



#

#

طراحی و ساخت سیستم مدرن اندازه گیری تخلیه الکتریکی جزئی

حیدر علی شایانفر
استاد دانشگاه علم و صنعت ایران

ایران

منصور رفیعی
دانشجوی دکتری دانشگاه علم و صنعت ایران
و عضو هیئت علمی دانشگاه صنعت آب و برق

ایران

واژه های کلیدی: اندازه گیری تخلیه جزئی، آشکار سازی، تحلیل پالسهای تخلیه جزئی، نرم افزار

۱- مقدمه

موضوع تخلیه الکتریکی جزئی یا کرونا شامل مجموعه ای از فعالیتهای تحقیقاتی است که شروع آن به اوایل قرن بیستم برمی گردد. از این رو شاید به نظر برسد حوزه مطالعات PD بطور کامل توسعه یافته است. اما اهمیت زیاد آن برای دستیابی به مشخصات کیفی و عملکردی تجهیزات فشار قوی، همواره انگیزه شکل گیری فعالیتهای تحقیقاتی وسیع در ارتباط با مکانیزم، اثرات فیزیکی و شیمیایی و تکنیکهای آشکارسازی و اندازه گیری آن بوده است.

اولین گام در رابطه با مطالعه پدیده تخلیه الکتریکی در یک تجهیز، آشکارسازی آن است. سابقه کاربرد روش های اسیلوگرافی در آشکارسازی PD به بیش از ۷۰ سال پیش میرسد [1-2]. امروزه با توسعه اسیلوسکوپهای با پهنای باند در حد گیگاهرتز، رؤیت پالسهای تخلیه با زمان صعود ۱ تا ۲ نانوثانیه نیز امکانپذیر شده است. البته همیشه پالسهای تخلیه جزئی دارای زمان صعود در این حد نیستند. معمولاً آشکارسازی پالسهای تخلیه جزئی در پهنای باند حداکثر یک گیگاهرتز مناسب است. آشکارسازهای تخلیه جزئی متداول

چکیده:

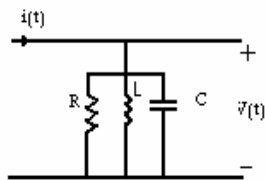
اندازه گیری دقیق و صحیح تخلیه الکتریکی جزئی اولین گام در استفاده از این پدیده مهم در ارزیابی وضعیت عایق در تجهیزات الکتریکی فشارقوی می باشد. با توجه به پیشرفت همزمان سخت افزار و نرم افزار کامپیوتر، استفاده از این تکنولوژی در اندازه گیری تخلیه الکتریکی جزئی مزایای بسیاری به همراه خواهد داشت.

در این مقاله گزارش ساخت یک تجهیز مدرن مبتنی بر کامپیوتر برای اندازه گیری تخلیه الکتریکی جزئی ارائه گردیده است. سخت افزاری که قسمت اصلی آن را یک مبدل آنالوک به دیجیتال خیلی سریع تشکیل می دهد و نرم افزاری که با استفاده از امکانات VC++ محیط کارآمدی را برای انجام آزمایش، پردازش دیجیتال اطلاعات، استخراج ویژگیها و تحلیل نتایج بوجود آورده است، در کنار هم سیستمی را تشکیل داده اند که برای بسیاری از مقاصد آموزشی و تحقیقاتی در رابطه با اندازه گیری تخلیه جزئی انواع تجهیزات فشار قوی مناسب مینماید.

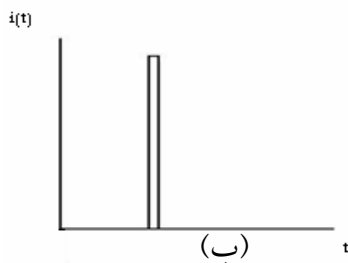
Ck: خازن کوپلاژ برای جداسازی ولتاژ فرکانس قدرت از سیگنال تخلیه

Zm: امپدانس آشکارسازی است که یک مدار دوقطبی شامل یک **RLC** موازی می باشد و از آن به عنوان فیلتر ابتدائی میان گذر برای تضعیف سیگنالهای ناخواسته استفاده می گردد. به وسیله این فیلتر سیگنال فرکانس قدرت و هارمونیکهای آن و نیز سیگنال های با فرکانس بالاتر از طیف مورد نظر سیگنال تخلیه جزئی تضعیف میگردند.

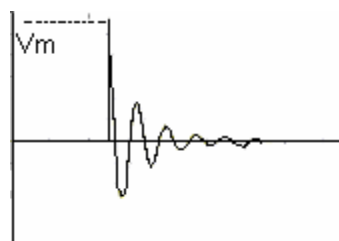
پالس جریان تخلیه الکتریکی با عبور از این امپدانس ولتاژی در دو سر آن ایجاد می کند که شکل آن به پاسخ ضربه این فیلتر بستگی دارد. ثابت می شود که مقدار بار ظاهری تخلیه متناسب با دامنه پاسخ این فیلتر می باشد [5].



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۲- (الف) مدار دوقطبی آشکار ساز
(ب) پالس جریان تخلیه جزئی (ج) ولتاژ آشکار شده

Ccal , Vcal: برای بدست آوردن ضریب تناسب بین بار ظاهری تخلیه و دامنه ولتاژ آشکار شده، از منبع ولتاژ مربعی

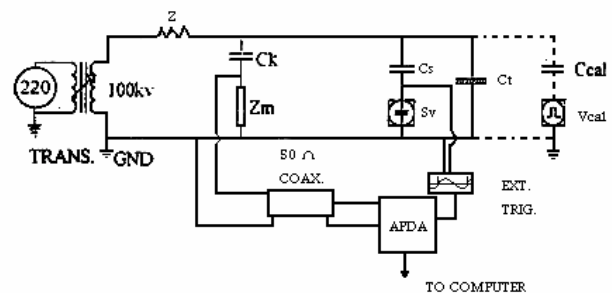
برای استفاده در در کابلها، خازنها و ترانسفورماتورها برای کار در طیف فرکانسی بین ۳۰ الی ۴۰۰ کیلو هرتز طراحی شده اند. دستگاههای آشکار ساز با پهنای باند وسیعتر در کارهای تحقیقاتی که در آنها بازسازی شکل پالس اهمیت زیادی دارد بکار می روند. همچنین برای بهبود رزولوشن پالس پهنای وسیعتر حدود ۲۰ مگاهرتز برای مکان یابی عیب در کابلها و حدود ۸۰۰ کیلوهرتز تا ۱ مگاهرتز برای ماشینهای گردان بکار می رود [3].

با توسعه مبدلهای آنالوگ به دیجیتال تحلیلگرهای دامنه پالس و سپس تحلیلگرهای فاز پالس و نهایتاً سیستم های اندازه گیری توزیع پالسهای PD معرفی گردیدند. با پیشرفت روزافزون و همزمان سخت افزار و نرم افزار و فراگیر شدن استفاده از کامپیوترهای شخصی ، سیستم های اندازه گیری مبتنی بر کامپیوتر بخصوص در کاربردهای تحقیقاتی توسعه زیادی یافته اند.

مقاله حاضر یک سیستم مدرن مبتنی بر کامپیوتر برای اندازه گیری و ثبت پالسهای تخلیه الکتریکی جزئی برای مقاصد تحقیقاتی را شرح می دهد.

۲- معرفی کلی سیستم ساخته شده

برای طرح این سیستم از مدار شکل زیر به عنوان مدار آشکار سازی استفاده شده که مطابق با شکل ۴-a استاندارد IEC 270 می باشد [4].



شکل ۱- مدار اندازه گیری سیگنال تخلیه الکتریکی

اجزاء اصلی این مدار اختصاراً توضیح داده میشوند:

Z: امپدانس محدود کننده جریان در صورت شکست

الکتریکی عایق مورد مطالعه

ظرفیت ۱۲۸ مگابایت بر روی برد در نظر گرفته شده است. بدین ترتیب برد در زمان نمونه برداری نیاز به ارتباط با حافظه کامپیوتر ندارد و بدین ترتیب می تواند با سرعت بسیار زیاد عمل نمونه برداری و تبدیل آنالوگ به دیجیتال را با عرض ۱۴ بیت انجام دهد. برای افزایش دقت و حذف نوسانات ناخواسته فقط از ۱۲ بیت نمونه های دیجیتال استفاده شده است. فرکانسهای نمونه گیری ۱، ۲، ۵، ۸، ۱۰، ۲۰ و ۴۰ مگاهرتز توسط کاربر از طریق نرم افزار امکان پذیر می باشد. شروع کار نمونه گیری یعنی تریگ شدن کارت به سه صورت نرم افزاری، سطح ولتاژ سیگنال ورودی (تخلیه جزئی) و تریگر با سیگنال خارجی منطبق با TTL قابل انتخاب است. برای ارتباط با نرم افزار، درایور این کارت بصورت ActiveX و در محیط VC++ تهیه شده است. کل مجموعه در داخل یک کامپیوتر صنعتی بصورت نصب شده در یک راک استاندارد ۳۶ یونیت قرار می گیرد.

۴- بخش نرم افزار

برای انجام آزمایش و نمونه گیری، ذخیره کردن داده های خام، آماده سازی سیگنال، پردازش دیجیتالی سیگنال، نمایش شکل موج لحظه ای پالسهای ذخیره شده، تشخیص پالسهای تخلیه و تعیین دامنه و فاز (زمان) وقوع و فرکانس تکرار آنها، تهیه منحنی های دو بعدی و سه بعدی و انجام تحلیلهای آماری و استخراج ویژگیهای سیگنال تخلیه جزئی به منظور شناسائی نوع عیب، نرم افزار کاملی در محیط VC++ تهیه شده که امکانات زیادی را در اختیار کاربر قرار میدهد. قسمتهای اصلی نرم افزار در ادامه اختصاراً توضیح داده میشوند.

انجام آزمایش و شروع نمونه گیری: پس از آماده شدن مدار و شرایط آزمایش، کاربر مشخصات آزمایش مانند ولتاژ، فرکانس، دمای شیء مورد آزمایش و کد شناسائی آن، نام متصدی آزمایش وسایر اطلاعات حسب نیاز را وارد می کند. فرکانس نمونه برداری بصورت $MSPS^2$ (میلیون نمونه در ثانیه) و ضریب تقویت فیلتر و نوع تریگر (شروع نمونه

با دامنه Vcal و خازن کالیبره Ccal استفاده می شود. باری که از این طریق به سیستم تزریق میشود عبارت است از:

$$q_{cal} = C_{cal} \times V_{cal} \quad (1)$$

CS, SV: خازن مقسم ولتاژ و ولتاژ اعمال شده را تا سطح ولتاژ قابل تحمل ولت متر دقیق SV (با نسبت ۱: ۵۰۰) کاهش می دهد. از این ولتاژ همچنین سیگنال عبور از صفر جهت تریگر خارجی و شروع کار دستگاه اندازه گیری PD فراهم میشود.

APDA¹: یک سیستم پیشرفته اندازه گیری و تحلیل پالسهای تخلیه جزئی می باشد که سخت افزار آن شامل تقویت کننده و فیلترهای آنالوگ، مدار مبدل آنالوگ به دیجیتال فوق العاده سریع، حافظه روی برد و سخت افزار کامپیوتر میباشد و نرم افزار آن بصورت اختصاصی طراحی شده است.

۳- بخش سخت افزار

مدار تقویت کننده و فیلتر بصورت قابل نصب در شیار ISA طراحی شده و دارای ضرایب تقویت ۴، ۲۰، ۱۰۰ و ۵۰۰ و پهنای باند ۵۰ تا ۸۰۰ کیلوهرتز است که این ضرایب هم از طریق نرم افزار و هم بصورت دستی قابل انتخاب می باشند. آدرس شناسائی برد نیز بوسیله دیپ سوئیچهای روی برد قابل تنظیم است.

کارت نمونه گیری و مبدل آنالوگ به دیجیتال سریع با توجه به مزایای باس PCI یعنی:

- نرخ بالای انتقال اطلاعات تا ۱۲۸ مگابایت بر ثانیه با عرض ۱۶ بیت

- خصوصیت PLUG & PLAY

- پشتیبانی از HOT SWAPPING

- دارا بودن ولتاژهای ۵ ولت و ۳/۳ ولت

بر روی شیار PCI کامپیوترهایی که پروتکل V2.2 و V2.1 مربوط به باس PCI را پشتیبانی می کنند قرار میگیرد. برای ایجاد قابلیت ذخیره سازی داده های نمونه برداری شده، یک حافظه داخلی از نوع SDRAM با

همانطور که در قسمت قبل بیان شد بار ظاهری تخلیه را می توان با دامنه اولین پیک آشکار شده سیگنال تخلیه الکتریکی جزئی متناسب دانست. یعنی در محاسبه بار تخلیه الکتریکی جزئی دنباله های سیگنال یعنی پیک های بعدی با علامت مثبت و منفی نباید در نظر گرفته شوند. بدین منظور از یک الگوریتم ابتکاری برای پیک یابی استفاده شده است. طبق تعریف این الگوریتم پیک نقطه ای است که شرایط زیر را داشته باشد:

- داده فعلی از داده های قبلی و بعدی بزرگتر باشد.
- مقدار داده از مقدار سطح نویز بیشتر باشد.
- فاصله زمانی پیک فعلی از پیک قبلی از حداقل زمان تفکیک بیشتر باشد.

انجام محاسبات و تحلیلها: پس از تشخیص پیک های سیگنال تخلیه جزئی تمام محاسبات با توجه به دامنه ، نرخ تکرار و فاز وقوع آنها نسبت به ولتاژ سینوسی فرکانس قدرت انجام میگردد.

برای تشکیل ماتریس $(\phi - q - n)$ کل دامنه یعنی از ۲۰۴۸- تا ۲۰۴۸+ به ۲۵۶ قسمت بنام پنجره دامنه و کل ۳۶۰ درجه فاز به ۲۰۰ قسمت بنام پنجره فاز تقسیم می شوند. تعداد پالسهای تخلیه متعلق به هر یک از پنجره های دامنه و فاز به عنوان درایه های ماتریس شناخته می شوند. از روی این ماتریس بطور مستقیم و غیر مستقیم هیستوگرامها و نمودارهای مختلف محاسبه و ترسیم میشوند که تعدادی از آنها عبارتند از:

- $H_n(\phi)$: تعداد پالسها در هر پنجره فاز
- $H_n(q)$: تعداد پالسها در هر پنجره دامنه
- $Q_s(\phi)$: مجموع مقدار بار تخلیه در هر پنجره فاز
- $W(\phi)$: انرژی تلف شده در تخلیه در هر پنجره فاز
- $W(q)$: انرژی تلف شده در تخلیه در هر پنجره دامنه
- $q(\phi)$: الگوی تخلیه
- $H(q, \phi)$: تعداد تخلیه با دامنه و فاز معین بر حسب دامنه و فاز
- $q_i(t)$: مقدار لحظه ای بار اندازه گیری شده
- $Q_s(q)$: مجموع مقدار بار تخلیه در هر پنجره دامنه
- $Q_m(\phi)$: ماکزیمم دامنه بار تخلیه در هر پنجره فاز

برداری) نیز در این مرحله قابل انتخاب هستند. برای آنالیز بر مبنای فاز وقوع تخلیه جزئی ، مناسب ترین روش تریگر با سیگنال خارجی بوسیله سیگنال عبور از صفر ولتاژ فرکانس قدرت آزمایش می باشد.

پس از انجام آزمایش ، داده ها از SDRAM روی برد به RAM کامپیوتر منتقل می شود و کاربر می تواند به تعداد سیکلهای مورد نظر از فرکانس قدرت داده های نمونه گیری شده را بصورت فایل روی دیسک سخت ذخیره سازی نماید.

آماده سازی، پردازش سیگنال و پیک یابی : در این مرحله میتوان با استفاده از امکانات نمایش سیگنال از جمله مرور، بزرگنمایی در محور های زمان و دامنه ، رؤیت همزمان سیگنال همراه با ولتاژ سینوسی فرکانس قدرت و .. آماده سازیهای زیر را بر روی داده های خام گرفته شده انجام داد :

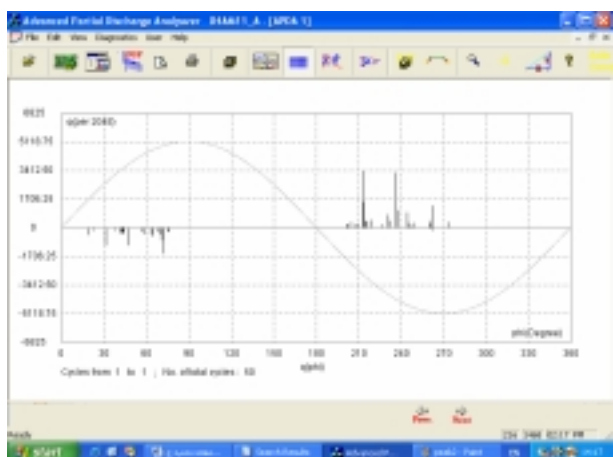
- حذف آفست دی سی: که ممکن است در اثر عبور سیگنال از تقویت کننده و فیلترها بوجود آمده باشد.

- تعریف سطح(آستانه) نویز : فقط پالسهای با دامنه بیش از این مقدار در نظر گرفته می شوند.

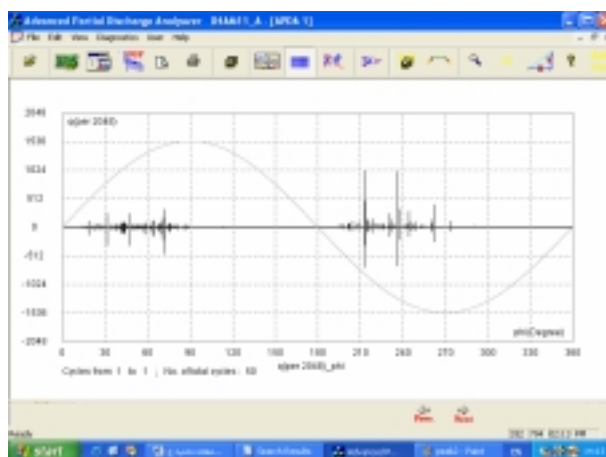
- جابجائی در محور زمان: می توان کل سیگنال را نسبت به فاز سینوسی فرکانس قدرت به اندازه دلخواه جابجا نمود.

- تعریف حداقل زمان تفکیک دو پالس متوالی: برای حذف پالس های با دامنه کوچکتر که ناشی از عبور از پالس اصلی از فیلترهای میان گذر هستند، حداقل فاصله زمانی برای تشخیص دو پالس متوالی تعریف میگردد

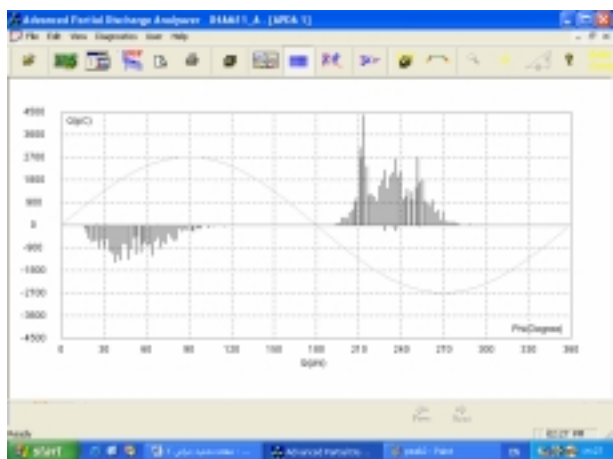
در این مرحله امکان استفاده از یک فیلتر میان گذر دیجیتال¹ FIR پنجره ای همینگ پیش بینی شده است که کاربر میتواند فیلتر را به داده های خام اعمال نموده و نتیجه آن را بطور همزمان با سیگنال اصلی روی دو محور جداگانه ببیند. فیلترهای استفاده شده از نوع همینگ^۲ هستند. در عین حال امکان استفاده از فیلتر موجودی طراحی فیلتر جدید وجود دارد.



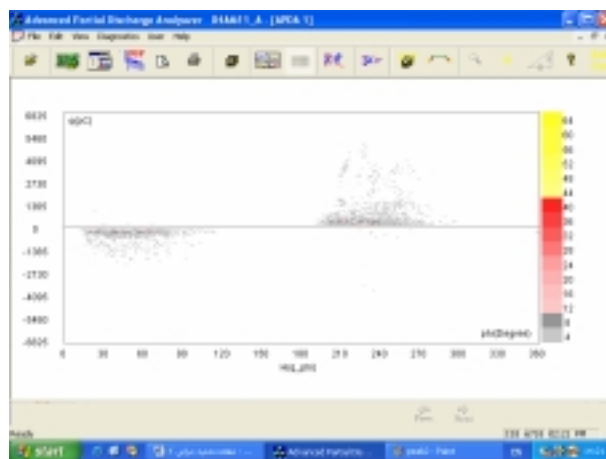
ب) الگوی تخلیه



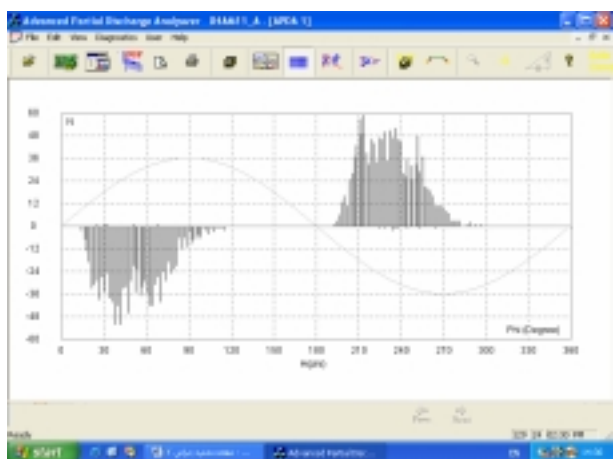
الف) مقدار لحظه ای بار اندازه گیری شده



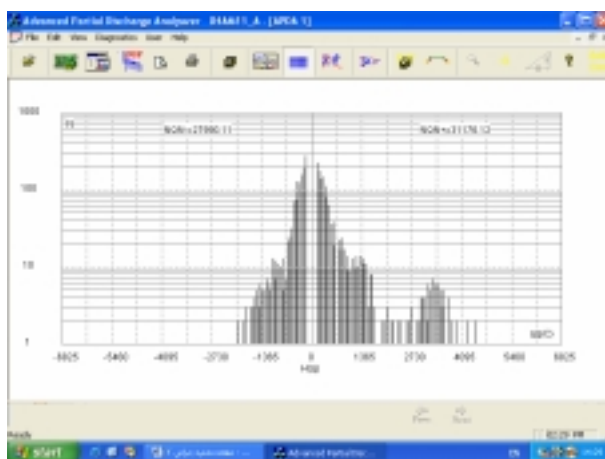
د) مجموع بار تخلیه در هر پنجره فاز



ج) تعداد تخلیه با دامنه و فاز معین بر حسب دامنه و فاز



و) تعداد پالسها در هر پنجره فاز



ه) تعداد پالسها در هر پنجره دامنه

شکل ۳- نمونه هایی از منحنی های خروجی نرم افزار-نتیجه آزمایش روی شینه ژنراتور واقعی

جدول ۲- شاخصهای بدست آمده از توزیعهای آماری

ردیف	شاخص	عنوان	توزیع		
			$H_n(\phi)$	$H_n(q)$	$Q_s(\phi)$
۱	sk +	skewness (+)	x	x	x
۲	sk -	skewness (-)	x	x	x
۳	ku +	kurtosis (+)	x	x	x
۴	ku -	kurtosis (-)	x	x	x
۵	CC	cross corelation	x	x	-

skewness: اگر میانگین را گشتاور اول و واریانس را گشتاور دوم داده های یک توزیع بنامیم ، گشتاور مرتبه سوم که پیش نامیده می شود از رابطه زیر بدست می آید:

$$sk = \frac{\sum (x_i - \mu)^3 \cdot P_i}{\sigma^3} \quad (۳)$$

kurtosis: یا تیزی، گشتاور مرتبه چهارم داده های یک توزیع است و تجمع داده ها حول میانگین را نشان می دهد و از رابطه زیر بدست می آید:

$$ku = \frac{\sum (x_i - \mu)^4 \cdot P_i}{\sigma^4} \quad (۴)$$

cross correlation: شاخص وابستگی متقابل دو توزیع است که در اینجا برای بدست آوردن میزان مشابهت تخلیه های پلاریته مثبت با پلاریته منفی محاسبه میشود و می تواند عامل مفیدی برای تشخیص بعضی از انواع عیوب باشد.

$$CC = \frac{\sum x_i \cdot \sum y_i - \sum x_i \cdot \sum y_i / n}{\sqrt{\left(\sum x_i^2 - \left(\sum x_i\right)^2 / n\right) \left(\sum y_i^2 - \left(\sum y_i\right)^2 / n\right)}} \quad (۵)$$

این کمیت ها برای توزیع های نشان داده شده در جدول-۲ که با علامت X مشخص شده اند برای پالسهای با پلاریته مثبت و منفی بطور جداگانه محاسبه می گردد.

جدول-۱، نمونه ای از شاخصهایی که توسط این نرم افزار از روی داده های خام سیگنال تخلیه جزئی محاسبه میشوند، نشان میدهد.

جدول ۱- شاخصهای بدست آمده از داده های خام

ردیف	شاخص	واحد	شرح
۱	NQN+	pC	بار نرمالیزه پالسهای با دامنه مثبت
۲	NQN-	pC	بار نرمالیزه پالسهای با دامنه منفی
۳	q^2	pC^2/sec	مجدور بار تخلیه بر واحد زمان
۴	Iav	nA	متوسط جریان تخلیه
۵	Qav+	pC	متوسط بار تخلیه با پلاریته مثبت
۶	Qav -	pC	متوسط بار تخلیه با پلاریته منفی
۷	Qmax +	pC	ماکزیمم بار تخلیه با پلاریته مثبت
۸	Qmax -	pC	ماکزیمم بار تخلیه با پلاریته منفی
۹	P	mW	توان تلف شده تخلیه

کمیت NQN^1 در استاندارد IEEE 1434- 2000 با عنوان عدد مقدار نرمالیزه تعریف شده است و از رابطه زیر بدست می آید:

$$NQN = \frac{FS}{G \times N} \times \left[\frac{\log_{10} P_1}{2} + \sum_{i=2}^{N-1} \log_{10} P_i + \frac{\log_{10} P_N}{2} \right] \quad (۲)$$

که در آن :

- P_i : تعداد پالسها در پنجره دامنه i در یک ثانیه
- FS : ماکزیمم مقدار پنجره دامنه در بهره واحد
- N : تعداد پنجره های دامنه
- G : بهره آشکارساز تخلیه الکتریکی جزئی

همانطور که از تعریف فوق دیده می شود، مقدار این کمیت به حساسیت آشکار ساز بستگی دارد. لذا مقایسه مقدار آن فقط برای داده هایی قابل توجیه است که با بهره یکسان آشکارسازی شده اند [6].

جدول-۲، نمونه ای از شاخصهای آماری که از روی توزیع های مختلف بدست آمده از ماتریس $(\phi - q - n)$ محاسبه می شوند را نشان می دهد.

۵- جمع بندی و نتیجه گیری

در این مقاله اجزاء و عملکرد یک دستگاه اندازه گیری تخلیه الکتریکی جزئی که با اهداف تحقیقاتی ساخته شده است، تشریح گردید. دستگاه ساخته شده دارای خصوصیات است که آن را از تجهیزات موجود متعارف کاملاً متمایز می نماید. برخی از آنها عبارتند از:

- امکان نمونه گیری از سیگنال تخلیه جزئی با سرعتهای مختلف ۱، ۲، ۵، ۸، ۱۰، ۲۰، ۴۰ میلیون نمونه در ثانیه که این دستگاه را هم برای مطالعه شکل موج پالس تخلیه مناسب می سازد (نرخ نمونه گیری بالا مثلاً ۴۰ MSPS) و هم مطالعات تحلیل توزیع فاز و دامنه پالسها که به نرخ نمونه گیری کمتری احتیاج دارند (مثلاً ۸ MSPS) با این دستگاه بسهولت انجام می شود.

- با تنظیم سخت افزاری بهره تقویت کننده و فرکانس قطع بالا و پائین فیلترها میتوان انواع مختلف تجهیزات فشارقوی مانند کابلها، ترانسفورماتورها، ماشینهای گردان و شینه های مجزا را مورد آزمایش قرار داد.

- با در اختیار بودن فایل داده های خام که توسط نرم افزار ذخیره می شود می توان انواع مطالعات و بررسی را بصورت offline و با فرصت کافی انجام داد.

- نمایش انواع منحنی ها و تحلیلهای توزیع فاز و توزیع دامنه که می تواند کاربر را در تعیین نوع و میزان شدت تخلیه الکتریکی جزئی یاری نماید.

- ویژگیهای سیگنال تخلیه الکتریکی جزئی استخراج شده توسط نرم افزار، ضمن کمک به کاربر برای تعیین نوع و شدت عیب به علت حجم کم اطلاعات قابلیت ذخیره در بانک اطلاعاتی و استفاده های بعدی را نیز دارد.

با جمع آوری و دسته بندی نتایج بدست آمده از آزمایشات تخلیه جزئی بخصوص شاخصهای آماری آنها میتوان به مرور زمان بانک اطلاعاتی ارزشمندی از این اطلاعات تشکیل داد و از آن برای تعیین یک نگاشت یک به یک بین این داده ها و عیوب مرتبط و نهایتاً تشخیص صحیح و سریع نوع عیوب استفاده نمود.

۶- تقدیر و تشکر

نگارندگان برخود لازم میدانند از شرکت توانیر و دانشگاه صنعت آب و برق بخاطر حمایت مالی و در اختیار قراردادن امکانات لازم برای انجام این تحقیقات تشکر نمایند.

۷- منابع و مراجع

- [1]- J. T. Tykociner, H. A. Brown E. B. Paine, "Oscillations due to ionization in dielectrics and methods of their detection and measurement", University of Illinois Bulletin, No. 49 and 50, Vol. 30, Urbana, Illinois, 1933.
- [2]- G. E. Quinn, "Detection of the ionization point in electrical apparatus", AIEE Trans., Vol. 59, pp. 709-714, 1940.
- [3]- R. Bartnikas, "Partial discharges, their detection and measurement", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.9, No. 5, October 2002.
- [4]- IEC standard Publication 270, "Partial discharge measurement", second edition, 1981.
- [5]- E. Kuffel, W. S. Zaenglein, "High voltage engineering fundamentals", NY: Pergamon Press, 1984.
- [6]- IEEE std. 1434-2000, "IEEE Trial Use Guide to the Measurement of Partial Discharges in Rotating Machinery",