2nd International Conference on Green University
دومین همایش بین المللی دانشگاه سبز
۱۰ و ۱۱ اردیبهشت
دانشگاه اصفهان
April 30-May 1 ,2019
University of Isfahan

# بهینه سازی مصرف انرژی با استفاده از میکرو خازن

**اکبر فتحی جلالی**

**مدیرعامل شرکت اروم نیرو توان**

urum.nirotavan@gmail.com

**چکیده :**

**میکرو خازنها (خازنهای صنعتی سه فاز ستاره) جایگزین مناسب برای خازنها و بانک خازنی می باشند، قابلیت تحمل هرگونه تغییرات ولتاژ ،جریان و هارمونیک ، عمر مفید بالا ، و در صورت نصب بر روی موتورها قابلیت کاهش جریان های اولیه الکتروموتور را دارند و حتی می توان جایگزین راه اندازه ها نیز شود. با عنایت به اهمیت جبرانسازی توان راکتیو به صورت پراکنده به منظور کاهش تلفات و بهینه سازی انرژی در سیستم توزیع، میکرو خازن ها به واسطه ابعاد کوچک و نصب و راه اندازی آسان بهترین گزینه به منظور جبرانسازی پراکنده(local) می باشند.**

**واژگان کلیدی :**

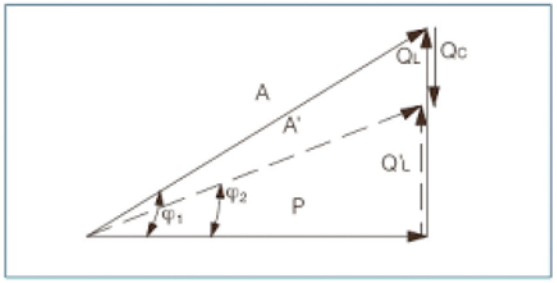
**بهینه سازی انرژی . جبران سازی توان راکتیو . میکرو خازن . هارمونیک . اصلاح ضریب توان**

**مقدمه**

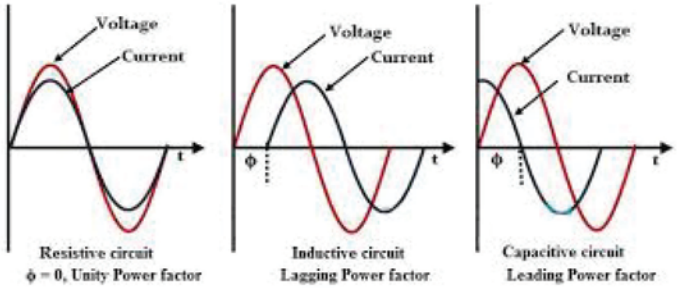
**در شبکه های توزیع با پس افت جریان از ولتاژ و مصرف بار راکتیو مواجه هستیم،لذا در تمامی مواقع بارگیری بخشی از انرژی مصرفی به صورت بار راکتیو از چرخه مصرف خارج می شود.این توان قابل استفاده نیست و در مسیر عبور تلف می شود و در عین حال برای شبکه زیان های بسیاری را در بردارد ، اضافه شدن جریان منبع و در نتیجه نیاز به منابع با توان های بیشتر، با افزایش جریان عبوری ، نیاز به سیم و کابل با سطح مقطع بالاتر داریم که موجب افزایش هزینه ها می شود ،اتلاف انرژی در سیم ها و کابل ها باعث افزایش دمای آنها شده و عمر مفیدشان را کاهش میدهد.توان راکتیو موجب افزایش یافتن جریان جاری بین منبع تغذیه و مصرف کنندگان می شود. بدین ترتیب توان ظاهری افزایش و ضریب توان کاهش خواهد یافت.**

**۱- اصلاح ضریب توان** : بدین معناست که توان راکتیو مورد نیاز به جای آنکه از منابع برق تامین شود در محل بار تولید گردد در این حالت جریان تغذیه کمترین مقدار را دارد و قادر است توان واقعی را با ولتاژ ثابت تری تغذیه کند و جریان و ولتاژ هم فاز شده و ضریب توان به یک نزدیک باشد .

$$Q_c = P \cdot (\tan\varphi_1 - \tan\varphi_2)$$




**۲- تنظیم ولتاژ** : تغییرات توان راکتیو منجر به تغییرات ولتاژ می شود جبران سازها با تولید توان راکتیو موجب تثبیت نسبی ولتاژ در برابر بارهای متغیر می گردد




**جبران سازی با خازن** : جهت جبران سازی بار راکتیو و بهبود توان در سیستم از بانک خازنی استفاده می گردد که بصورت موازی با سایر بارها نصب می شود .

معمولا در صنعت برای کاهش بار راکتیو از بانک خازنی با خازنهای مثلث استفاده می شود بانکهای خازنی استاتیک معمولا در ابتدای ورودی برق و در صورت وجود ترانس بعد از ترانس نصب می شود و بارهای راکتیو تولیدی داخل مجموعه قبل از ورود به شبکه توزیع کاهش می یابد.

خازنها با استفاده از رگلاتور و کنتاکتور و .... وارد مدار شده و از مدار خارج می شوند. این نوع خازنها با کمترین تغییرات ولتاژ ، جریان و هارمونیک آسیب پذیرهستند ، خازنها هنگام سوییچینگ ۲.۵ برابر جریان نامی شارژ می شوند که این امر موجب سوختن کنتاکتورها و فیوزها و تجهیزات جانبی می شود لذا به هنگام طراحی بانک خازنی کلیه تجهیزات مذکور را با ۲.۵ برابر جریان انتخاب می شوند. به جای کنتاکتور ها نیز از کنتاکتور خازنی در طراحی بانک خازنی استفاده می شود که هزینه های اولیه طراحی و تعمیر و نگهداری آنها بسیار بالا است.

## معایب جبران سازی با بانک خازنی :

۱- خازنهای موجود در بازار بصورت مثلث می باشد این نوع خازنها علاوه بر تولید و تزریق توان راکتیو خود بعنوان مصرف کننده جریان برق عمل می کنند . به منظور جلوگیری از تحمیل تلفات خازنی به شبکه ، معمولا از رگلاتور و کنتاکتور و ..... جهت ورود و خروج خازنها استفاده می شود . ورود و خروج خازنها موجب آرک زدگی و سوختن کنتاکتور ها و تجهیزات جانبی می شود ضمن اینکه خازنها تحمل تغییرات سریع ولتاژ و جریان و هارمونیک را ندارند و سریعا آسیب می بینند . لذا هزینه های تعمیر و نگهداری بانک های خازنی بسیار بالاست .

۲- استفاده از اینورتور و سافت استارترها در صنعت، موجب افزایش شدید هارمونیک های شبکه می گردد این هارمونیک ها در خازنهای مثلث ایجادحالت گردابی(میدان مغناطیسی فازی) و در نهایت رزونانس(در فیزیک، بازآوایی یا رزونانس یا تشدید عبارت است از تمایل سیستم به نوسان با بیشینه دامنه در فرکانس‌هایی خاص که به آنها فرکانس رزونانس یا فرکانس تشدید گویند. در چنین فرکانس‌هایی انرژی ارتعاشی در جسم ذخیره می‌شود و در نتیجه نیرویی کوچک و متناوب می‌تواند باعث حرکتی نوسانی با دامنه بزرگ شود.) ایجاد شده،باعث تشدید هارمونیک شده پس در نتیجه موجب آسیب دیدگی خازنها می شود .

۳- برای راه اندازی موتورها با توان بالا حتما بایستی از حالت ستاره و مثلث استفاده نمود این امر نهایتا ۸ ثانیه طول می کشد تا موتور راه اندازی شود در این حالت موتور جریانی تا ۶ برابر جریان نامی می کشد و پس از ۸ ثانیه به حالت نرمال می رسد این در حالی است که برای جلوگیری از ورود و خروج سریع خازنها این زمان در رگلاتور ها حداقل ۲۰ ثانیه طراحی می شود ، در عمل کلیه جریان های راه اندازی موتور بدون حضور خازن صورت می گیرد .

۴- اشباع شدن CT ، عدم تنظیم صحیح رگلاتور ، عدم تناسب پله های خازنی ، خرابی کنتاکتورهای خازنی در اثر ورود و خروج بی رویه خازنها ، پایین بودن عمر مفید خازنها از دیگر معایب بانک های خازنی می باشد .

۵- عمر مفید پایین این نوع خازنها از دیگر معایب آن می باشد .

## مزایای جبران سازی بامیکرو خازنها :

۱. با تغییر شکل داخلی خازنها از حالت مثلث به حالت ستاره ، ولتاژ سر خازنها از ۳۸۰ ولت به ۲۲۰ ولت کاهش می یابد لذا تحمل تغییرات ولتاژ بسیار بالایی دارند

۲. در صورت اعمال هارمونیک به میکرو خازنها ، حالت گردابی درون خازنها بوجود نمی آید لذا در مقابل هارمونیک ها آسیب نمی بینند .

۳. در صورت نصب بروی الکتروموتورها ، قادرند علاوه بر کاهش جریانهای استارت اولیه موتورها ، تلفات الکتروموتورها و تلفات کابلی آن را نیز کاهش دهند. میزان کاهش تلفات بستگی به مقدار ضریب توان موتورها دارد .

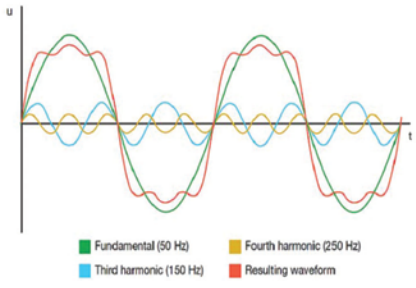
۴. بالا بودن عمر مفید ، قابل تعمیر بودن ، نصب و راه اندازی آسان ، و هزینه های پایین طراحی و ساخت و تعمیر نگهداری نسبت به بانک های خازنی

۵. عدم ارتباط فازی بین سری های میکرو خازنها ، موجب به حداقل رسیدن تلفات داخلی میکرو خازنها می باشند ضمن آنکه بخشی از هارمونیک های تولیدی در مجموعه از طریق سیم نول به زمین منتقل شده لذا میتوان گفت نسبت به خازنهای نوع مثلث تا ۳۵ درصد هارمونیک های کمتری به شبکه اعمال می کنند .

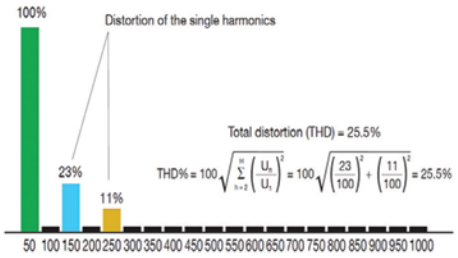
## میکرو خازنها جایگزین راه اندازها :

الکتروموتورها هنگام راه اندازی جریانی حدودا سه برابر جریان نامی میکشند این امر موجب افزایش بار راکتیو و کاهش شدید ضریب توان در موتورها می شود به منظور کاهش این جریان های اضافی می توان از راه اندازی نرم یا همان سافت استارتر استفاده نمود.همانگونه که از اسمشان مشخص است سافت استارترها صرفا جهت راه اندازی نرم استفاده میشود و کاربرد خاصی ندارد و موتورها پس از راه اندازی بار راکتیو تولید کرده و به شبکه ارسال میکنند . اخیرا برای راه اندازی و کاهش بار راکتیو از اینورتور استفاده میشود .اینورتورها قادرند علاوه بر راه اندازی نرم ، بار راکتیو تولیدی رو نیز کاهش بدهند . بزرگترین چالش اینورتورها تولید هارمونیک شدید می باشد و هر چه الکتروتورها بزرگتر باشند اینورتور مربوطه نیز بزرگتر شده و هارمونیک تولیدی افزایش میابد .بطوری که این هارمونیک ها موجب اخلال در مدارات ابزار دقیق و بانک خازنی میشود . چنانچه در برخی موارد هنگام استفاده از اینورتور و سافت استارتر ، بانک خازنی از مدار خارج می شود یا توسط رله های تاخیری ، پس از راه اندازی موتورها خازنها وارد مدار میشوند. لذا به منظور کاهش این هامورنیک ها نیاز به فیلترهای هارمونیکی می باشد هزینه نصب و راه اندازی آن نیز زیاد می باشد . بهترین گزینه برای جایگزینی موارد فوق استفاده از میکرو خازن ها می باشد.

### B-هارمونیک و اثرات مخرب آن بر روی شبکه




شکل (۱)



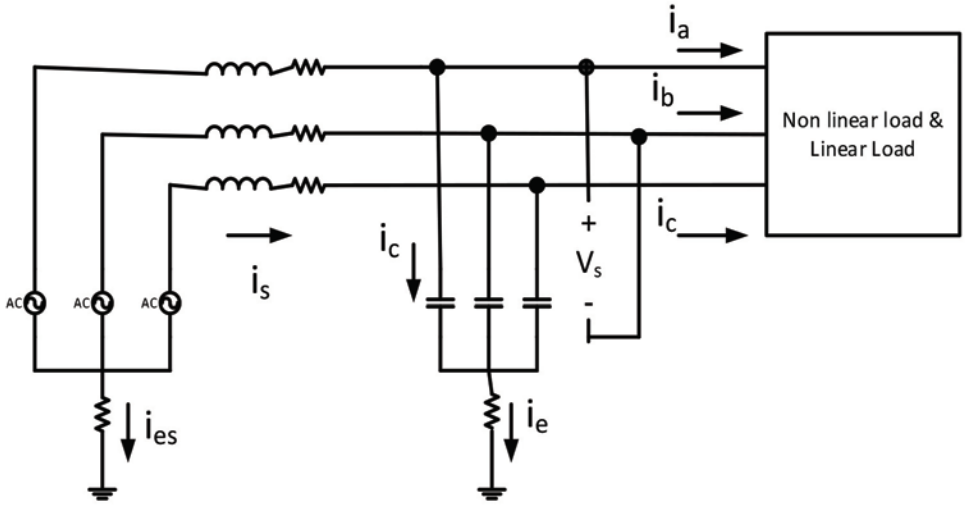

شکل (۲)

طبق نظریه فوریه، هر تابع متناوب با دوره تناوب **T** را می توان به صورت جمعی از چند تابع با دوره تناوبی از مضرب صحیح دوره تناوب تابع اصلی بسط داد. که به این بسط، بسط فوریه گفته می شود. هارمونیک فرکانس شکل موج اصلی را، هارمونیک اول یا هارمونیک پایه گویند و هارمونیک هایی که فرکانس آن ها، مضرب **n** از فرکانس اصلی شکل موج است، هارمونیک مرتبه **n** ام خوانده می شوند. طبق نظریه فوریه، یک شکل موج کاملا سینوسی، به جز هارمونیک اول (شکل موج اصلی) فاقد هرگونه هارمونیک اضافه است، لذا وجود هرگونه هارمونیک در یک سیستم الکتریکی بیانگر تغییر در شکل موج ولتاژ و جریان خواهد بود که حالت مطلوبی نیست و بایستی رفع گردد.

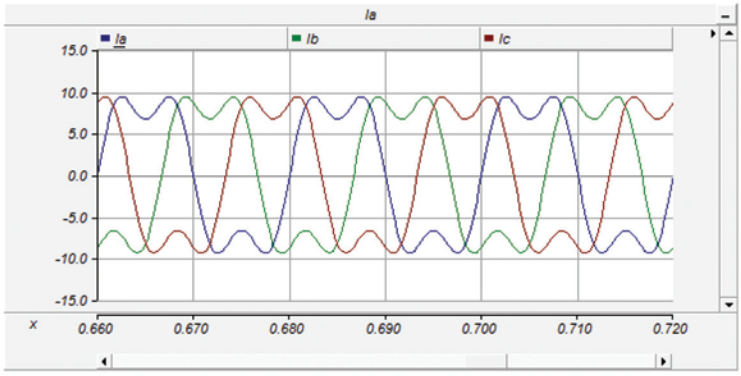
به طور کلی اعوجاج شکل موج به علت ماهیت تجهیزاتی ازقبیل درایوها،دستگاههای جوش ، لامپها و... است که می تواند به علت وجود اَمپِدانس غیر خطی یا متغیر با زمان و یا یکسوکننده های پل باشد؛ چرا که در این موارد، ادوات الکترونیک قدرت تنها در کسری از جریان را از خود عبور می دهند و باعث ایجاد هارمونیک و شکل موج غیر سینوسی می شود.یکی از تجهیزاتی که در برابر این هارمونیک ها بسیار حساس می باشد، خازن ها هستند. استاندارد ها توضیحات دقیقی را با هدف کاهش اثرات هارمونیک بر خازن ها ارائه می دهند. استاندارد IEC۶۱۶۴۲ مشکلات هارمونیک ها را بررسی کرده و توصیه و راهکارهایی را در این باره ارائه می دهد.

## مطالعه میکرو خازنها از نظر رفتار هارمونیکی

علاوه بر موارد فوق که به عنوان معایب جبرانسازهای خازنی با اتصال مثلث شناخته می‌شود در مواجهه با بارهایی با رفتار غیرخطی که منجر به تولید هارمونیک در شبکه می‌گردند، این نوع اتصال از بانک های خازنی رفتار مناسبی از خود در مقابل جریان‌های هارمونیک سوم نشان نمی‌دهد. به منظور بررسی دقیق‌تر این موضوع و رفتار هارمونیکی جبرانسازهای خازنی، یک سیستم نمونه مطابق شکل ۵ در نرم‌افزار PSCAD/EMTDC در دو حالت اتصال ستاره زمین شده و اتصال مثلث مورد مطالعه عددی واقع شده است [۴]. ولتاژ تغذیه ۳۸۰ ولت خط بوده و بار سه فاز متقارن ولی دارای هارمونیک سوم می‌باشد که در شکل ۶ قابل مشاهده است.

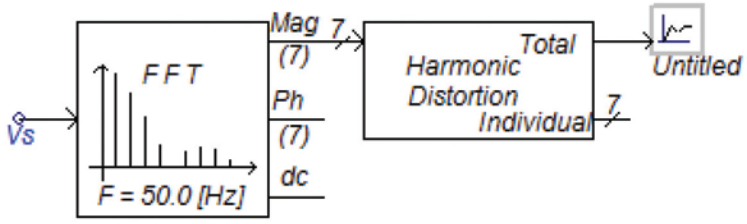



شکل ۵: شبکه توزیع نمونه شبیه سازی شده جهت مقایسه عملکرد خازن

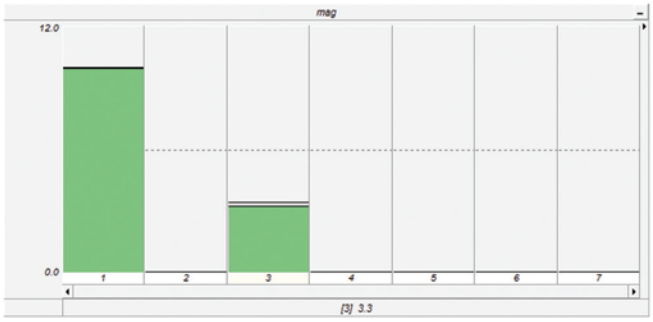



شکل ۶: جریان های سه فاز بار خطی و غیر خطی دارای مولفه هارمونیک سوم

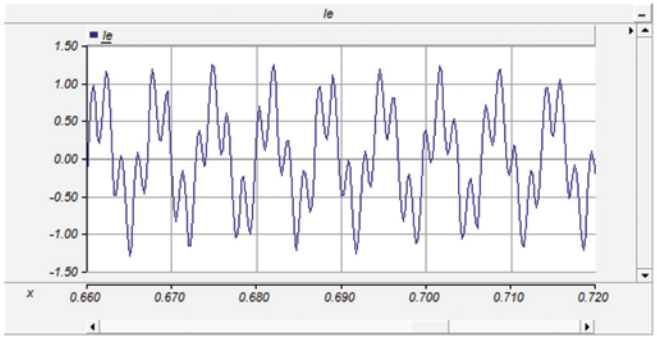
در شکل ۷ و شکل ۸ به ترتیب بلوک دیاگرام اندازه‌گیری طیف هارمونیکی جریان‌های بار و مولفه‌های هارمونیکی آن مشاهده می‌شود. شکل ۹ جریان نقطه زمین خازن‌ها را نشان می دهد. همانطور که از این شکل مشخص است قسمتی از جریان هامونیکی بار (نزدیک ۲ آمپر) از طریق نقطه صفر خازن‌ها به زمین انتقال یافته است و از انتقال هارمونیک‌ها به شبکه جلوگیری شده است. البته این نکته می‌بایستی ذکر گردد که مقدار جریان هارمونیکی انتقالی از طریق اتصال ستاره زمین شده به سمت زمین و جلوگیری از انتقال آن به سمت شبکه بستگی به امپدانس فیدر تغذیه کننده بار و مقاومت زمین دارد. در هر حالت، مقدار جریان هارمونیکی انتشار یافته به سمت شبکه در حضور جبران ساز با اتصال ستاره زمین شده کاهش می‌یابد. البته باید به این نکته اشاره گردد که میزان انتقال جریان‌های هارمونیکی به سمت زمین از نقطه ستاره زمین شده بانک خازنی بستگی به امپدانس فیدر و مقاومت زمین داشته و در موقعیت‌های به کارگیری این تجهیز می‌تواند درصدهای مختلفی از هارمونیک به زمین انتقال یابد و باعث تمیز شدن منحنی ولتاژ گردد.




شکل ۷: بلوک دیاگرام اندازه گیری طیف هارمونیکی اجزا

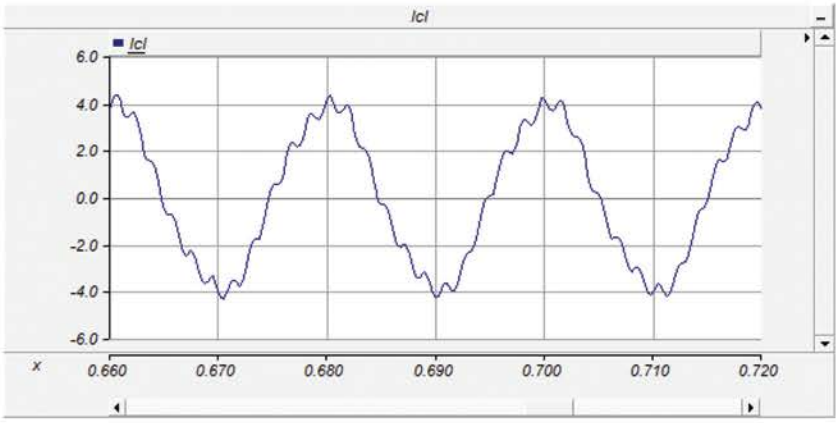



شکل ۸: مولفه هارمونیکی جریان های بار

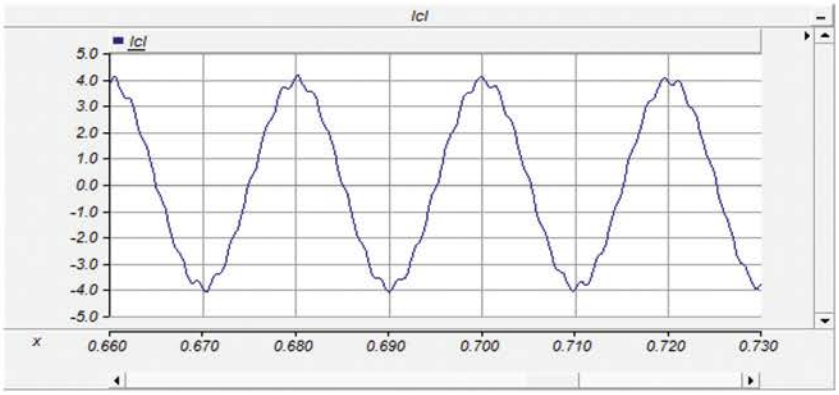



شکل ۹: جریان عبوری از نقطه صفر ستاره خازن ها در حالت ستاره زمین شده

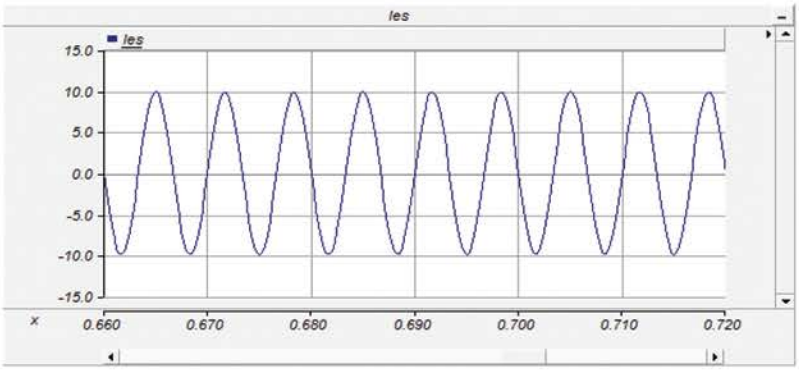
شکل ۱۰ جریان عبوری از خازن‌ها را در حالت ستاره زمین شده نشان می‌دهد که دارای اعوجاج بیشتری بوده و هارمونیک‌ها را به سمت زمین انتقال داده است و از انتشار آن به سمت شبکه کاسته است. در نتیجه می‌بایستی ولتاژ دو سر بار صاف‌تر گردد. حال اتصال خازن‌ها از حالت ستاره زمین شده به مثلث تغییر می‌کند و جهت برابری ظرفیت معادل هر دو حالت، ظرفیت خازن‌ها در حالت مثلث سه برابر کوچکتر می‌گردد. شکل ۱۱ جریان خازن‌ها را در حالت مثلث نشان می‌دهد. از مقایسه شکل-های ۱۰ و ۱۱ می‌توان به این نتیجه رسید که در حالت مثلث از نظر طیف هارمونیکی جریان خازن‌ها به حالت سینوسی نزدیکتر است؛ به عبارت دیگر جبران‌ساز خازنی نتوانسته جریان‌های هارمونیکی را به زمین انتقال دهند و این مولفه‌های هارمونیکی به شبکه منتشر شده‌اند. این امر منجر به افزایش تلفات مولفه‌های هارمونیکی در طول فیدرهای توزیع و کابل‌ها نیز می‌گردد. این نکته را با وضوح بیشتر می‌توان در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ که جریان زمین شبکه را در دو حالت ستاره و مثلث نشان می‌دهند ملاحظه نمود. همانطور که دیده می‌شود دامنه جریان سیم صفر در حالت مثلث نزدیک ۲ آمپر بیشتر است و اعوجاج بیشتری دارد.



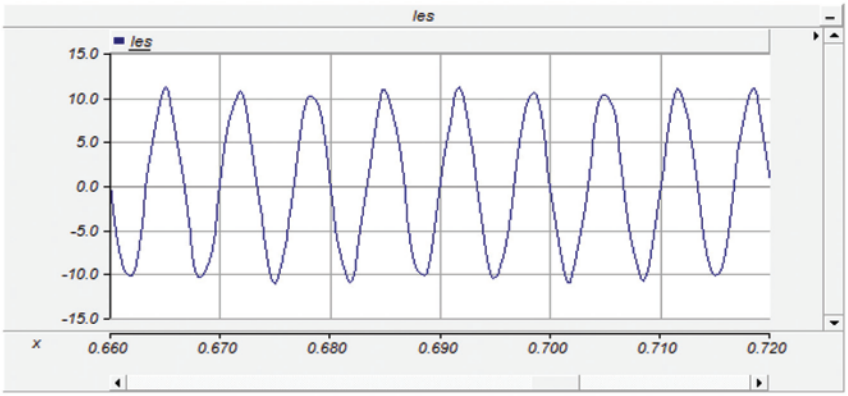

**شکل ۱۰: جریان خازن در حالت ستاره زمین شده**




**شکل ۱۱: جریان خازن در حالت مثلث با ظرفیت معادل حالت ستاره زمین شده**

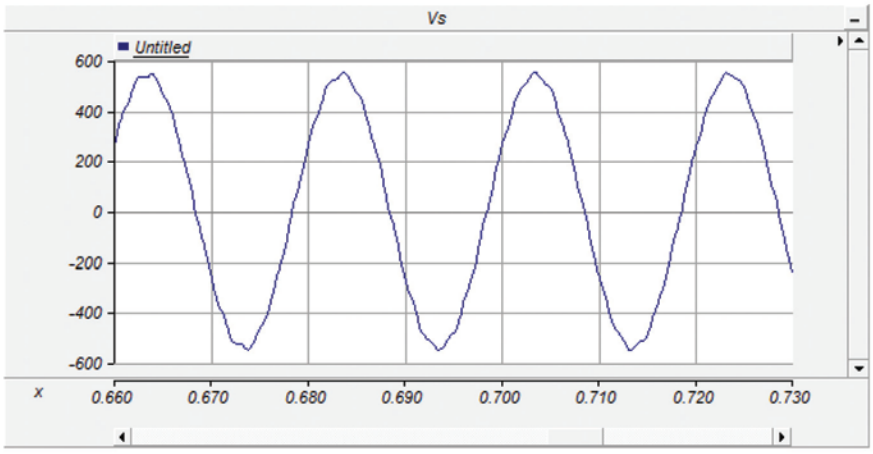



**شکل ۱۲: جریان نقطه صفر منابع تغذیه ( سیم نول شبکه ) در حالت خازن با اتصال ستاره زمین شده**

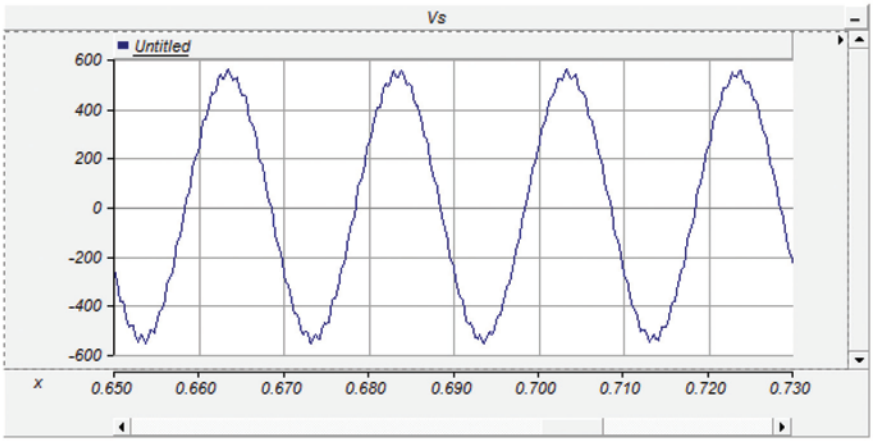



**شکل ۱۳: جریان نقطه صفر منابع تغذیه ( سیم نول شبکه ) در حالت خازن های مثلث**

**شکل ۱۴ و ۱۵ به ترتیب ولتاژ شبکه را در حالت اتصال ستاره زمین شده و مثلث مورد مقایسه قرار می‌دهد. از مقایسه کیفی ولتاژها می‌توان به این نتیجه رسید که آلودگی هارمونیکی ولتاژ در حالت مثلث بیشتر است. این امر منجر به افزایش ولتاژ فاز به فاز در دو سر بار به نزدیکی ۶۰۰ ولت گردیده و با تخریب عایقی خازن‌های جبران‌ساز، منجر به تخریب آنها می‌گردد. این در حالی است که دامنه ولتاژ در حالت ستاره زمین شده با انتقال مولفه‌های هارمونیکی به سمت زمین کاهش یافته و منجر به افزایش طول عمر خازن‌ها در بانک خازنی می‌گردد.**




**شکل ۱۴: ولتاژ فاز به فاز بار در حالت اتصال خازن به صورت ستاره زمین شده**




**شکل ۱۵: ولتاژ فاز به فاز بار در حالت اتصال خازن به صورت مثلث**

## بخش تجربی:

**۸- گروه فنی شرکت کویر تایر به منظور اصلاح بانک خازنی و ترمیم آن به دنبال راهکاری برای انتخاب جایگزین مناسب و بروز برای خازنهای شرکت بود طی همکاری صورت گرفته با این شرکت ، با عمکرد میکرو خازنها آشنا شده و پس از هماهنگی هـای به عمل آمده تست آزمایشی این نوع خازن بر روی یکی از الکترو موتورها در دستور کار قرار گرفت . طی مکاتبه با شرکت اروم نیرو توان ، یک دستگاه میکرو خازن به منظور تست اولیه در اختیار گروه فنی قرار گرفت و بر روی یک موتور ۵۰ کیلو واتی که قبض برق مستقلی داشت نصب و نتایج بدست آمده با پاورآنالیزور به شرح جدول زیر می باشد که عملکرد مثبت میکروخازن ها را اثبات می کند .**

| موتور ۵۰kw | KVARH | KWH | VOLTAG | CURRENT | KVAR | KW | KVA | PF |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| بدون میکروخازن | ۳.۴ | ۲.۳۳ | ۴۰۰ | ۸۹ | ۳۴.۲ | ۴۴.۹ | ۵۶.۳ | ۰.۷۹ |
| با میکرو خازن | ۱.۵ | ۲.۲۶ | ۴۰۲ | ۷۴ | ۱۴.۷ | ۴۴.۳ | ۴۶.۹ | ۰.۹۴ |
| درصد تغییرات | -٪۱۹.۵ | -٪۳ | ۰.۰۰۵ | -٪۱۵ | -٪۱۹.۵ | -٪۲ | -٪۱۷ | ۱۹٪ |

**جدول (۱)**

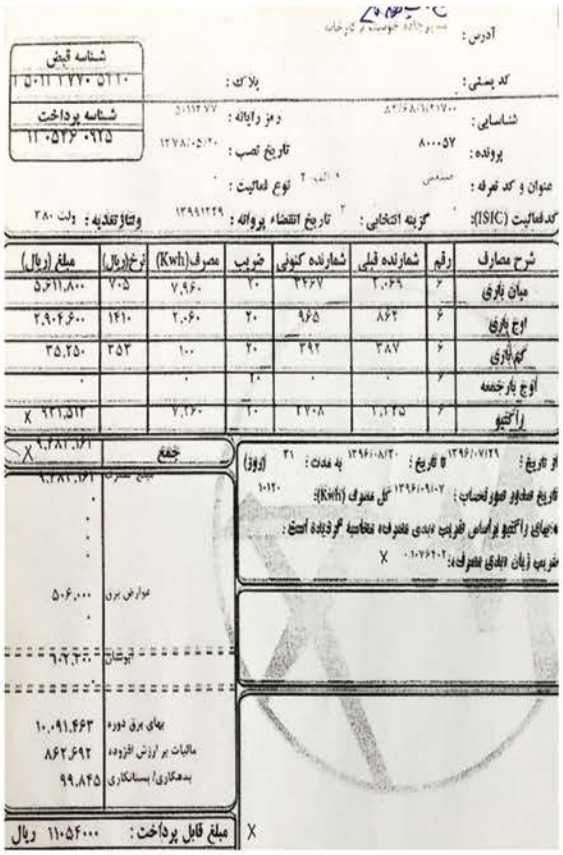
قبوض برقی که قبل و بعد از نصب دستگاه در دوره یک ماهه حاصل شد گویای نتایج مثبت در حذف بهای راکتیو، کاهش اتلاف انرژی و کاهش بهای پرداختی می باشد.

| | بهای راکتیو(ریال) | مبلغ قابل پرداخت(ریال) | ضریب بدی مصرف | جمع مصرف(kwh) |
|---|---|---|---|---|
| قبل از نصب | ۹۲۱۵۱۳ | ۱۱۰۵۴۰۰۰ | ۰.۱۰۷ | ۱۰۱۲۰ |
| بعد از نصب | ۰ | ۷۸۷۹۰۰۰ | ۰ | ۸۸۲۰ |
| تغییرات | ٪۱۰۰ | -۳۱۷۵۰۰۰ | ٪۱۰۰ | -۱۳۰۰ |

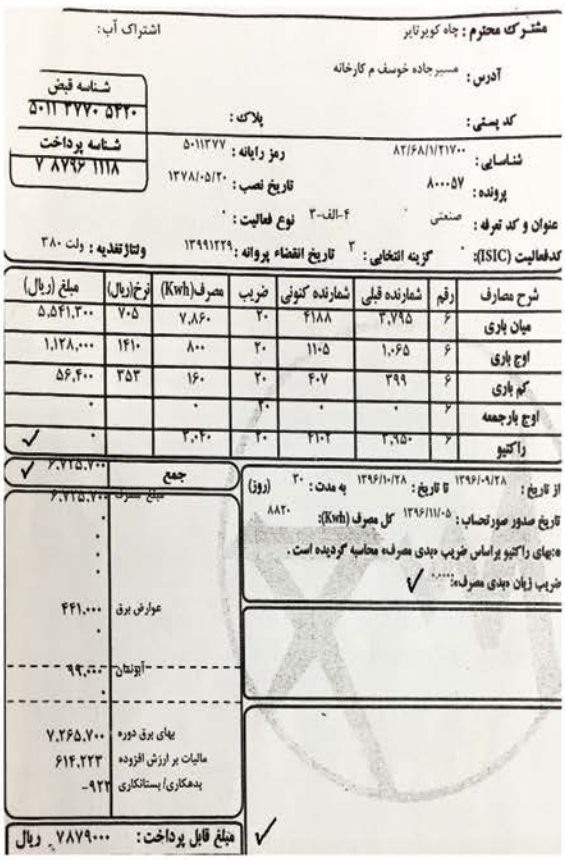
جدول (۲)

قبل از نصب میکروخازن خازنخازن

بعد از نصب میکروخازن



شکل (۴)



شکل(۵)

**یافته های تحقیق :**

**نتایج حاصل از نصب میکرو خازن بروی یک الکترو موتور ۵۰کیلو واتی نشان می دهد ، میکرو خازنها علاوه بر کاهش جریان اولیه موتور قادر اند بخشی از تلفات انرژی را نیز کاهش دهند می توان گفت موتور با جریان و ضربه کمتری راه اندازی شده است .**

**۱- موتور تا ۱۹.۵ درصد توان راکتیو کمتری مصرف کرده است**

**۲-موتور تا ۳ درصد اکتیو کمتری مصرف کرده است**

**۳- ضریب توان موتور ۱۹ درصد افزایش داشته است**

**۴- جریان موتور ۱۵ درصد کاهش داشته است**

**۵- کاهش تلفات کابل های شبکه توزیع به علت حذف بخشی از جریان مصرفی**

**۶- تصحیح ولتاژ**

**بحث و نتیجه گیری :**

**با اجرای طرح بهینه سازی توسط میکرو خازنها علاوه بر کاهش آمپر استارت اولیه موتور می توان بخشی از تلفات انرژی را نیز کاهش داد. در صنعت تایر سازی با توجه به ازدیاد ماشین آلات تایر سازی که مدام در حال استارت زدن هستند و با توجه به زمان نمونه گیری رگولاتورهای معمول در بانک های خازنی که حداقل ۲۰ و حداکثر ۴۵ ثانیه می باشد و زمان لازم جهت استارت و راه اندازی الکتروموتورهای با استارت ستاره که معمول ۶ تا ۸ ثانیه تعریف می گردد(به علت بالا بودن توان راه اندازی در ستاره و جهت جلوگیری از آسیب زیاد به سیم پیچی) بیشتر است ، عملا در بارهای با سوییچینگ بالا که در صنعت مذکور بسیار زیاد است بانک های خازنی معمول نمی تواند نقش موثری ایفا کند ، میکرو خازن ها امکان جبران سازی با تغیرات لحظه ای بار را داشته و ضمن بهینه سازی مصرف انرژی از افت ولتاژ ناشی از جریان لحظه ای نیز جلو گیری می کنند.**

**میکروخازن ها در برابر نوسانات ولتاژ و هارمونیک مقاوم بوده و با توجه به ازدیاد هارمونیک ها در صنعت سازگاری بسیار بالایی با تجهیزات صنعتی داشته و هزینه های تعمیر و نگهداری را به میزان قابل توجهی کاهش می دهد.**

**میکروخازن ها با امکان نصب پراکنده علاوه بر افزایش راندمان مصرف کننده منجر به آزادسازی ظرفیت هادی ها شده و ضمن کاهش تلفات از گرم شدن کابل ها جلوگیری نموده و در پی آن مانع ایجاد خسارات ناشی از ضعف عایقی کابل ها می شود.**

**مقالات مرتبط:**

**در زمینه جبران سازی توان راکتیو هیچ مورد مشابه داخلی و حتی خارجی وجود ندارد که از روش پیشنهادی در این دستگاه استفاده کرده باشد. مروری بر کارهای گذشته داخلی در زیر آورده شده است.**

**در تاریخ ۹۳/۶/۲ اختراع با عنوان "پیاده سازی همزمان نقطه توان ماکزیمم و جبرانساز" ثبت شده که فقط قابلیت شناسایی توان ماکزیمم را دارد.**

**در تاریخ ۹۳/۳/۱۷ اختراع با عنوان "طراحی و اجرای جبرانساز استاتیکی انعطاف پذیر" ثبت شده که از روش قدیمی خازن مثلث استفاده کرده و همانطور که پیشتر توضیح داده شد بازدهی خیلی کمتری دارند.**

**در تاریخ ۹۰/۱۰/۱۴ اختراع با عنوان "بانک خازنی و کسینوس فی متر هوشمند" ثبت شده است که باز از سیستمهای قدیمی خازنهای مثلثی استفاده کرده است.**