ضرایب، یک هندسه خاص استاتور مانند استاتور با هشت قطاع در نظر گرفته می‌شود. ظرفیت خازنی بین پایانه ولتاژ بالا و استاتور، زمانی که روتور کاملاً سطح استاتور را می‌پوشاند با فرض صفر بودن زمان، برابر کمینه می‌باشد و زمانی که پره‌های روتور ۴۵ درجه نسبت به حالت اول خود می‌چرخند، سطح استاتور کاملاً در مقابل پایانه ولتاژ قرار می‌گیرد، که در این حالت ظرفیت خازنی بیشینه است. ضرایب ثابت رابطه (۴) را می‌توان با استفاده از شرایط مرزی ذکر شده، بدست آورد:

$$\varphi = \omega t = 0 \rightarrow C(0) = A = C_0 = C_{\min} \quad (5)$$

$$\varphi = \omega t = \pi / 4 \rightarrow C_{\max} = C(\pi / 4) = C_{\min} + B \sin(\pi / 4) \quad (6)$$

$$\rightarrow B = \sqrt{2}(C_{\max} - C_{\min})$$

معادله تغییرات ظرفیت خازن در نهایت به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$C(t) = C_{\min} + \sqrt{2}\Delta C \sin(\omega t) \quad (7)$$

در رابطه بالا تغییرات ظرفیت خازنی به صورت $\Delta C = (C_{\max} - C_{\min})$ است.

با توجه به رابطه (۳) و (۷) جریان به صورت رابطه (۸) محاسبه می‌شود.

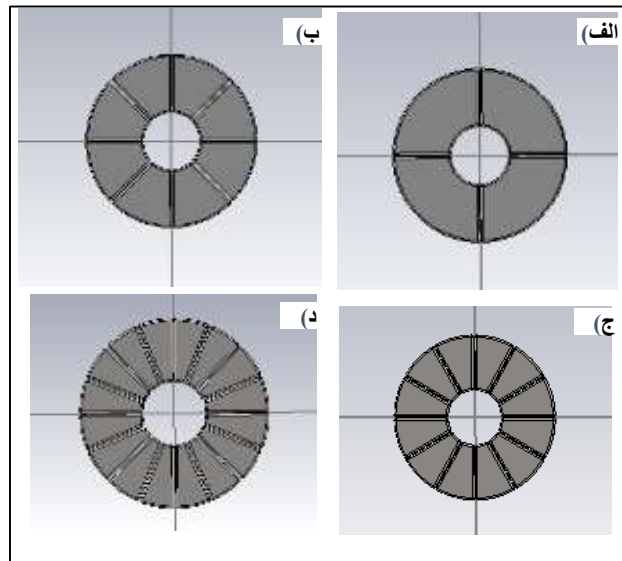
$$I(t) = \sqrt{2}V\omega\Delta C \cos(\omega t) \quad (8)$$

در پایان ولتاژ مجهول از رابطه (۹) قابل دستیابی است.

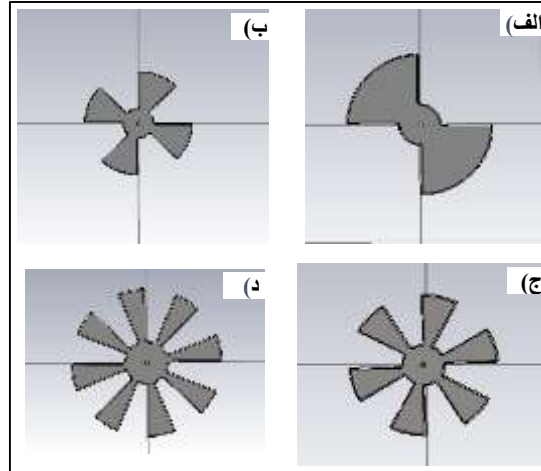
$$V = \frac{I(t)}{\sqrt{2\omega\Delta C \cos(\omega t)}} \quad (9)$$

روش کار:

در ادامه سعی داریم یک GVM برای شتابدهنده الکترواستاتیک با ولتاژ ۵۰۰ کیلوولت طراحی کنیم. برای طراحی این سیستم اندازه‌گیری از نرم افزار CST STUDIO SUITE استفاده می‌کنیم. در شکل ۱ و ۲ استاتورهای با الف) چهار، ب) هشت، ج) دوازده، د) شانزده قطاع و روتور متناسب با هر استاتور آورده شده‌است، هر کدام از این استاتورها شامل دو سنسور با ۱۸۰ درجه اختلاف فاز می‌باشند.

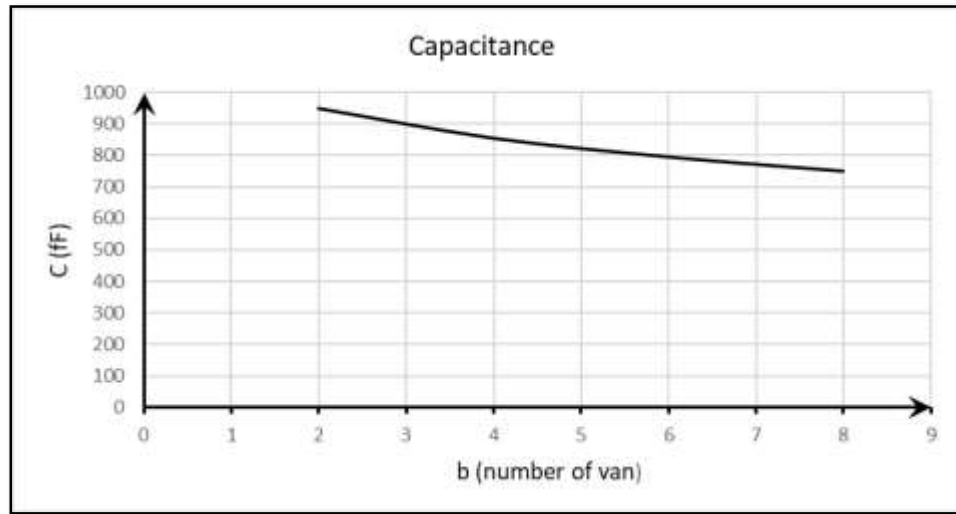


شکل (۱): GVM های طراحی شده با استاتور الف) چهار پره، ب) هشت پره، ج) دوازده پره، د) شانزده پره.



شکل (۲): GVM های طراحی شده با روتور الف) دو پره،
ب) چهار پره، ج) شش پره، د) هشت پره.

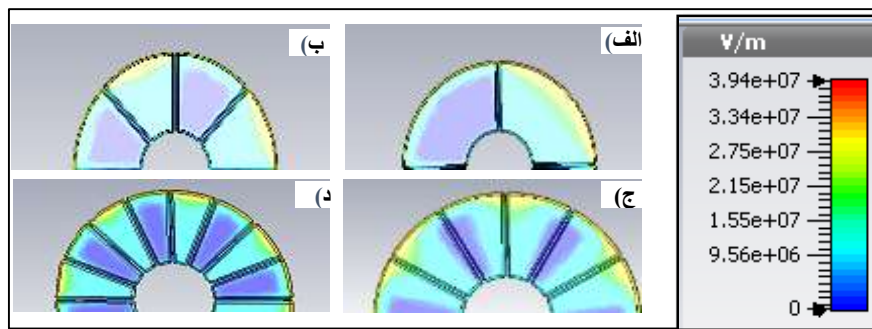
هرکدام از این استاتورها بصورت جداگانه مقابل پایانه ولتاژ بالا (با قطر ۷۰ و ضخامت ۰/۵ سانتی متر) قرار می گیرند. نمودار تغییرات ظرفیت خازنی بیشینه در شکل ۳ آورده شده است.



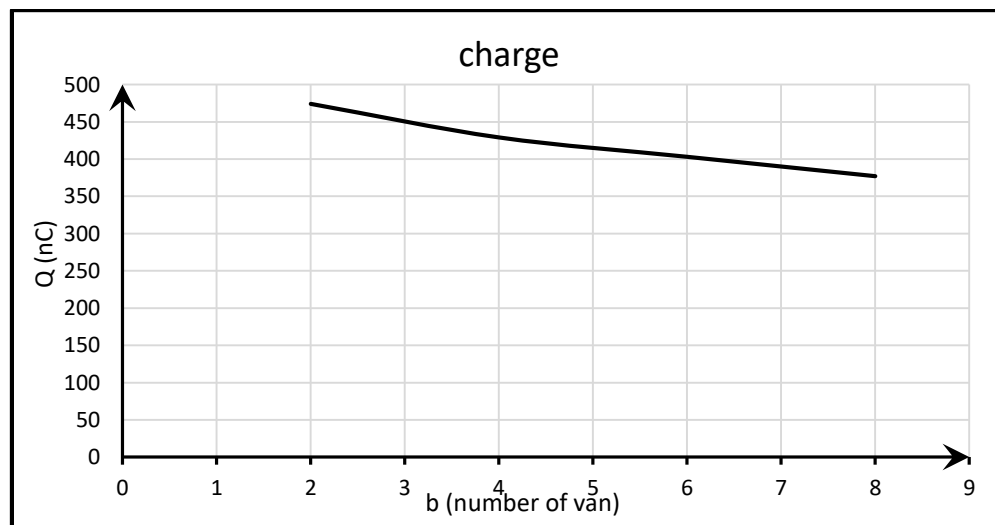
شکل (۳): نمودار تغییرات ظرفیت خازنی بیشینه بر حسب تعداد پره‌های روتور

شکل ۴ توزیع میدان را برای هرکدام از استاتورها نمایش می دهد و همان گونه مشاهده می شود که با افزایش تعداد پره‌ها اثرات لبه بیشتر شده توزیع میدان برای استاتور با پره‌های بیشتر کاهش می یابد، در نتیجه جریان القایی بر روی استاتور نیز

کم می شود. در شکل ۵، می توان تغییرات بار القایی بی شینه بر حسب تعداد پره های روتور را مشاهده نمود. با توجه به این که توزیع میدان الکتریکی همواره به سمت لبه ها است، هر چه تعداد پره ها افزایش پیدا کند، تعداد لبه ها نیز بیشتر می شود. از این رو به نسبت بیشتری توزیع میدان الکتریکی به سمت لب ها متمایل می شود. بنابراین از منظر توزیع مناسب میدان الکتریکی القایی، باید تعداد پره ها کم باشد.

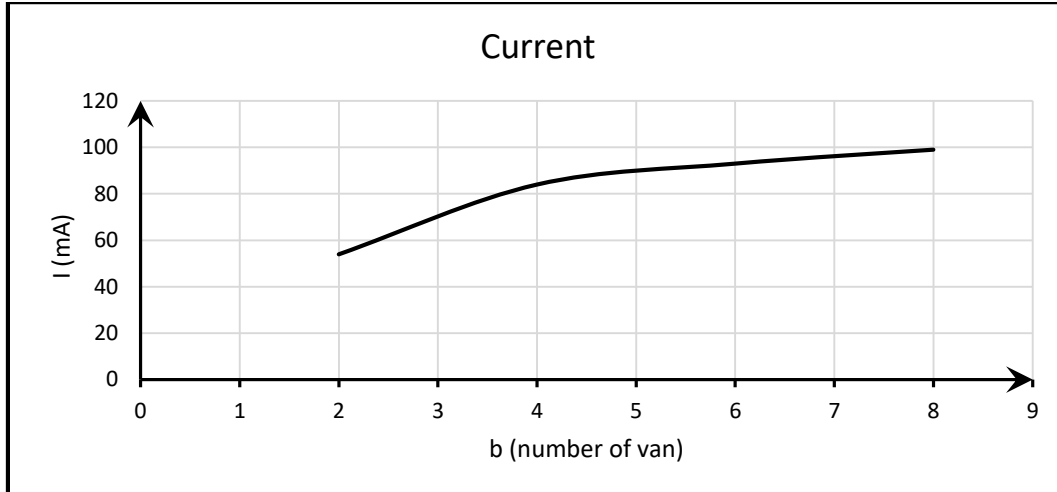


شکل (۴): توزیع میدان برای استاتورهایی با (الف) چهار، (ب) هشت، (ج) دوازده، (د) شانزده قطاع



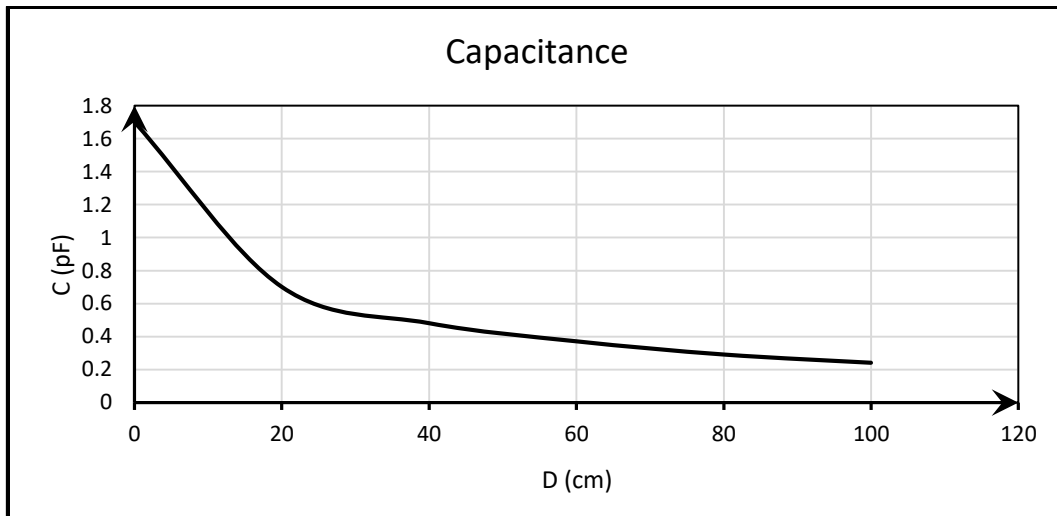
شکل (۵): نمودار تغییرات بارالقایی بی شینه بر حسب تعداد پره های روتور

با استفاده از رابطه (۸) جریان القایی را برای هریک از استاتورها محاسبه می کنیم، که سرعت چرخش روتور را برابر ۳۰۰۰ دور بر دقیقه در نظر می گیریم. نمودار جریان بر حسب تعداد پره های روتور در شکل ۶ نمایش داده شده است.



شکل (۶): نمودار تغییرات جریان الکتریکی بر حسب تعداد پره‌های روتور

طبق این نمودار با افزایش تعداد پره‌ها جریان القایی بیشتر می‌شود، در ادامه تاثیر افزایش فاصله پایانه ولتاژ نسبت به استاتور ۱۶ قطبی مشاهده می‌کنیم. شکل شماره ۷ تغییرات ظرفیت خازنی را نسبت به افزایش فاصله نمایش می‌دهد.



شکل (۷): نمودار تغییرات ظرفیت خازنی بر حسب افزایش فاصله پایانه تا GVM



طبق این نمودار هرچه فاصله بیشتر می شود ظرفیت کاهش می یابد، اما فاصله ۳۰ سانتی متری که در ابتدا ذکر شد فاصله ایده آل ما می باشد، در فاصله های کمتر از ۳۰ سانتی متر شکست ولتاژ اتفاق می افتد و اسپارک می زند.

نتایج:

طبق آنچه که برای استاتور ۱۶ قطعی در شبیه سازی بدست آمده است، ظرفیت خازنی بیشینه و کمینه به ترتیب برابر با ۰/۷۵۱ و ۰/۵۸۸ پیکو فاراد می باشد. سرعت چرخش روتور را می توان مقادیر مختلفی مانند ۱۵۰۰، ۱۸۰۰، ۳۰۰۰، ۳۶۰۰ دور بر دقیقه انتخاب نمود، که در اینجا ۳۰۰۰ دور بر دقیقه را انتخاب کردیم. بنابراین با داشتن مقادیر بیشینه و کمینه ظرفیت خازنی و نمودار جریان می توان ولتاژ مجهول را برای شتاب دهنده الکترو استاتیک بدست آورد. برای کالیبراسیون این سیستم می توان از یک شتاب دهنده الکترو استاتیک که قبلا ولتاژ آن توسط سیستم های اندازه گیری دیگر مانند مقسم ولتاژ بدست آمده است، استفاده نمود. اما باید توجه داشت، هنگام اندازه گیری با مقسم ولتاژ مقداری از جریان اتلاف می شود. در نهایت باید این جریان اتلاف شده را محاسبه و در فرایند اندازه گیری اضافه کنیم.

بحث و نتیجه گیری :

این بررسی ها برای ارزیابی مقادیر بهینه برای تعداد مناسب استاتور (روتور) و فاصله ابزار GVM تا، انجام پایانه شد. پس از شبیه سازی و بررسی های موردی، تعداد پره های روتور ۸ پره (استاتور به صورت ۱۶ قطاع) بدست آمد. ضمنا با توجه به اینکه گاز درون مخزن شتاب دهنده را هوا در نظر گرفتیم، فاصله مناسب پایانه از دستگاه GVM، ۳۰ سانتی متر می باشد، زیرا در فاصله های نزدیک تر بدلیل شکست ولتاژ جرقه ایجاد می شود.

مراجع:

- [1] E. Kuffel, et al. Measurement of high voltages., High Voltage Engineering, Butterworth-Heinemann. 2000.
- [2] M S.Naidu and V Kamaraju; High Voltage Engineering. Fourth Edition. 2009.
- [3] R. Dhandapani, et al. A Generating Voltmeter for The Measurement of the Terminal Voltage of the 2MV Tandem Accelerator. Journal title, 65A, 424-427. 1991.
- [4] A. Shemyakin, et al. Stability of Electron Energy in the Fermilab Electron Cooler, CONF-08-425-AD, 2009.