



بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

محاسبه زمان انتشار جبهه موج پتانسیل در دستگاه پلاسمای کانونی با استفاده از اندوکتانس و امپدانس مشخصه و بررسی تأثیر آن در تاخیر وقوع شکست

حسین، پیرجمادی: ندا، شمسیان: بابک، شیرانی بیدآبادی

دانشگاه اصفهان، دانشکده علوم و فناوریهای نوین، گروه مهندسی هسته ای

چکیده:

سرعت انتشار موج پتانسیل در یک خط انتقال محدود است و این امر موجب به وجود آمدن یک تاخیر در رسیدن جبهه موج به محل مورد نظر می شود. می توان سرعت انتشار موج در سیستم هم محور پلاسمای کانونی و زمان مورد نیاز جهت پیمایش طول آند را تخمین زد. سرعت انتشار جبهه موج پتانسیل و تاخیر زمانی ایجاد شده ناشی از آن تا رسیدن این موج ضربه تا لبه عایق در دستگاه پلاسمای کانونی دانشگاه اصفهان *UIPFI* محاسبه شد. این بازه زمانی بین اعمال پتانسیل به آند و انتشار آن تا رسیدن به لبه عایق می تواند از عوامل موثر بر تاخیر زمانی وقوع شکست باشد.

کلیدواژه: پلاسمای کانونی، شکست الکتریکی، بهمن الکترونی، زمان تاخیری شکست

مقدمه

با انتشار یک سیگنال الکتریکی در یک جفت رسانا، هر بخش از این مدار الکتریکی بعنوان یک جزء از یک مدار فشرده الکتریکی عمل می کند. در این فرم ساده که مدل بدون اتلاف در تئوری خطوط انتقال نامیده می شود، مدار معادل یک خط انتقال فقط شامل ظرفیت خازنی^۱ و اندوکتانس^۲ است. این عناصر الکتریکی به صورت یکنواخت در راستای خط توزیع شده اند.

در عمل با استفاده از سیم های از جنس ابررسانا می توان مقاومت الکتریکی خطوط انتقال را تا حد بسیار ناچیز پایین آورد، ولی حذف ظرفیت خازنی در واحد طول سیم امکان پذیر نیست. هر رسانا یک ظرفیت خازنی نسبت به زمین و یا ناشی از مجاورت با رساناهای اطراف دارد.

با بسته شدن کلید و اعمال اختلاف پتانسیل بین این دو سیم یک میدان الکتریکی بین آنها ایجاد می شود. انرژی در این میدان الکتریکی ذخیره می شود و این انرژی ذخیره شده در برابر تغییر پتانسیل واکنش نشان می دهد و با آن مقابله می نماید. واکنش خازن در برابر تغییر ولتاژ توسط رابطه

^۱ Capacitance

^۲ Inductance



بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ و دانشگاه اصفهان

$$I = C \frac{dV}{dt} \quad (1)$$

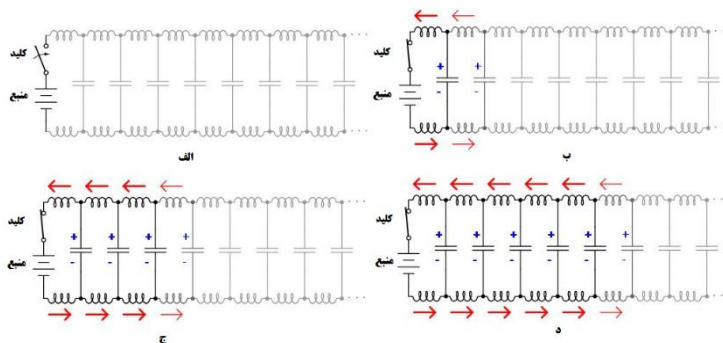
بیان می‌شود و نشان می‌دهد که جریان عبوری متناسب با آهنگ تغییرات ولتاژ نسبت به زمان تغییر می‌کند. با این وجود جریانی که توسط یک جفت سیم موازی حمل می‌شود نامحدود نیست و اندوکتانس‌هایی به صورت سری در امتداد این سیم وجود خواهند داشت.

همچنین جریان عبوری از یک سیم رسانا، یک میدان مغناطیسی در اطراف سیم القا می‌کند. انرژی در این میدان مغناطیسی ذخیره شده، با تغییر در جریان عبوری مخالفت کرده و در برابر تغییرات جریان واکنش نشان می‌دهد. در این حالت افت ولتاژ دوسر یک المان کوچک به صورت

$$V = L \frac{dI}{dt} \quad (2)$$

بیان می‌گردد. این افت ولتاژ ناشی از تغییرات جریان، آهنگ تغییرات ولتاژ بین توزیع ظرفیت خازنی را محدود می‌کند و از رسیدن جریان به مقداری نامحدود جلوگیری می‌نماید.

سرعت نسبی الکترون‌ها درون سیم (به سمت هم یا خلاف سمت یکدیگر) نزدیک سرعت نور است، لذا جبهه موج ولتاژ و جریان نیز در طول سیم‌ها با همان سرعت انتشار می‌یابد (شکل ۱). در نهایت جریانی ثابت و محدود از منبع در سیم‌ها جاری می‌گردد. اگر سیم‌ها به اندازه بی‌نهایت بلند باشند، توزیع خازنی بین آنها هرگز پر نخواهد شد و اختلاف پتانسیل بین آنها هرگز به منبع نخواهد رسید. همچنین توزیع اندوکتانس نیز هرگز اجازه رسیدن به جریان نامحدود را نخواهد داد [۴-۱].



شکل (۱) انتشار موج ولتاژ و جریان در یک خط انتقال

روش کار

۱- محاسبه مشخصات الکتریکی سیستم پلاسمای کانونی از دیدگاه نظریه انتقال قدرت
امپدانس مشخصه مانند یک مقاومت در خطوط انتقال قدرت عمل می‌کند و توان تولید شده توسط یک منبع که به یک خط انتقال وصل شده است را بدون وجود تلفات در امتداد این خط جاری می‌سازد. یکی از عوامل موثر در محاسبه امپدانس مشخصه یک خط انتقال توان با هندسه هم‌محور ماده عایق بین دو سیم رسانا است. در دستگاه



بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۷ و ۶ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

پلاسمای کانونی عایقی از جنس کوارتز، آند را دربر گرفته است. گاز مورد استفاده در محفظه خلا دستگاه پلاسمای کانونی نیز به عنوان یک عایق گازی در این دستگاه عمل می‌کند. بنابراین می‌توان دستگاه پلاسمای کانونی را ترکیبی از دو خازن^۳ استوانه‌ای که توسط دو عایق مجزا به شکل سری به هم متصل شده‌اند در نظر گرفت. امپدانس خطوط انتقال در واحد اهم^۴ به عنوان امپدانس مشخصه شناخته می‌شود.

برای حالت هندسه هم محور که دو سیم استوانه‌ای به عنوان خطوط انتقال مورد استفاده قرار می‌گیرند داریم:

$$Z_0 = \frac{138}{\sqrt{k}} \log\left(\frac{d_1}{d_2}\right) \quad (3)$$

d_1 و d_2 به ترتیب قطر الکترودهای داخلی و خارجی می‌باشند. فاکتور سرعت^۵ ضریبی است که فقط وابسته به ثابت دی‌الکتریک عایق است و به شکل زیر بیان می‌شود:

$$\text{ضریب سرعت} = \frac{v}{c} = \quad (4)$$

$\frac{1}{\sqrt{k}}$ امپدانس مشخصه همچنین با عنوان امپدانس طبیعی نیز شناخته می‌شود و معادل با مقاومت معادل یک خط انتقال است که بسیار طویل می‌باشد.

با افزایش فاصله بین دو رسانا امپدانس مشخصه نیز افزایش می‌یابد. ظرفیت خازنی کم‌تر و اندوکتانس سری بالاتر منجر به حمل جریال کوچک‌تر توسط خط انتقال به ازای میزان معینی از ولتاژ اعمالی است. برعکس با نزدیک کردن دو سیم به یکدیگر ظرفیت خازنی موازی بین دو سیم افزایش یافته و اندوکتانس سری کاهش می‌یابد. این تغییرات منجر به حمل جریان انتشار بالایی به ازای یک ولتاژ معین می‌گردد.

با توجه به شکل (۲) که حالت ساده شده هندسه دوخازن هم‌محور (عایق از جنس کوارتز و گاز درون محفظه) پلاسمای کانونی است، می‌توان مجموعه مورد نظر را ترکیبی از دو خازن استوانه‌ای که هر کدام از یک ماده دی-الکتریک پر شده است در نظر گرفت.

^۳ Capacitor

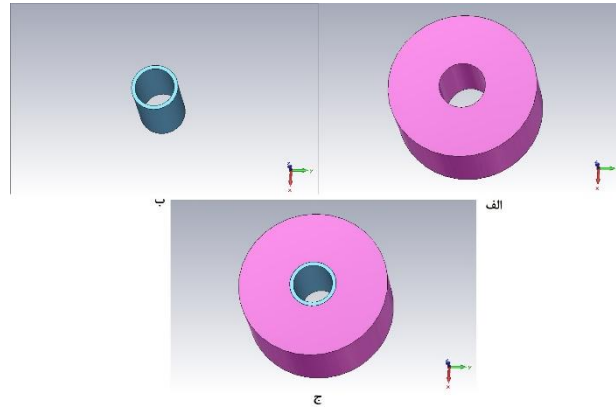
^۴ Ohm

^۵ Velocity Factor



بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان



شکل ۲ هندسه دو استوانه هم محور به عنوان دو خازن استوانه‌ای هم‌محور

ظرفیت یک خازن با هندسه مشخص را می‌توان کاملاً با توجه به ابعاد آن محاسبه نمود. برای یک خازن استوانه‌ای به طول L که دارای شعاع داخلی a و شعاع خارجی b است و با عایقی با ثابت دی‌الکتریک k پر شده است، ظرفیت خازنی به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$C = k\epsilon_0 \frac{2\pi L}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)} \quad (5)$$

در هندسه مورد نظر مواد دی‌الکتریک به کار رفته به ترتیب شیشه کوارتز و گاز آرگون هستند. در جدول (۱) ثابت‌های دی‌الکتریک مربوط به این دو ماده ارائه شده است.

جدول (۱) ثابت دی‌الکتریک چند ماده عایق

ثابت دی‌الکتریک	جنس دی‌الکتریک
۱/۰۰۰۵۱۳	آرگون
۱/۰۰۰۵۲۶	هوا
۴/۵	شیشه کوارتز
۴/۳ - ۴/۵	شیشه پیرکس

با توجه به هندسه انتخاب شده ارتفاع موثر عایق در دستگاه پلاسمای کانونی 4cm است، لذا ارتفاع خازن مورد نظر را برابر با 4cm در نظر می‌گیریم. شعاع داخلی خازن C_1 برابر با $1/05\text{cm}$ و شعاع خارجی آن $1/25\text{cm}$ می‌باشد. شعاع داخلی خازن C_1 برابر با $1/25\text{cm}$ و شعاع خارجی آن برابر با 4cm است. بنابراین اطلاعات موجود جهت محاسبه ظرفیت خازنی مشخصه دستگاه پلاسمای کانونی داریم:

$$\frac{C_1}{l} = k_1 \epsilon_0 \frac{2\pi}{\ln(b_1/a_1)} = \quad (6)$$

$$14.34 \left(\frac{PF}{cm}\right)$$



بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

$$\frac{C_2}{l} = k_2 \epsilon_0 \frac{2\pi}{\ln(b_2/a_2)} = 0.48 \left(\frac{PF}{cm} \right) \quad (7)$$

و برای محاسبه ظرفیت معادل آن با توجه به این که دو خازن به شکل سری به هم وصل شده‌اند، داریم:

$$\frac{1}{C_{tot}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} = 2.153 (cm.PF^{-1}) \rightarrow C_{tot} = 0.465 \left(\frac{PF}{cm} \right) \quad (8)$$

با توجه به نتایج به دست آمده مشاهده می‌شود که ظرفیت کل بسیار نزدیک به ظرفیت خازن C_2 است. همچنین بیش‌ترین تاثیر در امپدانس مشخصه و اندوکتانس نیز ناشی از خازن C_2 است؛ لذا با تقریب خوبی می‌توان در انجام محاسبات و شبیه‌سازی‌ها کل فضای بین الکترودها را پر شده از گاز آرگون در نظر گرفت.

اندوکتانس مشخصه یک خط انتقال هم‌محور به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$\left(\frac{L}{l} \right) = \frac{\mu}{2\pi} \ln(b/a) \quad (9)$$

که در آن μ ضریب گذردهی نسبی مغناطیسی ماده عایق بین الکترودها می‌باشد. با فرض اینکه همه فضای بین عایق‌ها توسط گاز آرگون پر شده است داریم:

$$L_{tot} = 2.675 \left(\frac{nH}{cm} \right) \quad (10)$$

و نهایتاً امپدانس مشخصه خط انتقال مورد نظر که طبق رابطه (۹) بیان می‌شود عبارتست از:

$$Z_0 = \frac{138}{\sqrt{k}} \log\left(\frac{b}{a}\right) = 80.32 \Omega \quad (11)$$

۲- تاخیر در انتشار^۶

تأخیر در انتشار به‌عنوان تابعی از اندوکتانس مشخصه و ظرفیت خازنی مشخصه یک خط انتقال، به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$T_{pd} = \sqrt{L_0 C_0} \left(\frac{ns}{u \text{ nitlength}} \right) \quad (12)$$

و معادل زمانی است که طول می‌کشد تا سیگنال ولتاژ در رسانا از یک نقطه تا نقطه مورد نظر انتشار یابد. در هندسه مورد نظر این تأخیر در انتشار موج ولتاژ عبارتست از:

$$t_{pd} = 33.34 \left(\frac{Ps}{cm} \right) \quad (13)$$

این تأخیر محاسبه شده برابر با زمان لازم جهت انتشار جبهه موج پتانسیل درون آنند تا رسیدن به لبه عایق می‌باشد.



بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۷ و ۸ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

نتیجه گیری

- ۱- بیشترین تاثیر در تاخیر انتشار وابسته به ظرفیت خازنی هندسه دستگاه پلاسمای کانونی است که آن هم بستگی شدیدی به نوع گاز مورد استفاده در دستگاه دارد. در این حالت عایق استفاده شده در اطراف آند که معمولا از جنس کوارتز می باشد تاثیر چندانی در انتشار جبهه موج پتانسیل ندارد.
- ۲- با توجه به اینکه طول موثر عایق در دستگاه پلاسمای کانونی دانشگاه اصفهان 6 cm می باشد، زمان لازم از لحظه اعمال ولتاژ به آند تا رسیدن جبهه موج پتانسیل سر عایق برابر با 200 pS محاسبه شد.
- ۳- تاخیر ناشی از انتشار ولتاژ در قیاس با زمان تشکیل بهمن الکترونی ناچیز است، بنابراین می توان اعمال پتانسیل به آند را به صورت آنی در نظر گرفت و از تاثیر آن در تاخیر شکست چشم پوشی کرد.

مراجع:

- [1] Coney, R.G. 1987. "The Protection of ESKOM's Alpha and Beta 400/765 kV Transmission Lines." Open Conference on EHV Transmission Systems. Eskom Megawatt Park Auditorium. 23 November.
- [2] EPRI. 1982. *Transmission Line Reference Book: 345 kV and Above*. Second Edition, Revised.
- [3] Krylov, S. V. 2004. "Design, Mechanical Aspects and Other Subjects of Compact EHV Overhead Line Technology." Presented at Midwest ISO Expanding Seminar on High Surge Impedance Loading Transmission Line Design and Magnetically Controlled Reactors. St. Paul, Minnesota. September 16.
- [4] Le Roux, B. C., A. C. Britten, K. J. Sadurski, and A. W. Chilton. 1987. "A Review of EHV Air Breakdown Studies in South Africa." Open Conference on EHV Transmission Systems. Eskom Megawatt Park Auditorium. 23 November.