# بهره‌برداری بهینه از ترانسفورماتورهای قدرت در حالت پارالل

محمد رضا شرف زاده
شرکت برق منطقه‌ای فارس

**چکیده :**

در این مقاله شرائط لازم جهت طراحی ، نصب و بهره‌برداری بهینه از ترانسفورماتورهای قدرت در حالت پارالل ، نظیر برابری ولتاژها و درصد ولتاژ اتصال کوتاه نامی و ظرفیتهای نامی در محدوده تلرانس مجاز و یکسان بودن گروههای برداری ، یادآوری و از لحاظ فنی و اقتصادی مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین نحوه بهره‌برداری بهینه از ترانسفورماتورها در حالت انفرادی و پارالل بویژه از لحاظ کاهش تلفات انرژی با استفاده از روابط ریاضی و گرافیکی مطالعه شده است.

**شرح مقاله :**

**۱- بهره برداری بهینه از ترانسفورماتورها در حالت پارالل :**

ترانسفورماتورها زمانی در بهترین حالت بهره‌برداری قرار دارند که بررسی‌های فنی و اقتصادی ، توزیع بهینه کل خروجی آنها را تائید نماید. برای انجام اینکار دو حالت متمایز زیر باید در نظر گرفته و رعایت شود. حالت اول به طراحی اولیه جهت نصب و حالت دوم به روش بهینه بهره‌برداری از واحدهای نصب شده مربوط میگردد.

**۱-۱- طراحی اولیه :**

چنانچه شرائط زیر در طرح اولیه جهت نصب واحدها رعایت گردد ترانسفورماتورها در بهترین حالت ممکن بهره‌برداری خواهند شد.

الف - ولتاژهای نامی طرف اولیه و همچنین ولتاژهای طرف ثانویه کلیه ترانسفورماتورها باید مساوی باشند.

$UP_1 = UP_2 = \ldots = UP_n$

$US_1 = US_2 = \ldots = US_n$

عملا" لازمه شرط فوق این است که نسبت تبدیل کلیه واحدها برابر باشند.

$K_1 = K_2 = \ldots = K_n$

البته ترانسفورماتورها میتوانند دارای نسبت تبدیل‌هائی در محدوده تلرانس مجاز ($\pm 0.5\%$) باشند.

ب - گروه برداری کلیه ترانسفورماتورها باید یکسان و مشابه باشند. البته حالتهای خاصی وجود دارد که در آن گروههای برداری متفاوتی قابلیت پارالل شدن را دارا می باشند.

ج - مؤلفه‌های اکتیو و راکتیو ولتاژ اتصال کوتاه همه ترانسفورماتورها باید مساوی باشند.

$(Usc)a_1 = (Usc)a_2 = \ldots = (Usc)a_n$

$(Usc)x_1 = (Usc)x_2 = \ldots = (Usc)x_n$

لازمه شرط فوق این است که ولتاژ اتصال کوتاه نامی ترانسفورماتورها و در نتیجه درصد ولتاژ اتصال کوتاه نامی آنها عملا" برابر باشند.

$Usc_1 = Usc_2 = \ldots = Usc_n$

درصد ولتاژهای اتصال کوتاه ترانسفورماتورها میتوانند دارای تلرانس مجاز ($\pm 10\%$) باشند.

د - بهتراست ترانسفورماتورها دارای قدرتهای یکسان باشند. در صورت عدم امکان نباید نسبت بین قدرتها بیشتر از ۳ به ۱ باشد. البته یک حالت استثنا نیز وجود دارد که بعدا" شرح داده خواهد شد.

اگر ترانسفورماتورها جهت پارالل شدن کلیه شرائط فوق را در برداشته باشند دیاگرام برداری ولتاژها و جریانهای حالت بارداری آنها بر هم منطبق میگردند. در این حالت تمام واحدها متناسب با قدرتهای نامی خود تحت بار قرار گرفته و جریانهای بارآنها بطور جبری با هم جمع میگردند. عدم رعایت هر یک از موارد یاد شده میتواند باعث تقلیل عمر مفید عایق سیم پیچ ترانسفورماتورها در اثر اعمال اضافه بار و نتیجتا" افزایش حرارت غیر مجاز در آنها یا افت قدرت خروجی در نتیجه کاهش راندمان کل در اثر اعمال بار زیر مقادیر نامی به واحدها گردد. که خود شرح مفصلی دارد ، و بحث آن خارج از گنجایش این مقاله است.

۲-۱- بهره‌برداری :

از آنجا که انرژی تولید شده در نیروگاهها پس از چندین مرحله تبدیل به محل مصرف میرسد ، لذا بخش عمده‌ای از انرژی الکتریکی در مراحل مختلف انتقال صرف تلفات در ترانسفورماتورها میگردد. از این رو لازم است تعداد ترانسفورماتورها و تلفات آنها از نقطه نظر اقتصادی مورد بررسی قرار گرفته و طبق یک برنامه صحیح از واحدهای نصب شده بارگیری به عمل آید تا این تلفات به حداقل ممکن تقلیل یابد.

بررسی اقتصادی کار واحدها بسته به نحوه تغییرات بار به دو حالت تقسیم میشود. حالت اول مربوط به واحدهای منصوبه در ایستگاههائی است که تغییرات بار در آنها عادی میباشد ، و حالت دوم به ایستگاههائی که تغییرات بار در آنها شدید است مربوط میشود.

۱-۲-۱- بهره‌برداری در شرائط تغییرات عادی بار :

در ایستگاههائی که تغییرات بار آنها زیاد نمیباشد ، ترانسفورماتورهای نصب شده باید دارای قدرتهای یکسان باشند. چنانچه میدانیم تلفات کل یک ترانسفورماتور شامل تلفات بی باری (تلفات آهنی) و تلفات مسی (تلفات اتصال کوتاه ) میباشد که میتوان آنرا بصورت زیر نشان داد :

$$P_T = Poc + Psc$$

$$P_T = Poc + 3Rsc \cdot I^2$$

در رابطه فوق Poc تلفات آهنی ، Psc تلفات مسی ، Rsc مقاومت اتصال کوتاه و I جریان بار ترانسفورماتور میباشند.

اکنون میخواهیم بررسی نمائیم چنانچه ایستگاهی دارای دو دستگاه ترانسفورماتور مشابه باشد که میتوانند بصورت پارالل کار کنند ، تلفات را در حالتی که تنها یکدستگاه و همچنین حالتی که هر دو بصورت پارالل در سرویس باشند محاسبه و تعیین نمائیم کدام حالت اقتصادیتر و دارای تلفات کمتراست. با آنچه بیان شد میتوان تلفات را در دو حالت مفروض بدست آورده و با هم مقایسه نمود.

چنانچه یکدستگاه ترانسفورماتور بصورت تکی کار کند :

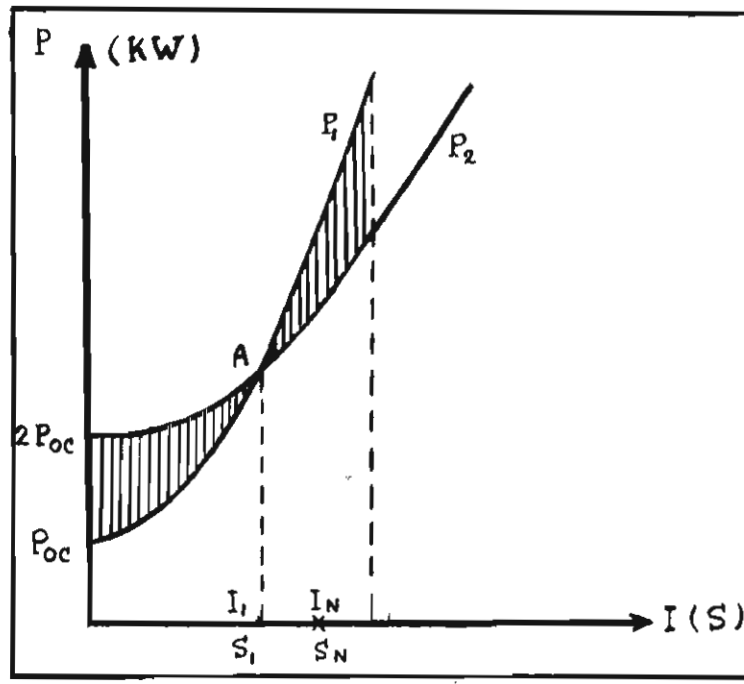
$$P_1 = Poc + 3Rsc \cdot I^2 \qquad (1)$$

و چنانچه دو ترانسفورماتور بصورت پارالل کارکنند:

$$P_2 = 2[Poc + 3Rsc.(I/2)^2]$$

$$P_2 = 2Poc + 3/2\ Rsc.I^2 \qquad (2)$$

با مقایسه روابط (۱) و(۲) نتیجه میشود که در حالت دوم تلفات هسته دو برابر ولی تلفات مسی نصف گردیده است. برای بررسی کار اقتصادی ابتدا منحنی تلفات را برای هر دو حالت مفروض ترسیم می نمائیم. در رسم منحنیها باید در نظر داشت که تلفات بی باری همیشه ثابت است زیرا با مجذور ولتاژ شبکه (که مقدار ثابتی است) متناسب بوده و ثابت میماند ، ولی تلفات مسی با مجذور جریان بار متناسب بوده و تغییرات آن نسبت به بار بصورت یک سهمی است.




شکل ۱

در شکل (۱) منحنی $P_1$ تلفات یک ترانسفورماتور تکی و منحنی $P_2$ مجموع تلفات دو ترانسفورماتور پارالل شده را نسبت به جریان بار (متناسب با آن نسبت به توان بار) نشان میدهد. چنانچه ملاحظه میشود ایندو منحنی در نقطه A یکدیگر را قطع مینمایند. در این نقطه به ازاء جریان $I_1$ تلفات یک ترانسفورماتور با مجموع تلفات دو ترانسفورماتور موازی شده برابر است. چنانچه دیده میشود اگر بار مصرفی کمتر از $S_1$ باشد ، $P_1<P_2$ شده و اگر بار مصرفی بیشتراز $S_1$ باشد $P_2<P_1$ خواهد شد. نتیجتا" به ازاء بارهای مصرفی کمتر از $S_1$ از یک ترانسفورماتور و به ازاء بارهای بیشتر از $S_1$ بهتراست از دو دستگاه ترانسفورماتور بصورت پارالل بار گرفته شود. اکنون برای تعیین نقطه A میتوان چنین نوشت :

$$P_1 - P_2 = 0$$

$$(Poc + 3Rsc.I_1^2) - 2(Poc + 0.75Rsc.I_1^2) = 0$$

$$1.5Rsc.I_1^2 - Poc = 0$$

$I_1$ جریان مربوط به نقطه A است.

در نتیجه :

$$I_1 = I_N.(2Poc/Psc)^{\frac{1}{2}} = I_N.(2m)^{\frac{1}{2}}$$

در رابطه فوق $m = Poc/Psc$ فرض شده است

از طرفی چون توان ترانسفورماتورها با جریان بار آنها متناسب است ، میتوان نوشت :

$$S_1 = S_N . (2m)^{\frac{1}{2}}$$

**مثال ۱ :**

در یک ایستگاه تبدیل انرژی دو دستگاه ترانسفورماتور مشابه هر یک به قدرت نامی 12.5 MVA با تلفات آهنی 15KW و تلفات مسی 75KW نصب شده است. بار ایستگاه معادل 12.5MVA با ضریب قدرت واحد میباشد. ابتدا تلفات را در دو حالت مختلف ( یک ترانسفورماتور یا هر دو ترانسفورماتور بصورت پارالل) محاسبه می‌نمائیم.

$$P_1 = P_{oc} + P_{sc} = 15 + 75 = 90 \text{ KW}$$

$$P_2 = 2P_{oc} + 0.5P_{sc} = 30 + 37.5 = 67.5 \text{ KW}$$

$$\text{درصد کاهش تلفات} = \frac{90 - 67.5}{90} \times 100 = 25\%$$

بطوریکه ملاحظه میشود در حالت دوم که ترانسفورماتورها بصورت پارالل کار میکنند تلفات به اندازه 25% کاهش یافته است.

به منظور بهره‌برداری اقتصادی در حالتی که بار متغیر فرض شود ، باید مشخص کرد که به ازاء چه مقادیری از بار از یک ترانسفورماتور و همچنین و به ازاء چه مقادیری از بار از هر دو بصورت موازی می‌بایست استفاده کرد تا بارگذاری اقتصادی و بهینه باشد. برای اینکار باید قدرت متناظر با نقطه برخورد منحنی ها را (نقطهA ) یافت و مرز استفاده از یک یا دو ترانسفورماتور را برای کار اقتصادی آنها تعیین نمود. از این رو خواهیم داشت :

$$m = P_{oc} / P_{sc} = 15 / 75 = 0.2$$

$$S_1 = S_N . (2m)^{\frac{1}{2}} = 12.5(2 \times 0.2)^{\frac{1}{2}} = 7.9 \text{ MVA}$$

بنابراین باید به ازاء بارهای کمتر از 7.9 MVA از یک ترانسفورماتور و به ازاء بارهای بیشتر از 7.9 MVA از هر دو بطور پارالل بار گرفت.

چنانچه تعداد ترانسفورماتورهای مشابه که در یک ایستگاه با هم پارالل میشوند بیش از دو دستگاه باشد (یا بطور کلی n دستگاه مشابه داشته باشیم.) رابطه کلی بهره‌برداری اقتصادی برای زمانیکه ترانسفورمر شماره n ام باید در سرویس قرار گیرد به طریق زیر تعیین میگردد.

باید :

$$P_{(n-1)} - P_n = 0$$

که به سادگی اثبات میشود :

$$I_{(n-1)} = I_N[n(n-1)m]^{\frac{1}{2}}$$

باتوجه به اینکه قدرت جذب شده از ترانسفورماتورها با جریان بارشان متناسب میباشد میتوان رابطه فوق را بر حسب قدرت ترانسفورماتورها نیز نوشت.

$$S_{(n-1)} = S_N.[n(n-1)m]^{\frac{1}{2}}$$

در رابطه اخیر $S_N$ قدرت نامی یکدستگاه ترانسفورماتور و n تعداد ترانسفورماتورهای مشابه موازی و m نسبت تلفات آهنی به تلفات مسی یک ترانسفورماتور میباشد. چنانچه رابطه فوق نشان میدهد کار اقتصادی ترانسفورماتورها بستگی به قدرت نامی $S_N$ و ضریب $[n(n-1)m]^{\frac{1}{2}}$ دارد. باید دانست که در واقع پارامتر m عامل اصلی در عملکرد اقتصادی ترانسفورماتورهای پارالل میباشد ، زیرا چنانچه مقدار m بزرگتراز 0.5 باشد ، موقعی واحدها اقتصادی کار میکنند که بیش از قدرت نامی‌شان از آنها بار گرفته شود. برای اثبات این موضوع کافی است در فرمول $S_1 = S_N(2m)^{\frac{1}{2}}$ به جای m مقداری بزرگتر از 0.5 قرارداده شود. دراینصورت ملاحظه میگردد $S_1 > S_N$ شده ، یعنی در ازاء قدرتهای بزرگتراز $S_N$ کار موازی ترانسفورماتورها اقتصادی خواهد بود،که در این صورت به واحدها اضافه بار اعمال شده و باعث OVERHEATING و خطرات ناشی از آن در آنها می گردد.چنانچه مقدار m به صفر نزدیک گردد باید در بارهای کوچکتری به تعداد ترانسفورماتورهای موازی اضافه نمود. از این جهت در ترانسفورماتورهای مختلف معمولا" $0.2<m<0.5$ در نظرگرفته میشود.

**مثال ۲ :**

در ایستگاهی پنج دستگاه ترانسفورماتور مشابه هر کدام با قدرت 10 MVA و نسبت تلفات آهنی به مسی معادل 0.45 بصورت پارالل کار میکنند. برای تعیین بهره‌برداری اقتصادی واحدها در بارهای مختلف با استفاده از رابطه زیرمی توان گفت :

$$S_{(n-1)} = S_N.[n(n-1)m]^{\frac{1}{2}}$$

- ترانسفورماتور دوم باید در بار $S_1=S_N(2m)^{\frac{1}{2}}$ در سرویس قرار گیرد.

- ترانسفورماتور سوم باید در بار $S_2=S_N(6m)^{\frac{1}{2}}$ در سرویس قرار گیرد.

- ترانسفورماتور چهارم باید در بار $S_3=S_N(12m)^{\frac{1}{2}}$ در سرویس قرار گیرد.

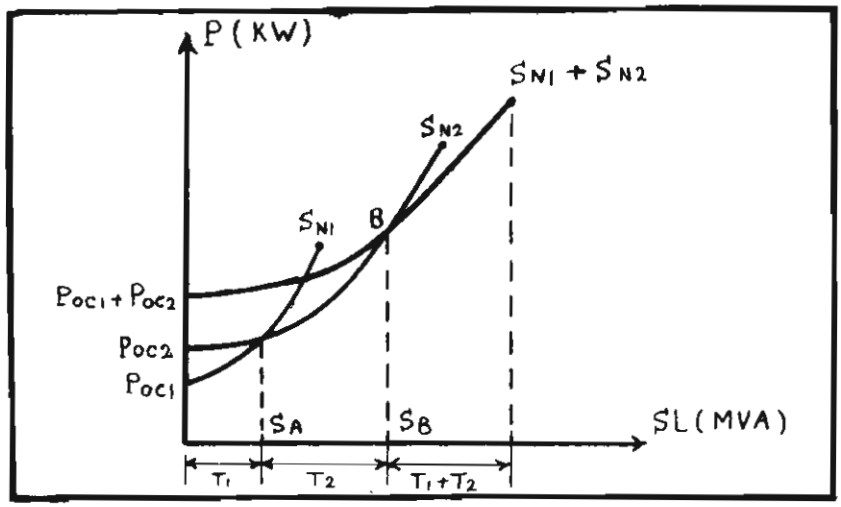
- ترانسفورماتور پنجم باید در بار $S_4=S_N(20m)^{\frac{1}{2}}$ در سرویس قرار گیرد.

با جایگزین کردن مقادیر عددی $S_N$ =10 MVA و m=0.45 در روابط فوق خواهیم داشت :

$S_1$=9.49 MVA , $S_2$=16.43 MVA , $S_3$=23.23 MVA , $S_4$=30 MVA

**۲-۲-۱- بهره‌برداری در شرایط تغییرات غیر عادی و زیاد بار :**

در اینگونه ایستگاهها با توجه به پیک بار بهتر است که از دو دستگاه ترانسفورماتور با قدرتهای نابرابر استفاده کرد ، بطوریکه دربارهای کم (پایه) از ترانسفورماتور کوچکتر و دربار متوسط از ترانسفورماتور بزرگتر و در پیک بار از هر دو ترانسفورماتور بصورت پارالل بارگیری به عمل آید. در شکل (۲) برنامه کار چنین ایستگاهی متناسب با بار تنظیم شده است. چنانچه مشاهده میشود نقاط برخورد منحنی‌های تلفات موقعیت واحدها را برای کار کردن بصورت تکی یا موازی تعیین مینماید. باید در نظر داشت که در ایستگاههائی که تغییرات بار آنها زیاد است نصب یک دستگاه یا دو دستگاه ترانسفورماتور با قدرتهای یکسان صحیح نیست ، زیرادر صورت اول ایستگاه فاقد واحد رزرو خواهد شد و در صورت دوم از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نمیباشد.




شکل ۲ - منحنی تغییرات تلفات در دو حالت بهره‌برداری تکی و پارالل

در این حالت نیز مانند حالت قبل که ترانسفورماتورهای پارالل شده مشابه بودند ، با مساوی قرار دادن تلفات ترانسفورماتور اول و دوم (نقطهA) ، و همچنین تلفات ترانسفورماتور بزرگتر با مجموع تلفات هر دو ترانسفورماتور (نقطه B) ، محدوده بهره‌برداری بهینه واحدها در هر حالت بدست می‌آید. برای تعیین قدرتهای متناظر با نقاط A و B در منحنی‌های تلفات شکل ۲ از روابط زیر استفاده میکنیم :

$$S_A = \{(P_{OC2}-P_{OC1})/[P_{SC1}/(S_{N1})^2-P_{SC2}/(S_{N2})^2]\}^{\frac{1}{2}}$$

$$S_B = \{P_{OC1}/[P_{SC2}/(S_{N2})^2-(P_{SC1}+P_{SC2})/(S_{N1}+S_{N2})^2]\}^{\frac{1}{2}}$$

**مثال ۳ :**

در یک پست توزیع محلی دو دستگاه ترانسفورماتور 63/20KV با مشخصات زیر نصب شده است.

$S_1$ = 15 MVA ، $P_{OC1}$ = 15 KW ، $P_{SC1}$ = 83 KW

$S_2$ = 30 MVA ، $P_{OC2}$ = 26 KW ، $P_{SC2}$ = 137 KW

جهت تعیین نحوه بهره‌برداری بهینه یا اقتصادی از دو واحد مذکور در بارهای مختلف با توجه به منحنی‌های تلفات ترانسفورماتورها در حالت کار انفرادی و پارالل (شکل ۲) کافی است قدرت بار مربوط به نقاط A و B را با استفاده از روابط قبلی بدست می‌آوریم. نتیجه چنین است :

$S_A$ = 7.125 MVA , $S_B$= 18.552 MVA

بنابراین چنانچه بار مصرفی کمتر از 7.125 MVA باشد ترانسفورماتور 15 MVA، و در صورتیکه بار مصرفی بین دو مقدار 7.125 MVA و 18.552 MVA تغییر نماید ترانسفورماتور 30 MVA ، و چنانچه بار مصرفی بزرگتر از 18.552 MVA باشد باید هر دو واحد را در سرویس قرار داد.

**مثال ۴ :**

طرح یک ایستگاه تبدیل انرژی که تغییرات بار آن زیاد پیش بینی شده و مشخصات بار پایه ، متوسط و پیک روزانه آن بترتیب برابر با 10 ، 25 و 50 مگاولت آمپر برآورد شده است در تحت بررسی میباشد . مشخصات ترانسفورماتورهای موجود در انبار طبق جدول (۱) است . با توجه به مقادیر بارپایه ، متوسط و پیک ایستگاه میخواهیم دو دستگاه ترانسفورماتور با قدرتهای مختلف از بین سه نوع ترانسفورماتور موجود طوری انتخاب کنیم که بهره‌برداری از آنها بهینه باشد.

| T | $S_N$ (MVA) | Poc(KW) | Psc(KW) |
|---|---|---|---|
| T1 | 12.5 | 16 | 80 |
| T2 | 15 | 20 | 90 |
| T3 | 40 | 50 | 200 |

جدول ۱

با توجه به پیک بار (50 MVA) بهتراست ترانسفورماتور (40 MVA) را با یکی از ترانسفورماتورهای 12.5MVA یا 15MVA هر یک که مناسبتر باشند انتخاب نمود. لذا ابتدا با استفاده از روابط قبلی محاسبه بهره‌برداری اقتصادی را یکبار برای ترانسفورماتورهای 40 و 12.5 و بار دیگر برای ترانسفورماتورهای 40 و 15 انجام میدهیم. بدین منظور باید داشته باشیم :

$S_A$ > 10MVA

$S_B$ > 25MVA