ششمین کنفرانس شبکه های توزیع نیروی برق

© بهره‌برداری و تعمیرات شبکه‌های توزیع

اثر خطای کنتور در تلفات برق بررسی شرائط محیطی، نصب و اثر هارمونیکها

محمداسماعیل همدانی گلشن - مهدی معلم - رضا رسالت‌پناه اصغر قسامی

دانشگاه صنعتی اصفهان شرکت برق منطقه‌ای اصفهان

چکیده

کنتورها بعنوان وسائل اندازه‌گیری انرژی الکتریکی حائز کمال اهمیت ازنظر اقتصادی برای شرکت‌های برق می‌باشند وبررسی صحت عملکرد آنهادرشرائط مختلف می‌تواند در محاسبه دقیق و صحیح انرژی مصرفی کمک نماید. تلفات ناشی ازعدم ثبت صحیح کنتور ازنوع تلفات کور وقابل اندازه‌گیری نمی‌باشد. عوامل محیطی همچون درجه حرارت ورطوبت ازیک طرف وفرسودگی وطول عمر و نحوه نصب کنتور از طرف دیگر وهمچنین شرائط غیر نرمال درورودیهای کنتور(ولتاژ وجریان) همچون اضافه جریان، تغییرات ولتاژ نسبت به ولتاژ نامی وغیرسینوسی بودن موجهای ولتاژ وجریان روی عملکرد کنتور می‌توانندتأثیر بگذارند.

دراین مقاله باتوجه به آزمایشهای انجام شده روی انواع کنتورها، نتایجی درمورد اثرات محیطی و اثرات اضافه جریان و ولتاژ ارائه می‌شود. همچنین باارائه یک مدل ریاضی دقیق به بررسی اثر هارمونیکهای ولتاژ وجریان روی دقت کنتور می‌پردازیم.

مقدمه

آنچه که معمولا" مسئولین صنعت برق بدان توجه داشته ودارند بهره‌برداری بهتر وبیشتر ازتأسیسات موجود صنعت برق وتوسعه آن می‌باشد. ولی آنچه که درسالهای قبل موردکم توجهی قرارگرفته است نواقص شبکه‌های الکتریکی است که باعث ایجاد تلفات درمراحل تولید، انتقال ، توزیع ومصرف می‌شوند. تاکنون مطالعاتی درمورد تلفات انرژی درنیروگاهها و خطوط انتقال انجام شده است ولی درمورد شبکه‌های توزیع بعلت حجم زیاد وپراکندگی آنها، اطلاعات جامع ومدونی دراین مورد وجودندارد.

تلفات بطور کلی برمبنای عوامل واجزای تشکیل دهنده آنها به دوگروه تلفات فیزیکی و تلفات کور تقسیم می‌شوند که عبارتنداز:

الف - تلفات فیزیکی: شامل تلفات خطوط انتقال وتوزیع که قابل محاسبه واندازه‌گیری می‌باشند.

ب - تلفات کور : که مقادیرآنها قابل اندازه‌گیری نبوده وبیشترناشی ازخطای اندازه‌گیری و استراق می‌باشند وعبارتنداز:

- عدم اندازه‌گیری صحیح مصرف توسط دستگاههای اندازه‌گیری
- عدم اندازه‌گیری صحیح به علت خطای کنتورخوان
- دستکاری کنتور توسط مشترکین
- استراق انرژی توسط غیرمشترکین

دراین مقاله به مسئله عدم اندازه‌گیری صحیح انرژی بوسیله کنتورها می‌پردازیم. کنتورها یا ثبت‌کننده‌های انرژی ازاجزاء مهم شبکه توزیع می‌باشندو بنابراین مطالعه آنها بعنوان جزئی که می‌تواند در شبکه‌با کم نشان دادن انرژی مصرفی ، تلفات ایجاد کند، امری ضروری است. خطادرمقدار ثبت شده کنتور حتی به مقدار کم می‌تواند تلفات هزینه‌بالائی رادربرداشته باشد. این تلفات ازنوع تلفات کوراست و برخلاف تلفات فیزیکی قابل اندازه‌گیری نمی‌باشد. دراین مقاله سعی می‌کنیم اثر عوامل مختلف را بر روی عملکرد کنتورها مطالعه نمائیم.

چون کنتورهای مورد استفاده درمنازل ومراکز صنعتی کوچک ،ساختمان نسبتاً آسیب‌پذیری دارند دربرخی موارد تحت تأثیر عوامل خارجی یا محیطی قرارگرفته‌و بنابراین درنشان دادن مقداردقیق مصرفی دچار خطا می‌شوند. بعلاوه برخی شرایط غیرنرمال در ورودیهای آن نیزمی‌توانند درعملکردآن تأثیر بگذارند.

دراین مطالعه اثرات محیطی وفیزیکی (دما- فرسودگی - عدم نصب صحیح کنتور) واثرات تغییرات ورودیها (تغییرات ولتاژ - اضافه‌جریان - وجودهارمونیک درولتاژ وجریان) روی عملکرد کنتور مورد بررسی قرار می‌گیرند. اثرات محیطی بوسیله آزمایشهایی مورد مطالعه قرارگرفته‌اند. همچنین توسط آزمایشهایی اثر تغییرات ولتاژ وهمچنین اضافه جریان روی دقت کنتور ملاحظه شده‌است . درنهایت باارائه یک مدل ریاضی دقیق ومناسب ، اثرهارمونیکهای ولتاژ وجریان روی عملکرد کنتوربررسی شده است.

لازم به ذکراست که نتایج ارائه شده دراین مقاله حاصل مطالعات منابع متعدد وآزمایشهای زیاد توسط یک تیم ازدانشگاه صنعتی اصفهان و آزمایشگاه کنتور برق منطقه‌ای اصفهان می‌باشدکه درمدت ۳ماه با پشتیبانی کمیته تحقیقات برق منطقه‌ای اصفهان انجام گرفته‌است.

۱- اثرعوامل محیطی برکارکرد کنتورها

عوامل محیطی همچون دمای هوا وفرسودگی کنتور برکارکنتورها مؤثرند. این عوامل بطور ناخواسته ثبت انرژی توسط کنتور رادچار خطا می‌کنند.

۱-۱- اثر درجه حرارت

یکی ازعوامل محیطی که می‌تواند باعث خطای ثبت کنتورشود، درجه حرارت محیط است. باتوجه به اینکه کنتورها هم درنواحی سردسیرو هم درنواحی گرمسیرمورد استفاده قرار می‌گیرند، لازم است جهت تعیین تأثیر دقیق این عامل روی عملکرد کنتور، بر روی انواع کنتورهای موجود درکشوردر دماهای خیلی کم وخیلی زیاد(که واقعاً درکشورما وجود دارد) آزمایشهایی صورت پذیرد. دراینجا، بطور نمونه نتایج آزمایشهایی راکه دردمای پایین و دمای بالا روی یک کنتور تکفاز AEG (۶۰) ۱۵ آمپر ، ۳۷۵rev/kwh انجام شده است راعرضه می‌کنیم. این کنتور، دردمای $-10^{\circ}C$ انرژی مصرفی توسط یک لامپ 100^{w} را درمدت ۱۲/۵ ساعت ثبت نمود. مقدار کارکرد کنتور $1/17^{kwh}$ بود. باتوجه به اینکه می‌دانیم یک لامپ 100^{w} دراین مدت ۱/۲۵ انرژی مصرف می‌کند پس بااستفاده از رابطه ۱ درصد خطای ثبت را ۶/۴-٪ بدست می‌آوریم.

$$\text{درصدخطای ثبت} = \frac{\text{انرژی مصرف شده} - \text{انرژی ثبت شده}}{\text{انرژی مصرف شده}} \times 100 \qquad (1)$$

یعنی کنتور ٪۶/۴کمترازمیزان مصرف واقعی ثبت کرده است.

درآزمایش دیگری ، همان کنتور به مدت ۱۲/۵ ساعت در دمای $45^{\circ}C$ انرژی مصرفی توسط

یک لامپ ^{W}۱۰۰ راثبت نمود. مقدار ثبت شده ^{kwh}۱/۱۶ بود که باتوجه به رابطه فوق درصد خطای ثبت ٪۷/۲- می‌باشد. دراین حالت باز کنتورکمتر ازمقدار واقعی ثبت نموده است. دلیل ایجاد خطاهای فوق می‌تواند ناشی از عملکرد قسمتهای الکتریکی ومکانیکی کنتور باشد. باتغییرات شدید درجه حرارت ، مقاومت قسمتهای الکتریکی تغییر می‌کند. که نتیجه آن به هم خوردن تنظیم کنتوراست. همچنین گرما و سرما می‌تواند باانبساط وانقباض قسمتهای مکانیکی درکمارچرخش دیسک ویاشماره اندازکنتور اختلال ایجاد کند. جهت کاهش این اثر پیشنهاد می‌شود که کنتورها حتی‌الامکان درجاهای سربسته ویا تابلوهای برق نگهداری‌شوند. تادرمعرض مستقیم‌گرماوسرمای شدیدنباشند. پیشنهاددیگراین‌است‌که‌درکارطراحی کنتورها،اثر دما درنظر گرفته شود وبرای کشورما، باتوجه به محدوده‌دمایی که درکشوروجود دارد کنتورها طراحی شوند.

۲-۱- اثرفرسودگی

جهت مشخص شدن اثر فرسودگی وطول عمر برروی عملکرد کنتورآزمایشهای مختلفی انجام دادیم که همه‌آنها نشان می‌دهند که طول عمر کنتورها باعث ثبت کنتور کمترازمقدار واقعی می‌شود. بعنوان نمونه نتیجه یکی ازاین آزمایشها درجدول ۱ ارائه می‌شود. دراین آزمایش یک کنتور سه فاز(۱۰۰) ۲۵ آمپر سه‌فاز (بعنوان کنتور مادر) با سه عدد کنتور تکفاز ۱۵ آمپری قدیمی سری شده ودرآمپرهای مختلف تامرز ۲۵ آمپر آزمایش شدند. نتیجه این آزمایش به‌صورت زیر است.

نوع کنتور	انرژی ثبت‌شده(kwh)	درصد خطا
AEG۲۵ (۱۰۰) Amp(کنتورمادر)	هرفاز ۲۸	۰
LANDIS ۵Amp	۲۶/۶	-۵
AEG۵Amp	۲۵/۸	-۷/۸۵
۵Amp ساخت روسیه	۲۴/۴	-۱۲/۸۵

جدول ۱: اثر فرسودگی بر روی کنتورهای تکفاز

دراین قسمت آزمایشهای متعددی نظیرجدول ۱انجام‌گرفت‌که همگی‌برخطای‌منفی کنتورهای فرسوده دلالت دارند جهت تعیین دقیق تأثیرعامل فرسودگی وطول عمر برروی هرکنتور خاص باید

آزمایشهای دقیق وزیادتری صورت پذیرد. البته علت اصلی کم نشان دادن کنتورهای فرسوده افزایش اصطکاک دراثرسائیدگی اتصالات مکانیکی وگردوغبار وذرات خارجی درداخل کنتور می‌باشد. به هرحال باتوجه به کارهای انجام شده و نتایج آزمایشها، پیشنهاد می‌شود شرکتهای توزیع، چندسال یکبار کنتورها را تست کنند تا درصورت عدم ثبت صحیح اقدام به تعویض آنها نمایند. البته ضروری است که تعدادی ازکنتورها که خیلی قدیمی می‌باشندحتماً تعویض شوند زیرا علاوه برفرسودگی کنتور وعدم ثبت دقیق به این علت ، جریان نامی آنها معمولاً" پایین است که جریانهای بارعبوری ازآنها خود باعث ایجاد خطا درثبت می‌شوند.

۲- اثر اضافه جریان واضافه ولتاژ برکارکرد کنتورها

۲-۱- اثر اضافه جریان

کنتورها دارای یک جریان نامی هستند ودربعضی موارد ممکن است جریانی بیش ازجریان نامی ازآنها عبورکند حال آیا این جریان اضافی روی دقت کار کنتوراثر داردیانه؟ جهت پاسخ به این سئوال ، آزمایشهایی روی انواع کنتورها انجام گرفت که بعنوان نمونه یکی ازآنها درادامه ارائه می‌شود. ازیک کنتور تکفازAEG (۶۰) ۱۵ ، $۳۷۵^{rev/kwh}$ جریانهایی برابر وبیش ازجریان نامی سیم‌پیچی جریان ازآن عبور داده شد. نتیجه این آزمایش بصورت زیراست.

درصد خطا	زمان محاسبه‌شده تئوری (ثانیه)	زمان اندازه‌گیری (ثانیه)	جریان (آمپر)
۰	۲۹	۲۹	۱۵
۰	۲۱/۸	۲۱/۸	۲۰
+۶/۲	۱۴/۵	۱۵/۴	۳۰
+۴/۵۸	۱۰/۹	۱۱/۴	۴۰
+۵/۵۰	۸/۷۲	۹/۲	۵۰
+۷/۲۹	۷/۷۲	۷/۸	۶۰

جدول ۲ : اثر اضافه جریان برروی عملکرد کنتور

درصد خطا ازرابطه زیربدست آورده‌شده‌است.

$$\text{درصد خطا} = \frac{\text{زمان اندازه‌گیری شده} - \text{زمان‌محاسبه‌شده (تئوری)}}{\text{زمان محاسبه شده}} \times ۱۰۰ \qquad (۲)$$

براساس نتایج آزمایش ،باافزایش جریان ازجریان نامی ،کنتوردچار خطا شده وکمترازمقدار واقعی ثبت می‌کند.

دلایل ایجاد خطا درجریانهای بالا می‌توانداناشی ازاشباع مدار مغناطیسی‌سیم‌پیچی جریان باشدکه منجر به‌کاهش شاراین سیم‌پیچ شده‌وکنتورمقدارکمتری راثبت می‌کند،ویا بعلت افزایش کوپل ترمزی کنتور است.

۲-۲- اثر تغییرات ولتاژ

باتوجه به اینکه سیم‌پیچی ولتاژ یک کنتوردرمعرض تغییرات زیاد ولتاژ درطول شبانه‌روز می‌باشد، ضروری است اثرولتاژ کم یاولتاژ زیاد روی دقت کنتور مورد بررسی قرارگیرد. دراین راستا آزمایشهایی روی کنتورهای تکفاز وسه‌فاز انجام شد. درمورد کنتور تکفاز، مشاهده شد که تغییرات ولتاژ دردامنه ۲۰۰ ولت تا ۲۴۰ تقریباً اثری روی کار کنتور ندارد. اماکنتورهای سه فازباتغییرات ولتاژاثر کمی را ازخود نشان می‌دهند.

علاوه‌برکم بودن این اثر ،علامت آن هم برای کنتورهای مختلف متفاوت است، برخی ازآنها کمترو برخی بیشتر ثبت می‌کنند.

۳- اثر خطای نصب روی عملکرد کنتور

یکی از مواردی که درکنتورها مشاهده می شود این است که اگر کاملا" به حالت عمود نصب نشوند، درمقدار نشان داده شده، دچار خطا می‌شوند. برای مشاهده این اثر واینکه مقدار خطاباتغییر زاویه ازخط عمود چه تغییری می‌کند، آزمایشهای متنوعی صورت گرفته‌است که عبارتنداز:

الف - یک کنتور تکفاز راتحت زوایای مختلف ازخط عمود درجهت انحراف به راست قرار دادیم

وبه‌ازاء یک زاویه خاص ،درجریانهای مختلف (از ۱ تا ۲۰آمپر) زمان رابرای ۵ دور کنتور ثبت کردیم.

ب - همان آزمایش (الف) برای انحراف به چپ ، جلو وعقب انجام شد.

ج - آزمایشهای الف و ب برای انواع مختلف کنتورها انجام شد.

درصد خطا بصورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\text{درصد خطا} = \frac{\text{زمان درحالت نصب صحیح} - \text{زمان درحالت نصب نامناسب}}{\text{زمان درحالت نصب صحیح}} \times ۱۰۰ \quad (۳)$$

ازاین آزمایشها نتایج زیرحاصل شد:

۱- وقتی کنتورنسبت به خط عمود دارای زاویه باشد، کنتور دچار خطامی‌شود. نصب نادرست برروی سیستم الکتریکی اثری ندارد واثر آن حتماً روی سیستم مکانیکی است. درواقع افزایش اصطکاک باعث کاهش سرعت دیسک می‌شود.

۲- درجریانهای کم خطای کنتورناشی ازانحراف درنصب کمتر ودرجریانهای بالا خطا زیاد است.

۳- دربرخی ازکنتورها درزوایای بالای ۷۵° دیسک اصلا" نمی‌گردد.

۴- باافزایش زاویه انحراف خطای ثبت کنتورافزایش می‌یابد.

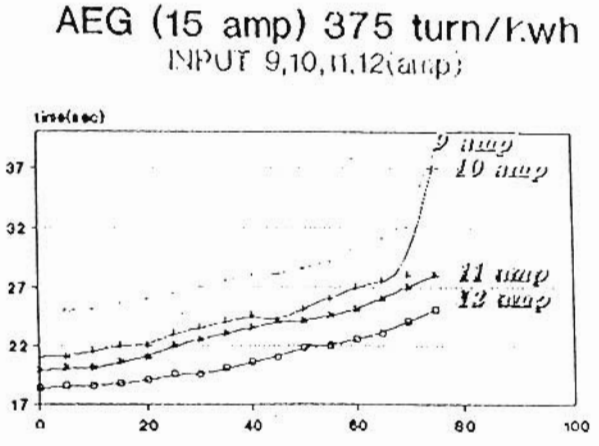
۵- خطای کنتور دریک جریان معین وانحراف مساوی درجهات مختلف تقریباً ثابت است. پس باتعیین خطا دریک جهت ، تقریباً خطا درجهات مختلف دیگرهم بدست می‌آید.

۶- برای برخی ازکنتورها، خطای ثبت برای زوایای انحراف کوچک (کمتراز ۱۰°) تقریباً صفراست.

۷- اگر برای یک زاویه انحراف معین وجریانهای ۱ تا ۲۰^{A} ، میانگین و انحرافی معیار خطای ثبت کنتور محاسبه شود واین کاربرای زوایای انحراف دیگر هم انجام شود مشاهده می‌شود که باافزایش زاویه انحراف ، میانگین درصد خطابه مقدار زیادی افزایش می‌یابد ولی انحراف معیار خطاها تقریباً دارای افزایش کمتری‌می‌باشد. حال اگر برای یک جریان معین وزوایای انحراف مختلف ،میانگین وانحراف معیار درصد خطا محاسبه شود ،دیده می‌شود که باافزایش جریان ، تغییرات این میانگین‌ها وانحراف معیارها از قانون مشخصی پیروی نمی‌کنندو عمدتاً انحراف معیارها بزرگتر ازحالت قبل است. پس نتیجه می‌گیریم ، عامل اصلی ایجاد خطاانحراف نصب می‌باشد وتغییرات جریان عامل جزئی است.

منحنی نمونه زیر زمان ۵ دور کنتور ^{AEG}(۱۵^{amp}) ۳۷۵ دور بر کیلووات ساعت را برای

جریانها ۹ و ۱۰ و ۱۱ و۱۲ آمپر و زاویه انحراف به راست از °۵ تا °۸۵ نشان می‌دهد.



شکل ۱: زمان ۵ دور برای زوایا نصب وجریانها مختلف

٤- اثر هارمونیکهای ولتاژ وجریان روی عملکرد کنتورها

ازآنجائیکه در دودهه اخیر، استفاده ازیکسوکننده‌های تایریستوری و ترانزیستوری کنترل شده افزایش یافته است واستفاده ازاین عناصر می‌تواند باعث غیرسینوسی شدن ولتاژ و جریان شبکه‌قدرت شوند. بنابراین لزوم بررسی دقت یک وات ساعت متر القایی(کنتور) که به یک بار غیرخطی متصل است بیشتر حس می‌شود. این بارها می‌توانند باعث خطا در ثبت کنتورها شوند. بررسی این خطا به دوروش تحلیلی توسط مدل ریاضی کنتور و روش اندازه‌گیری و آزمایش می‌تواند انجام شود. دراین مقاله به روش اول یعنی ارائه یک مدل ریاضی برای کنتور که بتواند عملکرد آن را برای ولتاژ و جریان غیرسینوسی شبیه‌سازی کند توجه داریم.

کنتورهای تکفاز و سه فاز اساساً دارای اصول عملکرد یکسان هستند پس می‌توانیم بررسی خودرابه کنتور تکفاز متمرکز کنیم. یک کنتورالقایی دارای الکترومگنتهای ولتاژ و جریان است که بترتیب توسط ولتاژ ترمینال وجریان خط تغذیه می‌شوند. که درنتیجه توسط آنها فلوهای فاصله هوایی تولید می‌شوند. درزیر سیم‌پیچی ولتاژ ، یک پیچک شیفت فازتعبیه می‌شود که فلوی مؤثر ولتاژ گذرانده ازفاصله‌هوایی را °۹۰ شیفت فاز می‌دهد. براثر واکنش بین فلوهای مؤثر ولتاژ وجریان ازیک طرف وجریانهای گردابی القا شده و دردیسک توسط این شارها ازطرف دیگر، کوپل شتاب دهنده‌ای

بر دیسک اعمال می‌شود. برای اینکه سرعت چرخش دیسک متناسب باتوان موردانداز‌ه‌گیری باشد، یک آهنربای دائمی طوری قرارداده می‌شود که قسمت عمده گشتاور ترمزی راایجاد می‌کند. دربارهای کم ، جهت غلبه براصطکاک درقسمتهای متحرک از یک سیم‌پیچی باتعداد دور کم به نام سیم پیچ تنظیم‌کننده بارهای کم استفاده می‌شود. درجریانهای خیلی زیاد همچون اثر ترمزی شار جریان افزایش می‌یابدو درنتیجه کنتور مقدار کمتری راثبت می‌کند پس جهت جبران این پدیده ازسیم‌پیچی جبران بارهای زیاد استفاده می‌شود.

۱-۴- تعیین مدل

بابرخی فرضیات مناسب وساده‌کننده، مدل ریاضی کنتور طی مراحل زیر بدست آورده می‌شود:

۱- معادلات ولتاژ اعمال شده وجریان عبوری ازکنتور عبارتنداز:

$$v = V\cos\omega t \qquad (۴)$$

$$i = I\cos(\omega t-\theta) \qquad (۵)$$

بنابراین شارهای اصلی ولتاژ وجریان عبارتنداز:

$$\varphi_v = \Phi_v\cos(\omega t-\alpha_v) \qquad (۶)$$

$$\varphi_i = \Phi_i\cos(\omega t-\theta) \qquad (۷)$$

۲- بعلت غیرخطی بودن منحنیهای مغناطیسی مگنتهای ولتاژ وجریان ، فلوهای مؤثر بصورت خطی با فلوهای اصلی درارتباط نیستند. بطور تقریبی این ارتباط چنین است:

$$\varphi'_j = a_{j1}\varphi_j + a_{j3}\varphi_j^3 + a_{j5}\varphi_j^5 \qquad j = i,v \qquad (۸)$$

a_{j1} و a_{j3} و a_{j5} پارامترهای اشباع مربوط به مدارهای مغناطیسی شارهای ولتاژ وجریان می‌باشند. شارهای مؤثرباجاگذاری روابط (۶) و (۷) دررابطه (۸) بصورت زیر بدست می‌آیند.

$$\varphi'_v = \sum_{k=1,3,5}\Phi'_{vk}\cos(k\omega t-k\alpha_v) \qquad (۹)$$

$$\varphi'_i = \sum_{k=1,3,5}\Phi'_{ik}\cos(k\omega t-k\theta) \qquad (۱۰)$$

که درآنها

$$\Phi'_{j1} = a_{j1}\Phi_j + \frac{3}{4}a_{j3}\Phi^3_j + \frac{5}{8}a_{j5}\Phi^5_j \qquad (۱۱)$$

$$\Phi'_{j3} = \frac{1}{4}a_{j3}\Phi^3_j + \frac{5}{16}a_{j5}\Phi^5_j \qquad (۱۲)$$

$$\Phi'_{j5} = \frac{1}{16}a_{j5}\Phi^5_j \qquad (۱۳)$$

۳- حلقه شیف فازبر روی فلوی مؤثر ولتاژ (φ_v) ازنظر اندازه و زاویه فاز تأثیر می‌گذارد اما بر روی φ_i اثری ندارد. پس فلوهای مؤثر بصورت زیر تصحیح می‌شوند

$$\varphi''_v = \sum_{k=1,3,5} \varphi''_{vk} \cos(k\omega t - k\alpha_v - \delta_k) \quad (14)$$

$$\varphi''_i = \varphi'_i \quad (15)$$

۴- ولتاژهای القایی در دیسک که توسط φ''_v و φ''_i ایجاد می‌شوند بصورت زیر بدست می‌آیند.

$$e_j = -d\frac{\varphi''_j}{dt} = k\omega\Phi''_{jk} \sin(k\omega t - \beta_{jk}) \qquad j = v, i \quad (16)$$

که

$$\beta_{vk} = k\alpha_v + \delta_k \quad (17)$$

$$\beta_{ik} = k\theta \quad (18)$$

۵- بنابراین جریانهای گردابی القا شده در دیسک چنین‌اند:

$$i_j = \sum_{k=1,3,5} (k\omega\Phi''_{jk}/|Z_{dk}|) \sin(k\omega t - \beta_{jk} - \alpha_{dk}) \qquad j = v, i \quad (17)$$

$$\alpha_{dk} = \tan^{-1}(k\omega Ld/Rd) \quad (18)$$

Ld/Rd نشان دهنده نسبت اندوکتانس به مقاومت مسیر معادل جریان گردابی و Z_{dk} امپدانس معادل برای هارمونیک K ام جریان است. (درواقع تاکنون جریان ورودی به کنتور را بدون هارمونیک درنظر گرفته‌ایم ولی به علت وجود هارمونیک درمقدار مؤثر فلوها، درجریان گردابی ایجاد شده در دیسک هارمونیک وجوددارد).

۶- کوپل متوسط شتاب دهنده به دیسک برابراست با:

$$TD = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} (\varphi''_v\, i_j - \varphi''_i\, i_v)dt \quad (19)$$

که نهایتاً پس ازچند عملیات به رابطه زیر می‌رسیم:

$$TD = \sum_{k=1,3,5} k\omega c_k z_k \Phi''_{vk}\Phi''_{ik} \sin(\beta_{vk} - \beta_{ik}) \quad (20)$$

که

$$C_k = \frac{1}{Rd\,[1+(k\omega_0 Ld/Rd)^2]} \quad (21)$$

و

$$Z_k = [1+(k\omega_0 Ld/Rd)^2] / [1+k\omega Ld/Rd)^2] \quad (22)$$

که ω فرکانس ولتاژ و جریان اعمال شده و ω_0 فرکانس مبنا می‌باشد.

۷- جریانهای معادل دیسک براثرحرکت دیسک و ۱- وجود شارمغناطیسی دائم (Φ_m) ، i_m ، ۲- وجود شار ولتاژ i_{vb} و ۳- وجود شار جریان i_{ib} می‌باشند. پس کوپل ترمزی متوسط چنین است.

$$TB = \frac{w}{2\pi} \int_{0}^{\frac{2\pi}{\omega}} (k_1\Phi_m i_m + k_1\varphi''_1 i_{1b} + k_1\varphi''_1 i_{ib})dt \qquad (۲۳)$$

K_3, K_2, K_1 پارامترهای ثابت یک کنتور هستند. اگر سرعت دیسک S باشد پس

$$i_m = \frac{S\Phi_m}{R_m} \qquad (۲۴)$$

وداریم :

$$i_{jb} = \sum_{k=1,3,5} s(\Phi''_{ik}/|Z_{dk}|) \sin(k\omega t - \beta_{jk} - \alpha_{dk}) \qquad j = v, i \qquad (۲۵)$$

پس ازچندعملیات، رابطه نهایی زیر برای TB بدست‌می‌آید.

$$TB = s[k' + \sum_{k=1,3,5} c_k\tau_k (k'_1\Phi''^2_{vk} + k'_2 F''^2_{ik})] \qquad (۲۶)$$

که

$$k'_1 = k_1\Phi'^2_m/R_m \qquad (۲۷)$$

$$k'_2 = k_2/Rd\,[1+(\omega_0 Ld/Rd)^2] \qquad (۲۸)$$

$$k'_2 = k_2/Rd\,[1+(\omega_0 Ld/Rd)^2] \qquad (۲۹)$$

۸- درحالت پایدار TD=TB است وبنابراین سرعت دیسک درحالت پایدار بصورت زیربدست می‌آید.

$$S = \frac{\sum_{k=0,3,5} k\omega c_k\tau_k\Phi''_{vk}\Phi''_{ik} \sin(\beta_{vk}-\beta_{ik})}{k_1 + \sum_{k=0,3,5} c_k\tau_k (k'_2\Phi''_{vk} + k'_0\Phi''_{ik})^2} \qquad (۳۰)$$

درصد خطا ازرابطه زیربدست می‌آید:

$$\%\text{خطا} = \frac{(S-S_0)}{S_0} \times 100 \qquad (۳۱)$$

که S سرعت دیسک براساس رابطه (۲۹) و S_0 سرعت دیسک درفرکانس مبنای ω_0 (فرکانس نامی) می‌باشد.

۲-۴- تعیین پاسخ فرکانسی یک کنتور

بااستفاده ازروابط (۲۹) و (۳۰) می‌توان پاسخ فرکانسی یک کنتور رابعنوان نمودار درصد خطابرحسب فرکانس ولتاژ وجریان اعمال شده به آن بدست آورد. در [1] یک نمونه ازاین پاسخ فرکانسی برای یک کنتور مشخص وبرای ضریب قدرتهای مختلف آورده شده‌است. بااستفاده ازاین پاسخ فرکانسی دیده‌می‌شود که در فرکانس ۱ KHZ ، کنتور فقط ۶ درصد از انرژی را ثبت می‌کند و درفرکانس ۶ KHZ هیچ مقداری ثبت نمی‌شود وخطا برابر ۱۰۰٪ است.

۳-۴- پاسخ کنتور به ورودیهای شامل هارمونیک

فرض می‌کنیم جریان و ولتاژ ورودی به کنتور علاوه برمؤلفه بافرکانس شامل نامی هارمونیک مرتبه h هم باشند یعنی :

$$\upsilon = v \cos \omega_0 t + v_h \cos (h\omega_0 t - \gamma_v) \quad (۳۲)$$

$$i = I \cos (\omega_0 t - \theta) + I_h \cos (h\omega_0 t - \gamma_i) \quad (۳۳)$$

توان متوسط که کنتور باید ثبت کندبصورت زیرمحاسبه می‌شود:

$$P = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} \upsilon.i.dt = \frac{VI}{2} \cos \theta + \frac{V_h I_h}{2} \cos (\gamma_v - \gamma_i) \quad (۳۴)$$

نحوه محاسبه سرعت دیسک دراین حالت هم طبق رابطه (۲۹) می‌باشد. فقط جملات وارد شده در روابط زیادتر وعملیات پیچیده‌تراست.

درصورتی که ورودیهای ولتاژ و جریان شامل چند مؤلفه هارمونیکی باشند، چون معمولاً" اندازه هارمونیک h ام ولتاژیاجریان ، معمولاً" بیش از $\frac{1}{h}$ برابرمؤلفه اصلی نیست، درنظر گرفتن هارمونیک ۳و۵و۷ کافی است. توجه داریم که هارمونیک‌های زوج بندرت درشبکه قدرت یافت می‌شوند. نحوه محاسبه سرعت دیسک دراین حالت همانند قبل می‌باشد.

۵- نتیجه گیری

اثرات درجه حرارت ، فرسودگی ونصب (عوامل خارجی) و شرائط ورودی غیرنرمال همچون اضافه جریان و تغییرات ولتاژ نسبت به ولتاژ نامی توسط انجام برخی آزمایشها مورد مطالعه قرار گرفتند. نتیجه این آزمایشها دراکثر موارد کم نشان دادن انرژی مصرفی توسط کنتور نسبت به مقدارواقعی می‌باشد. همچنین باتوسعه یک‌مدل ریاضی برای کنتوراثرهارمونیک‌های ولتاژوجریان روی عملکرد کنتوربررسی شد. اثرغیر سینوسی بودن ورودیها به کنتور، ثبت کمترازمقدار واقعی می‌باشد.

باتوجه به نتایج فوق ،درنظرگرفتن این عوامل بطور دقیقتر درطراحی وساخت کنتورها وهمچنین آزمایش کنتورهای فرسوده بطور گسترده ودرصورت عدم اصلاح جایگزین کردن برخی ازآنها ، ضروری بنظر می‌رسد.

۶- یادآوری

لازم به ذکراست که مطالعات و آزمایشهای انجام شده دراین تحقیق توسط کمیته تحقیقات برق اصفهان پشتیبانی شده است وبدینوسیله از همکاری و مساعدت این کمیته تشکرمی‌گردد.

۷- مراجع

[1] y.Baghzouz and owen t.tan, "Harmonic Analysis of Induction Watthour Meter performance, "IEEE Trans.on Power Apparatus and Syatems, vol, PAS-104 NO.2, . February, 1985,pp.399-406.

[2] H.R. Soutar and O.P.Malik "Theoretical Analysis pof a single-phase Induction Watthor Meter, "IEEE Trans.on Power Apparatus and Systems, VOL.PAS-88 NO.8,August 1969,pp.1275-1285.

[3] Ehham B.Makram and Claren ce L.Wright and Adly A.Girgis "A Harmonic Analysis of the induction watthour meters RegistrationError", IEEE trans. on power Delivery. vol7, No.3, July 1992

۴ "تلفات انرژی الکتریکی وضرورت کاهش آن "،شرکت توزیع نیروی آذربایجان شرقی ، مهندس کریم روشن میلانی .