



## تعيين چگالي احتمال اضافه ولتاژهاي ناشي از كلید زني در كابل هاي فشار قوي با استفاده از نرم افزار EMTP

وحيد ماجدي اصل\*

سيد حسين حسينيان\*

امير سعيد دشني\*\*

\*دانشگاه صنعتی امیرکبیر - دانشکده مهندسی برق (قطب علمی قدرت)

\*\*شرکت برق منطقه‌ای تهران - دفتر تحقیقات و فناوری

تهران - ایران

واژه‌های کلیدی: EMTP، کلیدزنی، هماهنگی عایقی، چگالی احتمال اضافه ولتاژ، مدلسازی گذرا

### چکیده:

این مقاله به مطالعه حالات گذرای ناشی از کلیدزنی در کابل‌های خطوط توزیع با استفاده از نرم افزار EMTP پرداخته است. ابتدا در این مقاله عناصر سیستم‌های قدرت در حالات گذرا مدلسازی شده‌اند. سپس بر اساس این مدلسازیها به مطالعه اندازه اضافه ولتاژهای ناشی از کلیدزنی در نقاط مختلف شبکه پرداخته شده است و نتایج جالبی بدست آمده است. در این مقاله برای بررسی اندازه اضافه ولتاژها از روشها و پارامترهای آماری استفاده می‌شود تا نتایج حاصل از این بررسی‌ها دقیقتر باشد. برای این منظور چگالی توزیع احتمال اندازه اضافه ولتاژها در حالات مختلف بدست آمده و با تحلیل پارامترهای آماری آن نتایج جالبی بدست آمده است.

### ۱-مقدمه:

کابل‌های فشار قوی سهم عمده‌ای از توان الکتریکی موجود در شبکه‌های قدرت را انتقال می‌دهند. بعلمت مسائل تکنولوژیکی و اقتصادی بندرت از این کابل‌ها در ولتاژهای بالا و سیستم انتقال استفاده می‌شود. این کابل‌ها بطور عمده در سیستم‌های توزیع استفاده می‌شوند. لذا بررسی آنها در سیستم‌های توزیع امری ضروری تلقی می‌شود. یکی از مهمترین مسائلی که در مورد کابل‌های فشار قوی می‌بایست مدنظر داشت، حفظ استقامت عایقی کابل‌ها است. چون عایق کابل‌ها از نوع غیرخودترمیم است، لذا بروز حادثه‌ای که باعث شکست

عایقی کابل شود منجر به خرابی کامل آن می‌شود. از طرف دیگر تنشهای مختلفی که در سیستم قدرت وجود دارد حتی اگر باعث شکست عایق کابل نشود، موجب خستگی و کاهش مقاومت عایقی آن می‌شود. بنابراین مطالعه چنین حوادث و رخدادهایی در سیستم قدرت ضروری به نظر می‌رسد. این مطالعه می‌تواند راهنمای مناسبی در انتخاب نوع کابل باشد. همچنین با بررسی این حوادث و رخدادها می‌توان راههای مقابله با آن را یافت و سیستم قدرت را در مقابل آنها حفاظت کرد.

از مهمترین تنشهایی که ممکن است در شبکه توزیع بر روی کابل وارد شود، اضافه ولتاژهای مختلفی است که در شبکه رخ می‌دهد و می‌تواند تأثیر نامطلوبی بر روی کابل بگذارد. مهمترین نوع اضافه ولتاژهای گذرا که می‌تواند در سیستم‌های توزیع زیرزمینی حادث شود، اضافه ولتاژهای ناشی از کلیدزنی است که اغلب در شبکه‌های توزیع رخ می‌دهد. برای بررسی و مطالعه این اضافه ولتاژها روش‌های مختلفی پیشنهاد شده است. در مراجع [۱-۳] به منظور هماهنگی عایقی سیستم قدرت، اندازه اضافه ولتاژها با دو روش، روش صریح<sup>۱</sup> و روش آماری<sup>۲</sup> مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در این مقاله به منظور بررسی دقیقتر اندازه اضافه ولتاژها از روش آماری برای تحلیل اضافه ولتاژها استفاده می‌شود. روش‌هایی را که برای بررسی آماری اضافه ولتاژها پیشنهاد می‌شود، [۱] می‌توان به دو روش پیک فاز<sup>۳</sup> و پیک موردی<sup>۴</sup> تقسیم

1 Deterministic Method

2 Statistic Method

3 Phase Peak

4 Case Peak

کرد. در روش پیک فاز، برای بررسی آماری اضافه ولتاژها در هر بار کلیدزنی پیک هر سه فاز مورد استفاده قرار می‌گیرد. اما در روش پیک موردی در هر بار کلیدزنی ماکزیمم پیک سه فاز بعنوان ولتاژ ماکزیمم مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مقاله از روش پیک موردی برای بررسی اضافه ولتاژها استفاده شده است.

بر اساس اطلاعاتی که از پارامترهای آماری منحنی‌های توزیع بدست می‌آید می‌توان به نتیجه‌گیری‌های مفیدی درباره اندازه اضافه ولتاژها در نقاط مختلف شبکه دست یافت، که در مباحث حفاظت شبکه و هماهنگی عایقی شبکه مورد استفاده قرار می‌گیرد.

عناوین کلی که در این مقاله مورد بررسی قرار می‌گیرد را می‌توان دسته‌های زیر تقسیم کرد:

در قسمت دوم مقاله به مدلسازی گذرای عناصر مختلف شبکه پرداخته می‌شود. در قسمت سوم به بررسی آماری اضافه ولتاژها پرداخته می‌شود و در قسمت چهارم نتایج حاصل از این بررسی‌ها ارائه می‌شود.

## ۲- مدل سازی عناصر مختلف جهت بررسی اضافه ولتاژهای ناشی از کلیدزنی

برای بررسی دقیق اثر اضافه ولتاژهای ناشی از کلیدزنی در سیستم قدرت می‌بایست از شبیه‌سازهای آنالوگ و یا دیجیتال استفاده شود. شبیه‌سازهای آنالوگ یا TNA ها با مدلسازی عناصر مختلف سیستم قدرت بوسیله مقاومتها، ترانزیستورها، خازن‌ها، سلفها، ... سیستم قدرت را بشکل مینیاتوری مدل کرده و آن را شبیه سازی می‌کنند. شبیه‌سازهای دیجیتال و یا نرم‌افزارهای شبیه ساز کامپیوتری با استفاده از معادلات دینامیکی و گذرای حاکم بر عناصر مختلف به شبیه‌سازی سیستم قدرت می‌پردازند. برای عناصر مختلف سیستم قدرت برحسب اینکه در چه زمینه‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرند، مدل‌های مختلفی ارائه شده است. برای بررسی اضافه ولتاژهای گذرا در سیستم نیز می‌بایست از مدل‌گذاری عناصر استفاده شود علاوه بر این برحسب اینکه چه گذرائی در سیستم قدرت شبیه‌سازی می‌شود، مدل‌های مختلفی برای عناصر ارائه شده است. بعنوان مثال مدل یک ترانسفورماتور برای بررسی حالت گذرای ناشی از صاعقه با مدل آن برای بررسی حالت گذرای ناشی از کلیدزنی متفاوت است، این امر بر انتخاب دقیق مدل عناصر تاکید می‌کند.

در ادامه به مدلسازی عناصر قدرت که در بررسی اضافه ولتاژهای ناشی از کلیدزنی نقش دارند، پرداخته می‌شوند.

### ۲-۱- مدل خطوط انتقال و کابل‌ها

مدل‌های مختلفی برای بررسی حالت گذرای خطوط انتقال و کابل‌ها ارائه شده که هر یک دقت و سرعت محاسباتی خاصی دارند. هر قدر

دقت یک مدل بالاتر باشد، سرعت محاسباتی آن کاهش می‌یابد. بنابراین می‌بایست براساس نوع بررسی، مدلی که هم دقت و هم سرعت مناسب داشته باشد، انتخاب کرد.

تمام مدل‌های گذرای خطوط انتقال و کابل‌ها بر اساس معادلات زیر است [۴].

$$\frac{dV}{dx} = -[Z] \cdot \Delta(I) \quad (1)$$

$$\frac{dI}{dx} = -[Y] \cdot \Delta(V) \quad (2)$$

$$[Y] = S \cdot [P]^{-1} \quad (3)$$

که در آن  $V$  و  $I$  بترتیب بردارهای ولتاژ و جریان در فاصله  $x$  از کابل هستند و ماتریس‌های مربع  $[Z]$ ،  $[Y]$  و  $[P]$  بترتیب ماتریس امپدانس، ماتریس ادمیتانس و ماتریس پتانسیل هادی‌های کابل می‌باشند. در مورد کابل‌های تک هسته‌ای ماتریس امپدانس و ماتریس پتانسیل را می‌توان به شکل زیر نشان داد:

$$[Z] = [Z_i] + [Z_o] \quad (4)$$

$$[P] = [P_i] + [P_o] \quad (5)$$

که در آن:

$[Z_i]$ : ماتریس امپدانس داخلی هادی‌های کابل

$[Z_o]$ : ماتریس امپدانس محیط خارجی (امپدانس زمین بعنوان مسیر برگشت)

$[P_i]$ : ماتریس پتانسیل داخلی هادی‌های کابل

$[P_o]$ : ماتریس پتانسیل محیط خارجی کابل.

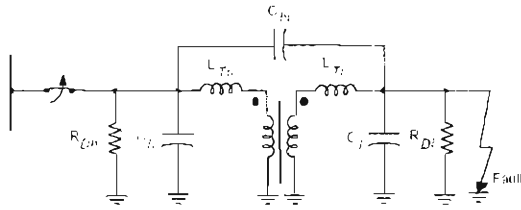
در این مدل اثر زمین سیستم با دقت مناسب مدل شده است و همچنین درآیه‌های زیر ماتریس‌های فوق تابع فرکانس هستند و مقادیر آنها با تغییر فرکانس، تغییر می‌کند.

بر اساس مدل‌های ارائه شده برای کابل [۴-۷] در نرم‌افزار EMTP سه مدل مختلف برای مدل‌سازی خطوط و کابل‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد [۵] و [۱۲]:

**مدل  $\pi$ :** ساده‌ترین مدل برای مدل‌سازی خط و کابل مدل  $\pi$  می‌باشد که در این مدل یک خط و یا کابل با مقادیر  $R$ ،  $L$  و  $C$  آن مدل می‌شود. این مدل برای خطوط کوتاهی که طول آن در مقایسه با کوتاهترین طول موج ولتاژ، بسیار کوچک باشد، قابل استفاده است. همچنین از این مدل برای مدلسازی خطوط و کابل‌هایی از سیستم که دارای اهمیت چندانی نیستند، استفاده می‌شود. به عبارت دیگر به منظور ساده‌سازی و افزایش سرعت شبیه‌سازی و همچنین به علت اینکه نرم‌افزار EMTP می‌تواند فقط تعداد محدودی از خطوط را بطور دقیق مدل کند، لذا برخی خطوط و کابل‌ها را که دور از ناحیه کلیدزنی هستند و اثر اضافه ولتاژها برای آنها کم است، می‌توان بصورت مدل  $\pi$ ، مدل کرد.

**مدل گسترده (Bergeron Model):** این مدل مرسوم‌ترین مدلی است که در بررسی حالات گذرای خطوط و کابل‌ها استفاده می‌شود. در این مدل خط یا کابل به تعداد محدودی از خطوط با طول کوتاه تقسیم

می‌شود و هر یک از این قسمت‌ها با مدل  $\pi$  مدل می‌شوند. در این مدل به علت گسترده بودن خط، اثر موجی آن مدل می‌شود. در نرم‌افزار EMTP این روش به روش Bergeron موسوم است. تعداد جزئیاتی که برای یک خط و یا کابل در نظر گرفته می‌شود وابسته به طول خط است. از این مدل در نواحی از شبکه که تغییرات فرکانس شدید نیست، می‌توان استفاده کرد.



شکل (۱). شماتیک کلی از مدل ترانسفورمر برای مطالعات کلید زنی

همانطور که از شکل دیده می‌شود به منظور اضافه کردن اثر غیرخطی هسته ترانس، یک سلف غیرخطی به طور موازی به مدل کلایک ترانس اضافه شده است. در نرم‌افزار EMTP می‌توان اثر غیرخطی ترانس را بطور مستقیم با وارد کردن منحنی منحصه  $v-i$  یا  $q-i$  هسه، اعمال کرد [۶]. در محدوده‌های فرکانسی کلیدزنی که شامل فرکانس‌های تقریباً بالا می‌باید می‌بایست اثر فوکوی هسته نیز لحاظ شود. در مدل نشان داده شده در شکل (۱) این اثر با مقاومت‌های  $R_{Dl}$  و  $R_{Cl}$  مدل شده است. اندازه مقاومت‌ها به فرکانس سیستم وابسته است. در رابطه (۶) اندازه تقریبی این مقاومت‌ها نشان داده شده است [۱۱]:

$$R_{Dl} = \frac{-\pi \sqrt{\frac{L}{C}}}{\ln DF} \quad (۸)$$

که در آن:

$L$ : اندوکتانس نشتی ترانس

$C$ : کاپاسیتانس معادل ترانس

$DF$ : ضریب میرانی که در حدود ۰/۵ تا ۰/۶ می‌باشد.

همچنین در محدوده‌های فرکانس بالا ظرفیتهای خازنی مربوط به سیم‌پیچ‌ها و بدنه ترانس در نظر گرفته می‌شود. که در شکل (۱) با  $C_{hl}$ ،  $C_l$  و  $C_h$  نشان داده شده‌اند.  $C_L$  ظرفیت خازنی سیم‌پیچ فشار ضعیف ترانس نسبت به بدنه،  $C_h$  ظرفیت خازن سیم‌پیچ قوی نسبت به بدنه، و  $C_{hl}$  ظرفیت خازنی مابین دو سیم‌پیچ ترانس است. مقادیر خازنی ترانس را بوسیله روش‌های تشخیصی مختلف، نظیر روش شناسایی فرکانس و روش شناسایی حوزه زمان و همچنین بوسیله روش‌های کاهش مرتبه مدل ترانس بدست می‌آورند. روابط تقریبی که بین خازن‌های مختلف ترانس وجود دارد به قرار زیر است [۸]:

$$0.2 \leq \frac{C_{hl}}{C_h + C_l} \leq 0.4 \quad (۷)$$

$$C = \frac{1}{(2\pi f)^2 L_T} \quad (۸)$$

$$C = C_h + C_l \quad (۹)$$

$$C = C_l + C_{hl} \quad (۱۰)$$

**مدل J\_Marti**: اندازه پارامترهای مختلف عناصر سیستم قدرت با تغییر فرکانس سیستم تغییر می‌کنند. بنابراین در شرایطی از شبیه‌سازی که طیف وسیعی از فرکانس‌ها وجود دارند، تغییر این پارامترها در نتایج شبیه‌سازی مؤثر است. در بررسی حالت‌های گذرای ناشی از کلیدزنی تقریباً طیف وسیعی از فرکانس‌ها وجود دارد. غالباً در اضافه ولتاژهای ناشی از کلیدزنی می‌توان فرکانسهایی از ۵۰ هرتز تا ۱۰ کیلوهرتز را دید. لذا در این حالات پارامترهای مختلف مدار تحت تأثیر تغییرات فرکانس قرار دارند. این پارامترها  $R$ ،  $L$  و  $C$  خطوط هستند. لذا برای اینکه مدل دقیقی از سیستم داشته باشیم که اثر تغییرات فرکانس را لحاظ کند، می‌بایست از مدلهایی که تأثیر تغییر فرکانس را در نظر می‌گیرند، استفاده شود. روشی را که بتوان اثر تغییرات پارامترهای مدار را بر اثر تغییر فرکانس لحاظ کرد به روش Jmartی موسوم است. این روش در نرم‌افزار EMTP وجود دارد [۶].

بنابراین بطور خلاصه می‌توان گفت که برای مدلسازی کابلهایی که در معرض تغییرات وسیع فرکانس قرار دارند (کابلهایی که نزدیک به نقطه کلیدزنی هستند) می‌بایست از مدل Jmartی و برای کابلهایی که دور از نقطه کلیدزنی هستند و کمتر در معرض اضافه ولتاژها قرار دارند از مدلهای  $\pi$  و مدل گسترده استفاده کرد.

## ۲-۲- مدل سازی ترانسفورماتور

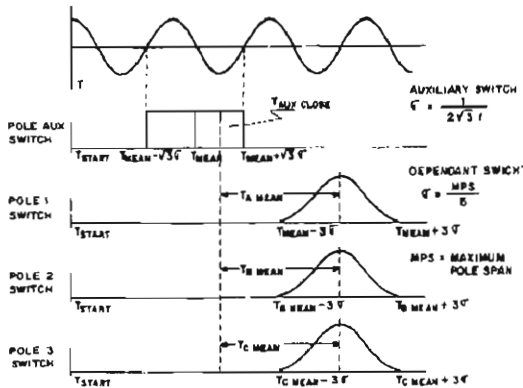
مدل‌های مختلفی برای ترانسفورماتورها ارائه شده است. از آن جمله می‌توان به مدل‌های گسترده، کاهش یافته، خطی، فشرده و ... اشاره کرد [۸-۱۱]. انتخاب بهترین مدل برای مطالعه ترانسفورماتور وابسته به محدوده تغییرات فرکانسی است که در حالات گذرا مشاهده می‌شود. مدلهای گسترده ترانسفورماتور برای مطالعات گذرای سریع نظیر مطالعات اثر صاعقه بر روی ترانس مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مراجع مختلف با استفاده از روش‌های گوناگون به ساده سازی و کاهش مرتبه مدل پرداخته می‌شود تا بتوان مدلی مناسب برای اهداف گوناگون بدست آورد [۱۰]. مدلی که برای مطالعات کلیدزنی استفاده می‌شود مدلی است که اثر مقاومتی، اندوکتانس نشتی، اثر غیرخطی هسته و اثر خازنی ترانس لحاظ شده باشد. در شکل (۱) شماتیک این مدل نشان داده شده است.

که در آن:

$f$ : فرکانس نوسانات در هر یک از سیم پیچ‌ها

$L_p$ : اندوکتانس نشی خازن.

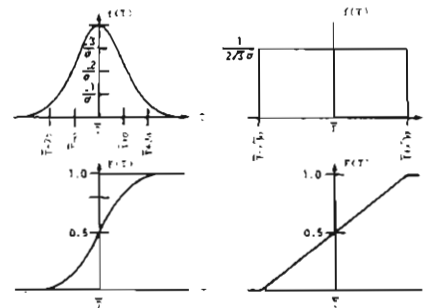
$C$ : ظرفیت خازنی مؤثر ترانس



شکل (۳). شکل گرافیکی عملکرد یک کلید آماری

### ۲-۳- کلیدها:

کلیدها نظیر مدارشکن‌ها، کلیدهای خلاء، دیژنکتورها و ... تجهیزاتی هستند که بخشی از سیستم قدرت را قطع می‌کنند. در مطالعات مربوط به بررسی اضافه ولتاژهای ناشی از کلیدزنی، یک کلید در هنگام وصل با یک مقاومت  $R=0$  و در هنگام قطع با مقاومت  $R=\infty$  مدل می‌شود. چون در مطالعات مربوط به اضافه ولتاژها، بررسی آماری اضافه ولتاژها مدنظر است لذا برای این منظور می‌بایست کلیدهایی را که بطور تصادفی در زمانهای مختلف کلیدزنی می‌کنند، انتخاب کرد. در نرم‌افزار EMTP کلیدهای آماری<sup>۱</sup> توانایی چنین قطع و وصل‌های متوالی را دارند [۳]. توزیع احتمالی زمان کلیدزنی می‌تواند بصورت تابع گوسی و یا تابع یکنواخت باشد. در شکل (۲) منحنی‌های توزیع این دو نوع کلیدزنی به همراه پارامترهای مختلف آن نشان داده شده است. زمان  $\bar{T}$  زمان پایه است و کلید در زمان  $t$  کلیدزنی می‌شود.  $\sigma$  نیز اندازه انحراف معیار منحنی توزیع می‌باشد.



شکل (۲). توزیع احتمالی کلید زنی در کلیدهای آماری

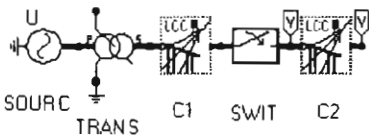
در بررسی اضافه ولتاژهای ناشی از کلیدزنی عموماً از منحنی توزیع گوسی استفاده می‌شود. اندازه انحراف معیار آن نیز به نوع کلید وابسته است و بر اساس اندازه بازوی قطع و وصل‌کننده مشخص می‌شود. اندازه نوعی انحراف معیار در حدود ۱ تا ۴ میکروثانیه است. این زمان بیانگر اختلاف زمانی بین قطع یا وصل هر سه فاز کلید است. لذا این توزیع احتمالی در زمان کلیدزنی اختلاف زمانی تصادفی مابین فازها را ایجاد می‌کند. برای بررسی اثر کلیدزنی در زمان‌های مختلف (یک سیکل ولتاژ) می‌بایست زمان  $\bar{T}$  نیز بصورت تصادفی در طول یک سیکل انتخاب شود. لذا یک توزیع احتمال دیگر نیز زمان  $\bar{T}$  را انتخاب می‌کند بطوریکه بتوان یک کلیدزنی در طول یک سیکل داشت. در شکل (۳) این موضوع بصورت گرافیکی نشان داده شده است [۶].

### ۲-۴- مدل سازی خازن و سلف

خازن می‌تواند بوسیله یک عنصر فشرده مدل شود. اما در مطالعات اضافه ولتاژهای کلیدزنی در نظر گرفتن پارامترهای دیگر خازن نظیر اندوکتانس سری و یا مقاومت نشی آن، ضروری بنظر می‌رسد. این امر در مورد کلیدزنی‌هایی که روی خود خازن صورت می‌گیرد اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. بطور مشابه برای مدل‌سازی یک سلف می‌توان از مدل فشرده آن استفاده کرد اما به منظور بررسی دقیق آن بر روی اضافه ولتاژهای کلیدزنی بهتر است اثر مقاومت سیم‌پیچی، اشباع هسته و همچنین اثر خازن موازی با آن را نیز در نظر گرفت. این نوع مدل‌سازی در بررسی کلیدزنی یک راکتور و قطع جریان آن اهمیت بیشتری پیدا می‌کند.

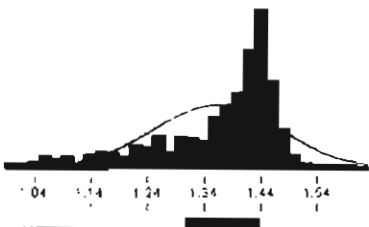
### ۲-۵- مدل سازی بار:

بارهای موجود در سیستم قدرت عموماً مقاومتی و سلفی هستند. جزء مقاومتی آن شامل بارهای گرمایشی و روشنایی و همچنین توان اکتیو جذب شده توسط موتورهای می‌باشد. جزء اندوکتیو آن نیز شامل بارهای روشنایی با لامپهای فلورسنت و توان راکتیو جذب شده توسط موتورهای است. پس بطور کلی می‌توان بار یک سیستم را با یک مقاومت و یک سلف موازی مدل کرد. همچنین می‌توان خازن شنت را نیز بطور موازی با مقاومت و سلف مدل کرد. این خازن بیانگر بانکهای خازنی موجود در سیستم است که برای جبران‌سازی و تصحیح ضریب توان سیستم استفاده می‌شود. همچنین به منظور نشان دادن اثر خطوط، کابل‌ها و ترانسفورماتورهای مابین بار و باس اصلی می‌توان از یک مقاومت و سلف سری با بار استفاده کرد. این امر خصوصاً در مدل‌سازی‌های فرکانس بالا ضروری است. در شکل (۴) مدار معادل یک بار که برای بررسی‌های کلیدزنی مناسب است نشان داده شده است. مقدار  $R_N$  و  $X_N$  عموماً ۱۰ تا ۲۰ درصد امیداسی بار هستند [۱۱].

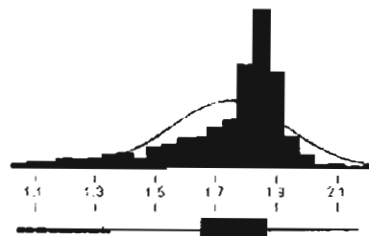


شکل (۵). آرایش سیستم جهت مطالعه اثر طول کابل در اندازه اضافه ولتاژ ناشی از کلید زنی

در شکل (۶) توزیع احتمالی اندازه اضافه ولتاژها در ابتدا و انتهای کابل نشان داده شده است.



الف) ابتدای کابل



ب) انتهای کابل

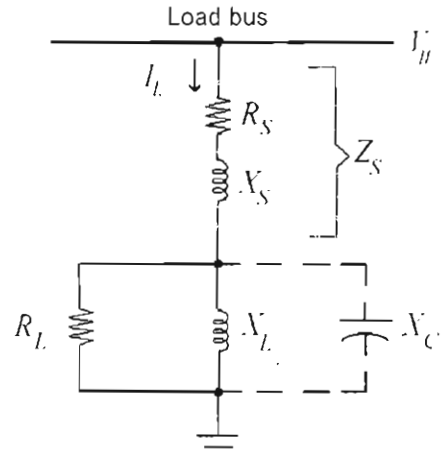
شکل (۶): توزیع احتمالی اندازه اضافه ولتاژها در ابتدا و انتهای کابل

همانطور که از شکل دیده می‌شود توزیع احتمالی اندازه اضافه ولتاژها دارای توزیع نرمال چوله<sup>۱</sup> شده به طرف راست است. در جدول (۱) پارامترهای آماری توزیع احتمالی اضافه ولتاژها در ابتدا و انتهای کابل نشان داده شده است. در این جدول پارامترهای مختلف نظیر میانگین، میانه، ماکزیمم اضافه ولتاژ، تعداد نمونه، اندازه چولگی و ... ارائه شده است. بر اساس این پارامترهای آماری می‌توان تحلیل بهتری از اندازه اضافه ولتاژها در شرایط مختلف بدست آورد. بر اساس این جدول می‌توان به نتایج زیر دست یافت:

الف - افزایش طول کابل تأثیر محسوسی در اندازه اضافه ولتاژهای ابتدا و انتهای کابل ندارد. بیشترین اختلاف در اندازه میانه، در طولهای مختلف حدود ۰/۱ پرونیت (۱۶۵۰ ولت) است. این مقدار در مقایسه با ولتاژ نامی سیستم و اندازه اضافه ولتاژها قابل صرف نظر کردن است.

ب- با افزایش طول کابل چولگی موجود در توزیع احتمال کاهش یافته و منحنی توزیع حالت نرمال‌تری به خود می‌گیرد. همچنین چارک سوم توزیع‌های احتمالی یک دید فیزیکی از اندازه چولگی ارائه می‌کند.

بارهای خاص مثل بارهای موتوری بزرگ، بارهای الکترونیکی و بارهای روشنایی فلورسنت ممکن است به مدلسازی خاصی نیاز داشته باشند تا بتوان مدل دقیقی برای آنها ارائه کرد.



شکل (۴). مدار معادل یک بار

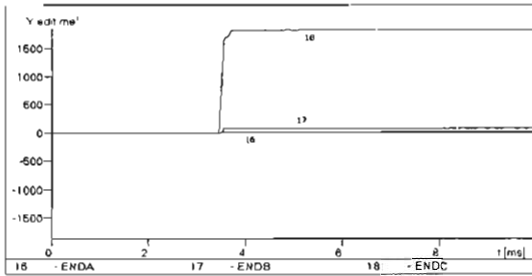
### ۳- تعیین چگالی احتمال اضافه ولتاژهای ناشی از کلیدزنی در

#### کابل‌های توزیع

همانطور که اشاره شد از مهمترین تنش‌هایی که در سیستم‌های توزیع بر روی کابل‌ها وارد می‌شود، اضافه ولتاژهای ناشی از کلیدزنی است که ممکن است در شبکه رخ دهد و تأثیر نامطلوبی بر روی کابل بگذارد. در این قسمت به بررسی آماری این اضافه ولتاژها بر روی کابل‌ها پرداخته می‌شود.

### ۳-۱- بررسی اثر طول کابل در اندازه اضافه ولتاژها

در سیستم‌های توزیع کابل‌های مختلف با طولهای متفاوت عهده‌دار تغذیه بارها هستند. بررسی اثر طول کابل در اندازه اضافه ولتاژها می‌تواند دید روشنی از اندازه اضافه ولتاژها در کابل‌های متفاوت ایجاد می‌کند. در شکل (۵) یک شبکه نمونه از سیستم توزیع نشان داده شده است. این مدار می‌تواند قسمت کوچکی از یک سیستم توزیع گسترده باشد در این شکل کابل C2 از طریق یک کلید به باس تغذیه متصل است. باس تغذیه نیز از طریق کابل C1 و ترانسفورماتور T از فیدر اصلی تغذیه می‌شود کابل مورد مطالعه از نوع کابل تک‌هسته‌ای زره‌دار با هسته سی و عایق XLPE است و ولتاژ نامی آن ۲۰ کیلوولت است. کلیدهای آماری در بازه زمانی ۰/۰۲ ثانیه تا ۰/۰۴۵ ثانیه با تابع احتمال یکنواخت ۸۰۰ بار کلیدزنی می‌شوند همچنین اختلاف زمانی کلیدزنی مابین فازها با یک تابع نرمال با مقدار میانگین ۰/۰۲ و انحراف معیار ۲ میلی‌ثانیه در نظر گرفته شده است.



شکل (۸): توان و انرژی جذب شده در برق گیر  
(ب) انرژی جذب شده در برق گیر

### ۳-۳- بررسی اثر بار انتهایی کابل، در اندازه اضافه ولتاژ ناشی از کلیدزنی

در شرایط عادی همواره، بارهایی به انتهای کابل متصل هستند و از طریق کابل تغذیه می‌شوند. این بارها تاثیر محسوسی در اندازه اضافه ولتاژها دارند. اگر باری با امپدانس  $Z = 25\Omega$  از طریق کابل C2 تغذیه شود جریان نامی ۴۵۰ آمپر را از کابل می‌کشد. به منظور بررسی اثر نوع بار در اندازه اضافه ولتاژها بار ۲۵ اهمی با ضریب توانهای ۰/۱۰، ۰/۵، ۱/۸ و صفر مورد بررسی قرار می‌گیرد. در جدول (۳) پارامترهای آماری اضافه ولتاژها در انتهای کابل نشان داده شده است. بر اساس این جدول می‌توان به نتایج زیر دست یافت:

الف) برای بارهای با ضریب توان ۱ (بار اهمی خالص) اندازه اضافه ولتاژها شدت کاهش می‌یابد. با مقایسه آن با کابل بی‌بار مشاهده می‌شود که اندازه میانه در ابتدای خط حدود ۰/۳۴ پرینویت (۵۶۱۰ ولت) و در انتهای خط حدود ۰/۶۸ پرینویت (۱۱۲۲۰ ولت) کاهش می‌یابد. این امر اثر میرایی شدید بارهای اهمی را در اندازه اضافه ولتاژ نشان می‌دهد. همین کاهش را می‌توان در میانگین و ماکزیمم اضافه ولتاژها نیز مشاهده کرد.

ب) در بارهای اهمی سلفی یا ضریب توانهای مختلف، اندازه پارامترهای مختلف آماری نظیر میانه، میانگین و ماکزیمم اضافه ولتاژ تفاوت محسوسی با حالت بی‌بار ندارد. بعنوان نمونه اندازه میانه در بیشترین حالت به اندازه ۰/۸ پرینویت (۱۳۲۰ ولت) از کابل بی‌بار کمتر است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که بارهای اهمی سلفی (که اکثر بارهای موجود در سیستم‌های توزیع را تشکیل می‌دهند) تأثیر چندانی در اندازه اضافه ولتاژها ندارد.

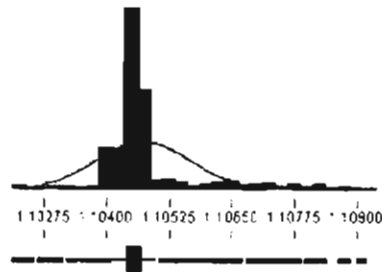
### ۳-۴- بررسی اندازه اضافه ولتاژها در نقطه اتصال کابل‌ها

شاید مهمترین و حساسترین محل در کابل‌ها نقطه اتصال کابل‌ها به یکدیگر باشد. عموماً نقطه اتصال کابلها از لحاظ عایق بندی از ضعیفترین نقاط کابل هستند، از طرف دیگر نقطه اتصال کابلها به یکدیگر بعنوان مرز دو محیط مختلف تلقی می‌شود و این امر باعث افزایش اضافه ولتاژها در این نقطه می‌شود. اگر در شکل (۵) به انتهای

ج- اختلاف مابین اضافه ولتاژها در ابتدا و انتهای کابل در حدود ۰/۴۲ پرینویت (۶۹۳۰ ولت) می‌باشد، این امر بیانگر تفاوت فاحش در اندازه اضافه ولتاژها در ابتدا و انتهای خط است.

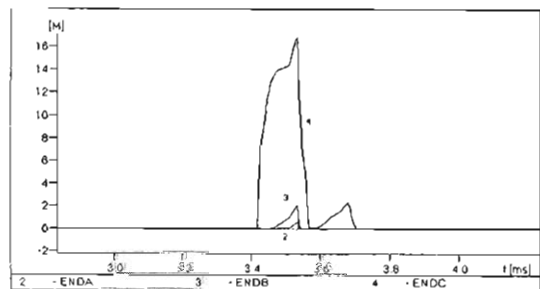
### ۲-۳- بررسی اثر وجود برق‌گیر در حفاظت کابل در برابر اضافه ولتاژها

برای حفاظت تجهیزات مختلف سیستم‌های توزیع در برابر اضافه ولتاژهای گذرا از برق‌گیرهای مختلف استفاده می‌شود. از مهمترین آنها، برق‌گیرهای ZnO (اکسید روی) است، که به فراوانی در سیستم‌های توزیع استفاده می‌شود. اگر در مدار شکل (۵) به انتهای کابل C2 برق‌گیر نصب شود اندازه اضافه ولتاژها به نحو مؤثری کاهش می‌یابد. در شکل (۷) منحنی چگالی احتمال اضافه ولتاژهای انتهای کابل، نشان داده شده است. در جدول (۲) نیز پارامترهای آماری منحنی‌های چگالی احتمال داده شده‌اند از روی این منحنی‌ها و جداول می‌توان دید که با نصب برق‌گیر میزان اضافه ولتاژها در انتهای کابل به نحو مؤثری کاهش یافته است. بطوریکه اندازه میانه در حدود ۰/۶۲ پرینویت کاهش یافته است. این امر اثر حفاظتی برق‌گیر را نشان می‌دهد.



شکل (۷): منحنی‌های چگالی احتمال اضافه ولتاژهای انتهای کابل، در وجود برق‌گیر

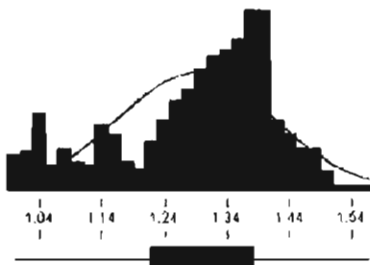
در شکل (۸) نیز توان و انرژی جذب شده از برق‌گیر نشان داده شده است.



الف) توان جذب شده از برق‌گیر

### ۳-۶- اندازه‌گیری اضافه ولتاژها در کلیدهای بازبست<sup>۱</sup>

در اکثر سیستم‌های قدرت خصوصاً در سیستم‌های توزیع از کلیدهای بازبست استفاده می‌شود عملکرد این کلیدها به این ترتیب است که با وقوع عیب در سیستم قدرت کلیدها قسمت معیوب را از سیستم قدرت جدا می‌کند و پس از مدت کوتاهی کلید مجدداً وصل می‌شود اگر عیب مورد نظر رفع شده باشد سیستم به شرایط عادی خود بازمی‌گردد در غیراینصورت کلید بازبست دوباره باز شده و قسمت معیوب را از شبکه جدا می‌کند. تفاوت عمده این نوع کلیدزنی با برق‌دار کردن عادی سیستم در این است که در هنگام برق‌دار کردن<sup>۲</sup> سیستم بی‌برق است اما در برق‌دار کردن مجدد<sup>۳</sup> سیستم متصل شده برق‌دار است. لذا این امر در اندازه اضافه ولتاژها مؤثر است. اگر در شکل (۵) بجای کلید عادی از یک کلید بازبست استفاده شود می‌توان اثر کلیدهای بازبست را در اندازه اضافه ولتاژها مشاهده کرد. در شکل (۱۰) توزیع احتمالی اندازه اضافه ولتاژها در انتهای کابل نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که اندازه اضافه ولتاژها به طور محسوسی افزایش پیدا کرده است. از طرف دیگر شکل منحنی توزیع احتمال به حالت توزیع نرمال نزدیکتر می‌شود.



شکل (۱۰): منحنی‌های چگالی احتمال اضافه ولتاژهای انتهای کابل در صورت وجود کلید بازبست

در جدول (۶) پارامترهای آماری اضافه ولتاژهای انتهای کابل در سه حالت کلید زنی با کلید عادی، کلیدزنی با کلید بازبست با زمان تاخیر ۰/۲ ثانیه و کلیدزنی با کلید بازبست با زمان تاخیر ۰/۱ ثانیه نشان داده شده است.

از روی این جداول می‌توان به نتایج زیر دست یافت:

الف) با وجود کلید بازبست اندازه اضافه ولتاژها در ابتدا و انتهای کابل، به مقدار زیادی افزایش یافته است. به عنوان مثال اندازه میانه در حدود ۰/۸ پریونیت افزایش یافته است.

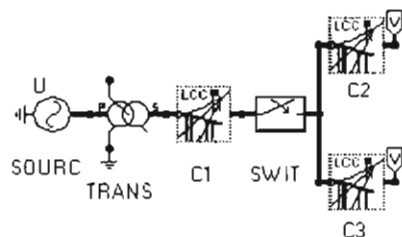
ب) با بررسی اثر زمان بازبست کلیدها ملاحظه می‌شود که با کاهش زمان بازبست کلیدها اندازه اضافه ولتاژها افزایش می‌یابد علت این امر را می‌توان در زمان تخلیه بارهای موجود در کابل جستجو کرد. در کلید بازبست با زمان تاخیر ۰/۱ ثانیه، زمان مورد نیاز برای تخلیه بارهای

کابل C2 کابل دیگری با طول ۵۰۰۰ متر اضافه شود، می‌توان اندازه اضافه ولتاژها را در نقاط مختلف کابل بررسی کرد. در جدول (۴) پارامترهای آماری اضافه ولتاژها در نقطه اتصال دو کابل نشان داده شده است. براساس این اطلاعات می‌توان گفت:

اندازه اضافه ولتاژهای ناشی از کلیدزنی در نقطه اتصال دارای مقدار قابل توجه است بطوریکه اندازه میانه در وسط کابل فقط در حدود ۰/۰۷ پریونیت از انتهای کابل کمتر است و با اندازه ماکزیمم اضافه ولتاژها در وسط و انتهای خط تنها در حدود ۰/۰۷ پریونیت اختلاف دارد. این امر نشان می‌دهد که نقطه اتصال کابلها از نقاط مهم و حساس کابل است و برای حفاظت آن در برابر اضافه ولتاژها می‌بایست از تجهیزات حفاظتی مناسب استفاده کرد.

### ۳-۵- بررسی اضافه ولتاژها در باس مشترک کابلها

همواره در قسمتهایی از سیستم توزیع دو یا چند فیدر از یک باس مشترک تغذیه می‌شوند. در این باس‌ها برای اتصال کابل‌ها به شینه مشترک از سرکابلها استفاده می‌شود. از دید امواج سیمار سرکابلها مرز دو محیط مختلف است لذا در این نقاط امواج برگشتی موجب اضافه ولتاژهای بزرگ می‌شوند. در شکل (۹) قسمتی از یک شبکه توزیع که دارای شینه مشترک است و دو فیدر را تغذیه می‌کند، انتخاب شده است.



شکل (۹): آرایش سیستم جهت مطالعه اندازه اضافه ولتاژ ناشی از کلید زنی در باس مشترک کابل

در جدول (۵) پارامترهای آماری مربوط به اضافه ولتاژهای ناشی از کلید زنی در ابتدا فیدر و انتهای کابلها نشان داده شده است. بر اساس این اطلاعات می‌توان به نتایج زیر دست یافت:

الف) اندازه اضافه ولتاژها در ابتدای کابل (سر کابل) در حدود ۰/۰۶ پریونیت افزایش یافته که بیانگر تاثیر نامحسوس اضافه ولتاژها در باس مشترک است.

ب) اندازه اضافه ولتاژها در انتهای کابلها در حدود ۰/۲۲ پریونیت زیادتر است که تاثیر فیدر دیگر را نشان می‌دهد.

Reclosing Switch<sup>۱</sup>  
 Energization<sup>۲</sup>  
 Reenergization<sup>۳</sup>

موجود در خط کمتر از حالت دیگر است لذا اندازه این اضافه ولتاژها بیشتر است.

۵-مراجع:

۴-نتیجه گیری

بر اساس شبیه سازیهای انجام گرفته مشاهده شد که اضافه ولتاژهای ناشی از کلید زنی در سیستمهای توزیع زمینی مهمترین نوع اضافه ولتاژهای گذرا می باشد و می بایست در هنگام طراحی شبکه توزیع، انتخاب کابلها و تجهیزات حفاظتی در نظر گرفته شود. به منظور شبیه سازی و اندازه گیری اضافه ولتاژها می بایست از مدل‌های مناسب عناصر استفاده شود تا محاسبات دارای دقت و سرعت محاسباتی مناسب باشند. از روی شبیه سازیها مشاهده شد که طول کابل تاثیر چندانی در اندازه اضافه ولتاژها در ابتدا و انتهای کابل ندارد. اما بارهای مختلف تاثیرات متفاوت بر روی اندازه اضافه ولتاژها دارند. بطوریکه بارهای اهمی خالص اضافه ولتاژها را به نحو مؤثری میرا می کند اما بارهای اهمی-سلفی تاثیر محسوسی بر روی اندازه اضافه ولتاژها ندارند. همچنین مشاهده شد که نقطه اتصال کابلها و سر کابل‌های ابتدای فیدر از نقاط حساس کابل می باشد و اندازه اضافه ولتاژها در این نقاط قابل توجه است. کلیدهای بازبست تاثیر به سزائی در افزایش اضافه ولتاژهای ناشی از کلیدزنی دارند میزان این اضافه ولتاژها نیز به زمان وصل مجدد کلیدها وابسته است. سرانجام مشاهده شد که برفگیرها تاثیر محسوسی در کاهش و میرا کردن اندازه اضافه ولتاژها دارند. بنابراین می توان از این تجهیزات برای حفاظت کابلها از اضافه ولتاژهای ناشی از کلیدزنی استفاده کرد.

۶-ضمیمه:

جدول (۱-الف): پارامترهای آماری مربوط به اضافه ولتاژهای فاز به زمین ناشی از کلیدزنی در ابتدای کابل

طول کابل	میانگین	انحراف معیار	واریانس	چولگی	تعداد نمونه	میان	چارک سوم	ماکزیمم
۱۰۰۰	۱/۳۴۵	۰/۱۴۰	۰/۰۱۹۸	-۰/۹	۷۸۲	۱/۳۹۳	۱/۲۴۵	۱/۵۹۹
۲۰۰۰	۱/۳۶۲	۰/۱۱۴	۰/۰۱۴	-۰/۹	۷۴۱	۱/۴۰۳	۱/۴۳۸	۱/۶۲۰
۵۰۰۰	۰/۳۱۳	۰/۱۳۷	۰/۰۱۸۹	-۰/۶۷	۷۶۱	۱/۳۵۱	۱/۴۰۷	۱/۶۴۸
۱۰۰۰۰	۰/۲۶۲	۰/۱۲۱	۰/۰۱۴۷	-۰/۶۶	۷۷۲	۱/۲۹۵	۱/۳۴۹	۱/۵۴۰

[۱۲] گ. قره پتیان، ه. علیپور " بررسی حالات گذرا توسط EMTP " چاپ اول، مرکز نشر دانشگاه امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، زمستان ۱۳۷۸.

[1] International Standard, IEC71-2, Insulation coordination, part2:Application guide

[2] CIGRE Working Group SC 33,"Risk of failure determination of overhead line phase-to-earth insulation under swithing surges",ELECTRA, No. 56, 1970, pp 41-57.

[3] CIGRE Working Group SC 33,"The probabilistic approach to insulation coordination",ELECTRA, No. 13, 1978, pp 69-94.

[4] L.M. Wedepohl and D.J. Wilcox, "Transient analysis of underground power transmission systems; system-model and wave propagation characteristics",Proc. IEE, vol. 120, pp. 252-259, Feb. 1973.

[5] H.W. Dommel, "Electromagnetic Transients Program Reference manual", Report prepared for Bonneville Power Administration, Portland, Oregon August 1986

[6] Electromagnetic Transients Program Rule Book. Bonneville Power Administration, Portland, Oregon, April 1982

[7] H.W. Dommel and J.R. Marti, "Overhead transmission line models for steady state and transient analysis", CEA Engineering & Operating Division Transaction,1985.

[8] A Morched, L. Marti, and J Ottevangers,"A high frequency transformer model for the EMTP " IEEE Trans. PWRD, vol. 8,No. 3,July 1993,pp. 1615-1626.

[9] F De Leon and A Semlyen,"Reduced order model for transformer transients" IEEE Trans. PWRD, Vol. 7,No. 1,January 1992,pp 376-383.

[10] R.J.Galazra, J.H. Chow, R.C. Degeneff, "Transformer model reduction using time and frequency domain sensitivity techinques",IEEE Trans. PWRD, Vol 10, No. 4, April 1995,pp. 1052-1059.

[11] A.M. Gole, D.W. Durbak,et al."Task Force Report: Modeling Guidelines for Switching Transients", IEEE PES Switching Transients Task Force 15.08.09.03



جدول (۱-ب): پارامترهای آماری مربوط به اضافه ولتاژهای فاز به زمین ناشی از کلیدزنی در انتهای کابل

طول کابل	میانگین	انحراف معیار	واریانس	چولگی	تعداد نمونه	میانه	چارک سوم	ماکزیمم
۱۰۰۰	۱/۶۹۷	۰/۲۳۰	۰/۰۵۴۱	-۱/۳۳	۷۹۰	۱/۷۷۶	۱/۸۴۲	۲/۱۱
۲۰۰۰	۱/۷۴۲	۰/۱۹۵	۰/۰۴۸۲	-۱/۴۶	۷۶۷	۱/۸۰۸	۱/۸۶۶	۲/۱۷
۵۰۰۰	۱/۶۹۶	۰/۲۳۴	۰/۰۵۵۰	-۱/۱۵	۷۸۶	۱/۷۷۲	۱/۸۴۶	۲/۲۱
۱۰۰۰۰	۱/۶۶۱	۰/۲۱۴	۰/۰۴۶	-۱/۰۹	۷۹۰	۱/۷۲۷	۱/۷۹۵	۲/۲۱

جدول (۲): پارامترهای آماری مربوط به اضافه ولتاژهای ناشی از کلیدزنی در انتهای کابل با حضور برقیگیر

	میانگین	انحراف معیار	واریانس	چولگی	تعداد نمونه	میانه	چارک سوم	ماکزیمم
بی برقیگیر	۱/۶۶	۰/۲۱۴	۰/۰۴۶	-۱/۰۹	۷۹۰	۱/۷۲۷	۱/۷۹۵	۲/۲۱
با برقیگیر	۱/۱۰۴	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰	۱/۹۳	۷۹۹	۱/۱۰۴	۱/۱۰۵	۱/۱۰۹

جدول (۳): پارامترهای آماری مربوط به اضافه ولتاژهای ناشی از کلیدزنی در انتهای کابل باردار

نوع بار	میانگین	انحراف معیار	واریانس	چولگی	تعداد نمونه	میانه	چارک سوم	ماکزیمم
بی بار	۱/۶۱۹	۰/۲۲۱	۰/۰۴۹	-۱/۳۱	۷۸۸	۱/۷۰۴	۱/۷۵۹	۲/۰۰
بار اهمی	۱/۰۲۴	۰/۰۱۴	۰/۰۰۰۱	۰/۶۸۷	۲۶۹	۱/۰۲۴	۱/۰۳۲	۱/۰۹۲
Pf=0.8	۱/۵۷۸	۰/۱۸۸	۰/۰۴۵	-۰/۹۴	۷۶۹	۱/۶۱۹	۱/۷۰۶	۱/۹۲۲
Pf=0.5	۰/۵۹۶	۰/۱۸۹	۰/۰۳۶	-۰/۸۷	۷۷۵	۱/۷۴۸	۱/۷۱۷	۲/۰۴
Pf=0.0	۱/۶۱۵	۰/۲۱۹	۰/۰۴۷	-۰/۶۲	۷۷۶	۱/۷۵۴	۱/۷۳۴	۲/۱۹۲

جدول (۴): پارامترهای آماری مربوط به اضافه ولتاژهای ناشی از کلیدزنی در نقطه اتصال دو کابل به هم

	میانگین	انحراف معیار	واریانس	چولگی	تعداد نمونه	میانه	چارک سوم	ماکزیمم
وسط خط	۱/۶۰۸	۰/۲۰۴	۰/۰۴۲	-۱/۲۷	۷۸۵	۱/۶۷۷	۱/۷۴	۲/۰۷
آخر خط	۱/۶۷۰	۰/۲۱۶	۰/۰۴۷	-۱/۱	۷۸۵	۱/۷۴۷	۱/۸	۲/۲

جدول (۵): پارامترهای آماری مربوط به اضافه ولتاژهای ناشی از کلیدزنی در ابتدا و انتهای فیدر

	میانگین	انحراف معیار	واریانس	چولگی	تعداد نمونه	میانه	چارک سوم	ماکزیمم
ابتدای فیدر	۱/۳۷۳	۰/۱۴۹	۰/۰۲۲	-۱/۰۲	۱/۴۲۳	۱/۴۷۳	۱/۶۹۶	
انتهای فیدر ۲۰۰۰ m	۱/۴۴۵	۰/۱۷۰	۰/۰۲۹	-۱/۰۶	۱/۵۰۱	۱/۶۳۸	۱/۹۴۳	
انتهای فیدر ۵۰۰۰ m	۱/۹۳۰	۰/۲۹۶	۰/۰۸۸	-۱/۳۲	۲/۰۲۷	۲/۱۲	۲/۵۱	

جدول (۶): پارامترهای آماری مربوط به اضافه ولتاژهای ناشی از کلیدزنی در انتهای کابل برای کلیدهای بازبست

نوع کلید	میانگین	انحراف معیار	واریانس	چولگی	تعداد نمونه	میانه	چارک سوم	ماکزیمم
عادی	۱/۶۹۶	۰/۲۳۴	۰/۰۵۵	-۱/۱۵	۷۸۶	۱/۷۷۲	۱/۸۴۶	۲/۲۱
بازبست ۰/۲	۲/۴۲۸	۰/۵۲۶	۰/۲۷۷	-۰/۵۸	۵۹۸	۲/۵۸	۲/۸۳۱	۳/۹
بازبست ۰/۱	۲/۲۱	۰/۵۷۴	۰/۳۲۹	-۰/۳	۵۹۸	۲/۴۵۲	۲/۶۷۲	۳/۶۷۳