

شیوه ای نوین برای شناسایی پارامترهای سیم پیچی ترانسفورماتور بر اساس مدل شبکه نردبانی

مسعود محمدعلیزاده شبستری، احمد جاوید غنی زاده، پرویز نجفی، مجتبی آقا میرسلیم، گئورگ قره پتیان، جواد شکراللهی مغانی
دانشکده مهندسی برق - دانشگاه صنعتی امیرکبیر - تهران - ایران
masoudshabestary@gmail.com, Ghanizadeh@aut.ac.ir

چکیده - آنالیز پاسخ فرکانسی که به عنوان تحلیل حوزه فرکانس نیز شناخته می شود، روشی قدرتمند و حساس برای ارزیابی شرایط ترانسفورماتورها، با استفاده از توابع انتقال الکتریکی طی یک محدوده فرکانسی وسیع است. آنالیز پاسخ فرکانسی این اجازه را می دهد که تغییرات موضعی یا الکتریکی اجزای داخلی نشان داده شوند. در تحقیقات اخیر، تلاش های زیادی انجام شده است تا مدل سیم پیچی ترانسفورماتور، به صورت مدل شبکه نردبانی هم ارز آن انجام شود. این تلاش ها دارای نقایصی هستند که باعث کاهش دقت مدل ها می شود. در این مقاله ایده ای جدید پیشنهاد شده تا پارامترهای مدل شبکه نردبانی را به دقت تعیین کند. ساده سازی های مرسوم در اینجا به کار گرفته نشده اند، تا به دقت مدل پیشنهادی افزوده شود. با استفاده از الگوریتم ژنتیک سعی شده است تا تابع خطا بین آنالیزهای پاسخ فرکانسی اندازه گیری شده و شبیه سازی شده به حداقل برسد و نتایج مورد نظر حاصل شود. مقایسه نتایج اندازه گیری بر روی یک سیم پیچ ترانسفورماتور (20/04kV، 1600 kVA، سیم پیچی دیسکی پیوسته با 38 دیسک)، با نتایج شبیه سازی، مزیت های قابل توجه شیوه پیشنهادی را نشان می دهد. کلید واژه- آنالیز پاسخ فرکانسی، سیم پیچی ترانسفورماتور، الگوریتم ژنتیک، مدل شبکه نردبانی.

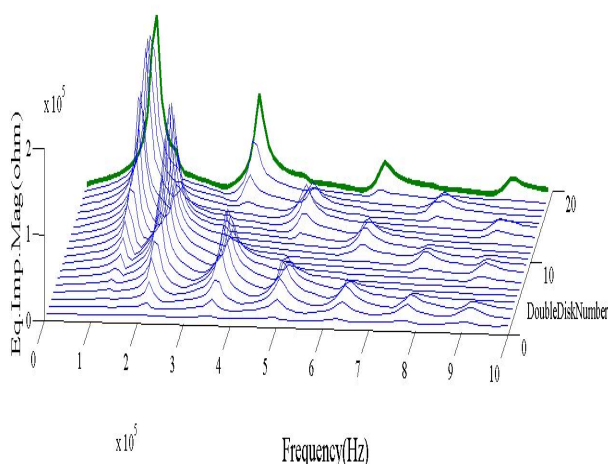
1- مقدمه

به منظور پیدا کردن محل و نوع نقص های مکانیکی توسط آنالیز پاسخ فرکانسی، سیم پیچی های ترانسفورماتور باید به درستی مدل و شبیه سازی شوند. تحقیقات مختلفی انجام شده اند تا مدل دقیق و مناسبی از سیم پیچی های ترانسفورماتور ارائه شود. به عنوان مثال مدل های فیزیکی [4-5]، مدل های جعبه سیاه [6] و مدل های هیبریدی [7]. مرجع [2] یک شبکه نردبانی کامل با پنج بخش را مورد بررسی قرار داده است. بر اساس این مرجع، طول سیم پیچ به طور مستقیم به بخش های مختلف شبکه نردبانی تصویر می گردد. همچنین تعداد بخش های مدل شبکه نردبانی برای یک سیم پیچی ترانسفورماتور معمولی، بستگی به آنالیز پاسخ فرکانسی آن دارد. علاوه بر این، مدل شبکه نردبانی که در [8] استفاده شده، دارای 6 بخش برای آنالیز مدل های واقعی فیزیکی است. اخیرا برخی الگوریتم های تکاملی اعمال شده اند تا پارامترهای مناسب برای مدل های مختلف شناسایی شوند. این الگوریتم های بهینه سازی، شامل الگوریتم ازدحام باکتری [9]، الگوریتم کلونی زنبورهای عسل [2]، الگوریتم ژنتیک [4] و غیره می باشند. در این مقاله، از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است تا تفاوت بین آنالیزهای پاسخ فرکانسی اندازه گیری شده و شبیه سازی شده به حداقل برسد.

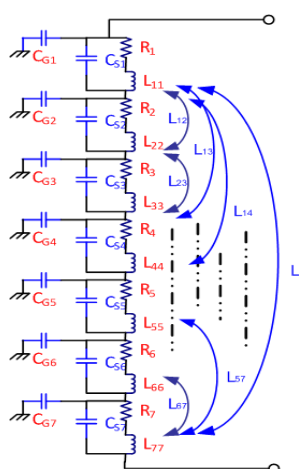
ترانسفورماتورها به طور گسترده ای در سیستم های قدرت استفاده می شوند. از این رو نظارت بر روی عیوب و نقایص آن ها در سال های اخیر نظرات بسیاری را به خود جلب کرده است. نقص های مکانیکی مانند تغییر شکل شعاعی، جابه جایی محوری و غیره می توانند توان ترانسفورماتورها را مختل کنند [1]. شیوه های مختلفی برای آنالیز و نظارت در سال های اخیر پیشنهاد شده است که در بین این شیوه ها، آنالیز پاسخ فرکانسی رایج ترین روش مورد استفاده است [1-2]. از آنجایی که هر جزء شبکه الکتریکی، پاسخ فرکانسی منحصر به فرد خودش را دارد، از شیوه ای رایج برای ارزیابی صحت مکانیکی در ترانسفورماتورها، بر اساس آنالیز پاسخ فرکانسی استفاده می شود. باید خاطر نشان کرد که پاسخ فرکانسی مانند اثر انگشت از یک دستگاه الکتریکی است که در شرایط مختلف، متفاوت است. از این رو مقایسه بین اندازه گیری های شرایط سالم و دارای خطا در یک ترانسفورماتور نشان دهنده تغییرات مکانیکی یا الکتریکی اجزای داخلی است [3].

یک ترانسفورماتور دارای n پیک باشد، به یک مدار معادل با حداقل n بخش نیاز است. با توجه به منحنی سبز رنگ در شکل 1 که نشان دهنده اندازه‌ی امپدانس معادل است، تعداد پیک های منحنی چهار عدد می باشد. بنابراین، شبکه نردبانی باید حداقل چهار بخش داشته باشد.

برای به دست آوردن نتایج دقیق تر، تعداد رزونانس های میانی نیز باید در نظر گرفته شوند. با توجه به آزمایش های انجام داده شده اضافی، سه پیک دیگر نیز بین پیک های قبلی پنهان شده اند. در این مقاله به منظور افزایش دقت نتایج، سه بخش که نمایانگر سه پیک پنهان است به شبکه اضافه شده اند. از این رو، همان طور که در شکل 2 نشان داده است، شبکه نردبانی با هفت بخش، برای سیم پیچی فشار قوی ترانسفورماتور، در MATLAB شبیه سازی شده است.



شکل 1: نتایج آنالیز پاسخ فرکانسی (مقدار امپدانس معادل) بین هر زوج دیسک و زمین، برای یک ترانسفورماتور قدرت.



شکل 2: شبکه نردبانی معادل با 7 بخش، شبیه سازی شده در MATLAB، که نمایانگر سیم پیچی فشار قوی است.

مرجع [4] ارائه کننده شیوه ای است که به وسیله آن می توان پارامترهای مختلف سیم پیچی ترانسفورماتور را از طریق ارائه مدل R-L-C-M توسط الگوریتم ژنتیک شناسایی کرد. اگرچه، ساده سازی هایی در نظر گرفته شده تا هدف مورد نظر قابل دسترس باشد. برای مثال، 1- اندوکتانس های متقابل کوچک نادیده گرفته شده اند، 2- مقدار پارامترهای مختلف در هر بخش شبکه نردبانی برابر فرض شده اند (به عنوان مثال مقاومت و اندوکتانس تمام بخش ها مقدار برابر دارند)، 3- نتایج تجربی با تمرکز به روی سیم پیچ فشار قوی (HV) و بدون مدل سیم پیچی فشار ضعیف (LV) به دست آمده اند.

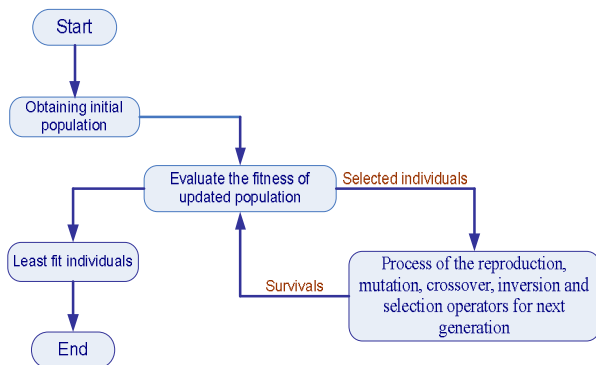
همچنین [2] و [8] شیوه های شناسایی با محدودیت های خاصی ارائه داده اند. در این مراجع نیز ساده سازی هایی در نظر گرفته شده است. برخی از این ساده سازی ها عبارتند از: 1- محدودیت تعداد بخش ها، 2- استفاده از مقدار برابر برای عناصر هر بخش، 3- نادیده گرفتن مقاومت، و 4- در نظر گرفتن تنها یک فرکانس رزونانس. لازم به ذکر است که تعداد پارامترهای مجهول بسیار محدود است.

در این مقاله شیوه ای نوین ارائه شده تا بر محدودیت های ذکر شده و ساده سازی ها غلبه شود. شیوه پیشنهادی بر روی یک سیم پیچ ترانسفورماتور 20/04 kV، 1600 kVA اعمال شده است. همان طور که در بالا ذکر شد، از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است تا بهترین مقادیر برای پارامترهای مختلف مدل سیم پیچی، از طریق به حداقل رساندن تابع خطا (EF) بین آنالیزهای پاسخ فرکانسی اندازه گیری شده و شبیه سازی شده، حاصل شود. مقایسه ها نشان داده اند که شیوه پیشنهادی در این مقاله می تواند پارامترهای مدل را دقیق تر از دیگر شیوه ها شناسایی کند.

2- مدارهای معادل

از شبکه نردبانی برای مدل سازی سیم پیچی های ترانسفورماتور استفاده می شود. در این مقاله، از این مدل برای آزمایش و شبیه سازی استفاده شده است. یک شبکه نردبانی شامل چندین بخش است. به طور معمول هر بخش نمایانگر تعدادی دیسکهای گروهی در سیم پیچی دیسکی و همچنین یک یا چند دور در سیم پیچی حلزونی [10-12] است. به منظور به دست آوردن نتایج رضایت بخش از شبکه نردبانی، تعداد بخش ها باید برابر یا بیشتر از تعداد پیک های نمودار آنالیز پاسخ فرکانسی باشد [8]، [2]. از این رو اگر آنالیز پاسخ فرکانسی اندازه گیری شده از

دهد که فرآیند الگوریتم ژنتیک را نمایش می دهد.



شکل 3: نمودار ساده برای نشان دادن فرآیند الگوریتم ژنتیک.

4- مدارهای معادل با هفت بخش، با در نظر گرفتن دو حالت مختلف

همان طور که در بخش 2 توضیح داده شد، در این مقاله یک مدار معادل با 7 بخش ارائه شده است. از آنجایی که نمودار آنالیز پاسخ فرکانسی هفت پیک دارد (با در نظر گرفتن رزونانس های پنهان)، مدار معادل نیز هفت بخش دارد، تا نتایج منطقی تر و دقیق تری حاصل شوند. این مدار معادل در دو حالت مختلف مورد بررسی قرار گرفته شده است.

حالت 1: مدار معادل با 7 بخش و مقداری برابر برای تمام عناصر

در این حالت، مقدار عناصر در تمامی بخش های مختلف، مقدار مساوی در نظر گرفته شده. بنابراین، R ، CS ، و CG ، سه پارامتر مجهول هستند. همان طور که در شکل 2 نشان داده شده است، تفاوت بین دو زیر وند، نشان دهنده فاصله است. به عنوان مثال، زیر وندهای L_{13} ، L_{46} و L_{27} را در نظر بگیرید. از آنجایی که $|6-4| < |7-2| = |5-5| < |3-1|$ ، رابطه بین فواصل این چنین است: $d_{55} < d_{13} = d_{46} < d_{27}$. با در نظر گرفتن این موضوع و معادله 2، نتیجه می گیریم $L_{55} > L_{13} = L_{46} > L_{27}$. به همین شیوه روابط زیر حاصل می شوند:

$$L_{11} = L_{22} = L_{33} = L_{44} = L_{55} = L_{66} = L_{77} \quad (5)$$

$$L_{12} = L_{23} = L_{34} = L_{45} = L_{56} = L_{67} \quad (6)$$

$$L_{13} = L_{24} = L_{35} = L_{46} = L_{57} \quad (7)$$

$$L_{14} = L_{25} = L_{36} = L_{47} \quad (8)$$

$$L_{15} = L_{26} = L_{37} \quad (9)$$

$$L_{16} = L_{27} \quad (10)$$

$$L_{11} > L_{12} > L_{13} > L_{14} > L_{15} > L_{16} > L_{17} \quad (11)$$

در این شکل، مدل معادل از عناصر الکتریکی ساخته شده است. مقدار این عناصر در نتایج موثر هستند. بنابراین، لازم است که مقدار دقیق این عناصر تعیین شود. در قدم اول، توضیح کوتاهی برای شرح نمادهای شکل 2 ضروری است:

CG : ظرفیت خازنی بین بخش و مخزن، یا هسته.

CS : ظرفیت خازنی بین دو بخش مجاور.

R : مقاومت سری بین هر بخش.

L : خودالقایی یا اندوکتانس متقابل.

در این مقاله دو حالت مختلف در نظر گرفته شده اند. در حالت اول، عناصر یکسان در تمام بخش ها، برابر در نظر گرفته شده اند. در حالت دوم، مقدار هر عنصر در بخش های مختلف، متفاوت در نظر گرفته شده. هر حالت برخی نقاط مثبت و برخی نقاط ضعف دارد. حالت اول دقت کمتری دارد و در مقایسه با حالت دوم آسان تر است.

نکته قابل ذکر این است که مقادیر قابل قبول خودالقایی و اندوکتانس متقابل در مدل شبکه نردبانی، باید از نابرابری های زیر پیروی کنند تا قابل قبول باشند [2].

$$L_{ab} < L_{aa} \quad \text{and} \quad L_{ab} < L_{bb} \quad (1)$$

$$L_{ab} > L_{cd} \quad \text{if} \quad |c-d| > |a-b| \quad (2)$$

$$(L_{ab} - L_{ac}) > (L_{ac} - L_{ad}) \quad \text{if} \quad |a-b| < |a-c| < |a-d| \quad (3)$$

3- تابع خطا و فرآیند بهینه سازی

برای یافتن مقادیر دقیق عناصر موجود در شبکه نردبانی داشتن یک مدل قابل اطمینان نقش مهمی دارد. زیرا تغییر این عناصر منجر به بوجود آمدن مدل های معادل مختلفی می شود. به دلیل برخی محدودیت ها به دست آوردن مدل دقیق پیچیده و مشکل است. در این مقاله، از یک تابع خطا استفاده شده تا تفاوت بین داده های نتایج شبیه سازی و تجربی کاهش یابد. این تابع خطا بر اساس مرجع [1] به این صورت تعریف شده است:

$$EF = \sum_{i=1}^{NS} \frac{1}{NS} \sqrt{\left[\frac{s_i - ((s_i + r_i)/2)}{((s_i + r_i)/2)} \right]^2 + \left[\frac{r_i - ((r_i + s_i)/2)}{((r_i + s_i)/2)} \right]^2} \quad (4)$$

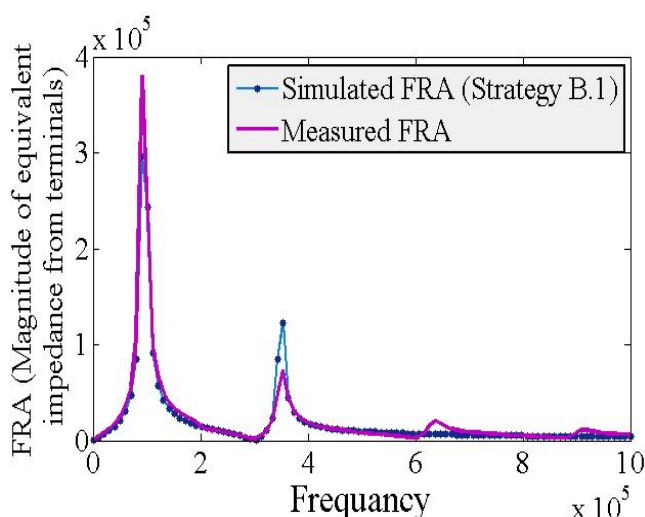
s_i و r_i و NS به ترتیب نمایانگر نتایج شبیه سازی، داده های مرجع، و تعداد نمونه ها هستند. به منظور به حداقل رساندن تابع خطا، شیوه پیشنهادی از یک فرآیند بهینه سازی استفاده می کند. الگوریتم ژنتیک یک الگوریتم انطباقی تکرار شونده است، که بر اساس ایده های تکاملی انتخاب طبیعی و ژنتیک، بهترین افراد را انتخاب می کند. شکل 3 نمودار ساده ای را نشان می

انجام شده است. علاوه بر این، شبکه نردبانی با 7 بخش در MATLAB simulink شبیه سازی شده است.

نتایج حالت 1 و حالت 2 به ترتیب در شکل 4 و شکل 5 نشان داده شده است. بر اساس این شکل ها، حالت 2 دقیق تر است و آنالیز پاسخ فرکانسی شبیه سازی شده، نزدیک تر به منحنی قابل انتظار است. همچنین دقیق تر بودن حالت 2 در جدول 2 قابل مشاهده است، زیرا مقدار تابع خطا در این حالت، کمتر از مقدار تابع خطا در حالت 1 است. در مقابل، جدول 2 نقاط منفی حالت 2 را نیز نشان می دهد. همان طور که ذکر شد، حالت 2 فرآیندی وقت گیر است و مطابق جدول 2، زمان همگرایی حالت 2 بیشتر از حالت 1 است. جدول 3 مقادیر به دست آمده در خصوص عناصر مدار معادل با 7 بخش، برای هر دو حالت را نشان می دهد. لازم به ذکر است که مقاومت، اندوکتانس و ظرفیت های خازنی به ترتیب در واحد کیلو اهم، میلی هانری و نانو فاراد بیان شده اند. همان طور که توضیح داده شد برخی پارامترها در حالت 1، برابر فرض شده اند و همین دلیل برخی خانه های جدول خالی است.

جدول 2: نتایج دو حالت پیشنهادی متفاوت

	Population size of GA	Generation size of GA	Convergence time (Hour)	EF	Covered resonances
Case1	500	100	9	0.33	2
Case2	500	100	18	0.12	4



شکل 4: آنالیز پاسخ فرکانسی اندازه گیری و شبیه سازی شده برای حالت 1

از این رو، این حالت شامل 10 پارامتر مجهول است (Cs, R, CG، و 7 مقدار مختلف برای اندوکتانس ها). رابطه بین این پارامترها در معادله 11 نشان داده شده است. مقدار اندوکتانس القا شده بین سیم پیچی های مختلف با افزایش فاصله بین آن ها کاهش می یابد [2]، [8].

حالت 2: مدار معادل با 7 بخش و مقادیر متفاوت برای

عناصر یکسان

در این حالت تعداد پارامترهای مجهول به این ترتیب است: 7 پارامتر مجهول برای CG در بخش های مختلف، 7 پارامتر برای هر CS و R (در مجموع 21 پارامتر مجهول برای CG، CS، و R). تعداد پارامترهای مجهول برای L برابر است با:

$$7_{Self_induc.} + \binom{7}{2}_{Mutual_induc.} = 7 + 21 = 28$$

در نهایت، مجموع تعداد پارامترهای مجهول برابر است با 21+28=49.

در این روش مقدار پارامترها بیشتر از حالت 1 است. علاوه بر این، نابرابری های ذکر شده نیز باید به این پارامترها اعمال شوند.

برای مثال:

$$L_1 > L_{12} \quad , \quad L_2 > L_{12} \quad (12)$$

$$L_{12} > L_{13} \quad , \quad L_3 > L_{13} \quad (13)$$

$$L_{13} > L_{14} \quad , \quad L_4 > L_{14} \quad (14)$$

$$L_2 > L_{23} \quad , \quad L_3 > L_{23} \quad (15)$$

$$L_{23} > L_{24} \quad , \quad L_4 > L_{24} \quad (16)$$

$$L_3 > L_{34} \quad , \quad L_4 > L_{34} \quad (17)$$

این مقدار پارامترهای مجهول و محدودیت ها، نقاط مثبت و منفی به همراه دارند. با این حال دقت نتایج بهبود می یابد، ولی سرعت فرآیند کاهش می یابد و محاسبات پیچیده تر می شوند.

جدول 1: مشخصات دو حالت مختلف با 7 بخش

تعداد قیود	تعداد پارامترهای نامعلوم	مقادیر المانهای مشابه	حالت
6	10	یکسان	حالت 1
42	49	متفاوت	حالت 2

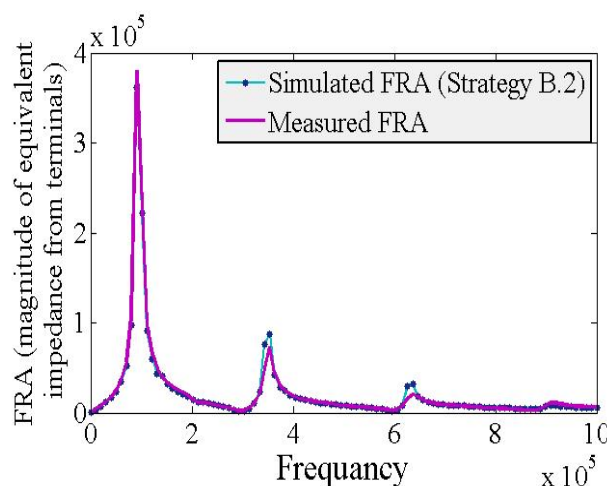
5- نتایج آزمایش

نتایج آزمایش، تفاوت میان دو حالت بررسی شده را نشان می دهند. فرآیند بهینه سازی توسط الگوریتم ژنتیک MATLAB

است. نقطه مثبت حالت 1 ساده تر بودن آن و نقطه مثبت حالت 2 دقیق تر بودن آن است. ارجحیت این دو حالت به کاربرد مورد نظر بستگی دارد. برای مثال، اگر سرعت فرآیند مهم است، حالت 1 بهتر است. ولی اگر دقت فرآیند مد نظر است، حالت 2 مناسب تر خواهد بود. اگر نقاط منفی حالت 2 بتواند با ترفندهای ریاضی و سیستم های محاسبه پیشرفته جبران شود، این حالت شیوه ای نوین برای مدل سازی یک ترانسفورماتور قدرت خواهد بود.

مراجع

- [1] T. Y. Ji, W. H. Tang, and Q. H. Wu, "Detection of power transformer winding deformation and variation of measurement connections using a hybrid winding model," *Electric Power Systems Research*, vol. 87, pp. 39-46, 2012.
- [2] P. Mukherjee, L. Satish, "Construction of Equivalent Circuit of a Single and Isolated Transformer Winding From FRA Data Using the ABC Algorithm" *IEEE Trans. Power Del.* vol. 27, no. 2, April 2012.
- [3] P. Karimifard, G.B. Gharehpetian, A. J. Ghanizadeh and S. Tenbohlen "Estimation of simulated transfer function to discriminate axial displacement and radial deformation of transformer winding," *COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, vol. 31 no. 4, pp. 1277-1292, 2012.
- [4] V. Rashtchi, E. Rahimpour, E. Rezapour, "Using a genetic algorithm for parameter identification of transformer R-L-C-M model", *Electrical Engineering*, vol. 88, no. 5, pp. 417-422, 2006.
- [5] C. Arturi, "Transient simulation and analysis of a three-phase five-limb step-up transformer following an out-of-phase synchronization". *IEEE Trans Power Deliv*, vol. 6, no. 1, pp. 196-207, 1991.
- [6] P. Vaessen, "Transformer model for high frequencies". *IEEE Trans Power Deliv*, vol. 3, no. 4, pp. 1761-1768, 1988.
- [7] G.B. Gharehpetian, H. Mohseni, K. Moller, "Hybrid modelling of inhomogeneous transformer windings for very fast transient overvoltage studies". *IEEE Trans Power Deliv*, vol. 13, no. 1, pp. 157-163, 1998.
- [8] K. Ragavan and L. Satish, "Construction of physically realizable driving-point function from measured frequency response data on a model winding," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 23, no. 2, pp. 760-767, Apr. 2008.
- [9] A. Shintemirov, W.J. Tang, W.H. Tang, Q.H. Wu, "Improved modelling of power transformer winding using bacterial swarming algorithm and frequency response analysis", *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 80, no. 9, pp. 1111-1120, 2010.
- [10] N. Abeywickrama, Y.V. Serdyuk, S.M. Gubanski, "Exploring possibilities for characterization of power transformer insulation by frequency response analysis (FRA)", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21, no. 3, pp. 1375-1382, 2006.
- [11] N. Abeywickrama, "Effect of dielectric and magnetic material characteristics on frequency response of power transformers", PhD Thesis, Chalmers University of Technology, Department of Materials and Manufacturing Technology, 2007.
- [12] M. Florkowski, J. Furgal, "Detection of transformer winding deformations based on the transfer function—measurements and simulations", *Measurement Science and Technology*, vol. 14, no. 11, pp. 1986-1992, 2003.



شکل 5: آنالیز پاسخ فرکانسی اندازه گیری و شبیه سازی شده برای حالت 2

جدول 3: مقادیر به دست آمده برای عناصر مدار معادل با هفت بخش

	حالت 1	حالت 2		حالت 1	حالت 2
$R_1(\Omega)$	0.0315	0.0825	L_{34}		3.9327
R_2		0.0931	L_{35}		1.4601
R_3		0.0584	L_{36}		0.9710
R_4		0.0961	L_{37}		0.2071
R_5		0.0931	L_{45}		0.6906
R_6		0.0544	L_{46}		0.0644
R_7		0.0553	L_{47}		0.0282
$L_{11}(\text{mH})$	1.8256	9.8077	L_{56}		0.1039
L_{22}		1.1946	L_{57}		0.0282
L_{33}		7.0576	L_{67}		0.7502
L_{44}		4.8540	$C_{G1}(\text{nF})$	5.9649	1.9457
L_{55}		1.0851	C_{G2}		1.9665
L_{66}		1.6951	C_{G3}		4.5158
L_{77}		1.7606	C_{G4}		4.5415
L_{12}	1.5031	0.5670	C_{G5}		4.3646
L_{13}	1.3019	0.2716	C_{G6}		2.9999
L_{14}	0.3465	0.1241	C_{G7}		0.8013
L_{15}	0.1536	0.1120	C_{S1}	1.0202	1.6147
L_{16}	0.1399	0.0806	C_{S2}		1.1555
L_{17}	0.1095	0.0782	C_{S3}		1.1717
L_{23}		1.0953	C_{S4}		0.0927
L_{24}		0.1319	C_{S5}		1.3399
L_{25}		0.0450	C_{S6}		9.7902
L_{26}		0.0377	C_{S7}		1.4181
L_{27}		0.0085			

6- نتیجه گیری

در این مقاله، یک مدار معادل با 7 بخش برای ترانسفورماتور قدرت ارائه شد. این 7 بخش بر اساس تعداد رزونانس های آشکار و پنهان ارائه شده اند. سپس دو حالت مختلف در نظر گرفته شدند و به همین دلیل به منظور پیدا کردن بهترین نتایج در هر حالت، یک تابع خطا تعریف شده است. برای بهینه سازی این تابع، از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. مقایسه بین دو حالت پیشنهادی نشان داد که هر حالت دارای نقاط منفی و مثبتی