حفاظت تجهیزات شبکه‌های توزیع در برابر اضافه ولتاژهای مخرب سیستم قدرت

احمد غلامي
محسن نياستي سميه موزوني
دانشگاه علم و صنعت ايران ـ دانشكده مهندسي برق
دانشكده مهندسي دانشگاه سمنان _ شركت مهندسين مشاور غرب نيرو
دانشگاه آزاد اسلامي واحد تهران مركز
m_niasati@iust.ac.ir

چكيده

حفاظت تجهيزات شبكه‌هاي توزيع در برابر اضافه ولتاژها، عمدتاً بوسيله برقگيرها صورت مي‌گيرد. در طراحي بهينه شبكه‌هاي توزيع بايد مكان‌هاي بهينه براي نصب برقگيرها معين شود تا علاوه بر داشتن يك شبكه مطمئن و محفوظ در برابر اضافه ولتاژها، شبكه‌اي اقتصادي‌تر و با حداقل هزينه نصب و نگهداري برقگيرها به دست آيد. هدف اين مقاله، تعيين شعاع حفاظتي برقگيرهاي ZnO به كمك نرم‌افزارEMTP و جايابي بهينه آنها در شبكه‌هاي توزيع بوسيله الگوريتم‌هاي كامپيوتري مي‌باشد. با بررسي نتايج شبيه‌سازي‌هاي انجام شده، مشاهده گرديد كه شعاع حفاظتي برقگير ZnO نمونه براي شبكه‌هاي هوايي در حدود 160 متر و براي شبكه‌هاي كابلي در حدود50 متر مي‌باشد. همچنين مشاهده شد كه با جايابي بهينه برقگيرها، تعداد برقگيرهاي مورد نياز براي يك شبكه نمونه (شبكه توزيع 123 شينه IEEE) بطور قابل ملاحظه‌اي كاهش مي‌يابد و در نتيجه مي‌توان به يك شبكه اقتصادي‌تر دست يافت.

كلمات كليدي: برقگير، شعاع حفاظتي، شبكه‌هاي توزيع، جايابي بهينه، EMTP

1ـ مقدمه

يكي از پديده‌هاي سوء براي سيستم‌هاي قدرت، اضافه ولتاژهاي سيستم مي‌باشد. حفاظت تجهيزات شبكه‌هاي توزيع در برابر اضافه ولتاژها, عمدتاً بوسيله برقگيرها صورت مي‌گيرد. فاصله برقگيرها از تجهيزات تأثير مهمي در كنترل اضافه ولتاژها و در نتيجه حفاظت تجهيزات دارد. از نظر فني هر چه برقگير به تجهيزات نزديكتر باشد, حفاظت بهتري صورت مي‌گيرد ولي به دلايل

اقتصادي و با توجه به قيمت برقگيرها, قرار گرفتن برقگيرها در كنار هر تجهيز شبكه به صرفه نيست. از طرفي ديگر گستردگي و توسعه روز افزون شبكه‌هاي توزيع در شهرها و نزديكي پست‌هاي توزيع شهري به يكديگر, موجب خواهد شد كه برقگيرها نزديك هم نصب گردند. با در نظر گرفتن شعاع حفاظتي هر برقگير و احتمال پوشش حفاظتي يك محدوده توسط چند برقگير, مطالعه و بررسي لزوم نصب يا عدم نصب برقگيرهايي كه در شعاع حفاظتي برقگيرهاي مجاور قرار مي‌گيرند ضروري و مفيد است. لذا در طراحي بهينه شبكه‌هاي توزيع بايد مكان‌هاي بهينه براي نصب برقگيرها معين شود. همچنين بايد در انتخاب نوع و مشخصات برقگير دقت شود. با انتخاب درست و نصب آنها در مكان‌هاي بهينه در شبكه قدرت, علاوه بر داشتن يك شبكه مطمئن و محفوظ در برابر اضافه ولتاژها, شبكه‌اي اقتصادي‌تر و با حداقل هزينه نصب و نگهداري برقگيرها به دست خواهد آمد [1].

2ـ بررسی لزوم نصب برقگیر در شبکه توزیع

هر چند بخاطر ارتفاع كم خطوط توزيع در مقايسه با خطوط انتقال و يا قرار گرفتن آنها در مجاورت ساختمان‌ها و درختان بلند، درصد اصابت مستقيم صاعقه به شبكه‌هاي توزيع كاهش مي‌يابد، ولي بخاطر سطح عايقي پايين خطوط توزيع، حتي ولتاژهاي القايي ناشي از اصابت غير مستقيم صاعقه كه دامنه آنها تا 300kV مي‌رسد نيز مي‌تواند ايزولاسيون تجهيزات خطوط توزيع را تهديد كند. دامنه ولتاژهاي القائي صاعقه با ارتفاع خط از سطح زمين متناسب است. هر چه ارتفاع دكل و سيم‌ها از سطح زمين كمتر باشد، دامنه اضافه ولتاژهاي القائي بيشتر كاهش مي‌يابد [1]. اين واقعيت با توجه به فرمولي كه S.Rusck در سال 1958 براي يك مدل ساده به منظور شبيه‌سازي برخورد غير مستقيم صاعقه توسعه داد به وضوح مشاهده مي‌شود. بر اساس مدل ارائه شده، ولتاژ القائي از رابطه تقريبي زير بدست مي‌آيد[1،2]:

(1)

$$V_{\max} = 36.5 \frac{I_s . h}{y} [kV]$$

كه در آن I_s، ماكزيمم جريان صاعقه در لحظه برخورد و بر حسب kA، h ارتفاع خط از زمين بر حسب متر و y فاصله محل برخورد صاعقه از خط بر حسب متر مي‌باشد.

شكل (1) دامنه اضافه ولتاژهاي القايي ناشي از اصابت غير مستقيم صاعقه به مجاورت خط بر حسب فاصله محل صاعقه از خط را نشان مي‌دهد. مشاهده مي‌گردد كه هر چه فاصله محل اصابت صاعقه به خط نزديكتر باشد دامنه اضافه ولتاژهاي القايي روي خط افزايش مي‌يابد. معمولاً اصابت صاعقه در فاصله كمتر از 100 متر از خط، مي‌تواند ايزولاسيون تجهيزات شبكه‌هاي توزيع را تهديد كند. بنابراين حتي اگر احتمال برخورد مستقيم صاعقه با خط كم باشد ولي منطقه مورد نظر صاعقه خيز باشد بايد از وسايل حفاظتي مثل برقگيرها براي محدود كردن دامنه اضافه ولتاژهاي القايي در شبكه قدرت استفاده كرد. از طرف ديگر چون طول خطوط توزيع در مقايسه با خطوط انتقال كم مي‌باشد لذا

استهلاك و كاهش دامنه موج اضافه ولتاژ در هنگام انتشار موج در طول خط و همچنين تحت تأثير پديده كرونا ناچيز است.
از آنجا كه دامنه اضافه ولتاژهاي كليدزني به مقدار سطح ولتاژ شبكه بستگي دارد لذا اين نوع اضافه ولتاژها بيشتر در شبكه‌هايHV وEHV رايج مي‌باشد ولي در شبكه‌هاي توزيع و فوق توزيع نيز (بخصوص كليدزني خازني) مي‌تواند مشكل ساز شود. بطور كلي، براي شبكه‌هاي توزيع اضافه ولتاژهاي ناشي از اصابت مستقيم ويا غير مستقيم صاعقه مهمترين عامل تهديد و نگراني هستند به همين دليل در طراحي سطح عايقي تجهيزات شبكه‌هاي توزيع، اين نوع اضافه ولتاژها ملاك مي‌باشند[1،4].

3ـ تعيين شعاع حفاظتی برقگيرهایZnO

3ـ1ـ مدلسازی تجهيزات شبكه توزيع

براي شبيه‌سازي بايد تجهيزات شبكه توزيع مثل ترانسفورماتورهاي توزيع، برقگيرها، خطوط هوايي، كابل‌ها و ساير تجهيزات مدلسازي شوند. در ميان تجهيزات فوق، ترانسفورماتورها و برقگيرها از اهميت بيشتري برخوردارند. اصولاً براي مطالعات امواج با شيب پيشاني تند (امواج صاعقه و كليدزني)، ترانسفورماتورها را با خازن مدل مي‌كنند. مدل برقگير ZnO براي مطالعات صاعقه به صورت مدل فركانسي مطابق شكل(2) در نظر گرفته مي‌شود كه هماهنگي زيادي با رفتار واقعي برقگيرهاي ZnO دارد [1].
پارامترهاي مدل از روابط (2) بدست مي‌آيند:

$$\left(C=\frac{100n}{d}PF\ ;\ L_0=\frac{0.2d}{n}\mu H\ ;\ L_1=\frac{15d}{n}\mu H\ ;\ R_1=\frac{65d}{n}\Omega\ ;\ R_0=\frac{100\,d}{n}\Omega\right) \qquad (2)$$

كه در آن، d طول برقگير بر حسب متر، n تعداد ستون‌هاي موازي متشكل از ديسكهاي اكسيد فلزي (ZnO)، L_0 اندوكتانس مغناطيسي ناشي از ميدان‌هاي مجاور برقگير يا اندوكتانس حلقه شامل ترانسفورماتور و برقگير، R_0 براي پايدار سازي محاسبات انتگرالگيري و C ظرفيت خازني دو سر برقگير مي‌باشد. مشخصات غيرخطي V-I، A_0 و A_1) را مي‌توان از روي مقادير ولتاژ ـ جريان برقگير كه توسط سازنده داده مي‌شود تخمين زد.

3ـ2ـ تعيين برد حفاظتی برقگير ZnO

3ـ2ـ1ـ تعيين شعاع حفاظتی برقگيرZnO در خطوط هوايی

شبكه20kV هوايي به طول 2km مطابق شكل(3) براي شبيه‌سازي در نظر گرفته و فرض مي‌شود كه صاعقه به ابتداي خط اصابت كرده و برقگير در انتهاي خط نصب شده است. منبع اضافه ولتاژ بصورت موج ضربه صاعقه تك اصابتي (1.2/ 50µs) با شيب $200\ kV/\mu s$ و دامنه 250kV در نظر گرفته شده است.

پس از اجراي برنامه، شكل موج‌هاي ولتاژ گره‌هاي مختلف شكل (3) برحسب نوع هادي خط بصورت شكل (4) بدست مي‌آيد. با توجه به شكل موج ولتاژ در نقطه A در فاصله 130 متري از برقگير و اينكه مدت زمان دوام ولتاژ با دامنه بيش از125 kV (ولتاژ استقامت سيستم 20kV) كمتر از 2 ميكروثانيه (حداقل زمان لازم براي يونيزه شدن هوا) مي‌باشد، مي‌توان ديد كه برقگير مذكور توانسته ولتاژ در فاصله بيش از 130 متري خود را در حد قابل قبول محدود كند. بنابراين شعاع حفاظتي برقگير مذكور بيش از 130 متر مي‌باشد. با تكرار شبيه‌سازي فوق براي انواع مختلف هادي‌ها مشاهده شده كه شعاع حفاظتي برقگير به نوع هادي بستگي ندارد و مقدار آن در حدود 160 متر مي‌باشد.

3ـ2ـ2ـ تعيين حوزه حفاظتي برقگير در شبكه كابلي

شبكه 20kV با خط كابلي به طول 1km مطابق شكل(5) براي شبيه‌سازي در نظر گرفته مي‌شود و فرض مي‌شود كه صاعقه به ابتداي خط اصابت كرده و برقگير در انتهاي خط نصب شده است. امپدانس موجي خط هوايي(Z_L) برابر 350 اهم و امپدانس موجي كابل(Z_C) برابر 45 اهم در نظر گرفته شده است (كابل كلاس A و با سطح مقطع 50 ميليمتر). منبع اضافه ولتاژ مطابق حالت قبلي (موج ولتاژ 50/ 1.2 با دامنه 250kV) است.

پس از اجراي برنامه، منحني‌هاي ولتاژ گره‌هاي مختلف شبكه شكل(5) بصورت شكل(6) بدست مي‌آيد. با توجه به توضيحات قبلي مي‌توان دريافت كه شعاع حفاظتي برقگير مذكور براي خطوط كابلي در حدود 50 متر مي‌باشد. و اين بدان معني مي‌باشد كه اگر طول كابل كمتر از 50 متر باشد، آنگاه با نصب برقگير در يك سر كابل مي‌توان هم كابل و هم ترانسفورماتور و تجهيزات نصب شده در سر ديگر كابل را محافظت كرد. با تكرار شبيه‌سازي براي كابلهاي ديگر (با كلاسها و سطح مقطع‌هاي متفاوت) و همچنين تغيير محل اصابت صاعقه به خط كابلي، ملاحظه شد كه موج ضربه قبل از رسيدن به برقگير در انتهاي كابل، در سطح 60kV محدود شده و نيز در شين A5 به فاصله 50 متري از انتهاي كابل، دوام موج اضافه ولتاژ با دامنه بالاتر از 100kV، كمتر از 2µsec مي‌باشد و مقدار حداكثر آن به 102kV مي‌رسد. بنابراين برقگير فوق داراي شعاع حفاظتي معادل 50 متر بوده و نوع كابل و سطح مقطع آن تأثير چنداني بر مقدار شعاع حفاظتي فوق ندارند.

3ـ2ـ3ـ بررسي حوزه حفاظتي برقگير در شبكه تركيبي

شبكه20kV تركيبي شكل (7) شامل كابل با طول 1km و خط هوايي به طول 250m در نظر گرفته مي‌شود. دو برقگير در دو سر كابل قرار گرفته و صاعقه به ابتداي خط هوايي اصابت كرده است. نتايج شبيه‌سازي براي كابل كلاسC با سطح مقطع 50mm بصورت شكل(8) مي‌باشد.

همانطور كه از منحنی هامشاهده مي‌شود، دامنه موج ضربه پس از رسيدن به برقگير در ابتداي كابل، در سطح 80kV محدود شده

است و ولتاژ A2 در فاصله250 متري از برقگير اول نيز در حدود 80kV محدود شده است. قابل ذكر است كه نوع كابل و سطح مقطع آن تأثير ناچيزي روي دامنه اضافه ولتاژها دارد. با توجه به منحني‌هاي بدست آمده، جهت حفاظت كابل‌ها در شبكه‌هاي تركيبي بايد در هر دو انتهاي آنها برقگير نصب نمود تا از ورود موج ضربه به داخل كابل جلوگيري شود.

4ـ تعيين مكان‌هاى بهينه نصب برقگيرها در شبكه توزيع نمونه

در اكثر شبكه‌هاي توزيع با توجه به تغييرات شبكه پس از احداث آن، شعاع حفاظتي برقگيرهاي شبكه در نظر گرفته نمي‌شود و به منظور افزايش قابليت اطمينان، براي هر تجهيز (ترانسفورماتور) بطور جداگانه برقگير نصب مي‌شود. اما در بخش قبلي مشاهده شد كه برقگيرها مي‌توانند دامنه اضافه ولتاژها را تا يك شعاع معيني محدود كنند. بنابراين مي‌توان با جايابي مناسب برقگيرها در شبكه، تعداد آنها را بدون آنكه از قابليت اطمينان شبكه بطور جدي كاسته شود، كاهش داد. از اينرو بايد شبكه قدرت به منظور تعيين مكان‌هاي مناسب و بهينه براي نصب برقگيرها مورد تجزيه و تحليل قرار گيرد. در ادامه مكان‌هاي مناسب براي نصب برقگيرها در يك شبكه توزيع نمونه (شبكه 123 شينه IEEE) بر اساس شعاع حفاظتي برقگيرها تعيين مي‌شود.

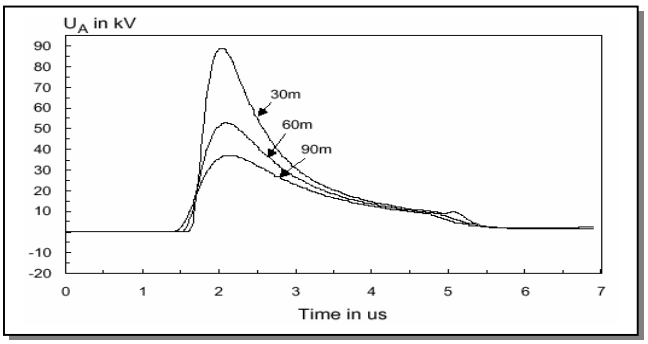
شبكه‌هاي توزيع معمولاً بصورت غربالي يا حلقوي طراحي و بصورت شعاعي بهره برداري مي‌شوند. يكي از مزاياي مهم شبكه‌هاي شعاعي، سادگي هماهنگي عايقي (حفاظتي) آنها است. در اينجا نيز از شعاعي بودن شبكه‌هاي توزيع براي تهيه الگوريتمهاي تعيين مكانهاي بهينه نصب برقگير استفاده مي‌شود. با توجه به مشخصات و ساختار شبكه توزيع (موقعيت گره‌ها و طول شاخه‌ها) و تجهيزات متصل به گره‌ها و همچنين با توجه به اهميت تجهيزات و بر اساس شعاع حفاظتي برقگير، مكانهاي مناسب جهت نصب برقگيرها مشخص مي‌شوند بطوري كه تمام تجهيزات مورد نظر تحت حفاظت برقگيرها قرار بگيرند.

از شبكه نمونه هوايي 123 شينه IEEE مطابق شكل (9) براي تعيين مكانهاي مناسب نصب برقگيرها استفاده شده است. جايابي براي برقگير (ZnO) با شعاع حفاظتي 150 متر براي خطوط هوايي انجام شده است (در عمل با توجه به استانداردها و شرايط جغرافيايي منطقه و همچنين نتايج حاصل از شبيه‌سازي‌هاي كامپيوتري انجام شده براي خطوط مختلف, مقدار شعاع حفاظتي برقگير تا 200 متر نيز پيشنهاد مي شود). با در نظر گرفتن فاصله بين گره‌ها و تجهيزات متصل به هر گره، تقريباً 70 گره از كل گره‌هاي شبكه مفروض در حالت متداول (حالتي كه براي هر تجهيز بطور جداگانه برقگير نصب شود) نياز به برقگير دارند. اما با در نظر گرفتن شعاع حفاظتي برقگيرهاي مجاور (در اينجا 150متر)، تعداد گره‌هايي كه نياز به برقگير دارند تقريباً به 50 گره كاهش مي‌يابد.

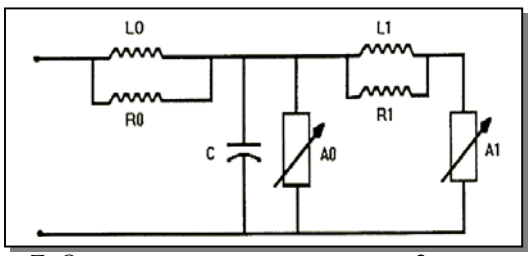
5ـ نتيجه‌گيرى

هدف اصلي اين مقاله, بررسي و تحليل جهت تعيين شعاع حفاظتي برقگيرها براي حفاظت تجهيزات شبكه‌هاي توزيع در برابر اضافه ولتاژها (بخصوص ناشي از اصابت صاعقه) بود. با توجه به شبيه‌سازي‌هاي انجام شده, شعاع حفاظتي برقگير (با مشخصات معين) در شبكه‌هاي توزيع هوايي و كابلي و تركيبي بدست آمد. شبيه‌سازي‌ها نشان دادند كه حوزه حفاظت برقگير در خط هوايي معادل 160 متر مي‌باشد و اين مقدار با توجه به شرايط شبكه و مشخصات برقگير, تا 200 متر نيز مي‌تواند افزايش يابد. همچنين حوزه حفاظت برقگير در خط كابلي معادل 50 متر مي‌باشد. در ادامه شبيه‌سازي‌ها مشاهده شد كه در شبكه‌هاي تركيبي و كابلهاي واصل خطوط هوايي، هر دو سر انتهايي كابل ملزم به نصب برقگير مي‌باشند. همچنين مشاهده شد كه با در نظر گرفتن شعاع حفاظتي برقگيرها، تعداد برقگيرهاي شبكه بطور قابل ملاحظه‌اي كاهش مي‌يابد و بدون آنكه از قابليت اطمينان شبكه كاسته شود، با كاهش برقگيرهاي شبكه صرفه جويي اقتصادي قابل ملاحظه‌اي صورت مي‌گيرد.

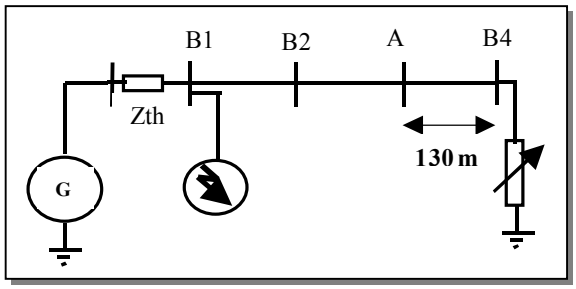
6ـ شكلها و منحنی‌ها



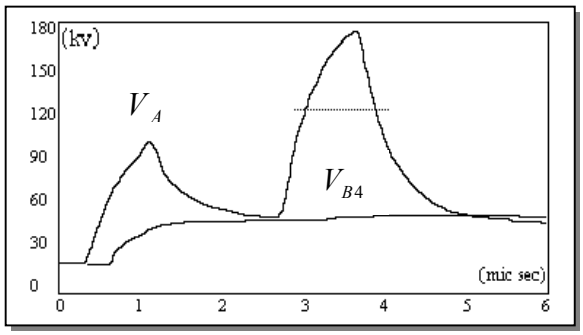
شكل (1)_ تأثير فاصله محل اصابت صاعقه در مجاورت خط بر دامنه ولتاژهاي القائي خطوط



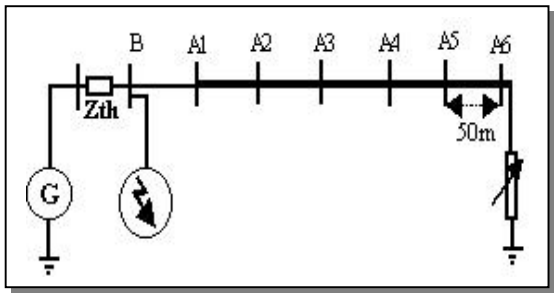
شكل(2)_ مدل فركانسي برقگير ZnO



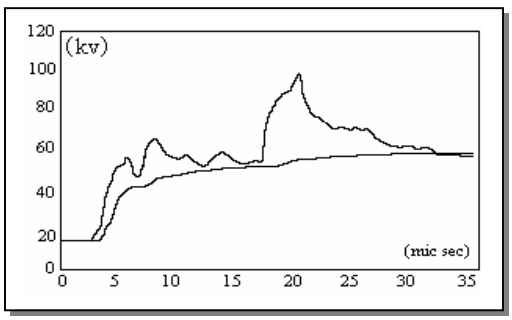
شكل(3)_ خط هوايي به طول 2km با برقگير ZnO در انتهاي آن و اصابت صاعقه در ابتداي خط



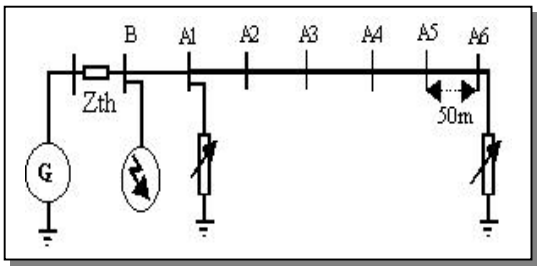
شكل(4)_ شكل موج ولتاژ در فاصله 130 متري از برقگير ناشي از اصابت صاعقه به ابتداي خط هوايي



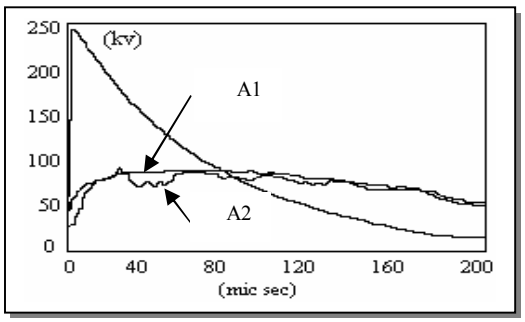
شكل(5)_ خط كابلي به طول 1km با برقگير در انتهاي آن و اصابت صاعقه به ابتداي خط هوايي



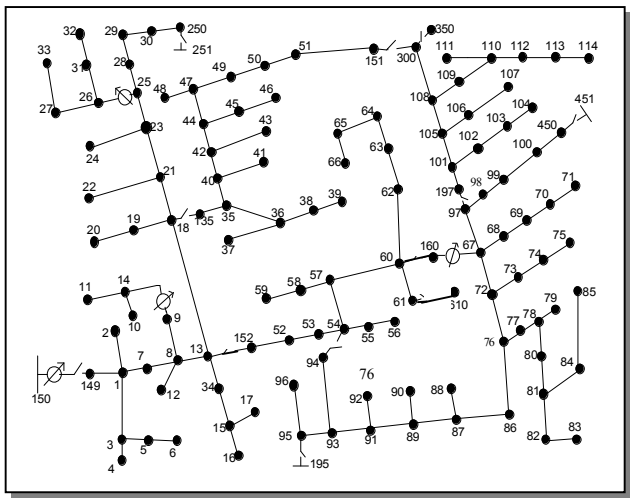
شکل(6)_ اصابت صاعقه به ابتداي خط هوايي و ورود موج ولتاژ به شبکه کابلي و عملکرد برقگير در انتهاي کابل



شکل(7)_ شبکه کابلي به طول 1km با دو عدد برقگير در دو سر کابل و اصابت صاعقه به ابتداي خط هوايي



شکل(8)_ اصابت صاعقه به ابتداي خط هوايي و ورود موج به کابل وعملکرد برقگير در ابتداي کابل



شکل(9)_ شبکه توزيع هوايي 123 شينه IEEE

مراجع

[1] محسن نياستي جايابي بهينه نصب برقگيرها براي حفاظت تجهيزات شبكه‌هاي توزيع . پايان‌نامه كارشناسي ارشد- دانشگاه علم و صنعت ايران ـ بهمن 1380

[2] C.A.Nucci F.Rachicdi, "Lightning-Induced Overvoltages", IEEE Transmission and Distribution Conference, Panl Session Distribution Lightning Protection, April 14,1999.

[3] Del Pull, Senior Member IEEE, "Low Voltage Power System Surge Overvoltage Protection." IEEE Transactions On Industry Applications, Vol.37, No. 1, January/February 2001.

[4] Thomas A. Short, "Lightning Protection of Overhead Distribution Lines." Power Technologies, a Division of Stone & Webster Consultants, Inc., November 2000.

[5] Carlos T.Mata, I. Fernandez, Vladimir A.Rakov, Martin A.Uman, "EMTP Modeling of a Triggered _Lightning Strike to the Phase Conductor of an Overhead Distribution Line." Transactions On Power Delivery, Vol. 15, No.4, October 2000.

[6] Juan A. Martinez, Francisco Gonzalez-Molina, "Surge Protection of Underground Distribution Cables." IEEE Transactions On Power Delivery, Vol. 15, No.2, April 2000