دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(پلی تکنیک تهران)

دانشکده مهندسی برق

گروه مهندسی قدرت

پایان‌نامه کارشناسی ارشد

تشخیص جابجایی مکانیکی سیم پیچ فشار قوی ترانسفورماتور قدرت به کمک مدل مشروح

نگارنده:

علی شیروانی بروجنی

استاد راهنما:

دکتر گئورگ قره پتیان

تابستان ۸۶

بسمه تعالي

تـاريخ: .....

شماره مدرک

دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)

فـرم اطلاعات پایان‌نـامه
کارشنـاسی- ارشد و دکتـرا
کتابخـانه مرکـزی

مشخصات دانشجو	نام خانوادگی : شیروانی بروجنی	نام : علی	شماره دانشجویی: ۸۴۱۲۳۱۲۲	
	دانشکده: برق	رشته تحصیلی: برق-قدرت	گروه: قدرت	
عنوان	تشخیص جابجایی مکانیکی سیم پیچ فشار قوی ترانسفورماتور قدرت به کمک مدل مشروح			
Title :	**Detection of Mechanical Displacement in HV Transformer Winding Using Detailed Model**			

استاد راهنما	نام خانوادگی : قره‌پتیان نام: گئورگ	درجه و رتبه دانشیار	نام خانوادگی : نام:	درجه و رتبه
استاد مشاور	نام خانوادگی : نام	درجه و رتبه	نام خانوادگی : نام:	درجه و رتبه

دانشنامه	کارشناسی○ ارشد ✹ دکترا ○	سال تحصیلی:
نوع پروژه	کاربردی ✹ بنیادی○ توسعه ای○ نظری○	

مشخصات ظاهری	تعداد صفحات:۱۰۲	تصویر: ✹	جدول: ✹	نمودار: ✹	نقشه: ○	واژه‌نامه: ○	تعداد مراجع: ۴۴	تعداد ضمائم: ○۲

زبان متن	فارسی ✹ انگلیسی ○	چکیده	فارسی ✹	انگلیسی ✹
یاداشت	لوح فشرده ✹ دیسکت فلاپی ○			
توصیفگر				
کلید واژه فارسی				

چکیده

ترانسفورماتورهای بزرگ به عنوان عناصر ارتباطی بین نیروگاهها و شبکه‌های توزیع انرژی یا بین شبکه‌ها با سطوح ولتاژ مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند تا انرژی الکتریکی به طور اقتصادی توزیع شود. لذا همواره در دسترس و سالم بودن آنها پایه و اساس یک توزیع انرژی مطمئن می‌باشد. در این تحقیق روشی برای تشخیص محل و مقدار جابجایی های سیم پیچ فشار قوی ترانسفورماتور قدرت ارائه شده است. در مواقع اتصال کوتاه و یا برخورد صاعقه به ترمینالهای ترانسفورماتور و به دلیل عبور جریان های بسیار زیاد از سیم پیچ ها، نیروهای شدیدی به آنها وارد می آید که در بعضی مواقع باعث جابجایی سیم پیچ می شود. در این تحقیق پس از مدل سازی ترانسفورماتور به روش مشروح، با شبیه سازی حادثه اتفاق افتاده برای ترانسفورماتور، نحوه توزیع نیروهای الکترومغناطیسی در طول سیم پیچ محاسبه شده و از آن طریق نقاط مستعد برای ایجاد جابجایی مشخص می‌شوند. سپس با شبیه سازی انواع عیب‌های از پیش تعیین شده و مقایسه با نتایج اندازه‌گیری، نوع جابجایی ایجاد شده در سیم پیچ مشخص خواهد شد.

شبیه سازی ها و نتایج حاصل شده نشان می‌دهند که این روش به خوبی قادر است محل و مقدار دقیق انواع جابجایی های ایجاد شده در اثر نیروهای الکترومغناطیسی را به خوبی تشخیص دهد.

فهرست مطالب

فصل ۱- مقدمه _____ ۶

۱-۱- مقدمه‌ای بر مسئله موجود ۶

۱-۲- وضعیت کنونی موضوع ۷

۱-۳- هدف پروژه ۸

فصل ۲- روش‌های مدل سازی ترانسفورماتور برای مطالعات VFTO _____ ۱۰

۲-۱- مقدمه ۱۰

۲-۱-۱- بررسی تحقیقات انجام شده ۱۲

۲-۱-۱-۱- دیدگاه فیزیکی ۱۲

۲-۱-۱-۲- دیدگاه جعبه سیاه (Black-Box) ۱۴

۲-۲- بررسی روش‌های مدل‌سازی جعبه سیاه ۱۵

۲-۲-۱- روش تحلیل Modal ۱۶

۲-۲-۲- روش Pole-Removal ۱۸

۲-۳- بررسی روش‌های مدل‌سازی فیزیکی ۲۱

۲-۳-۱- مدل خط انتقال چند فازه ۲۲

۲-۳-۲- مدل مشروح (Detailed) ۲۴

۲-۴- انتخاب مناسب‌ترین روش مدل‌سازی ۲۵

فصل ۳- مدل مشروح ترانسفورماتور و تخمین پارامترهای آن _____ ۲۶

۳-۱- محاسبهٔ ظرفیتهای الکتریکی ۲۶

۳-۱-۱- تخمین ظرفیت طولی یک سیم‌پیچ بشقابی واژگون ۲۷

۳-۱-۲- تخمین ظرفیت طولی یک سیم‌پیچ بشقابی درهم ۲۹

۳-۱-۳- تخمین ظرفیت الکتریکی بین دو سیم‌پیچ و یا بین یک سیم‌پیچ و زمین ۳۰

۳-۲- محاسبهٔ اندوکتانسهای خودی و متقابل ۳۱

۳-۲-۱- تخمین اندوکتانس متقابل ۳۱

۳-۲-۲- تخمین اندوکتانس خودی ۳۲

۳-۳- تخمین مقاومت‌های موازی ۳۳

۳-۴- تخمین مقاومت‌های سری ۳۳

۳-۴-۱- مؤلفه‌های شارهای پراکندگی ۳۴

۳-۴-۲- افزایش مقاومت سری در اثر رفتار میدان پراکندگی ۳۶

۳-۵- مدلسازی مقاومتهای وابسته به فرکانس ۳۸

۳-۶- تأثیرات عیب‌های مورد تحقیق روی پارامترهای مدل مشروح ۳۹

فصل ۴- محاسبه نیروهای الکترومغناطیسی ۴۱

۴-۱- مقدمه ۴۱

۴-۲- نیروی مغناطیسی بین مدارهای بسته حامل جریان ۴۱

۴-۲-۱- محاسبه نیرو بین دو حلقه حامل جریان ۴۱

۴-۲-۲- محاسبات نیرو با استفاده از مفهوم انرژی ۴۵

۴-۳- محاسبات نیروهای مغناطیسی بین سین پیچهای هسته هوایی ۴۸

۴-۳-۱- محاسبه نیروهای مغناطیسی بین دو حلقه حامل جریان ۴۸

۴-۳-۲- محاسبه نیروهای مغناطیسی بین دو صفحه شامل کلافهای n حلقه ای حامل جریان ۴۹

۴-۳-۳- محاسبه نیروهای مغناطیسی بین صفحات با حلقه های متحد المرکز ۵۲

۴-۳-۴- محاسبه نیروی مغناطیسی بین دو صفحه با سیم پیچهای حلزونی ۵۲

۴-۳-۴-۱- روش تحلیلی کلی ۵۳

۴-۳-۴-۲- استفاده از حلقه های متحد المرکز به جای سیم پیچها ۵۷

فصل ۵- مانیتورینگ ترانسفورماتورها و تشخیص محل عیب ۵۹

۵-۱- مقدمه ۵۹

۵-۲- وضعیت و سیر تکاملی مانیتورینگ ترانسفورماتورها ۶۰

۵-۳- مراحل پیشرفت روش تابع تبدیل برای مانیتورینگ ترانسفورماتورها ۶۳

۵-۳-۱- تابع تبدیل برای آزمایش ترانسفورماتورهای بزرگ ۶۳

۵-۳-۲- تابع تبدیل برای مانیتورینگ ۶۴

۵-۳-۲-۱- تابع تبدیل برای مانیتورینگ به صورت همزمان با بهره‌برداری و در حالت خروج از مدار ۶۵

۵-۳-۲-۲- تابع تبدیل به عنوان یک روش تشخیص عیب مقایسه‌ای ۶۵

۵-۴- محاسبهٔ تابع تبدیل از داده‌های اندازه‌گیری شده ۶۶

۵-۴-۱- وزن دار کردن با یک تابع نمائی ۶۷

۵-۴-۲- به کارگیری یک فیلتر دیجیتالی بالاگذر ۶۹

۵-۴-۳- مقایسه روشها ۷۰

۵-۵- روشهای اندازه‌گیری ۷۱

5-6- تشخیص محل عیب ۷۳

۵-۶-۱- مقادیر ورودی و ابعاد مورد نیاز ۷۶

۵-۶-۲- تعیین پارامترهای مدل مشروح ۷۸

۵-۶-۳- محاسبه، تحلیل و بررسی نیروهای الکترومغناطیسی و تعیین فضای جستجو ۷۹

۵-۶-۴- به کارگیری FRA و کشف نقطه معیوب ۸۳

فصل ۶- نتیجه گیری ۸۷

مراجع ۸۸

پیوست ۲- مقدمه ای بر نرم افزار EMTP ۹۶

فهرست جداول

جدول ۵- 1- پارامترهای ترانسفورماتور ۷۶
جدول ۵- 2- بعضی عناصر ماتریس القای متقابل قبل و بعد از جابجایی ۷۸
جدول ۵- 3- خازن محاسبه شده بین واحد های مختلف قبل و بعد از جابه‌جایی ۷۹
جدول ۵- 4- مقدار $ASLE$ برای حالت های مختلف جابه‌جایی ۸۶

فهرست اشکال

شکل ۲-۱- تاریخچهٔ بروز اضافه ولتاژها در داخل سیم‌پیچ[۱۷] ۱۱
شکل ۲-۲- مدار معادل تحیل مُدال[۱۷] ۱۷
شکل ۲-۳- سیستم n - فازه خط انتقال به عنوان مدل فرکانس بالای یک سیم‌پیچ[۱۷] ۲۲
شکل ۲-۴- مدار معادل یک واحد سیم‌پیچی در مدل مشروح و ترانسفورماتور ۲۴
شکل ۳-۱- a) زوج دیسک واژگون، b) زوج دیسک درهم[۱۵] ۲۷
شکل ۳-۲- سیم‌پیچ بشقابی برای نمایش ظرفیتهای بین بشقابها و پتانسیل زمین (هسته یا تانک) و یا سیم‌پیچ مجاور[۱۶] ۲۷
شکل ۳-۳- توزیع ظرفیتهای الکتریکی در یک سیم‌پیچ بشقابی واژگون[۱۵] ۲۸
شکل ۳-۴- دو حلقهٔ موازی[۳۶] ۳۱
شکل ۳-۵- تعریف پارامترهای یک حلقه b :طول محوری هادی، aطول شعاعی هادی و R شعاع حلقه[۳۶] ۳۲
شکل ۳-۶- هادی چهارگوش در یک واحد سیم‌پیچ برای محاسبهٔ مؤلفه‌های شدت میدان مغناطیسی[۱۶] ۳۴
شکل ۳-۷- توزیع مؤلفه‌های طولی شدت میدان پراکندگی در یک بشقاب چهارحلقه‌ای[۱۶] ۳۵
شکل ۳-۸- توزیع مؤلفه‌های عرضی شدت میدان پراکندگی در یک مجموعهٔ چهار حلقه‌ای[۱۶] ۳۵
شکل ۳-۹- توزیع مؤلفه‌های طولی و عرضی شدت میدان مغناطیسی یک سیم‌پیچ بشقابی[۱۶] ۳۶
شکل ۳-۱۰- مدلسازی مقاومت بسته به فرکانس ۳۸
شکل ۳-۱۱- تأثیرات تغییرات مکانیکی سیم‌پیچ‌ها روی پارامترهای مدل مشروح[۱۶] ۴۰
شکل ۴-۱- دو حلقه دلخواه هم محور در فاصله z از هم ۴۲
شکل ۴-۲- تعیین پتانسیل برداری حلقه حامل جریانی به شعاع a در نقطه دلخواه p ۴۲
شکل ۴-۳- دو حلقه حامل جریان به شعاعهای a و b در فاصله z از هم ۴۹
شکل ۴-۴- دو کلاف با n_1 و n_2 دور به هم فشرده ۵۰
شکل ۴-۵- تقسیم دو کویل به قسمت های مختلف در جهت شعاعی و عمودی ۵۱
شکل ۴-۶- دو سیم پیچ با حلقه های متحدالمرکز ۵۲
شکل ۴-۷- دو سیم پیچ حلزونی در فاصله z از هم ۵۳
شکل ۴-۸- محاسبه پتانسیل مغناطیسی برداری ناشی از سیم پیچ حلزونی در نقطه دلخواه p ۵۳
شکل ۵-۱- نتیجه آماری از انواع عیبهای مرسوم در ترانسفورماتور ۶۱
شکل ۵-۲- مدلسازی رفتار نوسانی سیم‌پیچهای ترانسفورماتور بوسیلهٔ مدارهای تشدید سری RLC ۶۹
شکل ۵-۳- - نمایش ترانسفورماتور به عنوان شبکهٔ RLCM مختلط ۷۱
شکل ۵-۴- تعیین تابع تبدیل با اندازه‌گیریهای انجام شده در حوزهٔ فرکانس[۱۶] ۷۱
شکل ۵-۵- تعیین تابع تبدیل با اندازه‌گیریهای انجام شده در حوزهٔ زمان[۳۶] ۷۲
شکل ۵-۶- روشهای مختلف مونیتورینگ ترانسفورماتور ۷۵
شکل ۵-۷- نمای سیم پیچی ترانسفورماتور مورد آزمایش الف:نمای کلی ۷۷
شکل ۵-۸- جریان واحد های اول، پنجم، هشتم و شانزدهم ۸۱
شکل ۵-۹- نیروی وارد بر دیسک های ۸،۷،۲۷ ..... ۸۱
شکل ۵-۱۰- توزیع نیروی الکتریکی در زمان های 120، 260، 357ms ۸۲
شکل ۵-۱۱- مقایسه تابع تبدیل مرجع و تابع تبدیل متناظر با نقاط کاندید جریان سیم زمین ۸۶
شکل پ۱-1- سیم‌پیچ همگن با هسته ۹۱
شکل پ۲-1- نمونه ای از فایل ورودی EMTP (4_2.atp) ۹۷
شکل پ۲-2- مدل مشروح ترانسفورماتور ۹۸
شکل پ۲-3- پارامترهای فایل tpbigw.exe ۹۹

شکل پ۲-4- فایل listsize. big ۱۰۰
شکل پ۲-5- فایل listsize.dat ۱۰۰
شکل پ۲-6- فایل خروجی EMTP (4_2.ans) ۱۰۲

فصل ۱- مقدمه

از آنجائیکه قدرت شبکه‌های برق همواره در حال افزایش بوده و بایستی تا حد ممکن تغذیهٔ انرژی برق مطمئن انجام شود، بالا بودن قابلیت اطمینان، طول عمر و کیفیت تک تک عناصر و تجهیزات موجود در شبکه ضروری است. ترانسفورماتورهای مرتبط کنندهٔ سطوح ولتاژ مختلف در شبکه از مهمترین عناصر شبکه‌اند که خروج از مدار آنها با قابلیت اطمینان توزیع انرژی آسیب جدی وارد کرده و باعث هدر رفتن سرمایه زیادی می‌شود. برای افزایش قابلیت اطمینان تغذیه انرژی برق، شناسایی سریع عیبهای رخ داده در ترانسفورماتورها الزامی می‌باشد.

۱-۱- مقدمه‌ای بر مسئله موجود

وظیفهٔ یک سیستم تشخیص عیب مدرن این است که با تعیین وضعیت کار ترانسفورماتور، استفادهٔ بهینه آن را با در نظر گرفتن قدرت انتقالی و مدت کارکرد تضمین کند، بدون آنکه قابلیت اطمینان ترانسفورماتور تحت تأثیر قرار گیرد. برای انجام این کار روشهای مختلفی همچون مانیتورینگ حرارتی، تجزیه و تحلیل گازهای حل شده در روغن، اندازه‌گیریهای تخلیه جزئی (الکتریکی، صوتی)، تحلیل تابع تبدیل، اندازه‌گیری ولتاژ بازگشتی و غیره مورد بررسی و تحقیق قرار گرفته‌اند. هر کدام از این روشها دارای ویژگیهای خود بوده و قادر به شناسائی نوع به خصوصی از عیب می‌باشند.

روش تابع تبدیل امروزه برای تشخیص تغییرات مکانیکی در سیم‌پیچ مورد بحث می‌باشد[۱]. تحقیقات عملی نشان می‌دهند که جابجائی محوری و تغییر شکل شعاعی سیم‌پیچها روی توابع تبدیل تأثیر می‌گذارند[۲]. با انجام تحقیقات در این زمینه مشخص شده است که تا حد مطلوبی می‌توان چنین عیبهائی را تشخیص داده و محل بروز آنها را تخمین زد. روش تابع تبدیل یک روش مقایسه‌ای است. یعنی اندازه‌گیریهای جدید را باید با اندازه‌گیریهای مرجعی در کنار هم قرار داد. کنترل منظم تابع تبدیل مانیتورینگ پیوسته‌ای را امکان‌پذیر می‌سازد که می‌توان به تغییرات بوجود آمده در کارکرد ترانسفورماتور به موقع پی برد. اگر انحرافات قابل ملاحظه‌ای در نتایج اندازه‌گیریها مشاهده شد، باید این انحرافات را مورد بررسی و تحلیل قرار داد که آیا ممکن است عیبی رخ داده باشد، همچنین اگر عیبی روی داده است، آیا می‌توان نوع و محل آنرا برآورد کرد.

برای مقایسهٔ نتایج اندازه‌گیریها روشهای مختلفی توسط کریستین [۲] پیشنهاد شده که عبارتند از:

- مقایسهٔ وابسته به زمان: اندازه‌گیریهای جدید را می‌توان با اندازه‌گیریهای قدیم مقایسه نمود. اندازه‌گیریهای مورد نظر که در زمانهای گذشته انجام شده باشند در بیشتر موارد در دسترس نمی‌باشند و لذا در این حالتها نمی‌توان این روش را به کار برد.
- مشخصه‌های متقارن: می‌توان اندازه‌گیریها را روی هر سه فاز (R, S, T) یک ترانسفورماتور سه فازه انجام داده و نتایج آنها را با همدیگر مقایسه نمود. عیب این روش این است که بسته به طراحی قسمت فعال ترانسفورماتور، سه ستون سیم‌پیچها کاملاً یکسان نمی‌باشند.

- طراحی‌های یکسان: در بیشتر موارد نتایج اندازه‌گیریها روی ترانسفورماتورهای با طراحی و مشخصات یکسان مشابه می‌باشند. با این وجود، این روش به دلیل تولرانسهای تولید همواره قابل اطمینان نیست.

مقایسه نتایج اندازه‌گیری و مدلسازی می‌تواند به عنوان یک روش دیگر مورد بررسی و مطالعه قرار گیرد. از آنجائیکه ارتباطات بین عیبهای رخ داده در ترانسفورماتورها و توابع تبدیل مربوط به آنها به اندازه کافی شناخته نشده‌اند، سعی می‌شود که به کمک مدلهای مناسب این وابستگیها نتیجه شوند. به وسیلهٔ شبیه‌سازی یک ترانسفورماتور معیوب توسط این مدلها می توان محل، نوع و میزان عیب را به سرعت تخمین زد. در یک حالت عملی می‌توان شبیه‌سازیها را برای انواع عیبها انجام داده و با مشاهدهٔ نتایج آنها و نتایج اندازه‌گیریها تغییرات واقعی ترانسفورماتور را نتیجه گرفت.

۱-۲- وضعیت کنونی موضوع

تا به امروز روش تابع تبدیل برای ترانسفورماتورها در حالت کلی به کمک نتایج اندازه‌گیری انجام شده است. کارهای انجام شده نشان می‌دهند که این روش برای شناسایی عیبهای سیم‌پیچهای ترانسفورماتور مناسب می‌باشد. به منظور تقویت روشهای اندازه‌گیری توصیف شده و تحقیق نظری رفتار فرکانسی ترانسفورماتورها، شبیه‌سازی سیم‌پیچهای ترانسفورماتور ضروری است.

مدلسازی ساختاری پیچیده‌ای مثل قسمت فعال ترانسفورماتورها یک مصالحه بین هزینهٔ محاسبات و دقت آنها را می‌طلبد. تعداد عناصر قابل تعریف در مدل و لذا دقت مدلسازی محدود است. در میان روشهای زیاد مدلسازی، مدلهای زیر بیشتر مطرح می‌باشند:

- مدلهای جعبه سیاه (Black-Box):
  - آنالیز مُدال[۳]
  - مدلسازی بر پایهٔ وضعیتهای قطب‌ها و صفرها[۴]، [۵].
- - مدلهای فیزیکی:
  - مدل خط انتقال n فازه[۶]
  - مدل مشروح:
    - مدلسازی بر پایهٔ اندوکتانسهای خودی و متقابل[۷]
    - مدلسازی بر اساس اندوکتانسهای نشتی[۸]
    - مدلسازی به کمک اصل دوگانی[۹]
    - مدلسازی با استفاده از تحلیل میدانهای الکترومغناطیسی[۱۰] .
- مدل هایبرید
  - ترکیبی از مدلهای فیزیکی و جعبه سیاه[۱۱]

برای مدلسازی تغییرات بوجود آمده در سیم‌پیچها، مدلهای جعبه سیاه مناسب نمی‌باشند. زیرا برای چنین مدلسازی بایستی وابستگی بین قطبها و صفرهای سیستم و ساختار سیم‌پیچ ترانسفورماتور معلوم باشد. در حالی که مدل جعبه سیاه از روی نتایج اندازه‌گیری شده در پایانه‌های ترانسفورماتور ساخته می‌شود.

در مدلسازی فیزیکی، ابعاد هندسی سیم‌پیچها برای توصیف محاسباتی ترانسفورماتور مورد استفاده قرار می‌گیرند. مدلهای فیزیکی که به صورت مدار معادل می‌باشند. در یک محدودهٔ مشخصی در حوزهٔ فرکانسی معتبر می‌باشند .

با مدلسازی سیم پیچها به صورت یک مدار RLCM (مدل مشروح) می‌توان مقادیر جریانها و ولتاژها را توسط نرم‌افزارهای مرسوم برای حل مدارهای الکتریکی (به عنوان مثال ATP، Pspice، ...) محاسبه کرد. بر خلاف مدل خط انتقال چند فازه، می‌توان توسط مدل مشروح پدیده‌های غیرخطی (هیسترزیس، اشباع) و وابسته به فرکانس (تلفات جریانهای فوکو، تلفات عایقی) را وارد محاسبه کرد، علاوه بر این به کارگیری مدل مشروح نشان داده است که ساختارهای سیم‌پیچهای پیچیده‌تر با تعداد سیم‌پیچهای بیشتر را می‌توان تا حد قابل قبولی شبیه‌سازی نمود . مدل خط انتقال n فازه تاکنون چنین کاربردهائی نداشته است.

با توجه به مطالعات انجام شده دیده می‌شود که از میان مدلهای مشروح ذکر شده، مدل متکی بر اندوکتانسهای خودی و متقابل ساده‌تر و مفیدتر می‌باشد. گرچه ممکن است نتوان عناصر مدار معادل را کاملاً دقیق تعیین کرد. بیشتر شبیه‌سازیهای انجام شده توسط این مدل محاسبات رضایتبخش را نتیجه داده‌اند. بنابراین مدل مشروح متکی بر اندوکتانسهای خودی و متقابل در این رساله مورد توجه خاصی قرار گرفته است.

۱-۳- هدف پروژه

نیاز روز افزون به انرژی برق ساخت ترانسفورماتورهای با قدرت و ولتاژ بالاتر را ایجاب می‌کند. مسائل مربوط به چنین ترانسفورماتورهائی همچون اطمینان کارکرد، وزن بالای حمل و نقل و نیازمندی به مواد بیشتر یک مانیتورینگ کامل از ترانسفورماتورها را ضروری می‌کند تا بتوان این ترانسفورماتورهای گران‌قیمت را از بروز صدمات شدید محافظت کرده و هزینه‌های ناشی از آنها را تا حد ممکن پائین نگاه داشت. به ویژه اینکه می‌توان صدمات وارد بر سیم‌پیچهای ترانسفورماتور را بوسیلهٔ روش تابع تبدیل شناسائی کرد. برای اینکه از آزمایشهای عملی پرهزینه اجتناب شود می‌توان از نتایج شبیه‌سازیهای کامپیوتری برای بدست آوردن اطلاعات مورد نظر لازم استفاده نمود. این اطلاعات را می‌توان برای هر کدام از اهداف زیر مورد استفاده قرار داد:

- اگر هیچگونه نتیجهٔ اندازه‌گیری از ترانسفورماتور در حالت سالم موجود نباشد، می‌توان نتایج محاسباتی را به عنوان مرجع برای مقایسه با نتایج اندازه‌گیری جدید مورد استفاده قرار داد.
- می‌توان اثرات عیبهای شناخته شده روی توابع تبدیل را به کمک شبیه‌سازیها بررسی و تحلیل کرد.
- با استفاده از نتایج محاسباتی و مقایسه با اندازه گیری های انجام شده می‌توان محل و نوع عیب را در یک ترانسفورماتور معیوب تعیین کرد.

برای حصول این اهداف، کارهای زیر به ترتیب انجام داده شده‌اند:

- در ابتدا به بررسی اجمالی روشهای گوناگون مدل سازی ترانسفورماتور های قدرت پرداخته شده است و پس از بررسی معایب و محاسن هر کدام از این روشها، روش بسیار مناسب

مدلسازی مشروح ترانسفورماتور انتخاب شده است. به طور کلی موارد بسیار زیادی از کاربرد این روش برای عیب یابی می توان در تحقیقات مشاهده کرد.

- در فصل سوم به بررسی دقیقتر و استخراج روابط حاکم بر مدل مشروح پرداخته شده است.
- در ادامه شبیه‌سازی از سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور در حالت سالم برای ارزیابی دقت مدل انجام شده است.
- به دلیل استفاده از توزیع نیروهای الکترومغناطیسی در روند عیب یابی، در فصل چهارم روابط مورد نیاز جهت محاسبه نیروهای الکترومغناطیسی به دست آمده است.
- در فصل پنجم در ابتدا به مقدماتی در زمینه نحوه اندازه گیری و روشهای مونیتورینگ ترانسفورماتور پرداخته شده است و در ادامه به تشریح روش پیشنهادی این تحقیق پرداخته شده است.
- به عنوان اولین گام، شبیه سازی شرایط و حادثه اتفاق افتاده برای ترانسفورماتور جهت محاسبه جریان همه قسمت ها و واحدهای مدل صورت گرفته است.
- محاسبه نیروهای الکترومغناطیسی بین واحد های مختلف و توزیع آنها در طول سیم پیچها برای به دست آوردن مکان های مستعد جهت ایجاد جابه جایی، در مرحله بعد صورت گرفته است.
- شبیه سازی و محاسبهٔ توابع تبدیل یک ترانسفورماتور در حالت های مختلف عیب در مکان های به دست آمده در قسمت قبل و در حالات فرضی که دو سیم‌پیچ آن نسبت به هم در جهت محوری جابجا شده باشد. بوسیلهٔ این محاسبات اثر جابجائی محوری روی توابع تبدیل مورد تحلیل قرار گرفته و همچنین تغییرات توابع تبدیل و پارامترهای مدل مطالعه و بررسی و پارامترهای مدل در حالت معیوب نیز محاسبه شده‌اند.
- مقایسه توابع تبدیل به دست آمده از نتایج شبیه سازی با تابع تبدیل ترانسفورماتور واقعی و پیدا کردن شبیه ترین آنها به مشخصه فرکانسی واقعی ترانسفورماتور و در نهایت، مشخص کردن محل عیب در سیم پیچ.

فصل ۲- روش‌های مدل سازی ترانسفورماتور برای مطالعات VFTO[1]

در این فصل روش‌های مدلسازی ترانسفورماتور چه از دیدگاه مهندس طراح ترانسفورماتور و چه از دیدگاه مهندس طراح سیستم قدرت با یکدیگر مقایسه و بررسی شده است. در این فصل دقیقاً به نقاط ضعف و قوت روش‌های مدل‌سازی اشاره شده و نشان داده شده که چرا مدل مشروح مناسبترین مدل برای اهداف ماست.

۲-۱- مقدمه

در پایان دهۀ شصت و اوایل دهۀ هفتادِ میلادی، خطاهای متعددی در عایق‌بندی سیم‌پیچ‌های فشار قوی ترانسفورماتورهای قدرت، مشاهده شد. محل بروز این خطاها در نقاط داخلی سیم‌پیچ‌ها بود. جائی که تا به حال انتظار آن نمی‌رفت. در ابتدا دلیلی برای بروز این خطاها پیدا نشد. بعد از بررسی رفتار نوسانی سیم‌پیچ‌ها، در اواسطِ دهۀ هفتاد، مشخص شد که بروز پدیدۀ تشدید در داخل سیم‌پیچ فشار قوی، باعث صدمه موضعی عایق و نهایتاً باعث خرابی ترانسفورماتور می‌گردد. دلیل بروز این نوسانات وجود ظرفیت‌های الکتریکی اجتناب‌ناپذیر در کنار اندوکتانس‌های سیم‌پیچ است. این ظرفیت‌ها در فرکانس‌های مربوط به حالت‌های گذرا خود را نشان می‌دهند و مجموعۀ سیم‌پیچ را به یک سیستم قابل نوسان تبدیل می‌کنند. این سیستم می‌تواند توسط موج صاعقه، موج ناشی از کلید زنی، اغتشاشات شبکه مثلاً اتصال کوتاه‌ها و یا اتصال از راه دور ترانسفورماتورهای بی‌بار تحریک شود.

در صورتیکه تحریک ورودی دارای فرکانسهایی باشد که با یکی از فرکانس‌های طبیعی سیم‌پیچ ترانسفورماتور تطبیق نماید، آنگاه پدیدۀ تشدید بروز خواهد کرد. در اینصورت عایق‌بندی ترانسفورماتور در معرض خطر است. این پدیده به پدیدۀ Part Winding Resonance معروف است. شکل۲-۱-a نشان دهندۀ این پدیده در طول سیم‌پیچ فشار قوی است. در هنگام بروز پدیدۀ تشدید اول در در وسط سیم‌پیچ اضافه ولتاژ بزرگی بوجود می‌آید و عایق تحت تنش الکتریکی خطرناکی قرار می‌گیرد. حفاظت در برابر این اضافه ولتاژ، یا اضافه ولتاژهای ناشی از تشدیدهای مرتبۀ بالاتر، مثلاً تشدید دوم توسط تمهیدات معمولی مانند نصب برقگیر در سر سیم‌پیچ، امکان‌پذیر نیست. جهت رفع این مشکل یا باید یک فیلتر قدرت برای فرکانس‌های تشدید معین شده، موازی با ترانسفورماتور نصب گردد و یا باید توپولوژی شبکه طوری تغییر یابد که فرکانس‌های تحریک از فرکانس‌های طبیعی ترانسفورماتور فاصله گیرند. این هر دو راه حل هزینه‌بر هستند. در عوض در مرحلۀ ساخت، به کمک یک شبیه‌سازی بر روی مدل، می‌توان ریسک مربوطه را تخمین زد و نقاط ضعف را جبران کرد. در این راستا، در طول دهۀ هفتاد طراحان مدل‌هائی را ارائه دادند که حد اعتبار فرکانسی آنها در حد چند ده کیلوهرتز بود و به کمک آنها می‌توانستند اضافه ولتاژها را پیش‌بینی کنند.

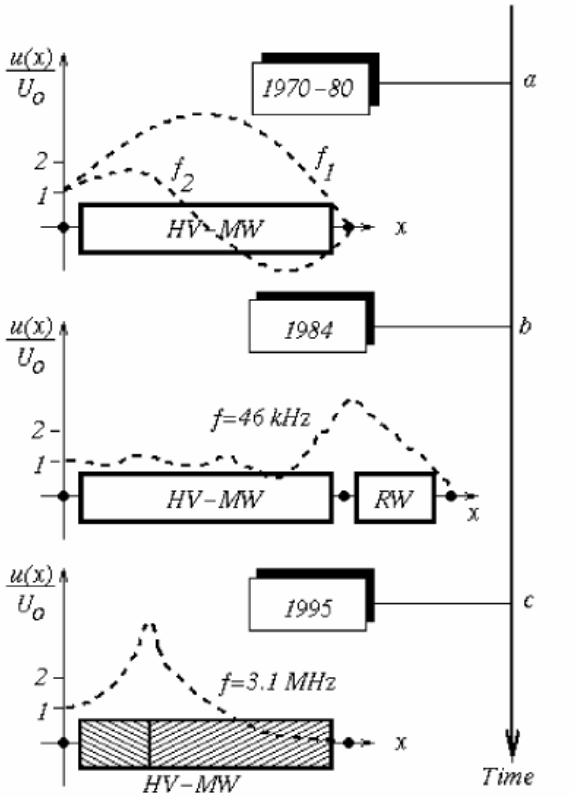
---

[1] Very Fast Transients Overvoltage

با افزایش کاربرد پست‌های SF_6 تحقیقات زیادی در این رابطه شروع شدند و اندازه‌گیری‌های متعددی نشان داند که اضافه ولتاژهای بوجود آمده در این پست‌ها، دارای مؤلفه‌های فرکانسی در حوزهٔ فرکانسی مگاهرتز هستند. بدین ترتیب بابی تازه در مباحث مربوط به حالت‌های گذرای سیستم‌های قدرت باز شد. اکنون مسئله این بود که تجهیزات شبکه در این حوزهٔ فرکانسی چه رفتاری دارند. با توجه به این انگیزه، اندازه‌گیری‌ها و بررسی‌ها بر روی ترانسفورماتورهای قدرت نیز شروع شد. مشخص شد که در محل اتصال دو سیم‌پیچ اصلی و تنظیم ولتاژ، در فرکانس خاصی امکان بروز اضافه ولتاژ هست. شکل۲-۱-b نشان دهندهٔ این پدیده است. دلیل بروز این اضافه ولتاژ توجیه نشد. Teranishi و همکاران پیشنهاد کردند که ZnO در محل اتصال دو سیم‌پیچ استفاده گردد. البته بعلت محدودیت عملکرد فرکانسی ZnO، کاربرد آنها برای بررسی‌های VFTO منتفی است.

در سال ۱۹۸۰ در نیروگاه اتمی Philippsburg 1 آلمان بروز پدیدهٔ تشدید سیم‌پیچ، منجر به خرابی ترانسفورماتور مربوطه گردید و خسارات زیادی حاصل شد. در پی بروز این حادثه موضوع به مراکز تحقیقاتی ارجاع شد.

در ادامه این مسیر، برای اولین بار توسط دکتر قره پتیان مدلی ارائه شد که در حوزهٔ فرکانسی ۱۰ کیلوهرتز تا ۱۰ مگاهرتز معتبر است و امکان بروز اضافه ولتاژهای شدید، در حوزهٔ فرکانسی مگاهرتز، و در محل اتصال دو نوع سیم‌بندی متفاوت در یک سیم‌پیچ فشار قوی را دارا است. شکل ۲-۱-c نشان دهندهٔ این پدیده در طول سیم‌پیچ فشار قوی است. مدل ارائه شده توانائی پیش‌بینی این اضافه ولتاژ را داشته است.



شکل ۲-۱- تاریخچهٔ بروز اضافه ولتاژها در داخل سیم‌پیچ[۱۷]

(HV-MW :سیم‌پیچ فشار قوی اصلی

RW : سیم‌پیچ تنظیم ولتاژ و انتهای سیم‌پیچ زمین شده است.)

۲-۱-۱- بررسی تحقیقات انجام شده

مدار معادل سادهٔ ترانسفورماتور، مدل ترانسفورماتور جهت محاسبات اتصال کوتاه و پخش بار و یا مدل آن جهت تحلیل هارمونیک‌ها نمی‌تواند جهت انجام بررسی‌های حالات گذرا بکار رود و باید مدل‌های مناسبی در این راستا مطرح نمود.

تلاش‌های مربوط به توصیف رفتارِ سیم‌پیچ ترانسفورماتور در حالات گذرا از ابتدای قرن حاضر شروع شده است. Wanger با اضافه نمودن ظرفیت طولی به موازاتِ اندوکتانس‌های مدلِ خط انتقال، اولین گام را در مدل‌سازی سیم‌پیچ برداشت[۱۲]. Blume بعداً سعی کرد که اثر القای متقابل را وارد مدل نماید. هر دو روش فقط برای سیم‌پیچ‌های با ساختار همگن معتبر بودند و بررسی نتایج ناشی از این مدل دید خوبی نسبت به حالت‌های گذرای سیم‌پیچ بدست می‌دهد. به مرور زمان روش‌های دیگری نیز در این رابطه استفاده شدند. مثلاً اندازه‌گیری در حوزه زمان بر روی ترانسفورماتورِ آمادهٔ کار، اندازه‌گیری بر روی مدل‌هایی که از لحاظ هندسی مشابه اصل هستند و یا اندازه‌گیری بر روی مدل‌های الکترومغناطیسی انجام شدند. کامپیوتر آنالوگ نیز جهت بررسی رفتار سیم‌پیچ مورد استفاده قرار گرفت. ولی با شروع به کار کامپیوترهای رقمی عملاً این روش منسوخ گردید.

کتاب‌شناسی ارائه شده توسط Abetti دربرگیرندهٔ انتشاراتِ پایه مربوط به نیمهٔ اول قرن بیستم، در رابطه با این موضوع است. با مطالعه این مراجع و تمامی تحقیقاتِ عملی و علمی انجام شده تا زمان حاضر می‌توان این مجموعه را، با توجه به هدفی که از کاربرد آنها دنبال می‌شود، در دو دیدگاه یا روش مشاهده زیر دسته‌بندی کرد.

- دیدگاه فیزیکی
- دیدگاه جعبه سیاه (Black-Box)

۲-۱-۱-۱- دیدگاه فیزیکی

در دیدگاه فیزیکی موضوع مورد علاقه و مطرح شده، رفتار نوسانی و تنش‌های الکتریکی در داخل سیم‌پیچ است. در این دیدگاه، بررسی‌ها در مرحلهٔ طراحی بر روی مدلی از سیم‌پیچ صورت می‌پذیرد. مدل‌های مطرح شده در این دیدگاه را می‌توان در دو گروه دسته‌بندی نمود:

- مدل‌های مشروح (Detailed)
- مدلِ خط انتقالِ چندفازه

در روش مدل‌سازی مشروح، کوچکترین عنصر فضائی در سیم‌پیچ، یک حلقه و یا گروهی از حلقه‌ها (مثلاً یک دیسک یا یک زوج دیسک) است. هر جزء در این مدل معمولاً با یک مدار RLC موازی مدل می‌گردد، مجموعهٔ سیم‌پیچ بصورت یک شبکه نردبانی است. هر جزء در شبکه دارای یک ظرفیت خازنی نسبت به زمین است و اندوکتانس‌ها دارای القای متقابل‌اند. این روش مدل‌سازی توسط Wagner، Blume و Boyajiam پایه‌گذاری شده و توسط Bewley و Lewis با گام‌های اساسی، تکمیل شده است. مزیت اصلی این روش در رفتار عددی خوب و کارآیی صحیح مدل در حوزهٔ فرکانسی مورد نظر است. بزرگترین دشواری که مطرح است، مسئله تعیین و تخمینِ پارامترهای مدار با توجه به اطلاعات مربوط به ابعاد هندسی ترانسفورماتور و مواد بکار برده شده در آن است.

مدل مشروح، مداری با عناصر فشرده و تعداد گره محدود است. بدین خاطر مدل مشروح می‌تواند فقط رفتار سیم‌پیچ را در یک حوزهٔ فرکانسی محدود بازنمایی کند. توانایی مدل در توصیف رفتار نوسانی سیم‌پیچ اولاً به دقت محاسبات مربوط به تخمین پارامترهای مدل و ثانیاً به میزان مشروح بودن آن بستگی دارد. هر چه مدل مذکور مشروح‌تر باشد، یعنی جزئیات بیشتری در برداشته باشد، دارای حد اعتبار فرکانسی بالاتری است. معمولاً از طرف طراح، حد فرکانسی خاصی مدنظر است. مثلاً جهت بررسی پدیدهٔ کلیدزنی، ۲۰ کیلوهرتز و جهت بررسی اثر برخورد صاعقه، ۲۵۰ کیلوهرتز. پریود این فرکانس بایستی حداقل ده برابر بزرگتر از Travel Time بزرگترین جزء مدل باشد تا شرط مشروح بودن برقرار باشد. این فرکانس، حد اعتبارِ فرکانسی مدل را تعیین می‌کند. این حد در مدل‌های مطرح شده در حدود چند صد کیلوهرتز بوده است. برای اینکه حد اعتبار فرکانسی را به حوزه مگاهرتز بکشانیم، باید مدل را تظریف نمود. نتیجهٔ این عمل، شبکه‌ای است بسیار بزرگ که معمولاً صدها گره دارد. شبیه‌سازی و تحلیل این چنین شبکه‌ای همیشه با دشواری همراه است.

همانگونه که گفته شد مشکل اساسی مدل مشروح مسئله تخمین پارامترهای مدل است. در مرحلهٔ طراحی باید پارامترهای مدل را مبتنی بر یکی از روش‌های زیر بدست آورد.

- تحلیل میدان به کمک روشِ اجزا محدود یا تفاصل محدود.
- روش‌های تحلیلی- تقریبی و یا
- روش شبیه‌سازی بار

البته این پارامترها را می‌توان بعد از مرحله ساخت بر مبنای اندازه‌گیری‌های حوزه زمان و یا حوزه فرکانس نیز بدست آورد.

در نوسانات فرکانس بالا، با شکل موج‌های پیچیده‌ای مواجه هستیم. در این حالت دیگر مفروضات ساده کنندهٔ مربوط به توزیع جریان و پتانسیل که بر اساس آنها پارامترها محاسبه می‌گردند، دیگر صحیح نیستند. ولی باید به تقریب تن در داد و پارامترهای مدل را با تقریب پذیرفت. مزیت مدل مشروح در توانایی آن در مدلسازی خواص غیرخطی هستهٔ آهنی است. در عوض مدل‌سازی پدیده‌های وابسته به فرکانس در این مدل نسبتاً دشوار و از لحاظ محاسباتی هزینه‌بر می‌باشد.

مدل دیگری که در این دیدگاه مطرح است، مدل خط انتقالِ چندفازه برای سیم‌پیچ ترانسفورماتور است. اگر مسئله مورد مطالعه، سیم‌پیچ تک‌لایه‌ای همگن باشد، آنگاه می‌توان انتظار داشت که مدل تک‌فازهٔ خط انتقال نیز تا حدودی جواب‌گوی نیازها باشد. صحت کیفی این روش برای سیم‌پیچ بدون هسته در مراجع مختلف نشان داده شده است. ولی در آنجا روشی جهت تخمین پارامترهای مدل ارائه نشده است. مدل‌سازی سیم‌پیچ بصورت خطوط انتقالی که از لحاظ مکانی با یکدیگر موازی هستند، ولی از لحاظ الکتریکی سری شده‌اند، بر مبنای تئوری خطوط انتقال n-فازه است. این تئوری به ماشین‌های الکتریکی و ترانسفورماتورها اعمال شده است. این مدل نیز همانند مدل مشروح، دارای حد اعتبار فرکانسی است. اثبات صحت روشِ مدل‌سازی تاکنون فقط برای سیم‌پیچ ساده انجام شده است. به علاوه در مدل مطرح شده از اثرِ پوستی و اثر همجواری که باعث افزایش تلفات و میرائی می‌شوند، صرف‌نظر شده است.

در صورتیکه بخواهیم این روش را برای انواع متفاوت سیم‌پیچ‌ها بکار بریم، باید هر حلقه را به عنوان یک خط انتقال در نظر بگیریم. در اینصورت باید یک سیم‌پیچ فشارقوی را با بیش از هزار خط انتقال مدل نمود

که عملاً میسر نیست. در رابطه با این روشِ مدلسازی باید متذکر شد که هنوز کاربرد خطوط انتقال وابسته به فرکانس در هیچ موردی مشاهده نشده و موضوعی است که جای کار فراوان دارد.

۲-۱-۱-۲- دیدگاه جعبه سیاه (Black-Box)

در این دیدگاه موضوع مورد توجه، شکل موج جریان و ولتاژ در ترمینالِ ورودی ترانسفورماتور است و ترانسفورماتور بصورت یک جعبه سیاه در کنار دیگر اجزا شبکه مطرح می‌گردد. در این روشِ مدلسازی، وجود نتایج اندازه‌گیری در حوزه زمان و یا فرکانسی ضروری است. بنابراین امکان مدل‌سازی بعد از مرحلهٔ طراحی میسر می‌گردد.

در حوزهٔ زمان، سیم‌پیچ توسط یک موج ضربه یا پله تحریک می‌گردد. پاسخ ضربه با پله در نقاطی که در دسترس است، توسط یک ثبت کنندهٔ حالت گذرا ثبت شده و نهایتاً به یک کامپیوتر منتقل می‌گردد. توسط یک تحلیل FFT طیف دامنه‌ها و فرکانس‌های طبیعی سیم‌پیچ مشخص می‌گردد. در حوزهٔ فرکانس، تابعِ مختلطِ امپدانس یا انتقال ولتاژ در یک حوزهٔ فرکانسی محدود اندازه‌گیری می‌شود. اندازه‌گیری توسط دستگاه امپدانس آنالایزر صورت می‌گیرد. این دستگاه می‌تواند امپدانس را در محدودهٔ میلی‌اُهم تا مگااُهم اندازه‌گیری نماید. این وسیله دارای یک نوسان‌ساز است که یک نوسان سینوسی با دامنهٔ کم تولید می‌نماید. سیم‌پیچ توسط این نوسان تحریک می‌شود. فرکانس نوسان در حوزهٔ فرکانسی خاصی تغییر می‌یابد و نتایج حاصله به کامپیوتر منتقل می‌گردند. با تحلیل پاسخ فرکانسی می‌توان فرکانس‌های طبیعی را مشخص نمود.

در هر دو حال به علت عدم دسترسی به نقاط داخلی، در واقع فرکانس‌های طبیعی ترمینالِ تحریک شده (تابع ایمیتانس) آشکار می‌گردد و نه تمامی فرکانس‌های طبیعی سیم‌پیچ، در واقع پدیده‌های مربوط به داخل سیم‌پیچ در این دیدگاه بررسی نمی‌شود.

مدل‌های جعبه سیاه را می‌توان در مرحلهٔ طراحی بعد از تعیین مدل مشروح، بصورت عددی بدست آورد. Hingorani این مدل‌ها را برای اولین بار جهت بررسی سیستم‌های انتقالی جریان مستقیم بکار برد . بعداً توسط کارهای تکمیلی تغییرات فراوانی در آنها صورت پذیرفت. در مدل‌سازی بصورت یک جعبه سیاه روش‌های متعددی وجود دارند که هدف همگی آنها نمایش پاسخ فرکانسی بصورت یک شبکه از عناصر متمرکز و یا یک تابع تبدیل می‌باشد. از آن جمله‌اند، روش تبدیل، روش تخمین پارامترها، روش تحلیل مُدال و روش Ploe-Removal دو روش آخر بیشتر کاربرد دارند و نسبت به بقیهٔ روش‌ها (در مورد ترانسفورماتور) کاراتر بوده‌اند.

روشِ تحلیلِ مُدال بر این فرض استوار است که رفتار هر سیستمِ نوسانی را می‌توان با فرکانس‌های ویژه آن توصیف نمود. این فرکانس‌های ویژه می‌توانند توسط پارامترهای مُدال (دامنه، میرائی و فرکانس نوسان) تعیین شوند. در روش تحلیل مُدال هر فرکانس ویژه توسط یک شاخه RLC سری مدل می‌گردد. پارامترهای مُدال می‌توانند توسط مرتب کردن تابع تبدیل بفرم حقیقی و مجازی بدست آیند. این مسئله خود یک نکته منفی برای این روش بحساب می‌آید (فصل ۱-۱-۳). به علاوه باید قبل از تطبیق پارامترها، هر بار تابع تبدیل را بازسازی نمود تا امکان مقایسه بین پاسخ فرکانسی محاسبه شده و پاسخ فرکانسی اندازه‌گیری شده، فراهم آید.

در روش‌های دیگر مدل‌سازی جعبه‌سیاه، هیچ مدار معادلی بدست نمی‌آید، بلکه فقط یک تابع تبدیل بدست می‌آید. روش Pole-Removal یک پاسخ فرکانسی را به یک تابع تبدیل با صفر و قطب‌های ساده و مختلط تبدیل می‌کند و بدین وسیله ترانسفورماتور توصیف می‌گردد. مسئله مهم در این روش، شناسائی صحیحِ نقاط اکسترمُم است. به علاوه باید ساختار توپولوژیکی سیم‌پیچ‌ها دقیقاً تعریف شده باشد تا از ناپایداری عددی جلوگیری گردد.

در مجموع می‌توان گفت که بزرگترین مزیتِ مدل‌های جعبه سیاه بالا بودن حد اعتبار فرکانسی آنهاست. در واقع این مدل‌ها اصولاً حد اعتبار فرکانسی محدودی ندارند. بلکه این اندازه‌گیری هستند که بعلت محدودیت‌های موجود در دستگاه‌ها، این روش مدلسازی را در حد چند مگاهرتز محدود کرده‌اند.

بزرگترین نقطهٔ ضعف این روش، در رابطه با عدم توانائی آن در توصیف رفتار نقاط داخلی سیم‌پیچ است. لذا در مرحلهٔ طراحی باید از مدل‌های مشروح سود جست. ولی مدل‌های مشروح برای اینکه تا حد مگاهرتز معتبر باشند، باید به صورت حلقه حلقه با جزئیات کامل مدل شوند. مدل بدست آمده در حکم یک Lagre Scale System است. تحلیل این گونه مدل‌ها مستقیماً ممکن نیست و باید از روش‌های کاهش مرتبه استفاده نمود.

۲-۲- بررسی روش‌های مدل‌سازی جعبه سیاه

اگر بررسی تأثیرات متقابل ترانسفورماتور و شبکه تغذیه کنندهٔ آن مورد نظر محقق باشد. آنگاه باید ترانسفورماتور را در ترمینال‌هایش بصورت یک جعبه سیاه مدل نمود. این دیدگاه مربوط به مهندس طراح سیستم قدرت است. چرا که او جهت طراحی و هماهنگی عایق‌ها در سیستم‌های HV و EHV نیاز به مدل‌های جعبه‌سیاه برای اجزاء متفاوت سیستم قدرت از جمله ترانسفورماتور دارد. جهت بررسی‌های تک‌فاز، مدل دو قطبی امپدانس ورودی سیم‌پیچ کافی است. توصیف سه فاز ترانسفورماتور بصورت یک جعبه‌سیاه نیاز به یک مدل چند قطبی دارد. برای مثال یک ترانسفورماتور سه‌فاز دو سیم‌پیچه نیاز به یک مدل هفت قطبی دارد.

استخراج مدل ریاضی سیستم را تحلیل سیستم می‌نامند. اگر در این ضمن از داده‌های بدست آمده از آزمایشات استفاده شود، عمل انجام شده را شناسائی سیستم می‌نامند. بجز ملاحظات نظری، شرط‌های معینی مانند خطی بودن، برای مدل قائل می‌شوند. بر اساس این شرط‌ها و ملاحظات و به کمک یک روش شناسائی می‌توان با توجه به مقادیر اندازه‌گیری شدهٔ ورودی و خروجی یک مدل ریاضی برای سیستم مورد مطالعه بدست آورد.

اغلب تحلیل سیستم یک روند تکراری است. یعنی یک مدل مقایسه تکراری با سیستم مبنا به میزانی اصلاح می‌گردد تا دقت موردنظر فراهم آید. در این ضمن بسته به نوع کاربرد، می‌تواند مسئله به مدل پارامتری یا مدل غیرپارامتری مربوط گردد. مدل‌های پارامتری دارای ساختار ثابتی‌اند. مثلاً به شکل یک مدار معادل، یک معادلهٔ دیفرانسیل و یا یک تابع تبدیل. مدل‌های غیرپارمترای هیچ ساختاری ندارند و بصورت یک منحنی و یا جدول از زوج‌های مرتب می‌باشند.

هدف مدل‌سازی جعبه سیاه این است که از مدل غیرپارامتری ترانسفورماتور، بفرم پاسخ فرکانسی آن، به یک مدل پارامتری به شکل یک تابع تبدیل و یا به شکل یک مدار معادل برسد. با توجه به رفتار خطی

ترانسفورماتور برای فرکانس‌های بزرگتر از ۱۰kHz می‌توان آن را یک سیستم LTI دانست و روند مذکور را بر آن اعمال نمود. این روش می‌تواند هم بر مبنای اندازه‌گیری حوزهٔ فرکانس باشد و هم بر مبنای اندازه‌گیری حوزهٔ زمان. پاسخ پله یا ضربهٔ اندازه‌گیری شده و همچنین تحریک ورودی در حوزهٔ زمان به کمک FFT به حوزهٔ فرکانس منتقل می‌گردند و نهایتاً از آن‌ها تابع تبدیل سیستم مشتق می‌گردد.

ساده‌ترین روش مدل‌سازی جعبه‌سیاه، مربوط به روشی است که مبنای آن شبکه‌ای با ساختار ثابت است. در این مدار مقادیر عناصر شبکه مجهول هستند. ولی نحوهٔ اتصال عناصر مدل شکل ثابتی دارد. در این مدار می‌توان بر اساس معادلات دیفرانسیل حاکم بر آن، نسبت به خروجی به ورودی سیستم را در حوزهٔ فرکانس بدست آورد. پارامترهای این تابع تبدیل وابسته به عناصر مجهول شبکه‌اند.

بر مبنای روش‌های عددی، مثل روش حداقل مربعات، سعی می‌شود که با تغییر پارامترهای این تابع مقدار تابع به مقدار اندازه‌گیری شده نزدیک گردد. در این بین باید تابع هدف که مربع تفاضل دو تابع فوق‌الذکر است، حداقل گردد. بعد از حصول یک دقت موردنظر و یا دستیابی به حداکثر وقت ممکن، در گام آخر مقادیر عناصر شبکه بر اساس پارامترهای تابع تبدیل محاسبه می‌گردند.

عیب این روش مدل‌سازی جعبه سیاه در این است که ساختارش ثابت است. بنابراین به کمک آن می‌توان یک سیستم با مرتبهٔ خاص را مدل‌سازی نمود. تعداد فرکانس‌های تشدید در مورد ترانسفورماتورها بسیار متغیر است و می‌تواند بیش از ۲۰ عدد نیز گردد. در نتیجه روش‌های مدل‌سازی با ساختار ثابت به عنوان یک مدل جعبه سیاه آن چنان در مدل‌سازی در حوزهٔ فرکانسی گسترده موفق نخواهند بود.

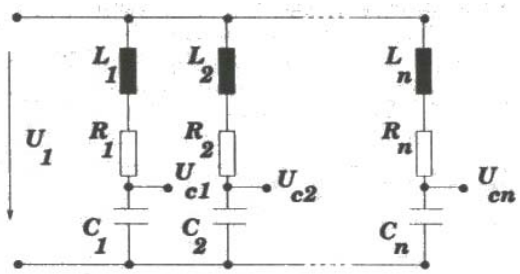
بنابراین بیشتر باید روش‌هایی مورد نظر باشند که دارای ساختار متغیراند. در زیر دو روش کاراً که نسبت به دیگر روش‌ها از همه موفق‌تر بوده‌اند معرفی می‌گردد.

۲-۲-۱- روش تحلیل Modal

این روش مدل‌سازی اساساً روش جدیدی نیست و از تئوری‌های مدار مربوط به اوایل قرن حاضر می‌باشد. ولی کاربرد آن برای نمایش‌های پیچیده بعد از دههٔ شصت همراه با گسترش کاربرد کامپیوتر رقمی جهت شبیه‌سازی‌ها میسر گشت. بر مبنای این تئوری، فرکانس‌های ویژهٔ تابع انتقال یک سیستم، تعیین کنندهٔ رفتار نوسانی آن است. این فرکانس‌های ویژه می‌توانند توسط سه پارامتر مُدال تعیین شوند.

- ω_i: فرکانس تشدید
- A_i: دامنه
- ξ_i: میرائی

اگر این مقادیر برای تمام فرکانس‌های ویژه معلوم باشند، آنگاه می‌توان رفتار سیستم را توسط ارائه تابع انتقال توصیف نمود. در روش تحلیل مُدال محاسباتی، پارامترهای مُدال را می‌توان از داده‌های مرحلهٔ ساخت بدست آورد. در روش تحلیل مُدال آزمایشی (تجربی)، پارامترهای مُدال از ارزیابی قسمت حقیقی و مجازی تابع انتقال اندازه‌گیری شده تعیین می‌گردند.



شکل ۲-۲- مدار معادل تحیل مُدال[۱۷]

برای پارامترهای مُدال مربوط به یک فرکانس ویژه می‌توان یک مدار تشدید سری نسبت داد. در نتیجه کلاً تحلیل مُدال منجر می‌شود به نمایش یک سیستم نوسانی بصورت اتصال موازی مدارهای تشدید سری. تعداد مدارات تشدید سری بستگی به تعداد فرکانس‌های ویژه سیستم دارد.

شکل ۲-۲ مدار مذکور را نمایش می‌دهد. مقادیر المان‌های RLC، می‌توانند بر اساس مقادیر پارامترهای مُدال و یک اندازه‌گیری اضافی امپدانس ورودی تعیین می‌شوند. در مورد ترانسفورماتور، نقطه شروع بررسی‌ها، سیم‌پیچ ثانویه است. در اینجا ولتاژ ثانویه بصورت مجموع وزن داده شدهٔ ولتاژهائی است که بر روی خازن‌ها در این شکل نمایش داده شده‌اند.

$$U_۲ = \gamma U_۱ - \sum_{i=۱}^{n} A_i U_{ci} \qquad (۱-۲)$$

در این رابطه به نسبت تبدیل خازنی ترانسفورماتور معروف است. در واقع برابر قسمت حقیقی تابع انتقال، به ازای $\omega \to \infty$ است. با توجه به این که ولتاژ دو سرخازن در شاخه برابر است با:

$$U_{ci} = U_۱ \frac{A_i \omega_i^۲}{\omega_i^۲ - \omega^۲ + j۲\xi_i \omega} \qquad (۲-۲)$$

بنابراین تابع انتقال ترانسفورماتور را می‌توان مستقیماً برحسب پارامترهای مُدال بیان نمود.

$$\frac{U_۲}{U_۱} = H(j\omega) = \gamma - \sum_{i=۱}^{n} \frac{A_i \omega_i^۲}{\omega_i^۲ - \omega^۲ + j۲\xi_i \omega} \qquad (۳-۲)$$

در زیر روش محاسبهٔ پارامترهای مُدال و عناصر مدار معادل بحث می‌گردد. به جای میرائی از تعریف ضریب کیفیت استفاده می‌گردد.

$$Q_i = \frac{\omega_i}{۲\xi_i} \qquad (۴-۲)$$

ضریب کیفیت در واقع نسبت فرکانس تشدید بر پهنای باند $\Delta\omega_i$ است.

$$Q_i = \frac{\omega_i}{\Delta\omega_i} \qquad (۵-۲)$$

دامنه نسبت حداکثر دامنه تشدید در قسمت موهومی تابع تبدیل به ضریب کیفیت، برای فرکانس ویژهٔ است.

$$A_i = \frac{Max\{\Im m\{H(j\omega)\}\}}{Q_i} \qquad (۶-۲)$$