

# اثر هارمونیک ها بر خازن ها

نویسنده : عباس صمیمی فر

E-mail: Md.samimi@Gmail.com

چکیده - نقش خازن‌ها به عنوان المان های الکتریکی و الکترونیکی کارآمد در صنایع مربوط به تولید و انتقال و توزیع امروزی غیر قابل انکار است بگونه ای که دیگر هرگز نمی توان چنین صناعی را بدون وجود خازنهای نیرو متصور شد. از این رو شناخت کامل خازن‌ها و عوامل تاثیر گذار بر آنها و حفظ و نگهداری و نظارت دقیق بر آنها ، برای افزایش طول عمر خازن ها و کار کرد بهینه آنها امری است الزامی و اجتناب ناپذیر.

کلید واژه - خازن قدرت ، فرکانس ، هارمونیک ها.

## مقدمه

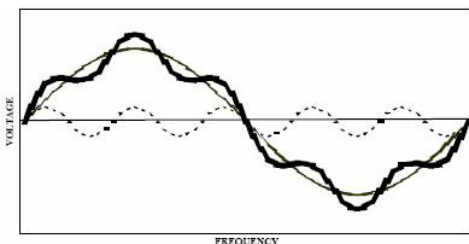
در سالهای اولیه هارمونیکها در صنایع چندان رایج نبودند. به خاطر مصرف کننده های خطی متعادل. مانند : موتورهای القایی سه فاز، گرم کننده ها و روشن کننده های ملتهب شونده تا درجه سفیدی و .... این بارهای خطی جریان سینوسی ای در فرکانسی برابر با فرکانس ولتاژ می کشند. بنابراین با این تجهیزات اداره کل سیستم نسبتا با سلامتی بیشتری همراه بود. ولی پیشرفت سریع در الکترونیک صنعتی در کاربری صنعتی سبب بوجود آمدن بارهای غیر خطی صنعتی شد. در ساده ترین حالت ، بارهای غیر خطی شکل موج بار غیر سینوسی از شکل موج ولتاژ سینوسی رسم می کنند (شکل موج جریان غیر سینوسی).

پدیده آورنده های اصلی بارهای غیر خطی درایوهای AC / DC ، نرم راه اندازه ها ، یکسوسازهای 6 / 12 فاز و ... می باشند. بارهای غیر خطی شکل موج جریان را تخریب می کنند. در عوض این شکل موج جریان شکل موج ولتاژ را تخریب می نماید. بنابراین سامانه به سمت تخریب شکل موج در هر دوی ولتاژ و جریان می شود. در این مقاله سعی شده است تا بزبانی هرچه ساده تر توضیحی در مورد نحوه عملکرد هارمونیک ها و راه کاری برای دوری از تاثیر گذاری آنها بر خازن‌ها ی نیرو ارائه شود.

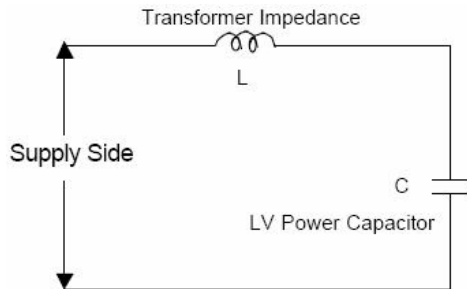
## اساس هارمونیک ها :

اصولا هارمونیک ها آلوده سازی شکل موج را در اشکال سینوسی آنها نشان می دهند. ولی فقط در مضارب فرکانس

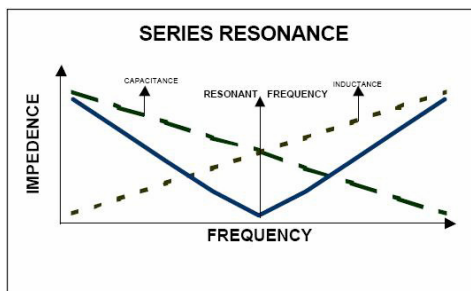
اصلی . تخریب شکل موج را می توان در فرکانس های مختلف (مضارب فرکانس اصلی) بعنوان یک نوسان دوره ای بوسیله آنالیز فوریه تجزیه و تحلیل کرد. در حال حاضر هارمونیکهای فرد و زوج و مرتبه 3 در اندازه های مختلف ضرایب فرکانس های مختلف در سامانه های الکتریکی موجودند که مستقیما تجهیزات سامانه الکتریکی را متاثر می سازند. در معنایی وسیعتر هارمونیکهای زوج و مرتبه 3 هریک تلاش می کنند که دیگری را خنثی نمایند. ولی در مدت زمانی که بار نا متعادل است این هارمونیک های زوج و مرتبه 3 منجر به اضافه بار در نول و اتلاف انرژی شدید می شوند. با تمام احوال هارمونیک های فرد اول مانند هارمونیک پنجم ، هفتم ، یازدهم ، سیزدهم و .... عملکرد این تجهیزات الکتریکی را تحت تاثیر قرار می دهند. برای فهم بهتر تاثیر هارمونیک ها ، شکل زیر تاثیر تخریب هارمونیک پنجم بر شکل موج سینوسی را نشان می دهد :



هارمونیک های ولتاژ و جریان تاثیرات متفاوتی بر تجهیزات الکتریکی دارند. ولی عموما بیشتر تجهیزات الکتریکی به



به خاطر ترکیب سری سلف و خازن ، در فرکانس تشدید امپدانس کل به پایین ترین سطح کاهش می یابد و این امپدانس در فرکانس تشدید طبیعی مقاومتی دارد. بنا براین در فرکانس تشدید رآکتانس خازنی و رآکتانس سلفی (القایی) برابر هستند. این امپدانس پایین برای توان ورودی در فرکانس تشدید ، افزایش توانی جریان را نتیجه می دهد. شکل داده شده زیر رفتار امپدانس خالص در وضعیت تشدید سری را نشان می دهد.



در کاربری صنعتی رآکتانس ترانسفورماتور قدرت به علاوه خازنهای اصلاح ضریب توان در سمت ولتاژ پایین به عنوان یک مدار تشدید موازی برای سمت ولتاژ بالای ترانسفورماتور عمل می کند. اگر این فرکانس تشدید ترکیب سلف و خازن بر فرکانس هارمونیک شایع در صنعت منطبق شود ، بخاطر بستری با امپدانس پایین ارائه شده توسط خازن ها برای هارمونیک ها ، منجر به افزایش توانی جریان خازن ها خواهد شد. از این رو خازن های ولتاژ پایین در سطحی بسیار بالا اضافه بار پیدا خواهند کرد که همچنین این عمل موجب تحمیل بار اضافی بر ترانسفورماتور می شود. این پدیده منجر به تخریب ولتاژ در شبکه ولتاژ پایین می شود.

هارمونیکهای ولتاژ بسیار حساس اند. تجهیزات اصلی نیرو مانند موتورها، خازن ها و غیره بوسیله هارمونیکهای ولتاژ متاثر می شوند. به طور عمده هارمونیکهای جریان موجب تداخل مغناطیسی (Magnetic Interference) و همچنین موجب افزایش اتلاف در شبکه های توزیع می شوند. هارمونیکهای جریان وابسته به بار اند ، در حالی که سطح هارمونیکهای ولتاژ به پایداری سامانه تغذیه و هارمونیکهای بار (هارمونیکهای جریان) بستگی دارد. عموماً هارمونیک های ولتاژ از هارمونیک های جریان کمتر خواهند بود.

### تشدید:

اساساً تشدید سلفی – خازنی در همه انواع بارها مشاهده می شود. ولی اگر هارمونیک ها در شبکه توزیع شایع نباشند تاثیر تشدید فرونشانده می شود.

در هر ترکیب سلفی – خازنی چه در حالت سری و چه در حالت موازی ، در فرکانسی خاص تشدید رخ می دهد که این فرکانس خاص فرکانس تشدید نامیده می شود. فرکانس تشدید فرکانسی است که در آن رآکتانس خازنی ( $X_c$ ) و رآکتانس القایی ( $X_L$ ) برابر هستند.

برای ترکیبی مثالی برای بار صنعتی که شامل اندوکتانس بار و یا رآکتانس ترانسفورماتور که بعنوان  $X_L$  عمل می کند و رآکتانس خازن تصحیح ضریب توان که بصورت  $X_c$  خودنمایی می کند فرکانس تشدید برابر با LC خواهیم داشت . رآکتانس خازنی متناسب با فرکانس کاهش می یابد (توجه :  $X_c$  با فرکانس نسبت عکس دارد). در حای که رآکتانس القایی متناسب با آن افزایش می یابد (توجه

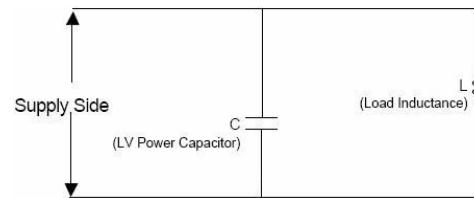
:  $X_L$  با فرکانس نسبت مستقیم دارد). این فرکانس تشدید به سبب متغیر بودن الگوی بار متغیر خواهد بود. این مساله برای ظرفیت خازنی ثابت کل برای اصلاح ضریب توان پیچیده تر است. برای درک صحیح این پدیده لازم است دو نوع وضعیت تشدید شامل حالت تشدید سری و حالت تشدید موازی مورد توجه قرار گیرند. این دو امکان در زیر توضیح داده می شوند.

### تشدید سری:

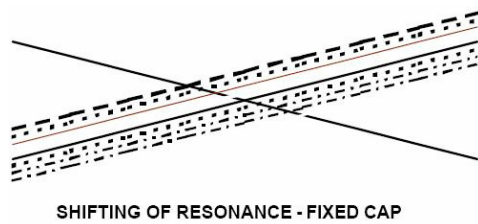
یک ترکیب سری رآکتانس سلفی – خازنی ، مدار تشدید سری شکل می دهد که در شکل زیر نشان داده شده است.

## تشدید موازی:

یک تشدید موازی ترکیبی از راکتانس خازنی و القایی است که در شکل زیر نمایش داده شده است.



می شود. شکل زیر تاثیر ظرفیت خازنی ثابت و اندوکتانس متغیر را نشان می دهد.



این تغییر مداوم فرکانس تشدید ممکن است موجب تطبیق فرکانس تشدید بر فرکانس هارمونیک شود که ممکن است منتج به ولتاژ بالا و جریان بالا که سبب نقص و خرابی تجهیزات الکتریکی می شوند، گردد. بنا بر این در هر دو تشدید موازی و سری خازنهای قدرت متاثر هستند که بکار گیری دستگاه های حفاظتی و ایمنی را برای خازنها ایجاب می نماید. این امر درک صحیح بر خازنهای قدرت را قبل از از اعمال تصحیح بخاطر تاثیر هارمونیک ها و تشدید ایجاب می نماید.

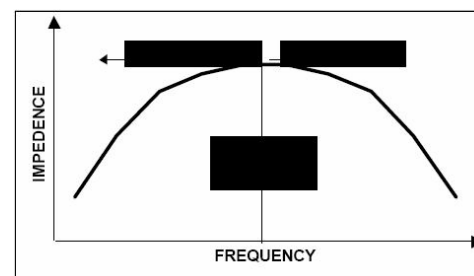
## خازنهای قدرت:

خازنهای اصلاح ضریب توان نسبت به هارمونیک ها حساس اند و بیشتر عیوب خازنهای قدرت، عیوبی با طبیعت زیر را نشان می دهند:

1. هارمونیک ها - هارمونیک های پنجم، هفتم، یازدهم، سیزدهم و ...
2. تشدید
3. اضافه ولتاژ
4. امواج کلید زنی
5. جریان هجومی
6. ولتاژ آنی بازگیری جرقه
7. تخلیه / بازبست ولتاژ

بسته به طراحی ساختاری اساسی، حدود پایداری در مقابل اضافه ولتاژ، اضافه جریان و هارمونیکها برای دور کردن خازن از خرابی بسیار مهم است. اساسا خازن ها امواج کلید زنی تولید می کنند که عموما به عنوان جریان هجومی و اضافه ولتاژ آنی دسته بندی می شوند.

در اینجا رفتار امپدانس برعکس حالت تشدید موازی خواهد بود که در شکل داده شده در زیر، نشان داده شده است. در فرکانس تشدید امپدانس منتهجه مدار به مقداری بالا افزایش می یابد. این، منجر به بوجود آمدن مدار تشدید موازی میان خازن های اصلاح ضریب توان و اندوکتانس بار می شود که نتیجه آن عبور ولتاژ بسیار بالا هم اندازه امپدانس ها و جریان های گردابی بسیار بالا درون حلقه خواهد بود.



در کاربری صنعتی خازن اصلاح ضریب توان مدار تشدید موازی با اندوکتانس بار تشکیل می دهد. هارمونیک های تولید شده از سمت بار راکتانس شبکه را افزایش می دهند. که موجب بلوکه شدن هارمونیک های سمت تغذیه می شود. این منجر به تشدید موازی اندوکتانس بار و اندوکتانس خازنی می شود. مدار LC (سلفی - خازنی) موازی، شروع به تشدید میان آنها می کند که منجر به ولتاژ بسیار بالا و جریان گردابی بسیار بالا در درون حلقه مدار سلف - خازن (LC) می شود. نتیجه این امر آسیب به تمام سمت ولتاژ پایین سامانه الکتریکی است.

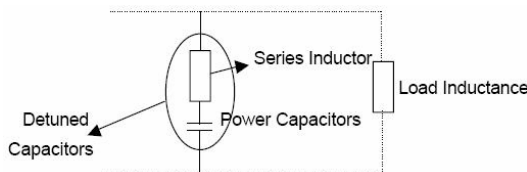
ایزوله کردن تشدید موازی از ایزولاسیون تشدید سری نسبتا پیچیده تر است. اساسا این امر بخاطر تنوع بار صنعتی از زمانی به زمان دیگر است که موجب تغییر فرکانس تشدید

مثل جریان هجومی، اضافه ولتاژ آبی و غیره نیاز دارند که بطور دقیق تعریف و بررسی شوند.

#### دستگاه های مسدود کننده هارمونیک ها:

برای کاربری سالم خازن ها لازم است که فرکانس تشدید مدار LC (سلف - خازن) که شامل ادوکتانس بار و خازنهای اصلاح ضریب توان می شود، به فرکانسی دور از کمترین فرکانس هارمونیک تغییر داده شود. برای مثال هارمونیک هایی که در سامانه تولید می شوند و خازن های قدرت را متاثر می سازند، هارمونیک های پنجم، هفتم، یازدهم، سیزدهم و غیره هستند. پایین ترین هارمونیکی که بر خازن ها تاثیر می گذارد هارمونیک پنجم است که در فرکانس 250 هرتز دیده می شود. اساسا اگر خازن ها با سلف ها موازی شده باشند، انتخاب مقدار اندوکتانس به شکل زیر است:

ترکیب سری LC (سلف - خازن) در فرکانسی زیر 250 هرتز تشدید می کند. بنابراین در همه فرکانس های هارمونیک ها ترکیب سری سلف و خازن مانند یک ترکیب سلفی عمل خواهد کرد و امکان تشدید برای هارمونیک پنجم یا هر هارمونیک بالاتری از بین می رود. شکل زیر نامیزان سازی (De - Tuning) خازن ها را نشان می دهد.

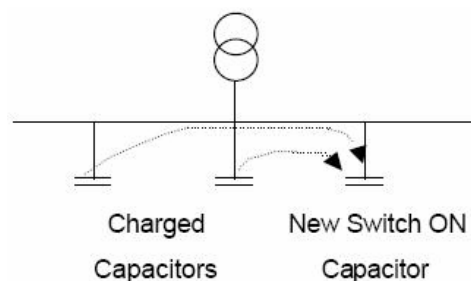


این ترکیب سلف و خازن که در آن فرکانس تشدید در فرکانسی دور از فرکانس هارمونیک تنظیم شده است، مدار LC (سلف - خازن) نامیزان شده (De-Tuned) نام دارد. ضریب نامیزان سازی نسبت راکتانس به ظرفیت خازنی است. در مدار خازنی نامیزان شده، اساسا سلف مانند دستگاه مسدود کننده هارمونیک ها عمل می کند. برای خازن ها ضریب مناسب نامیزان سازی حدود 7٪ است که فرکانس تشدید را در 189 هرتز تنظیم می کند.

اما، نامیزان سازی 5.67٪ همچنین در جایی استفاده می شود که فرکانس تشدید معادل 210 هرتز دارد. هر دو

جریان هجومی پدیده ای است که هنگام به مدار وصل کردن خازن ها رخ می دهد. امپدانس ارائه شده توسط خازن طبیعتا بسیار کم و مقاومتی است. این امر منجر به جریان هجومی به بزرگی 50 تا 100 برابر جریان اسمی می شود که از خازن عبور می کند، اما چرا از خازن؟ زیرا امپدانس ترانسفورماتور در زمان روشن کردن خازن ها فقط در مقابل شار جریان مقاومت می کند.

این امر هنگامی پیچیده تر می گردد که در ترکیب موازی بانک خازنی ممکن است جریان هجومی کلید زنی به سطحی بالاتر از 200 تا 300 برابر جریان اسمی برسد. این جریان هجومی نتیجه تخلیه خازن های از پیش شارژ شده موازی با آن می باشد. در زیر این مطلب نشان داده شده است. نوعا جریان هجومی علاوه بر تخریب در شکل موج جریان سبب تخریب در شکل موج ولتاژ می شود.



در هنگام خاموش کردن (از مدار خارج کردن) خازن ها، بسته به شارژ ذخیره شده در آن، اضافه ولتاژ ناگهانی بالاتری در زمان خاموش کردن خازن ها بوجود خواهد آمد که ممکن است موجب پدید آمدن جرقه در پایه ها شود. هنگامی که خازن خاموش می شود شار الکتریکی در خود نگه می دارد و بوسیله مقاومت های تخلیه، تخلیه (Discharge) می شود. مدت زمان تخلیه عموما بین 30 تا 60 ثانیه می باشد. تا زمانی که تخلیه بشکل موثری صورت نگرفته نمی توان خازن ها را به مدار باز گرداند. هرگونه باز بست خازن قبل از تخلیه کامل دوباره موجب افزایش جریان هجومی می شود.

علاوه بر دستگاه های مسدود کننده هارمونیک ها که با صحت خازن ها نسبت مستقیم دارند، و در سر خط بعدی تشریح می شوند، دستگاه های تحلیل برنده امواج کلید زنی

خروجی خازن و سطح ولتاژ نیاز به انتخاب صحیح بر اساس درجه نامیزان سازی دارند. برای مثال برای 7% نامیزان سازی برای رسیدن به 200 کیلو ولت آمپر رآکتیو خروجی (KVAR) در 400 ولت ، نیاز به آن داریم که خازن 240 KVAR خروجی با ولتاژ 400 ولت انتخاب نماییم. این بدلیل افزایش ولتاژ بوسیله اندوکتانس سری است. مشابهاً برای رسیدن به 200 KVAR خروجی در ولتاژ 440 ولت به خازن های 240 KVAR خروجی 480 ولتی نیاز است. محاسبه افزایش ولتاژ به سبب رآکتانس سری ، بر اساس نامیزان سازی است و به روش زیر انجام می گیرد :

( درجه نامیزان سازی - 1 ) / (ولتاژ نرمال مجاز) = ولتاژ خازن

### سامانه خازنی ایده آل:

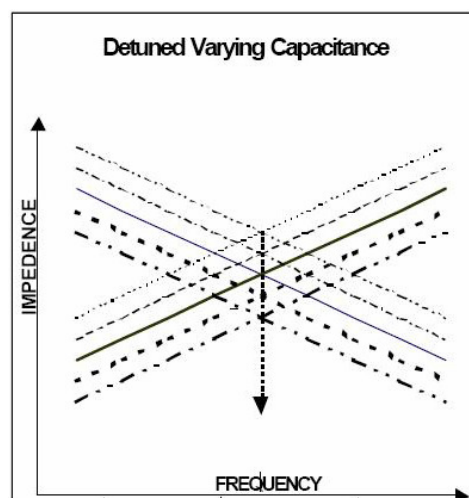
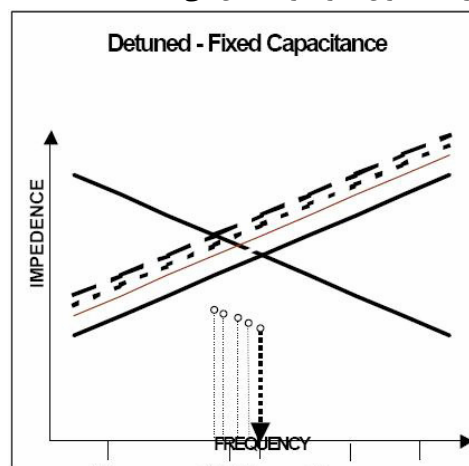
برای تصحیح ضریب توان در بار صنعتی کنونی که شامل هارمونیک ها و تشدید می شود ، یک سامانه اتصال خازنی اساساً باید خصوصیات زیر را دارا باشد :

ظرفیت خازنی متغیر بر اساس توان رآکتیو برای دوری از تغییر فرکانس تشدید. این امر انتخاب صحیح پنل های APFC را ممکن می سازد. پنل APFC باید خصوصیات زیر را داشته باشد.

- ❖ حسگرها باید به طور مداوم سطح هارمونیک های ولتاژ را نمایش دهد و خازن ها را تحت زیر سطوح بالاتر هارمونیک ها محافظت نماید.
- ❖ انتخاب محدوده هارمونیک های پنجم ، هفتم ، یازدهم ، سیزدهم و همچنین شناخت تخریب همه هارمونیک ها برای تنظیم حدود ایمن و همچنین پیش بینی تغییرات بعدی هارمونیک ها.
- ❖ مونیتورینگ جریان RMS برای محافظت خازن ها تحت هر حالت تشدید.
- ❖ کنترل مشخصات ، برای دوری از بکارگیری ظرفیت مازاد خازنی تحت حالت کم بار.
- ❖ انتخاب خازن با عمر بالا و با تضمین مشخصات زیر :

ظرفیت اضافه بار : حداقل دو برابر جریان اسمی به طور مداوم و 350 برابر آن هنگام جریان هجومی. قابلیت پایداری در مقابل اضافه ولتاژ: بیشتر از 10% و بالاتر از ولتاژ مجاز بصورت پیوسته.

درجه نامیزان سازی ، مسدود کردن (بلوکه کردن) هارمونیک ها از خازن ها را تضمین می کنند. شکل زیر درجه نامیزان سازی را نمایش می دهد.



### بانک های نامیزان سازی خازن:

بانک های نامیزان سازی خازن نیازمند آن هستند که با نکات اساسی زیر مشخص شوند :

- انتخاب درجه نامیزان سازی
  - محاسبه خازن کل خروجی مورد نیاز
  - محاسبه افزایش ولتاژ بوسیله سلف های سری
- درجه نامیزان سازی مطلوب بر پایه هارمونیک موجود است. لازم است که هارمونیک های سمت بار اندازه گیری شوند تا در درجه نامیزان تصمیم گیری شود.

\*

قابلیت پایداری در مقابل هارمونیک ها : تضمین محدوده های هارمونیک های پنجم ، هفتم ، یازدهم ، سیزدهم و همچنین برای محدوده های THD.

❖ مدار سلفی De – Tuned برای مسدود کردن

هارمونیک ها (الگوی هارمونیک بار باید قبل از

تعیین درجه نامیزان سازی (De – Tuning)

اندازه گیری شود).

❖ انتخاب سطح خازن و سطح ولتاژ براساس درجه

نامیزان سازی.

❖ دستگاه های کلیدزنی با تقلیل دهنده های داخلی

برای تقلیل امواج کلید زنی برای خازن های

قدرت.

اساسا این خصوصیات با مطالعه متناسب هارمونیک های ولتاژ بار همراه است که تضمین می کند که تاثیر مخرب هارمونیک ها و تشدید از خازن ها دور شود که بدین وسیله عمر خازن ها و کارایی کل سامانه الکتریکی را افزایش می دهد.

### نتیجه گیری

علم به شرایط و خصوصیات خازن ها و عوامل موثر بر آنها از جمله هارمونیک ها نه تنها موجب افزایش امنیت و سلامتی و طول عمر آنها خواهد شد بلکه سبب کاهش هزینه های پیش بینی شده و نشده در بکار گیری انرژی الکتریکی می شود.