



بررسی عملی و شبیه سازی تغییرات رفتاری برقگیر با عوامل اثر گذار

سید محمد رضا نبوی^۱

حمید مهدوی نیک^۲

ابوالفضل وطن دوست^۳

کلمات کلیدی: برقگیر اکسید روی ، درصد افت خاصیت عایقی ، جریان نشتی

چکیده

در این مقاله علاوه بر ملاحظات و جداولی که بطور عملی اندازه گیری و ارائه شده اند ، تحلیل های تئوریک و شبیه سازی جهت بررسی رفتار برقگیر نیز ارائه شده است . نتایج عملی به کمک دستگاه تستر برقگیر طراحی شده ، برای تشخیص صحت عملکرد برقگیر بدست آمده است . این دستگاه از دو قسمت عمده تشکیل می شود :

- سنسور

- مدار الکترونیکی

سنسور از دو سیم پیچ تشکیل می شود که بصورت کاملا متقارن روی دو نیم هسته از جنس فریت پیچیده شده اند، تعداد دور سیم پیچی شده نیز با توجه به امپدانس پیش تقویت کننده تعیین می شود.

مدارات الکترونیکی نیز وظیفه حذف نویز و نمونه گیری از ولتاژ خروجی سنسور و تبدیل آن به جریان و در نهایت نمایش میزان جریان و در صدف افت خاصیت عایقی را به عهده دارند.

در پایان نیز ، مقایسه نتایج شبیه سازی و عملی انجام گرفته است .

مقدمه

برقگیرها به علل مختلف در شبکه های توزیع دچار آسیب می شوند که مهمترین آنها عوامل محیطی (رطوبت، آلاینده های موجود در هوا و ...)، شوک های الکتریکی و ضربات مکانیکی می باشد در صورتیکه علت بروز عیب ، ناشی از انتخاب غلط و ناصحیح مشخصه برقگیر نبوده وبا فرض اینکه برقگیرهای شبکه توزیع هر منطقه از نظر نقطه کار ، ولتاژ نامی، جریان تخلیه بر اساس منحنی های ایزو

کرونیک و ولتاژ پس ماند و... صحیح فرض شوند بر اساس استاندارد IEC60099-4 به مشکلات و عیب ایجاد شده در زمان بهره برداری پرداخته می شود[3].

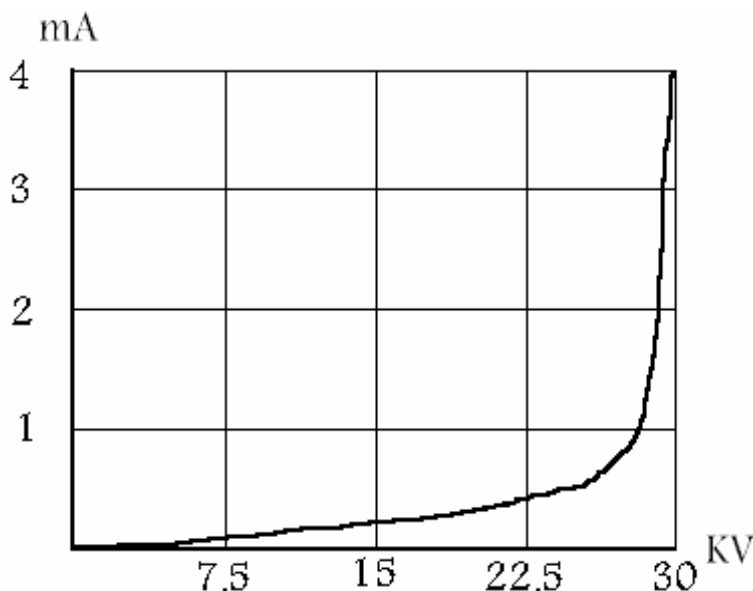
در برقگیرهای اکسید فلزی با پوشش عایق چینی، رطوبت عامل 86% از کار افتادگی برقگیرها می باشد[1]. این مسئله ناشی از ضعف آب بندی این نوع برقگیرها میباشد و در نتیجه نفوذ رطوبت به داخل برقگیر و قرص داخلی آنها و خوردگی تدریجی واریستور، برقگیر تخریب شده و دچار عیب خواهد شد. یک روش ابتدائی در شبکه های توزیع قبل از نصب مجدد برقگیرها جهت تشخیص سالم بودن آب بندی آن توسط غوطه ور نمودن آن در داخل حوضچه آب و عدم مشاهده حباب های هوا خواهد بود در برقگیرهای پلیمری نیز نفوذ بخار رطوبت (Vapor Transmission Moisture) باعث فرسایش واریستور می شود. این مسئله ناشی از نفوذپذیری مواد پلیمری سلیکونی می باشد. علاوه بر نفوذ رطوبت به داخل برقگیر، عامل دوم افزایش جریان ناشی در سطح پوشش عایق آن بوده که به تدریج میتواند به ایجاد جرقه (Flashover) منتهی شود. این مشکل ناشی از آلودگی محیط در برقگیرهای چینی بدلیل طول خزش کمتر، بیشتر می باشد. ولی در برقگیرهای نوع پلیمری با افزایش سطح خزش این مشکل تا حدود زیادی کاهش یافته است. علاوه بر آلودگی محیط عوامل دیگری مانند رسوبات نمکی و آلایندهای صنعتی نیز در این منطقه ای خرابی و کاهش عمر برقگیر مؤثر می باشند.

شوکهای الکتریکی نیز در کاهش عمر برقگیرها نقش مهمی دارند که مهمترین آنها اضافه ولتاژهای دائم، ضربه و شوکهای جریان به گونه ای که انرژی آنها بیش از حد مجاز تحمل برقگیرها بوده و این امر بیشتر به انتخاب غلط آنها مربوط میگردد. در برقگیرهای با پوشش چینی در اثر عیب، برقگیر منفجر شده و ممکن است که باعث صدمه دیدن سایر تجهیزات و پرسنل شود اما در برقگیرهای با پوشش پلیمری معمولاً این مشکل به وجود نمی آید و در اثر قوس در داخل این برقگیرها انفجار ایجاد نمی شود، از این لحاظ این نوع برقگیرها مناسبتر میباشد[2].

در اثر عیب در برقگیرها، معمولاً برقگیر اتصال کوتاه می شود و در نتیجه باعث عکس العمل سیستمهای حفاظتی شده، باعث قطع شدن قسمتهایی از شبکه خواهد شد. امروزه از یک قطعه به نام جداکننده (disconnect) در شبکه های توزیع استفاده می شود که از اتصال کوتاه شدن شبکه جلوگیری کرده، مدت زمان خاموشی را کاهش می دهند.

اندازه گیری جریان ناشی در آزمایشگاه فشار قوی

برقگیرهایی نوع ZnO که در شبکه توزیع بکار می روند دارای مشخصه ولتاژ - جریان مطابق شکل (1) می باشند:

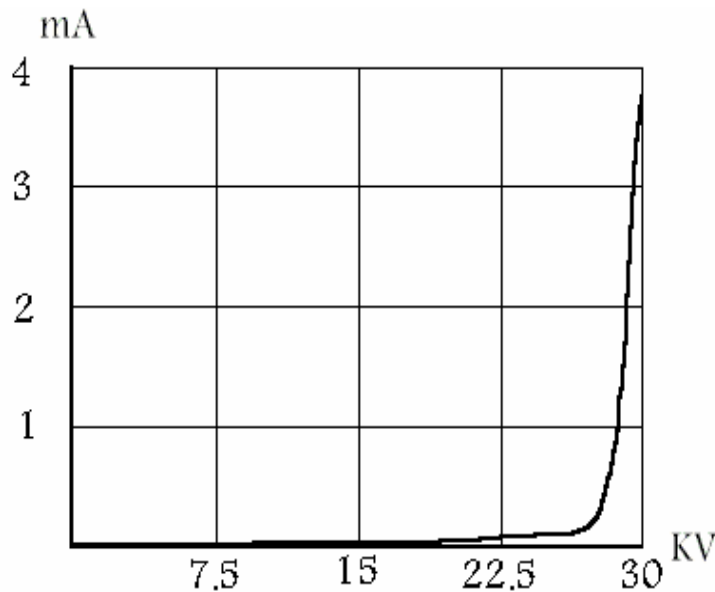


شکل(1)- مشخصه جریان بر حسب ولتاژ متناوب

با توجه به منحنی مشخصه فوق تا ولتاژ حدود 25 کیلو ولت برقیگیر دارای مقاومت نسبتا خطی می باشد و در نتیجه شکل موج جریان ، اعوجاجی نخواهد داشت لذا با توجه به سینوسی بودن شکل موج جریان میزان هارمونیک سوم نزدیک صفر می باشد اما از ولتاژهای 25 کیلو ولت به بالا وارد ناحیه غیر خطی خواهیم شد و میزان جریان هارمونیک سوم تغییرات شدیدی خواهد داشت. منحنی

شکل (2) نیز جریان هارمونیک سوم را نشان می دهد که توسط دستگاه تستر برقیگیر بدست آمده است. با استفاده از این دستگاه می توان میزان افت خاصیت عایقی برقیگیر را نشان داد که مطابق جدول (1) می باشد :

به ازای جریان نشتی کل 1840 میکرو آمپر می توان گفت برقیگیر کاملا کارایی خود را ازدست داده است زیرا این مقدار جریان نشتی بیش از حد استاندارد می باشد (جریان نشتی مجاز در ولتاژ نامی طبق استاندارد برق ایران کمتر از 1 میلی آمپر می باشد) لذا می توان گفت که برقیگیر صد در صد خاصیت عایقی خود را از دست داده است.



شکل (2)- مشخصه جریان هارمونیک سوم بر حسب ولتاژ متناوب

ولتاژ متناوب (kv)	12	14	16	18	20	22	24	26	27	28	29	30
جریان نشتی کل میکروآمپر	240	280	320	360	400	450	500	590	660	930	1840	4200
جریان هارمونیک سوم میکرو آمپر	13	15	17	19	24	28	40	70	110	300	1100	3600
در صد افت خاصیت عایقی	0	12	24	35	47	58	70	82	88	94	100	100

جدول (1) - نتایج اندازه گیری های جریان نشتی

با توجه به اینکه ولتاژ کار برقگیر ها در شبکه توزیع (فاز به زمین) حدود 12 کیلو ولت است در صدف عایقی سایر رنجهای جریان توسط دستگاه تستر برقگیر بصورت زیر محاسبه خواهد شد:

$(12 - 29) / (12 -)$ ضریب تبدیل جریان به ولتاژ \times جریان هارمونیک سوم = درصد افت خاصیت عایقی
ضریب تبدیل جریان به ولتاژ عدد متغیری است که با توجه به میزان جریان ، توسط دستگاه محاسبه می شود.

اصول طراحی مدار الکترونیکی

طراحی قسمت الکترونیک تستر برقگیر به روش آنالوگ و دیجیتال صورت گرفته است ، پس از طی مراحل آزمایش و تایید اولیه با استفاده از میکروکنترلر شرکت Atmel مداری طراحی شده که می تواند اثر فرکانسهای غیر 150 هرتز را شدیداً کاهش دهد. وجود نویز با هارمونیکهای مختلف ، میدانهای الکترواستاتیکی 20 کیلوولت ، خطاهای عملکردی ، طراحی دریک حجم کوچک و محدودیت توان منبع تغذیه باعث می شود قسمت الکترونیکی از ویژگی خاصی برخوردار باشد.

استفاده از میکروکنترلر باعث شده که حجم مدار الکترونیکی کاهش یابد و تمامی موارد مورد نیاز شامل حذف نویز ، تایمینگهای مختلف و... توسط نرم افزار انجام شود.

با استفاده از این مدار ابتدا سیگنال ورودی از سنسور را تقویت نموده و پس از تقویت اولیه با عبور از یک فیلتر میانگذر تمامی نویزهای سیگنال حذف و نهایتاً یک سیگنال 150 هرتز (هارمونیک سوم) برای کالیبره کردن آماده شده ، سپس توسط یک مبدل آنالوگ به دیجیتال سیگنال 150 هرتز به کدهای باینری تبدیل می شود و میکرو کنترلر نیز پس از محاسبه سطح زیر منحنی و داشتن پربود سیگنال ، مقدار مؤثر آن را محاسبه نموده پس از پردازش آماری ، با راه اندازی LCD آن را نمایش می دهد.

میدان مغناطیسی ایجاد شده توسط جریان نشتی برقگیر ولتاژی متناسب با جریان نشتی در دو سر سیم پیچها ایجاد می کند. قبل از اندازه گیری ولتاژ باید نویزهای زیادی که با این ولتاژ همراه است حذف شود لذا از نوعی تقویت کننده تفاضلی به عنوان پیش تقویت کننده (Pre-Amplifier) استفاده شده است. این نوع تقویت کننده تفاضلی دارای مشخصات بهبود یافته است که به نام تقویت کننده ابزار دقیق (Instrumentation Amplifier) مشهور است. در تقویت کننده های ابزار دقیق امپدانسهای ورودی مساوی ، بهره مد مشترک بسیار کم و بهره تفاضلی بسیار دقیق می باشد.

پس از تقویت اولیه سیگنال ، فیلتر میانگذر در حالت نمونه برداری از جریان نشتی هارمونیک سوم ، برای عبور هارمونیک سوم و حذف سایر هارمونیکها مورد استفاده قرار می گیرد. این فیلتر نویزهای فرکانس بالا را حذف کرده و در خروجی مدار یک سیگنال سینوسی با فرکانس 150 هرتز که متناسب با دامنه ورودی تغییر می کند نمایان می سازد. با توجه به اینکه لازم است فیلتر بصورت خطی عمل کند فرکانس مرکزی آن در برابر تغییرات دما ثابت باشد ، فیلتر نوع باترورث انتخاب شده است. فیلترهای آنالوگ بعلاوه استفاده از خازن و سلف در برابر تغییرات دما ناپایدار بوده و فرکانس مرکزی آن تغییر می کند. در این فیلتر تغییر ترانس المانها تاثیر ناچیزی در عملکرد فیلتر دارد و با استفاده از سه op-amp مربوط به آی سی TLO84 طراحی شده است که علاوه بر فیلترینگ تقویت مجدد سیگنال را نیز بعهده دارد .

در این مدار از یک مبدل آنالوگ به دیجیتال (AD0841) استفاده شده است. فرکانس نمونه برداری حدود 20 kHz انتخاب شده است که 133 نمونه در هر پریود حاصل آن می باشد. ولتاژ مرجع مبدل 5 ولت در نظر گرفته شده است که حداکثر ممکن می باشد تا تاثیر نویز روی اندازه گیری حداقل باشد. در این حالت هر پریود اندازه گیری حدود 20 میلی ولت است. فعال سازی A/D و شروع تبدیل آن توسط میکروکنترلر انجام می گیرد برای کنترل مبدل آنالوگ به دیجیتال و همچنین پردازش و انتقال اطلاعات به نمایشگر از سری جدید میکروکنترلرهای شرکت Atmel به شماره 89c2051 استفاده شده است.

میکروکنترلر از طریق پورت 1 اطلاعات دیجیتال A/D را خوانده و از طریق پورت 3 اعمال کنترلی روی A/D و LCD انجام می دهد. میکروکنترلر علاوه بر کارهای فوق ، کنترل ولتاژ تغذیه (جهت آلام Low Battery) و مدت زمان روشن بودن دستگاه (جهت Auto Power) را نیز بعهده دارد..

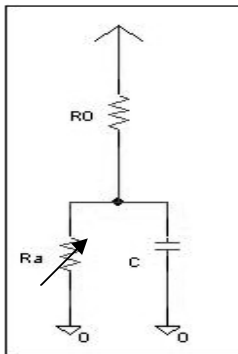
لزوم شبیه‌سازی رفتار برقی‌ها :

همانطور که در قسمتهای قبلی اشاره شد ، تغییرات زانوی منحنی برقی‌گیر در اثر مرور زمان و عوامل تاثیرگذار دیگر باعث ، عوض شدن رفتار برقی‌گیر خصوصاً در آستانه عملکردی آن می‌شود . بنابراین اگر برقی‌گیر معیوبی در شبکه توزیع باشد ، می‌توان با اندازه‌گیری هارمونیک سوم جریان نشستی به این مساله پی برد . اما در عمل تنها منحنیهای DC و AC رفتار برقی‌گیر در دست می‌باشد و تغییرات هارمونیک سوم محتاج تحلیل می‌باشد . بدین منظور به کمک شبیه‌سازی نرم‌افزاری و با توجه به منحنیهای

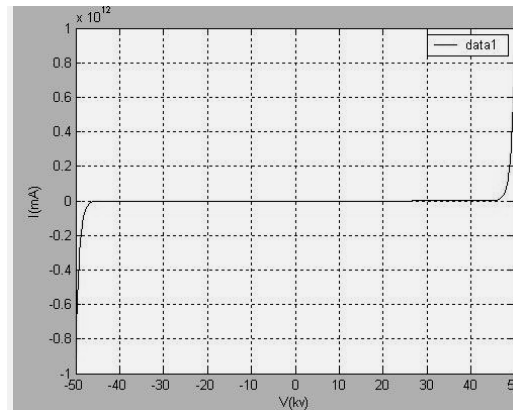
یادشده می‌توان طیف فرکانسی و هارمونیک سوم جریان را نشان داد و با اندازه‌گیری هارمونیک سوم جریان نشستی با وسیله ساخته شده و تطبیق آنها با نتایج شبیه‌سازی در ولتاژهای مختلف در مورد عملکرد برقی‌گیر اظهار نظر نمود .

نحوه شبیه‌سازی :

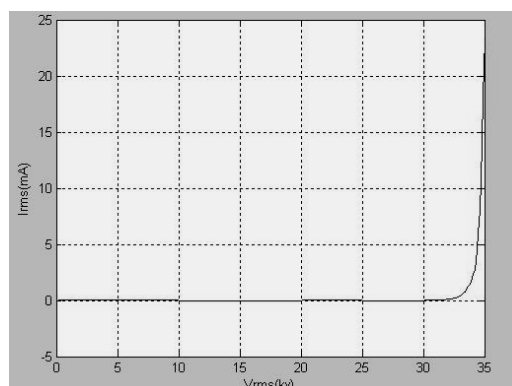
شکل (3) مدل مداری یک برقی‌گیر و دستگاه نمونه ساخته شده را نشان می‌دهد . همچنین شکل (4) و شکل (5) مبین رفتار AC و DC یک برقی‌گیر نمونه (REYCHEM Ur 26.2kv , In:10kA) است .



شکل (3): مدل برقی‌گیر و دستگاه ساخته شده



شکل (4) : منحنی DC ولتاژ-جریان



شکل (5) : منحنی AC ولتاژ-جریان

حال به کمک محاسبات ریاضی و نرم‌افزار Matlab تحلیلی درباره رفتار Arrester بدست می‌آوریم . با توجه به مدل مداری ، امپدانس برقی برابر است با :

$$\begin{cases} Z_{DC} = R_0 + R_a = R_{DC} = \frac{V_{DC}}{I_{DC}} \\ Z_{AC} = R_0 + R_a / (1 + jR_a C \omega) , R_a = R(V) \end{cases}$$

نکته قابل توجه اینکه در محاسبات رفتاری برقی منحنی DC از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است زیرا این منحنی رفتار مهمترین المان مدل (مقاومت متغیر) ، که تابع ولتاژ می‌باشد را بدست می‌دهد . حال به کمک قسمت خطی منحنی AC مقدار خازن را بدست می‌آوریم . برای این منظور از ولتاژهای کمتر به عنوان مثال $V_{rms} = 10kv$ و $I = 200\mu A$ استفاده شده است تا دقت بیشتری داشته باشیم . در این ولتاژ تقریباً $R(V)$ را می‌توان بینهایت فرض کرد . همچنین مقدار نوعی R ، حدود 10Ω است که ناشی از مقاومت اهمی اتصالات می‌باشد در نتیجه :

$$\begin{cases} V = 10kv \\ I = 200\mu A \\ R(V) \rightarrow \infty \\ Z_{AC} = R_0 + 1/jC\omega , |Z_{AC}| = |V/I| = 50MEG \Omega \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} |Z_{AC}|^2 = R_0^2 + 1/C^2 \omega^2 = 25 * 10^{14} \Omega \\ \omega = 100\pi \\ R_0^2 \ll |Z_{AC}|^2 \end{cases}$$

پس :

$$C \sim 60pf$$

قابل توجه اینکه مقدار خازن بدست آمده در امپدانس برقی در ولتاژهای کوچکتر مؤثر می‌باشد . گام بعدی محاسبه $R(V)$ با توجه به منحنی خواهد بود . با در نظر گرفتن چند نقطه از نمودار DC ، منحنی DC را می‌توان درونیایی نمود و تابع Z بر حسب V را بدست آورد . با عنایت به تغییرات بسیار شدید منحنی در قسمت زانویی آن نوع درونیایی Spline و درجه آن 60 در نظر گرفته می‌شود . درونیایی از مراتب کمتر باعث عدم تطبیق منحنی حاصل با واقعیت خواهد شد ضمن اینکه استفاده از درجات بالاتر در شبیه سازی روی منحنی و خصوصاً در زانوی آن اعوجاج زیادی ایجاد می‌کند . پس از محاسبه تابع $R(V)$ به کمک چند جمله‌ای بدست آمده از دستور Polyfit ، می‌توان به صورت زیر Z_{AC} را محاسبه نمود :

$$\begin{cases} Z_{AC}^{\Omega}(V) = 10 + R(V) * 10^6 / (1 + j R(V) C \omega * 10^6) \\ Z_{AC}^{-\Omega}(V) = a_1 V^{60} + a_2 V^{59} + \dots + a_3 V^{56} \end{cases} \quad \text{و} :$$

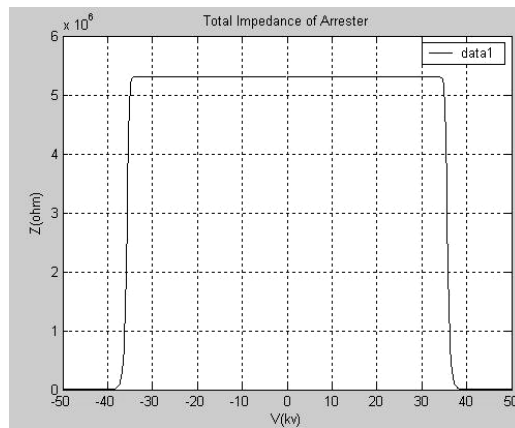
$$A = [5.7085e-081 \quad 8.1213e-079 \quad 4.334e-077 \quad 1.0282e-075 \quad 9.1506e-075]$$

$$Z_{AC}^{\Omega}(V) = b_1 V^{60} + b_2 V^{59} + \dots + b_3 V^{56}$$

$$B = [5.7085e-081 \quad -8.1213e-079 \quad 4.334e-077 \quad -1.0282e-075 \quad 9.1506e-075]$$

$$V: kv$$

بنابراین $|Z_{AC}(V)|$ را که تابع ولتاژ است می‌توان به دست آورد. شکل (6) تغییرات اندازه امپدانس برقی را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل نیز مشخص است قسمت خطی منحنی I-V یک امپدانس تقریباً ثابت که ناشی از وجود خازن می‌باشد ایجاد نموده است. دو قسمت دیگر منحنی، نتیجه شاخکهای غیرخطی منحنی DC می‌باشد (عمدتاً در نمودارها تنها قسمت ولتاژ- مثبت نمایش داده می‌شود اما در اینجا برای روشنتر بودن موضوع و با توجه به دو طرفه بودن برقیها قسمت منفی نیز نمایش داده شده است).

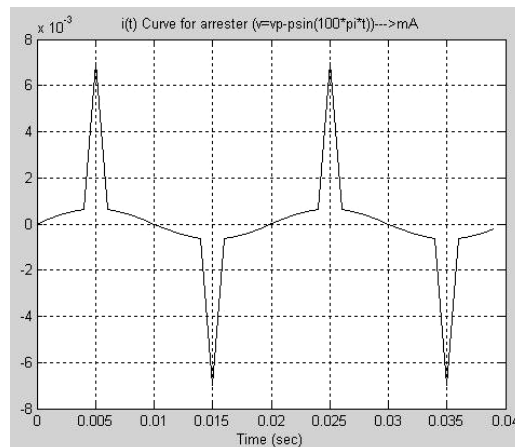


شکل (6): تغییرات امپدانس برقی برای هر ولتاژ اعمالی

تا این قسمت منحنی امپدانس برای هر ولتاژ اعمالی بدست آمده است در صورتی که منحنی AC (شکل (5)) برای مقدار مؤثر ولتاژ بوده و قابلیت اعمال منحنی ولتاژ-زمان برای بدست آوردن منحنی جریان-زمان و نهایتاً تبدیل فوریه را نداشت. در مرحله بعد به کمک نرم‌افزار، پس از محاسبه تابع سه ضابطه‌ای $|Z_{AC}(V)|$ ، نهایتاً جریان را به صورت تابعی از زمان خواهیم داشت:

$$|i_{AC}| = \left| \frac{V}{Z_{ac}(v)} \right| * 10^3 \text{ A}$$

$$V(t) = V_a \sin(100 \Pi t)$$



شکل (7) : منحنی جریان (A) - زمان (sec) بازای ولتاژ متناوب 50HZ

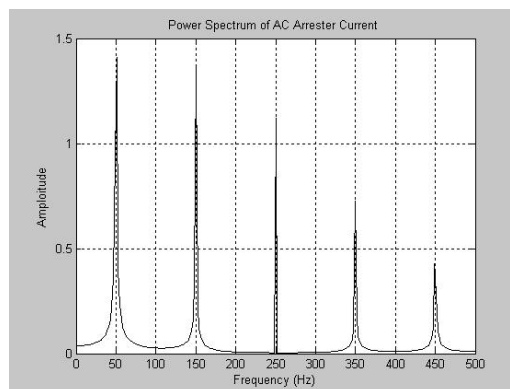
```

t=0;
while t(i)<=0.6
    v(i)=36*sin(100*pi*t(i));
    if v(i)<-34
        itot1(i)=v(i)/(polyval(A,v(i)));
    end
    if v(i)>34
        itot1(i)=v(i)/(polyval(B,v(i)));
    end
    if v(i)>=34 && v(i)<=34
        itot1(i)=v(i)/(5.2325*10e6);
    end
    t(i+1)=t(i)+0.001;
    i=i+1;
end
ifft=fft(itot1*1000,512);

```

شکل (7) جریان برقگیر را بر حسب زمان به تصویر کشیده است. توجه به این نکته ضروری است که با تغییر زانوی منحنی، زمان هدایت برقگیر و قله جریان تغییر خواهد نمود. گام آخر تحلیل فرکانسی این جریان خواهد بود که این امر نیز در شکل (8) به تصویر کشیده شده است. این طیف فرکانسی بازای $V_{rms}=30kV$ بدست آمده است. همانطور که در شکل هم مشخص است، هارمونیک سوم بسیار به فرکانس اصلی نزدیک شده است که ناشی از عملکرد برقگیر در ناحیه غیرخطی است. بقیه هارمونیکها درصد قابل توجهی از هارمونیک اصلی را به خود اختصاص نمی دهند.

در این شکل تقریباً جریان هارمونیک سوم 90% مؤلفه اصلی است که با نتایج عملی منطبق می باشد. بنابراین اگر منحنیهای AC و DC برقگیر مورد نظر در دسترس باشد، بازای یک ولتاژ در ناحیه غیرخطی (خصوصاً زانوی منحنی) می توان درصد جریان هارمونیک سوم را با روش ارائه شده در این مقاله محاسبه نمود و در صورت تطبیق مقادیر عملی با آن، از سلامت برقگیر (یا اگر از سالم بودن برقگیر مطمئن هستیم، از صحت عملکرد دستگاه اندازه گیری) اطمینان حاصل نمود.



شکل (8) : طیف فرکانسی جریان برقگیر

نتیجه گیری

با توجه به اینکه در اکثر موارد برقگیر سالم و معیوب از لحاظ ظاهری هیچ تفاوتی ندارند، لذا نیاز به دستگاهی است که برقگیر در حالت سرویس در شبکه را تست نموده و در صدف خاصیت عایقی آن را مشخص کرده برای این منظور از دستگاه تستر برقگیر استفاده می شود. بنابراین این دستگاه با توجه به خاصیت غیر خطی مقاومت برقگیر و با اندازه گیری جریان نشتی هارمونیک سوم پس از تطبیق این جریان با نتایج شبیه سازی در صدف خاصیت عایقی برقگیر را مشخص می نماید.

مراجع

[1] H.Duffy, P.Larsson, J.Mackevich, G. Wiseman, 'North American Experience With Distribution Surge Arresters', Annual Conference of the Electricity Supply engineers Australia, 1989.

[2] J.Mackevich, 'Evaluation Of polymer Distribution Surge Arresters'; 57Conference of the Northeast Underground Committee Surge Arrester.

[3] IEC 60099-4, Metal Oxide Surge Arresters Without Gaps For AC Systems, 1991.