

## اثر تشخیص صحیح جریان هجومی و جریان خطا در عملکرد حفاظت ترانسفورماتور قدرت

علی رسولی<sup>۱</sup>، سعید بیات<sup>۲</sup>، مرتضی گنجی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>شرکت برق منطقه‌ای زنجان (نویسنده مسئول)

<sup>۲</sup>شرکت برق منطقه‌ای زنجان

<sup>۳</sup>دانشگاه کار خرمدره

### چکیده

ترانسفورماتورها یکی از بخش‌های اساسی شبکه‌های انتقال و توزیع برق می‌باشند. تشخیص سریع شروع یک عیب در ترانسفورماتور سبب جلوگیری از گسترش عیب و ازدیاد ایمنی می‌شود. در صورتی که واحدهای حفاظتی در شبکه‌های قدرت به درستی عمل نکنند، خطاهای به وجود آمده ممکن است موجب اتلاف انرژی و یا خرابی تجهیزات گران‌قیمت شوند. همیشه مساله جریان هجومی و چگونگی تفکیک و جداسازی آن از خطاهای درونی ترانسفورماتور، مطرح بوده است که در لحظه کلیدزنی به دلیل اشباع هسته ترانسفورماتور جریانی از هسته ترانسفورماتور کشیده می‌شود که به جریان هجومی مغناطیس شونده معروف است. جریان هجومی که در هنگام اتصال ترانسفورماتور به منبع انرژی رخ می‌دهد، ناشی از اضافه شار مغناطیسی موقت در هسته ترانسفورماتور می‌باشد. پدیده جریان هجومی، حالت گذرای بزرگی است که به هنگام برقرار شدن ترانسفورماتور روی می‌دهد. اندازه جریان هجومی ممکن است تا چندین برابر جریان نامی ترانسفورماتور باشد که به عملکرد نامناسب سیستم حفاظتی منجر می‌گردد. در واقع تشابه بین ویژگی‌های جریان هجومی و شرایط خطای داخلی باعث بروز این خطا می‌شود. بطور کلی ترانسفورماتورهای قدرت، از عناصر اصلی و مهم و در عین حال گرانترین تجهیزات در سیستم‌های الکتریکی محسوب می‌شوند یکی از مشکلات اساسی در حفاظت ترانسفورماتورهای قدرت، وجود مسئله جریان هجومی است که کار حفاظت از این عناصر سیستم قدرت الکتریکی را دشوار می‌سازد و به عملکرد نامناسب سیستم حفاظتی منجر می‌گردد که از این لحاظ باید مورد توجه قرار گیرد. در این مقاله ضمن شبیه‌سازی رفتار ترانسفورماتور قدرت و استخراج جریان‌های خطا و هجومی، روشی جهت تمایز جریان هجومی از جریان‌های خطا ارائه شده است.

**واژه‌های کلیدی:** ترانسفورماتور قدرت، جریان هجومی، حفاظت، سیستم‌های قدرت، محدود ساز

## ۱. مقدمه

یکی از مسائل و مشکلات مهم کیفیت برق در سیستم‌های توزیع و انتقال مسئله هارمونیک‌ها می‌باشد که اعوجاج‌های هارمونیکی در سیستم‌های قدرت مشکلات خاصی را به دنبال دارند که عدم عملکرد مناسب تجهیزات، کاهش عمر و پایین آمدن راندمان از مهمترین آنهاست. بنابراین شرکت‌های برق بایستی ضمن مانیتورینگ میزان اعوجاج‌های هارمونیکی در شبکه محدودیت‌هایی را ارائه نمایند تا از آسیب دیدگی تجهیزات مشترکین خانگی و صنعتی جلوگیری گردد. در شبکه‌های مدرن فشار ضعیف مصرف‌کنندگان زیادی وجود دارند که از شبکه، جریان غیر سینوسی می‌کشند این جریان‌ها به دلیل وجود امپدانس شبکه باعث ایجاد افت ولتاژ می‌گردند. افتی که باعث تغییر شکل ولتاژ سینوسی شبکه می‌شود. این آثار طبق بسط فوریه می‌توانند به هارمونیک پایه (اصلی) و تک تک هارمونیک‌ها تجزیه شوند. فرکانس‌های هارمونیک مضرب صحیحی از فرکانس پایه هستند.

## ۲. مصرف‌کنندگان خطی

الف- مقاومت‌های اهمی

ب- موتورهای سه فاز

ج- خازن‌ها

## ۳. مصرف‌کنندگان غیرخطی

الف- جریان مغناطیسی ترانسفورماتورها

ب- تجهیزات مورد استفاده در حمل و نقل برقی مانند متروها و اتوبوس‌های برقی

ج- کاربرد SVC به عنوان کنترل‌کننده استاتیک توان راکتیو شبکه

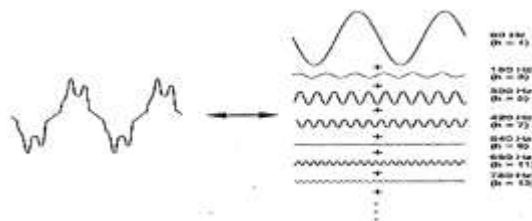
د- مبدل‌های AC/DC و DC/DC به موتورهای القایی و مدارهای کنترل دور

ه- کوره‌های با قوس الکتریکی و القایی، بارهای غیر خطی مثل دستگاه جوش

و- بوبین‌ها و عناصر اشباع شونده و یکسوکننده‌ها و دستگاه‌های UPS

## ۴. اعوجاج‌های هارمونیکی

هر شکل موج اعوجاجی مطابق شکل (۱) را می‌توان به صورت ترکیبی از موجهای سینوسی با فرکانس‌های و دامنه‌های مختلف نشان داد. این موج‌های سینوسی که فرکانس آنها ضریب صحیحی از فرکانس اصلی باشد، هارمونیک‌های مولفه اصلی می‌نامند. در صورتی که فرکانس آنها ضریبی صحیح از فرکانس اصلی نباشد هارمونیک‌های میانی نامیده می‌شوند.



شکل (۱): نمایش سری فوریه شکل موج اعوجاج یافته

در حالت عادی پاسخ شبکه برق در نیم سیکل مثبت ولتاژ شبیه پاسخ آن در نیم سیکل منفی است یعنی این باعث می‌شود شکل موج جریان در نیم سیکل مثبت شبیه شکل موج جریان در نیم سیکل منفی شود و طبق بسط سری فوریه برای یک شکل موج که دو نیم سیکل مثبت و منفی آن شبیه هم هستند، هارمونیک زوج وجود ندارد.

**۵. مؤلفه‌های هارمونیک‌ی جریان هجومی****۶,۱ هارمونیک دوم جریان هجومی**

هارمونیک دوم در تمامی شکل موج‌های جریان هجومی وجود دارد. شکل موج‌هایی که طی یکدوره‌ی تناوب، مدت زمانی که شکل موج دارای مقدار مثبت است با مدت زمانی که شکل موج دارای مقدار منفی است برابر نباشد، شامل هارمونیک دوم هستند. لازم به ذکر است نسبت دامنه هارمونیک دوم تا اندازه ای با درجه ی اشباع هسته تغییر می‌کند.

**۶,۲ هارمونیک سوم جریان هجومی**

به‌طور کلی هارمونیک سومی که در جریان هجومی وجود دارد نسبت به هارمونیک دوم قابل مقایسه است. اگر سیم‌پیچ‌ها در ترانسفورماتور به‌صورت مثلث بسته شوند با توجه به این که جریان خط برابر اختلاف دو جریان فاز است، هارمونیک سوم در جریان خط وجود نداشته و در نتیجه ترانس جریان نمی‌تواند آن را حس کند. از سوی دیگر باید توجه داشت که در اثر ایجاد یک خطای سنگین و به اشباع رفتن ترانس جریان، هارمونیک سوم در ثانویه‌ی ترانس جریان ایجاد می‌گردد.

**۶,۳ هارمونیک‌های بالاتر جریان هجومی**

در میان هارمونیک‌های موجود در جریان هجومی، میزان دامنه‌ی آن‌ها با افزایش مرتبه‌ی هارمونیک به سرعت به سمت صفر میل می‌کند. بنابراین به دلیل اینکه دامنه‌ی هارمونیک‌های بالاتر ناچیز می‌باشند نیازی به استفاده کردن از فیلتر اضافی نیست.

**۶,۴ اثر هارمونیک‌ها بر ترانسفورماتورها**

بعنوان یک قاعده عمومی، ترانسفورماتوری که اعوجاج جریان در آن بیش از پنج درصد باشد، توان نامی آن کاهش می‌یابد. و موارد مختلف ناشی از هارمونیک‌های جریان بار که باعث افزایش دمای ترانسفورماتور می‌گردد عبارتند از:

الف- افزایش جریان مجاز به بیشتر از حد مجاز

ب- تلفات ناشی از جریان گردابی

ج- افزایش تلفات هسته ناشی از هارمونیک‌ها

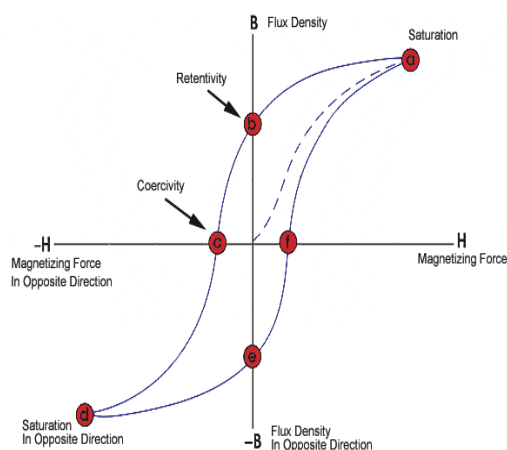
**۶,۵ بررسی هارمونیک‌ها در ترانسفورماتورهای سه‌فاز**

جریان تحریک ترانسفورماتور یکفاز که از سمت منبع  $ac$  به طرف اولیه جاری می‌شود تا شار  $ac$  را در هسته پدید آورد غیر سینوسی و هارمونیک‌ی می‌باشد. دلیل این امر به خاطر حلقه هیستریزیس هسته است. این جریان شامل هارمونیک اول (هارمونیک اصلی با فرکانس مشابه فرکانس منبع یا  $\omega$ ) و هارمونیک‌های فرد شامل هارمونیک‌های سوم پنجم و... با فرکانس های  $3\omega$  و  $5\omega$  ... می‌باشد. از آنجایی که پس از دامنه هارمونیک اول جریان تحریک دامنه هارمونیک سوم این جریان نسبتاً در خور توجه است ولی هنوز نسبت به دامنه هارمونیک اول کوچک می‌باشد. بنابراین این دامنه‌های سایر هارمونیک‌های جریان تحریک نسبت به دامنه هارمونیک اول بسیار ناچیز است.

## ۶. مباحث کلی جریان هجومی در ترانسفورماتور:

در شرایط معمولی یک ترانسفورماتور در حالت بی‌باری جریان مغناطیس‌کننده‌ای حدود ۰٫۵ تا ۲ درصد جریان نامی‌اش از منبع می‌کشد. این جریان به علت اثرات اشباع آهن، سینوسی نیست (شکل ۲).

شکل (۲): جریان بی‌باری ترانسفورماتور

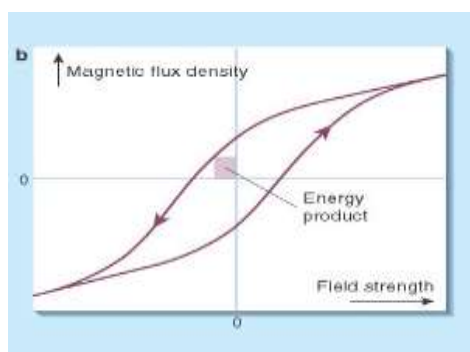


مقدار اعوجاج بستگی به مقدار چگالی شار مغناطیسی دارد که هسته در آن چگالی کار می‌کند. تغییرات شار هسته و جریان مغناطیس‌کننده به نحوی است که در هر دوره‌ی تناوب یک بار دور حلقه‌ی هیستریزس طی می‌شود (شکل ۳).

همچنین تغییرات شار به نحوی است که در هر لحظه نیروی محرکه‌ی الکتریکی<sup>۲</sup> لازم را برای برابری با ولتاژ لحظه‌ای منبع تولید کند. در شکل (۳) حلقه‌ی هیستریزس همراه با منحنی مغناطیسی<sup>۳</sup> مکان قرار گرفتن رئوس حلقه‌های هیستریزس نشان داده شده در

ولتاژهای اعمال شده به ترانسفورماتور در حالت ماندگار<sup>۴</sup> به دست آمده‌اند. هر چقدر که ولتاژ افزایش می‌یابد، شار بیشتری نیز از هسته عبور می‌کند. در نتیجه‌ی این امر و با به اشباع رفتن هسته، ماکزیمم جریان نیز به سرعت افزایش پیدا می‌کند.

## a. بررسی ریاضی جریان هجومی



در این بخش مسأله‌ی اضافه شار هسته‌ی ترانسفورماتور در لحظه‌ی وصل به شبکه را به نحو ساده به طریق ریاضی بررسی می‌کنیم. اگر موج ولتاژ سینوسی  $V = V_m \sin(\omega t + \theta)$  در لحظه‌ی  $t = 0$  با وصل کلید منبع، به ترانسفورماتور اعمال شود، می‌توان نوشت:

$$V = V_m \sin(\omega t + \theta_0) = Ri + N \frac{d\phi}{dt} \quad (1-3)$$

که در آن  $i$  جریان عبوری از مدار،  $\phi$  شار تولید شده،  $N$  تعداد دور سیم پیچ و  $R$  مقاومت اهمی مدار سیم پیچ است. برای ساده شدن مطلب ابتدا فرض می‌کنیم که اندوکتانس سیم پیچ اولیه‌ی ترانسفورماتور ثابت و مساوی  $L$  باشد.

۱- Hysteresis loop

۱- Emf

۲- Magnetizing curve

۳- Steady State

۱- Overfluxing

$$L = \frac{N\phi}{i} \Rightarrow i = \frac{N\phi}{dt}$$

بنابراین خواهیم داشت:

$$V_m \sin(\omega t + \theta.) = R \frac{N\phi}{L} + N \frac{d\phi}{dt} \quad (3-3)$$

با فرض ثابت بودن  $L$ ، پاسخ این معادله‌ی دیفرانسیل عبارت است از:

$$\phi(t) = \phi_m \sin(\omega t + \theta. - \varphi) - \phi_m \sin(\theta. - \varphi) e^{\frac{t}{Z}} \quad (4-3)$$

در این رابطه  $Z = \frac{L}{R}$  و  $\varphi = \tan^{-1} \frac{\omega L}{R}$  و  $\phi_m = \frac{V_m L}{N[R^2 + (\omega L)^2]^{\frac{1}{2}}}$  است که این فرض در ترانسفورماتور با تقریب خوبی صحیح است. لذا رابطه‌ی (۳-۳) به صورت زیر ساده می‌شود:

$$\phi(t) = -\phi_m \cos(\omega t + \theta.) + \phi_m \cos \theta. e^{\frac{t}{Z}} = \phi_s + \phi_l \quad (5-3)$$

که در آن  $\phi_s$  شار ماندگار و  $\phi_l$  شار گذراست.

اگر در لحظه‌ی  $t = 0$  فوران پسماند  $\phi_R$  را نیز داشته باشیم، با اعمال شرایط اولیه به معادله‌ی دیفرانسیل مدار، جمله‌ی  $\phi_R e^{\frac{t}{Z}}$  نیز به رابطه‌ی (۳-۵) افزوده می‌شود.

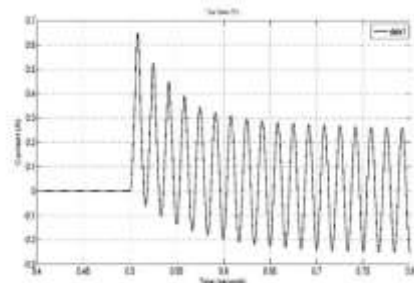
$$\phi(t) = \phi_R e^{\frac{t}{Z}} - \phi_m \cos(\omega t + \theta.) + \phi_m \cos \theta. e^{\frac{t}{Z}} = \phi_s + \phi_l \quad (6-3)$$

اگر  $\theta. = 0$  باشد، شار مغناطیسی در اولین ماکزیمم خود همانگونه که از رابطه‌ی (۳-۶) برمی‌آید و قبلاً نیز اشاره شد، می‌تواند در  $\omega t = \pi$  به لحاظ تئوریک به حدود  $2\phi_m + \phi_R$  برسد، و این بدترین شرایط است. اگر  $\theta. = \frac{\pi}{2}$  باشد، بنابر رابطه‌ی (۳-۶) دامنه‌ی جریان هجومی به حداقل خود می‌رسد. در این حالت اگر شار پسماند صفر باشد، باید انتظار داشت که هیچ گونه جریان هجومی ایجاد نشود.

## b. دامنه و مدت عبور جریان هجومی:

حداکثر دامنه‌ی جریان هجومی در ترانسفورماتورهای قدرت معمولی معمولاً تا حدود ۱۰ برابر جریان نامی و گاهی ۱۵ تا ۲۰ برابر جریان نامی و حتی تا ۳۰ برابر جریان نامی ثبت گردیده است. این امر بستگی به پارامترهای ساختمانی ترانسفورماتور و موقعیت آن در شبکه‌ی قدرت و شرایط کلیدزنی دارد [۸].

حداکثر مدت عبور جریان هجومی تا میرایی کامل نیز در ترانسفورماتورهای مختلف متفاوت بوده و ممکن است از حدود ۱۰ سیکل تا ۱ دقیقه و حتی چند دقیقه طول بکشد. این مدت میرایی به زاویه ی موج ولتاژ در لحظه ی وصل ترانسفورماتور، مقدار و پلاریته ی شار پسماند، خواص مغناطیسی ترانسفورماتور، مقاومت الکتریکی، تلفات مدار و فرکانس بستگی دارد.



شکل (۴): نمونه ای از جریان هجومی

جریان هجومی به طور کلی به ابعاد هسته و سیم پیچ های ترانسفورماتور و فواصل بین آنها، نوع آهن مورد استفاده در هسته و سایر قسمت های ترانسفورماتور، چگالی اشباع هسته، مشخصات شبکه ی قدرت با مقاومت و اندوکتانس منبع تغذیه، میزان و پلاریته ی فوران پسماند هسته و نیز زاویه ی موج ولتاژ در لحظه ی برق دار شدن ترانسفورماتور بستگی دارد. آزمایش نشان می دهد که هر چه چگالی اشباع هسته کوچکتر باشد، مقدار ماکزیمم جریان هجومی بزرگتر خواهد بود.

#### ۵. عوامل موثر مربوط به جریان هجومی

۱. در چند سیکل اول، جریان هجومی به شدت میرا می شود، ولی بعد از آن از شدت میرایی کاسته می شود و چند ثانیه طول می کشد تا کلاً از بین برود.
۲. در چند سیکل اول درصد اشباع هسته بالا و مقدار  $L$  پایین است بنا براین میرایی سریع اتفاق می افتد ولی بعد از چند سیکل از آنجا که مقاومت اهمی سیم پیچ ها باعث میرا شدن شکل موج می شود از درصد اشباع هسته کاسته شده و مقدار  $L$  افزایش می یابد.
۳. مقاومت اهمی مدار (اعم از ترانسفورماتور و شبکه) میزان میرایی را مشخص می کند.
۴. ترانسفورماتورهای ژنراتور و یا نزدیک به نیروگاه های بزرگ به علت پایین بودن درصد میرایی از جریان هجومی با تداوم بیشتری از نظر زمان برخوردارند.

#### ۷. انواع جریان هجومی

غیر از جریان هجومی اولیه که در لحظه برقرار شدن ابتدایی ترانسفورماتور رخ می دهد، بدو طریق دیگر نیز ممکن است جریان هجومی در ترانسفورماتورها ایجاد شود.

- ۱- نوع اول آن جریان هجومی بازیابی نام دارد. این جریان وقتی برآه می افتد که ولتاژ ترمینال ترانسفورماتور بعلت وقوع خطای خارجی سقوط نموده و سپس با عملکرد رله و قطع کلید، قسمتی از مدار که دارای خطا بوده از آن جدا شود، یا خطا بر طرف گردیده و ولتاژ ترمینال ترانسفورماتور مجدداً به مقدار نامی بازگشت نماید. در این حالت میزان افزایش ولتاژ ترمینال ترانسفورماتور، درصدی از ولتاژ نامی است. لذا دامنه جریان هجومی بازیابی همیشه کوچکتر از دامنه جریان هجومی اولیه است.

1-Initial Inrush Current

2-Recovery Inrush Current

۲- نوع دیگر جریان هجومی را می توان جریان هجومی تبعی<sup>۸</sup> نامید. این جریان هنگامی ایجاد می شود که یک ترانسفورماتور که تاکنون بی برق بوده، با یک ترانسفورماتور برقدار، موازی شود. در این حالت ممکن است ترانسفورماتوری که از قبل برقدار بوده، مجدداً یک جریان هجومی را ببیند. علت ایجاد جریان هجومی تبعی آن است که ترانسفورماتوری که به تازگی برقدار می شود، یک جریان هجومی پیدا می کند. این جریان یک مسیر موازی در ترانسفورماتوری که از قبل برقدار بوده می بیند و مولفه DC این جریان، ترانسفورماتور برقدار قبلی را نیز به اشباع می برد.

## ۸. روش های تشخیص جریان هجومی و جریان خطا

با توجه به این که رله دیفرانسیل جریان هجومی را به عنوان خطای داخلی در نظر می گیرد، چند روش برای تشخیص بین جریان هجومی و جریان خطا وجود دارد:

- ۱- کاهش حساسیت رله به شکل موج های جریان که دارای Offset DC هستند.
- ۲- تشخیص هارمونیک دوم.
- ۳- غیر فعال کردن رله دیفرانسیل در پروسه برقدار کردن ترانسفورماتور.
- ۴- تأخیر زمانی.

## d. ویژگی های جریان هجومی

الف- این جریان دارای مقدار بالایی مؤلفه DC و هارمونیک دوم است و درصد هارمونیک های آن در جدول (۱) قابل شناسایی و مقایسه شده است.

جدول (۱): درصد هارمونیک های جریان هجومی

هارمونیک	درصد
DC	۵۵
دوم	۶۳
سوم	۲۶/۸
چهارم	۵/۱
پنجم	۴/۱
ششم	۳/۷
هفتم	۲/۴

ب- مقدار دامنه اصلی و هارمونیک های موجود در جریان هجومی در جدول (۲) نیز قابل مشاهده است.

جدول (۲): هارمونیک های موجود در جریان هجومی

فرکانس	دامنه
اصلی	٪۱۰۰
DC	٪۶۰-۴۰
هارمونیک دوم	٪۷۰-۳۰
هارمونیک سوم	٪۳۰-۱۰
هارمونیک چهارم	کمتر از ٪۵
هارمونیک پنجم	کمتر از ٪۵
هارمونیک ششم	کمتر از ٪۵
هارمونیک هفتم	کمتر از ٪۵

#### e. اهمیت رله های حفاظتی در سیستم های قدرت

گسترش سیستم های قدرت موجب افزایش احتمال گسترش خطاها در این شبکه ها می گردد که منجر به عدم تداوم تأمین انرژی الکتریکی مورد نیاز مشترکین خواهد شد. از طرفی وضع قوانین بازدارنده برای عدم تأمین انرژی مورد نیاز مصرف کنندگان موجب شده است که شرکت های برق بیش از پیش در اندیشه تقویت قابلیت اطمینان شبکه های خود باشند. از آنجا که عوامل مخاطره آمیز در یک سیستم یکپارچه از داخل و خارج سیستم به آن تحمیل خواهد شد بنابراین افزایش قابلیت اطمینان و عملکرد اجزای سیستم از اهمیت ویژه ای برخوردار است.

#### f. حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور و تأثیر جریان هجومی در آن

رله های دیفرانسیل یکی از اصلی ترین وسایل حفاظتی در ترانسفورماتورهای با قدرت بالاتر از ۱۰ مگا ولت آمپر و گاهی از ۵ مگا ولت آمپر به بالا، هستند. این رله ها ترانسفورماتور را در مقابل خطرات ناشی از خطاهای داخلی حفاظت می کنند. ترانسفورماتورهای جریان که در این شکل دیده می شوند، طوری متصل شده اند که در شرایط عادی جریانی از سیم پیچ عمل کننده عبور نمی کند. اگر یک اتصال کوتاه یا خطای اتصال به زمین اتفاق بیفتد، جریان های عبوری از ثانویه ترانسفورماتورهای جریان نابرابر می شوند و اختلاف بین آنها از طریق سیم پیچ عمل کننده جاری می شود. رله ی دیفرانسیل زیر از نوع درصدی<sup>۱۰</sup> می باشد.

#### g. تأثیر زمان کلید زنی در جریان هجومی

هر گاه فرکانس شبکه ۶۰ هرتز در نظر باشد. و لحظه وصل ترانسفورماتور توسط کلید را ۵/۰ ثانیه باشد شکل موج جریان هجومی به صورت زیر خواهد شد.

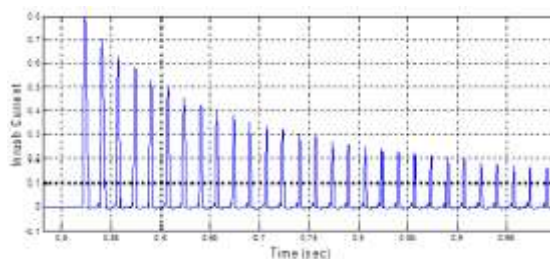
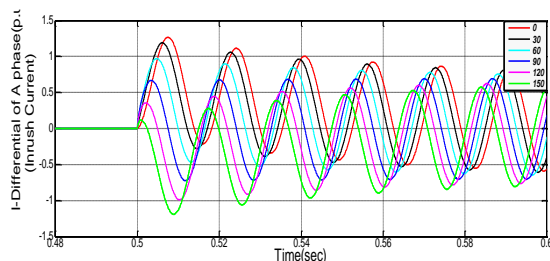
$$f = 60 \text{ Hz}$$

<sup>۱</sup> (Operating Coil)

<sup>۱۰</sup> (Percentage differential relay)



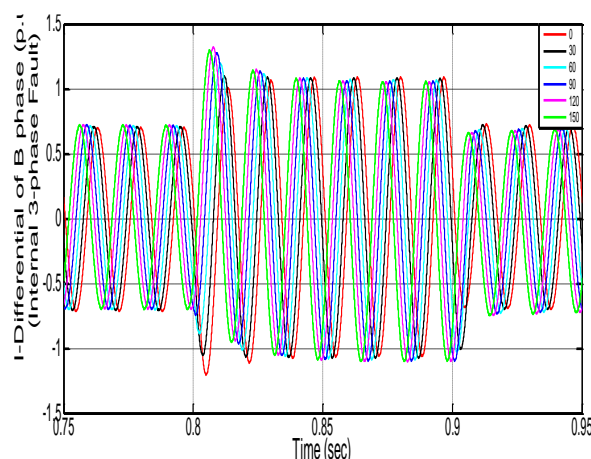
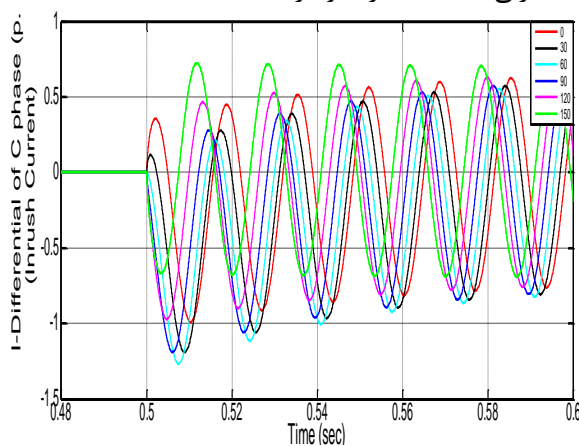
با توجه به فرکانس شبکه هر یک از سیکل کامل در مدت ۰/۰۱۶۷ ثانیه پیموده می‌شود بنابراین در عرض ۰/۵ ثانیه ۳۰ سیکل کامل ایجاد می‌گردد که کلید در این مدت در حالت قطع بوده و ترانسفورماتور به شبکه متناوب متصل نیست و اگر بعد از این مدت زمان در لحظه وصل ترانسفورماتور به شبکه متناوب زمان کلیدزنی تغییر داده شود. (بطور مثال مطابق شکل (۴) در ۳۰ درجه از شکل موج ولتاژ، یعنی در ۰/۵۰۱۴ ثانیه کلید وصل گردد). در اندازه و مدت زمان تداوم جریان هجومی تغییری حاصل خواهد شد و مقدار آن کاهش می‌یابد. که در شکل های (۴) و (۵) نشان داده شده است.



شکل (۴): شکل موج جریان هجومی، کلیدزنی در ۰/۵۰۱۴ ثانیه

## h. بررسی جریان هجومی

معمولاً برای تشخیص جریان هجومی و جلوگیری از صدور فرمان قطع، از مؤلفه‌ی هارمونیک دوم استفاده می‌شود. در این قسمت شکل موجهای (۵) و (۶) بدست آمده جریان هجومی را برای زوایای مختلف کلید زنی در دو حالت با شار پسماند و بدون شار پسماند بررسی می‌گردد. و لحظه وصل کلید B1 برای زوایای مختلف کلید زنی ۰/۵ ثانیه در نظر گرفته شده است.

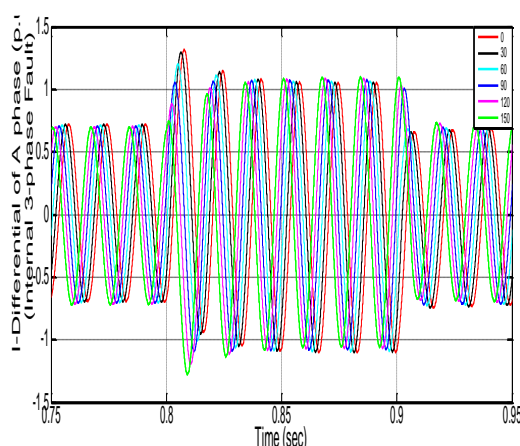


شکل (۷): جریان هجومی برای ۳ فاز ترانسفورماتور چند سیم پیچه کششی با زوایای کلید زنی مختلف با شار پسماند شکل (۵):

جریان هجومی برای ۳ فاز ترانسفورماتور چند سیم پیچه کششی با زوایای کلید زنی مختلف بدون شار پسماند

### ۱. بررسی جریان خط داخلی

با مقایسه شکل موج های جریان خطای داخلی و جریان هجومی خواهیم دید که شکل موج خطای داخلی فقط شامل مولفه اصلی است ولی شکل موج جریان هجومی دارای هارمونیک های زیادی می باشد.



در این قسمت چند نمونه از شکل موجهای بدست آمده مربوط به خطاهای معمولی فاز به فاز و فاز به زمین از قبیل (سه فاز به زمین، سه فاز، دوفاز به زمین، دو فاز و تکفاز به زمین) برای زوایای مختلف کلید زنی در دو حالت با شار پسماند و بدون شار پسماند مورد بررسی قرار گرفته که در شکل های زیر نشان داده شده است.

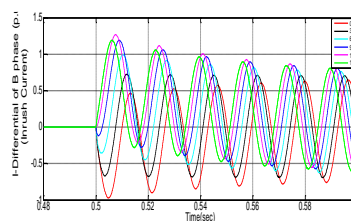
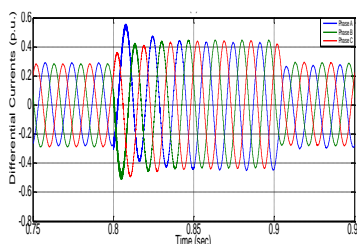
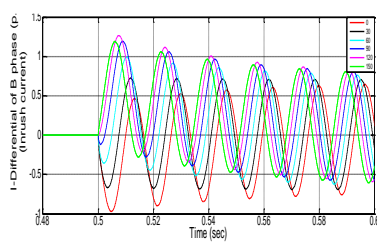
شکل (۷): جریان خطای داخلی سه فاز (ABC) در خط اول، برای ۳ فاز، ترانسفورماتور چند سیم پیچه کششی با زوایای کلید زنی مختلف با شار پسماند همراه با شکل موج جریان ها

شکل (۱۳-۴): جریان خطای داخلی سه فاز (ABC) در خط اول، برای

۳ فاز، ترانسفورماتور چند سیم پیچه کششی با زوایای کلید زنی مختلف بدون شار پسماند همراه با شکل موج جریان ها

۹. نتایج شبیه سازی

در این بخش به بررسی نتایج شبیه سازی روش پیشنهادی می پردازیم. تمامی شبیه سازی ها در محیط Matlab انجام شده است. نکته ای قابل ذکر اینکه به دلیل دلایل اقتصادی محل کار ترانسفورماتور در شرایط عادی مطابق با نقطه ی زانویی منحنی هیستریزس می باشد. بنابراین تنها افزایش کوچکی در شار مغناطیسی هسته از مقدار نرمال آن موجب ایجاد جریان مغناطیسی بالایی خواهد شد. دو عامل مهم در میزان جریان هجومی ترانسفورماتور و مقدار شار نقش اصلی دارند. اولین عامل لحظه ی برق دار شدن ترانسفورماتور می باشد که با تغییر زمان کلید وصل ترانسفورماتور به شبکه قابل کنترل است. دومین عامل میزان شار اولیه ترانسفورماتور در لحظه برق دار شدن آن است که به آن شار پسماند گفته می شود و در واقع شار به جا مانده از آخرین خاموشی ترانسفورماتور است. در شبیه سازی های صورت گرفته سعی شده است که وجود دو عامل مذکور نیز مورد بررسی قرار گیرد.



ج.

یسه روش پیشنهادی با روش بلوک هارمونیک

روش های مختلفی جهت تشخیص جریان هجومی از جریان خطا وجود دارد. در میان این روش ها، روش بلوک هارمونیک با بیشترین استقبال از طرف سازندگان رله و ابزار مهندسی مواجه است. در این روش نسبت هارمونیک دوم به صورت زیر تعریف می گردد:

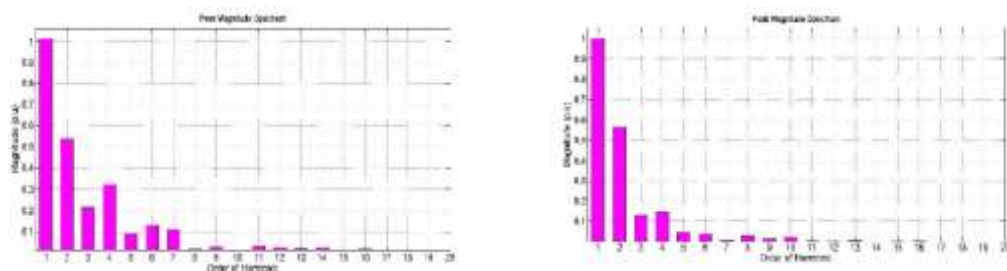
که در آن مولفه های هارمونیک دوم جریان های سه فاز A, B, C و مولفه های هارمونیک اول جریان های سه فاز A, B, C می باشند.

با توجه به اینکه در ترانسفورماتورهای مدرن و بزرگ میزان هارمونیک‌های دوم در جریان هجومی مغناطیسی یک یا دو فاز می‌تواند نسبتاً کوچک باشد. با استفاده از مواد جدید در ساختار تشکیل دهنده ترانسفورماتور که در سال‌های اخیر رواج یافته است و تغییراتی همچون به کارگیری خازن‌های جبران‌ساز در سیستم قدرت و به خصوص سیستم‌های دارای خطوط طولانی، تغییراتی در مقدار مولفه هارمونیک دوم جریان هجومی و جریان خطا ایجاد شده است.

لذا با توجه به موارد بیان شده برای نمونه از هسته به جنس آهن‌پوش مذکور در Matlab شبیه‌سازی شده است. شکل‌های زیر نشان‌دهنده مولفه‌های هارمونیک جریان هجومی ترانسفورماتور با هسته آهنی به ترتیب بدون شار پسماند و با شار پسماند ۸۰٪ در فاز اول می‌باشد.

شکل (۸): مولفه‌های هارمونیک مطابق با هسته آهنی با شار پسماند صفر

شکل (۸): مولفه‌های هارمونیک مطابق با هسته آهنی با شار پسماند ۸۰٪



#### ۱۰. نتیجه گیری

با توجه به اینکه مجموع ظرفیت ترانسفورماتورهای نصب شده در شبکه معمولاً بین ۵ تا ۸ برابر ظرفیت واحدهای تولیدی می‌باشد لذا

حفاظت اینگونه تجهیزات بسیار حائز اهمیت خواهد بود. تشخیص سریع شروع یک عیب در ترانسفورماتور سبب جلوگیری از گسترش عیب و ازدیاد ایمنی می‌شود.

جریان هجومی دارای هارمونیک‌های زیادی دارند اما جریان خطای داخلی معمولاً دارای مولفه اصلی می‌باشد و بطور متعارف، برای تشخیص جریان هجومی و جلوگیری از صدور فرمان قطع، از مؤلفه‌ی هارمونیک دوم استفاده می‌شود. با استفاده از این مؤلفه و دیگر خصوصیات جریان هجومی و خطا می‌توان حالت خطا را از غیر خطا تشخیص داده و از آن برای بهبود عملکرد رله‌های دیفرانسیل در شبکه‌های قدرت استفاده کرد. دامنه مولفه dc جریان هجومی معمولاً (۴۰-۶۰)٪ دامنه مولفه اصلی و هارمونیک دوم جریان هجومی (۳۰-۷۰)٪ دامنه مولفه اصلی می‌باشد و جریان خطا دارای مولفه اصلی بیشتری از جریان هجومی دارد که نمونه داده‌های مربوط به جریان هجومی و جریان خطای سه فاز به زمین با هفده مولفه که شامل مولفه DC و اصلی و هارمونیک‌ها می‌باشد.

در واقع تشابه بین ویژگی‌های جریان هجومی و جریان خطای داخلی، موجب رخداد این خطا می‌شود. لذا برای عملکرد ایمن ترانسفورماتور بایستی جریان هجومی از جریان خطای داخلی تشخیص داده شود. نخست، برای استخراج ویژگی و شکل موجها نرم‌افزار MATLAB بکار برده شده است که با یک روش مؤثر و کارآمد برای تشخیص جریان هجومی از جریان‌های خطا، که نتیجه آن نسبت به سایر روش‌های انجام شده و الگوریتم‌ها، با دقت بالا بوده و زمان پاسخ دهی حل مسئله سریع‌تر می‌باشد.

روش پیشنهادی می‌تواند خطای سیم‌پیچی را از جریان هجومی مستقل از هارمونیک‌ها تشخیص دهد و برای سیستم‌های قدرتی که هارمونیک دوم جریان خطای بزرگ و یا هارمونیک دوم جریان هجومی کوچکی دارند مؤثر می‌باشد. علاوه بر این به خوبی جریان‌های خطا از جریان هجومی قابل تشخیص می‌باشند.

## منابع

- [۱] N. Ruiz-Reyes, P. Vera-Candeas, F. Jurado, "Discrimination between transient voltage stability and voltage sag using damped sinusoids- based transient modeling," IEEE Trans. Power Del., vol. 20, no. 4, pp. 2644–2650, Oct. 2005.
- [۲] S. A. Saleh, M. A. Rahman, "Modeling and protection of a three phase power transformer using wavelet packet transform," IEEE Trans. Power Del., vol. 20, no. 2, pp. 1273–1282, Apr. 2005.
- [۳] M. M. Eissa, "A novel digital directional transformer protection technique based on wavelet packet," IEEE Trans. Power Del., vol. 20, no. 3, pp. 1830–1836, Jun. 2005.
- [۴] A. A. HossamEldin, M. A. Refaey, "A novel algorithm for discrimination between inrush current and internal faults in power transformer differential protection based on discrete wavelet transform," Electric Power Sys., vol. 81, no. 1, pp. 19-24, Jan. 2011.
- [۵] A.-R. Sedighi, M.-R. Haghifam, "Detection of inrush current in distribution transformer using wavelet transform," Int. Journal of Electrical Power & Energy Sys., vol. 27, no. 5–6, pp. 361-370, Jun.–Jul. 2005.
- [۶] Omar A.S. Youssef "Discrimination between faults and magnetising inrush currents in transformers based on wavelet transforms," Electric Power Sys. Research, vol. 63, no. 2, pp. 87-94, Sep. 2002.
- [۷] H. Monsef, S. Lotfifard, "Internal fault current identification based on wavelet transform in power transformers," Electric Power Sys. Research, vol. 77, no. 12, pp. 1637-1645, Oct. 2007.
- [۸] M. Gong , X. Zhang ,Zh. Gong, W. Xia ,J. Wu, Ch. Lv , "Study on a new method to identify inrush current of transformer based on wavelet neural network," Int. Conf. Electrical & Control Eng., Sep. 2011.
- [۹] J. H. Brunke and H. J. Frohlich, "Elimination of Transformer Inrush Currents by Controlled Switching-Part II: Application and Performance Considerations," IEEE Trans. Power Del., vol. 16, no. 2, pp. 281–285, Apr. 2001.
- [۱۰] C. D. Tsirekis, N. D. Hatziaargyriou, "Control of shunt capacitors and shunt reactors energization transients," Int. Conf. Power Sys. Transients, pp. 1–6, Jan. 2003.
- [۱۱] S. Emmanouil, M. H. J. Bollen, and Y. H. G. Irene, "Expert system for classification and analysis of power system events," IEEE Trans. Power Del., vol. 17, no. 2, pp. 423–428, Apr. 2002