

محاسبه و بررسی جریان هجومی ناشی از وصل ترانسفورماتورهای توزیع به نام بیات -

محمد امیر حسینی خلج - محمدرضا رضاجویی

شرکت توزیع نیروی برق شمالشرق تهران - دانشگاه علم و صنعت ایران - دفتر فنی توزیع تهران ایران

کلید واژه: جریان هجومی - ترانسفورماتور - تلفات - فوران

1) مقدمه:

از آنجائیکه جریان هجومی در لحظه راه اندازی ترانسفورماتور بسیار مهم می باشد و به سان یک ضربه مکانیکی قوی بر ساختار ترانسفورماتور اثر می گذارد، لذا توجه خود را بر روی آن معطوف می کنیم. همانگونه که می دانیم با تحت ولتاژ قرار دادن اولیه یک ترانسفورماتور در حالتی که ثانویه باز است، جریان کوچکی بنام جریان تحریک از سیم پیچ ها جاری خواهد شد که شامل دو جزء است: یکی مربوط به تلفات هسته و دیگری جریان مغناطیس کننده می باشد. مقدار این جریان به تلفات بی باری ترانسفورماتور، تعداد دور سیم پیچ اولیه، شکل منحنی اشباع ترانس و حداکثر چگالی فوران بستگی دارد [1].

2) جریان مغناطیس کننده:

ترانس با ثانویه باز به مانند یک راکتور با هسته آهنی عمل می کند و معادله دیفرانسیل آن را میتوان بصورت زیر نوشت:

$$e = R i + n \frac{d\phi}{dt} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} e &= \text{ولتاژ لحظه ای منبع تغذیه} & \text{و} & R = \text{مقاومت سیم پیچی} \\ n &= \text{دور سیم پیچی اولیه} & \text{و} & i = \text{جریان لحظه ای} \\ \Phi &= \text{فوران لحظه ای} \end{aligned}$$

که به علت کوچکی R و i ، جمله $R i$ قابل صرف نظر می باشد. پس داریم:

$$\begin{aligned} e &= n \frac{d\phi}{dt} = \sqrt{2} E \sin(\omega t + \lambda) \\ \phi &= -\frac{\sqrt{2}}{\omega n} E \cos(\omega t + \lambda) + \phi_t \end{aligned} \quad (2)$$

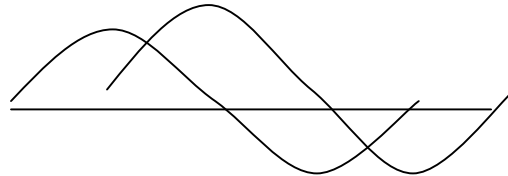
$E =$ مقدار مؤثر ولتاژ منبع

در معادله فوق جمله اول فوران شرایط طبیعی در هسته ترانسفورماتور و جمله دوم معرف جزء گذرای فوران است که مقدار آن به عوامل زیر بستگی دارد:
√ زمان شارژ ترانس

✓ حداکثر فوران طبیعی
 ✓ فوران پس ماند در هسته در زمان شارژ ترانس

پس فوران حالت پایدار ، یک موج سینوسی است که 90 درجه از ولتاژ منبع عقب تر می باشد .

فوران نرمال ولتاژ



طرح اقتصادی ترانسفورماتور نیازمند آنست که هسته ترانس در قسمت زانوبی منحنی کار کند . (در قسمت خطی و اشباع نیازمند افزایش سطح مقطع هادیها هستیم.)

3) تلفات هسته :

تلفات بی باری ترانسفورماتور شامل تلفات آهنی و تلفات هیستریزاس است که از روابط زیر پیروی می کنند :

$$I_{ron} \text{ Loss} = W_h + W_F \quad (3)$$

$$\text{تلفات انرژی} \quad W_h = k_h \cdot f \cdot B_m^{1.6} \quad \text{w/kg} \quad (4)$$

$$W_F = k_F \cdot f^2 \cdot t \cdot B_m^2 \quad \text{w/kg} \quad (5)$$

t = ضخامت ورقه ها و f = فرکانس و B_m = حداکثر چگالی فوران

k_h, k_f = ضرایبی هستند که به کیفیت جنس ورقه ها و ابعاد (حجم) آنها بستگی دارند .

تلفات موجب کاهش جریان هجومی و جریان تحریک به مقادیر نامی پس از زمان مشخص خواهد بود .

4) محاسبه جریان هجومی ترانس سه فاز :

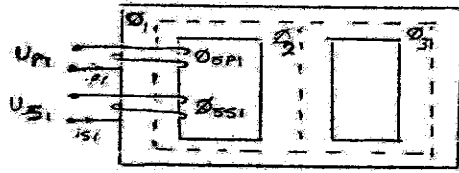
در ترانسفورماتور سه ستونی شکل (1) مدار مغناطیسی متقارن نبوده و رلوکتانس مغناطیسی برای بوبین ستون وسط کمتر از بوبینهای کناری می باشد . اگر نیروی محرکه مغناطیسی هر ستون را با F_1, F_2, F_3 نشان دهیم بطوریکه این نیروها فوران های ϕ_1 و ϕ_2 و ϕ_3 را در سه ستون هسته ایجاد نمایند . می توان روابط KVL را برای مدار مغناطیسی حلقه سمت چپ و راست هسته این چنین بنویسیم .

$$\begin{aligned} F_1 - \phi_1 (R_c + 2R_y) &= F_2 - \phi_2 R_c \\ F_3 - \phi_3 (R_c + 2R_y) &= F_2 - \phi_2 R_c \end{aligned} \quad (6)$$

با فرض سیستم سه فاز متقارن داریم :

$$F_1 + F_2 + F_3 = 0$$

در این روابط R_c رلوکتانس ستون و R_y رلوکتانس یوغ می باشد .



شکل (1) : ترانسفورماتور سه

از روابط فوق می توان استفاده کرده و نیروی محرکه مغناطیسی سه ستون را محاسبه نمود .

$$\begin{aligned} F_1 &= \phi_1 (R_c + 2R_y) + \frac{2}{3} \phi_2 R_y \\ F_2 &= \phi_2 (R_c + \frac{2}{3} R_y) \\ F_3 &= \phi_3 (R_c + 2R_y) + \frac{2}{3} \phi_2 R_y \end{aligned} \quad (7)$$

مشاهده می شود که نیروی محرکه مغناطیسی ستون وسط فقط تابع فوران مغناطیسی همان شاخه است ولی نیروی محرکه مغناطیسی ستونهای کناری ، هر یک از دو مؤلفه تشکیل شده اند که مؤلفه اول تابع فوران همان ستون و همفاز با آن می باشد و مؤلفه دیگر تابع فوران ستون وسط است . پس نیروهای محرکه مغناطیسی در این حالت یک دستگاه سه فاز نامتقارن را تشکیل میدهند .

جهت بررسی جریان هجومی ترانسفورماتور سه فاز ، هر ستون را شامل سه بوبین اولیه ، ثانویه و اتصال کوتاه مدل سازی می کنیم که سیم پیچ اتصال کوتاه نمایانگر اثرات جریان مذکور خواهد بود . تحت این شرایط ولتاژ این سه بوبین عبارت خواهد بود از :

$$\begin{aligned} U_{pi} &= i_{pi} \cdot R_{pi} + N_{pi} \frac{d}{dt} (\phi_i + \phi_{\sigma pi}) \\ U_{si} &= i_{si} \cdot R_{si} + N_{si} \frac{d}{dt} (\phi_i + \phi_{\sigma si}) \\ U_{ei} &= i_{ei} \cdot R_{ei} + N_{ei} \frac{d}{dt} (\phi_i + \phi_{\sigma ei}) \end{aligned} \quad (8)$$

$$i=1,2,3$$

مقاومت اصلی بوبین های اولیه و ثانویه هر فاز و $R_{e1,2,3}$ مقاومت اهمی سیم پیچ اتصال کوتاه شده است و N تعداد حلقه های سیم پیچی و φ فوران است. سیم پیچ اتصال کوتاه شده روی هر کدام از سه ساق ترانس قرار دارد ولی در شکل نشان داده نشده است .
 به منظور ساده تر کردن محاسبات ، فوران عبوری از هر سیم پیچ برابر مجموع فوران خودی و پراکندگی در نظر گرفته شده است . حال معادلات مدار مغناطیسی را برای دو حلقه سمت چپ و راست هسته ترانس می نویسیم .

$$\varphi_1 R_{m1} - \varphi_2 R_{m2} = i_{p1} N_{p1} + i_{s1} N_{s1} + i_{e1} N_e - i_{p2} N_{p2} - i_{s2} N_{s2} - i_{e2} N_e \quad (9)$$

$$\varphi_2 R_{m2} - \varphi_3 R_{m3} = i_{p2} N_{p2} + i_{s2} N_{s2} + i_{e2} N_e - i_{p3} N_{p3} - i_{s3} N_{s3} - i_{e3} N_e \quad (10)$$

در این رابطه $R_{m1,2,3}$ رلوکتانس شاخه مغناطیسی ترانس است و متغیر میباشد و با توجه به سه ساق بودن ترانس

$$\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 0 \quad \text{داریم:}$$

$$\varphi_3 = -\varphi_1 - \varphi_2 \quad \text{در نتیجه:}$$

$$F = \begin{bmatrix} R_{m1} & -R_{m2} \\ R_{m3} & R_{m2} + R_{m3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$F = \begin{bmatrix} i_{p1} N_{p1} + i_{s1} N_{s1} + i_{e1} N_e - i_{p2} N_{p2} - i_{s2} N_{s2} - i_{e2} N_e \\ i_{p2} N_{p2} + i_{s2} N_{s2} + i_{e2} N_e - i_{p3} N_{p3} - i_{s3} N_{s3} - i_{e3} N_e \end{bmatrix} \quad (12)$$

از این روابط فلوی خودی بدست می آید .

$$\begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} . F$$

ضرایب a_{11} تا a_{22} معکوس ماتریس رلوکتانس هستند . از رابطه (12) با توجه به (11) داریم :

$$\begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{19} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{29} \end{bmatrix} . i \quad (13)$$

$$i^T = [i_{p1} \ i_{p2} \ i_{p3} \ i_{s1} \ i_{s2} \ i_{s3} \ i_{e1} \ i_{e2} \ i_{e3}] \quad (14)$$

فلوی پراکندگی را بر حسب جریان و اندوکتانس پراکندگی میتوان نوشت :

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{\sigma pi} &= \left(\frac{L_{\sigma pi}}{N_{pi}} \right) \cdot i_{pi} \\ \varphi_{\sigma si} &= \left(\frac{L_{\sigma si}}{N_{si}} \right) \cdot i_{si} \\ \varphi_{\sigma ei} &= \left(\frac{L_{\sigma ei}}{N_{ei}} \right) \cdot i_{ei} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} i = 1, 2, 3 \\ 15) \end{aligned}$$

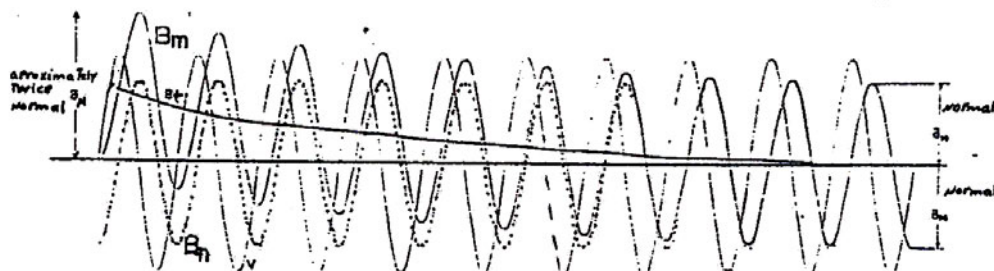
با توجه به محاسبات به عمل آمده در رابطه (8) به جای فلوهای خودی و پراکندگی، معادل آنها را که از روابط (13) و (15) بدست آمده اند قرار می دهیم و با توجه به روابط ماتریسی مربوطه مقادیر جریانها را بدست می آوریم [2] و [3].

جدول جریانهای هجومی با توجه به ظرفیت ترانسفورماتورهای شرکت ایران ترانسفو در پایان مقاله پیوست می باشد.

در ارتباط با جریان هجومی شش وضعیت مختلف را میتوان برای کلید زنی ترانسفورماتور متصور شد که آنها را به شرح زیر خلاصه می کنیم:

4-1) کلید زنی در ولتاژ صفر و پس ماند صفر:

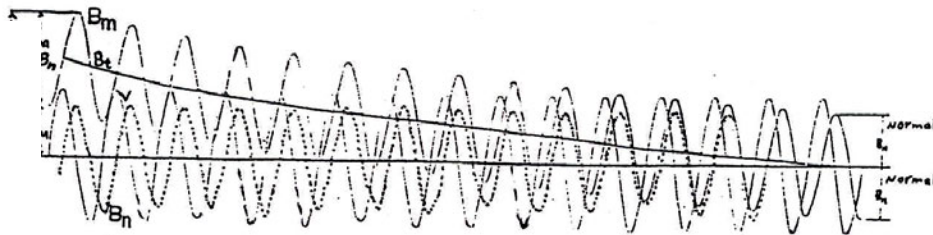
تحت شرایط طبیعی، فوران مغناطیسی در هسته 90 درجه با ولتاژ اختلاف فاز دارد و وقتی فوران پس ماند در هسته وجود نداشته باشد، فوران باید از صفر شروع شود. بعلت این جابجایی فاز لازم است فوران از یک حداکثر در یک جهت به یک حداکثر دیگر در جهت مخالف تغییر کند تا بتواند نیم سیکل را در سیم پیچی اولیه ایجاد نماید. بنابر این کل فوران بوجود آمده در طی نیم سیکل دو برابر فوران حداکثر خواهد بود. البته در عمل هیچوقت فوران گذرا به دو برابر مقدار خود در شرایط نامی نمی رسد و این به علت مقاومت سیم پیچی اولیه می باشد. در این شرایط جریان در زمان کوتاه مستهلک شده و زبانی به ترانس نمی رسد ولی امکان عملکرد در رله حفاظتی را فراهم می آورد.



شکل (2): کلیدزنی در ولتاژ صفر و پس ماند صفر

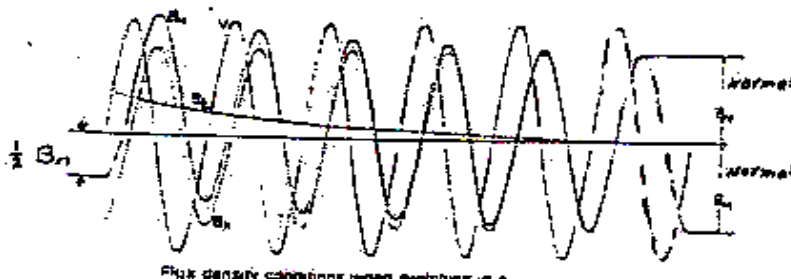
4-2) کلید زنی در ولتاژ صفر با حداکثر پس ماند مغناطیسی با پلاریته مخالف با فورانی که در شرایط ولتاژ طبیعی است :

در این حالت چون موج فوران از یک مقدار اولیه مربوط به پس ماند شروع میکند ، پس به مقداری بیش از دو برابر حداکثر نامی خواهد رسید و جریان هجومی زمان بیشتری نیاز دارد تا به شرایط پایدار خود برسد .



4-3) کلید زنی در ولتاژ صفر با حداکثر پس ماند مغناطیسی با پلاریته همسان با فورانی که در شرایط ولتاژ طبیعی است :

تحت این شرایط چون موج فوران پس ماند در همان جهت فوران اصلی است ، پس دامنه آن کمتر از فوران اولیه می باشد . می دانیم که خود هسته همیشه فوران پس ماند را کاهش خواهد داد . از سوی دیگر اثر سلف ترانس بروی خازن خط می تواند در کاهش فوران پس ماند مؤثر باشد .



شکل (4) : کلید زنی در ولتاژ صفر با حداکثر پس ماند با پلاریته همسان

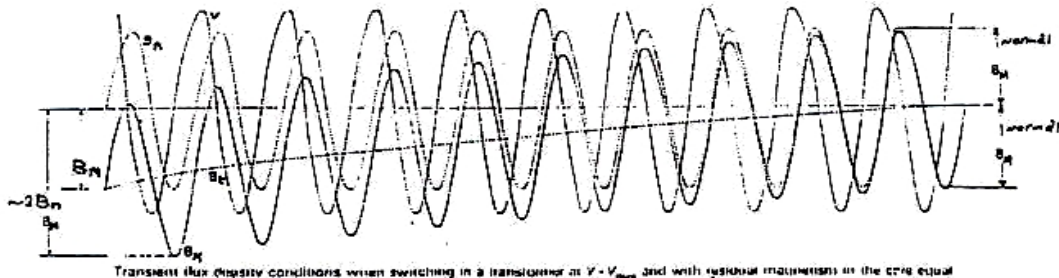
4-4) کلید زنی در حداکثر ولتاژ با پس ماند مغناطیسی صفر :

در این حالت در لحظه کلید زنی فوران باید صفر باشد ، چون با ولتاژ 90 درجه اختلاف فاز دارد و چون فوران پس ماند نداریم ، مطلوب ترین شرایط موجود را خواهیم داشت .

4-5) کلید زنی در حداکثر ولتاژ با پس ماند مغناطیسی حداکثر با پلاریته مخالف با فورانی که در شرایط ولتاژ طبیعی است :

در این حالت بخاطر فوران پس ماند

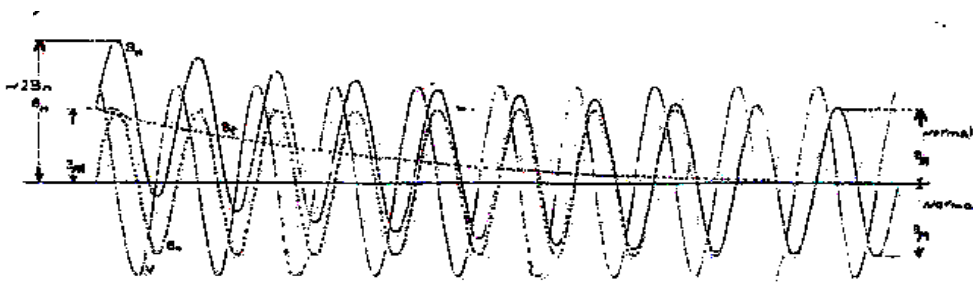
مؤلفه گذرا بوجود می آید و شکل موج غیر متقارن است و فوران پس از $\frac{3}{4}$ سیکل به حداکثر خود در جهت منفی میرسد که بیش از دو برابر حداکثر نامی خواهد بود .



شکل (5) : کلیدزنی در حداکثر ولتاژ با پس ماند حداکثر با پلاریته

4-6) کلید زنی در حداکثر ولتاژ با پس ماند مغناطیسی حداکثر با پلاریته همسان با فورانی که در شرایط ولتاژ طبیعی است :

این حالت نیز مخالف حالت قبل است و فوران اولیه غیر متقارن بوده و به جهت وجود فوران پس ماند از مقدار مثبت شروع شده در $\frac{1}{4}$ سیکل به بیش از دو برابر حالت نامی میرسد .



شکل (6) : کلیدزنی در حداکثر ولتاژ با پس ماند حداکثر با پلاریته همسان

از میان 6 حالت گفته شده حالت 2 از همه بدتر و حالت 4 از همه بهتر است .

5) تئوری های کاهش جریان های هجومی :

برای کاهش جریانهای هجومی تئوریهای زیر را میتوان نام برد ، هرچند که بعضی از آنها دارای اشکالاتی هستند که به آنها اشاره خواهد شد .

5-1) قبل از وصل کلید فشار قوی (بریکر) ، ابتدا مقداری بار را از روی سمت فشار ضعیف برداشته تا فوران پس ماند در هسته به حداقل خود برسد .

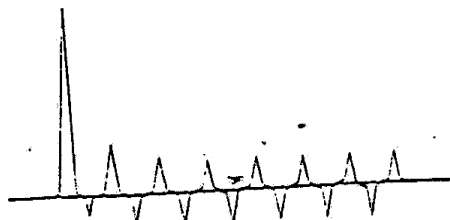
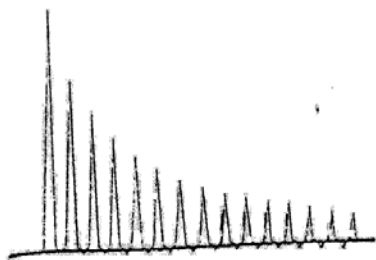
5-2) استفاده از ترانسفورماتورهای با ظرفیت کمتر در شبکه توزیع

5-3) از نظر تئوری ، فوران پس ماند میتواند با کاهش تدریجی ولتاژ قبل از قطع کلید حذف گردد که این کار را نمی توان بطور کامل در عمل رعایت نمود. ولی میتوان قبل از قطع فیذر ، تپ ترانس 63/20 kv را تا چند پله مجاز کاهش دهیم و سپس به قطع کلید فیذر خروجی اقدام نمائیم .

5-4) اگر می توانستیم کنتاکتهای کلید را در حداکثر ولتاژ باز کنیم ، بهتر بود. چون در این حالت فلوی هسته نزدیک به صفر است . (این شرایط در عمل اتفاق می افتد چون کلید مدار را در جریان نزدیک به صفر قطع میکند ، جائیکه ولتاژ حداکثر است) هرچند که این عمل برای ترانسهای تک فاز صادق است لیکن برای ترانسهای سه فاز امکان پذیر نمی باشد چون با حداکثر بودن ولتاژ یک فاز ، ولتاژ فازهای دیگر حداکثر نخواهد بود .

5-5) اگر بتوان سیستم وصل کنتاکتها را کند نمود ، می توانستیم کاری کنیم که قبل از تماس کامل کنتاکتها جرقه ایجاد شود ، پس ولتاژ در لحظه نزدیک به حداکثر وصل میگردد و جریان هجومی حداقل مقدار را می داشت ، هرچند که این کار برای ترانسهای سه فاز کاربرد ندارد چون در این حالت دو فاز دیگر ولتاژ حداکثر پیدا می کردند و از طرف دیگر کند شدن سیستم وصل کلید میتواند ولتاژ فرکانس بالا را ایجاد کرده و شکست عایق سیم پیچی را به دنبال داشته باشد ، لذا این روش توصیه نمی شود .

5-6) استفاده از مقاومت حائل بین کنتاکتها و سیم پیچی ترانس می تواند تا حدی جلوی جریانهای تیز هجومی را بگیرد . شکل زیر جریان هجومی ترانس را در دو حالت با مقاومت سری و بدون آن نشان میدهد. مقاومت حائل می تواند 5٪ ولتاژ نامی منبع را در حالت بی بار بخود اختصاص دهد .



شکل (7-ب) با مقاومت سری

شکل (7-الف) بدون مقاومت

5-7) استفاده از راکتورهای میرا کننده :

راکتورهای میرا کننده برای محدود کردن جریان هجومی ترانس به کار می روند . این راکتورها در شرایط کار نرمال ، جریان نامی خط را از خود عبور داده و در شرایط کلید زنی امپدانس زیادی را در مدار قرار میدهند و جریان را محدود می کنند . نوع متداول این راکتورها ، راکتور با هسته هوایی است [4] .

6) نتیجه گیری :

تأثیر مستقیم جریانهای هجومی ناشی از وصل ترانسفورماتور به شبکه ، نیروی مکانیکی است که به ساختار اکتیو پارت فشار می آورد که این نیروها بین بوبینها بیشتر خود را نشان میدهند به لحاظ آنکه این نیروها به سرعت افت می کنند و از بین می روند ، هادیهای بوبین ها در این لحظات کوتاه تحت کشش قرار می گیرند و عایق این هادیها در اثر کشش در برخی از نقاط فشرده می شوند ، در اثر این فشردگی نیروهایی که بصورت نرمال موقع ساخت به بوبین استقامت مکانیکی داده است کم می شود .

این عامل باعث بهم فشردگی عایق هادیها در بخشی و شل شدن آنها در بخش دیگر می شود که نهایتاً در قطع و وصل های زیاد ، خطرات شدیدی بوبین ها را تهدید می کند .

با توجه به مطالب ارائه شده ، تئوری های 1-5 و 2-5 مناسب شرکتهای توزیع بوده و حتی میتوان آنها را بصورت دستورالعمل در سیستم جاری نمود .

بطور کلی خلاصه و ماحصل محاسبات به شرح ذیل میباشد :

✓ وجود ترانسفورماتورهای با ظرفیت بالا موجب افزایش جریان هجومی می شوند .

✓ قطع فیذر زیر بار موجب می گردد فوران پس ماند در هسته ترانس افزایش یابد که این خود ، در هنگام وصل کلید ، جریان هجومی را افزایش می دهد .

مراجع :

- [1]. A.C.F RANKLIA . Transformer Book , Buther Worth , 1983
- [2]. Anthony .J. PANSINI , Electrical Transformers and power Equipment , Printice Hall , 1989
- [3]. NELSON .E.C , determination Of Primary feeder losses IEEE - PAS , DEC , 1968 , PP.1991

[4] مهندس شاهرخشاهی - طهماسبلی ، اضافه ولتاژهای قطع و وصل ، انتشارات امیر کبیر ، 1368

