

محاسبه پارامترهای مدل مشروح برای مطالعه رفتار فرکانسی سیم پیچهای تغییر شکل یافته در جهت شعاعی

ابراهیم رحیم پور

استادیار گروه مهندسی برق - دانشکده مهندسی - دانشگاه زنجان

حمید لسانی

دانشیار گروه مهندسی برق و کامپیوتر - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

حسین محسنی

استاد گروه مهندسی برق و کامپیوتر - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

یوخن کریستین، کورت فزر

انیستیتوی فشار قوی دانشگاه اشتوتگارت آلمان

(تاریخ دریافت ۸۰/۳/۲۲، تاریخ تصویب ۸۱/۸/۴)

چکیده

اندازه گیری و تجزیه تحلیل تابع تبدیل یک ترانسفرماتور تنها روش شناخته شده برای پی بردن به وجود تغییر شکل مکانیکی سیم پیچها در جهت شعاعی و یا جابجایی محوری است. مدل سازی چنین عیبهایی و محاسبه تابع تبدیل توسط مدل، منجر به شناخت دقیقتر از رفتار سیم پیچ شده و می تواند در تشخیص سریعتر عیب کمک نماید. به کمک یک ترانسفرماتور آزمایشگاهی متشکل از یک سیم پیچ بشقابی (۱۰KV و ۱/۲ MVA) و یک سیم پیچ لایه ای (۴۰۰V و ۱/۲ MVA) تغییر شکل مکانیکی در این مقاله مورد مطالعه قرار گرفته است. توابع تبدیل ترانسفرماتور مذکور در حالت های مختلف توسط مدل مشروح محاسبه شده اند. مقایسه نتایج محاسباتی و اندازه گیری شده نشان می دهد که مدل مشروح دارای قابلیت لازم برای شبیه سازی عیبهای سیم پیچها بوده و روش پیشنهادی برای محاسبه پارامترهای مدل، دقت مطلوب را دارا است.

کلیدواژه های فارسی : ترانسفورماتور، مدل سازی، تابع تبدیل، عیب یابی

مقدمه

روش تابع تبدیل یک روش مقایسه ای است. یعنی اندازه گیری های جدید باید با اندازه گیری های مرجعی مقایسه شوند. اندازه گیری منظم تابع تبدیل در زمانهای مختلف، یک بازرسی و کنترل پیوسته ای را امکان پذیر نموده و می تواند تغییرات نامطلوب ایجاد شده در سیم پیچ را در حین بهره برداری به موقع شناسایی نماید. اگر انحرافات در اندازه گیریها مشاهده شد، باید نتایج را بطور دقیق ارزیابی کرد [۲،۳]. از آنجاییکه تاکنون تاثیر عیبهای سیم پیچ ترانسفورماتور و تغییرات مربوطه در چگونگی رفتار تابع تبدیل به اندازه کافی شناخته نشده است، تصمیم بر این گرفته شد تا این تاثیرات توسط مدل کامپیوتری مورد مطالعه قرار گیرد. علاوه بر این نتایج محاسباتی یک مدل می تواند به عنوان مرجع برای مقایسه با نتایج اندازه گیری در نظر گرفته شود، به ویژه در حالتی که هیچگونه نتیجه اندازه گیری قبلی موجود نیست.

سیستمهای تشخیص عیب مدرن باید بتوانند با مشخص کردن وضعیت واقعی عملکرد ترانسفورماتور، استفاده بهینه ترانسفورماتور را با توجه به قدرت انتقالی و طول مدت کارکرد آن تضمین کنند. برای این منظور روشهای مختلف تشخیص عیب مورد تحقیق قرار گرفته و می گیرند. اندازه گیری دما، تجزیه و تحلیل گازهای حل شده در روغن، اندازه گیریهای تخلیه جزئی (الکتریکی و صوتی) و اندازه گیری تابع تبدیل از جمله این روشها می باشند. هر کدام از این روشها ویژگی خود را داشته و می توانند عیب بخصوصی را شناسایی کنند. هر چند که تشخیص تغییر شکل‌های مکانیکی در سیم پیچ با استفاده از روش تابع تبدیل امکان پذیر است، اما لازم است تا با تحقیقات بیشتر توانایی تعیین محل و نوع عیب توسط این روش مطالعه شود [۱].

مدل مشروح قابل تشخیص می باشد.

مدل مشروح در این مقاله برای ارزیابی تغییر شکل مکانیکی سیم پیچ در جهت شعاعی مورد استفاده قرار گرفته است. پارامترهای این مدل در حالتیکه سیم پیچ تغییر شکل دارد، برای نخستین بار در اینجا مورد محاسبه قرار می گیرند.

روش اندازه گیری تابع تبدیل

برای تعیین تابع تبدیل می توان اندازه گیریهای لازم را درحوزه زمان و یا در حوزه فرکانس انجام داد. هر دو روش دقت اندازه گیری تقریباً یکسانی دارند [۱]. برای تعیین مستقیم تابع تبدیل در حوزه فرکانس از آنالایزر شبکه^۱ استفاده می شود. با تحریک سینوسی نسبت تبدیل دامنه و جابجایی فاز بین سیگنالهای ورودی و خروجی تعیین می شود.

در مقاله حاضر اندازه گیریهای تابع تبدیل در حوزه زمان

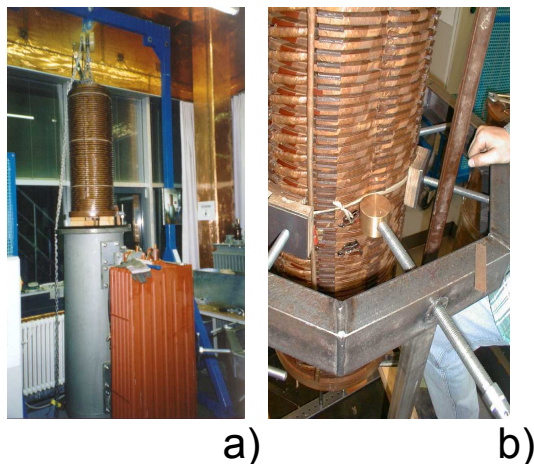
انجام شده اند. ترانسفورماتور مورد آزمایش توسط یک موج ضربه به عنوان ورودی تحریک شده و سپس خروجی متأثر از ضربه و همچنین سیگنال ورودی

تغییرات مکانیکی سیم پیچها عمدتاً از دو نوع جابجایی محوری آنها نسبت به همدیگر و تغییر شکل مکانیکی آنها در جهت شعاعی است. در عمل ثابت شده است که این دو نوع عیب تابع تبدیل ترانسفورماتور را تغییر می دهند [۴]. در مرجع [۵] جابجایی محوری سیم پیچ بوسیله یک ترانسفورماتور آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفته و شبیه سازیهای کامپیوتری توسط مدل مشروح انجام شده اند. علاوه بر این مدل مشروح در مرجع [۶] برای تشخیص محل یک اتصال حلقه در سیم پیچ مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج تحقیقات در مراجع [۵،۶] نشان می دهند که :

۱- مدل مشروح RLC که براساس ابعاد هندسی سیم پیچ تعیین می شود از حدود ۱۰ کیلوهرتز تا یک مگا هرتز دقت بسیار خوبی دارد.

۲- این مدل توانایی تعیین محل اتصال کوتاه بین دو حلقه در طول سیم پیچ را دارد.

۳- جابجایی محوری سیم پیچ در حدود ۱/۲ درصد طول محوری سیم پیچ توسط



شکل ۱: آنالیز حساسیت تابع تبدیل نسبت به تغییر شکل مکانیکی شعاعی.

(a) سیم پیچ بشقابی تغییر شکل یافته و تانک پر از روغن

(b) تجهیزات مکانیکی برای دادن تغییر

شکل مکانیکی به سیم پیچ

برای بررسی حساسیت تابع تبدیل نسبت به تغییر شکل مکانیکی شعاعی، ترانسفورماتور فوق الذکر تحت شرایط مختلف پایانه مورد آزمایش قرار گرفته و برای این منظور سیم پیچ بشقابی در چند مرحله در جهت شعاعی تغییر شکل داده شده است. (شکل b ۱). تجهیزات مکانیکی لازم برای ایجاد تغییر شکل مکانیکی در شکل

اندازه گیری می گردند. با انتقال اطلاعات به یک کامپیوتر و بعد از تحلیل FFT^2 (تبدیل فوریه سریع) بر روی سیگنالهای ورودی و خروجی و انجام عمل تقسیم، تابع تبدیل مورد نظر محاسبه می شود. برای اینکه بتوان تا حد ممکن به فرکانسهای بالایی در سیگنال تحریک دست یافت، سعی می شود که زمان پیشانی ولتاژ ضربه تا حد ممکن کوچک باشد. مقادیر بدست آمده در آزمایشها برای زمان پیشانی و زمان پشت به ترتیب بین ۱۰۰ تا ۵۰۰ نانوثانیه و ۳۰ تا ۲۰۰ میکروثانیه بوده اند.

ترانسفورماتور مورد آزمایش از دو سیم پیچ تشکیل شده است. یکی از سیم پیچها بشقابی بوده که از ۶۰ بشقاب ۱۱ حلقه ای ساخته شده و ولتاژ نامی ۱۰ کیلو ولت را دارا است. سیم پیچ دوم با ولتاژ نامی ۴۰۰ ولت، یک سیم پیچ لایه ای ۲۳ حلقه ای می باشد. ترانسفورماتور مذکور ۱/۲ مگا ولت آمپر قدرت دارد و در آن از یک استوانه توخالی آهنی که زمین شده، به عنوان هسته استفاده گردیده و در تمام آزمایشها در یک تانک پر از روغن قرار گرفته است (شکل ۱a).

سیم پیچ ، بشقابهای ششم تا پنجاه چهارم به میزان هفت درصد شعاع سیم پیچ در جهت شعاعی تغییر شکل داده شده اند.	
در چهار طرف عمود بر هم سیم پیچ ، بشقابهای ششم تا پنجاه چهارم به میزان هفت درصد شعاع سیم پیچ در جهت شعاعی تغییر شکل داده شده اند.	مرحله ۴

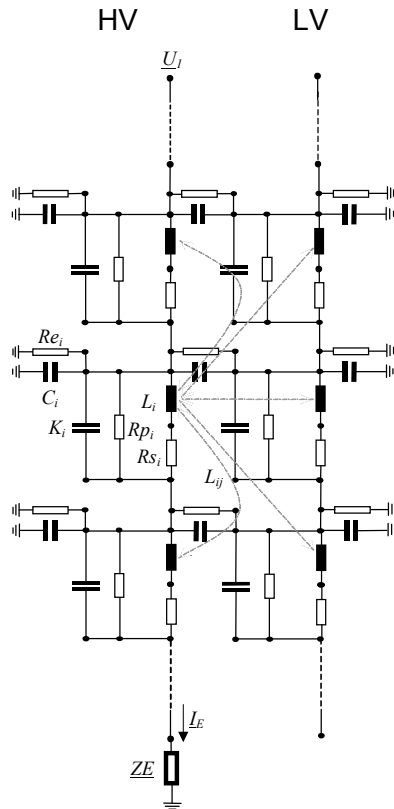
مدل مشروح

با فرض خطی بودن در حوزه فرکانسی بالاتر از ۱۰ کیلو هرتز [۷] می توان مدل RLC نشان داده شده در شکل (۲) را برای ترانسفورماتور تحت آزمایش در نظر گرفت. عناصر مربوط به واحد i در شکل مذکور به صورت مشخص تر نامگذاری شده اند. یکی از پارامترهای اساسی مدل مذکور تعداد واحد های مدل می باشد ، زیرا که دقت مدل و زمان شبیه سازی با کاهش یا افزایش تعداد واحدهای مدل تغییر می کند. در این مقاله سیم پیچ بشقابی

(b) دیده می شود. مراحل مختلف تغییر شکل مکانیکی در جدول (۱) تعریف گردیده اند.

جدول ۱ : مراحل مختلف تغییر شکل مکانیکی آزمایش شده.

مرحله تغییر شکل مکانیکی شعاعی	میزان تغییر شکل مکانیکی
مرحله ۱	در یک طرف سیم پیچ ، بشقابهای ششم تا پنجاه و چهارم به میزان هفت درصد شعاع سیم پیچ در جهت شعاعی تغییر شکل داده شده اند.
مرحله ۲	در دو طرف سیم پیچ که در جهت مقابل هم قرار دارند، بشقابهای ششم تا پنجاه و چهارم به میزان هفت درصد شعاع سیم پیچ در جهت شعاعی تغییر شکل داده شده اند.
مرحله ۳	در سه طرف عمود بر هم



شکل ۲: مدار معادل ترانسفورماتور ،

HV: سیم پیچ بشقابی و **LV**: سیم پیچ لایه ای .

مدل نشان داده شده در شکل (۲) را می توان در حوزه زمان و یا فرکانس برای محاسبه جریانهای تمام شاخه ها و ولتاژهای تمام گروه ها حل کرد. از آنجاییکه عناصر R_{e_i} ، R_{p_i} و R_{s_i} وابسته به فرکانس هستند، محاسبات در حوزه فرکانس ترجیح داده می شود.

و سیم پیچ لایه ای به ترتیب با ۳۰ و ۲۳ واحد مدل سازی شده اند.

عناصر مشخص شده در این مدل به صورت زیر تعریف می گردند:

L_i : اندوکتانس خودی واحد i -ام

L_{ij} : اندوکتانس متقابل بین واحدهای i و j

K_i : ظرفیت سری متوجه واحد i -ام

C_i : ظرفیت بین واحد i -ام و پتانسیل

زمین (هسته یا تانک) یا سیم پیچ مجاور

R_{p_i} : مقاومت اهمی برای در نظر گرفتن

تلفات عایقی واحد i -ام

R_{e_i} : مقاومت اهمی برای منظور کردن

تلفات عایقی بین واحد i -ام و پتانسیل

زمین یا سیم پیچ مجاور

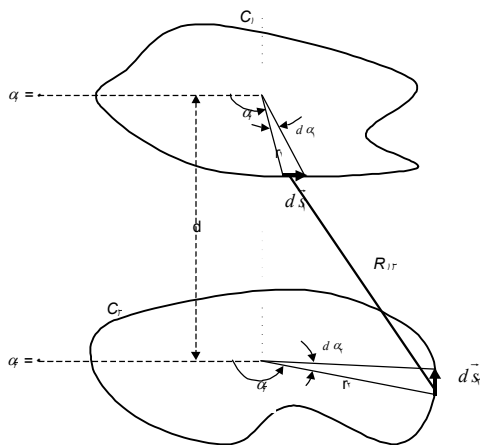
R_{s_i} : مقاومت اهمی برای وارد کردن تلفات

اهمی در واحد i -ام

Z_E : امپدانس بین انتهای سیم پیچ و زمین

تعیین پارامترهای مدل

با در نظر گرفتن برخی تقریبه‌ها و اعمال ساده‌سازیهای مناسب در ابعاد هندسی سیم پیچها، می‌توان پارامترهای مدل مشروح را به کمک فرمولهای مناسب محاسبه نمود.



اندوکتانسهای خودی و متقابل

اندوکتانسهای خودی و متقابل را می‌توان توسط معادلات ماکسول و یا به کمک بردار پتانسیل محاسبه نمود. بدین ترتیب اندوکتانس متقابل بین دو حلقه نشان داده شده در شکل (۳) به طریق زیر محاسبه می‌شود [۹،۸].

$$M_{12} = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_{C_1} \oint_{C_2} \frac{d\vec{s}_1 \cdot d\vec{s}_2}{R_{12}} \quad (1)$$

با حل انتگرال دوگانه فوق بر روی محیط کامل هر دو حلقه می‌توان معادله زیر را بدست آورد:

$$M_{12} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{r_1(\alpha_1) \cdot r_2(\alpha_2) \cdot \cos(\alpha_2 - \alpha_1)}{R_{12}(\alpha_1, \alpha_2)} d\alpha_1 \cdot d\alpha_2 \quad (2)$$

شکل ۳: دو هادی حلقه ای موازی با هم.

همه پارامترهای موجود در روابط (۱) و (۲) در شکل (۳) تعریف شده اند. برای حالتی که حلقه‌ها تغییر شکل مکانیکی داشته باشند، معادله (۲) به صورت عددی با روش دوزنقه ای محاسبه می‌شود [۱۰]. در حالتی که حلقه‌ها سالم و به صورت دایره کاملی به شعاعهای r_1 و r_2 در نظر گرفته می‌شوند، این انتگرال به صورت ساده تر زیر در می‌آید [۹،۱۱]:

$$M_{12} = \frac{2\mu_0 \sqrt{r_1 r_2}}{\sqrt{k'}} \cdot [K(k') - E(k')] \quad (3)$$

که در آن :

$$k' = \frac{1 - \sqrt{1 - k^2}}{1 + \sqrt{1 - k^2}}$$

a : طول هادی در جهت محوری، **b** :
طول هادی در جهت شعاعی و **R** : شعاع
حلقه .

برای حالتی که حلقه سالم بوده و تغییر
شکلی ندارد ،

اندوکتانس خودی بوسیله رابطه زیر

بدست

می آید [۹،۱۱] :

$$L_i = \mu_0 R \left(\ln \frac{8R}{GMA} - 2 \right) \quad (5)$$

اندوکتانس متقابل بین دو واحد مدل که
شامل n_a و n_b حلقه می باشند، به صورت
مجموع اندوکتانسهای متقابل بین تک تک
حلقه های واحد اول و حلقه های واحد
دوم محاسبه می شود. یعنی به تعداد
حاصلضرب $n_a \cdot n_b$ اندوکتانس متقابل با
هم جمع بسته می شوند تا اندوکتانس
متقابل بین دو واحد حاصل شود [۱۲] .

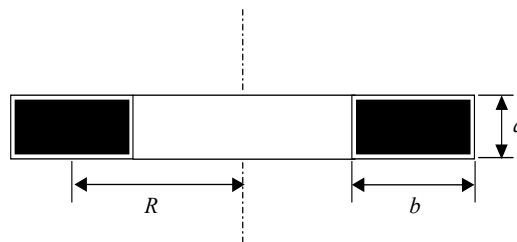
برای اینکه دقت محاسبات مربوط به
اندوکتانسهای خودی و متقابل در حالت
حلقه های تغییر شکل یافته تعیین و تعداد
اجزاء هر حلقه برای انتگرال گیری
مشخص گردد، اندوکتانسها دوباره محاسبه

$$k = \sqrt{\frac{4r_1 r_2}{(r_1 + r_2)^2 + d^2}}$$

و $K(k')$ و $E(k')$ انتگرالهای کامل بیضوی
از نوع اول و دوم می باشند.

اندوکتانس خودی یک حلقه تغییر شکل
یافته که ابعاد حالت سالم آن در شکل (۴)
تعریف شده است ، به عنوان اندوکتانس
متقابل بین دو حلقه فرضی در نظر گرفته
می شود. این دو حلقه فرضی دارای تغییر
شکل مکانیکی شعاعی مشابه حلقه مورد
نظر بوده و فاصله عمودی
بین این دو حلقه یعنی d برابر فاصله
متوسط هندسی GMD می باشد به
صورت زیر محاسبه می گردد [۹] :

$$\ln \frac{GMA}{\sqrt{(a^2 + b^2)}} = \frac{2b}{3a} \tan^{-1} \frac{a}{b} + \frac{2a}{3b} \tan^{-1} \frac{b}{a} - \frac{b^2}{12a^2} \ln \left(1 + \frac{a^2}{b^2} \right) - \frac{a^2}{12b^2} \ln \left(1 + \frac{b^2}{a^2} \right) - \frac{25}{12} \quad (4)$$



شکل ۴ : تعریف ابعاد هندسی یک
حلقه:

ظرفیتها

ظرفیت سری K_i یک واحد مدل ، از ظرفیتهای بین حلقه های آن واحد نتیجه می شود. این ظرفیت به کمک انرژی ذخیره شده در واحد مورد نظر قابل محاسبه است. برای این منظور توزیع ولتاژ بین حلقه های یک واحد ، خطی فرض می شود [۱۳].

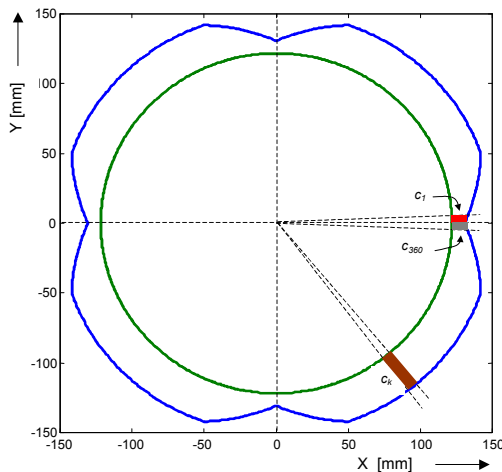
ظرفیتهای C_i ، میدان الکتریکی بین واحد مدل و پتانسیل زمین و یا یک واحد مدل و سیم پیچ مجاور را وارد محاسبه می کنند. برای حالتیکه سیم پیچ تغییر شکل مکانیکی ندارد، روابط متکی بر دو استوانه هم محور و یا دو صفحه موازی ، برای محاسبه این ظرفیتها مورد استفاده قرار می گیرند.

جدول ۲ : چند المان انتخابی از ماتریس اندوکتانس ترانسفورماتور مورد نظر در حالت های تغییر شکل یافته و بدون تغییر شکل.

شده اند. در یکی از محاسبات (B_{360}) هر حلقه تغییر شکل یافته برای انتگرال گیری عددی ۳۶۰ جزء و در دیگری (B_{720})، ۷۲۰ جزء در نظر گرفته شده است. اختلاف نسبی بین این دو محاسبه برای چند المان انتخابی از ماتریس اندوکتانس در جدول (۲) داده شده است. المانهای ۱ تا ۳۰ مربوط به سیم پیچ بشقابی و ۳۱ تا ۵۳ مربوط به سیم پیچ لایه ای می باشند. از اینرو ماتریس اندوکتانس L یک ماتریس 53×53 است.

المانهای ۴ تا ۲۷ تغییر شکل داده شده اند. مقدار حداکثر $\frac{B_{360} - B_{720}}{B_{720}} \times 100$ برابر ۳/۱۶۶ درصد است که مربوط به المان (۳۱) و $L(4)$ می باشد. به رغم زمان طولانیتر محاسبات در B_{720} اختلاف نتایج آن با B_{360} کوچک است. از اینرو در شبیه سازیهای انجام شده ، محاسبات با ۳۶۰ جزء برای هر حلقه مورد استفاده قرار گرفت. در جدول (۲) همچنین می توان مقایسه ای از مقادیر اندوکتانسها را در حالت های مختلف تغییر شکل و بدون تغییر شکل مشاهده نمود.

شکل نشان داده شده است. نتایج نشان داده شده در این جداول نشان می دهند که اختلاف کوچکی بین محاسبات با روشهای استوانه ای و دو صفحه موازی وجود دارد. همچنین نتایج محاسبات روش اجزاء محدود در این جداول دقت روش پیشنهادی را ثابت می کند.



شکل ۵ : نمایشی از روش محاسبه

ظرفیت بین دو سیم پیچ و یا ظرفیت بین یک سیم پیچ و پتانسیل زمین .

جدول ۳ : ظرفیت محاسبه شده بین دو

سیم پیچ .

L [μH]	بدون تغییر شکل	مرحله تغییر شکل					$\frac{B_{360}-B_{720}}{B_{720}}$ [%]
		مرحله ۱	مرحله ۲	مرحله ۳	مرحله ۴ (B ₃₆₀)	مرحله ۵ (B ₇₂₀)	
L(2,4)	122.5301	122.1686	121.7428	121.3169	120.8911	120.8465	0.0225
L(2,10)	24.2021	24.0881	23.9626	23.8371	23.7116	23.6984	0.0032
L(2,20)	4.1953	4.1609	4.1336	4.1064	4.0791	4.0763	5.66e-4
L(6,6)	276.9438	275.3246	273.7391	272.1564	270.5713	270.4033	0.0989
L(6,7)	188.0966	186.8225	185.6377	184.4555	183.2711	183.1607	0.0147
L(6,10)	66.2699	65.7208	65.1785	64.6385	64.0965	64.0411	0.0078
L(6,20)	7.9077	7.8091	7.7120	7.6168	7.5198	7.5098	9.98e-4
L(6,33)	4.6534	4.6325	4.6009	4.5693	4.5377	4.5406	2.2434
L(6,43)	0.2995	0.2977	0.2960	0.2943	0.2927	0.2925	0.0569
L(6,53)	0.0494	0.0489	0.0486	0.0482	0.0479	0.0479	8.75e-4

در حالتیکه سیم پیچ تغییر شکل مکانیکی دارد ، ظرفیت C_i به عنوان مجموع ظرفیتهای جزئی که میدان الکتریکی آنها را می توان یکنواخت در نظر گرفت ، محاسبه شده است. شکل (۵) این مفهوم را برای محاسبه ظرفیت بین دو سیم پیچ نشان می دهد. این ظرفیت از مجموع ۳۶۰ ظرفیت جزئی با صفحات موازی حاصل گردیده است. لازم به ذکر است که تعداد ظرفیتهای جزئی را نیز می توان برای حصول یک دقت مطلوب ، بیشتر یا کمتر انتخاب نمود.

$$C_i = \sum_{k=1}^{k=360} C_k \quad (6)$$

در جداول (۳ و ۴) ظرفیت محاسبه شده بین دو سیم پیچ و بین سیم پیچ های بشقابی و تانک برای مراحل مختلف تغییر

(b) تلفات مربوط به اثر پوستی^۴ و اثر هم
جواری^۵ در سیم پیچها
(c) تلفات عایقی

جدول ۴ : ظرفیت محاسبه شده بین سیم
پیچ بشقابی و تانک.

مرحله تغییر شکل	[nF/m]	
	روش المانهای محدود	محاسبه تحلیلی
بدون تغییر شکل	0.3810	خازن صفحه ای $\left(\epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} \right)$ 0.3821
		خازن استوانه ای $\left(\frac{2\pi \epsilon_0 \epsilon_r}{\ln \frac{r_o}{r_i}} \right)$ 0.3798
مرحله ۱	0.3784	0.3763
مرحله ۲	0.3661	0.3643
مرحله ۳	0.3548	0.3523
مرحله ۴	0.3431	0.3403

A: سطح صفحات موازی ، d : فاصله بین
دو صفحه
 r_0 : شعاع استوانه بیرونی ، r_i : شعاع
استوانه درونی

از آنجاییکه در فرکانسهای حدوداً بالاتر از
۱۰ کیلوهرتز شار مغناطیسی وارد هسته
نمی شود، از تلفات هسته در این فرکانسها
چشم پوشی می گردد. Rs_i برای در نظر
گرفتن تلفات اهمی و اثرات پوستی و هم

مرحله تغییر شکل	[nF/m]	
	روش المانهای محدود	محاسبه تحلیلی
بدون تغییر شکل	0.5886	خازن صفحه ای $\left(\epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} \right)$ 0.5898
		خازن استوانه ای $\left(\frac{2\pi \epsilon_0 \epsilon_r}{\ln \frac{r_o}{r_i}} \right)$ 0.5877
مرحله ۱	0.6192	0.6173
مرحله ۲	0.6593	0.6568
مرحله ۳	0.6998	0.6962
مرحله ۴	0.7387	0.7356

A : سطح صفحات موازی ، d : فاصله بین
دو صفحه
 r_0 : شعاع استوانه بیرونی ، r_i : شعاع
استوانه درونی

مقاومتها

میدانهای الکتریکی و مغناطیسی سیم
پیچهای ترانسفورماتور تحت تأثیر میدانهای
مختلفی می باشند، که عبارتند از :

- تلفات هسته :

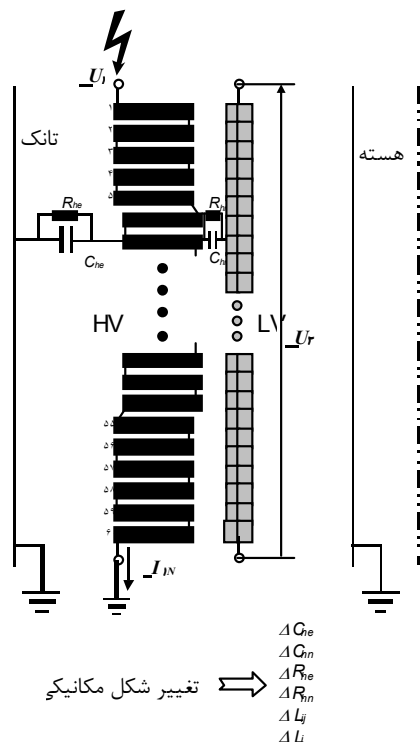
(a) تلفات هیستریزس

(b) تلفات جریانهای فوکو

- تلفات در سیم پیچ و مواد عایقی :

(a) تلفات اهمی در سیم پیچها

فرکانسهای مختلف و در مراحل مختلف تغییر شکل داده شده اند.



شکل ۶: تغییرات پارامترهای مدل در اثر تغییر شکل مکانیکی سیم پیچ.

توابع تبدیل مختلفی در این کار تحقیقاتی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته اند. مطالعات انجام شده نشان می دهند که تمامی توابع تبدیل حساسیت تقریباً یکسانی نسبت به تغییر شکل در سیم پیچ دارند. در این مقاله نتایج تعدادی از توابع تبدیل نشان داده می شوند که به کمک

جواری در مدل وارد شده است. مقاومت اهمی به کمک ابعاد هادی محاسبه شده و سپس توسط روابط مناسبی که در مرجع [۱۴] داده شده اند، اثرات پوستی و هم جواری در نظر گرفته می شوند.

بدلیل وابستگی اثرات پوستی و هم جواری به فرکانس، R_{si} یک مقاومت وابسته به فرکانس است. R_{pi} مقاومتی وابسته به فرکانس بوده که به منظور وارد کردن تلفات عایقی در سیم پیچ اعمال می گردد. R_{e_i} نیز تلفات عایق بین دو سیم پیچ و یا بین سیم پیچ و پتانسیل زمین را در مدلسازی وارد می نماید. تمامی مقاومتها به کمک روابط داده شده در مرجع [۱۳] در فرکانسهای مختلف محاسبه شده اند و سپس در مدل مشروح، که در حوزه فرکانس تحلیل شده است، مورد استفاده قرار گرفته اند.

در اثر تغییر شکل مکانیکی در سیم پیچ میدانهای الکتریکی و مغناطیسی در ساختار مورد نظر تغییر می کند و متعاقباً المانهای ماتریس اندوکتانس، ظرفیتهای C_{hn} و C_{he} و همچنین مقاومتهای موازی با آنها یعنی R_{hn} و R_{he} تغییر می یابند (شکل ۶). در جدول (۵) مقادیر این مقاومتها در

a) b)

شکل ۷ : توابع تبدیل و مدارهای مطالعه شده.

تابع تبدیل محاسبه شده از ولتاژ بین دو پایانه سیم پیچ لایه ای به عنوان خروجی و ولتاژ اعمالی به سیم پیچ بشقابی به عنوان ورودی :

$$TF_{U_2}(f) = \frac{U_2(f)}{U_1(f)} \quad (۸)$$

با توجه به شکل (۷) بقیه توابع تبدیل به صورت زیر تعریف می شوند :

$$TF_{I_{1a}}(f) = \frac{I_{1a}(f)}{U_1(f)}, \quad TF_{I_{1b}}(f) = \frac{I_{1b}(f)}{U_1(f)},$$

$$TF_{U_{2N}}(f) = \frac{U_{2N}(f)}{U_1(f)}, \quad TF_{I_{U1E}}(f) = \frac{I_{U1E}(f)}{U_1(f)}, \quad (۹)$$

مقایسه بین نتایج اندازه گیریها و محاسبات

در شکل (۸) نتایج اندازه گیری و شبیه سازی برای تابع تبدیل جریان سیم زمین نسبت به ولتاژ ورودی با همدیگر مقایسه شده اند. با توجه به این شکل می توان دریافت که فرکانسهای تشدید به

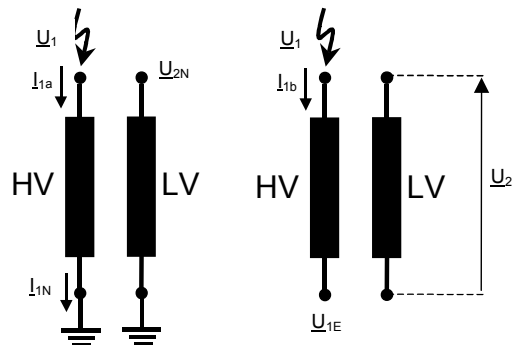
شکل (۷) به صورت زیر تعریف می شوند :

تابع تبدیل محاسبه شده از جریان سیم زمین سیم پیچ بشقابی بع عنوان خروجی و ولتاژ اعمالی به همان سیم پیچ بع عنوان ورودی :

$$TF_{I_{1N}}(f) = \frac{I_{1N}(f)}{U_1(f)} \quad (۷)$$

جدول ۵ : مقاومتهای بین یک واحد و پتانسیل زمین و نیز بین دو واحد مدل از دو سیم پیچ مختلف در حالت های مختلف تغییر شکل مکانیکی .

Rp _i [MΩ]	فرکانس [MHz]										
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	
بین HV و HV	بدون تغییر شکل	12.2671	3.8913	1.8997	1.1239	0.7424	0.5268	0.3932	0.3046	0.2430	0.1983
	مرحله ۱	12.4562	3.9513	1.9290	1.1412	0.7538	0.5349	0.3993	0.3093	0.2467	0.2014
	مرحله ۲	12.8665	4.0814	1.9925	1.1788	0.7787	0.5525	0.4124	0.3195	0.2549	0.2080
	مرحله ۳	13.3047	4.2205	2.0604	1.2190	0.8052	0.5714	0.4265	0.3304	0.2636	0.2151
بین HV و LV	بدون تغییر شکل	8.6849	2.7550	1.3450	0.7957	0.5256	0.3730	0.2784	0.2157	0.1720	0.1404
	مرحله ۱	8.2980	2.6323	1.2851	0.7603	0.5022	0.3564	0.2660	0.2061	0.1643	0.1341
	مرحله ۲	7.7990	2.4740	1.2078	0.7145	0.4720	0.3350	0.2500	0.1937	0.1545	0.1261
	مرحله ۳	7.3576	2.3340	1.1394	0.6741	0.4453	0.3160	0.2359	0.1827	0.1457	0.1189
بین LV و هسته	بدون تغییر شکل	1.5100	0.4790	0.2339	0.1384	0.0914	0.0648	0.0484	0.0375	0.0299	0.0244



نشان می دهد که میزان و جهت تغییر اکثر تشدیدها به خوبی توسط مدل حاصل شده اند. باید توجه داشت که تغییر مقدار مطلق دامنه ها در بعضی موارد از نتایج اندازه گیری متفاوتند.

شکل (۹) همچنین نشان می دهد که در اثر تغییر شکل مکانیکی، تابع تبدیل در کل محدوده فرکانسی مطالعه شده تغییر می یابد.

در مورد توابع تبدیل مربوط به ولتاژ انتقالی، شکل (۹c)

نشان می دهد که در فرکانسهای بالا، سیگنالهای اندازه گیری شده دارای نویز می باشند. همچنین در فرکانسهای تشدید بین ۲۰۰ تا ۳۰۰ و نیز بین ۴۰۰ تا ۵۰۰ کیلوهرتز دامنه های مربوط به اندازه گیری کمتر از مقادیر مربوطه در محاسبات می باشند (شکلهای ۹c و ۹d).

اثرات تک تک پارامترهای تبدیل مدل روی توابع تبدیل جداگانه مورد مطالعه قرار گرفته اند. همه توابع تبدیل نشان می دهند که می توان از اثر تغییرات ماتریس اندوکتانس روی توابع تبدیل چشم پوشی کرد. به عنوان مثال در شکل (۱۰) می توان تابع تبدیل جریان سیم زمین نسبت به ولتاژ

خوبی توسط مدل مشروح شبیه سازی گردیده و علاوه بر مقدار فرکانس، مقدار دامنه نیز در فرکانسهای تشدید با دقت کافی محاسبه شده اند.

اختلافهای جزئی بین نتایج اندازه گیری و محاسبه شده در شکل (۸) می تواند از عوامل زیر ناشی شوند:

- میدانهای الکتریکی و مغناطیسی پیوسته در ترانسفورماتور با عناصر فشرده RLC در مدل منظور شده اند که باعث محدود شدن دقت مدل می شود.

- برخی از تأثیرات موجود در سیستم اندازه گیری که نمی توان در مدلسازی منظور کرد. به عنوان مثال می توان میراثی موجود در کابلها و رفتار فرکانسی مبدلها را نام برد.

- تولرانسهای موجود در ساخت سیم پیچها که باعث تفاوت ابعاد واقعی هندسی سیم پیچها از مقادیر در نظر گرفته شده در طراحی می گردد.

شکل (۹) نتایج آنالیز حساسیت تابع تبدیل نسبت به تغییر شکل مکانیکی، حاصل شده از اندازه گیریها و محاسبات را نشان می دهد. مقایسه اندازه گیریها و محاسبات

درکارهای آتی می توان چنین اثراتی را توسط مدل مشروح بررسی کرد، بدون اینکه مجبور به انجام آزمایشهای طاقت فرسا و گران قیمت شد. در این مقاله همچنین نشان داده شد که می توان از اثرات تغییرات ماتریس اندوکتانس در مطالعات مربوط به تغییر شکل مکانیکی در جهت شعاعی چشم پوشی کرد و لذا زمان محاسباتی را به میزان زیادی کاهش داد.

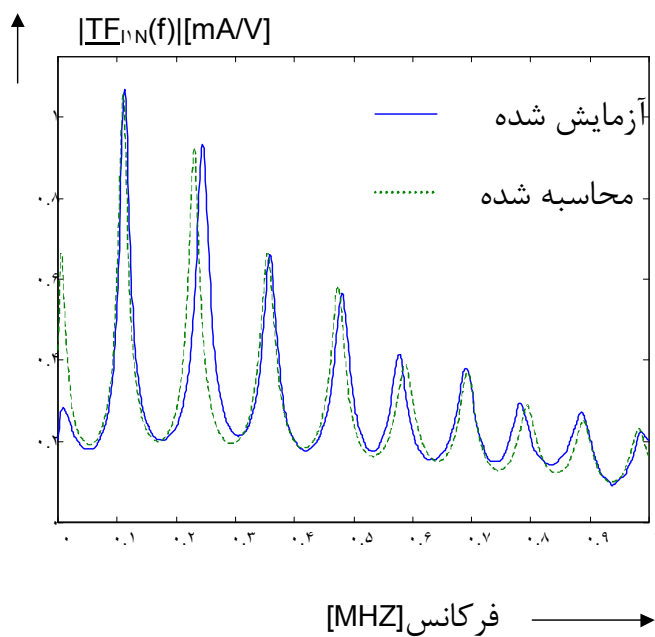
سپاسگزاری

کار حاضر در نتیجه اعطای بورس تحصیلی به نویسنده اول مقاله بوده است. بدینوسیله از موسسه تبادل فرهنگی آلمان (DAAD) در مورد فراهم نمودن زمینه انجام این کار تحقیقاتی نهایت تشکر و قدردانی می شود.

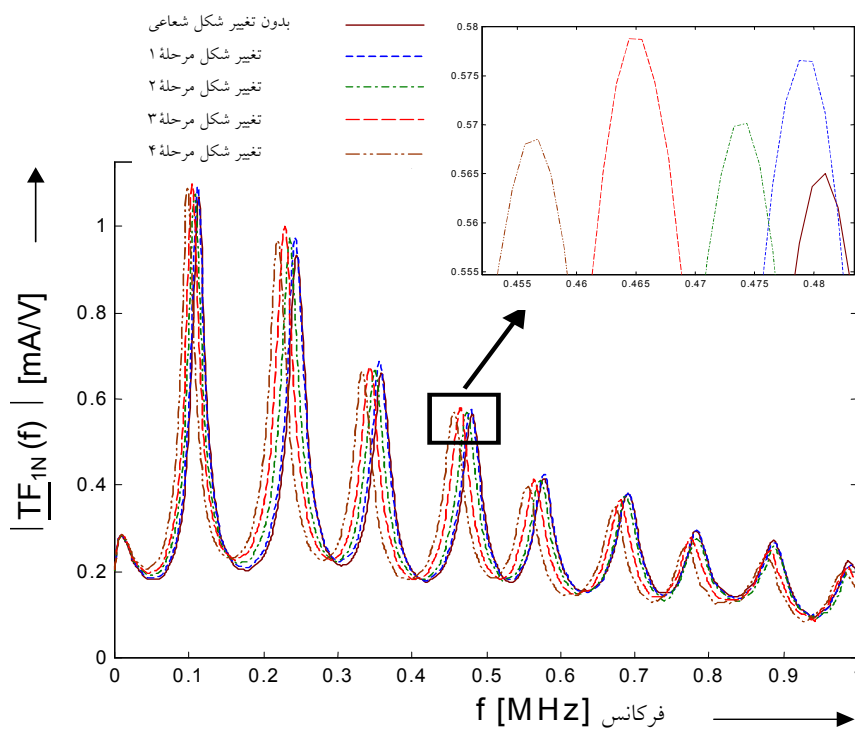
ورودی را در دو حالت محاسبه شده، با در نظر گرفتن و بدون در نظر گرفتن تغییر ماتریس اندوکتانس، مشاهده کرد.

نتیجه گیری

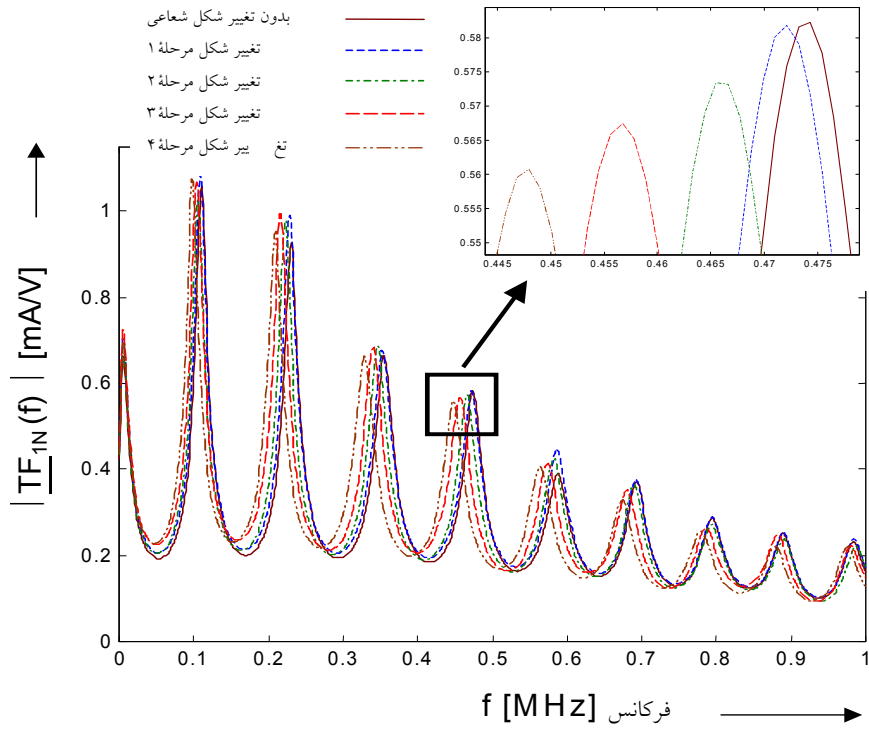
مدل مشروح پیشنهادی برای ترانسفورماتور تحت آزمایش نشان می دهد که رفتار فرکانسی سیم پیچها توسط این مدل در محدوده فرکانسی تا یک مگاهرتز قابل محاسبه و شبیه سازی است. این مدل مشخصه های اساسی توابع تبدیل (فرکانسهای تشدید و دامنه در فرکانسهای تشدید) را به خوبی استنتاج می کند. در اثر مدلسازی میدانهای پیوسته با عناصر فشرده و اثرات جانبی مربوط به سیستم اندازه گیری، نمی توان تطابق کاملی بین اندازه گیریها و محاسبات انتظار داشت. مدل مشروح قادر است به خوبی اثرات ناشی از تغییر شکل مکانیکی سیم پیچها روی توابع تبدیل را نشان دهد. در نتیجه



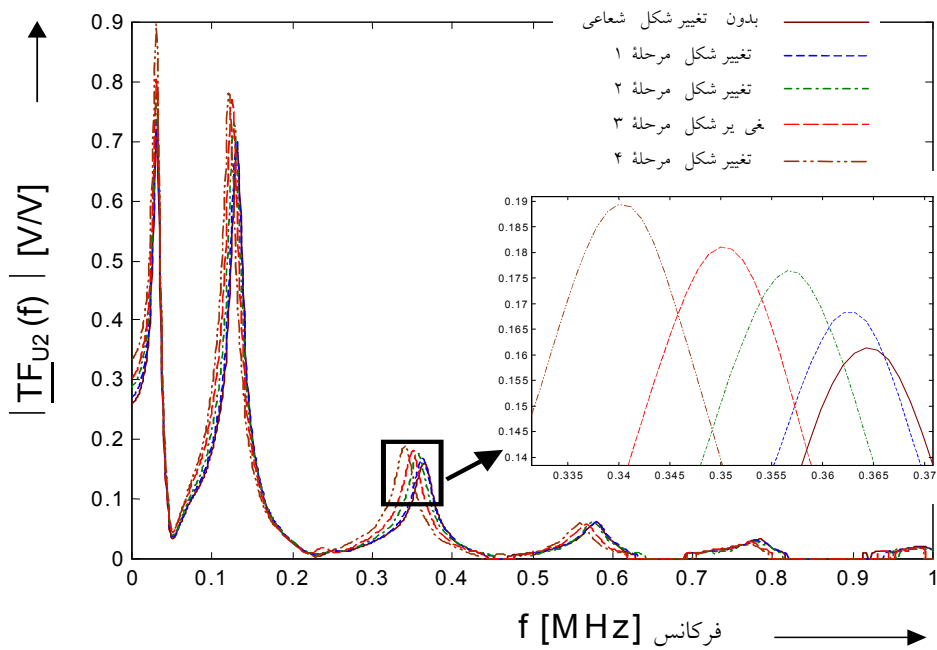
شکل ۸ : مقایسه بین نتایج اندازه گیری و محاسبه شده برای تابع تبدیل جریان سیم زمین نسبت به ولتاژ ورودی.



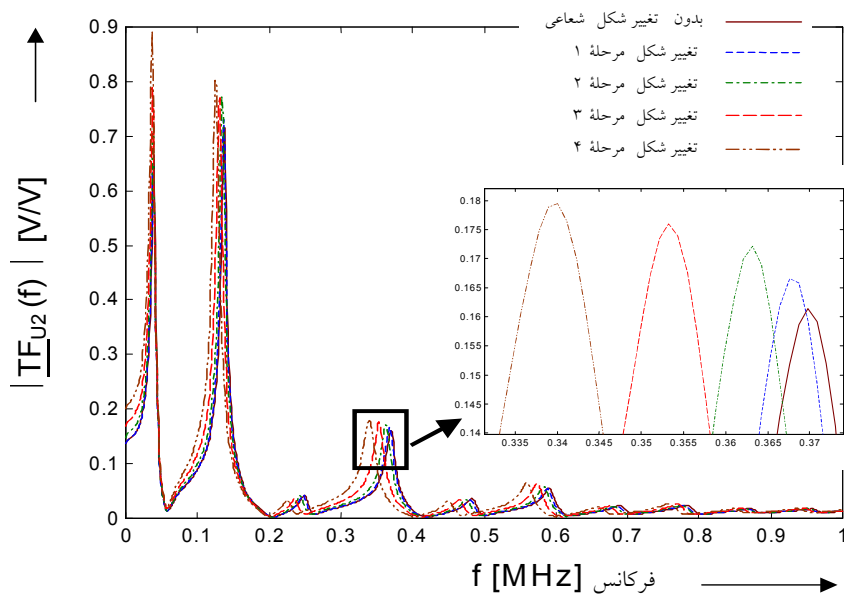
۹ (a)



۹ (b)



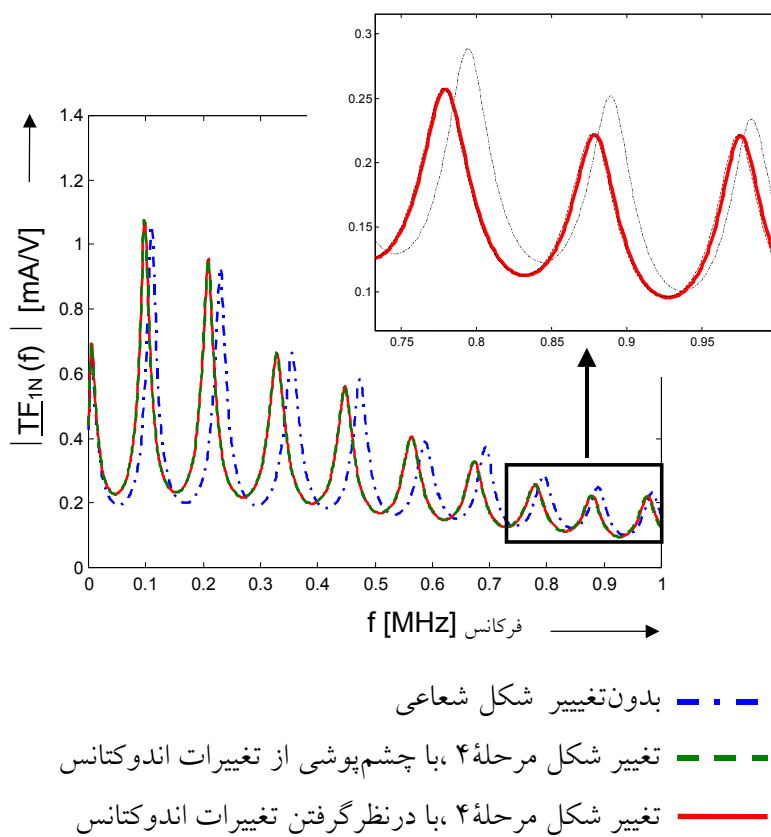
۹ (c)



۹ (d)

شکل ۹: مقایسه بین اندازه گیریها و محاسبات برای آنالیز حساسیت تابع تبدیل نسبت به تغییر شکل مکانیکی:

تابع تبدیل جریان سیم زمین نسبت به ولتاژ ورودی (**a**: اندازه گیری، **b**: محاسبه)
 تابع تبدیل ولتاژ انتقالی به سیم پیچ لایه ای نسبت به ولتاژ ورودی (**c**: اندازه گیری،
d: محاسبه)



شکل ۱۰: اثر تغییر ماتریس اندوکتانس روی تابع تبدیل جریان سیم زمین نسبت به ولتاژ اعمالی.

مراجع

- 1 - Leibfried, T. (1999). "Monitoring of power transformers using the transfer function method." *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol.14, No.4, PP. 1333-1341.
- 2 - Christian, J. and Sundermann, U. (1999). "Beurteilung des zustandes von transformatoren mit der ubertragungsfunktion." *Micafil Symposium*, Stuttgart, Germany, PP. 29-30.
- 3 - Leibfried, T. and Feser, K. (1993). "Insulation diagnostics of transformers by means of the transfer function method." *8th International Symposium on High Voltage Engineering*, Yokohama, Japan, Vol. 3, PP. 129-132.
- 4 - Feser, K., et al. (2000). "The transfer function method for detection of winding displacements on power transformers after transport, short circuit or 30 years of service." *Cigre, WG.*, Vol. 12/33-04, PP. 1-12.
- 5 - Rahimpour, E., Christian, J., Feser, K. and Mohseni, H. (2001). "Die fhigkeit eines detaillierten modells zur diagnose axialer verschiebungen in transformatorwicklungen mit hilfe von ubertragungsfunktionen." *Elektrical Engineering*, Vol. 83, No.1-2, PP. 55-61.
- 6 - Rahimpour, E., Christian, J., Feser, K. and Mohseni, H. (2000). "Modellierung der transformatorwicklung zur berechnung der ubertragungsfunktion für die diagnose von transformatoren." *Elektrie*, Vol.54, No.1-2, PP. 18-30.

- 7 - Gharehpetian, G. B. (1998). "Hybrid modeling of inhomogeneous transformer windings for very fast transient over voltage studies." *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol 13, No. 1, PP. 157-163.
- 8 - Wolff, I. (1997). *Maxwellsche theorie, grundlagen und anwendungen*. Springer Verlag, Berlin.
- 9 - Gray, A. (1967). *Absolute measurements in electricity and magnetism*. Dover Publications, New York.
- 10 - Isaacson, E. and Keller, H.B. (1973). *Analyse numerischer verfahren*. Verlag Harri Deutsch, Zürich, Frankfurt am Main.
- 11 - Miki, A., Hosoya, T. and Okuyama, K. (1978). "A calculation method for impulse voltage distribution and transferred voltage in transformer windings." *IEEE Trans. on Power App. and Sys.*, Vol. PAS-97, No. 3, PP. 930-939.
- 12 - Wirgau, K.A. (1976). "Inductance calculation of an air-core disk winding." *IEEE Trans. on Power App. and Sys.* Vol. PAS-95, No. 1, PP. 394-399.
- 13 - Nothaft, M. (1995). *Untersuchung der resonanzvorgange in wicklungen von hochspannungsleistungstransformatoren mittels eines detaillierten models*. Dissertation, TH Karlsruhe, Germany.
- 14 - Dietrich, W. (1988). "Berechnung der wirbelstromverluste in den wicklungen von mehrwicklungstransformatoren." *Etz-Archiv*, Vol. 10, No. 10, PP. 309-317.

واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1 - Network Analyzer
- 2 – Fast Fourier Transform
- 3 – Geometric Mean Distance
- 4 – Skin Effect
- 5 – Proximity Effect