



## بررسی تاثیر محیط هارمونیک بر عملکرد تجهیزات در شبکه توزیع

فرامرزی سپری  
محمود رضاحقی فام  
هادی یوسفی  
Fa\_Separi@Yahoo.Com  
mr\_haghifam@Yahoo.Com  
h\_yousefi\_y@yahoo.com  
شرکت توزیع نیروی برق مازندران  
استاددانشگاه تربیت مدرس  
شرکت توزیع نیروی برق مازندران  
کلمات کلیدی: "اثرات هارمونیک، کیفیت توان، تلفات هارمونیک، پخش بار هارمونیک"

### چکیده

با استفاده روزافزون از تجهیزات مبتنی بر مبدل‌های الکترونیکی، شبکه‌های توزیع با افزایش هارمونیک روبرو هستند. افزایش هارمونیک‌های جریان و ولتاژ در شبکه‌های توزیع موجب افزایش تلفات، عدم عملکرد رله‌ها و خطای دستگاه‌های اندازه‌گیری می‌شود. در این مقاله ارزیابی اثرات محیط هارمونیک بر عملکرد سیستم‌های اندازه‌گیری، ترانسها، رله‌ها، تلفات شبکه پرداخته خواهد شد. مطالعات عددی با اندازه‌گیری هارمونیک و شبیه‌سازی یک فیدر واقعی در محیط نرم‌افزار (ETAP) انجام می‌گیرد.

### ۱- مقدمه

اعوجاج شکل موج در حالت مانا عبارتست از انحراف از یک موج سینوسی در فرکانس نامی که توسط محتوای طیفی آن موج مشخص می‌گردد. پنج نوع اعوجاج در شکل موج را می‌توان شرح ذیل تشخیص داد:

- افسست DC
- نویز
- شکاف
- میان هارمونیک
- هارمونیک

هارمونیکها ولتاژها و جریانهای سینوسی هستند که دارای فرکانسهایی با مضرب عددی صحیح از فرکانس اصلی شبکه می‌باشند که با مولفه اصلی ولتاژ یا جریان ترکیب شده، و موجب اعوجاج در شکل موج می‌گردند. با افزایش تجهیزات مبتنی بر مبدل‌های الکترونیکی، شبکه‌های برق با افزایش هارمونیک روبرو هستند. با توجه به اینکه مبدا ایجاد این هارمونیکها عمدتاً در شبکه‌های توزیع قرار دارند، این شبکه‌ها در معرض اثرات هارمونیکها می‌باشند. با افزایش هارمونیکها تلفات در فیدرها و ترانسفورماتورها افزایش می‌یابد و نیز در شکل موج ولتاژ در سر مصرف کننده‌ها تغییر حاصل خواهد شد. عدم شناخت واقعی اثرات هارمونیک با توجه به افزایش روزافزون هارمونیک در شبکه‌های توزیع بهره برداری و امنیت شبکه را به خطری اندازد. یکی از معیارهای ارزیابی تاثیر هارمونیک مقدار THD است. هرچند ایراداتی از قبیل عدم وزن دهی معیار فوق مطرح است ولی بدلیل اینکه اطلاعات فوق از طریق اندازه‌گیری در دسترس می‌باشد مورد نظر محققین می‌باشد [۱]. طبق بررسیهای انجام شده

تخمین زده می‌شود که در آینده بسیار نزدیک بیش از ۵۰٪ از بارهای الکتریکی در اروپا و آمریکا به نوعی دارای تکنولوژی الکترونیک قدرت باشند [۳]. لذا با توجه به پیشرفت تکنولوژی ولزوم افزایش بارهای غیر خطی در شبکه توزیع ایران، در این مقاله سعی گردید پس از بررسی تاثیر سیستمی هارمونیک بر شبکه‌های توزیع از قبیل تلفات هارمونیک، عملکرد ترانسهای توزیع، رله‌ها و کنتورها با شبیه‌سازی یک فیدر واقعی ۲۰ کیلوولت موضوع مورد بررسی قرار گرفت.

### ۲- تلفات هارمونیک در شبکه‌های توزیع

فرض می‌کنیم یک جریان هارمونیک از یک شبکه توزیع سه فازه مدل شده عبور نماید برای یک شبکه  $n$  شینه، تلفات اکتیو ( $P_L$ ) برای هر مرتبه هارمونیک بیان می‌شود برابر با مجموع تلفات اکتیو تزریقی است.

$$P_L = \sum_{n=1}^n P_n \quad (1)$$

$P_n$  تلفات اکتیو تزریقی به شینه  $n$  ام از رابطه (۳) محاسبه می‌شود.

$$P_n = \text{Re} \left[ \sqrt{3} V_n e^{j\theta_n} \left( I_n e^{j\theta_n} \right)^* \right] \quad (2)$$

$$P_n = \sqrt{3} V_n I_n \cos(\theta_{vn} - \theta_{in}) \quad (3)$$

معادله (۳) نشان می‌دهد اطلاعاتی درباره دامنه و فاز جریان و ولتاژ هارمونیک منبع تغذیه و بار هر باس برای محاسبه تلفات اکتیو با هر مرتبه هارمونیک مورد نیاز می‌باشد. بطور کلی تلفات اکتیو از رابطه (۴) بدست می‌آید.

$$P_L = R I_{rms}^2 = R \left[ \sum_{n=1}^{n_{max}} I_n \right]^2 = R I^2 + R \sum_{n=1}^{n_{max}} I_n^2 \quad (4)$$

$R I^2$  مربوط به تلفات اکتیو هارمونیک اصلی می‌باشد و  $P_L^{FND}$  و  $R \sum_{n=2}^{n_{max}} I_n^2$  تلفات هارمونیک اکتیو می‌باشد.

با لحاظ نمودن اثر پوستی، معادله (۵) شرح ذیل تغییر می کند. اگر اثر پوستی را  $X_h$  بنامیم داریم:

$$R_h = R \cdot X_h \quad (10)$$

با قراردادن رابطه (۱۰) در معادله (۵) خواهیم داشت:

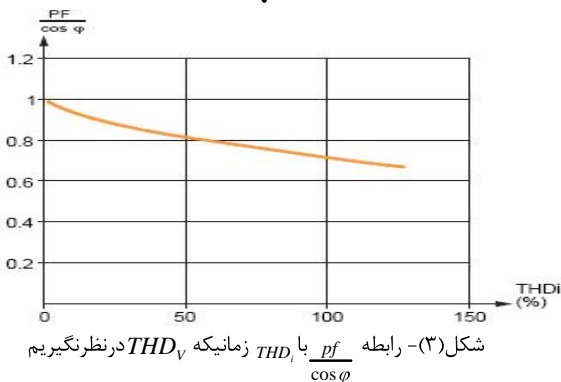
$$\frac{P_L^H}{P_L^{FND}} = \frac{\sum_{n=1}^{n_{\max}} R_h (I_n)^2}{R \cdot I_1^2} = \frac{R \sum_{n=1}^{n_{\max}} X_h \cdot I_n^2}{R I_1^2} = \left(1 + THD^2\right) \sum_{n=1}^{n_{\max}} X_h \quad (11)$$

رابطه فوق نشان می دهد که بادر نظر گرفتن اثر پوستی تلفات هارمونیکی افزایش می یابد.

### ۳- محاسبه ضریب قدرت در محیط هارمونیکی

یکی از موضوعات مهم در شبکه توزیع بحث ضریب قدرت برای مشترکین می باشد که بر اساس آن برای مشترکینی که ضریب قدرت آنها پایین می باشد ضریب زیان تعلق می گیرد تا بر اساس آن مشترکین با نصب خازن به اصلاح ضریب قدرت در شبکه بپردازند. با کمک گرفتن از معادله (۸) رابطه بین ضریب قدرت بر حسب  $THD$  طبق فرمول (۱۲) ارائه می گردد. شکل (۳) بیان می کند که با افزایش هارمونیک ضریب قدرت کمتر از یک می شود.

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{I_1 U_1 \cos \phi_1}{U_1 I_h} = \frac{\cos \phi_1}{\sqrt{1 + THD^2}} \quad (12)$$



$$\frac{P_L^H}{P_L^{FND}} = \frac{R \sum_{n=1}^{n_{\max}} (I_n)^2}{R \cdot I_1^2} = \frac{\sum_{n=1}^{n_{\max}} I_n^2}{I_1^2} \quad (5)$$

در یک محیط هارمونیکی رابطه بین جریان هارمونیکی و جریان فرکانس اصلی مطابق رابطه (۷) می باشد.

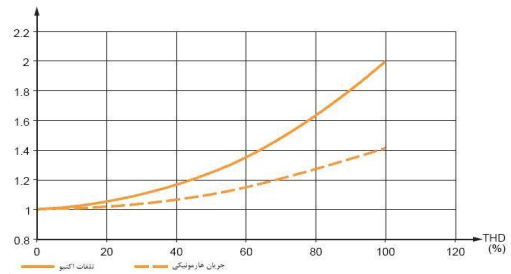
$$THD = \sqrt{\left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2} - 1 \quad (6)$$

$$I_h = I_1 \sqrt{1 + THD^2} \quad (7)$$

با جایگزینی معادله (۷) در (۵) رابطه بین تلفات اکتیو اصلی و تلفات هارمونیکی بصورت ذیل ارائه می گردد.

$$\frac{P_L^H}{P_L^{FND}} = 1 + THD^2 \quad (8)$$

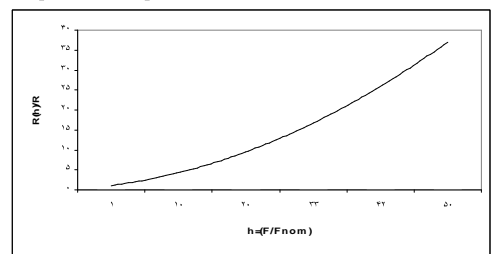
به عبارت دیگر هر چه  $THD$  بیشتر باشد تلفات در حالت تغذیه هارمونیکی نسبت به تلفات با موج سینوسی خالص بیشتر خواهد شد. تلفات توان اکتیو متناسب با جریان اصلی می باشد. لذا در حالتی که جریان هارمونیکی از باری کشیده شود، مقدار جریان و ولتاژ هارمونیکی از حالت اصلی بیشتر می شود. شکل (۱) نشان می دهد با افزایش  $THD$  مقدار جریان هارمونیکی و تلفات اکتیو افزایش می یابد.



### ۱-۲ اثر پوستی

اثر پوستی باعث توزیع غیر یکنواخت جریان در داخل هادی می گردد بطوریکه چگالی جریان در پوسته خارجی هادی بیشتر می گردد. این پدیده شار داخل هادی را کاهش داده و در مقایسه با حالتی که چگالی جریان داخل هادی یکنواخت می باشد (یعنی در حالت جریان  $dc$ ) مقاومت افزایش میابد. لذا با تغییر هارمونیکها مقدار مقاومت بدلیل اثر پوستی تغییر می یابد. برای مدلسازی اثر پوستی باید مقاومت با رابطه مشخصی نسبت به افزایش فرکانس عکس العمل نشان دهد. در مرجع [۵] مدل‌های مختلف این موضوع اشاره شده است که در این مقاله از رابطه (۹) که برگرفته از استاندارد  $IEEE Std 399$  است برای محاسبه اثر پوستی استفاده گردید

$$R(h) = R \left[ 1 + 0.1 \cdot h^{1.5} \right] \quad (9)$$



شکل (۲) - ارتباط تاثیر فرکانس بر اثرات پوستی مقاومت

### ۴- تاثیر هارمونیک بر تلفات و عملکرد خازن

هارمونیک ولتاژ باعث می شود تا خازن با جریان و ولتاژی که متناسب با فرکانس هارمونیک می باشد تحریک شود و این جریان سبب تلفات می شود. استاندارد  $IEC 60831$  اعلام می کند که جریان هارمونیکی عبوری از خازن نباید بیشتر از  $(1.2 I_n)$  جریان نامی باشد. لذا در این صورت بایستی خازن با ظرفیت بالاتر نصب گردد [۶]. خازنها مولد هارمونیک نیستند ولی بکارگیری خازن در شبکه هایی که دارای هارمونیک جریان یا ولتاژ است موجب بروز تشدید در شبکه برق میشود. راکتانس خازنی با افزایش فرکانس کاهش و راکتانس سلفی با افزایش فرکانس افزایش می یابد. در نتیجه در فرکانس خاصی تشدید رخ می دهد. هنگام بروز پدیده تشدید (مدار سری یا موازی  $LC$ ) دامنه جریان سلف یا ولتاژ دو سر خازن ممکن است بسیار زیاد شود. استفاده از خازن در شبکه های توزیع عموماً برای تصحیح ضریب قدرت و پایداری ولتاژ می باشد و هر دو نوع اتصال سری یا موازی خازن ها یا ترکیبی از آنها ممکن است موجود باشد. در مورد مدار سری، در فرکانس رزونانس، امپدانس کل شبکه به امیدانس مقاومت موجود در مدار کاهش می یابد و در صورت کوچک بودن این مولفه مقاومتی جریانهای بسیار زیادی از مدار عبور می کند. در مدارهای موازی، فرکانس رزونانس امیدانس کل شبکه بسیار زیاد است در نتیجه (ناشی از یک تحریک بسیار کوچک) جریان چرخشی زیادی بین سلف و خازن عبور نموده و ولتاژ دو سر

جدول (۳)- مشخصات ترانس (۲۰۰ KVA) و بار هارمونیک

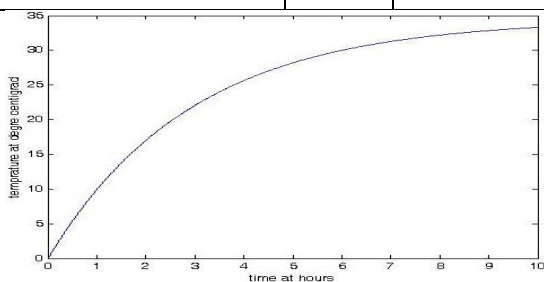
شرح موارد	بار خطی	بار غیر خطی
KVA قدرت نامی ترانس	۲۰۰	۲۰۰
ضریب قدرت بار	۱	۰/۸۴
(KW) بار متصل به ثانویه	۱۶۰	۱۶۰
مقاومت معادل (اهم)	۰/۰۸۲۳	۰/۰۸۲۳
وزن هسته Kg	۲۷۲	۲۷۲
وزن مس Kg	۱۵۹	۱۵۹
وزن تانک Kg	۲۰۰	۲۰۰
وزن روغن Kg	۲۱۵	۲۱۵
نوع سیستم خنک کنندگی	ONAN	ONAN

جدول (۴)- مقدار بار هارمونیک برای مقایسه

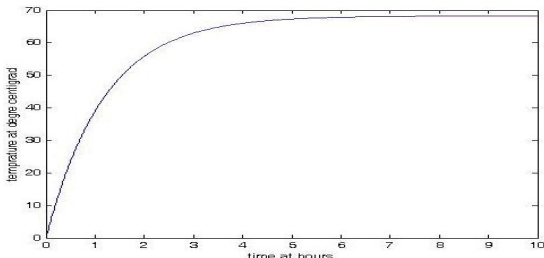
شرح موارد	بار خطی	بار غیر خطی
درصد هارمونیک سوم	۰	۵۸
درصد هارمونیک پنجم	۰	۳۰
درصد هارمونیک هفتم	۰	۲۰
درصد هارمونیک نهم	۰	۱۰
درصد هارمونیک یازدهم	۰	۷
درصد هارمونیک سیزدهم	۰	۳
درصد هارمونیک پانزدهم	۰	۲

جدول (۵)- نتایج حاصل از شبیه سازی

شرح موارد	بار خطی	بار غیر خطی
KVA ظرفیت مورد استفاده	۲۰۰	۱۹۴/۲۵۰
(KW) تلفات کل	۲/۸۴۳	۹/۰۱۵
حداکثر افزایش دمای روغن	۳۳/۳۱	۶۸/۲۵
(A) جریان مؤثر ثانویه	۱	۱/۲۱۷۶
راندمان ترانسفورماتور	۹۸/۲۵	۹۴/۶۶



شکل (۴)- منحنی تغییرات دمای روغن ترانس بر حسب زمان برای بار خطی



شکل (۵)- منحنی تغییرات دمای روغن ترانس بر حسب زمان برای بار غیر خطی

شبکه بسیار زیاد می شود. لذا در صورتیکه فرکانس رزونانس شبکه به یکی از هارمونیکهای ایجاد شده در مدار نزدیک باشد، جریان ها یا ولتاژهای بسیار بزرگی در شبکه هارمونیک دار تولید می شود، که چنین پدیده ای موجب خرابی بانک خازنی، عملکرد ناصحیح و مکرر فیوزهای خازن و شکست عایقی در کابلها شود. در بخش شبیه سازی تاثیرات خازن مطالعه می شود.

### ۵- تاثیر هارمونیک بر عملکرد ترانس

جریان هارمونیک سبب افزایش تلفات مسی و گردابی می شود و لذا هارمونیک سبب افزایش تلفات هیستریزس می شود. به عبارت دیگر تلفات در سیم پیچ متناسب با توان دوم  $THD_i$  است ولی تلفات هسته رابطه خطی با  $THD_v$  دارد. تاثیرات هارمونیک بر تلفات ترانس توسط رابطه (۱۳) بیان می شود.

$$P_n = \sum_n I_n^2 R_n + P_{fe} \sum_n \left( \frac{V_n}{V_1} \right)^2 \frac{1}{n^{2.6}} \quad (13)$$

$R_n$  = مقاومت سیم مسی در فرکانس نام  
 $P_{fe}$  = تلفات آهن در فرکانس اصلی

برای فرکانسهای مختلف  $R_n$  از معادله (۱۴) بدست می آید [۲].

$$R_n = R_1 (c_0 + c_1 n^b + c_2 n^2) \quad (14)$$

جدول (۱)- مقدار تقریبی برای مفروضات معادله (۱۴)

	$c_0$	$c_1$	$c_2$	$b$
توزیع	۰/۹-۰/۸۵	۰/۰۸-۰/۰۵	۰/۰۸-۰/۰۵	۱/۴-۰/۹
انتقال	۰/۸-۰/۷۵	۰/۱۳-۰/۱	۰/۱۳-۰/۱	۱/۴-۰/۹
	$c_0 + c_1 + c_2 = 1$			

معادله ساده شده (۱۵) تلفات در ترانس را نشان می دهد:

$$P_n \approx \left( \frac{R_h}{R_1} \right) THD_I^2 P_{cu} + \left( \frac{1}{h_v^{2.6}} \right) (THD_v)^{m/2} P_{fe} \quad (15)$$

برای راحتی محاسبات مقادیری بشرح جدول (۲) منتج از اندازه گیری پیشنهادی گردید [۲].

جدول (۲)- مقدار تقریبی ضرایب منتج از اندازه گیری

ترانسفورماتور	$THD_I$	$THD_v$	$R_\Delta$	$R_V$
توزیع	٪۱۱	٪۵	۳R۱	۴/۷R۱
قدرت	٪۷	٪۴	۴/۴R۱	۷/۶R۱

روابط و فرمولهایی در خصوص بدست آوردن تلفات هارمونیک و تاثیرات هارمونیک در مرجع [۲] ارائه شده است که نتایج تحت عنوان برنامه شبیه سازی توسط نرم افزار (matlab) نوشته شد. برای نمونه جهت مقایسه تاثیر هارمونیکها، ترانس ۲۰۰ KVA با سطح ولتاژ ۲۰ KV/۴۰۰ V مطابق جدول (۳) در نظر گرفته و نتایج شبیه سازی مطابق جدول (۴) ارائه می گردد. با توجه به اینکه ضریب قدرت بارهای غیر خطی پایین می باشد در این مقایسه ضریب قدرت ۰/۸۴ فرض گردید.

نتایج جداول وشکل‌های (۵۰۴) مبین آن است که هارمونیک‌ها سبب افزایش تلفات، کاهش راندمان، افزایش درجه حرارت روغن، کاهش بارگیری موثر ترانس می‌شود.

۶- تاثیر هارمونیک بر رله های الکترومغناطیسی  
رله های الکترومغناطیسی که با استفاده از گشتاور ناشی از فلو به حفاظت تجهیزات می پردازند از معادله گشتاور میسون بصورت شکل ذیل تبعیت می کند که با محاسبه مقادیر  $k_1$  تا  $k_4$  عملکرد رله تنظیم می گردد [۱].  
$$T = K_1 I^2 + K_2 V^2 + K_3 V \cos(\theta - \tau) + K_4$$
 (۱۶)

۶-۱- بررسی عملکرد رله های الکترومغناطیسی  
نیروی الکترومغناطیسی که سبب تحریک رله می شود متناسب با مربع شار موجود در فاصله هوایی می باشد. در صورت صرف نظر از اشباع، کل نیرو عملکردی بشرح ذیل خواهد بود.  $(k_2)$  مقدار ثابتی است که برای مهار استفاده می شود. با حل معادله تعادل (گشتاور=صفر) نقطه تحریک جریان بدست می آید.

$$T = K_1 I^2 - K_2$$
 (۱۷)

$$I_{PU} = \sqrt{\frac{K_2}{K_1}} = \text{const} \tan t$$
 (۱۸)

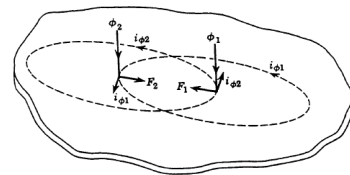
در محیط هارمونیکی نقطه تحریک جریان طبق رابطه ذیل بدست می آید.

$$T = K_1 (I_1 + \sum_{n=2}^{n=h_{\max}} I_n)^2 - K_2$$
 (۱۹)

۶-۲- تاثیر هارمونیک بر عملکرد رله های اضافه جریان  
رله های اضافه جریان مانند رله اضافه ولتاژ از نمونه های رله های القایی بوده که از مدل اصلاح شده گشتاور میسون تبعیت می کند بنابراین رله نیاز به گشتاور مثبت جهت عملکرد دارد. ایجاد نیرو در رله های دیسکی الکترومکانیکی گشتاور متحرک در دیسک ایجاد میکند. در دو زمان متغیر فلوهای ایجاد شده در فرکانس یکسان با اختلاف فاز  $\theta$  بصورت عبارت (۲۰، ۲۱) ارائه می گردد که مطابق شکل (۶) بر دیسک اعمال می گردد.

$$\phi^1 = \phi_m^1 \sin(\omega t)$$
 (۲۰)

$$\phi^2 = \phi_m^2 \sin(\omega t + \theta)$$
 (۲۱)



شکل (۶)-گشتاور تولیدی در رله های الکترومغناطیسی  
هر فلو سبب القای ولتاژ در اطراف خود می گردد و گردش جریان در رتور چرخان تحت تاثیر دو ولتاژ می باشد فلو ایجاد شده توسط جریان در برابر گردش جریانهای دیگر عکس العمل نشان میدهد موجب عملکرد نامناسب می شود که سبب عملکرد دیسک می شود. با عنایت به اینکه جریان دیسک اندوکتانس خودی ناچیز تولید می کند، جریان و ولتاژ را هم فاز در نظر می گیریم. نیرو مکانیکی در جهت خلاف فلو بین هم به وجود می آورد که نیرو وارد بر دیسک بصورت اختلاف دو نیرو بصورت رابطه (۲۲) بدست می آید [۳].

$$F \propto \phi^1_M \phi^2_M \sin(\theta)$$
 (۲۲)

اختلاف فاز شیفت ( $\theta$ ) فلوی سبب ایجاد نیرو می کند. موارد بالا در حالت فرکانس اصلی بدست آمده است لذا در صورت وجود هارمونیک فلوی ایجاد شده ناشی از بارهای غیرخطی در فرکانسهای مختلف که با اختلاف فاز  $\theta$  بصورت عبارت (۲۳ و ۲۴) ارائه می گردد. (با توجه به اینکه جریان عبوری از رتور اندوکتانس خودی ناچیز تولید می کند، جریان و ولتاژ را هم فاز در نظر می گیریم)

$$\phi^1 = \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \phi^1_{mh} \sin(h\omega t)$$
 (۲۳)

$$\phi^2 = \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \phi^2_{mh} \sin(h\omega t + h\theta)$$
 (۲۴)

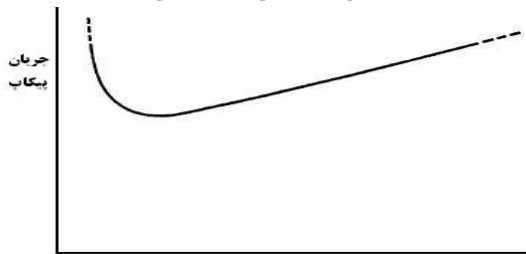
$$i_{\phi^1} \propto \frac{d\phi^1}{dt} \propto \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} h\omega \cdot \phi^1_{mh} \cos(h\omega t)$$
 (۲۵)

$$i_{\phi^2} \propto \frac{d\phi^2}{dt} \propto \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} h\omega \cdot \phi^2_{mh} \cos(h\omega t + h\theta)$$
 (۲۶)

$$F = F_1 - F_2 \propto (\phi^2_{\phi^1} \cdot i_{\phi^1} - \phi^1_{\phi^2} \cdot i_{\phi^2})$$
 (۲۷)

نتیجه نیرو متناسب با ضرب دو سری بدست می آید که عملاً نشان می دهد نیروی وارد بر دیسک تغییر می کند. [۷]

۶-۳- تاثیر فرکانس بر نقطه تحریک رله های القایی  
در فرکانس نامی نقطه تحریک رله عمل نمی کند. اگر از تغییرات جزئی و تصادفی فرکانس در شبکه صرف نظر کنیم با تغییر فرکانس نقطه تحریک و مشخصات زمانی رله تغییر می کند. این مسئله در زمان تست مهم می باشد که جریان تست سینوسی خالص باشد لذا در غیر این صورت نتایج نادرستی بدست می آید [۳].



شکل (۷)- تاثیر فرکانس بر نقطه تحریک

۷- شبیه سازی عملکرد کنترل در محیط هارمونیکی  
برای بررسی تاثیر هارمونیک بر کنترلرها از روش تحلیل مدل ریاضی استفاده شده است تا بتوان عملکرد آن را برای ولتاژ و جریان غیر سینوسی شبیه سازی کرد.

۷-۱- تعیین مدل ریاضی  
با برخی مفروضات مناسب و ساده، مدل ریاضی کنترل بصورت ذیل می باشد [۹].

$$S = \frac{\sum_{k=1,3,5} k\omega c_k \tau_k \phi''_{vk} \phi''_{ik} \sin(\beta_{vk} - \beta_{ik})}{k_1 + \sum_{k=1,3,5} c_k \tau_k (k'_v \phi''_{vk} + k'_i \phi''_{ik})}$$
 (۲۸)

درصد خطا از رابطه ذیل بدست می آید.

$$\% \text{خطا} = \frac{(s - s_0)}{s_0} \times 100$$
 (۲۹)

<sup>۱</sup> mason

<sup>۲</sup> Pick up

که  $S$  سرعت دیسک براساس رابطه (۲۸) و  $\omega_0$  سرعت دیسک در فرکانس مبنای ( $\omega_0$  فرکانس اصلی) می باشد.

۷-۲- پاسخ کنتور به ورودیهای هارمونیک  
فرض کنیم جریان و ولتاژ ورودی به کنتور علاوه بر فرکانس اصلی شامل هارمونیک مرتبه  $h$  ام باشند. یعنی:

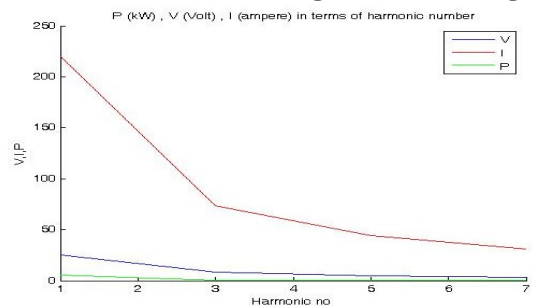
$$v = v \cos \omega_0 t + v_h \cos(h\omega_0 t - \gamma_v) \quad (30)$$

$$i = I \cos(\omega_0 t - \theta) + I_h \cos(h\omega_0 t - \gamma_i) \quad (31)$$

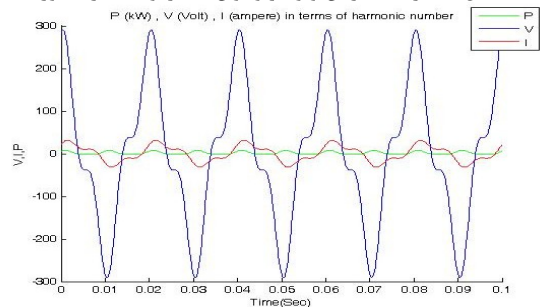
توان متوسط که توسط کنتور باید ثبت کند بصورت ذیل محاسبه می شود:

$$P = \frac{\omega}{2\pi} \int v.i dt = \frac{VI}{2} \cos \theta + \frac{v_h I_h}{2} \cos(\gamma_v - \gamma_i) \quad (32)$$

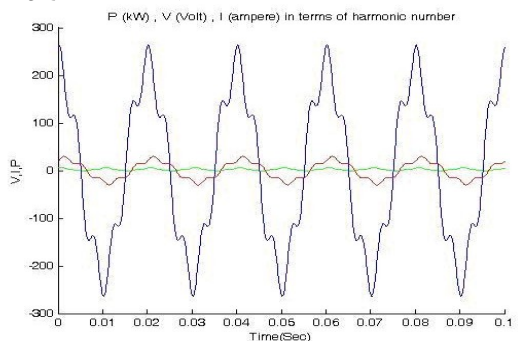
در صورتیکه ورودیهای ولتاژ و جریان شامل هارمونیک باشند. معمولا اندازه هارمونیک  $h$  ام ولتاژ و جریان، بیش از  $\left(\frac{1}{h}\right)$  برابر مولفه اصلی نیست لذا در نظر گرفتن هارمونیک ۳ و ۵ و ۷ کافی است [۱۰] جهت بررسی تاثیر هارمونیک به شبیه سازی مسئله می پردازیم. در این حالت  $v = 220(V)$ ,  $I = 25(A)$  فرض می شود. مطابق شکل (۸) ملاحظه می شود با افزایش هارمونیک دامنه جریان و ولتاژ کاهش می یابد و لذا مقدار توان مصرفی که کنتور نشان می دهد کاهش پیدا می کند.



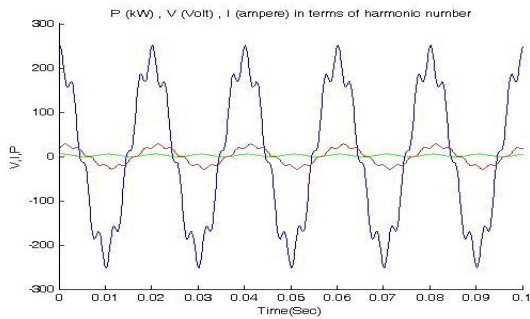
شکل (۸)- رابطه جریان و ولتاژ و توان با هارمونیک در کنتور



شکل (۹)- رابطه جریان و ولتاژ و توان (هارمونیک سوم) در کنتور بر حسب زمان



شکل (۱۰)- رابطه جریان و ولتاژ و توان (هارمونیک پنجم) بر حسب زمان



شکل (۱۱)- رابطه جریان و ولتاژ و توان (هارمونیک هفتم) بر حسب زمان

اشکال (۱۰، ۹، ۸) رابطه توان، جریان، ولتاژ بر حسب زمان در هارمونیکهای مختلف نشان می دهد. نتایج حاصله نشان می دهد که در فرکانسهای مختلف کنتور توانهای متفاوتی را اندازه گیری می کند.

### ۸- ضریب برهم کنش هارمونیک

یکی از موضوعات مهم در شبکه های توزیع اثر پذیری بارهای غیر خطی در یک شبکه بر همدیگر می باشد با عنایت به اینکه امیدانس و فاز خطوط و یا  $\left(\frac{X}{R}\right)$  با هم متفاوت می باشند که این عامل تحت ضریبی بعنوان ضریب برهم کنش هارمونیک بیان می شود.

$$DF_h = \frac{\left| \sum_{i=1}^n I_h^i \right|}{\left| \sum_{i=1}^n |I_h^i| \right|} \quad (33)$$

$N$ : مقدار بار غیر خطی موجود در شبکه

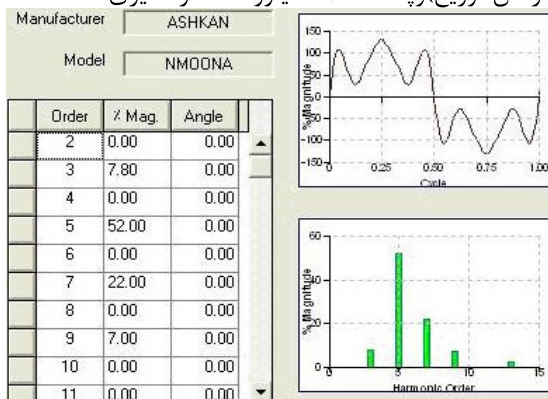
$\theta_h^i < |I_h^i|$ : جریان هارمونیک تریقی ناشی از بار غیر خطی  $i$  ام

مقدار این ضریب عددی بین صفر تا یک می باشد. مفهوم ساده مقدار کوچک ضریب فوق بیانگر حذف مقدار وسیع از هارمونیکها بر اثر گردش جریان بارهای مختلف هارمونیک است. بررسیها نشان می دهد خطوط دارای امیدانس و فاز بالا دارای ضریب کوچکتری می باشند. [۴]

### ۹- بررسی نمونه ای

#### ۹-۱- نتایج اندازه گیری

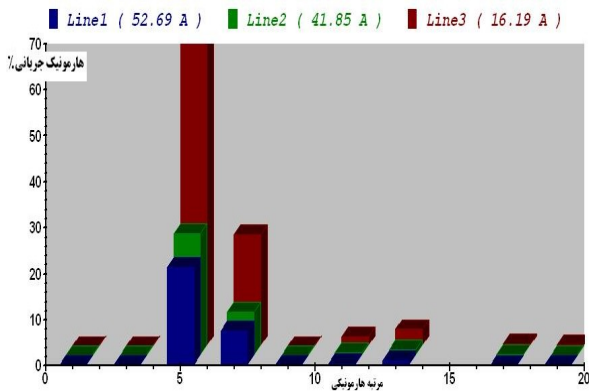
در این مطالعه مقدار دامنه هارمونیک در دو نقطه فشار ضعیف (سرترانس توزیع) و پست ۲۰/۶۳ کیلوولت اندازه گیری شد.



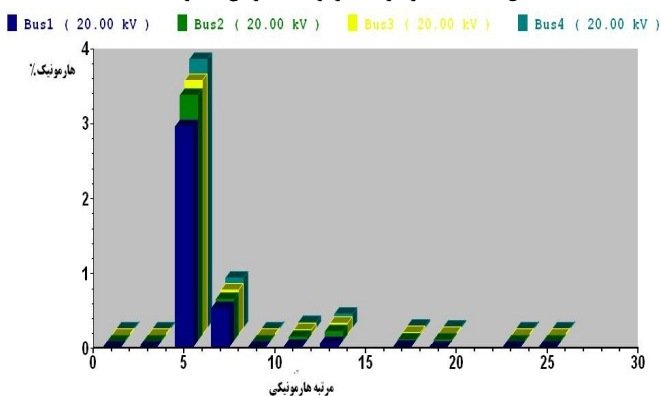
شکل (۱۲)- نتایج اندازه گیری هارمونیک جریان در سمت فشار ضعیف

جدول (۸)- نتایج حاصله از تلفات هارمونیکی فیدرها

تلفات امپلی (%)	تلفات هارمونیکی (%)	مقاومت مسیر	محدود جریان	ضریب یوسنی	مرتب هارمونیک	نام فیدر
۱۱۴۰۰	۲۶۱/۸۷۸	۱/۳۷۲	۱۲۷/۲۳۰	۱/۵	۵	Line1
	۴۵/۴۴۷	۱/۳۷۲	۱۶/۵۶۰	۲	۷	
	۱/۳۸۵	۱/۳۷۲	۰/۳۳۶	۳	۱۱	
	۰/۵۲۳	۱/۳۷۲	۰/۱۰۹	۳/۵	۱۳	
	۰/۱۱۰	۱/۳۷۲	۰/۰۱	۸	۱۷	
۰/۰۴۶	۱/۳۷۲	۰/۰۰۴	۹/۲۸	۱۹		
۲۰۰۰	۴۵/۷۱۱	۰/۳۸	۸۰/۲۸۰	۱/۵	۵	Line2
	۱۲/۳۲۹	۰/۳۸	۱۶/۲۴۰	۲	۷	
	۰/۳۸۳	۰/۳۸	۰/۳۳۶	۳	۱۱	
	۰/۱۴۵	۰/۳۸	۰/۱۰۹	۳/۵	۱۳	
	۰/۰۳۰	۰/۳۸	۰/۰۱	۸	۱۷	
۰/۰۱۳	۰/۳۸	۰/۰۰۴	۹/۲۸	۱۹		
۵۰۰	۱۱۳/۴۴۸	۰/۶۵۱	۱۱۶/۲	۱/۵	۵	Line3
	۲۰/۰۹۹	۰/۶۵۱	۱۵/۴۴	۲	۷	
	۰/۶۵۷	۰/۶۵۱	۰/۳۳۶	۳	۱۱	
	۰/۲۴۸	۰/۶۵۱	۰/۱۰۹	۳/۵	۱۳	
	۰/۰۵۲	۰/۶۵۱	۰/۰۱	۸	۱۷	
۰/۰۲۲	۰/۶۵۱	۰/۰۰۴	۹/۲۸	۱۹		
۱۳۹۰۰	۵۰۲/۵۲۶	جمع کل تلفات				

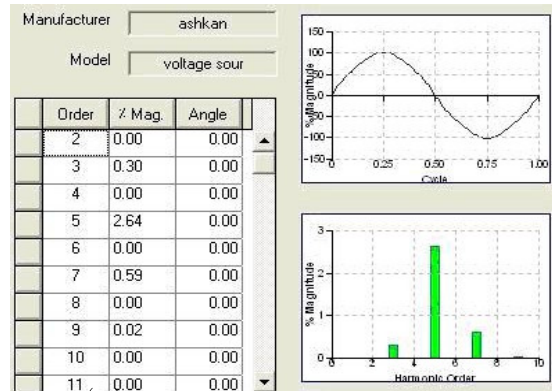


شکل (۱۵)- مقدار درصد هارمونیکی جریان خطوط



شکل (۱۶)- درصد هارمونیکی در شینه های مختلف

اشکال فوق نشان می دهد که بسته به محل بار غیر خطی مقدار هارمونیکی در جریان خطوط ولتاژ باسها متفاوت است. وبا استفاده از خروجی شبیه سازی تلفات هارمونیکی برای مراتب مختلف در فیدرهای مختلف محاسبه گردید. جدول (۸) نشان می دهد که بحث تلفات هارمونیکی در شبکه های توزیع مهم می باشد و باید



شکل (۱۳)- نتایج اندازه گیری هارمونیکی ولتاژ در شینه پست (۶۳/۲۰ kV)

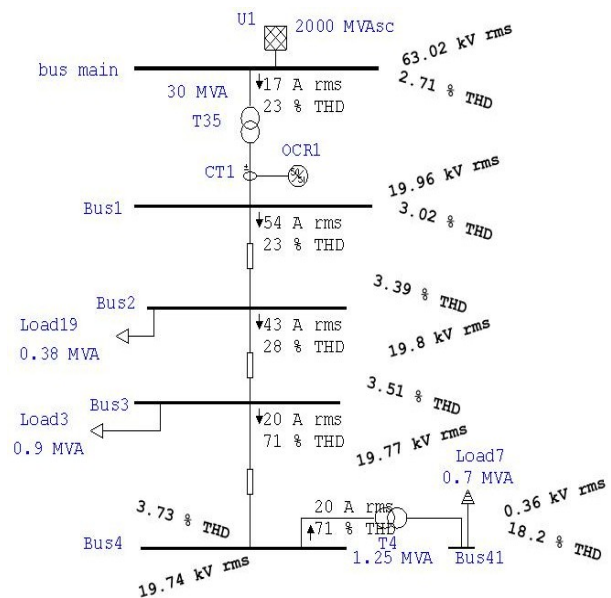
جدول (۶)- نتایج اندازه گیری میان هارمونیکی در فیدر نمونه

شماره فاز	مقدار	درصد	مرتب
R	۱۰۴	۰/۵۲	بین ۲ و ۲
S	۲۴	۰/۱۲	بین ۲ و ۱
T	۲۶	۰/۱۳	بین ۲ و ۱

نتایج اندازه گیری حاکی از آن است که سطح میان هارمونیکی نیز در شبکه توزیع بالا می باشد که بایستی مورد توجه قرار گیرد.

## ۹-۲- شبیه سازی شبکه نمونه

در این مطالعه فیدر فشار متوسط خروجی از پست ۶۳/۲۰ کیلوولت شبیه سازی گردید. منبع دارای ولتاژ سینوسی می باشد. اندازه گیری هارمونیکیها در نزدیک بار (سرترانس ۱۲۵۰ کیلو ولت) و شینه خروجی ۲۰ کیلوولت توسط دستگاه اندازه گیری ION۷۶۰۰ اندازه گیری گردید. جهت ساده سازی در شبیه سازی بغير از ترانسسی که دستگاه اندازه گیری در آن نصب گردید بقیه بارها در روی باسها بصورت مجتمع در نظر گرفته شد.



شکل (۱۴)- شبکه نمونه بهمراه نتایج پخش بار هارمونیکی

بیشتر مد نظر شرکت‌های توزیع قرار بگیرد. نکته مهم دیگر تغییر مقدار جریان فیدرها می باشد که نتایج خروجی از شبیه سازی نشان می دهد. جریان موثر و جریان پیک در محیط هارمونیکی بشرح ذیل تغییر میکنند. [۱۷]

■ جریان موثر در حالت اعوجاجی

$$I_{rms} = I_1 \sqrt{1 + D_1^2} \quad \text{و} \quad I_{rms} = I_1 \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_n^2} \quad (34)$$

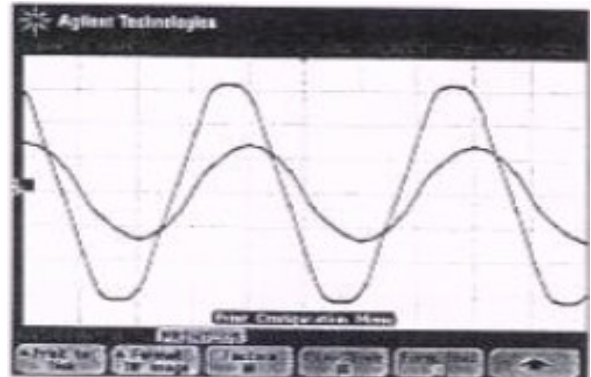
■ جریان پیک در حالت اعوجاجی

$$peak I = K \cdot I_{rms} = K \cdot I_1 \sqrt{1 + D_1^2} \quad (35)$$

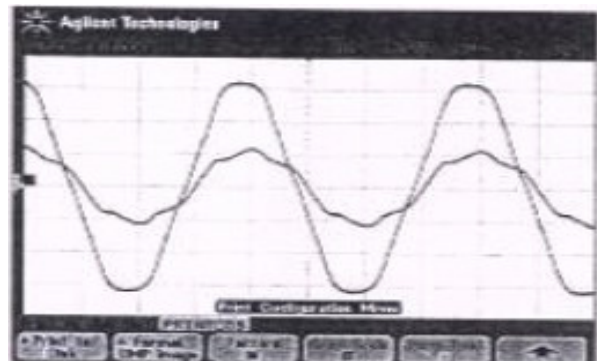
سیستم های حفاظتی و یا ترکیبی از سیستم های حفاظتی به نحوی عمل می نمایند که بخش کوچکی از سیستم را که در آن خطا رخ داده است از بقیه شبکه جدا نمایند. با چنین دیدی از عملکرد رله ها هر عاملی که سبب تاخیر و تسریع عملکرد رله ها گردد مشکلات زیادی را برای شبکه های توزیع و فوق توزیع به همراه خواهد داشت.

### ۳-۹- بررسی عملکرد خازن در محیط هارمونیکی

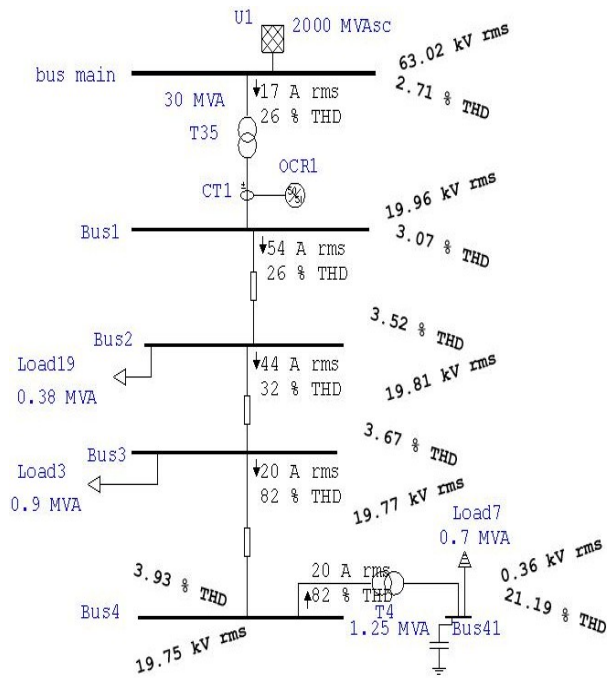
شکل موجهای ولتاژ و جریان مربوط به تابلوی شماره (۱) دانشکده برق را مشاهده می نمایم. در شکل (۱۷) ابتدا بانک خازنی از شبکه جدا شد. با توجه به اینکه در زمان اندازه گیری باری که از تابلو تغذیه می شد کم بود بنابراین اعوجاج کمی مشاهده می شود. ولی در اثر اضافه شدن بانک خازنی مطابق شکل (۱۸) اعوجاج بیشتر در شکل موج مشاهده می کنیم. بنابراین در این قسمت از شبیه سازی به اثرات خازن در محیطهای هارمونیکی پرداخته می شود.



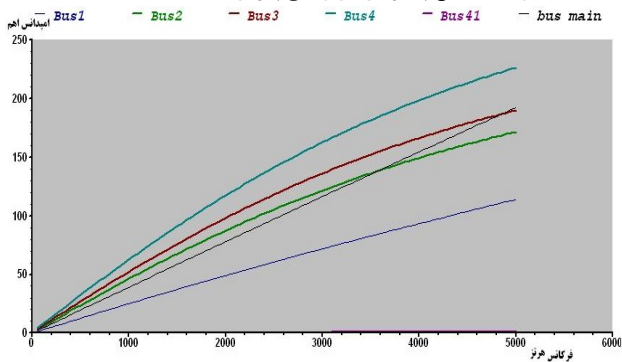
شکل (۱۷) - دیتای گرفته شده بدون حضور خازن



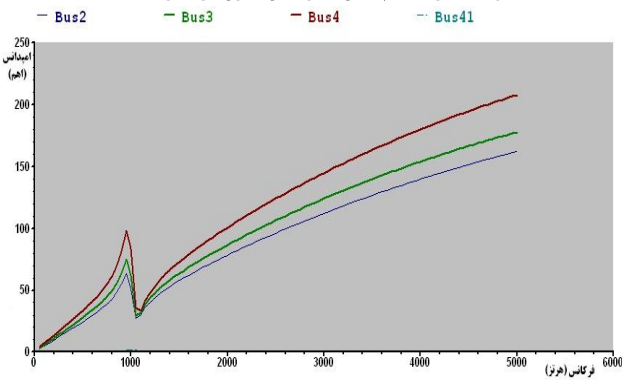
شکل (۱۸) - دیتای گرفته شده با حضور خازن ۵۵ کیلووار



شکل (۱۹) - نتایج پخش بار هارمونیکی پس از نصب خازن ۵۰ کیلووار

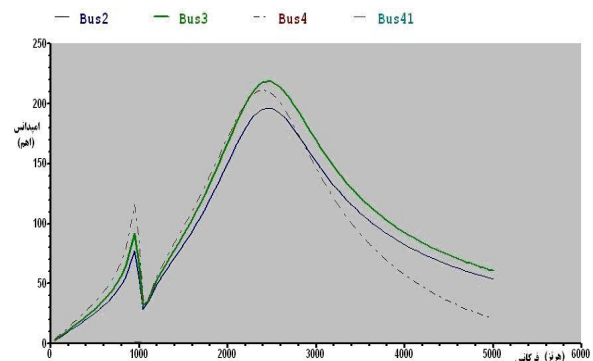


شکل (۲۰) - رابطه امپدانس با فرکانس (خازن در مدار نیست)



شکل (۲۱) - رابطه امپدانس با فرکانس (خازن ۵۰ k var در مدار است)

که همه موارد مذکور در شبکه تجدید ساختار یافته (بازار برق) سبب هدر رفتن منابع اقتصادی و نارضایتی مشترکین می شود. لذا طراحی شبکه توزیع بدون لحاظ نمودن مساله هارمونیک توجیه فنی ندارد. یکی از روشهای قابل اعتماد برای برخورد با مسائلی از این قبیل ایجاد روشهای پیشگیرانه می باشد که مبتنی بر شناخت اثر گذاری علت بر معلول است که بدین وسیله می توان با بررسی وضع موجود (اندازه گیری پارامترهای الکتریکی شبکه از قبیل هارمونیک و...) بیش از آنکه سیستم دچار عیب پیش بینی نشده گردد با اقدامات موثر نسبت به کاهش اثرات هارمونیکها در شبکه توزیع اقدام کرد.



شکل (۲۲) - رابطه امپدانس با فرکانس (خازن  $150k \text{ var}$  در مدار است)

با توجه به توضیحات ارائه شده در بخش قبلی ملاحظه می شود با افزایش خازن (سه خازن  $50$  کیلووار در سه شینه که بار وجود داشت نصب گردید) در شبکه هارمونیک (در حالت عادی خاصیت سلفی دارد) در یکی از فرکانسها تشدید صورت می گیرد و هر چه مقدار خازن بیشتر شود فرکانس تشدید به فرکانس قدرت نزدیکتر می شود که در این حالت اثرات مخربی بر شبکه اعمال می شود.

#### ۹-۴- تلفات هارمونیک ترانس

نظریه اینکه در شبکه نمونه هارمونیک را روی شینه ترانس  $1250$  کیلوولت آمپرنقطه اندازه گیری نمودیم. با محاسبه ضرایب تاثیر گذار ( $37$  و  $36$ ) تلفات هارمونیک ترانس طبق جدول (۹) بدست می آید [۱۱، ۵].

$$P_{EC} = P_{EC-R} \cdot F_{HL} \quad (36)$$

$$P_{OSL} = P_{OSL-R} \cdot F_{HL-STR} \quad (37)$$

$$F_{HL} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left( \frac{I_h}{I_N} \right)^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left( \frac{I_h}{I_N} \right)^2} \quad (38)$$

$$F_{HL-STR} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left( \frac{I_h}{I_N} \right)^2 h^{0.8}}{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left( \frac{I_h}{I_N} \right)^2} \quad (39)$$

جدول (۹) - نتایج حاصله از تلفات هارمونیک فیدها

نوع تلفات	مقدار نامی	ضریب $F_{HL}, F_{HL-STR}$	مقدار تلفات هارمونیک
مسى ( $kW$ )	۱/۵	۲۸/۴	۴۲/۶
گردابی ( $kW$ )	۳/۰۹۹	۳/۸۲	۱۱/۸۴

#### ۱۱- مراجع

- [۱] P. H. Robinson, "Relay Systems, by I.T.", Hill book co, new york, ۱۹۳۵
- [۲] "harmonic distribution in the mv and lv distribution network", ppc.sa, may ۲۰۰۶
- [۳] K.j.helson, "fundamental relay operating principles and characteristics", hill book co, new york, ۱۹۹۲
- [۴] L.degroote and b.renders, "harmonic nonlinear a anlysis of three-phase four-wire distribution networks", Vienna, may ۲۰۰۷
- [۵] A.elmoudi, m.lehtonen, "effect harmonics on transformers loss of life", conference record of the ۲۰۰۶ iee international on electrical insulation
- [۶] A.kouyoumdjian, "harmonics and electrialv instaliation technical publication forms the Schneider training institute", may ۲۰۰۶
- [۷] Alexander e.emanul, "the engineering economics of power systems harmonics in sub distribution feeders", transaction on power system, vol. ۶, no. ۳, august ۱۹۹۱
- [۸] J.j.desmet, "modeling and sensitivity analysis of the thermal behavior of lv cables for different current conditions", ۲۰۰۴
- [۹] S.kujszczczyk, "electro energetyczne układy przesyłow", wnt ۱۹۹۷
- [۱۰] C.j.hatziadoniu, "modling of linear component for harmonic studies", ۲۰۰۳ iee
- [۱۱] Thiago martin de morais, "a new three\_phase transformer modeling for three\_phase harmonic analysis in distribution system", ۲۰۰۵ iee
- [۱۲] صادقی، سیدحسین، آرتین، منتصر کوهساری، شهرام هارمونیک در شبکه های قدرت. مرکز نشر دانشگاهی امیر کبیر. ۱۳۸۲

#### ۱۰- نتیجه گیری

آلودگی هارمونیک و تاثیر آن بر جنبه های متفاوت عملکرد سیستمهای توزیع الکتریکی را می توان از منظر طراحی و بهره برداری شبکه های توزیع مد نظر قرار داد. مدلسازی و شبیه سازی های صورت گرفته نشان می دهد وجود هارمونیکها علاوه بر آن که سهم قابل ملاحظه ای از ظرفیت سیستمهای توزیع را به خود اختصاص می دهد، باعث کاهش بازده تجهیزات، عدم امکان بهره برداری از مقادیر نامی تجهیزات و کاهش عمر آنها می شود که علاوه بر ضرر اقتصادی مضاعف باعث قطعی های بی برنامه و افزایش هزینه تعمیرات، نگهداری تجهیزات می شود



This document was created with Win2PDF available at <http://www.daneprairie.com>.  
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.