



بررسی و ارزیابی اضافه ولتاژهای ناشی از برقدار کردن خطوط هوایی و کابلهای زمینی ۲۰ کیلوولتی در شبکه های توزیع

مهرداد عابدی

سید حسین حسینیان

دانشکده برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده:

در این مقاله سعی بر آنستکه اضافه ولتاژهای ناشی از کلیدزنی (سوئیچینگ) در هنگام برقدار کردن (*Energization*) خطوط فشار متوسط هوایی و کابلهای زمینی ۲۰ کیلو ولتی مورد ارزیابی و بررسی قرار گیرد. در این مقاله تأکید بیشتر بر روی آندسته از تغذیه کننده های ۲۰ کیلوولتی است که ترکیبی از خطوط هوایی و کابلهای زمینی می باشند تا بتوان اضافه ولتاژها را بالاخص در محل اتصالات (*Junction*) ارزیابی نمود. همچنین در این مقاله به نقش برقیهای اکسید روی (*ZnO*) جهت کاهش اضافه ولتاژهای ناشی از برقدار کردن اینگونه تغذیه کننده ها اشاره می گردد. در این مقاله به میزان ولتاژ القایی (*Induced Voltage*) در *Sheath* کابلهایی که زمین نشده اند توجه می گردد و تأثیر زمین کردن *Sheath* بر ایمنی کابل مطرح می شود. در این نوشتار جهت شبیه سازی کامپیوتری سیستم مورد مطالعه و استخراج نتایج از نرم افزار مشهور *EMTP* [۱] کمک گرفته شده است.

۱- شرح مقاله

اصولاً کلیدزنی و مفهوم اضافه ولتاژهای ناشی از آن در خطوط هوایی و کابلهای زمینی *EHV* و *UHV* مطرح می گردد تا در طراحی سطح عایقی خطوط هوایی و کابلهای زمینی مورد توجه قرار گیرد. اضافه ولتاژ ناشی از کلیدزنی در خطوط هوایی شبکه های توزیع و فوق توزیع آنچنان قابل ملاحظه نیست. اما عامل مهمی که بررسی اضافه ولتاژ در شبکه های توزیع و فوق توزیع یعنی ۲۰ کیلو ولت و ۶۳ کیلوولت را ایجاب می کند همانا وجود کابلهای زمینی در این شبکه هاست و علت آن عدم خودترمیمی کابلهای زمینی می باشد. بعبارت دیگر اگر در خطوط هوایی اضافه ولتاژ به حدی برسد که بین فازها و یا بین فازها و زمین (دکل) جرقه برقرار گردد، سیستم حفاظتی خط را

بی برق کرده و تا برقدار شدن مجدد، هوای یونیزه جابجا می‌گردد و شرایط عایقی مناسب دوباره پدید می‌آید (خود ترمیمی). اما پدیده خود ترمیمی در کابل‌های زمینی رخ نمی‌دهد و هرگاه میزان اضافه ولتاژ در قسمتی از کابل از تحمل عایقی کابل فراتر رود آن بخش از کابل صدمه دیده و باید تعویض گردد. مسأله دیگری که بررسی اضافه ولتاژها در کابل‌های زمینی را مهم می‌سازد وجود کابل‌های زمینی و خطوط هوایی در یک مسیر خاص بدنبال یکدیگر می‌باشد. اصولاً در شبکه‌های ۲۰ کیلو ولت طول کابل‌های زمینی معمولاً کمتر از ۵ کیلومتر است، اما احتمال آن وجود دارد که این طول در آینده افزایش یابد. از آنجائیکه طول یکی از عوامل مهم در میزان اضافه ولتاژ است، لذا اضافه ولتاژ در مسیرهائی که فقط از کابل‌های زمینی تشکیل شده و طول آنها کمتر از ۵ کیلومتر می‌باشد چندان حیاتی و قابل توجه نیست. اما در شبکه‌های ۲۰ کیلوولتی که کابل‌های زمینی در ابتدا یا انتها یا در وسط یک مسیر ۲۰ کیلوولتی هوایی قرار می‌گیرند و بخشی از مسیر را بخود اختصاص می‌دهند اوضاع فرق می‌کند. عبارت دیگر آن بخش از مسیر که بصورت هوایی است اثر قابل ملاحظه‌ای بر اضافه ولتاژها در کابل‌های زمینی دارد. عامل دیگری که این بررسی را ایجاب می‌نماید عملکرد متفاوت برقی‌ها در خطوط هوایی و کابل‌های زمینی است، زیرا ظرفیت خازنی کابلها زیاده بوده و یا بالطبع امپدانس طبیعی (*Surge Impedance*) آنها نسبت به خطوط هوایی کمتر است. همچنین طول مسیرهای زمینی بعرباب از طول مسیرهای هوایی کمتر می‌باشد. لذا هدایت برقی‌ها در هنگام کلیدزنی در سیم‌های حاوی کابل است با جریان زیاد در مدت زمان کوتاه همراه خواهد بود.

با توجه به خاموشی‌ها و بارزدانی‌های مکرر (*Load Shedding*) که اخیراً در سطح کشور مطرح است. لازم دیدیم مطالعه‌ای نسبتاً جامع در رابطه با برقدار کردن تغذیه‌کننده‌های ۲۰ کیلوولتی هوایی و زمینی انجام دهیم که در زیر نتایج آن ارائه می‌گردد.

۲- سیستم مورد مطالعه

شکل (۱) شمای کلی یک تغذیه‌کننده (*Feeder*) ۲۰ کیلوولتی را نشان می‌دهد که از پست ۶۳/۲۰ کیلوولتی خارج شده و کل طول مسیر (*AD*) معادل ۹۰ کیلومتر فرض شده است. این سیستم دارای مشخصات زیر است.

الف: ولتاژ منبع تغذیه

رفتار شبکه نسبت به این تغذیه‌کننده با مدار معادل تونن نشان داده شده و ولتاژهای فاز مربوط به منبع تونن بقرار زیر است:

$$V_a = 16/33 \cos(\omega t - 90) \text{ kv}$$

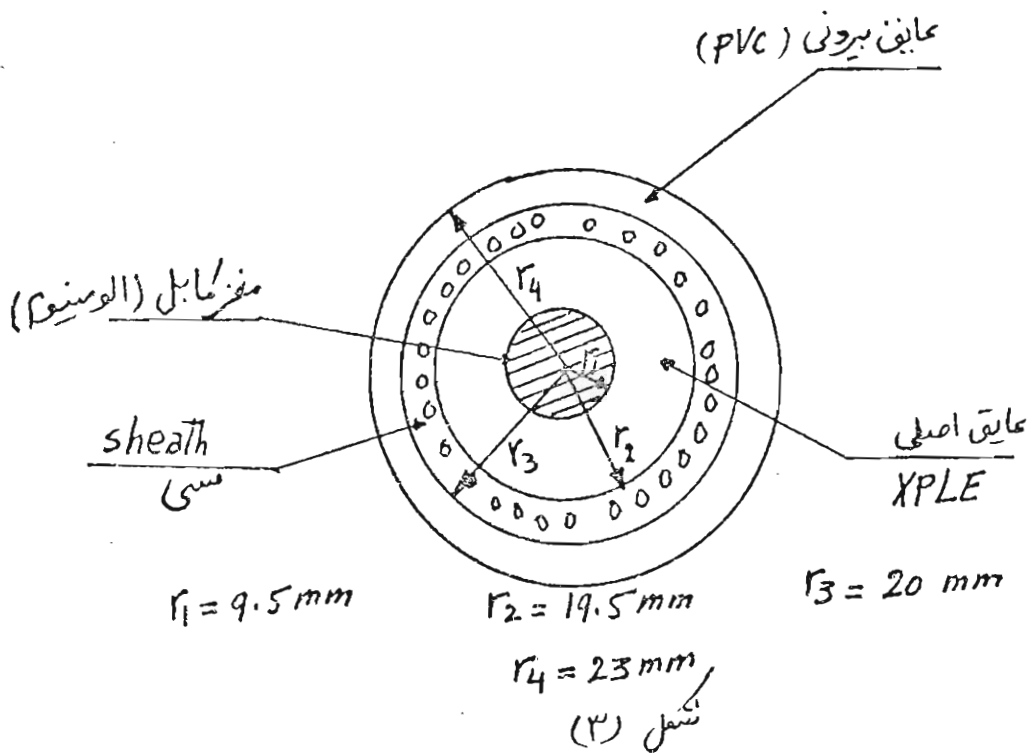
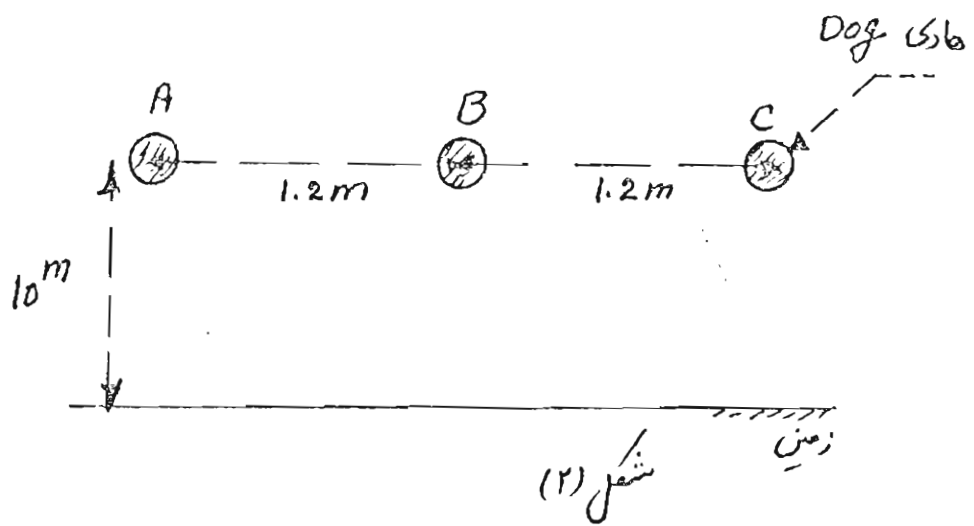
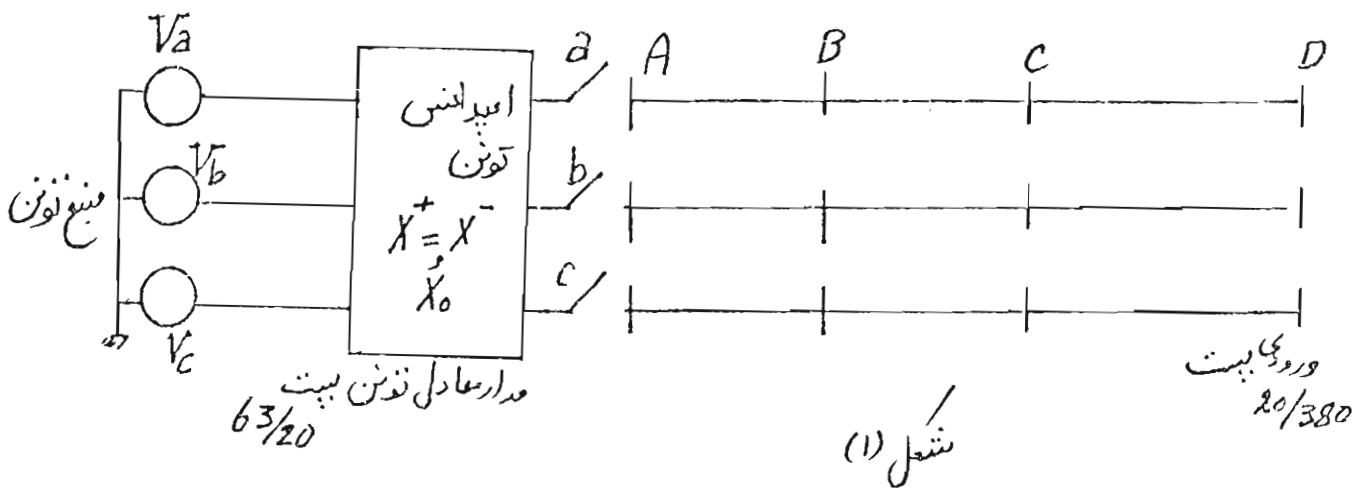
$$V_b = 16/33 \cos(\omega t + 150) \text{ kv}$$

$$V_c = 16/33 \cos(\omega t + 30) \text{ kv}$$

$$16/33 = \frac{\sqrt{2}(20)}{\sqrt{3}}$$

ب: امپدانس منبع تغذیه

امپدانس تونن منبع بقرار زیر فرض شده است.



$$X_1 = X_2 = 2 \Omega$$

ناچیز $R_{th} =$

$$X_3 = 1 \Omega$$

X_1, X_2, X_3 برتیب را کتانسهای توان مثبت، منفی و صفر می باشند.

ج: خط هوایی

نوع سیم خط هوایی ۲۰ کیلوولت از نوع DOG انتخاب شده و آرایش سیم ها بر روی تیر یا دکل مطابق شکل (۲) است. برای مدل سازی دقیق خط هوایی از مدل $J.Marti$ [۲] که مدل وابسته به فرکانس است استفاده شده است.

د: کابل زمینی

کابل زمینی سه فاز بصورت سه کابل زمینی تکفاز مورد شبیه سازی (Simulation) قرار گرفته است و در این مطالعه فرض شده که کابلها در عمق ۵۰ سانتیمتری از سطح زمین دفن گردیده اند. کابلها بصورت افقی در کنار هم هستند و فاصله فازها بقرار زیر است.

$$D_{ab} = D_{bc} = 10 \text{ سانچتر}$$

شکل (۳) شمای یکی از این کابلهای آلومینیومی را نشان می دهد و باید دانست جنس عایق اصلی از نوع XPLE بوده و عایق بیرونی آن از نوع PVC است جنس Sheath کابل از مس می باشد و سایر ابعاد در شکل (۳) ذکر شده است.

ه: زمان وصل کلیدهای ۲۰ کیلوولت

به منظور بررسی اضافه ولتاژهای ناشی از سوئیچینگ زمان وصل کلیدها باید بصورت آماری (Statistic) در طول یک پریود از موج سینوسی ۵۰ هرتز مدل گردد. در این مطالعه بمنظور کاهش حجم محاسبات برای هر حالت مورد مطالعه ۱۰ بار عمل کلیدزنی در زمانهای مختلف صورت گرفته است و ترتیب بسته شدن کلیدها بقرار زیر فرض می شود.

۱- کتاکت b در مدارشکن ۲۰ کیلوولت (شکل ۱) در زمانهای مختلف ۰، ۲، ۴، ۶، ۸، ۱۰، ...، ۲۰ میلی ثانیه بسته و شبیه سازی می گردد.

۲- کتاکت a در مدارشکن ۲۰ کیلوولت (شکل ۱) یک میلی ثانیه زودتر از زمانهای فوق الذکر بسته و شبیه سازی می شود.

۳- کتاکت c در مدارشکن ۲۰ کیلوولت (شکل ۱) یک میلی ثانیه دیرتر از زمانها فوق الذکر بسته و شبیه سازی می شود.

و: برقیگر

در این مقاله جهت بررسی اثر برقیگرها بر روی کاهش و محدود سازی اضافه ولتاژها از برقیگر ZnO با مشخصه اسمی ۲۱ کیلوولت در شبیه سازی با نرم افزار EMTP استفاده شده است.

۳- بررسی و تحلیل نتایج حاصله از شبیه سازی

در این بخش با استفاده از نرم افزار *EMTP* حالات زیر مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته و در هر حالت اضافه ولتاژهای ناشی از کلیدزنی در جداول مربوطه ذکر شده است. این جداول اضافه ولتاژهای نقاط مختلف A, B, C, D در شکل (۱) را برای فازهای مختلف نشان می دهد و اعداد این جداول بر حسب پریونیت ($P.U$) بوده و باید دانست $KV_{base} = 16/33$ باید دانست در هر حالت ۱۰ بار عمل کلیدزنی در زمانهای گوناگون توضیح داده شده در بالا انجام شده و جداول حاوی بیشترین اضافه ولتاژ در بین این ۱۰ بار عمل کلیدزنی می باشد.

الف: حالت شماره (۱)

در این حالت کل مسیر AD ۹۰ کیلومتری هوایی بوده و در شکل (۱) طولها اینچنین فرض شده است.

$$AB = 4 \text{ km} \quad \text{و} \quad BC = CD = 43 \text{ km}$$

نتایج حاصله مربوط به اضافه ولتاژها در این حالت در جدول (۱) ذکر شده است.

جدول (۱): نتایج مربوط به اضافه ولتاژها در حالت شماره (۱)
اعداد بر حسب $P.U$ است.

	A	B	C	D
فاز a	۱/۱۳۵	۱/۳	۱/۹۵	۲/۰۳
فاز b	۱/۱۲	۱/۴۳	۲/۱۵	۲/۲۸
فاز c	۱/۱۳	۱/۴۲	۲/۱۲	۲/۳۲

همانطور که مشاهده می شود اضافه ولتاژها در انتهای مسیر (نقطه D) بیشتر از سایر نقاط است زیرا هر چه طول بیشتر شود، اضافه ولتاژ نیز افزونتر می گردد. مسلماً این اضافه ولتاژ زیاد در انتهای مسیر از طریق ترانسفورماتورهای توزیع $20/380$ به مصرف کننده اعمال می گردد. لذا با توجه به تعداد زیاد کلیدزنی ها که معمولاً ناشی از قطع و وصل اختیاری یا اجباری در سیستم های توزیع پدید می آید، لزوم کنترل این اضافه ولتاژها حتمی به نظر می رسد.

ب: حالت شماره (۲)

در این حالت با توجه به شکل (۱) فرض می کنیم.

$$AB = 4 \text{ km (cable)} \quad BC = CD = 43 \text{ km (overhead line)}$$

نتایج مربوط به اضافه ولتاژها در این حالت در جدول (۲) ذکر شده است.

جدول (۲): نتایج مربوط به حالت شماره (۲)

	A	B	C	D
فاز a	۱/۴۶	۱/۷۴	۲/۴۶	۲/۵۷
فاز b	۱/۵۳	۱/۷۲	۲/۵۸	۲/۷۸
فاز c	۱/۳۹	۱/۵۷	۲/۱۵	۲/۸۳

با مقایسه جداول (۱) و (۲) در میابیم که آمدن کابل در ۴ کیلومتر اول خط اضافه ولتاژها در طول مسیر افزایش می‌یابد. علت این امر وجود کابل با اثر خازنی قوی بوده که اضافه ولتاژها را افزایش داده و سبب اعوجاجات ولتاژ با فرکانس بالا می‌شود. این اعوجاجات زیاد به خطوط هوایی منتقل شده و از انجا به کل سیستم توزیع منتقل می‌گردد.

ج: حالت شماره (۳)

در این حالت با توجه به شکل (۱) داریم.

$$BC = 4 \text{ km (cable)} \quad AB = CD = 43 \text{ km (خط هوایی)}$$

نتایج مربوط به اضافه ولتاژها در جدول (۳) ذکر شده است.

جدول (۳): نتایج مربوط به حالت (۳)

	A	B	C	D
فاز a	۱/۰۹	۱/۸۷	۱/۸۷	۱/۹۷
فاز b	۱/۰۸۶	۱/۶۴	۱/۶۵	۱/۸۵
فاز c	۱/۱	۲/۱۸	۲/۱۹	۲/۴۱

می‌بینیم اگر کابل به وسط مسیر منتقل شود میزان اعوجاجات در ولتاژ کابل به دلیل آنکه کابل از طریق یک امپدانس بیشتر (امپدانس شبکه + امپدانس خط هوایی) تغذیه می‌شود کمتر است و میزان میراثی در اعوجاجات نیز بالا

می‌باشد. بنابراین اضافه ولتاژها در طول خط کاهش می‌یابد و مقایسه جداول (۲) و (۳) مبین این مدعاست.

د: حالت شماره (۴)

در این حالت با توجه به شکل (۱) داریم:

$$CD = 4 \text{ km (کابل)} \quad AB = BC = 43 \text{ km (خط هوایی)}$$

نتایج مربوط به اضافه ولتاژها در این حالت در جدول (۴) آمده است.

جدول (۴): نتایج مربوط به حالت شماره (۴)

	A	B	C	D
فاز a	۱/۰۹	۱/۷۴	۱/۹۶	۱/۹۶
فاز b	۱/۰۸	۱/۴۳	۱/۷۴	۱/۷۴
فاز c	۱/۰۵	۱/۷۹	۲/۲۱	۲/۲

در این حالت کابل در انتهای مسیر است و با مقایسه جداول (۳) و (۴) در میابیم که ولتاژ در انتهای خط کمتر از حالت (۳) است. علت این امر دور شدن کابل از منبع تغذیه است، زیرا هر چه کابل دورتر از منبع قرار گیرد میزان اعوجاجات کاهش یافته و لذا اضافه ولتاژها نیز کاهش می‌یابد.

ه: حالت شماره (۵)

در حالات ۲ و ۳ و ۴ فرض بر آن بود که Sheath می‌کابل در ابتدا و انتهای کابل زمین شده است. در حالت (۵) شرایط مشابه به حالت (۴) بوده اما Sheath می‌را زمین نکرده‌ایم. نتایج مربوط به این حالت در جدول (۵) ذکر شده است.

جدول (۵): نتایج مربوط به حالت (۵)

	A	B	C	D
فاز a	۱/۰۹	۱/۷۹	۲/۲۱	۲/۲۲
فاز b	۱/۰۹	۱/۸۴	۲/۱۵	۲/۱۷
فاز c	۱/۱۲	۱/۸۲	۲/۳	۲/۳۲

با مقایسه جداول (۴) و (۵) در میابیم که زمین کردن Sheath اثر قابل ملاحظه‌ای بر کاهش اضافه ولتاژ در انتهای مسیر را دارد. علت این امر اینست که اگر Sheath زمین گردد مسیری برای جریان سوئیچینگ به زمین برقرار می‌گردد. از طرفی نتایج برنامه EMTP بهمانشان داد در حالتی که Sheath زمین نمی‌شود ولتاژهای زیر در Sheath هر فاز در انتهای کابل القاء می‌گردد.

$$V_a = 1181 \text{ P.U.}$$

$$V_b = 1176 \text{ P.U.}$$

$$V_c = 1163 \text{ P.U.}$$

لذا اگر Sheath زمین شود دیگر در آنها ولتاژی حدود $1/80 \text{ P.U.}$ القاء نمی‌گردد و عایق بیرونی کابل صدمه نمی‌بیند.

و: حالت شماره (۶)

در این حالت با توجه به شکل (۱) کل مسیر هوایی بوده و داریم

$$AB = 4 \text{ km (خط هوایی)} \quad BC = CD = 43 \text{ km (خط هوایی)}$$

در این حالت در نقطه D (انتهای مسیر) در هر فاز یک برنگیر ZnO قرار دارد و نتایج ناشی از کلیدزنی در جدول (۶) آمده است.

- جدول (۶): نتایج مربوط به حالت (۶)

	A	B	C	D
فاز a	1113	1129	1158	1158
فاز b	1112	1142	1168	1164
فاز c	1113	1139	1174	1164

با مقایسه جداول (۱) و (۶) در میابیم که آمدن برنگیر ZnO اثر قابل ملاحظه‌ای بر کاهش اضافه ولتاژ در ته مسیر دارد. لذا به کمک برنگیر می‌توان از اعمال اضافه ولتاژ گذرا به مصرف کننده‌ها جلوگیری نمود و عملکرد مناسب اینگونه برنگیرها را در خطوط 20 kv نشان داد.

ز: حالت شماره (۷)

در این حالت با توجه به شکل (۱) داریم.

$$AB = 4 \text{ km (کابل)} \quad BC = CD = 43 \text{ km (خط هوایی)}$$

در اینحالت نیز در نقطه D (انتهای مسیر) برقیگیر ZnO نصب شده است. نتایج مربوط به این حالت در جدول (۷) آمده است.

جدول (۷): نتایج مربوط به حالت (۷)

	A	B	C	D
فاز a	۱/۴۶	۱/۷۴	۱/۸۷	۱/۷
فاز b	۱/۵۳	۱/۷۲	۱/۹۸	۱/۷۵
فاز c	۱/۴۴	۱/۶۳	۱/۸۹	۱/۷۳

با مقایسه جداول (۲) و (۷) در میابیم که آمدن برقیگیرها بر کاهش اضافه ولتاژ اثر دارد. همانطور که اضافه ولتاژها در حالت (۲) بیش از حالت (۱) است. اضافه ولتاژها در حالت (۷) نیز بیش از حالت (۶) است.

ح: حالت شماره (۸)

در این حالت با توجه به شکل (۱) داریم:

$$AB = CD = 43 \text{ km (خط هوایی)} \quad BC = 4 \text{ km (کابل)}$$

در اینحالت در نقطه D (انتهای مسیر) برقیگیر ZnO نصب شده است. نتایج مربوط به این حالت در جدول (۸) آمده است.

جدول (۸): نتایج مربوط به حالت (۸)

	A	B	C	D
فاز a	۱/۰۹	۱/۷۵	۱/۷۵	۱/۶۱
فاز b	۱/۰۸۵	۱/۶	۱/۶۱	۱/۵۴
فاز c	۱/۰۹	۱/۸۶	۱/۸۸	۱/۶۸

مشاهده می‌شود که اضافه ولتاژها در انتهای مسیر از حالت (۷) کمتر است و دلیل آن دور شدن کابل از منبع است.

ط: حالت شماره (۹)

در این حالت با توجه به شکل (۱) داریم:

$$CD = 4 \text{ km (کابل)} \quad AB = BC = 43 \text{ km (خط هوایی)}$$

در این حالت در ابتدای کابل (نقطه C) برآیند ZnO نصب شده است و نتایج مربوطه در جدول (۹) آمده است.

جدول (۹): نتایج مربوط به حالت (۹)

	A	B	C	D
فاز a	۱/۰۹	۱/۵۱	۱/۶۶	۱/۶۷
فاز b	۱/۰۸	۱/۴	۱/۵۹	۱/۶
فاز c	۱/۰۵	۱/۵	۱/۷۳	۱/۷۳

با مقایسه جداول (۹) و (۴) در میابیم که اضافه ولتاژها کمتر شده و مشترکین کمتر آسیب می‌بینند. لذا نصب برآیند در اتصال (Junction) کابل و خطوط هوایی توصیه می‌شود.

۴- نتیجه گیری

در این مقاله با استفاده از برنامه EMTP حالات مختلفی از اضافه ولتاژهای ناشی از برآیند کردن خطوط 20 kv هوایی و زمینی را مورد مطالعه قرار داده و نحوه کاهش آن را توسط برآیندها ذکر نمودیم. مسأله زمین کردن Sheath کابل و ولتاژ القایی در آن نیز مورد توجه قرار گرفت تا از صدمه به عایق بیرونی کابل پرهیز شود. این مطالعه با توجه به قطعی‌های مکرر در شبکه‌های توزیع کشور از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و دید نسبتاً جامعی به مهندسين طراح و بهره‌بردار خواهد داد. در این مطالعه از اثر اشباع ترانسفورماتور پست تغذیه (پست $63/20$) و ترانسفورماتور پست $20/380$ صرف نظر شده است. شاید مطالعه بعدی همانا مطالعه دقیق سیستم در شرایط غیر خطی باشد.

مراجع:

- [1]. EMTP, "Revised Rule Book", Version 1. Electric power Research Institute, Palo Alto, Calif, 1986.

- [2]. J. Marti, "Accurate Modelling of Frequency Dependent Transmission lines in Electromagnetic Transient Simulation", *IEEE Trans on power Apparatus and systems*, Vol- PAS- 101, NO. 1. 1982.

[۳]. کتاب اصول مهندسی فشارقوی تألیف دکتر محمد قلی محمدی

[۴]. کتاب فیزیک و تکنولوژی عایقهای الکتریکی تألیف دکتر محمد قلی محمدی

[۵]. کتاب تکنولوژی فشارقوی تألیف دکتر محمد قلی محمدی