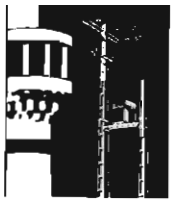
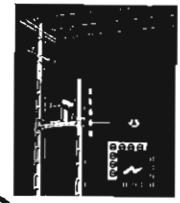




پنجمین کنفرانس شبکه‌های توزیع نیروی برق

بررسی اثرات عدم تعادل بار

و ارائه روشهای عملی به منظور متعادل نگهداشتن بار شبکه

علی اکبر محسنی شوشتری

سازمان آب و برق خوزستان

چکیده:

اصولاً یک شبکه مناسب باید دارای دو ویژگی خاص باشد یکی مسئله اقتصادی بودن شبکه و دیگری ارائه سرویس پیوسته و بهتر جهت مشترکین باشد. یکی از عواملی که باعث عدم پایداری در شبکه‌های توزیع می‌شود بارهای نامتعادل می‌باشد. جریانهای نامتعادل در فازهای سیم‌پیچی اول و دوم ترانسفورماتورهای سه فاز سبب تغییر شکل ولتاژهای خطی و فازی و پیدایش تلفات آهنی و مسی و حرارت اضافه می‌گردد و تأثیر نامطلوب بر کار مصرف‌کننده‌ها دارد، مثلاً افزایش ولتاژ دو سر لامپها باعث کوتاهی عمر آنها می‌شود و کاهش ولتاژ دو سر لامپها ضریب بهره آنها را تنزل می‌دهد. از طرفی عدم تقارن ولتاژ قطبهای اتصال موتورهای جریان متناوب میدان گردابی معکوسی را در آنها ایجاد می‌نماید و در نتیجه گشتاور راه‌اندازی و گشتاور حداکثر و ضریب بهره آنها کاهش می‌یابد. در این مقاله به مشکلات ناشی از نامتعادلی بارها و تأثیر این عوامل بر کارکرد موتورها، ترانسهای توزیع، کنتورهای اکتیو و ایمنی مصرف‌کننده‌ها پرداخته شده. و در انتهای مقاله جهت کاهش اثرات نامتعادلی بارها راه‌حلهای عملی ارائه شده.

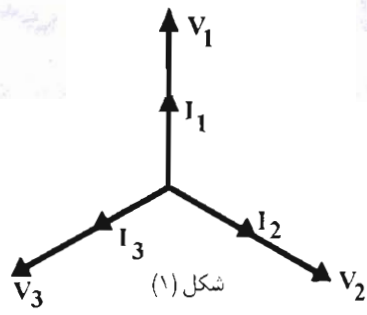
ضمن آرزوی موفقیت و اظهار قدردانی از تلاش آن دسته از برادران دست‌اندرکار این کنفرانس امید آن را دارم که این مقاله با همه نواقص خود بتواند راه‌گشای این مشکل باشد.

شرح مقاله :

۱ ـ محاسبات مربوط به تلفات توان ناشی از نامتعادلی بار :

۱ـ۱ـ بررسی تلفات در حالات متعادل و نامتعادل و مقایسه بین این دو حالت در شبکه‌ای با بار کاملاً واته و متمرکز در یک نقطه

اگر دیاگرام برداری ولتاژ و جریان مطابق شکل زیر باشد:



شکل (۱)

پس از تصویر کردن بردارهای جریان بر محور افقی و عمودی مقدار جریان نول برابر خواهد بود با:

$$In = \sqrt{(In)^2_x + (In)^2_y} \qquad In = \sqrt{I^2_1 + I^2_2 + I^2_3 - I_1 I_2 - I_2 I_3 - I_1 I_3}$$

اگر جریانها متعادل باشند در آن صورت جریان جاری شده در سیم نول صفر و مقدار تلفات برابر است با :

$$\text{تلفات متعادل } (\Delta P) = 3RI^2 = R_{/3}\ (I_1 + I_2 + I_3)^2$$

اگر جریانها متعادل نباشند با این فرض که سطح مقطع سیم فازها یکسان باشد مقدار تلفات برابر است با:

$$\text{تلفات نامتعادل } (\Delta P) = RI^2_1 + RI^2_2 + RI^2_3$$

تفاوت تلفات فازها در دو حالت متعادل و نامتعادل برابر است با:

$$(\Delta P) \text{ نامتعادل} - (\Delta P) \text{ متعادل} = 2_{/3}\ R\ (I^2_1 + I^2_2 + I^2_3 - I_1 I_2 - I_2 I_3 - I_1 I_3)$$

چون نامساوی زیر همواره برقرار است. بنابراین رابطه بالا همواره مثبت و تلفات در

$$I^2_1 + I^2_2 + I^2_3 \geq I_1 I_2 + I_2 I_3 + I_1 I_3$$

بیشتر از تلفات در حالت متعادل می‌باشد. این محاسبه بدون احتساب تلفات در سیم نول می‌باشد و چنانچه سطح مقطع سیم نول را برابر سیم فاز در نظر بگیریم. در آن صورت تلفات سیم نول نیز اضافه می‌شود.

$$(\Delta P) \text{ نول} = RI^2_n = R(I^2_1 + I^2_2 + I^2_3 - I_1 I_2 - I_2 I_3 - I_1 I_3)$$

$$(\Delta P) \text{ نامتعادل} - (\Delta P) \text{ متعادل} = 5/3\ R(I^2_1 + I^2_2 + I^2_3 - I_1 I_2 - I_2 I_3 - I_1 I_3) \quad (1)$$

و برای حالتی که سطح مقطع سیم نول نصف سیم فاز باشد.

(تلفات سیم نول) ۸/۳ = ازدیاد تلفات

۲ـ۱ـ رسم نمودار چگونگی رابطه بین افزایش عبور جریان از سیم نول و میزان تلفات در شبکه (بار کاملاً واته) اگر a درصد متوسط جریان سه فاز باشد که از سیم نول عبور می‌کند.

$$In = a/100\ (\frac{I_1 + I_2 + I_3}{3})$$

با توجه به رابطه (۱) ازدیاد تلفات برابر خواهد بود با:

$$\text{ازدیاد تلفات} = \frac{5}{3}\ (\frac{R.a^2}{10000}\ .\ \frac{(I_1 + I_2 + I_3)^2}{3})$$

$$\frac{\text{ازدیاد تلفات}}{\text{تلفات در حالت تعادل}} = \frac{a^2}{18000} \text{ و برای حالتی که سطح} = \frac{a^2}{180}(1) \text{ درصد ازدیاد تلفات}$$

مقطع سیم نول نصف سیم فاز باشد:

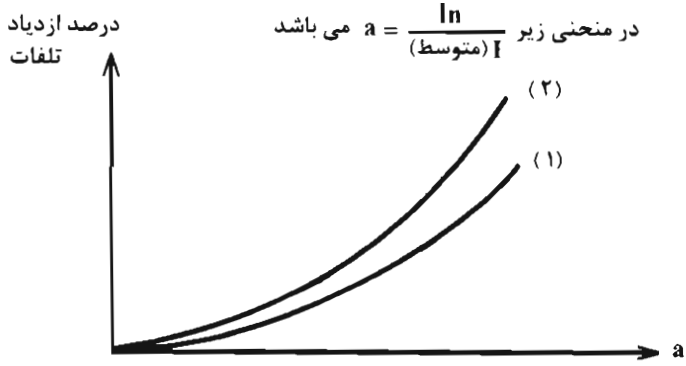
$$\text{درصد ازدیاد تلفات} = \frac{a^2}{112.5} \quad (2)$$

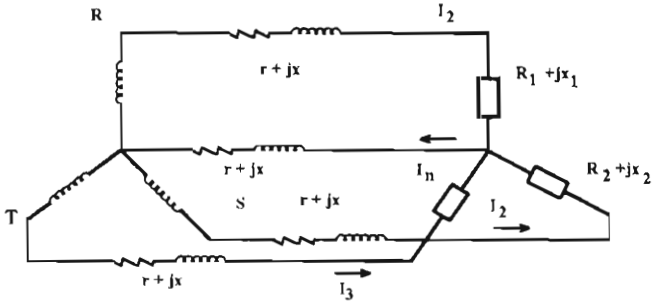
در منحنی زیر $a = \frac{In}{I \text{ (متوسط)}}$ می‌باشد.

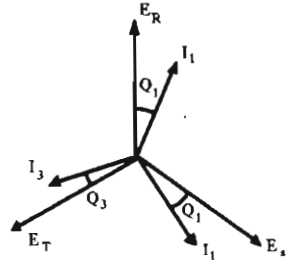
۳ـ۱ـ محاسبات مربوط به تلفات توان ناشی از نامتعادلی بار در شبکه‌های با بار مختلط.

فرض کنیم که بارهای مختلط در یک نقطه از خط متمرکز باشند. در این صورت شما و دیاگرام برداری ولتاژها و جریانها به صورت شکل زیر است:

در منحنی زیر $a = \frac{In}{I \text{ (متوسط)}}$ می باشد







$\vec{I}_1 = I_1 \text{Sin}\theta_1 + jI_1 \text{Cos}\theta_1 \qquad \vec{I}_2 = I_2 \text{Sin}\ (60 - \theta_2) - jI_2 \text{Cos}\ (60 - \theta_2)$

$\vec{I}_3 = -I_3 \text{Cos}\ (30 - \theta_3) - j\vec{I}_3 \text{Sin}\ (30 - \theta_3)$

$\vec{I}_n = \vec{I}_1 + \vec{I}_2 + \vec{I}_3$

حالت اول اگر θ برای هر سه جریان مساوی باشد بطوری که $\theta_3 = \theta_2 = \theta_1 = \theta$.

$$\vec{I}_n = (I_1 - 1/2\ I_2 - 1/2\ I_3)\ \mathrm{Sin}\theta + \sqrt{3}/2\ (I_2 - I_3)\ \mathrm{Cos}\theta + j\ [(I_1 - 1/2\ I_2 - 1/2\ I_3)\ \mathrm{Cos}\theta] - j[\sqrt{3}/2\ (I_2 - I_3)\ \mathrm{Sin}\theta]$$

محاسبه افت ولتاژ ـ در این قسمت به دلیل اینکه علاوه بر مقاومت اهمی باید راکتانس سلفی آنها را نیز در نظر گرفت. بنابراین افت ولتاژ هم در سیم فاز و هم در سیم نول بیشتر از حالت قبلی است.

حالت دوم اگر $\theta_3 \# \theta_2 \# \theta_1$ $I_1 = I_2 = I_3 = I$ در آن صورت جریان سیم نول برابر خواهد بود با:

$$In = I \sqrt{3\text{-}2\ [\mathrm{Cos}(\theta_1 - \theta_2 + 60) + \mathrm{Cos}(60 + \theta_3 - \theta_1) + \mathrm{Cos}(60 + \theta_2 - \theta_1)]}$$

بدترین حالت موقعی است که $\theta_1 = -90^\circ$ و $\theta_2 = 90^\circ$ و $\theta_3 = 30^\circ$ باشد در آن صورت جریان نول برابر است با: $I_n = I\sqrt{7} = 2.6\ I$

بنابراین اگر در ظاهر جریانهای سه فاز مساوی باشند لیکن بارهای اهمی و سلفی به تعادل روی فازهای مختلف تقسیم نشده باشند دارای یک نوع نامتعادلی خواهیم بود که در بدترین حالت جریان در سیم نول تا ۲/۶ برابر جریان فازها می‌شود و تلفات در سیم نول تا هفت برابر تلفات فازها می‌شود.

۴ ـ ۱ ـ محاسبه افت ولتاژ و تلفات توان در حالت کلی برای بارهای نامتعادل در طول خط.

الف ـ محاسبه افت ولتاژ :

اگر تعداد n سیم داشته باشیم n، ... ، d، c، b، a و تعداد جریانهای جاری شده نیز I_n، ... ، I_c، I_b، I_a باشد برای یک سیستم سه فازه، افت ولتاژ برای سیم برحسب مایل و در فرکانس ۶۰ برابر است با:

$$I_a R_a + j\ [0.2794(I_a \log 1/r + I_b \log 1/D_{ab} + I_c \log 1/D_{ac} + \ldots + I_n \log 1/D_{an}) + 0.03034\ \mu\ I_a]$$

و در فرکانس ۵۰ می‌توان رابطه فوق را در ۵۰/۶۰ ضرب کرد جریانها به صورت فیزوری می‌باشند.

در این رابطه R_a مقاومت هادی a به ازاء هر مایل -r شعاع هادی a برحسب اینچ و برای هادی a، D_{ab}، D_{ac}، D_{an}- فاصله برحسب اینچ بین مراکز هادیهای a و b، a و c، a و n می‌باشد و

μقابلیت نفوذپذیری برای هادی a.

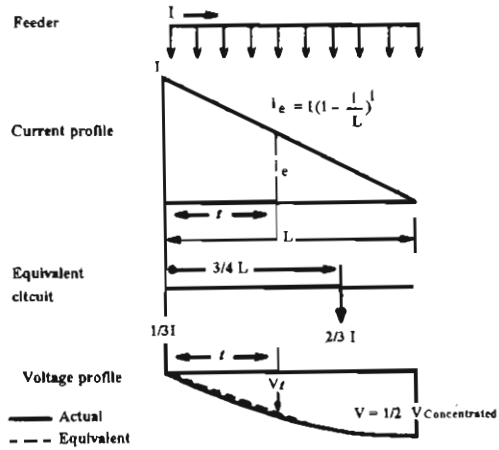
این معادله جواب می‌دهد افت ولتاژ را برای هر درجه از نامتعادلی و در ضریب قدرتهای مختلف.

1 inch = 2.54 cm 1 mil = 1.5 km

ب ـ محاسبه تلفات توان در حالت کلی :

افت ولتاژ و تلفات توان هادی ناشی از بارهای متمرکز در یک نقطه از خط توزیع را می‌توان با توجه به مشخصات خط و جریانها را به راحتی محاسبه کرد. اما عملاً در خطوط بارها به صورت غیریکنواخت توزیع شده‌اند به همین دلیل محاسبه تلفات توان و افت ولتاژ کاری مشکل است.

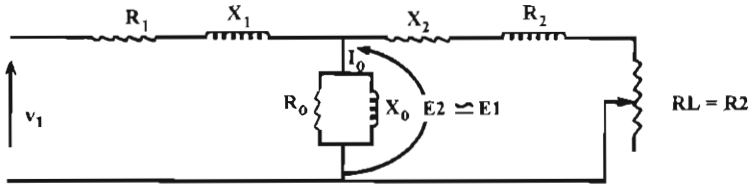
چند روش جهت حل این مشکلات ارائه می‌شود از جمله اینکه می‌توان فرض کرد که بارها در طول یک فیدر بطور یکنواخت توزیع شده باشند. که برای محاسبه افت ولتاژ می‌توان این فرض را کرد که مجموع بارها متمرکز شده‌اند. در نصف فیدر و برای محاسبه تلفات توان می‌توان این فرض را کرد که بارها متمرکز شده‌اند در فاصله یک سوم از کل طول فیدر از ترانس توزیع. البته روشهای دیگری نیز وجود دارد همانند شکلهای زیر بطوری که در این متد جهت محاسبه تلفات توان می‌توان این فرض را کرد که ۱/۳ بار در ابتدای فیدر و ۲/۳ دیگر بار در فاصله ۳/۴ از ترانس به صورت یکنواخت توزیع شده است و چگونگی محاسبه افت ولتاژ نیز در شکل نشان داده شده:



$$V_l = 2V\left[\frac{l}{L} - 1/2\left(\frac{l}{L}\right)\right]$$

۲ ـ اثر نامتعادلی بار در کار عادی موتورهای سه فاز :

از اثرات سوء نامتعادلی‌بار در عملکرد موتورها کاهش ضریب بهره این وسایل می‌باشد. که در زیر بطور اجمال به بررسی این موضوع می‌پردازیم. مدار معادل یک موتور القاء مانند ترانسفورماتور است بطوری که مقادیر ثانویه (رتور) را می‌توان به اولیه (استاتور) ارجاع داد و بر عکس.



بار مکانیکی موتور القاء را می‌توان با یک مقاومت غیرالقائی $R_2(1/S - 1)$ نشان و S لغزشی است که مقدار آن برابر است با $S = \frac{n_1 - n}{n}$ بطوری که در این رابطه n_1 سرعت سنکرون و n سرعت رتور می‌باشد.

۱ ـ ۲ ـ منحنی کوپل ـ سرعت موتور القائی سه فاز :

میزان کوپلی که یک موتور در هر سرعت ایجاد می‌کند یکی از مشخصات مهم موتور می‌باشد. زیرا معین‌کننده این است که چه نوع بارهائی را موتور قادر است بگرداند.

برای محاسبه کوپل مکانیکی تولید شده T ، با توجه به اینکه سرعت ماشین با لغزش S برابر با W_s (1 - S) برحسب رادیان بر ثانیه می‌توان چنین نتیجه گرفت.

$$T = \frac{K_1 S E^2_2 R_2}{(R_2)^2 + (SX_2)^2}$$

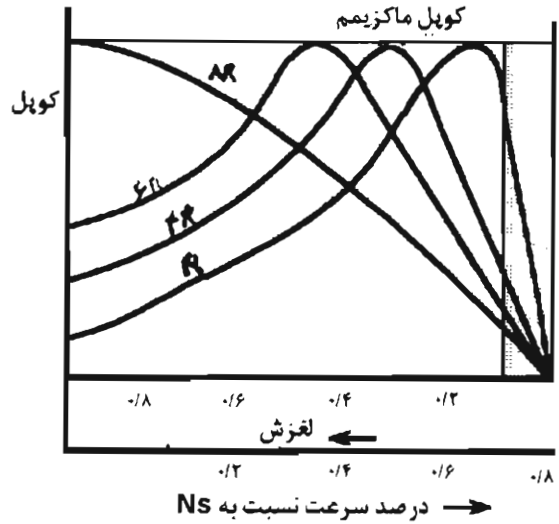
مطابق رابطه فوق که $E_2 \sim V$ و $T \sim V^2$

بنابراین تغییر ولتاژ منبع نه تنها بر کوپل راه‌اندازی T اثر دارد بلکه بر کوپل عادی نیز مؤثر است.

بنابراین جهت ثابت نگهداشتن رابطه بالا (با کم شدن ولتاژ استاتور) لغزش باید افزایش یابد یعنی سرعت افت کند که این مسئله باعث کاهش ضریب بهره موتور می‌گردد. که این مطلب را باید در راه‌اندازی توسط روشهای ستاره ـ مثلث و اتوتر این در نظر گرفت.

۲ ـ ۲ ـ محاسبه گشتاور در حالت نامتعادلی جریانها :

می‌دانیم در حالتی که جریان فازها نامتعادل باشند جریانهای ترتیب منفی و صفر وجود



خواهد داشت و به دلیل اینکه در اکثر موارد استاتور موتورهای سه فاز به صورت مثلث و یا ستاره بدون سیم زمین وصل می‌شوند بنابراین جریان مؤلفه صفر نمی‌تواند عبور کند. بنابراین ما فقط واکنش موتور را در برابر مؤلفه مثبت و منفی مطالعه می‌کنیم. در حالت نامتعادل جریان مؤلفه منفی تولید میدان دوار با دامنه ثابت ولی در جهت مخالف می‌نماید که سرعت این میدان نسبت به سیم‌پیچی رتور n_1 (2 - S) خواهد بود و ولتاژی با فرکانس دو برابر در سیم‌پیچهای رتور القاء می‌نماید. و گشتاور کل از تفاضل دو گشتاور مثبت و منفی حاصل می‌شود.

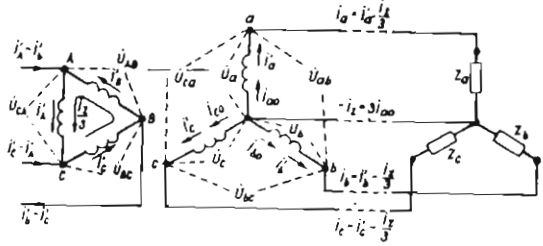
$$I^2_f \cdot R_{2/S} - I^2_b \cdot \frac{R_2}{(2 - S)}$$

بنابراین در صورت عدم تعادل جریانها مقدار کل گشتاور کاهش می‌یابد. از معایب دیگر نامتعادلی بار می‌توان به این نکته اشاره نمود که در اثر ولتاژ نامتقارن یک میدان دوار کامل در موتور ایجاد نمی‌شود و دامنه آن تغییر می‌کند در نتیجه قدرت موتور نیز با زمان تغییر می‌کند که سبب لرزش موتور می‌گردد. که در نهایت اگر گشتاور موتور از مقدار معینی کاهش یابد موتور از گردش ایستاده و حالت اتصال کوتاه در آن پدید آمده سیم‌پیچهای استاتور می‌سوزد که این حالت مانند دو فاز شدن موتور می‌باشد.

۳ ـ رفتار ترانسهای توزیع و قدرت در برخورد با نامتعادلی بار :

مطابق آمار رکوردگیری در پیک بار که از ۱۲۵ عدد ترانس توزیع با ظرفیتهای مختلف در

یکی از شهرهای استان خوزستان انجام گرفت مشاهده گردید که اولاً اکثر قریب به اتفاق ترانس‌ها با توجه به جریان سه فاز عبوری دارای نامتعادلی شدید بار هستند و ثانیاً چنانچه جریانهای هم فاز همه این ترانسها را باهم جمع کنیم باز عدم تعادل را در فیدرهای ۳۳کیلوولت خواهیم داشت. بنابراین لازم است که رفتار ترانسهای توزیع و قدرت را در برابر نامتعادلی بار با استفاده از روش کاربرد مؤلفه‌های متقارن مورد مطالعه قرار دهیم و برای این کار ترانسی را با گروه‌برداری D Y_o - 11 مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌دهیم. می‌دانیم هر سیستم سه فاز نامتعادل را می‌توان به سه سیستم متقارن مستقیم و معکوس و هموپلر تجزیه نمود و همچنین باید در نظر داشت که Z_1 ، Z_2 ، Z_0 امپدانسهای (معادل) دستگاه مستقیم و معکوس و صفر ترانسفورماتور می‌باشند که در ترانسها $Z_{sc} = Z_1 - Z_2$ است.



شکل (۷)

چون سیم صفر طرف ثانویه به زمین وصل شده است در هنگام نامتعادلی در مدار ثانویه مؤلفه‌های جریان مستقیم و معکوس و صفر جاری می‌شود و به دلیل اتصال مثلث در اولیه جریانهای هم فاز (صفر) باهم در اولیه و در داخل مثلث بسته می‌شوند.

در این حالت روابط زیر بین جریانهای فازی مدار ثانویه وجود دارد.

$$\dot{I}_a = \dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a2} + \dot{I}_{ao} = \dot{I}_{a'} + \dot{I}_{ao}$$

$$\dot{I}_b = \dot{I}_{b1} + \dot{I}_{b2} + \dot{I}_{bo} = \dot{I}_{b'} + \dot{I}_{bo} = \dot{I}_{a1}\, e^{j\frac{4\pi}{3}} + \dot{I}_{a}2\, e^{j\,2\frac{\pi}{3}} + \dot{I}_{ao}$$

$$\dot{I}_c = \dot{I}_{c1} + \dot{I}_{c2} + \dot{I}_{co} = \dot{I}_{c'} + \dot{I}_{co} = \dot{I}_{a1}\, e^{j\frac{2\pi}{3}} + \dot{I}_{a}2\, e^{j\frac{4\pi}{3}} + \dot{I}_{ao}$$

$I_{c'}$ و $I_{b'}$ ، $I_{a'}$ حاصل جمع هندسی جریانهای مستقیم و معکوس فازهای مربوطه است. برای ولتاژهای فازی می‌توانیم بنویسیم با توجه به شکل ۷.

$$\mathring{U}_a = -\mathring{U}_{CA} - I_{a'} Z_{sh} - \mathring{I}_{ao} Z_o$$

$$\mathring{U}_b = -\mathring{U}_{AB} - I_{b'} Z_{sh} - \mathring{I}_{bo} Z_o$$

$$\mathring{U}_c = -\mathring{U}_{BC} - I_{c'} Z_{sh} - \mathring{I}_{co} Z_o$$

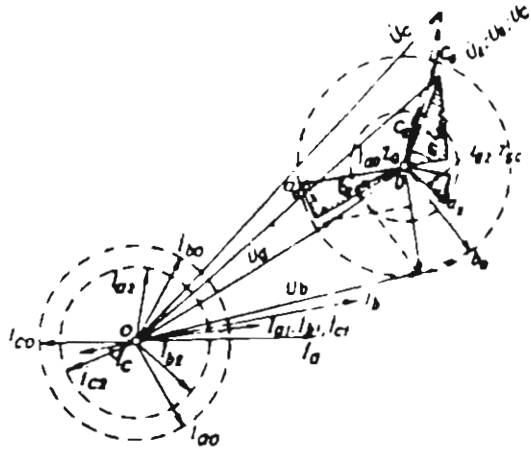
ولتاژهای خطی ثانویه برابر است با:

$$\mathring{U}_{ab} = \mathring{U}_a - \mathring{U}_b = \mathring{U}_{a'b} - \sqrt{3}\, \mathring{I}_{a1} Z_{sho}\, e^{j\frac{\pi}{6}} - \sqrt{3}\, \mathring{I}_{a2} Z_{sco}\, e^{-j\frac{\pi}{6}}$$

$$\mathring{U}_{bc} = \mathring{U}_b - \mathring{U}_c = \mathring{U}_{b'c} - \sqrt{3}\, \mathring{I}_{b1} Z_{sco}\, e^{j\frac{\pi}{6}} - \sqrt{3}\, \mathring{I}_{b2} Z_{sco}\, e^{-j\frac{\pi}{6}}$$

$$\mathring{U}_{ca} = \mathring{U}_c - \mathring{U}_a = \mathring{U}_{a'c} - \sqrt{3}\, \mathring{I}_{c1} Z_{sco}\, e^{j\frac{\pi}{6}} - \sqrt{3}\, \mathring{I}_{c2} Z_{sco}\, e^{-j\frac{\pi}{6}}$$

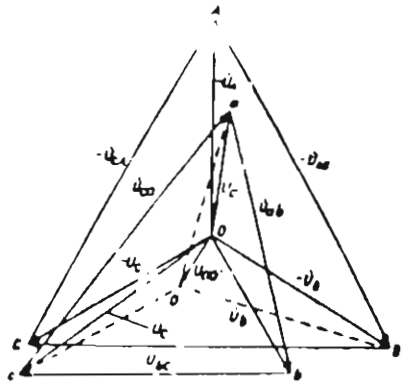
در این معادلات $\mathring{U}_{a'b}$ ، $\mathring{U}_{c'a}$ ، $\mathring{U}_{b'c}$ ولتاژهای خطی ثانویه ترانسفورماتور در حالت بی‌باری است. برای ترسیم دیاگرام ولتاژها باید افت ولتاژ در اثر جریانهای صفر را نیز در نظر گرفت.



شکل (۸)

در دیاگرام بالا افت ولتاژهای $I_{a1} Z_{sc}$ ، $I_{b1} Z_{sc}$ و $I_{c1} Z_{sc}$ برهم منطبق می‌گردد و افت ولتاژهای $I_{a2} Z_{sc}$ ، $I_{b2} Z_{sc}$ ، $I_{c2} Z_{sc}$ ، $I_{ao} Z_{sc}$ و $I_{bo} Z_s$ ، $I_{co} Z_{sc}$ را باید ترتیب دو بدو با آنها جمع کرد. برای این منظور ابتدا بردارهای افت ولتاژ $I_{a2} Z_{sc}$ و $I_{ao} Z_{sc}$ را به انتهای بردار $I_{a1} Z_{sc}$ می‌افزائیم و بعد دوائری به شعاعهای مساوی افت ولتاژهای مربوط می‌کشیم و روی این دوائر انتهای بردارهای $I_{b2} Z_{sc}$ و $I_{c2} Z_{sc}$ در جهت مستقیم و انتهای بردارهای $I_{bo} Z_{sc}$ و $I_{co} Z_{sc}$ را در جهت معکوس تغییر مکان می‌دهیم.

سپس حاصل جمعهای هندسی $I_{c2} Z_{sc} + I_{co} Z_{sc}$ و $I_{b2} Z_{sc} + I_{bo} Z_o$ و $I_{a2} Z_{sc} + I_{ao} Z_o$ را بدست می‌آوریم. با وصل کردن انتهای بردارهای بدست آمده به مبدا مختصات می‌توان بردارهای فاز U°_a ، U°_b و U°_c را بدست آورده. اگر بردار U°_b را ۱۲۰ درجه براست و بردار U°_c را ۱۲۰ درجه بچرخانیم دیاگرام واقعیٰ ولتاژها بدست می‌آید. مطابق شکل ۹ و از روی آن به سهولت بردارهای ولتاژهای خطی U°_{ab} ، U°_{bc} و U°_{ca} نیز معلوم می‌شود.



شکل (۹)

افت ولتاژ در اثر هم فاز بودن جریانهای دستگاه صفر در بار نامتعادل عدم تقارن ولتاژهای مدار ثانویه ترانسفورماتور را بازهم بیشتر افزایش می‌دهد.

به علاوه نقطه صفر به اندازه افت ولتاژ جریان صفر یعنی $\bar{0}\ \bar{0}$ تغییر مکان می‌دهد.

$$U^{\circ}_{0'0} = I^{\circ}_{ao} Z_o = I^{\circ}_{bo} Z_o = I^{\circ}_{co} Z_o$$

۴ ـ بررسی تأثیر نامتعادلی بارها در کارکرد کنتورها :

همان طوری که گفته شد یکی از اثرات نامتعادلی بارها نامتقارن شدن ولتاژ فازها و به دنبال آن کاهش دامنه ولتاژ فازها می‌باشد که این مشکل می‌تواند سبب خطا بر روی وسیله اندازه‌گیری انرژی مصرفی (کنتورها) می‌گردد یکی از روشهای اندازه‌گیری خطای یک کنتور محاسبه زمان گردش دیسک کنتور در تعداد دور مشخص به صورت تئوری و عملاً به کمک کرونومتر می‌باشد که با توجه به این اطلاعات و به کمک رابطه زیر درصد خطای کنتور بدست می‌آید.

$$\text{درصد خطای کنتور} = \frac{\text{تعداد دور بوسیله کرونومتر ـ تعداد دور محاسبه شده}}{\text{تعداد دور محاسبه شده}} \times ۱۰۰$$

و تعداد دور محاسبه شده نیز بوسیله رابطه زیر مشخص می‌گردد.

$$\text{زمان دور کنتور برحسب ثانیه محاسبه} = \frac{\text{(برای کنتور کیلووات ساعت) } ۱۰۰۰ \times \text{تعداد دور} \times \text{زمان در یکساعت (ثانیه)}}{\text{(تعداد دور به ازاء یک کیلووات ساعت)} \times \text{وات مصرفی}}$$

و برای بررسی کارکرد کنتور به ازاء ولتاژهای مختلف از یک کنتور تک فاز استفاده گردید که در آزمایشگاه به کمک دستگاه تزریق جریان و ولتاژ استاندارد تست شد. و نتایج آن به ازاء ولتاژهای مختلف در جدول زیر آمده است.

ولتاژ	۲۳۰	۲۲۰	۲۱۰	۲۰۰	۱۹۰	۱۸۰	۱۷۰
(ثانیه) زمان عملی بوسیله کرونومتر	۸۷	۸۹/۸	۹۴	۹۹	۱۰۵	۱۱۱	۱۱۷
زمان محاسبه شده برای ۶ دور به ازاء ولتاژ ۲۲۰ ولت (ثانیه)	۹۱						

نتیجه :

اگر مقدار خطای کنتور در ولتاژ نامی در حد استاندارد باشد. و با توجه به نامتعادلی بار ولتاژ کاهش پیدا می‌کند (با این فرض که وسائل برقی بتوانند در آن ولتاژ کار بکنند) در این حالت دیسک کنتور نسبت به حالت ولتاژ نامی کندتر می‌چرخد و به عبارت دیگر اگر در ولتاژ نامی زمان برای ۶ دور دیسک برابر ۸۹/۸ ثانیه بود برای ولتاژ ۱۸۰ این زمان به ۱۱۱ ثانیه

می‌رسد. و این بدان معناست که انرژی کمتری به کویل ولتاژ کنتور می‌رسد و باعث می‌گردد که دیسک کندتر چرخیده و انرژی کمتری به ثبت برسد. و با یک محاسبه ساده می‌توان نتیجه گرفت که به ازاء ۱۰ ولت کاهش جهت مصرف‌کننده بطور تقریب چیزی در حدود ۲۵کیلووات‌ساعت در طول یک ماه (در بارهای تا ۴ آمپر) و در بارهای بالاتر تا حدود ۶۰کیلووات‌ساعت انرژی کمتری کنتور به ثبت می‌رساند و این بالطبع به ضرر شرکتهای برق منطقه‌ای است.

۵ ـ اثرات نامتعادلی بار در ایمنی مصرف‌کننده‌ها :

در اثر عبور جریان از سیم نول این سیم دارای ولتاژی نسبت به زمین خواهد شد که این خود اثر ایمنی و حفاظتی سیم نول را از بین برده و اگر احیاناً تماسی با سیم نول توسط مصرف‌کننده بوجود آید ممکن است باعث برق‌گرفتگی و خطرات جانی شود.

راه‌حلهای عملی جهت کاهش اثرات نامتعادلی بار :

۱ ـ دادن کد یا شماره مخصوص به هر ترانس و تشکیل پرونده جداگانه جهت هر ترانس به طوری که پس از رکوردگیری سالانه (در موقع پیک بار) مقدار آمپراژ هر فاز در این پرونده نوشته شود و در صورت اضافه شدن مشترک جدید آمپر آن به این آمار اضافه گردد.

۲ ـ پس از رکوردگیری در صورت بالا بودن درصد بار ترانس اقدام به تعویض ترانس با ترانسی با ظرفیت بالاتر و در غیر این صورت مجبور به تفکیک شبکه و اضافه نمودن یک ترانس دیگر به شبکه.

۳ ـ رعایت استانداردهای توسعه و نصب شبکه‌های توزیع.

۴ ـ مبارزه قاطع و شدید با متخلفین سارق برق شبکه و کسانی که با دستکاری کنتورها عملاً پایداری شبکه را تمدید و عمر ترانس را کاهش می‌دهند.

۵ ـ استفاده از شبکه‌های رینگ فشار ضعیف که در صورت کاهش ولتاژ در بعضی نقاط و یا آسیب‌دیدن ترانس با بستن جمپرها از ترانسهای مجاور بتوان استفاده کرد.

۶ ـ پیداکردن نقاط ضعف شبکه توزیع (محلهائی که ولتاژ بیش از حد معمول کاهش می‌یابد) و در صورت لزوم نصب خازنهای ۵۰کیلووار فشار ضعیف.

۷ ـ داشتن یک سیستم زمین مناسب بطوری که سیم نول دارای زمین تکراری باشد که هم از خطر احتمال قطع شدن سیم نول کاسته گردد و هم اینکه با زیاد شدن تعداد زمینها مقاومت کل کم شده در نتیجه علاوه بر کاهش ولتاژ تماس مقدار تلفات توان در سیم نول نیز کم می‌شود.

۸ ـ استفاده از مانور تغییر تپ در ترانسها (توزیع و قدرت) بطوری که در صورت لزوم در تابستان تپهای ترانس افزایش و در زمستان کاهش یابد.
۹ ـ انتخاب فیوزهای مناسب قطع اضافه بار با توجه به ظرفیت ترانس و رکوردگیری سالانه.
۱۰ ـ کنترل بارهای صنعتی شبکه و اینکه مطابق تقاضای دیماندشان از شبکه تغذیه کنند.
۱۱ ـ انتخاب سیمهای با سطح مقطع مناسب در شبکه بطوری که حتماً سیم نول هم مقطع سیمهای فاز باشد و در شبکه زیر ترانس (قسمت فشار ضعیف) از سیم مسی با سطح مقطع ۷۰ میلی‌مترمربع استفاده گردد.

منابع

۱ ـ تئوری و ساختمان ترانسفورماتورهای یک فاز و سه فاز ـ دکتر علی مطلبی
۲ ـ ساختمان موتورهای آسنکرون ـ دکتر لسانی
۳ ـ جزوه جهاد دانشگاهی اصفهان
4 - STANDARD HANDBOOK FOR ELECTRICAL ENGINEERS - DONALD G. FINK - H. WAYNEBEATY