

بررسی اضافه ولتاژهای ناشی از برخورد صاعقه به خط انتقال و نفوذ

آن به سیم پیچ مبدل به کمک شبیه سازی مونت کارلو

دکتر حسین محسنی - دکتر کارولوکس

اعضاء هیئت علمی گروه مهندسی برق و کامپیوتر - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

مهندس گیورک قره پتیان

دانشجوی دکترای گروه مهندسی برق و کامپیوتر - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

چکیده

در این مقاله شکل موج صاعقه ای که به خط انتقال برخورد می کند و در آن منتشر می شود، با توجه به تابع توزیع پارامترهای این شکل موج، مدل شده است. سپس بر مبنای روش شبیه سازی مونت کارلو، برخورد صاعقه به خط، انتشار، و سپس نفوذ آن به سیم پیچ مبدل (ترانسفورماتور)، شبیه سازی شده است. با توجه به نتایج شبیه سازی، اضافه ولتاژهای ایجاد شده در مبدل مورد بررسی قرار گرفته است و مشخص شده است که در لحظات اولیه برخورد موج به مبدل، اضافه ولتاژهایی در ورودی آن به وجود می آید که مقدار آن اگر به روش قطعی مشخص گردد، نتیجه بسیار بدبینانه است. ولی به کمک شبیه سازی مونت کارلو می توان به نتایج واقع بینانه تری رسید.

در این مقاله مشخص شده است که میانگین حداکثر اضافه ولتاژی که در هر گره به دست می آید کمتر از مقداری است که به روش قطعی (با شکل موج استاندارد صاعقه) مشخص می شود و نود درصد اضافه ولتاژهای به وجود آمده در فاصله $\mu - \delta$ تا $\mu + 2\delta$ قرار می گیرند. همچنین مشخص شده است که با افزایش ظرفیتهای خازنی مبدل، دامنه اضافه ولتاژهای به وجود آمده کاهش می یابند. ولی در عوض نوسانات ولتاژ در مبدل دیرتر میرا می شوند.

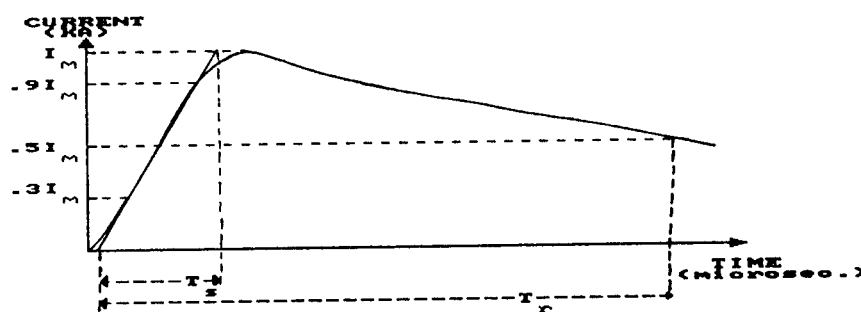
مقدمه

شود، نتیجه بدون تغییر خواهد ماند. در این روش در صورتی که ورودی به مبدل، جریان صاعقه باشد، باید از شکل موج $1,2/50$ با دامنه 31 کیلو آمپر استفاده نمود. (یعنی موجی با زمان پیشانی $1,2$ میکروثانیه و نیم زمان پشت 50 میکروثانیه) ولی با توجه به رفتار تصادفی صاعقه، پاسخ به دست آمده از

جهت بررسی رفتار سیم پیچ مبدل به ازای ورودیهای گوناگون به دو روش می توان عمل نمود. در روش اول شکل موج ورودی کاملاً معلوم فرض می شود و با حل معادله دیفرانسیل با مشتقات جزئی (PDE) مبدل به یک جواب قطعی و مشخص می رسیم [۱]. هر چند بار هم که برنامه اجرا

ولی اکثراً قطبیت آن منفی است. طول زمان دوام صاعقه از چند میکروثانیه تا چند صد میکروثانیه است. یک صاعقه معمولاً شامل چند برخورد است که دامنه جریان برخورد اول از همه بیشتر است. لذا جهت بررسی اضافه ولتاژها فقط مدل‌سازی برخورد اول کافی است.

هر صاعقه دارای سه پارامتر مهم است که در شکل (۱) این پارامترها مشخص شده‌اند. مهمترین آنها I_m حداکثر دامنه جریان صاعقه است و دیگر پارامترها عبارتند از T_s ، زمان



شکل (۱): شکل موج جریان صاعقه

می‌توان به رابطه زیر رسید:

$$T_2 = \frac{T_s}{2.282835} \quad (3)$$

از طرفی با توجه به اینکه جمله دوم رابطه (۱) بسیار سریع به سمت صفر میل می‌کند، بنابراین برای محاسبه T_1 می‌توان نوشت:

$$i(t) \approx \alpha I_m (e^{-t/T_1} - 0) \quad (4)$$

و از آنجا خواهیم داشت:

$$T_1 = 1.365434 * T_r \quad (5)$$

از آنجائی که T_s و T_r بر اساس اندازه‌گیریهای انجام شده [۳]، دارای توزیعهای مشخصی هستند، بنابراین می‌توان به روش مونت کارلو بر اساس این توزیعها T_s و T_r و با توجه به روابط (۳) و (۵)، T_1 و T_2 را مشخص نمود.

در رابطه با دامنه جریان صاعقه، توزیع لوگ-نرمال [۴] و همچنین ماکسول [۵] پیشنهاد شده است. IEEE با جمع‌بندی

این روش بیانگر رفتار واقعی مبدل نخواهد بود.

در روش دوم که مورد نظر این مقاله است، به کمک شبیه‌سازی مونت کارلو [۵] شکل موج صاعقه به صورت تصادفی مدل می‌شود و بر این اساس می‌توان به نتایج واقع‌بینانه‌تری دست یافت.

۱- مدل‌سازی

۱-۱ مدل‌سازی صاعقه

صاعقه بادو قطبیت مثبت و منفی در طبیعت دیده می‌شود

پیش موج (زمان پیشانی) و T_R نیم زمان پشت موج. برای بررسیهای قطعی، پارامترهای صاعقه را $I_m = 31 \text{ kA}$ ، $T_s = 1/2 \mu\text{s}$ و $T_R = 50 \mu\text{s}$ در نظر می‌گیرند.

با توجه به اینکه رفتار صاعقه در محدوده گسترده‌ای از مقادیر T_s ، I_m و T_R تصادفی است، لذا شبیه‌سازی مونت کارلو نتایج واقعی‌تری را نسبت به انجام بررسی با یک I_m ، T_s و T_R مشخص به بار خواهد آورد. جریان صاعقه را می‌توان به صورت رابطه زیر نوشت.

$$i(t) = \alpha I_m (e^{-t/T_1} - e^{-t/T_2}) \quad (1)$$

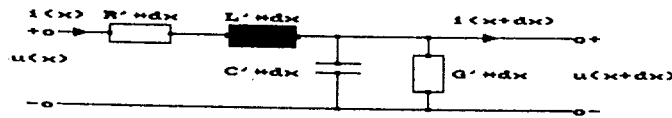
جهت مشخص‌سازی ارتباط بین پارامترها می‌توان فرض کرد که با توجه به کوچک بودن T_2 نسبت به T_1 در لحظات اولیه داریم:

$$i(t) \approx \alpha I_m (1 - e^{-t/T_2}) \quad (2)$$

با توجه به تعریف T_s (خط واصل از $0.3I_m$ به $0.9I_m$)

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = R'G'u + (R'C' + L'G') \frac{\partial u}{\partial t} + L'C' \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (۸)$$

$$\frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = R'G'i + (R'C' + L'G') \frac{\partial i}{\partial t} + L'C' \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} \quad (۹)$$



شکل (۲): جزء دیفرانسیلی خط انتقال

در صورت صرف نظر کردن از R' و G' و با فرض اینکه $\frac{\partial u}{\partial t} = 0$ در لحظه $t = 0$ برابر صفر و $U(x,t)$ در لحظه $t = 0$ برابر $f(x)$ باشد، خواهیم داشت:

$$u(x,t) = \frac{1}{2} (f(x+vt) + f(x-vt)) \quad (۱۰)$$

$$i(x,t) = \frac{1}{2} (h(x+vt) - h(x-vt)) \quad (۱۱)$$

یعنی می توان گفت در صورت برقراری شروط فوق بعد از برخورد صاعقه به خط، صاعقه به دو قسمت مساوی تقسیم می شود. یکی با سرعت $+v$ به سمت x های مثبت و دیگری با سرعت $-v$ به سمت x های منفی می رود. ثابت می شود که در صورت تغییر محیط انتشار (که خطی است با امپدانس مشخصه Z_0) مسئله انعکاس و شکست پیش می آید [۷] و برای هر لحظه می توان نوشت:

$$u = u_v + u_r \quad (۱۲)$$

$$i = i_v + i_r \quad (۱۳)$$

$$u_v = Z_0 i_v \quad (۱۴)$$

$$u_r = -Z_0 i_r \quad (۱۵)$$

در این مقاله فرض می کنیم که طول خط انتقال طولانی است و مطابق شکل (۳) آن قسمتی از موج که به سمت منبع

نتایج کار دیگران، توزیع زیر را برای دامنه جریان صاعقه پیشنهاد کرده است [۶].

$$P(i>I) = \frac{1}{1 + \frac{I^{2.6}}{31}} \quad (۶)$$

که در این رابطه واحد جریان کیلو آمپر می باشد. به کمک این رابطه بر اساس "روش معکوس سازی" [۲] متغیر تصادفی I تولید می شود.

طبیعی است که در اولین گام برای تولید T_R ، T_S و I_m از سه مولد با سه "بذر" مجزا استفاده شود [۲]. ولی عملاً این سه پارامتر مستقل از یکدیگر نیستند چون جهت تغییرات آنها مشابه است. برای مثال حالتی را در نظر بگیرید که در ابر بار زیادی جمع شده باشد، بنابراین مشخص است که نسبت به یک حالت کم بار، I_m بیشتر خواهد بود. از طرفی افزایش بار به معنی بالا بودن پتانسیل است. بنابراین نرخ تغییرات جریان نیز، بیشتر خواهد بود. با توجه به شکل (۱) می توان نوشت:

$$\frac{di}{dt} \approx \frac{I_m}{T_s} \quad (۷)$$

از آنجائی که میزان افزایش I_m بیشتر از di/dt است، بنابراین می توان نتیجه گرفت که T_s برای یک I_m بزرگتر، بیشتر است. همچنین برای T_R می توان گفت، زمانی که بار ابر زیادتر باشد، مدت زمان تخلیه بارها نیز افزایش می یابد. به عبارت دیگر T_R نیز افزایش خواهد یافت. بنابراین با توجه به تغییرات همنوای این سه پارامتر بهتر است که از یک مولد برای تولید آنها سود جست.

۲-۱- مدل سازی انتشار صاعقه در خط

جزء دیفرانسیلی خط انتقال را می توان مطابق شکل (۲) در نظر گرفت. برای این چنین خط انتقالی می توان به PDE زیر رسید [۶].

ظرفیت این دسته حلقه نسبت به بدنه و M مشخص کننده القای متقابل بین هر دو دسته حلقه است. همانگونه که دیده می شود در هر گره این مدل، یک جریان سلفی I_L ، یک جریان خازنی I_C و یک جریان اهمی I_G وجود دارد. جریان تزریقی به هر گره برابر مجموع این جریانهاست، یعنی:

$$I = I_C + I_L + I_G \quad (۱۶)$$

با تعریف M به عنوان ماتریس القاگری شبکه و C به عنوان ماتریس ظرفیت شبکه و G به عنوان ماتریس هدایت الکتریکی، می توان به روابط زیر رسید [۸]:

$$I_C = C \cdot U' \quad (۱۷)$$

$$I_L = A \cdot M^{-1} \cdot A^T \cdot U \quad (۱۸)$$

$$I_G = G \cdot U \quad (۱۹)$$

در این روابط، U بردار ولتاژ گره ها و A ماتریس تلاقی شبکه را مشخص می کند. با استفاده از این سه رابطه و مشتق رابطه (۱۶) می توان به رابطه زیر رسید.

$$I' = C \cdot U'' + G \cdot U' + H \cdot U \quad (۲۰)$$

که در اینجا داریم:

$$H = A \cdot M^{-1} \cdot A^T \quad (۲۱)$$

با استفاده از روابط زیر:

$$U(t+\Delta t) = 2U(t) - U(t - \Delta t) + \Delta t^2 \cdot U''(t) \quad (۲۲)$$

$$I'(t) = \frac{1}{\Delta t} (I(t) - I(t-\Delta t)) \quad (۲۳)$$

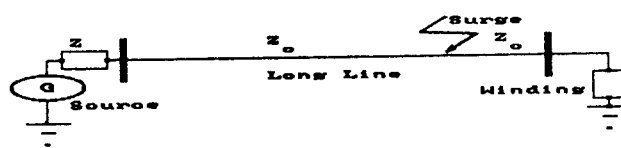
و با صرف نظر کردن از مقاومتها ($G = 0$) خواهیم داشت:

$$U(t+\Delta t) = (2 \cdot \Pi - \Delta t^2 C^{-1} H) U(t) + \Delta t C^{-1} I(t) + HIST(t) \quad (۲۴)$$

$$HIST(t) = -U(t-\Delta t) - \Delta t \cdot C^{-1} I(t-\Delta t) \quad (۲۵)$$

در رابطه (۲۴)، Π مشخص کننده ماتریس واحد است. با توجه به اینکه فقط به گره n -ام جریان اعمال می شود، خواهیم

منتشر می شود، در طول زمان بررسی به منبع نمی رسد و در

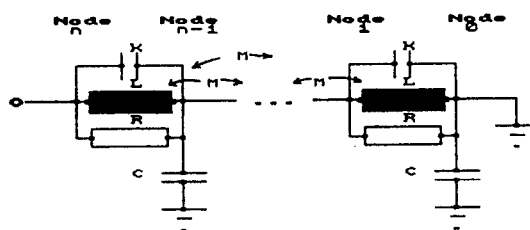


شکل (۳): سیستم مورد مطالعه

نتیجه به صورت منعکس شده به مبدل نیز نخواهد رسید، بنابراین در بررسی های انجام شده بی تأثیر است. از طرفی باید به این نکته توجه داشت که G' و R' باعث تغییر شکل موج و تضعیف دامنه جریان می گردند. ولی میزان تضعیف و تغییر شکل، تابعی از محل برخورد صاعقه به خط انتقال است. هر چه محل برخورد صاعقه به مبدل نزدیکتر باشد میزان تغییرات به صفر نزدیکتر است. در این مقاله فقط مسئله تضعیف در نظر گرفته شده است و مقدار تضعیف نیز، به صورت تصادفی بین صفر تا حداکثر مقدار تضعیف، محدود شده است. بدین ترتیب توانسته ایم محل برخورد صاعقه به خط را مدل کنیم.

۳-۱- مدل سازی سیم پیچ مبدل

شکل (۴) نشان دهنده مدل انتخابی جهت بررسی حالات گذرای مبدل است [۸]. در این مدل طول مبدل به n گره تقسیم شده است.



شکل (۴): مدل مبدل

بین دو گره مبدل، یک K و یک L و یک R که به ترتیب مشخص کننده ظرفیت، القاگری و مقاومت یک دسته از سیم پیچهای مبدل است، قرار دارد. C مشخص کننده

$$U(\Delta t) = \Delta t C^{-1} I(0) \quad (28)$$

داشت.

آخرین جزء بردار U ، ولتاژ گره n -ام است که برابر است با:

$$u_n(\Delta t) = u_{vn}(\Delta t) + u_{rn}(\Delta t) \quad (29)$$

در این رابطه $u_{vn}(\Delta t)$ از رابطه زیر مشخص می شود. توجه شود که $i_{vn}(\Delta t)$ برابر نصف شکل موج صاعقه در همین لحظه است.

$$u_{vn}(\Delta t) = Z_o \cdot i_{vn}(\Delta t) \quad (30)$$

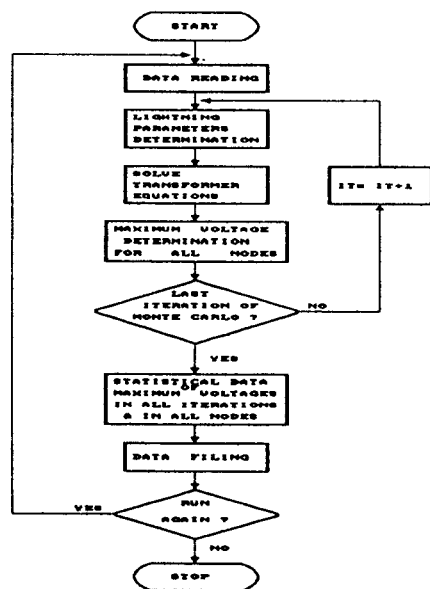
بنابراین می توان از رابطه (29) مقدار $u_{rn}(\Delta t)$ و از رابطه

زیر مقدار $i_{rn}(\Delta t)$ را مشخص نمود.

$$i_{rn}(\Delta t) = \frac{-1}{Z_o} u_{rn}(\Delta t) \quad (31)$$

حال می توان به کمک رابطه زیر $i_{rn}(\Delta t)$ را مشخص نمود.

$$i_n(\Delta t) = i_{vn}(\Delta t) + i_{rn}(\Delta t) \quad (32)$$



شکل (۵): فلوجارت برنامه

بنابراین برای $j=1$ ، $U(\Delta t)$ ، $I(\Delta t)$ ، HIST

مشخص است و می توان $U(2 \times \Delta t)$ را به کمک روابط (24)

و (25) مشخص نمود. به همین روال تا $kT =$ زولتاژ تمام

$$I(t) = [0 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0 \ i(t)]^T \quad (26)$$

که $i(t)$ همان جریان صاعقه است، که بعد از طی طول خط به گره n -ام مبدل رسیده است و با توجه به رابطه (13) داریم:

$$i(t) = i_v(t) + i_r(t) \quad (27)$$

قابل ذکر است که، از دو فرض در به دست آوردن این مدل استفاده شده است، یکی بی باری مبدل و دیگری وجود "حفاظ" زمین شده بین اولیه و ثانویه.

۲- آلوگوریتم حل و برنامه کامپیوتری

در این قسمت نحوه ترکیب مدل های فوق، جهت بررسی مسئله اضافه ولتاژها، ارائه می شود. شکل (۵) فلوجارت برنامه می را نشان می دهد که نیاز فوق را برآورده می سازد. این برنامه حدود ۱۴۰۰ خط است و به زبان فرترن نوشته شده و کاملاً اینتراکتیو است. روند برنامه به شرح زیر است. بعد از مرحله، دادن داده ها به برنامه، مولد اعداد تصادفی عددی را تولید می کند که براساس T_s ، T_R و I_m در نتیجه $i(t)$ مشخص می شود. عدد تصادفی دومی جهت مشخص سازی میزان میراثی تولید می گردد. بعد از اتمام این مرحله، $i(j \Delta t)$ جریان ورودی مبدل برای kT ، \dots ، $0 = z$ مشخص می شود.

Δt نمو زمانی محاسبات و kT تعداد کل نمونه ها است که با توجه به طول زمان شبیه سازی مشخص می گردد. این مقادیر در مرحله اخذ داده ها توسط کاربر مشخص می شوند.

به ازای $z = 0$ ز شرایط اولیه زیر برقرار است [V].

$$I(0) = [0 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 2i_v(0)]^T$$

$$U(0) = 0 \quad HIST(0) = 0$$

با توجه به روابط فوق، از رابطه (24) به رابطه زیر می رسیم که ولتاژ تمام گره ها را در لحظه Δt مشخص می سازد.

از حدود ۵ کیلوآمپر شروع و فقط در یک درصد موارد بیشتر از ۱۱۱ کیلوآمپر می‌گردد [۱]. با انجام یک سری محاسبات ساده بر روی تابع توزیع پیشنهاد شده توسط IEEE مشخص می‌شود که حدود پنج درصد موارد دامنه جریان از ۱۱۰ کیلوآمپر بیشتر است. بنابراین در استفاده از این تابع توزیع جهت کاهش واریانس باید مولد اعداد تصادفی را تصحیح نمود. با توجه به آزمونهای انجام شده که چند نمونه آن در جدول (۱) داده شده است، مشخص می‌گردد که به جای تولید اعداد تصادفی بین صفر و یک بهتر است اعداد مذکور را در فاصله ۰/۰۱ تا ۰/۹۷ تولید نمود. مولد اعداد تصادفی به کمک روابط زیر که به روش معکوس سازی به دست آمده‌اند [۵] مقدار دامنه جریان را مشخص می‌سازند. در این روابط RAND تابعی است که اعداد تصادفی با توزیع یکنواخت را به وجود می‌آورد.

$$u = 0.01 + 0.96.RAND(0) \quad (۳۳)$$

$$I_m = \exp(3.434 - \frac{1}{2.6} \cdot \ln(\frac{1-u}{u})) \quad (۳۴)$$

با توجه به رابطه (۳۳) به کمک محدودیت فوق دامنه

جریان بین ۵ تا ۱۲۰ کیلوآمپر محدود می‌گردد، که این مقادیر به نتایج اندازه گیری شده [۱] نزدیکترند.

جدول (۱): چند نمونه از نتایج محدودسازی تابع توزیع

گره‌ها محاسبه می‌شوند. مطابق با شکل (۵)، بعد از پایان مرحله حل معادلات مبدل، حداکثر ولتاژ به وجود آمده در هر گره مشخص می‌گردد. سپس مجدداً به اول برنامه بر می‌گردیم و دوباره مراحل فوق را برای یک شکل موج صاعقه دیگر که به صورت تصادفی تولید شده است تکرار می‌کنیم و حداکثر ولتاژ به وجود آمده در هر گره را برای این شکل موج نیز ذخیره می‌کنیم. در انتها بعد از پایان تکرارهای مونت کارلو برای اضافه ولتاژهای بوجود آمده در هر گره محاسبات آماری انجام می‌دهیم. یعنی مشخص می‌کنیم که در هر گره میانگین حداکثرهای ولتاژ، واریانس آنها و همچنین بیشترین حداکثر ولتاژی که در هر گره پیش آمده است چقدر است. نتایج و داده‌ها در آخرین مرحله بعد از نمایش بر روی صفحه تصویر، در فایل‌های خاصی جهت چاپ ذخیره می‌گردند. حال در صورت درخواست کاربر می‌توان به ابتدای برنامه آمده و بعضی از داده‌ها را به صورت اینتراکتیو تغییر داد و سپس مجدداً برنامه را اجرا نمود.

۳- عوامل مؤثر بر واریانس

۳-۱- تأثیر محدودسازی تابع توزیع

با توجه به اندازه گیریهای انجام شده، دامنه جریان صاعقه

Maximum Voltage Statistical Data at Each Node					Maximum Voltage Statistical Data at Each Node			
UI= .01+ .94*Rand 3(0)					UI= .01+ .97* Rand 3(0)			
Node No.	Umax	Uav	Var(u)	σ	Umax	Uav	Var(u)	σ
1	2.99271	2.17633	.01810	.13454	2.99271	2.25928	.01723	.13125
2	6.73361	4.89674	.09146	.30272	6.73361	5.08338	.08723	.29534
3	12.15790	8.84134	.29876	.54659	12.15790	9.17832	.28439	.53328
4	20.62167	14.99627	.85942	.92705	20.62167	15.56784	.81801	.90444
5	34.24086	24.90027	2.36977	1.53941	34.24086	25.84931	2.25605	1.50201

Maximum Voltage: Statistical Data at Each Node				
$U_i = .01 + .96 * \text{Rand}(0)$				
Node No.	Umax	Uav	Var(u)	σ
1	2.99271	2.23068	.01541	.12414
2	6.73361	5.01903	.07801	.27931
3	12.15790	9.06214	.25432	.504301
4	20.62167	15.37080	.73167	.85538
5	34.24086	25.52214	2.01761	1.42043
NO. of Iterations = 100		Surge Impedance = 300.0		
Inductance (mH) = 1.0000		Mutual Inductance (mH) = .1000		
Series Capaci. (μF) .1000		Parallel Capaci. (μF) = .0250		

۲-۳- تأثیر استفاده از چند مولد

از یک مولد و برای تولید I_m از مولد دیگری استفاده کنیم به نتایج درج شده در قسمت پائین همین جدول می‌رسیم. همانطور که دیده می‌شود واریانس در این حالت حتی به یک عدد چهاررقمی نیز رسیده است. در حالیکه میانگین فقط حداکثر تا ۱۰ کیلو ولت افزایش یافته است. آزمونهای دیگری نیز انجام شده که همگی تأییدکننده این نکته است که هرگونه تغییر در هموائی تغییرات پارامترهای شکل موج صاعقه باعث افزایش واریانس می‌شود.

همان گونه که در رابطه با مدل‌سازی شکل موج صاعقه گفته شد، پارامترهای صاعقه دارای تغییراتی هم‌نوا هستند و به همین دلیل برای تولید آنها از یک مولد اعداد تصادفی استفاده نموده‌ایم. برای اثبات عملی صحت این روش آزمونهای زیر انجام شده است. ابتدا در یک سیستم مشخص برای تولید T_s و T_R از یک مولد استفاده می‌کنیم (جدول ۲). همانطور که دیده می‌شود واریانس در تمام گره‌ها دارای مقادیر کوچکی است. اگر در همین سیستم برای تولید این دو

جدول (۲): اثر هم‌نوائی تغییرات پارامترهای شکل موج صاعقه

Maximum Voltage: Statistical Data at Each Node

Node No.	Umax	Uav	Var(u)	σ	
1	2.99271	2.21736	.01552	.12460	
2	6.73361	4.98906	.07860	.28035	
3	12.15790	9.00802	.25622	.50618	No.of Iterations =100
4	20.62167	15.27899	.73715	.85857	Inductance (mH)= 1.0000
5	34.24086	25.36970	2.03263	1.42570	Series capaci. (μ F)= .1000
Node No.	Umax	Uav	Var(u)	σ	Surge Impedance = 300.00
1	42.49103	3.07808	21.34264	4.61981	Mutual Inductance (mH)= .10
2	95.60480	6.92568	108.04710	10.39457	Parallel capaci. (mF)= .025
3	172.61980	12.50470	352.23680	18.76797	
4	292.78970	21.20990	1013.36400	31.83338	
5	486.15720	35.21756	2793.86800	52.85715	

۳-۳ تأثیر تعداد نقاط تابع توزیع تجربی

برای تولید T_p و T_R از یک تابع توزیع تجربی هفت نقطه‌ای استفاده کرده‌ایم. این انتخاب با توجه به توصیه‌های انجام شده صورت گرفته است [۹]. با انجام آزمونه‌های گوناگونی مشخص شده است که تغییر تعداد تابع توزیع بین ۵ تا ۸ نقطه تأثیر چندانی بر واریانس ندارد.

۴- تحلیل خروجی

در این بخش به تحلیل رفتار مبدل می‌پردازیم. هدف اصلی بررسی اضافه ولتاژهای به وجود آمده است.

۴-۱ مقایسه‌ای بین نتایج بررسیهای قطعی و تصادفی

یک مبدل (ترانسفورماتور) پنج گره‌ای با مشخصات $C = 0.04 \mu F$ $K = 0.01 \mu F$ $L = 1mH$ $M = 0.1 mH$ در نظر می‌گیریم. جدول (۳) حداکثر ولتاژ بوجود آمده در هر گره این مبدل را مشخص می‌کند. همانطور که دیده می‌شود برای صد تکرار مونت کارلو در گره ۵ بطور متوسط حداکثر ولتاژ $130/4$ کیلو ولت و بیشترین اضافه ولتاژ $152/15$ کیلو ولت بوده است. نتایج سمت راست همین جدول مشخص‌کننده اضافه ولتاژهای به وجود آمده در تمامی گره‌های همین مبدل است. ولی در اینجا جریان صاعقه با پارامترهای استاندارد و

تکرارهای مونت کارلو است. مثلاً برای سیستمی که مشخصات آن در جدول (۳) درج شده است. اگر تعداد تکرارها را به ۲۰۰ و سپس به ۱۰۰۰ تکرار افزایش دهیم مطابق با جدول (۶) دیده می شود که میانگین حداکثر ولتاژ در هر گره تقریباً ثابت می ماند. ولی واریانسها افزایش می یابند. چون دامنه جریان صاعقه دارای پراکندگی زیادی است و با افزایش تعداد تکرارها این پراکندگی فرصت پیدا می کند تا خود را نشان دهند. ولی به هر حال مشخص می شود که برای تعیین میانگین حداکثر ولتاژ، تعداد ۱۰۰ تکرار کافی است.

قطعی بر مبدل اعمال شده است. در این حالت برای گره ۵ حداکثر ولتاژ به وجود آمده ۲۲، ۲۴۲ کیلو ولت می باشد. بنابراین در صورت انتخاب نتایج آزمون قطعی به عنوان معیار، انتخاب ما بسیار دست بالا بوده است. با توجه به میانگین و واریانس حداکثرهای ولتاژ، مشخص است که چنین انتخابی اقتصادی نیست. قابل ذکر است که آزمونهای گوناگون مشخص ساخته اند که مقادیر عددی پارامترهای مبدل، بر این نتیجه گیری بی تأثیراند. برای مثال برای مبدلهای دیگر نیز همین مقایسه در جداول (۴) و (۵) انجام شده است. نکته جالبی که باید به آن اشاره نمود مسئله تعداد

جدول (۳): مقایسه نتایج برای $K = 0.1$

Maximum Voltage: Statistical Data at Each Node					Maximum Voltage		
Node No.	Umax	Uav	Var(U)	σ	Node No.	Umax	System Data
1	.12796	.10967	.00004	.00621	1	.20372	Surge Impedance (Ω) = 300
2	.76777	.65803	.00139	.03728	2	1.22231	Mutual Inductance (mH) = .10
3	4.47866	3.83852	.04730	.21749	3	7.13017	Parallel Capaci. (μF) = .04
4	26.10418	22.37308	1.60675	1.26758	4	41.55870	Inductance (mH) = 1.00
5	152.14640	130.40000	54.57705	7.38763	5	242.22200	Series Capaci. (μF) = .01

جدول (۴): مقایسه نتایج برای $K = 0.4$

Maximum Voltage: Statistical Data at Each Node					Maximum Voltage		
Node No.	Umax	Uav	Var(U)	σ	Node No.	Umax	System Data
1	.92678	.79481	.00207	.04546	1	1.47547	Surge Impedance (Ω) = 300.
2	2078034	2.38442	.01860	.13638	2	4.42640	Mutual Inductance (mH) = .1000
3	7.41425	6.35844	.13229	.36371	3	11.80373	Parallel Capaci. (μF) = .04
4	19.46241	16.69091	.91165	.95480	4	30.98478	Inductance (mH) = 1.00
5	50.97296	43.71428	6.25303	2.50060	5	81.15062	Series Capaci. (μF) = .01

جدول (۵): مقایسه نتایج برای $K = 0.16$

Maximum Voltage: Statistical Data at Each Node					Maximum Voltage		
Node No.	U _{max}	U _{av}	Var(U)	σ	Node No.	U _{max}	System Data
1	1.73105	1.48510	.00734	.08568	1	2.75589	Surge Impedance (Ω) = 300
2	3.89487	3.34148	.03716	.19278	2	6.20076	Mutual Inductance (mH) = .10
3	7.03240	6.03324	.12114	.34805	3	11.19581	Parallel Capaci. (μ F) = .04
4	11.92803	10.23329	.34859	.59042	4	18.98982	Inductance (mH) = 1.
5	19.80568	16.99167	.96102	.98032	5	31.53128	Series Capaci. (μ F) = .16

جدول (۶): اثر افزایش تعداد تکرارهای از ۲۰۰ (جدول سمت چپ) به ۱۰۰۰

Maximum Voltage Statistical Data at Bach Node					Maximum Voltage				
Nodg No.	U _{max}	U _{av}	Var(U)	σ	Node No.	U _{max}	U _{av}	Var(U)	σ
1	.13935	.10953	.00006	.00748	1	13.03180	.11052	.00006	.00787
2	.83608	.65717	.00201	0.4487	2	.86234	.66312	.00223	.04725
3	4.87714	3.83349	.06853	.26177	3	5.03030	3.86822	.07597	.27563
4	28.42676	22.34377	2.32729	1.52555	4	29.31946	22.54622	2.58090	1.60652
5	165.68340	130.22920	79.05635	8.89136	5	170.88650	131.40910	87.67552	9.36352

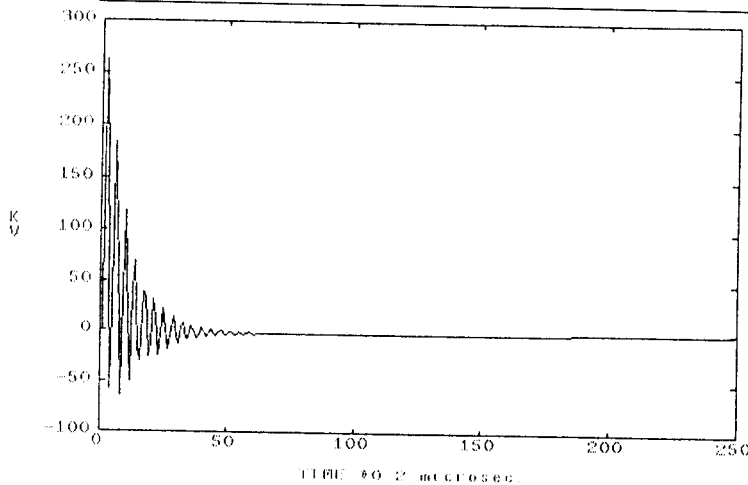
۲-۴- تابع چگالی حداکثر ولتاژ در هر گره

با توجه به آزمونهای انجام شده به این نتیجه رسیده‌ایم که حدود نود درصد حداکثرهای ولتاژها در هر گره‌ای، در فاصله $\sigma - \mu$ تا μ قرار دارند. بنابراین با توجه به فاصله اطمینان مورد نظر، می‌توان طراحی عایق‌بندی را با توجه به نتایج به دست آمده انجام داد.

۳-۴ تأثیر مقدار L , M بر دامنه اضافه ولتاژها

قبل از ارائه نتایج اشاره‌ای به رابطه (۲۴) می‌کنیم. این

برنامه نوشته شده این قابلیت را دارد که تابع چگالی حداکثرهای ولتاژ را برای تمام گره‌ها مشخص نماید. با توجه به آزمونهای انجام شده برای مبدلهائی با مقادیر K, C, M, L گوناگون دیده شده است که تمامی گره‌های مبدل دارای یک تابع چگالی خاص برای حداکثرهای ولتاژ هستند. شکل این تابع چگالی، در شکل (۶) برای یک نمونه خاص داده شده است.



شکل (۷): نمونه‌ای از پاسخ زمانی ولتاژ

همان گونه که دیده می‌شود حداکثر ولتاژ در لحظات اولیه پیش آمده است و ولتاژ دارای تغییرات نوسانی و میرا شونده، برای مدت زمانی حدود ۱۲ میکروثانیه است. دلیل نوسان به وجود آمده را می‌توان در رابطه (۲۰) جستجو کرد. با توجه به این رابطه ویژه مقادیر این سیستم را می‌توان با فرض $G = 0$ از رابطه زیر به دست آورد.

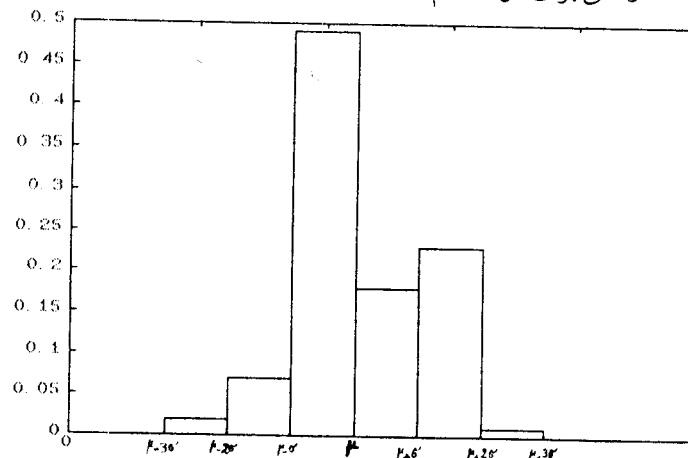
$$\Lambda^2 = -C^{-1}.H \quad (35)$$

همانگونه که مشخص است در سیستم، نوسانی خواهیم داشت که به علت وجود Z_0 میرا می‌شود. طبیعی است که در صورت در نظر گرفتن G میرائی شدیدتر خواهد شد. بنابراین در هنگام طراحی ترانس باید این مسئله را نیز مد نظر داشت تا مسئله تشدید پیش نیاید.

۴-۴ تأثیر مقادیر K و C بر دامنه اضافه ولتاژها

همانگونه که گفته شد ظرفیتهای خازنی بیشترین تأثیر را بر دامنه اضافه ولتاژهای به وجود آمده دارند. در جدولهای (۳)، (۴) و (۵) مقدار $M=0.1\text{mH}$, $L=1\text{mH}$ و $C=0.04\ \mu\text{F}$ ثابت در نظر گرفته شده است. ولی برای K به ترتیب مقادیر

رابطه با توجه به شرایط اولیه مسئله، در گام اول به رابطه (۲۸) تبدیل می‌شود. با توجه به این رابطه مشخص است که در لحظات اولیه این خازنها هستند که توزیع ولتاژ را در هر گره مشخص می‌سازند. (به این واقعیت از راههای دیگر نیز می‌توان رسید [۷]) از طرفی نیز با توجه به کوتاهی زمان پیشانی موج، مشخص است که اضافه ولتاژهای به وجود آمده در لحظات اولیه بعد از رسیدن موج صاعقه به مبدا به وجود می‌آیند. بنابراین این خازنها هستند که بر دامنه اضافه ولتاژهای به وجود آمده اثر خواهند داشت و نه سلفها. جهت بررسی صحت این موضوع، ابتدا مقدار K , C را به ترتیب در مقدار 0.1 و 0.25 میکروفاراد ثابت نگهداشته و سپس مورد $M=0.1\text{mH}$, $L=1\text{mH}$ را با مورد $M=1\text{mH}$, $L=10\text{mH}$ (یعنی حداکثر رنج تغییرات L , M) مقایسه می‌کنیم. نتایج آماری این دو مورد عیناً مشابه است و تغییرات بسیار کمی در میانگین حداکثر ولتاژها و بیشترین ولتاژها در هر گره دیده می‌شود. شکل (۷) نمونه‌ای از پاسخ زمانی برای مورد دوم است.



شکل (۶): تابع چگالی حداکثر ولتاژ در هر گره

جدول (۸): تأثیر افزایش C ($C = 0.0025$)

Maximum Voltage: Statistical Data at Each Node

Nodg No.	Umax	Uav	Var(U)	σ
1	27.69684	23.73811	1.80877	1.34490
2	62.31791	53.41075	9.15642	3.02596
3	112.51840	96.43607	29.84939	5.46346
4	190.84860	163.57040	85.88789	9.26757
5	316.89080	271.59720	236.81020	15.38864

با توجه به مطالب فوق می توان نتیجه گیری کرد که با افزایش K می توان با اضافه و لتازهای به وجود آمده مقابله نمود. از لحاظ تئوری نیز با توجه به رابطه (۲۸) مشخص شده است که بزرگ شدن K و C باعث کوچک شدن عناصر ماتریس C^{-1} می گردد و در نتیجه ولتاژ گره ها در لحظات اولیه، که همان لحظات وقوع حداکثرهای ولتاژ است، کوچکتر می شوند. بزرگ کردن مقدار K و C باعث می شود که دامنه اضافه ولتاژهای به وجود آمده کاهش یابند. ولی در عوض برای فاصله تغییرات L و M که در حد میلی هانری است، میراثی نیز کاهش می یابد. یعنی نوسانات ولتاژ در طول مدت زمان طولانی تری میرا می شوند. بنابراین مقدار K را باید به گونه ای طراحی کرد که نوسانات طولانی مدت توسط مبدل در سیستم قدرت تولید نشود. برای مثال در همان موردی که در شکل (۷) ارائه شد، مقدار ظرفیتهای خازنی را ده برابر می کنیم. شکل (۸) تغییرات زمانی ولتاژ را برای این حالت نشان می دهد.

۰/۰۱، ۰/۰۴ و ۰/۱۶ میکرو فاراد در نظر گرفته شده است. همانگونه که دیده می شود برای یک C ثابت و با افزایش K میانگین حداکثر اضافه ولتاژ به وجود آمده کاهش می یابد. مشابه همین تست در جدولهای (۳)، (۷) و (۸) انجام شده است. در اینجا مقدار L و M تغییر داده نشده است. مقدار K نیز ۰/۰۱ میکرو فاراد ثابت فرض شده است ولی مقدار C را به ترتیب ۰/۰۴، ۰/۰۱ و ۰/۰۲۵ میکرو فاراد انتخاب کرده ایم. با مقایسه این جدولها به این نتیجه می رسیم که به ازای یک K ثابت و با افزایش C میانگین حداکثر ولتاژ به وجود آمده در تمام گره ها کاهش می یابد. ولی تأثیر افزایش K خیلی بیشتر از تأثیر افزایش C است. (جدولهای (۷) و (۸) را با جدولهای (۳) و (۴) مقایسه کنید در مورد اول C و در مورد دوم K چهار برابر شده است).

جدول (۷): تأثیر افزایش C ($C = 0.01$)

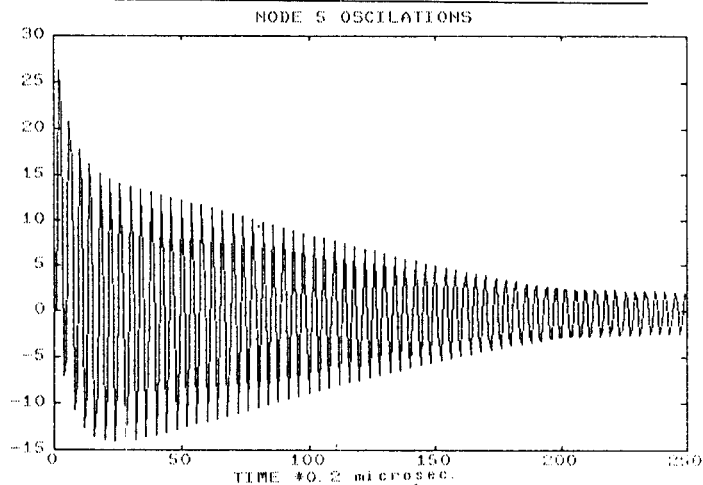
Maximum Voltage: Statistical Data at Each Node

Nodg No.	Umax	Uav	Var(U)	σ
1	3.70712	3.177261	.03241	.18002
2	11.12138	9.53179	.29159	.53999
3	29.65700	25.41809	2.07406	1.44016
4	77.84962	66.72247	14.29189	3.78046
5	203.89180	174.74930	98.03999	9.90151

قبلی است.

نتیجه گیری

با توجه به مدل سازی انجام شده برای مبدل مشخص گردید که با توجه به سطح اطمینان مورد نظر می توان به کمک شبیه سازی مونت کارلو به معیارهای اقتصادی تری جهت طراحی عایق بندی رسید. همچنین مشخص شد که با افزایش K می توان دامنه اضافه ولتاژهای به وجود آمده، ناشی از نفوذ موج صاعقه به مبدل را، کاست. ولی این افزایش باید در حدی باشد که نوسانات طولانی مدت در سیستم به وجود نیاید.



شکل (۸): تأثیر خازنها بر نوسانات ولتاژ

با توجه به شکل، دامنه ولتاژ به شدت کاهش یافته ولی همان گونه که مشخص است، بعد از گذشت پنجاه میکروثانیه هنوز نوسانات، میرانشده اند. این زمان پنج برابر زمان مورد

- 1-H.Baatz. "Mechanismus des Gewitters and Blitzes", Book, Verlag Gmbh, Bferlin 1978.
- 2-J.Anderson , A.Erikson, "Lightning Parameters for Engineering Applicatons", 1980,
Electra 69, 65 - 102.
- 3-Nagai , Y., T.Miyazaki & et-al, "Amplitude Distribution of the Electric field Emitted from
Lightning Dischrge" Proceeding of IEEE, EMC - 84, 1984, TOKYO.
- 4-IEEE Working Group on Estimating Transmission Lightning Outage Rates, "A Simplified
Method for Estimating Lightning Performance of Transmission Lines, IEEE trans.Of
Power Syst., PAS-104, No.4, 1985, PP. 919-932.
- 5-B.Gottfried, "Elements of Stochastic Process Simulation", book, Englewood Cliffs, Prentice
Hall 1984.
- 6-J.P.Bickford , N.Mullineux, J.R.Reed, "Computation of Power System Transients",Book,
IEE monograph series 18, 1980.
- 7-A.Greenwood, "Electrical Transients in Power Systems", Book, 2ed Ed. , John Wiley &
Sons, 1991.
- 8-H.Mohseni, "Berechung der Elektrischen Beansprunchungen bei Stossspannung and
Schaltueberspannung", ELIN zeitschrift, 1976, 2 .
- 9-Bratly, Fox & Schrage, "A Guide to Simulation", Book , Prentice Hall 1980.