

طراحی یک الگوریتم مبتنی بر تبدیل موجک و روش ANFIS جهت حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور

احسان هاشم زاده (۱)؛ ناصر پریرز (۲)؛ علی کریم پور (۳)؛ ساناز مسچی (۴)؛

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد: ehsan.hashemzadeh@gmail.com

۲- استادیار دانشگاه فردوسی مشهد: n-pariz@um.ac.ir

۳- استادیار دانشگاه فردوسی مشهد: karimpor@um.ac.ir

۴- کارشناسی ارشد شرکت مدیریت شبکه برق ایران: sanaz.meschi@gmail.com

در این مقاله یک الگوی جدید برای حفاظت ترانسفورماتورهای قدرت بر اساس انرژی سیگنال جریان دیفرانسیل ارائه شده است. نتایج حاصل از شبیه سازی نشان می دهد که با استفاده از این روش می توان انواع خطاهای داخلی را تشخیص داد. همچنین می توان این خطاها را از جریان هجومی مغناطیسی تمایز داد. با بکارگیری شبکه فازی - عصبی در رله پیشنهادی و و بررسی نتایج شبیه سازی، سرعت و دقت این روش نشان داده می شود.

کلمات کلیدی: حفاظت دیفرانسیل، ANFIS، تبدیل موجک، EMTP

۱- مقدمه

عملکرد این رله ها را دچار اغتشاش می کند. برخی از الگوریتم های پیشرفته دیجیتالی نظیر روشهای مبتنی بر سری فوریه و روشهای مبتنی بر تابع تبدیل [۱]، روشهای مبتنی بر تبدیل مودال [۲]، روشهای مبتنی بر توابع ویولت [۳]، روشهای مبتنی بر منطق فازی [۴]، روشهای مبتنی بر شبکه عصبی [۵] و روشهای مبتنی بر شبکه های فازی-عصبی [۶] در حفاظت ترانس ها به کار گرفته شده است. روش معمول برای شناسایی جریان هجومی از جریان خطا استفاده از هارمونیک دوم است.

با این وجود، در ترانسفورماتورهای قدرت با ظرفیت خازنی بالا، خطای داخلی ترانسفورماتور می تواند شامل

ارزش مالی بالای ترانسفورماتور و اهمیت آن در شبکه های قدرت منجر به توسعه روشهای حفاظتی و ارزیه راهکارهایی جهت جلوگیری از آسیب دیدگی ترانسفورماتورها شده است حفاظت از ترانسفورماتورهای قدرت یکی از مسائل چالش برانگیز در رله های حفاظتی است. حفاظت ترانسفورماتورها باید سریع و دقیق باشد. برای این منظور از رله های دیفرانسیل استفاده می گردد. رله دیفرانسیل با مقایسه جریان اولیه و ثانویه، قادر به تشخیص خطاهای داخلی می باشد. عواملی همچون جریان هجومی مغناطیسی، اضافه تحریک، عدم تطابق و اشباع CT ها

$$f(x) = a_0 + a_1\psi(x) + a_2\psi(2x) + a_3\psi(2x-1) +$$

.

.

.

$$+ a_{2^l}\psi(2^l x) + a_{2^l+1}\psi(2^l x-1) + \dots$$

$$+ a_{2^{l+1}-1}\psi(2^l x - 2^l + 1) \quad (4)$$

که در رابطه بالا l شماره سطح و a_i ضرایب مورد نیاز برای تبدیل موجک است. در معادله بالا a_i ها از روابط زیر بدست می آید.

$$a_0 = \int f(x)\phi(x)dx \quad (5)$$

$$a_{2^m+n} = 2^m \int f(x)\psi(2^m x - n)dx \quad (6)$$

در تبدیل موجک، هر سیگنال به تعداد مشخصی سطح تجزیه می گردد که تعداد این سطوح به تعداد نمونه های سیگنال بستگی دارد. اگر یک سیگنال 2^n نمونه داشته باشد می توان آنرا به $n+1$ سطح تجزیه کرد.

هر یک از ضرایب a_i که از تبدیل موجک بدست می آیند بیانگر یک فرکانس خاص و موقعیت مکانی موجک مربوطه اش می باشد. ضریب X در تابع wavelet بیانگر فرکانس و مقدار شیفت آن تابع، بیانگر موقعیت مکانی آن می باشد. شکل (۱) تصویر نقشه آنالیز فرکانسی- زمانی می باشد که هر چهار ضلعی بیانگر یکی از ضرایب a_i می باشد. بزرگی یا کوچکی این ضرایب، نشان دهنده آن است که آن فرکانس دارای چه وزنی است.

۲-۲- انرژی سیگنال

مشابه سری فوریه، با استفاده از اتحاد پارسوال، می توان انرژی سیگنال را برای تبدیل ویولت به صورت زیر تعریف کرد.

$$f(x) = a_0 + \sum_m \sum_n a_{2^m+n} \psi(2^m x - n) \quad (7)$$

بنابراین می توان انرژی سیگنال را با مربع کردن و جمع

هارمونیکهای زوج باشد. به علاوه در ترانسفورماتورهای مدرن و بزرگ میزان هارمونیکهای دوم در جریان هجومی مغناطیسی یک یا دو فاز می تواند نسبتا کوچک باشد [۷].

برای آنالیز یک سیگنال می توان علاوه بر روش فوریه از توابع موجک استفاده نمود. آنالیز فوریه جریانهای ترانسفورماتور، مشخصه های فرکانسی را بدون اینکه موقعیت آنها را در زمان بیان کند، نشان می دهد. در حالیکه روش تجزیه wavelet هم ویژگی های فرکانسی و هم ویژگی های زمانی را نشان می دهد. به همین دلیل روش تابع موجک برای مطالعه سیگنالهای گذرا ایده آل است.

۲- تبدیل موجک

۲-۱- توابع مقیاس و توابع موجک

توابع موجک از مقیاس کردن و انتقال یک تابع پایه که موجک مادر نامیده می شود، ساخته می شود. تابع پایه نیز از طریق توابع مقیاس ساخته می شود. این توابع به شکل زیر تعریف می شود:

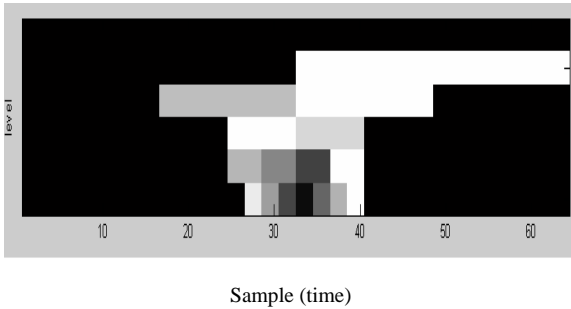
$$\phi(x) = c_0\phi(2x) + c_1\phi(2x-1) + \dots + c_{N-1}\phi(2x-N) \quad (1)$$

$$\phi(x) = \sum_{i=0}^{N-1} c_i \phi(2x - k) \quad (2)$$

که N تعداد ضرایب مورد نیاز و ضرایب c_i نیز از طریق روشهای ریاضی بدست می آید. تابع مقیاس را به روش مستقیم نمی توان بدست آورد و معمولا از تکرار بدست می آید. تابع موجک مادر را با $\psi(x)$ نشان می دهند و با استفاده از تابع مقیاس بدست می آیند.

$$\psi(x) = \sum_{i=0}^{N-1} (-1)^i c_i \phi(2x + k - N + 1) \quad (3)$$

همانطور که در تبدیل فوریه، هر تابع $f(x)$ را می توان با استفاده از توابع سینوس و کسینوس بسط داد. در تبدیل موجک نیز می توان هر تابع را به کمک توابع موجک بسط داد.



شکل ۳: نقشه فرکانسی- زمانی انرژی سیگنال جریان هجومی

۳- شبکه های فازی عصبی تطبیقی (ANFIS)

یک شبکه عصبی می تواند یک سیستم دینامیک را به کمک رابطه غیرخطی در حوزه زمان گسسته مدل کند. حاصل آن یک شبکه با اوزان قابل تنظیم است که پلنت را تخمین می زند. اگرچه این روش دارای مزایای بسیاری از جمله قابلیت انجام محاسبات موازی، پاسخ سریع و ارزان و امکان آموزش سیستم است، اما اطلاعات به صورت غیرشفاف ذخیره می شوند به عبارت دیگر شبکه های عصبی مانند جعبه سیاه عمل می کنند. نتایج آموزش در یک مجموعه (بزرگ) از مقادیر پارامترها گردآوری می شود. به نحوی که تفسیر آنرا تقریباً غیرممکن می سازد. از طرف دیگر قوانین فازی بر مبنای جملات خواندنی اگر آنگاه تشکیل شده اند که تقریباً شبیه زبان طبیعی است اما قوانین و قواعد فازی نمی توانند به خودشان آموزش دهند. با ترکیب آن دو به سیستم های فازی - عصبی دست می یابیم که همزمان می توانیم از قابلیت های آنها یعنی تفسیرپذیری و آموزش بهره ببریم.

۳-۱- ساختار ANFIS

در این قسمت ساختار ANFIS برای یک مدل فازی سوگینو بیان می شود. چنانچه سیستم استنتاج فازی دارای دو ورودی x و y و یک خروجی f باشد، مدل فازی رتبه اول سوگینو یک مجموعه قوانین با دو قانون فازی می تواند به صورت زیر بیان می شود:

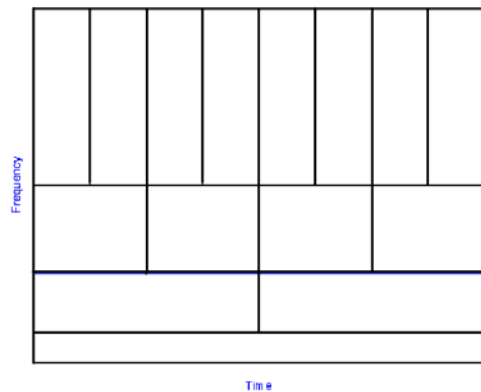
$$\text{If } x \text{ is } A_1 \text{ and } y \text{ is } B_1 \text{ then } f_1 = p_1x + q_1y + r_1$$

کردن تابع در هر طرف بدست آورد:

(۸)

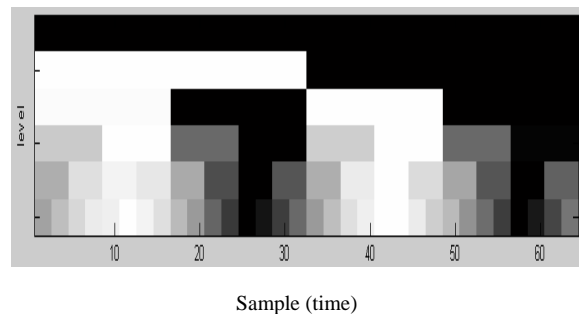
$$\int_0^1 f^2(x) dx = a_0^2 + a_1^2 + 0.5(a_2^2 + a_3^2) + 0.25(a_4^2 + \dots + a_7^2) + 0.125(a_8^2 + \dots + a_{15}^2) + \dots$$

معادله بالا توزیع انرژی سیگنال در حوزه زمان- فرکانس بیان می کند. در نقشه فرکانسی- زمانی هر سطح به 2^l چهار ضلعی تقسیم می شود. انرژی کل سیگنال مجموع مساحت محصور در این سطوح (شکل ۱) است.



شکل ۱: رابطه بین زمان- فرکانس در تبدیل ویولت

شکل (۲ و ۳) انرژی سیگنال را برای جریان خطا و جریان هجومی نشان می دهد. این اشکال نشان می دهد که انرژی جریان هجومی بیشتر در سطوح پایین تر یعنی جز DC و فرکانس پایین متمرکز شده است. علت این امر وجود مولفه DC و بزرگی دامنه هارمونیک های دوم در جریان هجومی است.



شکل ۲: نقشه فرکانسی- زمانی انرژی سیگنال جریان خطا

۴- طراحی الگوریتم حفاظت دیفرانسیل

۴-۱- شبیه سازی سیستم قدرت

برای مدل سازی ترانسفورماتور مورد نظر از نرم افزار EMTP استفاده شده است. ترانسفورماتور مورد مطالعه یک ترانسفورماتور سه فاز با توان نامی ۲۰۰ مگاوات آمپر و با نسبت تبدیل ۴۰۰/۲۳۰ کیلوولت انتخاب شده است که مقادیر امیدانسه‌های اولیه و ثانویه آن مطابق با یکی از نمونه های موجود در خود EMTP اختیار شده اند.

۴-۲- جزئیات شبیه سازی

عملکرد رله دیفرانسیل در سیستم های قدرت بر اساس اصل صفر بودن جمع جبری جریانهای شارشی به یک گره می باشد. در این نوع حفاظت جریان ورودی و خروجی از یکدیگر کم شده و در صورتیکه تفاضل آنها مقداری مخالف صفر باشد، خطا تشخیص داده می شود.

۴-۳- شبیه سازی خطاهای داخلی

شامل خطاهای داخل زون دیفرانسیل است. در این مقاله خطاهای فاز به زمین در طرف اولیه و ثانویه و خطای فاز به فاز در طرف اولیه (با توجه به ساختمان ترانس به ندرت اتفاق می افتد.) و ثانویه مورد بررسی قرار گرفته اند.

۴-۴- شبیه سازی حالت هجوم مغناطیسی

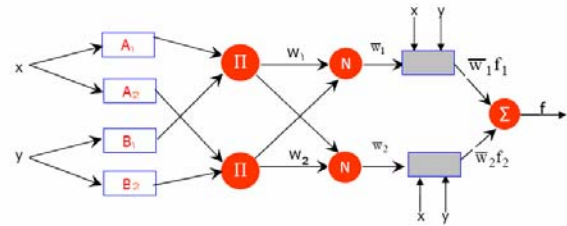
پدیده جریان هجومی حالت گذرای است که در لحظات اولیه ای که ترانسفورماتور برقرار می شود، اتفاق می افتد. در این مقاله جریان هجومی در هر دو حالت بی باری و بارداری با زوایای ولتاژ $\theta = 0, 15, 30, 45, 60, 90$ مورد بررسی قرار گرفته است.

۴-۵- شبیه سازی حالت کار عادی

در وضعیت کار عادی ترانس، ولتاژ تونن ورودی ترانسفورماتور در حدود ولتاژ نامی ترانسفورماتور است. در این حالت، بار خروجی ترانس متغیر است. این تغییر بار

If x is A_2 and y is B_2 then $f_2 = p_2x + q_2y + r_2$

ساختار این مکانیزم در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴: ساختار ANFIS

مشاهده می شود، با توجه به لایه های در نظر گرفته شده یک شبکه تطبیقی ساخته شده است که عملکردی مشابه مدل فازی سوگینو دارد.

۴-۲- الگوریتم آموزش

با توجه به شکل (۴) می توان نوشت:

$$f = \frac{W_1}{W_1 + W_2} f_1 + \frac{W_2}{W_1 + W_2} f_2 = \bar{W}_1 f_1 + \bar{W}_2 f_2$$

$$= (\bar{W}_1 x) p_1 + (\bar{W}_1 y) q_1 + (\bar{W}_1) r_1 + (\bar{W}_2 x) p_2 + (\bar{W}_2 y) q_2 + (\bar{W}_2) r_2 \quad (9)$$

برای تنظیم (آموزش) پارامترها از یک الگوریتم آموزشی ترکیبی به فرم زیر استفاده شده است [۸].

۱. مسیر پیشرو: ابتدا پارامترهای بخش مقدم (پارامترهای توابع عضویت) را ثابت در نظر می گیرد سپس با کمک تخمین حداقل مربعات به تنظیم پارامترهای مؤخر می پردازد. تخمین حداقل مربعات توسط الگوریتم فیلترکالمن توسعه یافته اجرا می شود.

۲. مسیر پسرو: در این مرحله پارامترهای بخش مؤخر (پارامترهای سیستم استنتاج فازی سوگینو درجه اول) ثابت فرض می شود. سپس با استفاده از روش گرادیان نزولی پارامترهای بخش مقدم تنظیم می گردد.

۴-۸- ساختار شبکه عصبی - فازی

مدل انتخابی دارای مشخصات زیر است.

- تعداد ورودی ها چهار عدد است. که عبارتند از: انرژی

سیگنال سطوح DC و سوم و چهارم برحسب درصد و

مقدار کل انرژی سیگنال.

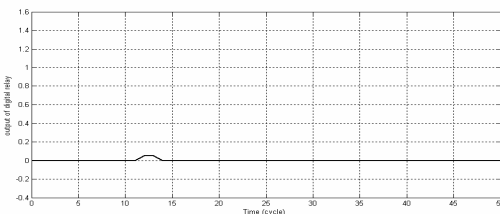
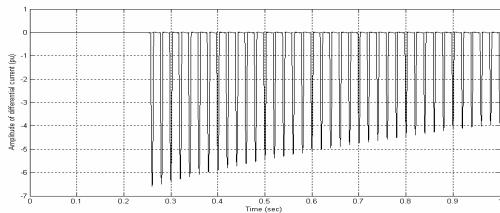
- سیستم استنتاج فازی به صورت سوگینو مرتبه اول است.

- توابع عضویت از نوع گوسین و تعداد آن سه می باشد.

در این تحقیق برای آموزش ANFIS از جعبه افزار فازی نرم افزار MATLAB استفاده شده است. بعد از ۵۰ بار تکرار که مجذور میانگین مربعات خطا به حدود ۰/۰۰۱ رسید آموزش متوقف می گردد.

۵- بررسی عملکرد رله دیفرانسیل

بعد از آموزش سیستم استنتاج فازی نوبت به بررسی عملکرد الگوریتم می رسد. چنانچه خروجی رله دیجیتال صفر باشد به معنی عدم وجود خطا در ترانس و خروجی یک به منزله وقوع خطا در ترانس می باشد. لحظه وقوع خطا در ترانسفورماتور می باشد.



شکل ۴: جریان دیفرانسیل فاز A و خروجی رله دیفرانسیل در هنگام جریان هجومی با زاویه وصل ۳۰ درجه در حالت بارداری

سبب تغییر مقدار جریان دیفرانسیل می شود (این مقدار تغییر بسیار کوچک است). محدوده تغییر بار می تواند از بی باری تا بارداری کامل ترانسفورماتور می باشد. آنچه در این نوع شبیه سازی ها بیشتر مد نظر قرار گرفته، تغییر اندازه و نوع بار است.

۴-۶- شبیه سازی حالت های ترکیبی

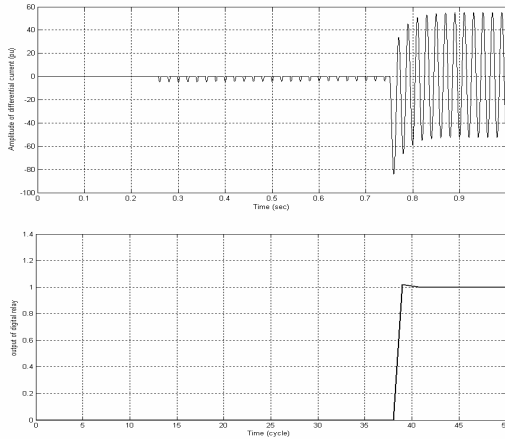
در صورت برقرار شدن ترانسفورماتور همزمان با بروز یک عیب داخلی در آن، حفاظت های دیفرانسیل مرسوم به علت تشخیص هارمونیک دوم بیش از حد مجاز در جریان دیفرانسیل ترانسفورماتور، از صدور فرمان قطع ترانسفورماتور جلوگیری می نمایند. این مشکل می تواند منجر به معیوب شدن ترانسفورماتور گردد.

۴-۷- پیش پردازش الگوی آموزشی

اطلاعات بدست آمده از شبیه سازی ها، قبل از اینکه به شبکه فازی-عصبی برای آموزش اعمال شود، پیش پردازش هایی صورت می پذیرد. این پیش پردازش ها شامل گذراندن تفاضل جریان CT ها از یک فیلتر آنتی الیاسینگ و سپس نمونه برداری با فرکانس ۳/۲ KHz (۶۴ نمونه در هر سیکل) و فیلتر آنتی الیاسینگ دارای فرکانس قطع KHz ۱/۶ می باشد.

چنانچه فرکانس نمونه برداری f باشد، اولین سطح (level) شامل فرکانس های $f/4$ تا $f/2$ می باشد. به طور کلی n امین سطح تبدیل وولت فرکانس های $f/2^{n+1}$ تا $f/2^n$ در برمی گیرد.

با توجه به اینکه فرکانس نمونه برداری ۳۲۰۰ Hz و تعداد نمونه ها ۶۴ تا (طول پنجره ها به اندازه یک سیکل) است، هر سیگنال را می توان به شش سطح و یک سطح DC تجزیه کرد. همانطور که قبلا ذکر شد بیشترین انرژی سیگنال جریان هجومی در سطوح با فرکانس های پایین تر است، از این رو انرژی سیگنال در سطح سوم و چهارم و سطح DC می تواند معیار مناسبی جهت تشخیص جریان هجومی از جریان خطا باشد.

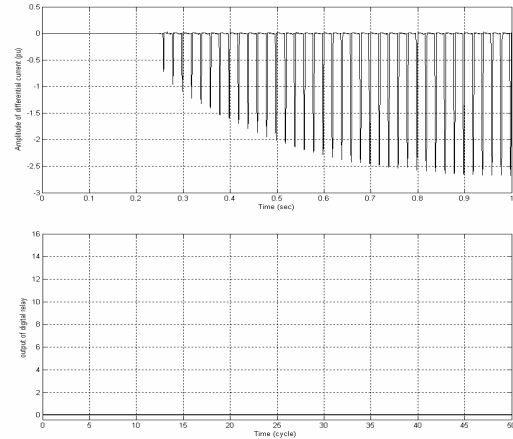


شکل ۷: جریان دیفرانسیل فاز A و خروجی رله دیفرانسیل در حالت وقوع همزمان جریان هجومی و خطای AG در $t = 0.75$ s با زاویه وصل صفر درجه

در نهایت در شکل (۷) به وقوع خطای داخلی فاز به زمین (AG) در طرف ثانویه همزمان با جریان هجومی در لحظه $t = 0.75$ s و زاویه وصل صفر درجه و خروجی رله دیجیتال اشاره شده است.

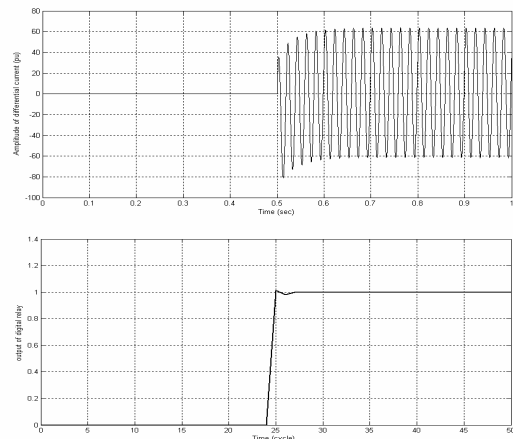
جداول (۱) تا (۳) برخی دیگر از نتایج عملکرد رله پیشنهادی را نشان می دهد. در این جدول تست رله دیفرانسیل در برابر جریان هجومی، خطاهای داخلی و خطاهای داخلی همراه با جریان به نمایش در آمده است.

جدول (۱): جریان هجومی و پاسخ رله طراحی شده



شکل ۵: جریان دیفرانسیل فاز A و خروجی رله دیفرانسیل در هنگام جریان هجومی با زاویه وصل ۴۵ درجه در حالت بارداری

در اشکال (۴) و (۵) هم به پدیده جریان هجومی اشاره شده است. در شکل (۴) جریان هجومی با زاویه وصل ۳۰ درجه و در شکل (۵) جریان هجومی با زاویه وصل ۴۵ درجه با بار کامل و همچنین عملکرد رله دیفرانسیل دیده می شود. در این دو حالت هم رله پایدار است و فرمان قطع صادر نمی کند.



شکل ۶: جریان دیفرانسیل فاز A و خروجی رله دیفرانسیل در حالت وقوع خطای AB در $t = 0.5$ s با زاویه وصل ۹۰ درجه

در شکل (۶) به وقوع خطای فاز به فاز ترانس (اتصال کوتاه AB) در طرف اولیه در لحظه $t = 0.5$ s و زاویه وصل ۹۰ درجه و عملکرد رله دیجیتال اشاره شده است.

فرکانس می شکنند در حالی که تبدیل فوری این توانایی را ندارد. با این روش تجزیه تحلیل، به سهولت می توان این دو جریان را از هم تفکیک کرد زیرا توزیع انرژی در زمان و فرکانس برای جریانهای هجومی و خطا بسیار متفاوت است.

۷- مراجع

- [1] Rahman, M.A., Jeyuasurya, B., "A State of the art review of transformer protection algorithm", IEEE Trans. PWRD, Vol.3, No.2, pp. 534-543, 1988.
- [2] Bax-Jensen, J. B., Mikkelsen, S.D., "Detection of fult and ageing phenomena", IEEE Trans. PWRD, Vol.10, No.1, pp. 308-314, 1995.
- [3] Lu Jiping, Chen Ying Xue; "An approach to power transformer protection based on wavelet transform", IEEE Trans. PWRD, 2005.
- [4] Wiszniewski A., Kasztenny, B., "A multi-criteria differential transform relay based on fuzzy logic", IEEE Trans. PWRD, Vol.10, No.4, pp. 1786-1792, 1995.

[۵] مرتضوی، هاشم؛ بهبود حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتورهای قدرت به کمک شبکه های عصبی: پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۸۰.

[۶] طاهری اسبق، امین؛ صادقی راد، محمد؛ منصف، محسن؛ "مقایسه روش ANFIS و NN در تشخیص جریان هجومی ترانسفورماتور در تب های مختلف". نوزدهمین کنفرانس بین المللی برق ایران ۱۳۸۳.

- [7] T.S.Sidhu, M.S.Sachdev, H.C.Wood, and M.Nagpal, design, implementation and testing of a micro-processor-based high-speed relay for detection transformer winding faults, IEEE Trans, Power delivery, vol.7, no.1,pp.108-117,1992.
- [8] Jang, J.S.R., "Anfis : Adaptive-network-Based fuzzy inference system ", IEEE Trans. SMC, Vol.23, No.3, pp. 675-684, 1993.

جدول (۲): وقوع همزمان خطای داخلی و جریان هجومی و پاسخ رله طراحی شده

AG		
AG		
AG		
AB		
AB		
AB		
ABG		
ABG		
ABG		
ABC		
ABC		
ABC		

جدول (۳): وقوع خطای داخلی و پاسخ رله طراحی شده

AG		
AG		
AB		
AB		
ABG		
ABG		
ABC		
ABC		

همانطور که مشاهده می شود، رله در هنگام رخداد انواع خطاهای خارجی و جریان هجومی با زوایای مختلف وصل کلید عمل نمی کند و در هنگام بروز انواع خطاهای داخلی با زوایای شروع مختلف و وقوع همزمان با جریان هجومی عمل می کند و فرمان قطع می دهد.

۶- نتیجه گیری

در این مقاله با استفاده از روش تبدیل موجک و بکارگیری شبکه فازی- عصبی ANFIS روشی ارائه گردید که بتوان سیگنال خطا را از سیگنال جریان هجومی تشخیص داد. تبدیل wavelet انرژی سیگنال را در حوزه زمان -