

محاسبه خازن سری انواع سیم پیچی های دیسکی در ترانسفورماتور

مصطفی شریف زاده، محمد علی چچم نیا و مهدی داورپناه

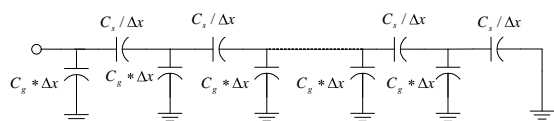
دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه تهران

m.davarpanah@ece.ut.ac.ir, m.chechemnia@ece.ut.ac.ir, m.shraifzadeh@ece.ut.ac.ir

چکیده - سیم پیچی های دیسکی معمولی و درهم بطور گسترده در ترانسفورماتورهای قدرت امروزی به کار برده می شوند. به علت تفاوت در نحوه اتصالات داخلی، این سیم پیچی ها رفتار متفاوت در مقابل امواج ضربه از خود نشان می دهند. بررسی پاسخ سیم پیچی ها در مقابل امواج فرکانس بالای ورودی، از مسایل مهم در طراحی ترانسفورماتورها می باشد. توزیع ابتدایی ولتاژ ضربه در سیم پیچی ها بستگی به خازن های پراکندگی داشته و از مدل ساده شده حالت گذرای ترانسفورماتور برای محاسبه آن استفاده می گردد. در این مقاله روش جدیدی برای محاسبه خازن های سری در انواع سیم پیچی های دیسکی و درهم ارائه شده و نتیجه روی انواع مختلف اتصالات درهم بررسی و با یکدیگر مقایسه شده اند

کلید واژه- ترانسفورماتور قدرت، سیم پیچی دیسکی، توزیع ولتاژ ضربه، حالت گذرای صاعقه

۱- مقدمه



شکل ۱. مدل گذرای ساده شده ترانسفورماتور

معادلات ولتاژ و جریان خازن های سری و موازی در فاصله x از انتهای سیم پیچی بصورت زیر خواهند بود :

$$i(x, t) = \frac{C_s}{\Delta x} \cdot \frac{d}{dt} (v(x) - v(x + \Delta x)) \quad (1)$$

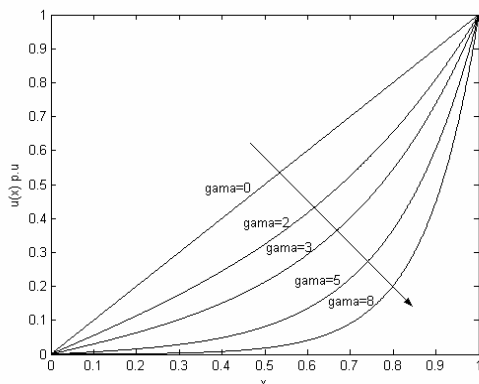
$$\frac{dv(x + \Delta x)}{dt} = \frac{i(x + \Delta x) - i(x)}{C_g \Delta x} \quad (2)$$

اگر در معادلات فوق Δx به سمت صفر میل داده شود، معادلات ۳ و ۴ بدست می آیند :

$$i(x, t) = C_s \frac{\partial^2 v(x, t)}{\partial t \partial x} \quad (3)$$

$$\frac{\partial i}{\partial x} = C_g \frac{\partial v}{\partial t} \quad (4)$$

امواج گذرای فرکانس بالای الکترومغناطیسی که بر اثر صاعقه بوجود می آیند، سبب ایجاد یک توزیع غیر یکنواخت ولتاژ گذرا در ترانسفورماتور می گردند. در دهه پنجاه میلادی، مهندسين دریافتند که این توزیع غیر یکنواخت استرس زیادی را در قسمتهای ابتدایی سیم پیچ های ترانس ایجاد می نماید. مشاهده تخریب عایقی یا سوختن ترانس که اکثرا از این ناحیه صورت می گرفت این نظر را تایید نمود. برای روشن شدن موضوع به محاسبه توزیع اولیه ولتاژ ضربه در سیم پیچی ترانسفورماتور پرداخته می شود [1]. با توجه به اینکه موج صاعقه در لحظات اولیه (تا زمان پیشانی موج) دارای مولفه های فرکانس بالا می باشد، لذا با دقت مناسب می توان از مقاومت و سلف سیم پیچ ها صرف نظر نموده و سیم پیچ ترانسفورماتور را بصورت شبکه نردبانی متشکل از خازن های سری و موازی مطابق شکل ۱ مدل نمود.



شکل ۲. نمودار توزیع اولیه ولتاژ ضربه

۲- سیم پیچی های درهم

مطابق شکل ۲ هر چه ضریب $\gamma = \sqrt{C_g / C_s}$ کمتر باشد، توزیع ولتاژ در طول سیم پیچی یکنواخت تر خواهد شد. استفاده از سیم پیچی های لایه ای حفاظت شده، هادی های محافظ و سیم پیچ های محافظ از روشهای مورد استفاده می باشند [2] و [3].

نوع سیم پیچی تاثیر قابل توجهی در مقدار خازن سری دارد. بنا بر این در طراحی ترانسفورماتور با توجه به ملاحظات حرارتی و عایقی بجای سیم پیچی های ساده (نظیر لایه ای) از انواع دیگر سیم پیچ استفاده می شود. در شکل ۳ برخی از انواع سیم پیچی های دیسکی مشاهده می شود.

در سیم پیچی دیسکی معمولی شکل (3.a)، سیم پیچ ها دور هسته در گروه هایی بصورت بشقاب (دیسک) پیچیده شده و سپس این دیسک ها به هم متصل می گردند. لازم به ذکر است که در سیم پیچی های لایه ای، هر سیم پیچی در مجاورت سیم پیچی دیگر پیچیده شده و نهایتاً تشکیل یک لایه را می دهند و سپس چندین لایه روی هم پیچیده می شوند. هر چند که سیم پیچی های دیسکی معمولی بهبود مناسبی در مقاومت در برابر ولتاژ ضربه پدید می آورند، اما در ولتاژ های بالاتر از 145Kv این بهبود رضایت بخش نیست [3].

چنانچه سیم پیچ های مجاور هم در یک بشقاب از دو دور مختلف باشند، رفتار سیم پیچی دیسکی در مقابل ولتاژ ضربه بهبود خواهد یافت. به این گونه سیم پیچی ها، سیم پیچ های درهم می گویند. در شکل های 3.b تا 3.d سه نمونه از سیم پیچ های درهم نشان داده شده است. تعداد

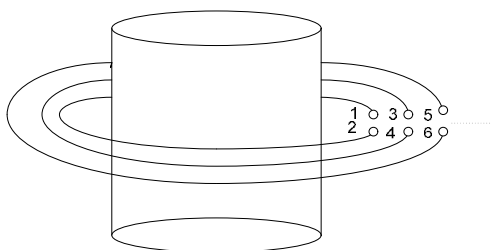
با حل فازوری معادلات فوق $v(x, t) = u(x) * e^{-j\omega t}$ و $i(x, t) = k(x) * e^{-j\omega t}$ اعمال u_0 به ترمینال ولتاژ ترانسفورماتور، توزیع ولتاژ موجی در طول سیم پیچ با اتصال ستاره زمین شده، از رابطه ۵ محاسبه می گردد:

$$u(x) = u_0 \frac{\sinh(\gamma x)}{\sinh(\gamma l)} \quad , \quad \gamma = \sqrt{\frac{C_g}{C_s}} \quad (5)$$

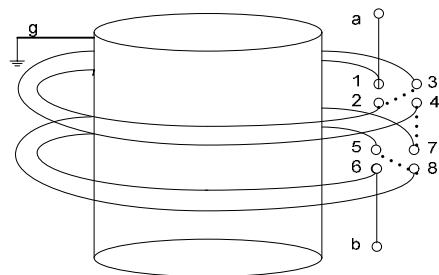
در این رابطه l طول سیم پیچ، x فاصله از انتهای سیم پیچ ترانسفورماتور، C_g خازن موازی است که می توان مقدار آن را از تست اندازه گیری تلفات عایقی ($tg(\delta)$) تعیین نمود و C_s خازن سری سیم پیچ های ترانسفورماتور است که مقدار آن را می توان با انجام تست پاسخ فرکانسی و یا تست (Low Voltage Impulse)LVI، اندازه گیری نمود. اندازه گیری خازن موازی ترانسفورماتور که به همراه تست $tg(\delta)$ انجام می گیرد، یکی از تست های متداول ترانسفورماتور است و معمولاً به عنوان یکی از تست های دوره ای و عیب یابی انجام می گیرد. جهت اندازه گیری خازن سری نیاز به ژنراتور ضربه فشار ضعیف و یا Network Analyzer می باشد. دستگاه های مذکور، مخصوص اندازه گیری خازن سری سیم پیچ ساخته می شوند و معمولاً در دسترس نمی باشند. در این مقاله روشی برای محاسبه خازن سری سیم پیچ ارائه گردیده و بر روی چند نوع سیم پیچی اعمال و تاثیر آن در توزیع ولتاژ صاعقه مورد بحث قرار گرفته است.

بر اساس رابطه ۵ توزیع ولتاژ صاعقه در طول سیم پیچ، در لحظات اولیه اعمال ولتاژ صاعقه مطابق شکل ۲ می باشد. لازم به ذکر است که پس از طی شدن زمان پیشانی موج ضربه، شیب ولتاژ صاعقه کمتر شده و توزیع ولتاژ صاعقه در این حالت خطی تر خواهد شد.

همان طور که در شکل ۲ مشخص است، هر چه γ کمتر باشد، توزیع ولتاژ ضربه روی سیم پیچ خطی تر خواهد شد، به عبارت دیگر توزیع اولیه به توزیع نهایی نزدیکتر و استرس ولتاژ روی سیم پیچی ها کمتر می شود. اما با افزایش γ ، توزیع ولتاژ غیر یکنواخت تر می گردد و استرس بیشتری در نقاط ابتدایی سیم پیچ خواهد بود. به عنوان مثال در صورتیکه $\gamma = 8$ باشد (که گاهی در سیم پیچی نوع لایه ای بوجود می آید)، تقریباً هشتاد درصد ولتاژ ضربه روی بیست درصد ابتدای سیم پیچ قرار می گیرد.

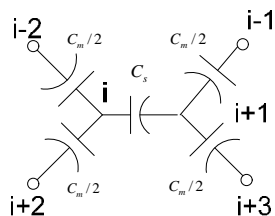


شکل ۴. نمایش دور های یک دیسک از سیم پیچی



شکل ۵. سیم پیچی دیسکی معمولی با دو دور در هر دیسک

در شکل ۶ خازن های موجود بین دو دور مجاور هم نشان داده شده است، در این شکل C_s ظرفیت خودی هر دور و C_m ظرفیت نهایی بین دو دور مجاور هم می باشد، که بصورت دو خازن $C_m/2$ بین نقاط ابتدایی و انتهایی در دو دور مجاور هم توزیع شده است. در این مدل فقط ظرفیت های خازنی متقابل بین دو دور مجاور هم در نظر گرفته شده و از ظرفیت های موجود بین دور های غیر مجاور صرفنظر شده است.

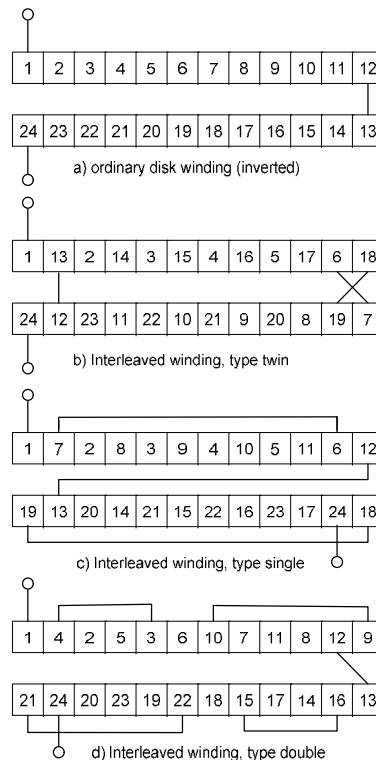


شکل ۶. مدار معادل خازنی سیم پیچ های دیسکی

در شکل ۵، هشت گره از سیم پیچی دیسکی نشان داده شده است. اتصال این گره ها را می توان با یک ماتریس ادمیتانس 8×8 نشان داد که در معادله ۶ آمده است. در این رابطه C_d ظرفیت نهایی بین دو دیسک مجاور می باشد که نحوه محاسبه آن در قسمت ۴ بیان خواهد شد. این ظرفیت بطور مساوی بین گره های ابتدا و انتهای دو دیسک توزیع شده است.

دیسک های درگیر با هم در سیم پیچی های درهم، درجه به هم پیچیدگی را مشخص می کند (جدول ۱).

در ادامه روشی برای مدل سازی خازنی سیم پیچ ها ارایه می گردد. از این مدل برای محاسبه C_s نهایی بین ابتدا و انتهای دیسک های درگیر با هم استفاده شده است و نتایج جهت مقایسه انواع سیم پیچ های در هم، بکار خواهد رفت.



شکل ۳. انواع مختلف سیم پیچی های دیسکی

جدول ۱. انواع سیم پیچی دیسکی

تعداد دیسک ها	نوع
1	Single Interleaved
2	Twin Interleaved
1/2	Double Interleaved

در شکل شماره ۴ لایه های مختلف سیم پیچ در یک دیسک نشان داده شده است. دو سر سیم پیچ در هر لایه جدا فرض شده است که با اتصال این نقاط به یکدیگر می توان انواع مختلف سیم پیچی را ایجاد نمود. به عنوان نمونه در شکل ۵ با اتصال گره های ۲ به ۳، ۴ به ۷، و ۵ به ۸، سیم پیچی دیسکی معمولی با دو دور در هر دیسک ایجاد شده است.

لذا اگر ماتریس Y_{th} خازنی مربوط را تشکیل داده (با نادیده گرفتن خازن های زمین)، درایه (i,i) ماتریس $Z_{th} = Y_{th}^{-1}$ برابر $1/C_{st}$ می باشد (زیرا تنها یک منبع جریان تزریقی در گره i موجود می باشد).

چنانچه مدل ارایه شده در قسمت 2 برای دو دیسک درگیر باهم و با n دور سیم پیچی در هر دیسک در نظر گرفته شود، ماتریس Y مطابق رابطه ۷ خواهد بود:

$$Y = \begin{bmatrix} C_s & -Cd/2 & 0 \\ -Cd/2 & 0 & -Cd/2 \\ 0 & -Cd/2 & C_s \end{bmatrix}_{4n \times 4n} \quad (7)$$

اگر اتصال بین گره m,n برقرار شود ماتریس Y بصورت زیر تغییر می نماید:

۱- عناصر y_{mm}, y_{nn} بصورت رابطه ۸ تغییر یافته و $y_{mn} = y_{nm}$ صفر می گردد.

$$\begin{cases} y_{mmnew} = y_{mmold} - y_{mn} \\ y_{nnnew} = y_{nnold} - y_{mn} \end{cases} \quad (8)$$

۲- با اتصال گره m و n می توان گره m (یا n) را از ماتریس Y_{old} حذف نمود. برای این منظور ستون های lm و nm و سطر های m ام و n ام با یکدیگر جمع شده و در سطر و ستون n ام قرار می گیرند.

برای آنکه تمام اتصالات در سیم پیچی برقرار گردد می بایست 2n-1 اتصال انجام گیرد. چنانچه مراحل دو گانه بالا برای تمام 2n-1 اتصال انجام گیرد، ماتریس $Y_{2n+1 \times 2n+1}$ بدست می آید. با حذف سطر و ستون گره مبنای b، $Y_{2n \times 2n}$ حاصل خواهد شد. در اینصورت :

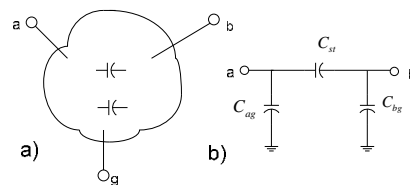
$$\begin{aligned} Z_{2n \times 2n} &= Y_{2n \times 2n}^{-1} \\ C_{st \ a,b} &= Z_{a,a}^{-1} \end{aligned} \quad (9)$$

لذا با داشتن Y کلی برای دیسک ها می توان برای هر نوع اتصال (درهم و ساده)، مقدار نهایی C_{st} بین ابتدا و انتهای یک مجموعه دیسک درگیر با هم را محاسبه نمود. همانگونه که در قسمت های قبل توضیح داده شد، این مقدار می تواند معیاری از توزیع ولتاژ اولیه ضربه در سیم پیچ های ترانسفورماتور باشد. در قسمت های بعد روش محاسبه خازن ها و اعمال روش بر چند نوع سیم پیچی در هم و نتایج حاصله آمده است.

$$Y = \begin{bmatrix} 1 & C_s + C_m/2 + C_d/2 & -C_s & -C_m/2 & 0 \\ 2 & -C_s & C_s + C_m/2 & 0 & -C_m/2 \\ 3 & -C_m/2 & 0 & C_s + C_m/2 & -C_s \\ 4 & 0 & -C_m/2 & -C_s & C_s + C_m/2 + C_d/2 \\ 5 & 0 & 0 & 0 & -C_d/2 \\ 6 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 7 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 8 & -C_d/2 & 0 & 0 & 0 \\ & 0 & 0 & 0 & -C_d/2 \\ & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & -C_d/2 & 0 & 0 & 0 \\ & C_s + C_m/2 + C_d/2 & -C_s & -C_m/2 & 0 \\ & -C_s & C_s + C_m/2 & 0 & -C_m/2 \\ & -C_m/2 & 0 & C_s + C_m/2 & -C_s \\ & 0 & -C_m/2 & -C_s & C_s + C_m/2 + C_d/2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

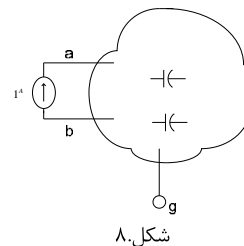
۳- روش پیشنهادی جهت محاسبه خازن سری بین دو دیسک

شبکه سه قطبی مطابق شکل 7.a در نظر گرفته شده است. شبکه خازنی نشان داده شده متشکل از دو مجموعه دیسک مجاور هم را می توان بصورت یک شبکه نردبانی متشکل از خازن های سری و موازی سیم پیچی مطابق شکل 7.b نشان داد.



شکل ۷. مدار معادل یک بخش سیم پیچی دیسکی بصورت سه قطبی خازنی

اگر از اتصال به زمین (g) صرفنظر شود، خازن های C_{ag} و C_{bg} مدار باز شده، و لذا خازن بین ترمینال های a و b از رابطه $Y_{th1} = C_{st}$ (ادمیتانس تونن) محاسبه می شود. برای محاسبه C_{st} ، باید زمین ها مدار باز گردد، که برای این منظور خازن های با زمین را در نظر نمی گیریم ($C_g = 0$). چنانچه گره ورودی a و گره مبنا b در نظر گرفته شود (شکل 8) و از گره a جریان 1A وارد شود، ولتاژ v_i مقدار Z_{th} خواهد بود [4].



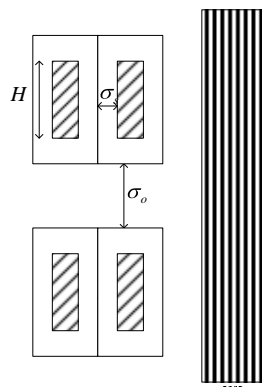
شکل ۸.

۴- محاسبه پارامترها [5] و [6]

در روش ارائه شده نیاز به محاسبه خازنهای خودی و متقابل می باشد. برای محاسبه ظرفیت های بین سیم پیچی های هم محور مجاور، سیم پیچی ها به صورت استوانه های هم محور با سطوح یکنواخت و صاف در نظر گرفته شده اند. همچنین قطرهای در مقایسه با فضای بین سیم پیچ ها به اندازه کافی بزرگ می باشد. در نتیجه می توان ظرفیت ها را بوسیله رابطه معتبر برای خازن های صفحه ای محاسبه نمود. ظرفیت متقابل بین دو دور مجاور در یک دیسک با استفاده از رابطه ۱۰ محاسبه می شود.

$$C_m = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_s \cdot D \cdot H}{\sigma_s} = 27.8 \frac{\epsilon_s \cdot D \cdot H}{\sigma_s} * 10^{-12} F \quad (10)$$

که در رابطه فوق H ارتفاع هادی، D قطر متوسط و ϵ_s گذردهی نسبی عایق جامد دور سیم پیچی (کاغذ آغشته به روغن) و σ_s ضخامت آن می باشد (شکل ۹).



شکل ۹. نمایش دو دیسک از سیم پیچی دیسکی

ظرفیت خودی سیم پیچ ها در رابطه ۱۱ بیان شده است [5]

$$C_s = 27.8 D \frac{\epsilon_s (H + 2\sigma_s)}{2\sigma_s} * 10^{-12} F \quad (11)$$

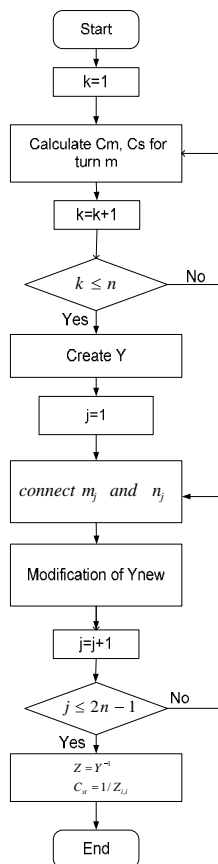
ظرفیت متقابل بین ۲ دیسک مجاور هم از رابطه ۱۲ بدست می آید [5] و [6]:

$$C_d = 27.8 D * \frac{1}{3} * \frac{r + \sigma}{\frac{2\sigma_s}{\epsilon_s} + \frac{\sigma_0}{\epsilon_0}} * 10^{-12} F \quad (12)$$

در رابطه ۱۲، r شعاع سیم پیچی، σ_0 ضخامت کانال روغن بین دو دیسک (مطابق شکل ۹)، و ϵ_0 گذردهی نسبی روغن می باشد.

۵- نتایج شبیه سازی

در این قسمت نتایج شبیه سازی برای چهار نوع سیم پیچی شکل ۳ آمده است. برای این منظور یک برنامه کامپیوتری در محیط نرم افزار MATLAB® تهیه شده است. فلو چارت این برنامه در شکل ۱۰ آمده است.



شکل ۱۰. فلو چارت برنامه محاسبه خازن سری بین دو دیسک مجاور

با استفاده از روش پیشنهادی در این مقاله، خازن سری بین دو دیسک مجاور هم در یک ترانسفورماتور توزیع 1250KVA، 20/0.4 کیلو ولت مورد بررسی قرار گرفت. در این ترانسفورماتور هادی مستطیلی دارای ابعاد $5^{mm} * 1.4^{mm}$ با ضخامت عایق کاغذی 0.1^{mm} ، ارتفاع کانال روغن بین دو دیسک 4^{mm} ، قطر ستون هسته 221^{mm} و قطر داخلی سیم پیچی ها 274^{mm} و 28^{mm} دور در هر دیسک می باشد. جهت مقایسه نتایج برای دیسک های شامل ۱۲ دور نیز آمده است. ضمناً گذردهی نسبی کاغذ آغشته به روغن ۳،۵ و گذردهی نسبی روغن ۲،۲۵ در نظر گرفته شده است.

۳- نتیجه‌گیری

در این مقاله روشی جهت محاسبه ظرفیت خازن سری بین دو دیسک مجاور در انواع سیم پیچی دیسکی پیشنهاد گردید. از مقایسه نتایج بدست آمده مشاهده می‌گردد که درهم نمودن سیم پیچی‌ها بطور موثری ظرفیت سری نهایی را افزایش می‌دهد. این امر سبب کاهش فاکتور γ و بهبود پاسخ ضربه ترانسفورماتور می‌شود. از نتایج حاصله در مرحله طراحی ترانسفورماتور جهت انتخاب نوع سیم پیچی مناسب استفاده می‌نمایند. در عمل ترانسفورماتور را بر اساس مسایل دیگر طراحی نموده، و سپس مناسب بودن پاسخ ضربه آن را بررسی می‌نمایند. چنانچه پاسخ پیش بینی شده و نحوه توزیع ولتاژ ضربه مناسب نباشد، نوع سیم پیچی را تغییر داده و مراحل طراحی را دوباره انجام می‌دهند.

مراجع

- [1] - جزوه درس حالت های گذرا در سیستم های قدرت، دکتر عباس شایگان، ۱۳۸۵.
- [2]- A.Greenwood, "Electrical Transients in Power Systems", Wiley-Interscience, 1971.
- [3]- "Transformers", Bharat Heavy Electricals Limited, 2nd ed. 2003.
- [4]- جبه دار، پرویز، "نظریه اساسی مدارها و شبکه ها"، جلد ۲، انتشارات دانشگاه تهران، ۱۳۸۰.
- [5]- رحیم پور، ابراهیم، "توزیع ولتاژ انتقالی در سیم پیچ های ترانسفورماتور"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی دانشگاه تهران، ۱۳۷۶.
- [6]- W.H.Hayt, "Engineering Electromagnetic", Mc Graw-Hill Book Company, 1988.
- [7]- K.Karsaid, D.Kerenyid and L.Kiss, "large Power Transformers", Elsevier, 1987, ISBN 0-444-995511-0, Vol.250
- [8]- Q.Moreau, P.Guunic, R.Dorr and Q.Su, "Comparison Between the High Frequency Characteristics of transformer Interleaved and Ordinary Disk Windings", IEEE trans. Power Delivery, 2000, PP2187-2192.

ظرفیت سری نهایی بین ابتدا و انتهای دو دیسک در اتصالات مختلف در جداول ۳و۲ آمده است.

جدول ۲. ظرفیت خازن سری بین دو دیسک مجاور هم با ۲۸ دور در هر دیسک

ظرفیت سری نهایی C_s [F]	نحوه اتصال
6.278e-011	3.a
e-010۵,۴۵۷۵	3.b
e-010۳,۲۶۲۴	3.c

جدول ۳. ظرفیت خازن سری بین دو دیسک مجاور هم با ۱۲ دور در هر دیسک

ظرفیت سری نهایی C_s [F]	نحوه اتصال
7.6753e-011	3.a
e-010۵,۴۴۵۶	3.b
e-010۳,۰۳۰۱	3.c
e-010۲,۰۵۵۰	3.d

همان طور که از جداول فوق ملاحظه می‌شود، هر چه اختلاف پتانسیل بین دو سیم پیچی مجاور هم بیشتر باشد، ظرفیت نهایی بیشتر خواهد بود. به عنوان نمونه درهم نمودن سیم پیچی به شیوه 3.b، ظرفیت سری را به میزان حدودا ده برابر نسبت به دیسکی معمولی افزایش داده است. در مراجع [7],[8] پاسخ فرکانسی ترانسفورماتور نیز مورد بررسی قرار گرفته و نشان داده شده است درهم نمودن سیم پیچی‌ها نه تنها توزیع اولیه ولتاژ، بلکه پاسخ گذرای آن و همچنین فرکانس های تشدید را بهبود می‌بخشد.

از روش انرژی نیز می‌توان نتایج بالا را تایید نمود. هرچه اختلاف پتانسیل بین دو دور مجاور هم بیشتر باشد، انرژی الکترواستاتیکی بیشتری ذخیره می‌گردد و در نهایت انرژی ذخیره شده در فضای بین ابتدا و انتهای دو دیسک افزایش می‌یابد. از آنجا که $Q = \frac{1}{2} CV^2$ و اختلاف پتانسیل دو سر ابتدا و انتها ثابت است، ظرفیت نهایی C افزایش خواهد یافت.