



طراحی ترانسفورماتور تعدیل بار در سیستم‌های توزیع به منظور تحلیل و ارزیابی روشهای ممکن مقابله با عدم تعادل

دانیال احمدی^۱، محمد توکلی بینا^۱، مسعود علی اکبر گلکار^۱
^۱دانشکده برق دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
ahmadi.danial@gmail.com

کلمات کلیدی: ترانسفورماتور متعادل ساز بار، جبران سازی جریان نامتعادل، نامتعادلی جریان

چکیده

ترانسفورماتور تعدیل بار یک جبران ساز پسیو است که در سال ۱۹۹۶ برای متعادل سازی بار در شبکه توزیع مطرح شد، ترانسفورماتور تعدیل بار یک ترانسفورماتور سه فاز است که در آن یک جفت سیم پیچ کوپلاژ اضافی در سمت ثانویه هر فاز وجود دارد. یک سیم پیچ کوپلاژ از هر فاز با یکی از سیم پیچ های کوپلاژ فاز دیگر سری شده و مجموع این دو سیم پیچ بصورت معکوس با سیم پیچ ثانویه فاز سوم موازی می شود. در شرایط عدم تعادل، جریان نامتعادل بین سیم پیچ های کوپلاژ و سیم پیچ ثانویه، که هر کدام توسط یک فاز جداگانه از اولیه تغذیه می شوند، جریان یافته و بدین ترتیب قسمتی از اضافه جریان یک فاز به دو فاز دیگر منتقل می گردد. در این مقاله با الهام از ترانسفورماتور تعدیل بار، ابتدا روشی به منظور طراحی بهینه ترانسفورماتور تعدیل بار ارائه می گردد. سپس، با توجه به روش طراحی ارائه شده، امکان مطرح شدن انواع جدیدی از

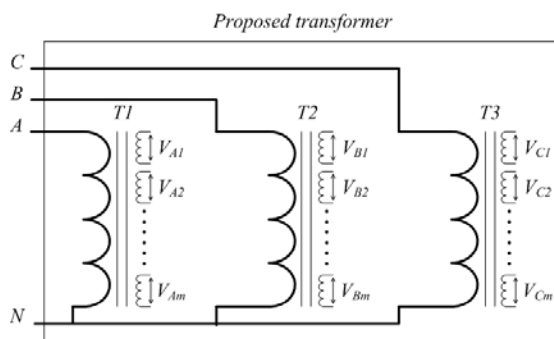
ترانسفورماتور تعدیل بار دیگر بوجود می آید. ترانسفورماتورهای پیشنهادی تعدیل بار به همراه ترانسفورماتور موجود توسط *MATLAB* شبیه سازی می گردد. عدم تعادل بار در شرایط مختلف به ازای بارهای گوناگون شبیه سازی و با مقایسه تحلیلی مولفه های مثبت، منفی و صفر متوجه در اثر اعمال ترانسفورماتورهای تعدیل بار بهترین شرایط انتخاب می گردد.

مقدمه

یکی از مشکلات مورد توجه در سیستم توزیع عدم تعادل بار است. عدم تعادل در بار باعث می شود که یک فاز ترانسفورماتور زودتر از بقیه فازها به مقدار نامی خود برسد در حالیکه فازهای دیگر دارای ظرفیت استفاده نشده هستند. این امر باعث افزایش بی مورد هزینه های ساخت ترانسفورماتور می شود. عدم تعادل در سیستم توزیع همچنین باعث افزایش تلفات در سیم های هادی، ایجاد تلفات در سیم نول، ایجاد ولتاژ در سیم نول نسبت به زمین

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

از کار انجام شده توسط محقق می‌توان اینطور استنباط کرد که ولتاژ فازهای a و b (مطابق شکل (۱) سیم پیچهای سمت ثانویه ستون T_1 به فاز a و به همین ترتیب سیم پیچهای سمت ثانویه ستونهای T_2 و T_3 به ترتیب به فازهای b و c متصل است) به صورت برداری با یکدیگر جمع شده اند که چون زاویه بین آنها 120° درجه است پس در نتیجه حاصل جمع آنها نیز در حالت متعادل با قرینه ولتاژ فاز c برابر می‌شود. در انتها، جمع سری این دو بردار را به طور معکوس با c موازی میکنند. همچنین مطابق شکل ۱، برای فاز 2 نیز معکوس سری دو فاز a و c را با b موازی و برای فاز 3 معکوس سری دو فاز c و b را با a موازی می‌کنند. این عمل باعث می‌شود تا جریان هر بار از هر سه فاز تامین شود. درعین حال، باید به این نکته توجه کرد که جریان هر فاز ثانویه ترانسفورماتور به طور یکسان از هر سه فاز اولیه تامین نمی‌شود. در این ترانسفورماتور $2/3$ جریان هر بار از یک سیم پیچی که به صورت موازی به عکس سری دو سیم پیچی دیگر متصل است تامین می‌شود و $1/3$ جریان هر بار از دو سیم پیچی سری تامین می‌شود. بنابراین در متعادل سازی بار با استفاده از این ترانسفورماتور مقدار تلفات مسی ترانسفورماتور متعادل ساز بار نسبت به یک ترانسفورماتور معمول بیشتر است.

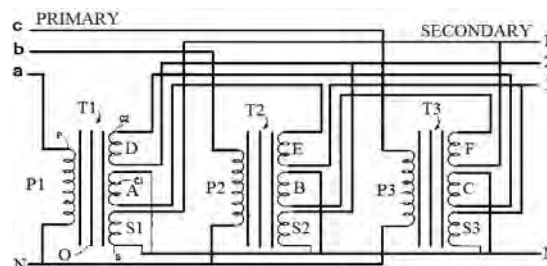


شکل ۲: نمای کلی ترانسفورماتورهای متعادل ساز بار

به عنوان مثال، با توجه به شکل (۱)، $2/3$ جریان بار که به نقطه ۳ سمت ثانویه متصل است از سیم پیچی S_3 و $1/3$ آن از سیم پیچی های A و E تامین می‌شود.

و افت ولتاژ شبکه نیز می‌گردد. برقراری تعادل کامل در یک سیستم توزیع به دلیل تصادفی بودن اتصال و قطع بارهای تکفاز به شبکه، عدم توزیع یکنواخت بارهای تکفاز بر روی سه فاز و نامتعادلی ذاتی سیستم قدرت آشکارا غیرممکن است. ولی به هر حال روشهایی جهت کاهش عدم تعادل و آثار آن پیشنهاد شده است. یکی از این روش‌ها استفاده از شبکه جبران‌کننده ادمیتانسی به منظور جبران‌سازی بار است [۱]. از آنجاکه با روشن و خاموش شدن بارهای تکفاز، ادمیتانس شبکه دائماً تغییر می‌کند، بکارگیری این روش در سیستم توزیع هزینه‌بر و از نظر عملی با مشکلاتی مواجه است. استفاده از متعادل سازهای گردان نظیر کندانسور سنکرون و موتورهای القایی به منظور جذب مؤلفه منفی جریان [۲] روش دیگری است که به دلیل هزینه بالا و تلفات زیاد مقرون به صرفه نمی‌باشد. روش دیگری که اخیراً پیشرفت قابل ملاحظه‌ای از لحاظ تئوری داشته، استفاده از کنترلرهای FACTS برای کاهش عدم تعادل است [۳]-[۷]. استفاده از این کنترلرها و مقابله با مسائلی همچون کارایی هارمونیک و راندمان در پیاده سازی عملی وابسته به تکنولوژی در حال پیشرفت است. در این راستا، فیلترهای اکتیو [۸]-[۹] و یا ترکیبی از کنترلرهای FACTS و فیلترهای اکتیو نیز پیشنهاد شده‌اند [۱۰]. که به هر حال هزینه-بر بوده و پیچیدگی در طراحی، کنترل و اجرا دارند.

در [۱۱] ترانسفورماتور خاصی به منظور جبران‌سازی بار پیشنهاد شده که در آن سیم پیچی های ثانویه را به شکل خاصی به یکدیگر متصل می‌کند. همانگونه که در شکل (۱) نشان داده شده این اتصال به گونه ای است که یک سیم پیچی از ستون T_1 ، (A) با یک سیم پیچی از ستون T_2 ، (E) سری و در نهایت به طور معکوس با یک سیم پیچی از ستون T_3 ، (S_3) موازی می‌شود.



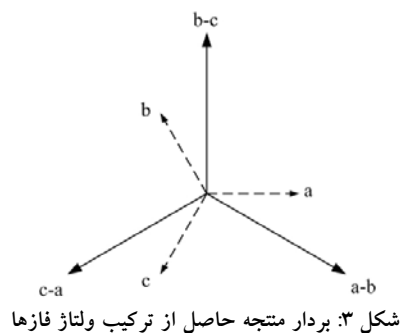
شکل ۱: ترانسفورماتور تعدیل بار

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

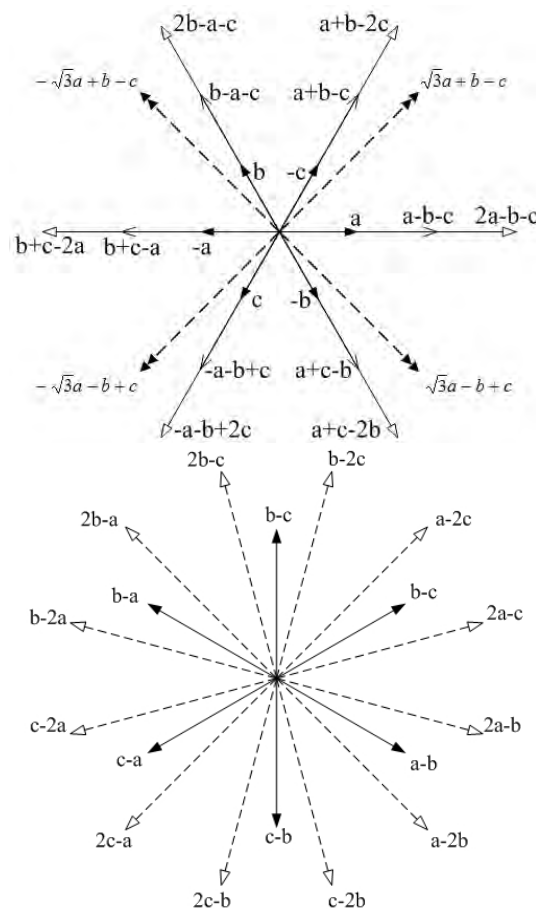
بهره‌گیری هرچه کامل‌تر از ظرفیت ترانسفورماتور پیشنهاد شده است. ترانسفورماتور تعدیل بار پیشنهاد شده با تغییراتی اندک در ساختار ترانسفورماتور توزیع قابل دست‌یابی است و نیاز به ادوات اضافی به منظور متعادل سازی نیست.

۱- پیشنهادهای جدید ترانسفورماتورهای تعدیل بار

در این مقاله، پیشنهاد بسط سری و موازی کردن ولتاژ فازها ارائه می‌گردد که در آن امکان معرفی ترانسفورماتورهای تعدیل بار جدید فراهم می‌گردد. فازورهای c و b و a را می‌توان با اضافه کردن سیم پیچ به سمت ثانویه ترانسفورماتور متعادل‌ساز بار بسط داد به عنوان مثال ترانسفورماتور تعدیل بار (شکل (۱)) از سه سیم پیچ در هر فاز ثانویه خود تشکیل شده است به گونه‌ای که با توجه به شکل (۲) در ستون T_1 علاوه بر یک سیم پیچ اولیه که به فازور A متصل است، سه سیم پیچ ثانیه V_{A1} , V_{A2} , V_{A3} وجود دارد پس منظور از فازور a ولتاژ دو سر سیم پیچ V_{A1} است و به همین ترتیب منظور از فازور b و c ولتاژ دو سر سیم پیچ V_B , V_C است. بنابراین ترانسفورماتور تعدیل بار از سه فازور a در ستون T_1 ، سه فازور b در ستون T_2 و سه فازور c در ستون T_3 تشکیل شده است. باید به این نکته توجه داشت که برای موازی کردن ولتاژ فازها، زاویه و اندازه آنها با هم برابر باشند. بعلاوه، برای رسیدن به تعادل جریان مطلوب تر اختلاف فاز بردارهای متجه‌ی بدست آمده 120° درجه باشد. به عنوان مثال، از سه فازور با فرم متعادل c و b و a می‌توان به سه بردار $a-b$ و $b-c$ و $c-a$ دست یافت که اندازه ولتاژ سه فاز در نقطه اتصال به بار برای هر سه فاز یکسان و با اختلاف فاز 120° درجه باشد (شکل (۳)). قابل ذکر است که با ادامه همین روش می‌توان نمودارهایی را مطابق شکل (۴) رسم کرد و حالت‌های مطلوب را با توجه به فاکتورهای ذکر شده استخراج نمود. از ترکیب سه فازور c و b و a سیزده امکان اتصال ترانسفورماتور تعدیل بار در شکل ۴ رسم شده است. چگونگی حصول این سیزده نوع اتصال در روابط (۱) تا (۱۳) به تفصیل آورده شده‌اند. به عنوان مثال رابطه ۱ چگونگی اتصالات ترانسفورماتور نشان داده شده در شکل (۱) را نشان می‌دهد.



ایراد این ترانسفورماتور آن است که اگر اختلاف دامنه جریان بارها از هم خیلی زیاد باشد توانایی آن در متعادل کردن بار کم است.



در این مقاله ضمن بررسی ترانسفورماتور تعدیل بار و بیان ایرادات و مزیت‌هایش، اصلاحاتی در توپولوژی آن پیشنهاد می‌گردد. اعمال این اصلاحات به منظور کاهش عدم تعادل و

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

$$\left\{ \begin{array}{l} Z_{(\text{Connection 1})} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \\ Z_{(\text{Connection 8})} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1.41 & -1.43 & 0.5625 \\ 0.5625 & 1.41 & -1.43 \\ -1.43 & 0.5625 & 1.41 \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad (15)$$

۲- استخراج مولفه‌های مثبت، منفی و صفر

برای استخراج مولفه‌های جریان از ماتریس زیر استفاده می‌کنند

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_+ \\ I_- \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix}}_A \underbrace{\begin{bmatrix} I_{pa} \\ I_{pb} \\ I_{pc} \end{bmatrix}}_{i_p} \quad (16)$$

با جایگذاری رابطه ۱۴ در ۱۶ می‌توان گفت:

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_+ \\ I_- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} * Z * \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} \quad (17)$$

به عنوان مثال ماتریس حاصل ضرب $A \times Z$ در اتصالات نوع

اول و هشتم عبارتند از:

$$\left\{ \begin{array}{l} A \times Z_{(\text{connection 1})} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -0.5 - 0.866i & -0.5 + 0.866i \\ -0.5 + 0.866i & -0.5 - 0.866i \end{bmatrix} \\ A \times Z_{(\text{connection 8})} = \begin{bmatrix} 0.15 + 0.14i \\ 1 \\ 0.06 + 1i \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 0.15 + 0.14i & 0.15 + 0.14i \\ -0.5 - 0.866i & -0.5 + 0.866i \\ -0.89 - 0.44i & 0.831 - 0.55i \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad (18)$$

نتایج بدست آمده از حاصل ضرب $A \times Z$ نشان دهنده‌ی آن است که حالت‌های اول و ششم مولفه‌ی صفر جریان را از بین می‌برند، بنابراین در صورت بستن ترانسفورماتور به یکی از دو حالت اول و ششم مولفه‌ی صفر جریان در شبکه جاری نمی‌شود. همانطوری که در رابطه ۱۸ دیده می‌شود تنها تغییری که ترانسفورماتور تعدیل بار (شکل (۱)) بر روی مولفه‌ها به وجود می‌آورد این است که مولفه صفر جریان را در سمت اولیه صفر می‌کند و مولفه‌های مثبت و منفی جریان بار بدون تغییر به سمت اولیه منتقل می‌شوند که این حالت در

$$\begin{bmatrix} -(b+c) \\ -(a+c) \\ -(a+b) \end{bmatrix} P \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} a+b-c \\ a+c-b \\ b+c-a \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} a+b-c \\ a+c-b \\ b+c-a \end{bmatrix} P \begin{bmatrix} a-2c+b \\ a-2b+c \\ b+c-2a \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} a+b-c \\ a+c-b \\ b+c-a \end{bmatrix} P \begin{bmatrix} a-2c+b \\ a-2b+c \\ b+c-2a \end{bmatrix} P \begin{bmatrix} -c \\ -b \\ -a \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} b-2c \\ a-2b \\ c-2a \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} b-c \\ a-b \\ c-a \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} \sqrt{3}a+b-c \\ \sqrt{3}c+a-b \\ \sqrt{3}b+c-a \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} \sqrt{3}a+b-c \\ \sqrt{3}c+a-b \\ \sqrt{3}b+c-a \end{bmatrix} P \begin{bmatrix} a-2c \\ c-2b \\ b-2a \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} 4b-a-c \\ 4c-a-b \\ 4a-b-c \end{bmatrix} P \begin{bmatrix} 2b-a-c \\ 2c-a-b \\ 2a-b-c \end{bmatrix} P \begin{bmatrix} b \\ c \\ a \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} a-b-c \\ c-a-b \\ b-c-a \end{bmatrix} P \begin{bmatrix} a \\ c \\ b \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} 2a-b-c \\ 2c-a-b \\ 2b-c-a \end{bmatrix} P \begin{bmatrix} a \\ c \\ b \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} -a-b+c \\ -a-c+b \\ -b-c+a \end{bmatrix} P \begin{bmatrix} -a+2c-b \\ -c+2b-a \\ -b+2a-c \end{bmatrix} P \begin{bmatrix} c \\ b \\ a \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} (b-c) + \frac{\sqrt{3}}{2}(a+b-c) \\ (a-b) + \frac{\sqrt{3}}{2}(a+c-b) \\ (c-a) + \frac{\sqrt{3}}{2}(b+c-a) \end{bmatrix} P \begin{bmatrix} b-2c \\ a-2b \\ c-2a \end{bmatrix} \quad (13)$$

بدین ترتیب، ارتباط جریان‌های سمت اولیه (i_p) و ثانویه (i_s) ترانسفورماتور را می‌توان برای تمام حالات ذکر شده بصورت زیر نوشت:

$$i_p = Zi_s \quad (14)$$

که در آن ماتریس Z را، ماتریس تبدیل جریان می‌نامیم. بعنوان مثال، ماتریس تبدیل جریان اتصالات نوع اول و هشتم عبارتند از:

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

در سمت ثانویه کمتر است، بنابراین ظرفیت ترانسفورماتور آزاد می‌شود، اما اختلاف فاز جریان‌های سمت اولیه از جریان‌های ثانویه ترانسفورماتور تعدیل بار بیشتر است و در نهایت بار متعادل نمی‌شود. در ادامه با توجه به مدل‌های به دست آمده به دنبال ترانسفورماتور متعادل‌ساز باری هستیم که علاوه بر متعادل‌سازی دامنه بار، نامتعادلی اختلاف فاز را نیز بهبود بخشد.

ترانسفورماتورهای توزیع معمول با اتصال مثلث-ستاره وجود دارد و نیازی به اضافه نمودن دو سیم پیچی جدید در سمت ثانویه و بالا بردن حجم و هزینه ساخت ترانسفورماتور نمیباشد. تنها مزیت ترانسفورماتور متعادل‌ساز بار اینستکه بار هر فاز ثانویه از سه فاز اولیه تامین می‌شود، بنابراین زمانیکه یک فاز سمت ثانویه ترانسفورماتور به مقدار نامی خود برسد، بیشترین دامنه جریان در سمت اولیه از بیشترین دامنه جریان

جدول (۱): جریان سمت اولیه ی ۱۳ نوع ترانسفورماتور متعادل‌ساز بار به ازای یک بار مقاومتی نامتعادل

Kind of transformer	magnitude	phase	I_0/I_+	I/I_+	Kind of transformer	magnitude	phase	I_0/I_+	I/I_+
۱	98.82	118.11	0	0.28214	۷	116.9	115.51	0.20028	0.280794
	50.09	-1.42				93.1	88.84		
	148.08	-122.48				111.05	12.76		
۲	117.2	104.98	0.140594	0.281206	۸	152.39	-139.69	0.011352	0.237157
	113.2	-101.14				120.27	82.93		
	92.18	-16.55				107.61	-10.98		
۳	126.28	-128.86	0.050455	0.250644	۱۰	106.19	-142.31	0.013936	0.274864
	120.51	86.5				81.3	123.7		
	88.39	-9.98				132.54	-2.43		
۴	145.29	-133.36	0.011558	0.247203	۱۱	174.48	-148.67	0.032343	0.188231
	123.51	87.4				165.68	76.09		
	92.18	-11.86				121.45	-38.3		
۵	133.08	-112.51	0.108758	0.281001	۱۳	119	-113.52	0.074833	0.27642
	122.25	110.42				126.43	97.68		
	70.49	-13.22				83.68	-1.27		
۶	106.77	-107.23	0	0.282011					
	127.62	110.38							
	78.09	-13.06							

۳- نتایج شبیه سازی

نتایج بدست آمده از جدول (۱) مقدار I_0/I_+ برای سه حالت اتصال ترانسفورماتورهای متعادل‌ساز بار ۲، ۵ و ۷ نسبتاً زیاد است. بنابراین از نتایج شبیه سازی ها انجام شده به ازای یک بار نامتعادل مقاومتی معلوم گردید که حالت‌های اول، ششم، دهم و سیزدهم بار را متعادل می‌کنند. براساس مطالعات آماری انجام شده بیشترین مقدار ضریب توان در شبکه توزیع ۰.۸۵ است [۱۹]. یعنی بیشترین مقدار اختلاف زاویه جریان از ولتاژ ۳۰ درجه است. بنابراین در این قسمت بار به گونه ای در نظر گرفته شده که در یک فاز اختلاف زاویه بین جریان و ولتاژ ۳۰، در فاز دوم ۲۰ و در فاز سوم ۱۰ درجه باشد. باید توجه داشت که در این مرحله دامنه تمام جریانها یکسان است و بار تنها از لحاظ فاز نامتعادل است، براساس نتایج بدست آمده از

برای شبیه سازی سه نوع بار متفاوت در نظر گرفته شد تا بر اساس داده ها مناسب ترین حالت انتخاب شود. در حالت اول بارهای متصل شده به سمت ثانویه ترانسفورماتورهای متعادل ساز بار فقط مقاومتی هستند پس در نتیجه جریانهای سه فاز تنها از لحاظ دامنه با یکدیگر اختلاف دارند).

$$(I_3 = 150A \text{ و } I_2 = 100A \text{ و } I_1 = 50A)$$

همانطور که در جدول (۱) مشاهده می‌شود، در حالت‌های ۳، ۴، ۸ و ۱۱ جریانی که از منبع کشیده می‌شود بیشتر از جریان بار است که براساس شبیه سازی های انجام شده جبران‌سازی با صرف توان اکتیو انجام گرفته و برای حالت‌های ۱، ۲، ۵، ۶، ۷، ۱۰ و ۱۳ مقدار I_0/I_+ ، حدوداً ۰.۲۸ است. همچنین مطابق

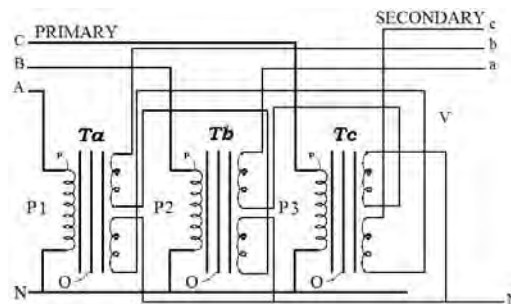
بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

جدول (۲): جریان سمت اولیه ی ۱۳ نوع ترانسفورماتور متعادل‌ساز بار به ازای یک بار نامتعادل در فاز

Kind of transformer	magnitude	phase	I_0/I_+	I/I_+	Kind of transformer	magnitude	phase	I_0/I_+	I/I_+
۱	103.4	-145.93	0	0.091451	۷	105.54	143.84	0.07102	0.091391
	89.77	98.64				86.03	102.56		
	103.82	-17.27				110.76	-22.88		
۲	94.59	95.03	0.046899	0.097449	۸	135.88	-161.2	0.003697	0.070596
	116.73	-142.59				124.52	84.13		
	94.92	-19.57				141.43	-35.2		
۳	120.98	-156.31	0.016739	0.07578	۱۰	93.72	-144.85	0.004787	0.087378
	104.39	85.17				107.29	98.82		
	119.56	-30.75				105.97	-29.92		
۴	124.95	-158.73	0.003753	0.074235	۱۱	173.34	-169.94	0.010196	0.054573
	111.75	84.88				159.51	71.64		
	124.5	-31.27				166.95	-44.03		
۵	114.12	-146.25	0.038462	0.090961	۱۳	112.45	-145.93	0.025868	0.088328
	101.84	95.4				93.39	92.55		
	102.4	-15.42				107.12	-20.69		
۶	110.19	-142.03	0	0.089738					
	96.39	93.5							
	97.01	-17.34							

جریان یک فاز با دامنه ی ۱۵۰ آمپر به اندازه ی ۳۰ درجه از ولتاژ عقب باشد، جریان فاز دوم با دامنه ی ۱۰۰ آمپر به اندازه ۲۰ درجه از ولتاژ عقب باشد و جریان فاز سوم با دامنه ی ۵۰ آمپر به اندازه ی ۱۰ درجه از ولتاژ عقب باشد. براساس نتایج بدست آمده (جدول (۳)) حالت‌های ۳، ۴، ۸ و ۱۱ با صرف توان اکتیو بار را متعادل می‌کنند که مطلوب نمی‌باشد. همچنین برای حالت‌های ۱، ۲، ۵، ۶، ۷، ۱۰، ۱۳ مقدار I_0/I_+ ، حدوداً ۰.۲۶ است و مقدار I_0/I_+ برای سه حالت ۲، ۵ و ۷ نسبتاً زیاد است. همانطوری که از شبیه سازی‌ها مشخص است حالت‌های ۱، ۶، ۱۰ و ۱۳ بار را به نسبت دیگر حالت‌ها بهتر متعادل می‌کنند و از بین حالت‌های ۱، ۶، ۱۰، ۱۳ حالت‌های ۱ و ۶ به خاطر از بین بردن مولفه صفر مناسب‌ترند. اما مزیت حالت ششم به حالت اول این است که تعداد سیم پیچی سمت ثانویه ی آن کمتر است (شکل (۵))، بنابراین هزینه سیم پیچی ترانسفورماتور، وزن و حجم آن کاهش پیدا می‌کند و همچنین قابلیت متعادل سازی ترانسفورماتور پیشنهادی بر اساس شبیه سازی‌های انجام شده در برابر باری که اختلاف دامنه ی جریان آن زیاد باشد بیشتر است. در ترانسفورماتورهای توزیع

شبیه سازی (جدول (۲))، در ترانسفورماتورهایی که به حالت‌های ۳، ۴، ۸ و ۱۱ بسته شده اند، جریانی که از منبع کشیده می‌شود بیشتر از جریان بار است. (جبران سازی با صرف توان اکتیو انجام گرفته) برای حالت‌های ۱، ۲، ۵، ۶، ۷، ۱۰، ۱۳ مقدار I_0/I_+ ، حدوداً ۰.۰۹ است. همچنین از نتایج بدست آمده از شبیه سازی در این مرحله مشخص است که ترانسفورماتورهای حالت‌های اول، دوم، پنجم، ششم، هفتم، دهم و سیزدهم بار را متعادل می‌کنند.



شکل ۵: ترانسفورماتور متعادل‌ساز بار پیشنهادی

در حالت سوم بار به گونه ای انتخاب می‌شود که هم اختلاف فاز وجود داشته باشد و هم اختلاف دامنه به گونه ای که

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

حالیکه در ترانسفورماتور پیشنهاد شده نسبت تبدیل هر یک از دو سیم پیچی ۲۰ کیلوولت به ۲۳۰ ولت است، در حالیکه ولتاژ خروجی ترانسفورماتور ۳۸۰ ولت است. بنابراین حجم و وزن ترانسفورماتور پیشنهاد شده تقریباً به اندازه یک ترانسفورماتور توزیع معمولی است.

معمول، نسبت تبدیل ۲۰ کیلوولت به ۳۸۰ ولت است. در ترانسفورماتور متعادل‌ساز موجود [۱۱] برای متعادل نمودن بار تعداد سیم پیچی‌های سمت ثانویه ترانسفورماتور نسبت به ترانسفورماتور توزیع معمول ۳ برابر می‌شود در حالیکه تعداد دور هر یک از سیم پیچی‌های سمت ثانویه با تعداد دور سیم پیچی ثانویه یک ترانسفورماتور توزیع معمول برابر است، در

جدول (۳): جریان سمت اولیه ی ۱۳ نوع ترانسفورماتور متعادل‌ساز بار به ازای یک بار نامتعادل (فاز و دامنه)

Kind of transformer	magnitude	phase	I_0/I_+	I/I_+	Kind of transformer	magnitude	phase	I_0/I_+	I/I_+
۱	124.12	-142.56	0	0.266197	۷	114.57	-138.91	0.233678	0.265002
	93.39	79.62				78.41	65.81		
	83.35	-11.36				120.31	-12.91		
۲	113.34	80.18	0.132872	0.326519	۸	160.84	-161.05	0.012075	0.202806
	123.17	-124.85				119.3	68.87		
	79.61	-38.1				128.93	-28.62		
۳	134.14	-151.38	0.054655	0.218046	۱۰	94.38	-162.36	0.016012	0.254103
	114.74	67.46				85.16	104.6		
	103.04	-26.63				126.72	-27.51		
۴	124.95	-158.73	0.003753	0.074235	۱۱	195.17	-166.18	0.033288	0.155679
	111.75	84.88				169.78	63.53		
	124.5	-31.27				140.27	-45.8		
۵	135.73	-139.44	0.127018	0.264298	۱۳	117.39	-137.56	0.086664	0.256698
	114	87.78				111.91	73.83		
	66.51	-27.41				86.87	-19.03		
۶	111.89	-132.29	0	0.265601					
	119.57	85							
	74.39	-29.26							

۴- نتیجه گیری

در این مقاله ساختار جدیدی برای ترانسفورماتور تعدیل بار ارائه شد. استفاده از ترانسفورماتور تعدیل بار یک روش کارآمد برای کاهش عدم تعادل در سیستم توزیع و بهره‌گیری هر چه بیشتر از ظرفیت ترانسفورماتور است. نتایج شبیه سازی نشان می‌دهند که در ترانسفورماتور تعدیل بار پیشنهاد شده، مشخصات بهتری از تعادل بار حاصل می‌گردد و با توجه به اینکه ثانویه ترانسفورماتور پیشنهادی در هر فاز از دو سیم پیچی تشکیل شده از لحاظ اقتصادی ساخت این ترانسفورماتور نسبت به دیگر مدلها ارزانتر و در نتیجه وزن آن سبکتر است.

۵- منابع

- [1] L. Gyugyi, R. A. Otto and T. H. Putman, "Principles and Applications Of Static Thyristor-Controlled Shunt Compensators", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-97, No. 5, pp. 1935-1945, Sept/Oct 1978.
- [2] V. B. Bhavaraju and Prasad N. Enjeti, "Analysis and Design of an Active Power Filter for Balancing Unbalanced Loads", IEEE Transactions on Power Electronics. Vol. 8, No. 4, pp. 640-647, October 1993.
- [3] Z. Yongqiang and L. Wenhua, "Balancing Compensation of Unbalanced Load Based on Single Phase STATCOM", IPENC Power Electronics and Motion Control Conference, Vol. 2, pp. 425 - 429, Aug 2004.

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

- [10] J. D. Glover and M. Sarma, "Power System Analysis and Design", Second Edition, PWS Publishing Company, Boston, MA, 1994.
- [11] Yaw-Juen Wang and Ming-Jer Yang, "Probabilistic Modeling of Three-Phase Voltage Unbalance Caused by Load Fluctuations", IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Vol. 4, pp. 2588 – 2593, 2000.
- A. von Jouanne and B. B. Banerjee, "Assessment of voltage unbalance", IEEE Transactions On Power Delivery, Vol. 16, No. 4, pp. 782-790, October 2001.
- [12] *Motors and Generators*, NEMA Standards Publication No. MG 1-1993.
- [13] J. Wang, A. F. Witulski, J. L. Vollin, T.K. Phelps, G. I. Cardwell, "Derivation, Calculation and Measurement of Parameters for a Multi-Winding Transformer Electrical Model", APEC Applied Power Electronics Conference and Exposition, Vol. 1, pp. 220 – 226, March 1999.
- [14] C. L. Fortescue, "Method of Symmetrical Coordinates Applied to the Solution of Polyphase Networks", Transaction of AIEE, Vol. 37, pp. 1027-1140, 1918.
- [15] مسعود علی اکبر گلکار، "طراحی و بهره برداری از سیستم‌های توزیع انرژی الکتریکی"، شرکت برق منطقه ای فارس، ۱۳۸۰.
- [4] B. N. Singh, B. Singh, A. Chandra and K. Al-Haddad, "Digital Implementation of an Advanced Static Compensator for Voltage Profile Improvement, Power-Factor Correction and Balancing of Unbalanced Reactive Loads", Electric Power Systems Research 54 (2000) 101–111.
- A. Sonnenmoser and P. W. Lehn, "Line Current Balancing with a Unified Power Flow Controller", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, No. 3, pp. 1151-1157, July 1999.
- [5] J. H. Chen, W. J. Lee and M. S. Chen, "Using a Static Var Compensator to Balance a Distribution System", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 35, No. 2, pp. 298 – 304, March/April 1999.
- [6] S. Y. Lee, C. J. Wu and W. N. Chang, "A Compact Control Algorithm for Reactive Power Compensation and Load-balancing with Static Var Compensator", Electric Power Systems Research 58 (2001) 63–70.
- A. Chandra, B. Singh, B. N. Singh and K. Al-Haddad, "An Improved Control Algorithm of Shunt Active Filter for Voltage Regulation, Harmonic Elimination, Power-Factor Correction and Balancing of Nonlinear Loads", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 15, No. 3, pp. 495-507, May 2000.
- B. C. Chen and Y. Y. Hsu, "A Novel Approach to the Design of a Shunt Active Filter for an Unbalanced Three-Phase Four-Wire System under Nonsinusoidal Conditions", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15, No. 4, pp. 1258-1264, Octobe 2000.
- [7] S. Y. Lee and C. J. Wu, "Reactive Power Compensation and Load-balancing for Unbalanced three-Phase Four-Wire System by a Combined System of an SVC and a Series Active Filter", IEE Proceedings Electric Power Applications, Vol. 147, No. 6, pp. 563 – 578, Nov 2000.
- [8] T. J. Reynal, "Load-balancing Transformer", U.S. Patent No. 5557249, September 1996.
- [9] T. J. E. Miller, "Reactive Power Control in Electric System", New York: Wiley, 1982.