

## ارائه روشی جهت مانیتورینگ و تشخیص خطای مکانیکی سیم پیچ ترانسفورماتور قدرت به روش برخط

میثم ربیعی<sup>۱</sup>

دکتر مرتضی رزاز<sup>۲</sup>

دکتر محمود جورابیان<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه شهید چمران اهواز    <sup>۲</sup> دانشیار گروه برق دانشگاه شهید چمران اهواز    <sup>۳</sup> استاد گروه برق دانشگاه شهید چمران اهواز

### چکیده

پایش و نظارت بر شرایط ترانسفورماتورهای قدرت سال های زیادی مورد بررسی بوده است. یکی از خطاهای پیش روی ترانسفورماتور، خطای مکانیکی سیم پیچ است. تاکنون روش های مختلفی برای تشخیص این خطا ارائه شده که در برخی از آنها ترانسفورماتور باید از مدار خارج شود و در برخی دیگر به صورت برخط تشخیص خطا انجام می شود. در این مقاله یک روش برخط ارائه گردیده است که از طریق تشکیل مکان هندسی ولتاژ- جریان، تشخیص خطاهای مکانیکی سیم پیچ ممکن می گردد. ولتاژ و جریان مورد نیاز به وسیله تجهیزات اندازه گیری متصل به ترانسفورماتور ثبت می شود. مکان هندسی بدست آمده توسط اطلاعات دریافتی قادر است وضعیت جاری سیم پیچ ترانسفورماتور را نشان دهد. بنابراین، نظارت برخط از شرایط سیم پیچ ترانسفورماتور بدست آمده است. این روش در فرکانس قدرت اجرا می گردد و تحلیل نتایج آن بسیار ساده است. برای بررسی صحت روش ارائه شده انواع مختلفی از خطاهای مکانیکی سیم پیچ شبیه سازی شده اند. دیاگرام مکان هندسی ترانسفورماتور دارای خطای مکانیکی با یک ترانسفورماتور سالم مقایسه می شود و عدم تطابق آنها، وجود عیوب سیم پیچ را نمایان می کند. شبیه سازی در محیط نرم افزار MATLAB اجرا شده است. پردازش دیجیتالی تصویر مکان هندسی، می تواند تشخیص خطا را بسیار ساده سازد.

**واژه های کلیدی:** ترانسفورماتور قدرت، سیم پیچ، خطای مکانیکی، دیاگرام مکان هندسی

### ۱- مقدمه

سیستم و آگاهی از پایداری های مکانیکی داخلی برای بهره برداران سیستم دارای اهمیت بالایی است. با کهنه شدن و پیرشدن ترانسفورماتورها وضعیت داخلی آنها با تنزل روبرو می شود که احتمال وقوع خطا را افزایش می دهد. خطاها معمولاً در شرایط سخت همچون رعد و برق، حالت های گذرای کلیدزنی، اتصال کوتاه ها و دیگر رخدادها تحریک می شوند. وقتی که ترانسفورماتور نو است استقامت الکتریکی و مکانیکی خوبی برای تحمل شرایط غیر عادی دارد. اما زمانی که کهنه می شود استقامت عایقی آن کاهش پیدا کرده و توان مقابله با اتصال کوتاه ها و دیگر حوادث را ندارد [۲]. در عمل انواع مختلفی از خطاها عملکرد ترانسفورماتور را تهدید می کنند. یکی

ترانسفورماتورهای قدرت جزء گران قیمت ترین و مهم ترین تجهیزات سیستم قدرت محسوب می شوند. این تجهیزات ممکن است با عیب های مختلفی روبرو شوند. بسیار مهم است که از رخ دادها و حوادث جلوگیری شود و مشکلات به سرعت شناسایی شوند. یک خطای غیره منتظره یا قطعی ناخواسته می تواند به لحاظ اقتصادی اثر قابل توجهی در بهره برداری داشته باشد. مشخصاً بررسی و نظارت بر ترانسفورماتورهای قدرت که به عنوان قطب یک شبکه در نظر گرفته می شوند بسیار مهم بوده است [۱]. از طرفی به دست آوردن اطلاعات از شرایط عایقی

بدست آوریم و آن را به عنوان دیاگرام مرجع در نظر بگیریم آنگاه هرگونه تغییر در این دیاگرام که آنرا از حالت مرجع متمایز کند نشان دهنده ی وجود عیب یا خطایی در ترانسفورماتور خواهد بود. این تست در فرکانس قدرت صورت می پذیرد، در نتیجه امکان نظارت بر شرایط مکانیکی سیم پیچ و تشخیص خطا به صورت برخط فراهم می شود. علاوه براین، این تکنیک به هیچ گونه تجهیز خاصی برای اجرای تست نیاز ندارد و از تجهیزات اندازه گیری متصل به ترانسفورماتور بهره می جوید.

## ۲- آسیب های مکانیکی سیم پیچ ترانسفورماتور

در بین همه عواملی که ترانسفورماتور را به خطر می اندازد، آسیبهای مکانیکی که ناشی از جریانهای اتصال کوتاه است بیشتر رایج است [۴]. اتصال کوتاه می تواند نیروهای کششی یا فشاری را در جهت های محوری یا شعاعی وارد کند. نتیجه ی این نیروها می تواند تغییر شکل های محوری<sup>۹</sup>، شعاعی<sup>۱۰</sup> و یا شاید زاویه ای<sup>۱۱</sup> باشد [۵]. دسته بندی تغییر شکل های سیم پیچ در [۶ و ۷] بررسی شده اند. چند نوع از تغییر شکل های رایج به صورت زیر هستند که حاصل نیروهای شعاعی، محوری و یا ترکیبی از آنها می باشند. شکل ۱ غرشدگی و شکل های ۲ و ۳ به ترتیب حالت واژگونی و شکستن بست های نگهدارنده را نشان می دهند.

### • تغییر شکل های شعاعی

۱. غرشدگی اجباری<sup>۱۲</sup> و غرشدگی آزاد<sup>۱۳</sup>

۲. کشش دایره ای<sup>۱۴</sup>

### • تغییر شکل های محوری

۳. واژگونی

۴. خم شدگی بین فاصله اندازه های شعاعی

۵. از بین رفتن نگهدارنده ها و بستهای سیم پیچ

از عمده ترین آنها آسیب های مکانیکی است. آسیب های مکانیکی توسط عوامل مختلفی از جمله اتصال کوتاه ها، زمین لرزه و حمل و نقل نامناسب رخ می دهند. این آسیب ها شامل تغییر شکل های سیم پیچ در جهت های محوری و شعاعی است. واژگونی<sup>۱</sup>، خم شدگی<sup>۲</sup>، غرشدگی<sup>۳</sup>، درهم فرورفتگی<sup>۴</sup>، مارپیچ شدگی<sup>۵</sup> از جمله اینها می باشند. دیگر آسیب های پیش رو، اتصال کوتاه دوره ها، شل شدن و شکستن بستهای نگهدارنده و نشستی<sup>۶</sup> هستند.

تشخیص این خطاها به روشهای قدیمی مشکل است [۳]. از آنجایی که سیم پیچهای ترانسفورماتور می توانند به عنوان شبکه ای از کاپاسیتانس، اندوکتانسهای خودی و متقابل و مقاومت مدل شوند پس در صورت رخ دادن عیب و یا نقصی در سیم پیچ مقادیر پارامترهای مدل شده تغییر خواهند کرد. یکی از روشهای قدرتمند در تشخیص خطا روش تحلیل پاسخ فرکانسی<sup>۷</sup> (FRA) است. این روش که از دقت خوبی برخوردار است با اعمال یک سیگنال به شبکه ی مدل شده (R-L-C) و بررسی پاسخ فرکانسی ثبت شده در خروجی به تشخیص خطا می پردازد. اما اصلی ترین ضعف در این روش (FRA) اینست که برای اجرای تست، ترانسفورماتور باید از شبکه جدا شود که نتیجه ی آن وقفه در انتقال انرژی خواهد بود. این مقاله یک روش برخط<sup>۸</sup> ارائه می دهد که در آن امکان نظارت بر شرایط سیم پیچ و تشخیص خطاهای مکانیکی در حین بهره برداری از ترانسفورماتور فراهم می شود. ایده ی اصلی تکنیک ارائه شده مبتنی بر ایجاد یک مکان هندسی بیضی شکل است. این دیاگرام مکان هندسی از طریق اختلاف ولتاژ بین سمت فشار قوی و فشار ضعیف از یک طرف و جریان ترانسفورماتور از طرف دیگر بدست می آید. از آنجایی که این دیاگرام رفتار سیم پیچ مدل شده به یک شبکه R-L-C را نشان می دهد، هرگونه تغییر در پارامترهای مدار معادل روی آن اثر می گذارد و باعث تغییر شکل در دیاگرام می شود. اگر مکان هندسی برای یک ترانسفورماتور سالم را

1 tilting

2 bending

3 buckling

4 telescoping

5 spiraling

6 leakage

7 Frequency Response Analysis

8 online

9 Axial deformation

10 Radial deformation

11 Angular deformation

12 Forced Buckling

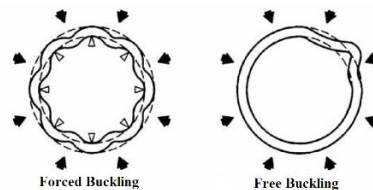
13 Free Buckling

14 Hoop tension

• ترکیب تغییر شکل های شعاعی و محوری

۶. مارپیچ شدگی

۷. درهم فرورفتگی

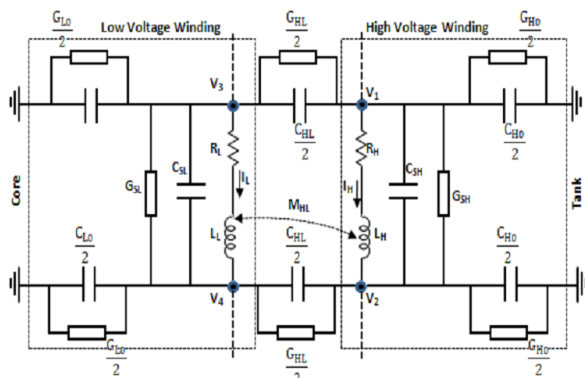


شکل ۱: اثر وارد شدن نیروی شعاعی که باعث غرشدگی سیم پیچ می شود [۷]



شکل ۲: حالت واژگونی سیم پیچ [۵]  
شکل ۳: شکستن بست های نگهدارنده [۵]

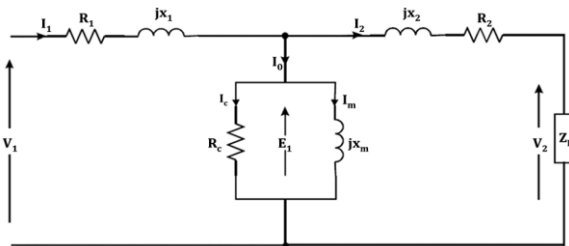
یک دیسک ترانسفورماتور که یک مدل توزیع شده است در شکل ۴ به نمایش گذاشته شده است. با توجه به تعداد دیسک های موجود در یک ترانسفورماتور این مدل به صورت یک شبکه آبهاری پشت سرهم قرار می گیرد که شامل اندوکتانس خودی و متقابل (Ls)، مقاومت (Rs)، خازن های موازی (Csh) و زمین (Cg) و کنداکتانس های دی الکتریک موازی (G) می شود. برای سادگی، اندوکتانس های متقابل به صورت یکجا در اندوکتانس های سری جمع شده اند.



شکل ۴: مدار معادل توزیع شده یک دیسک از سیم پیچ ترانسفورماتور قدرت

#### ۴- تکنیک ارائه شده

قاعده کلی روش ارائه شده مبتنی بر تشکیل یک مکان هندسی با استفاده از ولتاژها و جریانهای اندازه گیری شده در اولیه و ثانویه ترانسفورماتور می باشد. تفاضل ولتاژهای سمت فشار قوی و فشار ضعیف  $(V_1 - V_2)$  از یک فاز خاص در محور Y قرار می گیرد درحالی که جریان ورودی ترانسفورماتور  $(I_1)$  و برای برخی حالات تفاضل جریان ورودی و خروجی ترانسفورماتور  $(I_1 - I_2)$  در محور X جای می گیرد. ترسیم  $\Delta V$  برحسب  $I_1$  و یا  $\Delta I$  یک مکان هندسی شناخته شده ای (بیضی) را ایجاد می کند که رفتار و تغییرات آن قابل تحلیل می باشد. با توجه به مدار معادل تکفاز ترانسفورماتور در شکل ۵ روابط زیر نتیجه می شود:



شکل ۵: مدار معادل تکفاز ترانسفورماتور

$$v_1(t) = V_{m1} \sin(\omega t + \delta) \quad (1)$$

$$v_2(t) = V_{m2} \sin(\omega t) \quad (2)$$

#### ۳- مدل ترانسفورماتور

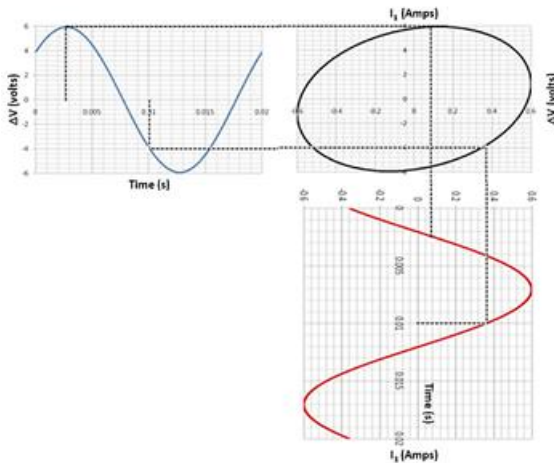
کاربرد هر گونه تکنیک تشخیصی برای تعیین آسیب های مکانیکی ترانسفورماتور وابسته به حساسیت آن در تغییر سلف ها و خازن های توزیع شده است. یک ترانسفورماتور می تواند با دقت کافی به یک مدار RLC مدل شود که مدل توزیع شده<sup>۱</sup> نام می گیرد. بعضی از مراجع تاثیر کنداکتانس موازی توزیع شده را نادیده گرفته اند که ممکن است ضعف هایی را در تشخیص خطا ایجاد کنند. نادیده گرفتن کنداکتانس موازی در مدار معادل باعث می شود که خطاهای ناشی در داخل ترانسفورماتور تشخیص داده نشوند. مدلی که در آن کنداکتانس موازی نادیده گرفته می شود شاید برای تعیین تابع انتقال و تشخیص خطاهایی از جمله اتصال کوتاه دورها، اتصال کوتاه هسته و جابجایی سیم پیچ مناسب و ایده آل باشد اما نیاز به اصلاحاتی دارد تا تشخیص خطاهای ناشی و تخلیه جزئی الکتریکی نیز در آن امکان پذیر باشد. مدار معادل

<sup>۱</sup> Distributed Model

اگر  $B^2 - 4AC > 0$  آنگاه رابطه یک هذلولی را نشان می دهد.

$$B^2 - 4AC = 16I_{m1}^2 V_m^2 \left\{ \cos^2 \delta \sin^2 \left( \varphi + \frac{\delta}{2} \right) - \cos^2 \delta \right\} = 16I_{m1}^2 V_m^2 \cos^2 \delta \left\{ \sin^2 \left( \varphi + \frac{\delta}{2} \right) - 1 \right\} = 16I_{m1}^2 V_m^2 \cos^2 \delta \cdot \cos^2 \left( \varphi + \frac{\delta}{2} \right) \quad (۸)$$

که این عبارت همیشه منفی است و نشان دهنده ی یک بیضی می باشد. شکل ۶ روند تشکیل بیضی را نشان می دهد.



شکل ۶: روند تشکیل دیاگرام بیضی

#### ۴-۱- روش $\Delta V - I$

روش  $\Delta V - I$  که برای تشخیص خطای مکانیکی ارائه شده است یک تکنیک مقایسه ای است. زمانی که دیاگرام مکان هندسی  $\Delta V - I$  تشکیل می شود در حالی که نمایانگر یک بیضی است در اصل با توجه به وضعیت فعلی سیم پیچها و شکل هندسی آنها ایجاد شده و هرگونه تغییر در هندسه ی سیم پیچها باعث ایجاد تغییر در وضعیت بیضی می شود. در صورتی که از یک ترانسفورماتور در حالت سالم، اطلاعات لازم ( $\Delta V - I$ ) ثبت شود و مکان هندسی  $\Delta V - I$  ترسیم گردد آنگاه یک دیاگرام مرجع یا اثر انگشت از سیم پیچ ترانسفورماتور حاصل خواهد شد. از این پس مقایسه ی دیاگرام مرجع با دیاگرام هایی که در زمانهای مختلف بدست می آیند روشی در تشخیص خطا خواهد بود. هرگونه عدم تطابق بین مکان هندسی بدست آمده از سیم پیچ ترانسفورماتور با مکان هندسی مرجع نشانگر خطای مکانیکی در سیم پیچ هاست.

#### ۴-۲ روش $\Delta V - \Delta I$

عملکرد این روش شبیه به روش قبلی است با این تفاوت که به جای استفاده از جریان ورودی  $I$  از تفاضل جریان ورودی

$$x = i_1(t) = I_{m1} \sin(\omega t - \varphi) \quad (۳)$$

برای سادگی فرض می شود  $V_{m1} = V_{m2} = V_m$

$$y = v_1 - v_2 = V_m \{ \sin(\omega t + \delta) - \sin(\omega t) \} \quad (۴)$$

$$\rightarrow 2V_m \cos \left( \omega t + \frac{\delta}{2} \right) \cdot \cos(\delta) \quad (۵)$$

با توجه به روابط (۳)، (۴) و حذف عبارت  $\omega t$  می توان نوشت:

$$\omega t = \sin^{-1} \left( \frac{x}{I_{m1}} \right) + \varphi = \cos^{-1} \left( \frac{y}{2V_m \cos \delta} \right) - \frac{\delta}{2}$$

$$\rightarrow \left\{ \cos^{-1} \frac{y}{2V_m \cos \delta} - \sin^{-1} \frac{x}{I_{m1}} \right\} = \left( \varphi + \frac{\delta}{2} \right)$$

$$\rightarrow \sin \left\{ \cos^{-1} \frac{y}{2V_m \cos \delta} - \sin^{-1} \frac{x}{I_{m1}} \right\} = \sin \left( \varphi + \frac{\delta}{2} \right)$$

$$\begin{aligned} &\rightarrow \sin \left( \cos^{-1} \frac{y}{2V_m \cos \delta} \right) \cdot \cos \left( \sin^{-1} \frac{x}{I_{m1}} \right) \\ &- \cos \left( \cos^{-1} \frac{y}{2V_m \cos \delta} \right) \cdot \sin \left( \sin^{-1} \frac{x}{I_{m1}} \right) \\ &= \sin \left( \varphi + \frac{\delta}{2} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\rightarrow \frac{\sqrt{(2V_m \cos \delta)^2 - y^2}}{2V_m \cos \delta} \cdot \frac{\sqrt{I_{m1}^2 - x^2}}{I_{m1}} - \frac{y}{2V_m \cos \delta} \cdot \frac{x}{I_{m1}} \\ &= \sin \left( \varphi + \frac{\delta}{2} \right) \end{aligned}$$

$$\rightarrow \sqrt{\{(2V_m \cos \delta)^2 - y^2\} \cdot \{I_{m1}^2 - x^2\}} = 2V_m I_{m1} \cos \delta \sin \left( \varphi + \frac{\delta}{2} \right) + xy. \quad (۶)$$

با به توان رساندن طرفین تساوی و مرتب سازی آنها نتیجه می شود:

$$\begin{aligned} &(2V_m \cos \delta)^2 x^2 + 4V_m I_{m1} \cos \delta \sin \left( \varphi + \frac{\delta}{2} \right) xy + \\ &I_{m1}^2 y^2 + \left( 2V_m I_{m1} \cos \delta \sin \left( \varphi + \frac{\delta}{2} \right) \right)^2 - \\ &(2V_m I_{m1} \cos \delta)^2 = 0. \end{aligned} \quad (۷)$$

که ضرایب آن به صورت زیر است

$$A = (2V_m \cos \delta)^2$$

$$B = 4V_m I_{m1} \cos \delta \sin \left( \varphi + \frac{\delta}{2} \right);$$

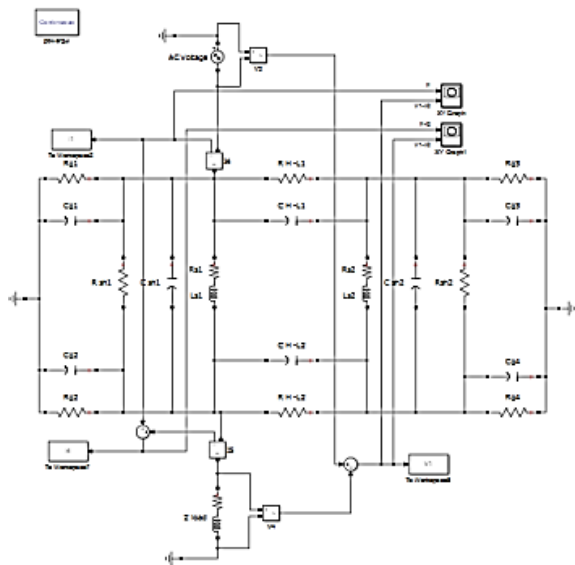
$$C = I_{m1}^2$$

$$D = \left( 2V_m I_{m1} \cos \delta \sin \left( \varphi + \frac{\delta}{2} \right) \right)^2 - (2V_m I_{m1} \cos \delta)^2$$

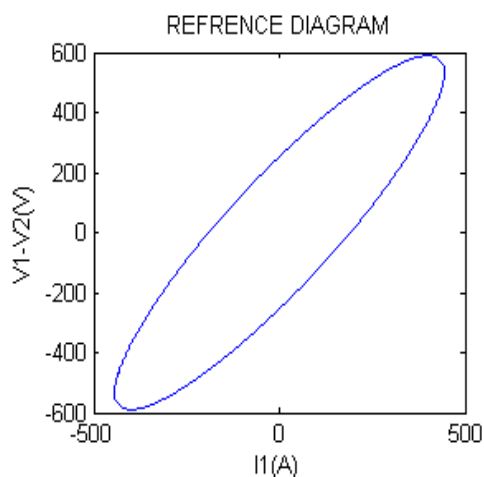
اگر  $B^2 - 4AC < 0$  آنگاه رابطه یک بیضی را نشان می دهد.

اگر  $B^2 - 4AC = 0$  آنگاه رابطه یک سهمی را نشان می دهد.

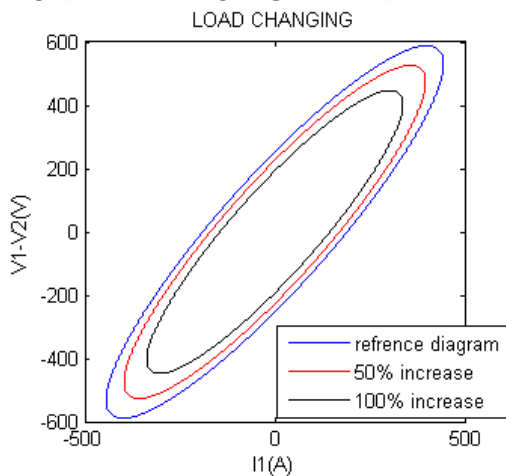
می دهد که دیاگرام های بیضی شکل، دارای محور مشترک و مرکز ثقل یکسان هستند و چرخشی در آنها رخ نداده است.



شکل ۷: مدار شبیه سازی شده در نرم افزار MATLAB



شکل ۸: دیاگرام مکان هندسی مرجع یا اثر انگشت سیم پیچ ترانسفورماتور



شکل ۹: تاثیر افزایش بار (به میزان ۵۰ و ۱۰۰ درصد) روی دیاگرام مرجع یک رابطه مستقیم بین شکل هندسی سیم پیچ در ترانسفورماتور و پارامترهای توزیع شده در ترانسفورماتور وجود

و خروجی  $\Delta I$  برای تشکیل مکان هندسی (بیضی) استفاده می شود. علت اینست که برخی از خطاهای مکانیکی سیم پیچ از طریق  $I - \Delta V$  قابل شناسایی نیستند. با یک تحلیل ساده در مدار معادل ارائه شده برای سیم پیچ متوجه می شویم شاخه ی موازی جریان بسیار کمی را به خود اختصاص می دهد و اگر از  $\Delta I$  به جای  $I$  بهره نجوییم تغییرات  $\Delta I$  قابل مشاهده نیست و متعاقباً برخی از خطاهای مکانیکی سیم پیچ ممکن است نادیده گرفته شود.

## ۵- شبیه سازی

شبیه سازی در نرم افزار MATLAB صورت گرفته است. مقادیر ارائه شده در جدول ۱ به عنوان پارامترهای مدار معادل نشان داده شده در شکل ۴ در نظر گرفته شده است [۹و۸]. ولتاژ ورودی به میزان ۶۶ کیلو ولت لحاظ شده که با فرکانس ۵۰ هرتز مصرف کننده ای را تغذیه می کند. شکل ۷ نشان دهنده ی مدار شبیه سازی شده در محیط MATLAB می باشد. با اجرای نرم افزار و ترسیم  $V1-V2$  ( $\Delta V$ ) برحسب  $I$ ، دیاگرام نشان داده شده در شکل ۸ حاصل می شود که نمایانگر مکان هندسی بدست آمده برای سیم پیچ ترانسفورماتور است. این دیاگرام، مکان هندسی مرجع یا اثر انگشت سیم پیچ ترانسفورماتور است.

جدول ۱: مقادیر پارامترهای مدار معادل [۹و۸]

1/G	Ch1	Cg	Csh	Ls	Rs	
$\gamma M\Omega$	$5nF$	$3nF$	$0.013nF$	$180\mu H$	$1.2\Omega$	HV
$\gamma M\Omega$	$5nF$	$6nF$	$0.026nF$	$65\mu H$	$0.5\Omega$	LV

جدول ۲: پارامترهای ترانسفورماتور و انواع خطاهایی که با آنها مرتبط است

پارامترهای فیزیکی	نوع خطا
اندوکتانس	تغییر شکل دیسک، اتصال کوتاه های سیم پیچ، شکست های محلی
کاپاسیتانس موازی	جابجایی دیسک، غرشدگی (به خاطر نیرو های شدید مکانیکی)، نفوذ رطوبت، شل شدن بست های نگهدارنده
کاپاسیتانس سری	کهنه شدن عایق، تغییر فاصله بین دیسک ها
مقاومت	اتصال کوتاه شدن دیسک، تخلیه جزئی

به منظور بررسی تاثیر تغییرات امپدانس بار بر روی دیاگرام، بار را به اندازه ۵۰ و ۱۰۰ درصد افزایش دادیم. تاثیر این افزایش در مقدار بارگذاری روی کاهش مساحت کلی مکان هندسی به صورت واضح در شکل ۹ قابل مشاهده است. شکل نشان

دارد. جدول ۲ تعدادی از پارامترهای فیزیکی ترانسفورماتور و انواع خطاهایی که با آنها مرتبط است را نشان می دهد.

## ۶- آنالیز و تحلیل خطا

انواع مختلفی از خطاهای مکانیکی روی مدل، شبیه سازی شده اند و مکان هندسی متناظر با آنها با مکان هندسی مرجع (مربوط به ترانسفورماتور سالم) مقایسه شده اند. شناسایی خطا از طریق مقایسه دیاگرام ترانسفورماتور سالم با دیاگرام ترانسفورماتور معیوب صورت می پذیرد. برای تشخیص ویژگی های سیم پیچ تغییر شکل داده و تاثیر پارامترهای مدل، روی دیاگرام  $\Delta V-I$  و  $\Delta V-\Delta I$  خطاهایی مثل خطای اتصال کوتاه دورها، جابجایی محوری، نشتی و غرشدگی شبیه سازی شده اند و با مکان هندسی مرجع مقایسه گردیده اند.

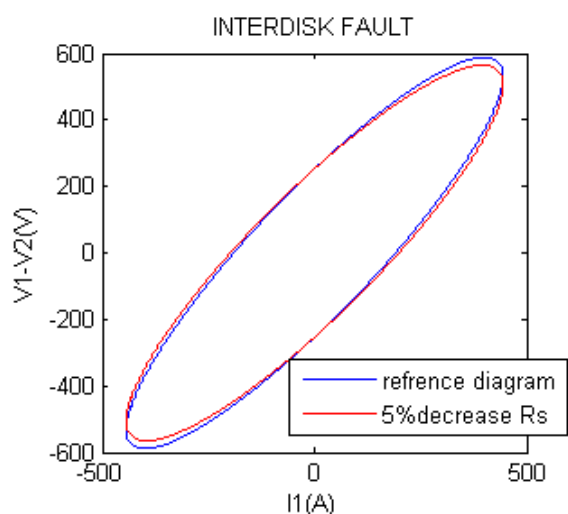
### ۶-۱- خطای اتصال کوتاه دورها

خطای اتصال کوتاه دورها به عنوان بیشترین خطای مشترک در ترانسفورماتور محسوب می شود. مطالعات نشان می دهد که در حدود ۸۰ درصد از خرابی های ترانسفورماتور مربوط به همین خطاست [۱۰]. در مدل مورد مطالعه برای شبیه سازی خطای اتصال کوتاه دورها پارامتر  $R_s$  تغییر داده شد تا تاثیر این خطا در مکان هندسی بررسی شود. برای نشان دادن دقت مدل در تعیین این خطا،  $R_s$  به میزان ۵ درصد کاهش داده می شود و دیاگرام حاصل با دیاگرام مرجع در شکل ۱۰ مقایسه می گردد. تفاوت به صورت واضح مشخص می باشد. در شکل ۱۱، به منظور بررسی افزایش دیسک های تحت اتصال کوتاه قرار گرفته، ۲۰ و ۴۰ درصد مقدار  $R_s$  کاهش داده شد و نتایج با دیاگرام مرجع مقایسه گردید. با توجه به شکل ها قابل مشاهده است که افزایش دیسک های معیوب (که اتصال کوتاه شده اند) باعث می شود دیاگرام به صورت ساعتگرد بچرخد و مساحت کلی آن کاهش یابد. این شبیه سازی با روش  $\Delta V-I$  صورت می پذیرد.

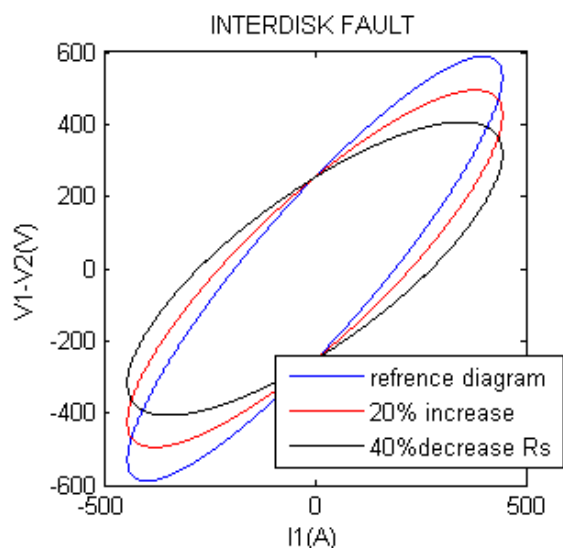
### ۶-۲- خطای جابجایی محوری

این خطا به خاطر عدم تعادل مغناطیسی بین سیم پیچ های فشار قوی و فشار ضعیف که از جریان های اتصال کوتاه ناشی می شود، رخ می دهد [۱۱]. این خطا بین مراکز مغناطیسی سیم پیچ ها، باعث ایجاد مولفه های نامتعادل نیروی مغناطیسی در هر نیمه سیم پیچ می شود که به تغییر در موقعیت نسبی خود منتهی می گردد. اگر به این خطا بی توجه باشیم می تواند به فروپاشی سیم پیچ و یا شکست ساختارهای نگهدارنده منجر شود. این خطا می تواند توسط تغییر در

اندوکتانس های خودی و متقابل ( $L_s$ ) شبیه سازی شود به صورتی که تغییر در کاپاسیتانس نادیده گرفته شود [۱۲]. در مدل، جابجایی محوری توسط ۱۰ و ۲۰ درصد کاهش در اندوکتانس ( $L_s$ )، مدل شده است. شکل ۱۲ تاثیر این خطا را نشان می دهد. در شکل قابل مشاهده است که خطای جابجایی محوری مساحت دیاگرام را کم می کند و با افزایش تعداد دیسک های تحت خطا کاهش مساحت بیشتر می شود. در شکل نمایان است که محور بزرگ هیچ گونه چرخشی را از خود نشان نمی دهد. این شبیه سازی با روش  $\Delta V-I$  صورت می پذیرد.



شکل ۱۰: دقت روش ارائه شده در تشخیص خطای اتصال کوتاه دورها



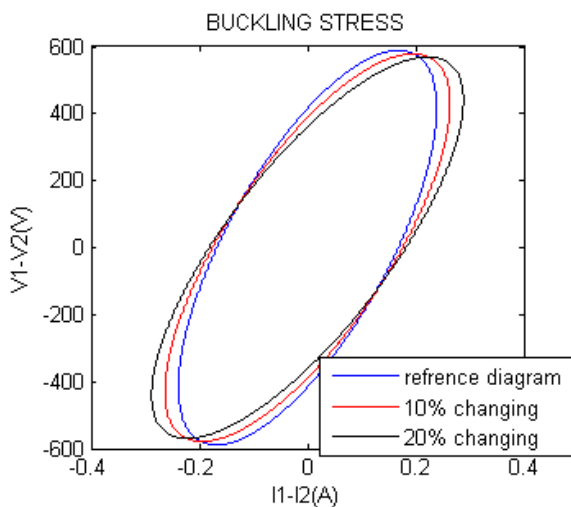
شکل ۱۱: تاثیر خطای اتصال کوتاه دورها روی مکان هندسی مرجع

### ۶-۳- خطای غرشدگی

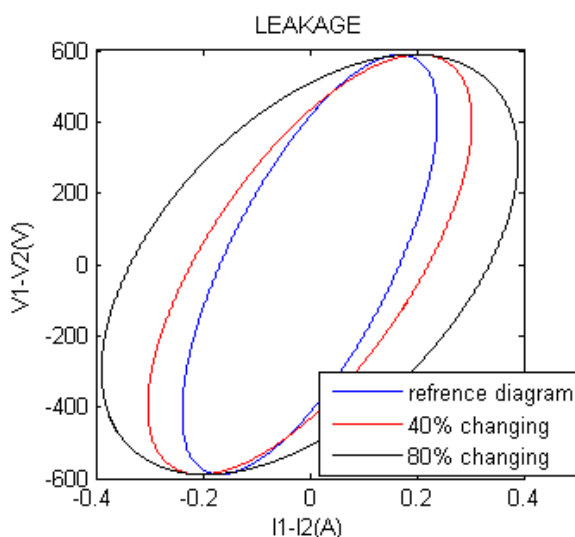
جریان و شار نشتی باعث ایجاد نیروی شعاعی روی سیم پیچ ها می شود. این نیرو، سیم پیچ های داخلی را به گونه ای



می کشد که به هسته نزدیک می شود در حالی که سیم پیچ های خارجی را به سمت خارج هل می دهد [۱۳]. برای شبیه سازی خطای غرشدگی در مدل توزیع شده باید کاپاسیتانس (Csh) سیم پیچ های داخلی کاهش داده شود و علاوه بر آن اندوکتانس متقابل بین سیم پیچ ها (Ls) در مکان های تغییر شکل داده را کم کنیم [۱۴]. همچنین به دلیل اینکه فاصله بین سیم پیچ و هسته کم شده باید کاپاسیتانس زمین (Cg) افزایش یابد. در اینجا برای شبیه سازی این خطا افزایش کاپاسیتانس زمین به اندازه ۱۰ درصد و کاهش اندوکتانس و کاپاسیتانس Csh به اندازه ۱۰ درصد مدل شده است. تاثیر این خطا روی دیاگرام مکان هندسی در شکل ۱۳ نمایش داده شده است. برخلاف خطای جابجایی محوری و اتصال کوتاه دورها مساحت دیاگرام افزایش می یابد. علاوه بر این محور بزرگ با توجه به افزایش دیسک های تحت خطا در جهت ساعتگرد کمی می چرخد. این شبیه سازی با روش  $\Delta V - \Delta I$  صورت می پذیرد.

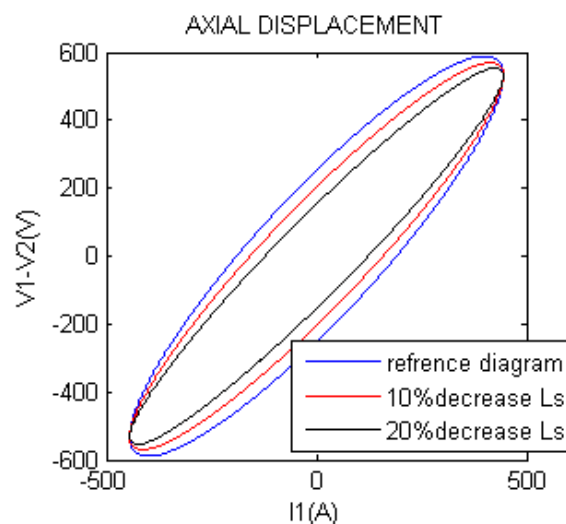


شکل ۱۳: تاثیر خطای غرشدگی روی مکان هندسی مرجع



شکل ۱۴: تاثیر خطای نشتی روی مکان هندسی مرجع

شکل ۱۲: تاثیر خطای جابجایی محوری روی مکان هندسی مرجع



شکل ۱۲: تاثیر خطای جابجایی محوری روی مکان هندسی مرجع

## ۷- تحلیل نتایج

### ۷-۱- تمایزات بصری

باتوجه به نتایج بدست آمده از دیاگرام های  $\Delta V-I$  و  $\Delta V-\Delta I$  قابل مشاهده است که هر یک از خطاها به گونه ای روی مکان هندسی تاثیر می گذارد. تاثیر هر یک از خطاها روی مساحت و میزان زاویه چرخش مکان هندسی متفاوت است. جدول ۳ چگونگی تاثیر خطاها را روی دیاگرام را توصیف می کند.

### ۶-۴- خطای نشتی

دلایل عمده این خطا در ترانسفورماتورها شامل آسیب عایقی، آسیب کابل زمین، فرسودگی و خوردگی، حجم زیاد رطوبت در سیم پیچ، نقاط داغ و عایق کهنه، که قدرت دی الکتریکی آن را کم می کند، هستند [۱۵]. این نوع خطا با افزایش کندانسانس موازی و ادمیتانس موازی شبیه سازی می شود. شکل ۱۴ تاثیر افزایش ۴۰ و ۸۰ درصدی کندانسانس زمین و ادمیتانس زمین را روی دیاگرام نشان می دهد. همانطوری که در شکل مشخص است مساحت دیاگرام افزایش پیدا می کند و محور بزرگ در جهت ساعتگرد می چرخد. تفاوت این خطا

خطا	مساحت	چرخش
اتصال کوتاه دورها	کاهش مساحت	بزرگ
جابجایی محوری	کاهش مساحت	بدون چرخش
غر شدگی	افزایش مساحت	کم
نشستی	افزایش شدید مساحت	بزرگ

ورودی و خروجی از یک سیم پیچ خاص روی محور Y با جریان ورودی سیم پیچ روی محور X است.

جدول ۴: تاثیر خطاهای مختلف روی گریز از مرکز و زاویه چرخش بیضی

تعداد دیسک	خطای اتصال کوتاه دورها		خطای جابجایی محوری		خطای غرشدگی		خطای نشستی	
	$\theta$	e	$\theta$	e	$\theta$	e	$\theta$	e
۵	۲.۲۶	۱.۶۹	۰.۱۹	۰	۰.۸۵	۱.۰۱	۲.۰۵	۱.۰۵
۱۰	۷.۳۱	۲.۱۷	۰.۲۳	۰	۱.۰۹	۱.۵۶	۲.۹۳	۱.۶۲
۱۵	۹.۰۴	۳.۰۱	۰.۲۶	۰	۱.۵۱	۱.۷۱	۳.۷۴	۱.۸۱
۲۰	۹.۵۹	۳.۲۸	۰.۲۹	۰	۱.۹۶	۱.۸۲	۴.۲۵	۱.۹۳
۲۵	۱۰.۱۵	۳.۷۲	۰.۳۱	۰	۲.۱۶	۲.۰۱	۵.۳۷	۲.۰۱
۳۰	۱۱.۲۵	۴.۱۲	۰.۳۵	۰	۲.۸۴	۲.۰۷	۶.۰۴	۲.۷۹
۳۵	۱۲.۳۸	۴.۴۹	۰.۳۸	۰	۳.۱۵	۲.۳۱	۶.۹۸	۳.۱۹
۴۰	۱۳.۴۰	۴.۹۸	۰.۴۲	۰	۳.۷۱	۲.۹۴	۷.۶۹	۴.۴۷
۴۵	۱۳.۸۴	۵.۵۲	۰.۴۵	۰	۴.۰۲	۳.۱۸	۸.۴۱	۵.۰۱
۵۰	۱۴.۰۱	۶.۰۹	۰.۴۹	۰	۴.۳۸	۳.۷۴	۹.۲۸	۵.۶۹

### ۷-۲- تمایز با استفاده از ویژگی های بیضی

همانطوری که در اثبات ریاضی و نتایج شبیه سازی نشان داده شد مکان هندسی  $I - \Delta V$  یا  $\Delta I - \Delta V$  نشانگر یک بیضی است. بعضی از ویژگی های یکتا و منحصر به فرد بیضی می تواند استفاده شود تا دیاگرام های مختلف با هم مقایسه گردند و انواع خطا از این طریق شناسایی گردد. این ویژگی ها شامل مرکز ثقل، طول محور های کوچک (b) و بزرگ (a)، زاویه بین محور بزرگ و محور افقی ( $\theta$ ) است. می توان با استفاده از دستورات نرم افزار MATLAB پارامترهای a، b و  $\theta$  را محاسبه کرد. علاوه بر این گریز از مرکز بیضی که برای تشریح نسبت کلی بیضی به کار می رود از رابطه ۹ قابل محاسبه است:

$$e = \sqrt{1 - \left(\frac{b}{a}\right)^2} \quad (9)$$

جدول ۴ انواع خطا را برای تعداد دیسک های مختلف به همراه  $\theta$  و e داده است. این جدول اختلاف درصد e و  $\theta$  را با حالت مرجع بیان می کند. خطای اتصال کوتاه دورها به ازای افزایش تعداد دیسک های معیوب، افزایش قابل توجهی در e و  $\theta$  دارد و در خطای جابجایی محوری به ازای افزایش تعداد دیسک های معیوب تغییرات  $\theta$  برابر صفر و تغییرات e اندک است. همچنین تغییرات e به ازای افزایش تعداد دیسک های معیوب برای خطای غرشدگی اندک است. تفاوت بین نشستی و غرشدگی میزان تغییرات در e و  $\theta$  متناظر برای هر کدام است.

این مکان هندسی به عنوان اثر انگشت ترانسفورماتور محسوب می شود. هر گونه خطای مکانیکی این دیاگرام را به صورت خاصی تغییر خواهد در نتیجه تشخیص خطا به همراه نوع خطا امکان پذیر خواهد شد. اندازه گیری و مقایسه برخی از ویژگی های دیاگرام شامل مرکز ثقل تصویر، طول محور های کوچک و بزرگ، گریز از مرکز (e) و زاویه چرخش ( $\theta$ ) برای تمایز بین خطاها لازم است. شبیه سازی نشان می دهد که هر خطا تاثیر یکتا و منحصر به فردی روی پارامتر ها دارد. این تکنیک نیازی به سخت افزار جدیدی ندارد چون از وسایل اندازه گیری موجود و متصل به ترانسفورماتور قدرت بهره می جوید و می تواند به صورت برخط مورد استفاده قرار گیرد. علاوه بر این در فرکانس قدرت انجام می شود. دیاگرام ارائه شده می تواند در هر سیکل رسم شود و با دیاگرام قبلی به وسیله کد پردازش تصویر مقایسه گردد تا هر گونه تغییر به سرعت شناسایی و سیگنال هشدار تولید کند.

### مراجع

- [1] M. Bagheri and M. S. Naderi, "Moisture diagnostics of power transformers using dielectric response and paper samples methods", IEEE Electr. Insul. Conf. (EIC), Annapolis, Maryland, USA, pp. 36-40, 2011

### ۸- نتیجه گیری

تکنیک ارائه شده یک راه مناسب برای شناسایی خطای مکانیکی در یک ترانسفورماتور قدرت ارائه می دهد. این تکنیک مبتنی بر ایجاد یک مکان هندسی از اختلاف ولتاژ



- [2] A. Abu-Siada , and Syed Islam, “A Novel Online Technique to Detect Power Transformer Winding Faults ”, IEEE Transaction on Power Delivery, VOL.27 ,NO.2, April 2012
- [3] M.S.A.Minhas,J.P.Reynders,andP.J.DeKlerk,“Failures in power System transformers and appropriate monitoring techniques ,”in Proc. 11<sup>th</sup> Int. Symp. High Voltage Eng.,1999,vol.1,pp.94–97.
- [4] M. Bagheri, M. S. Naderi, T. Blackburn, T. Phung, “Practical Challenges in Online Transformer Winding Deformation Diagnostics” IEEE International Power and Energy Conference PE Con., 2008, pp. 387-392
- [5] M. Florkowski and J. Furgal, “Transformer winding defects identification based on a high frequency method”, Measurement Sci. Techn., doi:10.1088/0957-0233/18/9/012, 2007
- [6] W. J. McNutt, W. M. Johnson, R. A. Nelson and R. E. Ayers, "Power Transformen Short-Circuit Strength-Requirements, Design, and Demonstration", IEEE Trans. Power App. Syst. Vol. 89, pp. 1955-1969, 1970.
- [7] E. Bjerkan, “High Frequency Modeling Of Power Transformer”, Doctoral Thesis Trondheim, May 2005 Faculty of Information Technology.
- [8] C. A. Platero, F. Blazquez, P. Frias, and D. Ramirez, "Influence of Rotor Position in FRA Response for Detection of Insulation Failures in Salient-Pole Synchronous Machines," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 26, pp. 671-676, June 2011.
- [9] E. Rahimpour, M. Jabbari, and S. Tenbohlen, "Mathematical Comparison Methods to Assess Transfer Functions of Transformers to Detect Different Types of Mechanical Faults," Power Delivery, IEEE Transactions on, vol. 25, pp. 2544-2555, 2010.
- [10] D.Sharafi,“Life extension of a group of western power transformers,”in Proc. Power Energy Eng.Conf.Asia-Pacific,2010,pp.1–4.
- [11] A. Palani, S.Santhi, S.Gopalakrishna, V.Jayashankar, "Real-Time Techniques to Measure Winding Displacement in Transformers During Short-Circuit Tests", Power Delivery, IEEE Transactions on, vol. 23, pp. 726-732, 2008.
- [12] E.Rahimpour, J.Christian, K.Feser,and H.Mohseni , “Transfer Function Method to Diagnose Axial Displacement and Radial Deformation of Transformer Windings,” IEEE Transaction on Power Delivery, VOL.18, NO.2, APRIL 2003
- [13] M. Bagheri, M. S. Naderi and T. Blackburn, “Advanced Transformer Winding Deformation Diagnosis: Moving from Off-line to On-line” IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 19, No. 6; Dec.2012.
- [14] A. Abu-Siada, N. Hashemnia, S. Islam, and Mohammad A.S. Masoum, “Understanding Power Transformer Frequency Response Analysis Signatures” IEEE Electrical Insulation Magazine. 29 (3): pp. 48-56.
- [15] N. Abeywickrama, Y. V. Serdyuk, and S. M. Gubanski, "Effect of Core Magnetization on Frequency Response Analysis (FRA) of Power Transformers," Power Delivery, IEEE Transactions on, vol. 23,pp. 1432-1438, 2008.