

## تخمین اضافه‌ولتاژهای کلیدزنی در خطوط انتقال با استفاده از روش عصبی- فازی

رضا شریعتی‌نسب<sup>۱</sup>، محسن عکافی مبارکه<sup>۲</sup> و محسن فرشاد<sup>۳</sup>

۱- استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه بیرجند- بیرجند- ایران

Shariatinasab@birjand.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه بیرجند- بیرجند- ایران

Mohsen.Akafi@yahoo.com

۳- استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه بیرجند- بیرجند- ایران

Moh\_farshad@yahoo.com

**چکیده:** یکی از علل اصلی قطعی خطوط انتقال، بویژه برای سطوح ولتاژ بالاتر از ۳۴۵ kV، شکست عایقی ناشی از اضافه‌ولتاژهای کلیدزنی است. بنابراین، بررسی این اضافه‌ولتاژها برای حفاظت خطوط انتقال ضروری است. با توجه به ماهیت آماری برخی عوامل، معمولاً مطالعه ریسک عایقی کلیدزنی به صورت آماری و با انجام تعداد زیادی شبیه‌سازی حالت گذرا انجام می‌شود. همچنین، با اضافه‌شدن تجهیز حفاظتی برقگیر، توزیع ولتاژ در کلیه نقاط به هم ریخته است و باید تمامی شبیه‌سازی‌ها به‌ازای هر محل استقرار جدید مجدداً تکرار شود که فرایندی پیچیده و زمانبر است. در این مقاله یک شبکه هوشمند فازی پیشنهاد شده که قادر است در مرحله طراحی با دریافت اطلاعات ساختاری خطوط شبکه، مقدار ریسک عایقی، تعداد قطعی و محل وقوع بیشترین اضافه ولتاژ در شبکه را تعیین کند. این شبکه هوشمند می‌تواند مستقیماً برای تعیین استقامت عایقی خط و تعیین نقاط بحرانی خط که بهترین کاندید برای نصب برقگیر هستند، استفاده شود. همچنین، به طور غیرمستقیم می‌تواند برای تعیین محل بهینه برقگیر در شبکه قدرت به کار رود. شبکه هوشمند طراحی شده در مرحله بهره‌برداری نیز می‌تواند برای مشخص کردن ترتیب اولویت برقرار کردن خطوط مختلف پست، به منظور وارد شدن کمترین تنش عایقی به خطوط استفاده شود.

**واژه‌های کلیدی:** اضافه‌ولتاژ کلیدزنی، برقگیر، سیستم هوشمند عصبی- فازی، هماهنگی عایقی.

### ۱- مقدمه

برق، به خود تجهیزات شبکه نیز ممکن است آسیب برساند. لذا محاسبه این اضافه‌ولتاژها به منظور بهبود طراحی عایقی شبکه، می‌تواند علاوه بر افزایش قابلیت اطمینان، صرفه‌جویی در هزینه‌های ناشی از خرابی شبکه را نیز موجب گردد.

مطالعه و شبیه‌سازی کلیدزنی برای دستیابی به هماهنگی عایقی مناسب در مرحله طراحی و یا بهره‌برداری به دانش بالایی در حوزه حالت‌های گذرا نیاز دارد. انجام چنین مطالعاتی با توجه به گستردگی‌های شبکه قدرت در مرحله طراحی، پیچیدگی‌هایی را به دنبال دارد. مطالعات کلیدزنی

جابه‌جایی سهم عمده انرژی الکتریکی از طریق خطوط انتقال، مؤید این مهم است که حفاظت شبکه انتقال نقش مهمی را برای حضور انرژی الکتریکی بدون وقفه ایفا می‌کند. اضافه ولتاژهای ناشی از کلیدزنی، علاوه بر قطعی

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۱/۰۷/۱۷

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۱/۱۱/۰۹

نام نویسنده مسؤول : رضا شریعتی‌نسب

نشانی نویسنده مسؤول: بیرجند - بلوار شهید آوینی - دانشگاه بیرجند -

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

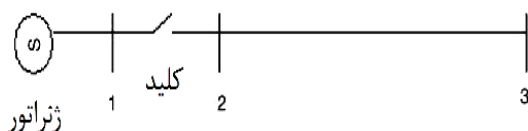
شده است. ورودی شبکه عصبی ارائه شده در این مرجع محدود به اطلاعات ساختاری شبکه و محل استقرار برقی است؛ در حالی که عوامل مهم دیگر مانند پروفیل ارتفاع خط و سطح استقامت عایقی شبکه در نظر گرفته نمی‌شوند. با توجه به قرارگیری قسمتی از شبکه انتقال مرجع [۵] در مناطق کوهستانی و متغیر بودن ارتفاع از سطح دریا، کاربرد شبکه عصبی پیشنهاد شده در بهینه‌سازی عملاً با محدودیت مواجه است.

هدف از این مقاله، تعریف یک سیستم هوشمند جامع برای پیش‌بینی مکان و مقدار ماکزیمم اضافه‌ولتاژ کلیدزنی و تعیین SSFOR ناشی از آن با استفاده از اطلاعات ساختاری خط برای هر شبکه است که در آن پروفیل ارتفاع خط (تغییرات ارتفاع دکل‌های خط از سطح دریا) نیز در نظر گرفته شده است. به این ترتیب، می‌توان با استفاده از شبکه هوشمند آموزش داده شده در مرحله طراحی مقدار مطلوب استقامت عایقی خط در نقاط مختلف شبکه را تعیین نمود. همچنین، با این شبکه هوشمند می‌توان در مرحله بهره‌برداری ترتیب برق‌دار کردن خطوط پست‌های فشارقوی شبکه را مشخص کرد. این شبکه هوشمند می‌تواند به طور غیرمستقیم در مسائل بهینه‌سازی شبکه برای تعیین محل بهینه برقی و مقدار استقامت عایقی نیز استفاده شود. سیستم هوشمند پیشنهاد شده در این مقاله یک شبکه عصبی-فازی (ANFIS<sup>۱</sup>) است که قابلیت آموزش سریع برای تعداد زیاد اطلاعات ورودی-خروجی را داراست.

## ۲- پارامترهای مؤثر بر دامنه تنش‌های

### کلیدزنی

برای بررسی عوامل مؤثر بر دامنه اضافه ولتاژها، یک شبکه ساده سه باسه مطابق شکل (۱) در نرم‌افزار EMTD/ATP مدل‌سازی شده است.



شکل (۱): سیستم ۳ باسه مورد مطالعه

در مرحله بهره‌برداری با توجه به توسعه شبکه و اهمیت ترتیب برق‌دار کردن خطوط به منظور اطمینان اپراتور از قرارگیری مقدار اضافه‌ولتاژها در زیر مقدار مجاز آن، ضرورت می‌یابد. با وجود این، انجام مطالعات حالت گذرا در محدوده زمانی بهره‌برداری امکان‌پذیر نیست.

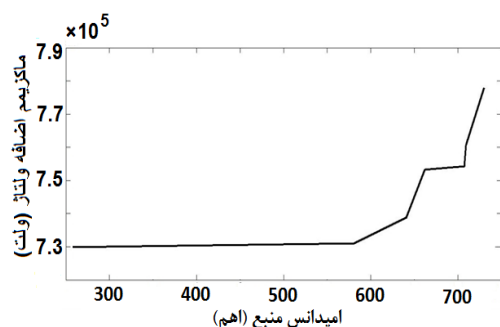
تعیین یک شبکه هوشمند که بتواند با دریافت اطلاعات ساختاری شبکه مقدار ریسک عایقی و ماکزیمم اضافه‌ولتاژ کلیدزنی را پیش‌بینی کند، راه حل بسیار مؤثری در جهت کاهش وقت و هزینه برای طراح در مرحله طراحی و شرکت‌های برق منطقه‌ای در مرحله بهره‌برداری خواهد بود.

مراجع [۳]، [۴] و [۵] مطالعاتی را با استفاده از شبکه عصبی در این زمینه انجام داده‌اند؛ اما این مطالعات یا محدود به یک سیستم مطالعاتی خاص می‌شوند و یا خروجی شبکه‌های هوشمند تعریف شده کاربردی نیست.

در مرجع [۳] ابتدا عوامل مؤثر بر دامنه اضافه‌ولتاژهای کلیدزنی از نظر کمی بررسی شده است. سپس با تأمین اطلاعات ورودی-خروجی یک سیستم ساده سه باسه، یک شبکه عصبی آموزش داده شده است. هدف از طراحی شبکه عصبی، تنها پیش‌بینی مقدار ماکزیمم اضافه ولتاژ کلیدزنی است. در این مرجع، بار به دام افتاده لحاظ نشده است. علاوه بر این، خروجی این شبکه عصبی برای طراحی عایقی کاربرد ندارد، زیرا مکان اضافه ولتاژ ماکزیمم و ریسک عایقی کلیدزنی نامشخص است.

در مرجع [۴] در ابتدا تأثیر پارامترهای مختلف شبکه بر مدت زمان و مقدار اضافه‌ولتاژهای کلیدزنی در یک سیستم مورد مطالعه ساده دو باسه بررسی شده است. در نهایت، دامنه و مدت زمان اضافه‌ولتاژهای کلیدزنی پس از بازیابی شبکه (برای مثال، پس از وقوع خاموشی سراسری<sup>۱</sup>) با استفاده از شبکه عصبی پیش‌بینی شده است. خروجی این تحقیق در مرحله بهره‌برداری استفاده می‌شود و اپراتور صرفاً می‌تواند از قرارگیری دامنه اضافه‌ولتاژ کلیدزنی در محدوده مجاز اطمینان حاصل کند.

در مرجع [۵] ابتدا روابط موجود برای محاسبه ریسک عایقی<sup>۲</sup> و نرخ خرابی‌های ناشی از کلیدزنی (SSFOR) بررسی شده است. سپس یک شبکه عصبی برای پیش‌بینی ریسک عایقی متناسب با محل قرارگیری برقی پیشنهاد



شکل (۳): تغییر ماکزیمم اضافه‌ولتاژ کلیدزنی خط برحسب

امپدانس منبع (طول خط ۴۰۰ km، امپدانس خط برابر ۶۰۰ اهم)

در رابطه با تاثیر ماهیت منبع نیز می‌توان گفت، هنگامی که خط از ترانسفورماتور موجود در پست تغذیه شود، ماهیت منبع سلفی خالص خواهد بود؛ اما زمانی که خط از طریق خطوط دیگر موجود در پست تغذیه شود، ماهیت منبع، سلفی مقاومتی است. در صورت سلفی مقاومتی بودن منبع، اضافه‌ولتاژ کلیدزنی نسبت به حالت سلفی خالص به علت ماهیت میراکنندگی منبع، در حدود ۱۰٪ تا ۱۵٪ کمتر خواهد بود [۶]. در این مقاله فرض بر این است که خط از ترانسفورماتور موجود در پست تغذیه می‌شود.

## ۲-۲- پارامترهای آماری مؤثر

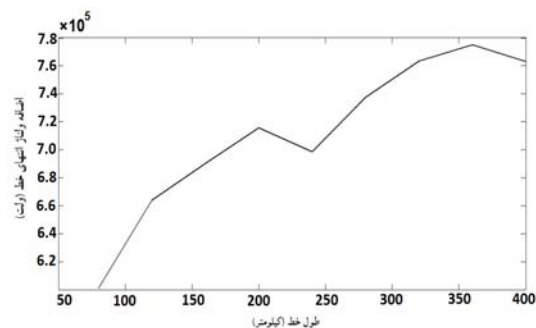
- ولتاژ دو سر کلید در لحظه وصل
- تخلیه کرونا

هرچه مقدار ولتاژ دو سر کلید در لحظه وصل بیشتر باشد، مقدار اضافه ولتاژ بیشتر خواهد بود. ولتاژ سمت منبع برابر ولتاژ لحظه وصل است. ولتاژ سمت دیگر کلید هم به مقدار بار به دام افتاده در خط بستگی داشته، مقدار آن کاملاً تصادفی است. برای اعمال تأثیر ولتاژ دو سر کلید در شبیه‌سازی، از شبیه‌سازی کلیدزنی آماری استفاده می‌شود که جزئیات آن در قسمت بعد بررسی خواهد شد. پارامتر تخلیه کرونا تأثیر چندانی بر روی اضافه‌ولتاژ کلیدزنی نداشته، در این مقاله از آن صرف نظر می‌شود [۶].

دامنه و شکل موج اضافه‌ولتاژهای کلیدزنی به ساختار و پارامترهای سیستم وابسته‌اند. علاوه بر این، حتی با فرض ساختار سیستم یکسان، اضافه‌ولتاژهای کلیدزنی وابسته به تعدادی پارامترهای تصادفی نیز هستند؛ لذا پارامترهای مؤثر بر اضافه‌ولتاژهای کلیدزنی به دو دسته عمده قابل تقسیم‌بندی است: پارامترهای قطعی مؤثر و پارامترهای آماری مؤثر.

## ۲-۱- پارامترهای قطعی مؤثر

این پارامترها به ساختار شبکه بستگی داشته، عبارتند از [۶]: طول خط، امپدانس منبع و ماهیت منبع از نظر سلفی خالص یا سلفی مقاومتی بودن. مهمترین پارامتر قطعی مؤثر در اضافه‌ولتاژهای کلیدزنی، طول خط است که تأثیر آن در شکل (۲) نشان داده شده است. در این شکل ماکزیمم اضافه‌ولتاژ کلیدزنی برای هر طول بازای ۱۰۰ بار کلیدزنی آماری به دست آمده است.



شکل (۲): تغییر ماکزیمم اضافه‌ولتاژ کلیدزنی برحسب طول

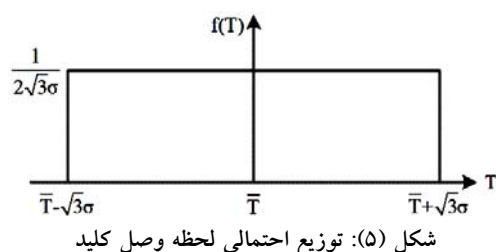
خط (امپدانس منبع ۸/۵ اهم)

پارامتر مؤثر دیگر اندازه امپدانس تونن پست تغذیه‌کننده خط است که تأثیر آن در شکل (۳) نشان داده شده است. برای سطوح اتصال کوتاه کمتر از مقدار امپدانس موجی خط ( $SIL^0$ )، امپدانس منبع تأثیر زیادی ندارد، اما برای سطوح بیشتر از  $SIL$ ، مقدار اضافه‌ولتاژ با افزایش امپدانس منبع افزایش می‌یابد [۶].

#### ۴- خطر بروز شکست عایقی

به واسطه اینکه علاوه بر پارامترهای قطعی، تعدادی پارامتر تصادفی نیز بر دامنه اضافه ولتاژهای کلیدزنی مؤثر هستند، باید معیار مورد استفاده برای بررسی مسأله ماهیت آماری داشته باشد. به علت آنکه تابع توزیع آماری اضافه ولتاژهای کلیدزنی نامشخص است، برای تعیین توزیع اضافه ولتاژهای کلیدزنی از قابلیت کلیدزنی آماری نرم افزار EMTP/ATP استفاده شده است.

کلیدزنی آماری با تغییر زاویه ولتاژ کلیدزنی که معادل تغییر دامنه منبع در لحظه وصل است، انجام می شود. برای به دست آوردن تابع توزیع احتمال اضافه ولتاژها، باید کلیدها در زمانهای تصادفی زده شوند. لذا زمان وصل یک کلید، به شکل آماری خواهد بود. توزیع احتمالی لحظه وصل کلیدزنی، مطابق شکل (۵)، می تواند به صورت یکنواخت حول یک مقدار متوسط  $T$  توزیع شده باشد [۱]. معمولاً بین ۱۰۰ تا ۲۰۰ زمان مختلف برای لحظه وصل کلید در نظر گرفته می شود که این زمانها به شکل تصادفی حول مقدار متوسط  $T$ ، شکل (۵)، انتخاب می شوند.



پس از انجام ۱۰۰ بار کلیدزنی آماری، مقدار متوسط و انحراف معیار تنش های کلیدزنی و یا به عبارت دیگر، توزیع آماری اضافه ولتاژهای کلیدزنی،  $f_0(V)$  مشخص می گردد. اگر احتمال تخلیه الکتریکی در عایق به وسیله تابع احتمال  $P(V)$  بیان شود:

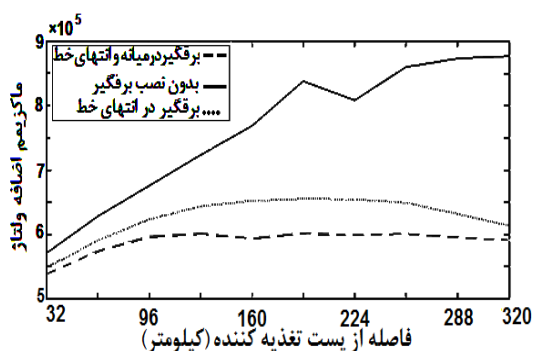
$$P(V) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^V \exp\left[-\frac{(V - V_{50\%})^2}{2\sigma^2}\right] dV \quad (1)$$

که در آن  $V_{50\%}$  برابر ولتاژ تخلیه بحرانی عایق یا CFO<sup>v</sup> است. معمولاً سطح استقامت عایق را با پارامتر دیگری با عنوان BSL<sup>A</sup> نشان می دهند که عبارت است از مقدار ولتاژی که عایق با احتمال ۹۰٪ دچار اتصال کوتاه

#### ۳- ادوات حفاظتی در مقابل اضافه ولتاژهای

##### کلیدزنی

بهترین امان حفاظتی برای محدود کردن اضافه ولتاژهای گذرا برقگیر اکسیدروی<sup>۲</sup> است. اصولاً نصب برقگیر در محل پست برای حفاظت تجهیزات گران قیمت پست انجام می گیرد. از طرفی، در خطوط انتقال، نصب برقگیر در طول خط، به ویژه در نقاط انتهایی آن، به منظور محدود کردن ماکزیمم اضافه ولتاژ کلیدزنی ضروری است. نکته قابل توجه این است که با نصب برقگیر، در اثر جابه جایی پروفیل اضافه ولتاژ خط، محل وقوع ماکزیمم اضافه ولتاژ از محل نصب به نقاطی در طول خط که قبل از نصب برقگیر دچار ماکزیمم اضافه ولتاژ نبوده، منتقل می شود. شکل (۴) پروفیل ولتاژ در طول خط را قبل و بعد از نصب برقگیر در طول خط نشان می دهد. همان طور که مشخص است، پس از نصب برقگیر، مقدار ماکزیمم اضافه ولتاژ و محل وقوع آن در طول خط تغییر کرده است.



شکل (۴): جابجایی محل وقوع ماکزیمم اضافه ولتاژ با نصب برقگیر

بنابراین، باید اولاً نقاط بحرانی از نظر اضافه ولتاژهای کلیدزنی شناسایی شود و سپس طراحی بهینه به منظور تغییر استقامت عایقی و یا نصب برقگیر در این نقاط انجام گیرد. نقاط بحرانی نقاطی هستند که با توجه به ارتفاع آنها از سطح دریا، استقامت عایقی زنجیره مقرر در آنها نسبت به سایر نواحی کمتر بوده و یا بیشترین مقدار اضافه ولتاژ در این نقاط اتفاق می افتد. به منظور تعیین نقاط بحرانی از معیار ریسک عایقی کلیدزنی استفاده می شود که در ادامه توضیح داده شده است.

عایقی خطوط در آن شبکه مشخص شوند. برای تعیین ریسک عایقی هر خط، خط مورد نظر قطعه‌بندی می‌شود؛ به این صورت که مجموع دکل‌های هم ارتفاع به صورت یک قطعه در نظر گرفته می‌شوند. لذا با شروع از محل پست، خط مورد نظر متناسب با تغییر ارتفاع به قسمت‌های مختلف تقسیم و *SSFOR* هر ناحیه به صورت جداگانه و با استفاده از رابطه (۳) محاسبه می‌گردد. به این ترتیب، تعداد قطعی سالانه هر خط به دست خواهد آمد. پس از آن ریسک کلی شبکه با استفاده از رابطه (۵) قابل محاسبه است.

#### ۵- بررسی تأثیر پروفیل ارتفاع بر روی عایق

با تغییر فشار اتمسفر، مقدار *CFO* عایق تغییر می‌کند که این تغییر بر اثر تغییر ارتفاع دکل از سطح دریاست. بدین ترتیب *CFO* با یک ضریب به شکل زیر اصلاح می‌شود:

$$CFO_n = \delta \cdot CFO_s \quad \text{and} \quad \delta = e^{(-A/8.15)} \quad (6)$$

که  $CFO_s$  و  $CFO_n$ ، به ترتیب *CFO* در شرایط غیر استاندارد و استاندارد بوده و  $A$  (km) ارتفاع دکل از سطح دریاست [۷].

#### ۶- هزینه‌های اقتصادی قطعی خط

هدف از بررسی تنش‌های ولتاژی و هماهنگی عایقی در شبکه، تعیین ریسک عایقی به منظور بررسی هزینه‌های اقتصادی ناشی از بروز قطعی در شبکه است. لذا تعیین مقدار هزینه مترتب بر خاموشی خطوط، به ویژه در مسایل بهینه‌سازی حایز اهمیت است. به این منظور می‌توان هزینه ناشی از قطعی خط را به صورت معادله زیر محاسبه نمود:

$$Cost = (SSFOR \times P_0 (C_{NPC} + C_{NEC} \cdot T_d)) / 100 \quad (7)$$

که  $P_0$  توان انتقالی خط،  $T_d$  متوسط مدت زمان قطعی،  $C_{NPC}$  متوسط هزینه سالانه توان تحویل داده نشده توسط برق منطقه‌ای و  $C_{NEC}$  متوسط هزینه سالانه انرژی تحویل داده نشده است. با توجه به اینکه *SSFOR* تعداد قطعی‌ها به ازای ۱۰۰ بار کلیدزنی آماری است؛ لذا برای به دست آوردن هزینه قطعی ناشی از یک بار کلیدزنی، رابطه (۷) بر ۱۰۰ تقسیم شده است. در این مقاله  $C_{NPC}$  و  $C_{NEC}$  به

نمی‌شود [۷]. دو پارامتر *CFO* و *BSL* با هم رابطه‌ای به صورت زیر دارند:

$$BSL = CFO (1 - 1.28 \frac{\sigma}{CFO}) \quad (2)$$

برای راحتی به  $\sigma / CFO$  سیگما می‌گویند و در این مقاله برابر ۰/۰۵ در نظر گرفته شده است [۷].

اکنون خطر شکست عایقی یک المان از شبکه بر اثر تنش کلیدزنی با در نظر گرفتن توزیع استقامت عایقی و تابع احتمال خطا به دست می‌آید [۷]:

$$SSFOR = \frac{1}{2} \int_{E_0}^{E_m} \left[ 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i) \right] \cdot f_s(V) \cdot d(V) \quad (3)$$

که در آن  $E_0$  و  $E_m$  به ترتیب کمترین و بیشترین مقدار اضافه‌ولتاژ در شبکه است.  $P_i$  احتمال وقوع شکست عایقی در دکل  $i$ ام به ازای یک اضافه‌ولتاژ کلیدزنی مشخص،  $f_s(V)$  تابع چگالی احتمال وقوع اضافه‌ولتاژ در انتهای مدار باز خط و  $n$  تعداد دکل‌های خط است. اگر پروفیل ولتاژ در طول خط انتقال به صورت خطی فرض شود، آنگاه تمام  $P_i$  ها برابر خواهند بود. اگر در هر عمل کلیدزنی، تنها بیشترین مقدار اضافه‌ولتاژ بین سه فاز ذخیره گردد، احتمال وقوع شکست در هر دکل،  $P(F)$ ، به شکل زیر قابل تعریف است:

$$P(F) = 1 - (1 - P(A)) \quad (4)$$

که  $P(A)$  احتمال وقوع شکست ناشی از ماکزیمم اضافه‌ولتاژ بین سه فاز است.

همان‌طور که در معادله (۳) دیده می‌شود، ریسک عایقی ماهیت آماری داشته و از طرفی ریسک عایقی تمام دکل‌ها بر ریسک عایقی خط تأثیرگذار است. در نهایت، ریسک کلی شبکه از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$R_{Global} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N SSFOR_i \quad (5)$$

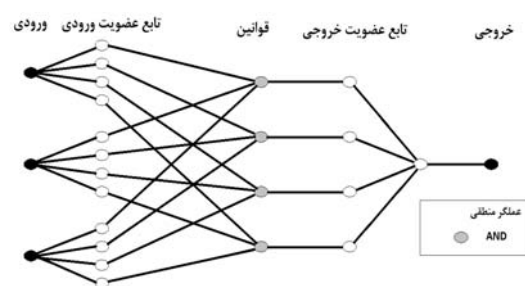
که  $R_{Global}$  نرخ شکست عایقی شبکه بر اثر عمل کلیدزنی،  $SSFOR_i$  نرخ شکست عایقی خط  $i$ ام و  $N$  تعداد خطوط شبکه است. در فرآیند جایابی برقی کمیته کردن  $R_{Global}$  می‌تواند به عنوان تابع هدف استفاده شود.

برای محاسبه ریسک کلی شبکه، نخست باید ریسک

ترتیب برابر  $0.675 \$/Kw$  و  $2/107 \$/Kwh$  است [۸].

## ۷- سیستم عصبی-فازی (ANFIS)

سیستم ANFIS که در سال ۱۹۹۳ توسط ژانگ [۹] ارائه شد، در واقع یک سیستم فازی در قالب یک شبکه تطبیقی است. شبکه ANFIS می‌تواند نگاهی و ورودی-خروجی سیستمی را با استفاده از قوانین فازی و حتی جفت ورودی-خروجی (داده‌های از پیش تعیین شده) در قالب سیستم فازی به دست آورد. مدل فازی به کار برده شده در ANFIS مدل سوگنو<sup>۱</sup> است که برای آموزش قوانین و تشکیل سیستم فازی به طور عددی بسیار مناسب است. در سیستم‌های فازی سوگنو قسمت آنگاه قوانین، ترکیب خطی از متغیرهای زبانی است که با ضرایب ثابتی با هم جمع می‌شوند و توابع عضویت نیز دارای پارامترهایی است که باید تعیین شوند. با این اوصاف، برای آموزش و ساختن سیستم فازی بر اساس اینکه کدام دسته پارامترها (پارامترهای قسمت آنگاه قوانین و یا پارامترهای توابع عضویت) را فرض کرده و کدام دسته را برای حداقل سازی خطای آموزش داده شوند، دو روش وجود خواهد داشت. سیستم عصبی آموزش دهنده شبکه فازی همانند دیگر انواع شبکه‌های عصبی دارای ساختار نرونی است که مطابق شکل (۶) است.



شکل (۶): آرایش ANFIS با سه تابع عضویت ورودی

در سیستم عصبی-فازی تعداد لایه‌ها ثابت است و تعداد نرون‌ها به تعداد قوانین و ورودی‌ها بستگی دارد. لایه اول مربوط به ورودی‌هاست. لایه دوم مربوط به توابع عضویت ورودی است که معمولاً در الگوریتم‌های خوشه‌بندی از تابع عضویت گوسی استفاده می‌شود.

پارامترهای تابع عضویت با توجه به دسته‌های ورودی-خروجی توسط شبکه عصبی تعیین می‌گردد. لایه سوم مربوط به قوانین بوده، اصولاً از عملگر "AND" استفاده می‌شود. تعریف وزن‌های اتصالات نیز بر عهده شبکه عصبی است. لایه چهارم توابع عضویت خروجی را شامل شده و در سیستم سوگنو به شکل توابع خطی متشکل از ورودی‌هاست و پارامترهای آن نیز توسط شبکه عصبی تعیین می‌شود.

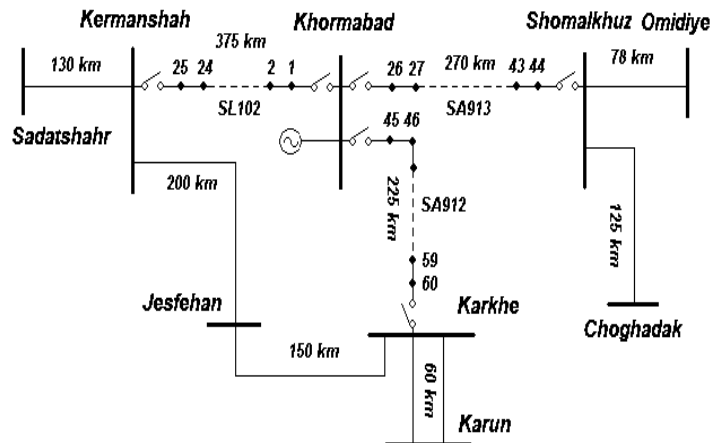
## ۸- آماده‌سازی اطلاعات ورودی-خروجی

### برای آموزش شبکه هوشمند

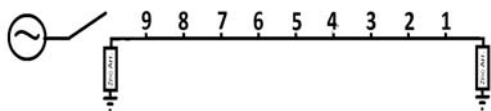
مقوله کلیدزنی در شبکه انتقال غالباً ماهیتی پیوسته دارد. به بیان دیگر، برخلاف مسائل حفاظتی مربوط به صاعقه که غالباً چند دکل محدود در مجاور دکل مورد اصابت صاعقه بررسی می‌شوند، در کلیدزنی کلیه دکل‌های خط باید بررسی شوند [۱۰].

از طرف دیگر، آرایش شبکه‌های هوشمند به گونه‌ای است که برای آموزش آنها باید اطلاعات ورودی-خروجی به صورت گسسته پیکربندی شده باشند. بنابراین، برای بررسی مسأله کلیدزنی دو راه حل وجود دارد: اول اینکه اطلاعات تمام دکل‌های خط برای آموزش استفاده شوند که با توجه به تعداد زیاد اطلاعات، امری ناممکن است. دوم اینکه اطلاعات خط به شکل هوشمندانه به صورت گسسته وارد شوند؛ به طوری که کلیه اطلاعات مهم خط را شامل گردد.

در ادامه، ایده مورد استفاده در این مقاله به منظور آماده‌سازی اطلاعات خط بررسی خواهد شد. هدف این است که شبکه آموزش دیده اولاً تمام اطلاعات مهم یک خط را شامل شده و ثانیاً برای هر خط دیگر قابل استفاده باشد. برای جمع‌آوری اطلاعات لازم برای آموزش شبکه ANFIS، یک قسمت از شبکه برق باختر، شکل (۷)، انتخاب شده است که از سه خط هوایی SA912، SL102 و SA913 و یک نیروگاه واقع در پست خرم‌آباد تشکیل شده است.



شکل (۷): شبکه مورد مطالعه



شکل (۸): نقاط کاندید برای یک خط نمونه

### ۸-۱- قسمت بندی کردن خط

مهمترین پارامتر مؤثر بر دامنه اضافه ولتاژهای کلیدزنی، طول خط است [۲]. در نتیجه یکی از ورودی‌های شبکه هوشمند طول خط خواهد بود. طول خطوط فوق فشارقوی در ایران بین ۴۰ km تا ۴۰۰ km است، بنابراین، در این مقاله همین محدوده طول در نظر گرفته شده است.

در امتداد خط انتقال، امکان تغییر پروفیل ارتفاع وجود دارد و با افزایش ارتفاع استقامت عایقی آن قسمت از خط ضعیف شده و نیاز به قرار دادن برقگیر در آن ناحیه احساس می‌شود. بنابراین، قسمت بندی کردن خط با این هدف انجام می‌گیرد که بتوان ریسک نقاط کاندید را برای نصب برقگیر که عموماً نقاط انتهایی و نقاط مرتفع هستند، جمع‌آوری کرده و برای آموزش شبکه هوشمند استفاده کرد. لذا تعداد قسمت‌ها و طول هر قسمت با توجه به پروفیل ارتفاع تعیین می‌شود. در این مقاله ۱۰ پروفیل ارتفاع مختلف برای خط در نظر گرفته شده و لذا خط به ۱۰ قسمت با طول مساوی تقسیم می‌شود.

از آنجا که معمولاً در محل پست ابتدا و انتهای خط برقگیر نصب می‌گردد، لذا برای کاهش ریسک عایقی تنها ۹ نقطه کاندید برای نصب برقگیر وجود دارد. این نقاط نسبت به انتهای خط که بیشترین اضافه ولتاژ را داراست، مشخص می‌گردند. به این ترتیب، نقاط کاندید مطابق شکل ۸ نسبت به انتهای خط از نقطه اول تا نقطه نهم مشخص می‌گردند.

### ۸-۲- روش اعمال اطلاعات امیدانس پشت منبع

برای محاسبه مقادیر امیدانس پشت منبع به محاسبات اتصال کوتاه و داشتن تمامی اطلاعات شبکه نیاز است، اما با توجه به اینکه مدار معادل تونن پشت منبع به امیدانس خطوط تغذیه‌کننده پشت بستگی دارد، با معلوم بودن امیدانس واحد طول خطوط تغذیه‌کننده پشت، می‌توان با تغییر طول خطوط، مقادیر مختلف مدار معادل پشت منبع کلیدزنی را محاسبه نمود. مطابق شکل (۷) خط SA913 در محل پست، از سه خط دیگر تغذیه می‌شود که با تغییر طول آنها مقادیر متفاوت امیدانس تونن پشت منبع به دست آمده است. جدول (۱) مقادیر محاسبه شده را نشان می‌دهد. همان طور که در ستون ۶ جدول (۱) دیده می‌شود، درصد اندوکتیو منبع برای حالت‌های مختلف بیش از ۹۹٪ است؛ بنابراین، طبق مطالب ذکر شده، خط مورد نظر در محل پست تغذیه‌کننده از ترانسفورماتور تغذیه شده است.

### ۸-۳- قرارگیری محل برقگیر

همان طور که در قسمت ۸-۱ گفته شد، ۹ موقعیت برای نصب برقگیر وجود دارد. در این مقاله فرض می‌شود که ۵ مجموعه برقگیر سه فاز برای نصب در هر خط وجود دارد.

جدول (۱): طول‌های مختلف خطوط تغذیه‌کننده برای تولید امیدانس پشت منبع

حالت‌های مختلف طول	خط اول (کیلومتر)	خط دوم (کیلومتر)	خط سوم (کیلومتر)	مقدار اندوکتیو امیدانس منبع (X/Z)	اندازه امیدانس تونن
۱	۵۳	۲۲۵	۱۲۵	۰/۹۹۱۳	۷/۵۵۲۹
۲	۴۰۰	۲۲۵	۱۲۵	۰/۹۹۲۵	۶/۶۵۸۳
۳	۴۰۰	۱۰	۱۲۵	۰/۹۹۲۱	۵/۷۴
۴	۱۵	۵	۱۰	۰/۹۹۶۴	۳/۶۲۰۹
۵	۴۰۰	۳۵۰	۳۵۰	۰/۹۹۳۶	۱۱/۱۶
۶	۲۰	۳۰	۵۰	۰/۹۹۳۳	۴/۹۷
۷	۳۰	۲۰	۶۰	۰/۹۹۴	۴/۸۲۹
۸	۲۵	۳۵	۱۵	۰/۹۹۴۶	۴/۶۶۵۸
۹	۵۰	۷۵	۱۵۰	۰/۹۹۱۳	۶/۷۱۲۸
۱۰	۲۵	۱۵	۳۵	۰/۹۹۵۹	۴/۱۶۳۴
۱۱	۳۵	۱۵	۱۰	۰/۹۹۶۱	۴/۱۰۲۷
۱۲	۵	۵	۵	۰/۹۹۷۲	۳/۳۷۴۶

کیلومتر و ۱۲ مقدار مختلف امیدانس پشت منبع، جدول (۱)، پیش بینی شده است. لذا تعداد کل پارامترهای ورودی شبکه ANFIS برابر  $(10 \times 12 \times 762) = 91440$  پارامتر است که با در نظر گرفتن مدت زمان ۵ دقیقه برای هر بار شبیه‌سازی آماری، برای جمع آوری داده‌های آموزشی مناسب به ۱۰/۶ ماه زمان نیاز است.

لذا ایده‌ای برای کاهش هوشمندانه تعداد حالات کلیدزنی به دست آمد که در واقع صرف نظر کردن از حالت‌های بلااستفاده است. در بررسی‌های انجام شده این نتیجه حاصل شد که از کل ۹ موقعیت موجود، با نصب برقگیر در سه موقعیت نزدیک به کلید، کمترین کاهش در مقدار ریسک عایقی پدید می‌آید. لذا قرارگیری برقگیر در این دو نقطه به صرف هزینه اضافی منجر شده و باید این دو نقطه از فهرست نقاط کاندید حذف گردند. لذا با وجود ۶ نقطه کاندید، تعداد کل حالت‌های قرارگیری برقگیر از ۷۶۲ حالت به ۶۲ حالت کاهش می‌یابد که در این صورت مدت زمان لازم برای شبیه‌سازی و جمع آوری داده‌های ورودی شبکه ANFIS به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد.

برای کاهش بعد ورودی، حضور برقگیر با عدد ۱ و عدم حضور با عدد صفر مشخص شده است. از تبدیل باینری به دسیمال به عنوان معادلی برای حالت استقرار

عملاً تعداد برقگیرها به میزان بودجه‌ای که برق منطقه‌ای قادر به هزینه کردن آن برای حفاظت شبکه است بستگی دارد. شبکه هوشمند باید قابلیت به کارگیری در فرآیند جایابی بهینه برقگیر را داشته باشد. در این فرآیند نقش شبکه هوشمند پیش‌بینی مقدار ریسک به ازای مشخصات ساختاری خط مورد مطالعه و مکان برقگیر است. بدین ترتیب، در هر تکرار فرآیند جایابی، نقاط کاندید به عنوان جمعیت اولیه توسط یک الگوریتم بهینه‌سازی تولید شده و شبکه هوشمند فازی ریسک خط را پیش‌بینی می‌کند. در نهایت، بهترین حالتی که کمترین مقدار ریسک را به ازای حداقل تعداد برقگیر داشته است مشخص می‌شود.

بنابر مطالب ذکر شده، باید تمامی حالات حضور برقگیر در اطلاعات آموزشی شبکه هوشمند وجود داشته باشد. در هر خط هشت نقطه کاندید برای نصب برقگیر موجود است. از طرفی، بسته به پارامترهای شبکه، استقامت عایقی، طول خط و پروفیل ارتفاع خط امکان استقرار ۱ تا ۵ برقگیر وجود دارد، در نتیجه تعداد تمامی حالت‌های ممکن برای نصب برقگیر در هر خط برابر است با:

$$\binom{9}{1} + \binom{9}{2} + \binom{9}{3} + \binom{9}{4} + \binom{9}{5} = 762$$

از طرفی، برای هر خط ۱۰ طول مختلف از ۴۰ تا ۴۰۰



شماره‌گذاری قسمت‌های مختلف خط از ۱ تا ۱۰ نسبت به انتهای خط انجام شده است. به این ترتیب، برای مثال، منظور از شبکه ۸، هشتمین قسمت از خط نسبت به پست انتهایی است.

مقادیر ماکزیمم اضافه‌ولتاژ، میانگین و انحراف معیار استاندارد اضافه ولتاژها به ازای ۷۴۴۰ بار اجرای برنامه ذخیره شده و نهایتاً ریسک هر قسمت با استفاده از معادله (۳) به دست آمده است. برای محاسبه ریسک، ۶ مقدار CFO در نظر گرفته شده است. بنابراین، مجموعاً  $44640 = 7440 \times 6$  دسته اطلاعات ورودی-خروجی برای هر قسمت خط فراهم شده که برای آموزش هر کدام از ۱۰ شبکه ANFIS به کار رفته است.

جدول (۲): مقادیر CFO غیر استاندارد متناظر با ارتفاع از سطح

دریا و BSL استاندارد

CFO	استاندارد BSL	ارتفاع (km)
۹۰۸/۱۲	۹۵۰	۰/۹۰۷
	۱۰۵۰	۱/۷۲
۱۰۱۵	۱۰۵۰	۰/۸۱۵
	۸۵۰	۴/۳۲
	۹۵۰	۵/۲۳
۵۳۴/۱۹	۱۰۵۰	۶/۰۵
	۸۵۰	۲/۸۴
	۹۵۰	۳/۷۵
۶۴۱/۰۳	۱۰۵۰	۴/۵۶
	۸۵۰	۱/۵۸
	۹۵۰	۲/۴۹
۷۴۷/۸۶	۱۰۵۰	۳/۳

بنابراین، اطلاعات ورودی شبکه ANFIS شامل اطلاعات مربوط به تنش ولتاژی و اطلاعات مربوط به استقامت عایقی است، زیرا مقدار ریسک و دامنه اضافه‌ولتاژهای کلیدزنی در هر نقطه به میزان تنش ولتاژ آن نقطه و استقامت عایقی که به نوبه خود متناظر با ارتفاع است، بستگی دارد. لذا اطلاعات ورودی شبکه ANFIS شامل طول خط، اندازه امپدانس منبع، مکان برقگیر، استقامت عایقی و پروفیل ارتفاع خط است. خروجی شبکه

برقگیر استفاده شده است. برای مثال عدد ۱۷ که در ستون مربوط به حالت برقگیر در جدول آمده است، معادل عدد باینری ۱۰۰۰۱۰ و به این مفهوم است که علاوه بر ابتدا و انتهای خط، در نقطه اول و پنجم نسبت به انتهای خط برقگیر نصب شده است، زیرا اولین و پنجمین عدد از سمت چپ در معدل باینری آن برابر ۱ است.

#### ۸-۴- روش اعمال اطلاعات پروفیل ارتفاع

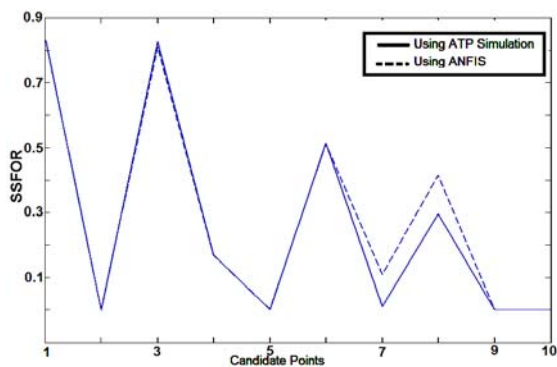
همان طور که قبلاً ذکر شد، یکی از ورودی‌های مورد نیاز برای پیش‌بینی ریسک، پروفیل ارتفاع خط است. می‌توان به جای استفاده از پروفیل ارتفاع به عنوان ورودی شبکه هوشمند، از مقدار CFO غیراستاندارد در هر ارتفاع استفاده کرد، زیرا هر CFO غیراستاندارد با استفاده از (۲) و (۶) معادل سه مقدار استاندارد BSL است که در سه ارتفاع مختلف استفاده شده است. به این ترتیب، در صورت استفاده از شبکه هوشمند در طراحی مناسب سطح عایقی شبکه، به ازای هر CFO امکان انتخاب سه مقدار BSL استاندارد وجود خواهد داشت. جدول (۲)، به عنوان مثال، CFO غیراستاندارد متناظر با BSL استاندارد در چند ارتفاع مختلف از سطح دریا را نشان می‌دهد. در جدول (۲) در سطر اول بدین جهت سه مقدار ارتفاع معادل وجود ندارد، که CFO غیر استاندارد ۹۰۸ از CFO استاندارد مربوط به سطح  $BSL = 850$  کمتر است. برای  $CFO = 1015$  نیز همین دلیل وجود دارد.

#### ۸-۵- اطلاعات ورودی-خروجی

بنابر مطالب ذکر شده، به ازای ۱۰ حالت ارتفاع، ۱۲ حالت امپدانس و ۶۲ حالت حضور برقگیر مجموعاً ۷۴۴۰ شبیه‌سازی حالت گذرا با ۱۰۰ بار کلیدزنی آماری انجام گرفته است. برای انجام شبیه‌سازی، هر خط انتقال به ۱۰ قسمت تقسیم شده و برای هر قسمت یک شبکه ANFIS به صورت جداگانه در نظر گرفته شده است. بنابراین مجموعاً ۱۰ شبکه ANFIS آموزش داده می‌شود.

متر هستند و استقامت عایقی آنها تضعیف نشده است [7]. شبکه هوشمند به منظور جایابی دو دسته برقی بررسی شده است. در جدول (۶) نتایج حاصل از جایابی بهینه برقی با استفاده از شبکه هوشمند فازی و ریسک عایقی حاصله نشان داده شده است. همان طور که در این جدول دیده می‌شود، نتایج شبکه هوشمند در مقایسه با نتایج شبیه‌سازی از دقت بالایی برخوردار است. ریسک حاصل از شبیه‌سازی نرم‌افزاری برای آرایش برقی که توسط شبکه هوشمند پیشنهاد شد، برابر  $1/0.59 \times 10^{-4}$  است که در مقایسه با مقدار  $6/5 \times 10^{-5}$  اختلاف چندانی ندارد. مزیت استفاده از شبکه هوشمند دریافت نتیجه در مدت بسیار کم همراه با دقت بالاست. همچنین، از دیگر مزایای شبکه هوشمند تخمین نقطه بحرانی وقوع اضافه‌ولتاژ است که در شکل ۹ مشخص است. نقطه انتهایی خط با بیشترین مقدار ریسک، نقطه وقوع اضافه‌ولتاژ بحرانی است. در این شکل نیز دقت شبکه هوشمند در تعیین مکان ماکزیمم اضافه‌ولتاژ به روشنی دیده می‌شود که نقطه انتهایی خط محل وقوع بحرانی اضافه‌ولتاژ است.

همان طور که در جدول (۶) مشاهده می‌شود، با چشم‌پوشی از پروفیل ارتفاع، دقت محاسبات اقتصادی برای پیش‌بینی هزینه ناشی از قطعی خط کم خواهد بود. بنابراین برای بررسی اضافه‌ولتاژهای کلیدزنی در نظر گرفتن پروفیل ارتفاع ضروری است.



شکل (۹): مقایسه نتیجه تخمین مکان وقوع ماکزیمم اضافه‌ولتاژ شبکه هوشمند و شبیه‌سازی به وسیله نمایش پروفیل ماکزیمم اضافه‌ولتاژ خط

ANFIS نیز توزیع آماری اضافه ولتاژ و یا به عبارتی مقدار ریسک عایقی در هر کدام از نقاط دهگانه خط است. با پیش‌بینی ریسک عایقی نقاط مختلف خط توسط شبکه ANFIS، نقاط بحرانی نیز تعیین می‌گردند؛ به این ترتیب که هر نقطه با ریسک بالاتر، از نظر حفاظت در برابر تنش‌های ولتاژی نیز مهمتر خواهد بود.

اضافه‌ولتاژهای کلیدزنی متناسب با پارامترهای مختلف شامل طول خط، اندازه امپدانس منبع و مکان برقی با شبیه‌سازی توسط نرم افزار EMT/ATP به دست آمده و سپس با کمک این خروجی‌ها، انتگرال ریسک (۳) در محیط MATLAB محاسبه شده است. به منظور انجام آموزش اطلاعات از جعبه ابزار ANFIS موجود در نرم‌افزار MATLAB استفاده شده است. تعداد قوانین شبکه‌های فازی برابر ۲۰۰ است که برای تولید شبکه فازی از الگوریتم خوشه‌بندی فازی استفاده شده است. تابع عضویت مورد استفاده گوسین است [۹]. بیشترین خطای آموزش نیز ۱۰٪ بوده است. در ضمن، برای تولید توابع عضویت فازی از خوشه‌بندی استفاده شده است. غیرفازی ساز مورد استفاده نیز غیر فازی ساز میانگین وزندار است [۱۱].

در جدول (۴) نمونه‌ای از اطلاعات ورودی-خروجی نمایش داده شده است. در واقع، اطلاعات ده شبکه هوشمند یکسان است و اطلاعات ستون‌های ۱ تا ۴ جدول (۴) نمونه‌ای از آنهاست؛ و تنها خروجی‌شان متفاوت بوده و ریسک است که در ستون‌های ۵ تا ۱۴ جدول (۴) آمده است.

## ۹- مقایسه نتایج برای یک خط انتقال نمونه

به منظور نشان دادن توانایی شبکه هوشمند در پیش‌بینی محل وقوع اضافه‌ولتاژ بحرانی، یک خط ۴۰۰ kV با طول ۳۲۰ کیلومتر، توان ۱۶۶۷ مگاوات،  $BSL=850$  kV و امپدانس پشت منبع ۷/۵۴ اهم در نظر گرفته شده است. پروفیل ارتفاع خط مطابق جدول (۵) است. در جدول (۵) نقاط مشخص شده با خط چین دارای ارتفاع کمتر از ۱۵۴۰



## مراجع

## زیر نویس ها

<sup>1</sup> Global Blackout<sup>2</sup> Insulation Risk<sup>3</sup> Switching Surge Flashover Rate<sup>4</sup> Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System<sup>5</sup> Surge Impedance Loading of Line<sup>6</sup> Zno Surge Arrester<sup>7</sup> Critical Flashover<sup>8</sup> Basic Switching Impulse Insulation Level<sup>9</sup> Sugeno

[ ] سید حسین حسینیان، "تعیین چگالی احتمال اضافه ولتاژهای ناشی از کلیدزنی در کابل‌های فشار قوی با استفاده از نرم‌افزار EMTP"، هشتمین کنفرانس شبکه‌های توزیع نیروی برق، ۱۳۸۲.

[ ] محسن عکافی مبارکه، "تخمین اضافه ولتاژهای کلیدزنی در خطوط انتقال با استفاده از روش فازی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه بیرجند، بیرجند، شهریور ۹۱.

- [3] D. Thukaram, H.P. Khincha, Sulabh Khandelwal, "Estimation of switching transient peak overvoltages during transmission line energization using artificial neural network", *Electr. Power Sys. Res*, 76, pp. 259–269, 2006.
- [4] S.A. Taher, I. Sadeghkhan, "Estimation of magnitude and time duration of temporary overvoltages using ANN in transmission lines during power system restoration", *Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol. 18, pp. 787–805, 2010.
- [5] R. Shariatinasab, B. Vahidi, S.H. Hosseinian, A. Ametani, "Optimization of Surge Arrester's Location on EHV and UHV Power Networks Using Simulation Optimization Method", *IEEE Trans. PE*, Vol.128, No.12, 2008.
- [6] Cigre Working Group, "Switching overvoltages in EHV and UHV systems with special reference to closing and reclosing transmission lines", *Electra* Vol. 30, pp. 70–122, 1973.
- [7] A.R. Hileman: "Insulation coordination for power systems", (*Marcel Dekker Inc., New York*, 1999
- [8] N.A. Katic, M.S. Savic, "Technical and economical optimization of overhead power distribution line lightning protection", *IEE Proc., Gener. Transm. Distrib*, Vol. 145, No. 3, pp. 239–244, 1998
- [9] J.J.R. Jang, "ANFIS: Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System", *IEEE Trans on Sys., Man. and Cybernetics*, Vol. 23, No. 3, 1993.
- [10] R. Shariatinasab, B. Vahidi, S. H. Hosseinian, A. Ametani, "Probabilistic Evaluation of Optimal Location of Surge Arrester on EHV and UHV Networks Due to Switching and Lightning Surges", *IEEE Trans. On Power Delivery*, Vol. 24, No. 4, pp.1903-1911, 2009.
- [11] L.X. Wang: "A Course In Fuzzy Systems and Control", (*Prentice-Hall International, Inc*, 1997).